



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

# ELEKTRIAOTUSVÕRKUDE REAKTIIVVÕIMSUSE REGULEERIMISVÕIMALUSTE JA MÕJUDE ANALÜÜS

ANALYSIS OF REACTIVE POWER REGULATION OPTIONS AND THEIR  
INFLUENCE IN DISTRIBUTION NETWORKS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Karl Kürsa

Üliõpilaskood: 153406AAVM

Juhendaja: dotsent Jako Kilter

Tallinn, 2018 a.

(Tiitellehe pöördel)

## 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.

“.....” ..... 201.....

Autor: .....  
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendaja: .....  
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....  
/ nimi ja allkiri /

# Lõputöö kokkuvõte

*Autor:* Karl Kürsa

*Lõputöö liik:* Magistritöö

*Töö pealkiri:* Elektri jaotusvõrkude reaktiivvõimsuse reguleerimisvõimaluste ja mõjude analüüs

*Kuupäev:* 25.05.2018

85 lk

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendaja(d):* dotsent Jako Kilter

*Sisu kirjeldus:*

Lõputöö eesmärk oli hinnata jaotusvõrku liituvate tootmiseadmete reaktiivvõimsusega pingereguleerimise otstarbekus ühes keskpinge fiidris ning uurida kui suurt mõju omab see jaotusvõrgus.

Töö annab ülevaate elektrivõrkudes pingereguleerimiseks kasutatavatest seademetest ning võrgupinge olulisusest elektrisüsteemis. Pingemuutuste hindamiseks koostati hajaasustuse ja linnapiirkonna kohta võrguarvutustarkvaras mudelid ning hinnati nende põhjal pingemuutusi fiidril paiknevates alajaamades. Mudelid ning nendes kasutatud koormused ei põhine konkreetsetel võrgupiirkonnal. Stsenaariumitest saadud pingemuutused on koondatud joonistele ja tabelitesse ning mudelite pildid on lõputöö lisas. Lõputöö raames viidi läbi vestlused, mille tarbeks koostas lõputöö autor kümme küsimust, tootmiseadmete ja jaotusvõrguettevõtjate esindajatega, et teada saada turuosaliste arvamust tootmiseadmete reaktiivvõimsuse kasutamisest pingereguleerimiseks. Lühidalt on lõputöös välja toodud reaktiivvõimsuse tasustamise mehhanismid Eesti ja teiste riikide kohta.

Töö tulemuste põhjal on võrguettevõtjatel soovituslik määrata tootmiseadmetele maksimaalselt võimalik reaktiivvõimsuse genereerimise säte, mida jaotusvõrguettevõtjad saaksid kasutada elektrisüsteemis avariiolekordades. Reaktiivvõimsuse tasustamise mehhanismide välja töötamise eelduseks on konkurents ja tasu, mis tagaks tootjate osalemise võrguettevõtjatele reaktiivvõimsuse teenuse pakkumiseks.

*Märksõnad:* pingereguleerimine, reaktiivvõimsus, jaotusvõrguettevõtted, võrgueeskirjad, elektrivõrgud, keskpingevõrgud

# Summary of the Diploma Work

*Author:* Karl Kürsa

*Type of the work:* Master Thesis

*Title:* Analysis of reactive power regulation options and their influence in distribution networks

*Date:* 25.05.2018

85 pages

*University:* Tallinn University of Technology

School of Engineering

*Department:* Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

*Tutor(s) of the work:* Associate Professor Jako Kilter

*Abstract:*

The aim of this thesis was to analyse the effect and usefulness of regulating voltage in a medium voltage feeder with a generating unit connected to a distribution network.

The thesis also gives an overview of voltage regulating devices used in electrical networks and describes the purpose of system voltage. To evaluate any voltage changes with an added generating unit in rural and urban areas, models were generated with a grid planning and analysis software. Based on the models changes in voltage were evaluated in distribution network substations. Models and loads are not based on any specific areas. Results are brought forth in figures and tables, specific modelling results are visualised in the appendix. Interviews with distribution system operators and electricity production companies were also carried out to find out what are their thoughts and expectations on using small power plants reactive power capability to regulate voltage in distribution feeders. Thesis also discusses briefly how reactive power usage is compensated by system operators in Estonia and other countries.

Based on the results, the author of the thesis recommends distribution system operators to demand generating units to supply maximum reactive power capability if needed for example in case of a grid failure. A prerequisite for or the development of specific reactive power usage fees are competitiveness and motivating schemes. To develop specific reactive power usage fees there should be contest and motivating fees, which ensures and motivates power plants to bid reactive power capability for system operators.

*Keywords:* voltage regulation, reactive power, distribution system operators, grid codes, power grid, medium voltage

# Sisukord

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Lõputöö ülesanne</b> .....  | <b>6</b>  |
| <b>Eessõna</b> .....   | <b>8</b>  |
| <b>Sissejuhatus</b> .....  | <b>9</b>  |
| <b>1. Pinge reguleerimisest elektrisüsteemides</b> .....   | <b>11</b> |
| 1.1. Eesti elektrisüsteemis kasutatavad pinged .....   | 11        |
| 1.1.1 Toitepinge reguleerimine jaotusvõrgu tarbijatele .....   | 12        |
| 1.2. Võrgupinge stabiilsus ja reguleerimine .....  | 13        |
| 1.2.1 Reaktiivvõimsuse üldine käsitlus .....   | 14        |
| 1.3. Elektrivõrkudes pinge ja reaktiivvõimsuse reguleerimise tehnilised võimalused .....                                       | 15        |
| 1.3.1 Sünkroongeneraatoriga pinge reguleerimine .....  | 16        |
| 1.3.2 Reaktorite ja kondensaatorpatareide kasutamine elektrivõrkudes .....   | 16        |
| 1.3.3 Ülevaade sünkroonkompensaatorist .....   | 18        |
| 1.3.4 Jõuelektroonikal põhinevad reaktiivvõimsuse reguleerimisseadmed .....  | 19        |
| <b>2. Pinge reguleerimise nõuetest võrgueeskirjades ja reaktiivvõimsuse tasustamisest</b> .....                                | <b>22</b> |
| 2.1. Reaktiivvõimsuse kasutamise tasustamise üldpõhimõtted Eestis ja teistes riikides .....                                    | 25        |
| 2.2. Tootmiseadmete omanike ja jaotusvõrguettevõtjate arvamused reaktiivenergia kohta .....                                    | 27        |
| 2.2.1 Elektrihaamade esindajate nägemus reaktiivvõimsuse kasutamisest elektrivõrkudes pinge reguleerimiseks .....              | 27        |
| 2.2.2 Võrguettevõtjate esindajate nägemus reaktiivvõimsuse kasutamisest elektrivõrkudes pinge reguleerimiseks .....            | 30        |
| 2.2.3 Kokkuvõte ja järeldused turuosalistega läbi viidud vestluste põhjal .....  | 33        |
| <b>3. Tootmiseadmega pinge reguleerimine keskpingefiidris mudelite näitel</b> .....  | <b>35</b> |
| 3.1. Tootmiseadmega keskpingefiidri mudeli koostamine .....  | 35        |
| 3.2. Tootmiseadmega keskpinge pinge reguleerimine keskpingefiidris hajaasustusega piirkonnas .....                             | 37        |
| 3.3. Tootmiseadmega pinge reguleerimine keskpingefiidris linnapiirkonna näitel.....  | 43        |
| 3.4. Tootmiseadmega keskpingefiidris pinge reguleerimine äärmuslikes olukordades arvestades üleeuroopalisi võrgueeskirju ..... | 47        |
| 3.4.1 Hajaasustusega piirkonnas pinge muutused kahe tootmiseadmega arvestades RfG nõudeid .....                                | 49        |
| 3.4.2 Pinge muutused kahe tootmiseadmega linnapiirkonnas arvestades RfG nõudeid.....   | 51        |
| 3.4.3 Pinge muutused piirkonnaalajaamas erinevate stsenaariumite korral .....  | 54        |
| <b>Lõputöö kokkuvõte</b> .....   | <b>56</b> |
| <b>Lisad</b> .....   | <b>60</b> |
| L.1. Hajaasustusega piirkonna mudelite tulemused.....  | 60        |
| L.2. Linnapiirkonna mudelite tulemused .....   | 68        |
| L.3. Hajaasustusega piirkonna mudelid lubatud pingemiinimumi korral .....  | 73        |
| L.4. Hajaasustusega piirkonna mudelid lubatud pingemaksimumi korral .....  | 77        |
| L.5. Linnapiirkonna mudelid lubatud pingemiinimumi korral .....  | 79        |
| L.6. Linnapiirkonna mudelid lubatud pingemaksimumi korral .....  | 83        |

# Lõputöö ülesanne

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Lõputöö teema:                | <b>Elektrijaotusvõrkude<br/>reaktiivvõimsuse<br/>reguleerimisvõimaluste ja<br/>mõjude analüüs</b> |
| Üliõpilane:                   | <b>Karl Kürsa, 153406AAVM</b>   |
| Eriala:                       | <b>elektroenergeetika</b>   |
| Lõputöö liik:                 | <b>magistritöö</b>  |
| Lõputöö juhendaja:            | <b>dotsent Jako Kilter</b>  |
| Lõputöö ülesande kehtivusaeg: | <b>01.06.2018</b>   |
| Lõputöö esitamise tähtaeg:    | <b>25.05.2018</b>   |

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

## Teema põhjendus:

Võrguettevõtjad seisvad aasta aastalt üha enam probleemi ees, kus üksnes tarbimissuunaliseks ehitatud elektrivõrku liitub aina enam taastuvenegial põhinevaid elektrijaamu (hajatootjaid). Genereerivate allikate lisandumisega võrku peavad ka jaotusvõrguettevõtted arvestama üha enam, et pinge reguleerimise peab sekkuma juhtimiskeskus ning võrguettevõtted peavad tegema lisakulutusi ettenähtud pingeniivo tagamiseks nõutud piirides. Teema on oluline nii jaotusvõrguettevõtjatele kui ka ülekandevõrguettevõtjatele ja tootmisüksustega liitujatele. Samuti tuleb töö olulisus välja uuendatava võrgueeskirja kontekstis, kus on tarvis määratleda reaktiivvõimsuse reguleerimise piirid jaotusvõrkudesse ühendatud tootmiseseadmetele.

## Töö eesmärk:

Töö eesmärk on uurida jaotusvõrkudesse ühendatavate tootmiseseadmete reaktiivvõimsuse reguleerimise nõuete vajalikkust ja määratleda tehnilis-majandusliku analüüsi alusel võimalikud nõuded, kuidas Euroopa generaatorite võrgueeskirja nõudeid määratleda Eesti võrgueeskirja kontekstis.

## **Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

- Millised on elektri jaotusvõrkude pinge ja reaktiivvõimsuse reguleerimise tehnilised võimalused?
- Milline on optimaalseim viis reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks ja pinge juhtimiseks elektri jaotusvõrkudes?
- Mis motiveeriks tootmisseadme omanikke osutama jaotusvõrguettevõtjale pinge reguleerimise teenust?
- Eesti elektrisüsteemis reaktiivvõimsuse turu võimalikkus ja selle analüüs.
- Mil viisil peaks Eestis arvestama Euroopa generaatorite võrgueeskirja nõudeid elektri jaotusvõrkude pinge ja reaktiivvõimsuse reguleerimise kontekstis?

## **Lähteandmed:**

1. Kasutatakse jaotusvõrkude erinevaid tüüpeid võrguskeeme, mille abil modelleeritakse erinevaid võrgu olukordasid.
2. Tutvuda võrguettevõtete reaktiivenergia tasu arvestamise põhimõtetega.
3. Vestlused tootmisseadmete omanikega.
4. Teadusartiklid (IEEE Xplore ja ScienceDirect andmebaasid)

# Eessõna

Lõputöö koostamise idee tekkis käesoleva lõputöö autori huvist uurida elektrivõrkudes pingereguleerimise üldpõhimõtteid. Samuti on teema aktuaalne, kuna aasta-aastalt kasvavad Eesti jaotusvõrkudesse liitumised kuni 1 MW elektrijaamadega. Töö lõpliku teema ja uurimisülesande püstituse eest tänan lõputöö juhendajat dotsent Jako Kilterit, kes oli kogu lõputöö koostamise ajal konsultatsioonideks ja aruteluteks kättesaadav. Ühtlasi tänan Elektronergeetika ja mehhatroonika instituudi nooremteadureid Tanel Sarnetit ja Mari Löperit, kes andsid nõu mudelite koostamisel. Eraldi soovin tänada elektrijaamade ja jaotusvõrguettevõtete esinejaid, kes leidsid aja kohtumiseks ning olid nõus reaktiivvõimsuse teemadel vestlema ja mõtteid vahetama.

Lõputöö autor: Karl Kürsa

Kontakt: [karl.kursa@eesti.ee](mailto:karl.kursa@eesti.ee)



## Sissejuhatus

Tänane Eesti elektrisüsteem on rajatud teadmisel, et suurtest sünkroonmasinatega elektrijaamatest transporditakse elektrienergia ülekandeliinide abil piirkonna alajaamadest jaotusvõrku ning jaotusvõrk omakorda tagab elektrienergiaga varustamise tööstus-, põllumajandus ja kodutarbijatele. Seetõttu olid käesoleva kümnendi alguses elektrivõrkudes võrguplaneerimine ja juhtimise üldpõhimõtted selged ning arengud aimatavamad kui täna. Elektrivõrgu planeerijad said eeldada, et koormuste järjepideval kasvamisel mingis võrgupiirkonnas, tuleb seal lähiaastatel tugevdada ülekandeliine või vahetada alajaamas jõutrafo võimsamate vastu.

Viimasel viiel aastal on pidevalt hoogustunud taastuenergia põhinevate elektrijaamade, eriti päikeseelektrijaamade liitumine jaotusvõrku. Mõnes Eesti piirkonnas katavad võrku ühendatud tootmisüksused teatud tundidel kogu piirkonna elektrienergia vajaduse ning ülekandevõrgust ei ole vajadust edastada elektrienergiat tarbijateni ehk toimub lokaalne elektrienergia kasutamine.

Pidevalt jaotusvõrku liituvate hajatootjate tõttu peavad jaotusvõrguettevõtjad arvestama üha enam liituvate jaamade tehnilise võimekuse ja mõjuga konkreetsetes võrgupiirkonnas. Tulenevalt elektrijaamade tehnilisest võimekusest ja kehtivatest võrgueeskirja nõuetest peab jaotusvõrguettevõtja kontrollima, et võrku liituva tootmiseadme võimekust saaks kasutada võrgu juhtimiseks ja optimeerimiseks.

Töö autoril tekkis huvi, milline on jaotusvõrku liituvate elektrijaamade tehniline võimekus pinge juhtimiseks ja kas väikestes võrkudes oleks jaotusvõrguettevõtjatel mõistlik pinge juhtimise võimekust kasutada. Eeldades, et võrguettevõtjad kasutaksid tootmiseadme pingereguleerimise võimekust, siis tekkis huvi teada saada, milline on täna juba võrku liitunud tootjate nägemus reaktiivvõimsuse pakkumisest võrguettevõtjatele. Lisaks eeltoodule peab Eesti tuleval aastal võtma kasutusele ja rakendama kõikidele turuosalistele üleeuroopalisi võrgueeskirju, kus on sõnastatud selgemalt nõuded tootmiseadmetele pingereguleerimise kohta.

Käesoleva lõputöö esmane eesmärk on uurida jaotusvõrku liitunud tootmiseadmetega kuni 1 MW elektrijaamade reaktiivvõimsuse reguleerimise kasutamise otstarbekust ja kontrollida võrguarvutustarkvaraga *PowerWorld Simulator* tootmiseadmete mõju keskpingefiidrites.

Töö lisaeesmärk on anda esmane hinnang ja soovitused jaotusvõrgu ettevõtetele, milline oleks otstarbekaim viis pinget reguleerida, võttes arvesse regulatiivset poolt. Lahenduse peavad saama küsimused: kas jaotusvõrku ühendatud elektrijaamasid oleks otstarbekas kasutada pinge reguleerimiseks ning kuidas saaks elektrijaamade omanikke motiveerida pakkuma reaktiivenergia teenust võrguettevõtjatele. Võib eeldada, et jaotusvõrgus tootmiseadmega pinge juhtimisel on mõju, mida võiksid jaotusvõrguettevõtjad kasutama hakata.

Lõputöö esimene osa annab ülevaate pinge reguleerimise üldistest põhimõtetest ning ülevaate seadmetest, millega on võimalik pinget elektrisüsteemides reguleerida. Lisaks kirjeldatakse võrkudes kasutusel olevate tootmiseadmete pinge reguleerimise võimekust.

Teises osas uuritakse, kuidas võiks toimuda elektrienergia tootjatele reaktiivvõimsuse tasustamine ning millised on tasustamise põhimõtted mujal maailmas. Lisaks küsitakse erinevate Eesti tootmiseadmete omanike ja jaotusvõrguettevõtjate esindajate nägemust võrku sünkroniseeritud tootmiseadmetega pinge reguleerimise teenuse otstarbekuse kohta. Samuti uuritakse, milline tasustamise mehhanism motiveeriks elektrijaamu pakkuma pingereguleerimise teenust. Lõputöö viimases osas modelleeritaks erinevaid võrgu talituse stsenaariume ning analüüsitakse pinge muutumisi erinevate võrguparameetrite ja pinge juhtimiste korral.

# 1. Pinge reguleerimisest elektrisüsteemides

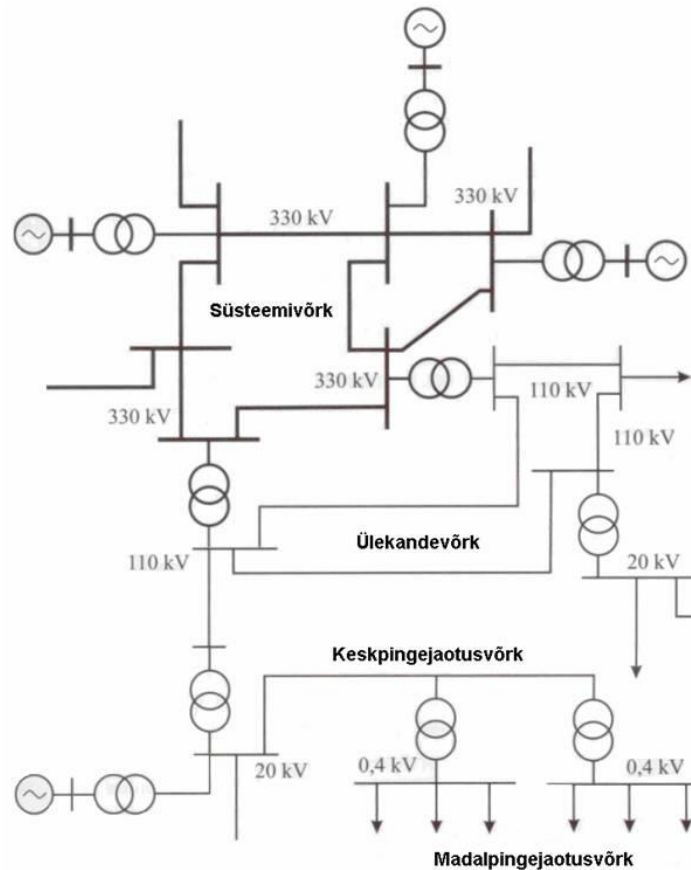
## 1.1. Eesti elektrisüsteemis kasutatavad pinged

Elektrisüsteem on terviklik seadmete kogum, mis koosneb elektrijaamadest, ülekandevõrgust ja tarbijatest ning elektrisüsteemi põhifunktsioon on tagada lõpptarbijatele kvaliteetne elektrienergia. Elektrisüsteemi selgrooks on elektrivõrk, mida defineeritakse erialakirjanduses kui elektrienergia edastamiseks ja jaotamiseks vajalikku seadmete ning rajatiste süsteemi. Seega on elektrivõrk vajalik peamiselt lõpptarbijate jaoks, keda võrku omavad ettevõtted ehk võrguettevõtjad varustavad elektrienergiaga [1]. Ühtlasi vastutavad võrguettevõtjad võrgu juhtimise ja töökindluse eest. Elektrivõrgud koosnevad peamiselt erinevat tüüpi alajaamadest ning seal paiknevatest seadmetest ja elektriliinidest (õhu- ja kaabelliinidest). [2]

Elektrivõrgu suuruse ja tehniliste lahenduste keerukuste tõttu on elektrivõrke kõige otstarbekam klassifitseerida erinevate pingestastmega, millest lihtsaim on elektrivõrkude eristamine kõrgepinge- ja madalpingevõrguks. Pinget, mille faasidevaheline nimivahelduvpinge on üle 1000 V nimetakse kõrgepingeks, kuid pinget, mis jääb alla 40 kV on liigitatud ka keskipingeks. Alla 1 kV pinget nimetakse madalpingeks. [2]

Kõrgepingevõrkude ülesanne on eelkõige elektrienergia transportimine üle suurte vahemaade, näiteks elektrijaamadest suuremate alajaamadeni ehk tarbijate võrgupiirkondadesse või teistesse elektrijaamadesse. Kõrgepingevõrke kasutatakse lisaks riikidevahelisteks võimsusvoogude edastamiseks, Eesti puhul näiteks Soomest Lähti ja vastupidi. Eestis opereerib kõrgepingega 110 kV ja 330 kV põhivõrguettevõtja Elering AS, millele riik on andnud süsteemihalduri kohustused.[3]

Elektrienergia jaotamine ja edastamine tarbimispiirkondadest lõpptarbijateni on jaotusvõrguettevõtjate peamine tegevusala. Eesti jaotusvõrguettevõtjad kasutavad keskipingevõrke, mille nimipinged on vahemikus 6-35 kV ja madalpingevõrke, kus faasidevaheline pinge on 0,4 kV [1]. Sellistes madalpingevõrkudes ei ole elektrienergia edastamine tarbijatele, kes asuvad jõutrafost üle 0,5 km eemal enam otstarbekas. Pingeklasside jaotumine Eesti elektrisüsteemis on kirjeldatud joonisel 1.1.[2]



**Joonis 1.1 Eesti elektrisüsteemi pingestmete jaotumine pingestme järgi [2]**

### 1.1.1 Toitepinge reguleerimine jaotusvõrgu tarbijatele

Jaotusvõrguettevõtete ülesanne on tagada oma tarbijatele liitumispunktis standardkohane pinge, lubatud amperaaž ehk peakaitsme nimivool, hoida võrgukaod minimaalsed ja tagada elektrivõrgu töökindlus, vähendades iga-aastaselt riketest põhjustatud katkestuste arvu ja nende kestvusust. Pinge optimaalne ja õige reguleerimine on otseselt seotud jaotusvõrgu talitusega, kuna võrgukaod on pöördvõrdelised pinge ruuduga ehk võrgukaod on minimaalsed kõrgematel pingetel [1]. Jaotusvõrgus on kõige lihtsam ja operatiivsem reguleerida pinget toitealajaamadesse paigaldatud jõutrafoaste astmelülititega, kus astme muutmisel muutub jõutrafo mähiste takistus ja seeläbi suureneb või väheneb jõutrafos sekundaarpinge. Üldiselt reguleeritakse jaotusvõrgus pingeid fiidrite kaupa ja seega on otstarbekas kõrgematel koormustel hoida toitealajaama lattidel kõrgemat pinget kui koormused on suured ja vastupidi. Suurtes toitealajaamades kasutatakse jõutrafosid primaarpingega 115 kV, mis on koormuse all reguleeritavad ja mille reguleerimisvahemik on  $\pm 9 \times 1,78 \%$ . Jaotusalajaamades paiknevad trafosid koormuse all reguleerida ei saa,

selleks tuleb jõutrafo taga olevad fiidrid tööst välja viia. Jaotusalajaamades on jõutrafo del ka vähem reguleeritavaid astmeid, üldjuhul kuni viis astet sammuga  $\pm 2 \times 2,5\%$ . [4]

Kõik elektrivõrguga ühendatavad elektriseadmed on projekteeritud töötama kõige efektiivsemalt ehk suurima võimsuse ja kasuteguriga oma nimipingel. Juhul kui toitepinge on üle nimipingega, suureneb seadme energiatarve ja väheneb tööiga. Elektriseadmetele on tehniliselt parim pinge, kus keskmine pingeniivo on nimipingega võrdne või veidi madalam. Elektriseadmete pingeniivo ülemine väärtus võiks olla kuni 2% üle nimipingega ehk kuni 235 V ja pinge alumine väärtus ei tohiks olla madalam kuni 4% nimipingest ehk kuni 221 V. [5] Teisalt on osaliselt tarbijatel veel elektriseadmeid, mis on projekteeritud vana standardi kohase 380/220 V nimipingega ehk madalama pingega kui kaasaegsed elektriseadmed. Lähtuvalt sellest on toitepinge määramisel olulisim ja tehniliselt keerukam ülesanne valida igale pingeastmel optimaalne pingeniivo. [5] Toitepinge õige reguleerimine nii jaotusvõrkudes kui ka tarbijate madalpinge elektrisüsteemides koos reaktiivvõimsuse kompensatsiooniga aitavad optimeerida lisaks elektritarbimist. Seega on oluline arvestada, et reaktiivvõimsuse kompenseerimine mõjutab otseselt süsteemi toitepinget. Eestis kehtiva standardi kohaselt peab pinge madalpinge tarbijatel olema 100% ajast vahemikus 230 V  $\pm 10\%$  kuni  $-15\%$  ehk vahemikus 196-253 V ja 95% ajast olema vahemikus 230 V  $\pm 10\%$  ehk 207-253 V. [5]

## 1.2. Võrgupinge stabiilsus ja reguleerimine

Elektrivõrkude stabiilsust hinnatakse sageduse ja pinge stabiilsuse järgi. Sageduse stabiilsust näitab elektrisüsteemis võrgusagedus, mis peab ühes sünkroonallas olema alati nõutud piirides. Võrgusageduse järgi saab hinnata, kas elektrienergia genereerimine ja tarbimine on igal ajahetkel süsteemis tasakaalus. Elektrisüsteemides võrgupinge hoidmist teatud piirides nimetakse pinge stabiilsuseks, mis on seotud aktiiv- ja reaktiivvõimsuse omavahelise tasakaalu leidmisega. Seega tekib reaktiivvõimsusvoo muutus juhul, kui süsteemis koormuse või ülekantava võimsuse kasv muutub kiiresti, mistõttu aktiivvõimsuse jaotamise tõttu olenevalt võrgu konfiguratsioonist võib pinge muutuda väga suurtes piirides. [6]

Elektrisüsteemis saab pinget juhtida reaktiivvõimsusvoo muutmisega ja seega peab elektrisüsteemis talitlema erinevaid reaktiivvõimsuse allikaid ja pinge reguleerimise seadmeid. Reaktiivvõimsuse kompenseerimise seadmed tarbivad või genereerivad elektrivõrku täiendavat reaktiivvõimsust ehk kompenseerivad reaktiivvõimsust. Allikaid, mis tekitavad elektrivõrkudesse kunstlikult reaktiivvõimsust nimetakse

kompenseerimisseadmeteks [1]. Kõige operatiivsem on elektrisüsteemis pinget reguleerida ning tagada pinge kvaliteeti ja stabiilsust elektrivõrgus paiknevate elektrienergiat genereerivaid allikate ehk tootmiseseadmetega. Enim kasutatakse võrgus elektrijaamasid, milles elektrienergiat genereeritakse sünkroonmootoriga. Sünkroongeneraatorid suudavad nii elektrivõrku genereerida kui ka reaktiivvõimsust tarbida, mis saavutatakse masina ergutusvoolu muutmisega. Tehnilise poole pealt piiravad sünkroongeneraatorite reaktiivvõimsuse võimekust ergutusvool ja staatorivool ning masina staatori ja rootori mähiste voolud. Võrgu koormuste järsul muutumisel või lühiste korral tekivad järsud pinge muutused, mis mõjutavad elektrivõrgu stabiilsust ning käideldavust. [7]

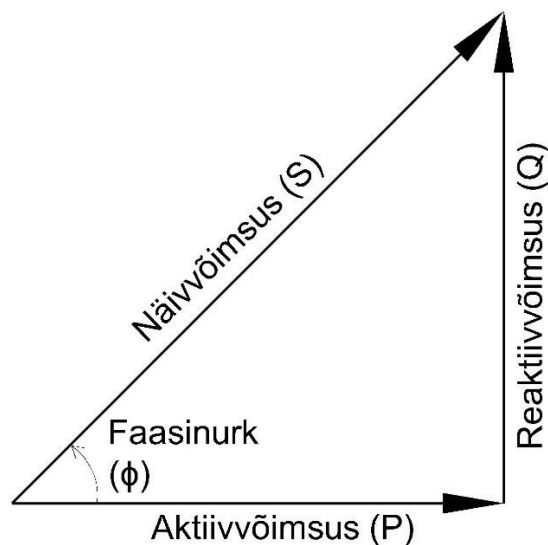
Võrguettevõtjatel lasub kohustus ennetada arvariidest põhjustatud pingelohkude ja katkestuste mõju tarbijatele. Peamised võimalused selliste mõjude vähendamiseks on keskpingevõrkudes neutraali maandamine läbi kaarekustutuspooli, fiidrites optimaalse võrguskeemi kasutamine, paljasjuhtmete asendamine isoleeritud juhtmetega, releekaitseadmetega selektiivsuse tagamine ja kompenseerimisseadmete kasutamine. Olukorda elektrisüsteemis, kus pinge alaneb suurtes piirides nii, et see ei taastu nõutud piiridesse nimetakse pingekollapsiks [6]. Pingekollapsid on elektrisüsteemile kõige ohtlikumad, kuna neid on praktiliselt võimatu ette näha ning nende mõju võib väga kiiresti viia kogu süsteemi kustumisele. Põhja-Ameerikas 2003. aasta augustis aset leidnud elektrisüsteemi kustumine algas pinge stabiilsuse probleemidest, mille lõpptulemuse jäi elektrienergiata umbes 55 miljonit tarbijat. [2][6]

### **1.2.1 Reaktiivvõimsuse üldine käsitlus**

Elektrisüsteemides kasutatakse elektrienergia ülekandmiseks vahelduvpinget ja -voolu ning seda kadude vähendamiseks. Vahelduvpinge ja -voolu eripäraks on siinuseline ehk perioodiline muutus, mis tingib elektrienergia ülekandmiseks ja muundamiseks vajaliku elektri- ja magnetväljaahelad. Elektrivõrkudes iseloomustatakse elektritarvitite koguvõimsust mõistega näivvõimsus (S), ühik megavoltamprit (MVA). Näivvõimsus on aktiiv- ja reaktiivvõimsuse geomeetriline summa ehk vektoriaalne suurus. Aktiivvõimsust (P) iseloomustatakse võimsusühikuga vatt (W), mis on reaalne võimsus, mida saab muuta vajadusel kasulikuks tööks. Vahelduvvoolu võrkudes tekkiv reaktiivvõimsus (Q) iseloomustabki kiirust, millega elektrienergiat salvestatakse kondensaatori elektrivälja ning induktiivpooli magnetvälja. Tihti nimetakse reaktiivvõimsust n.ö kasutuks võimsuseks, kuna

see põhjustab kadusid ja vähendab seadme võimalikku aktiivvõimsust. Teisalt on reaktiivvõimsus oluline elektrienergia ülekandmisel ja pinge reguleerimisel. [8]

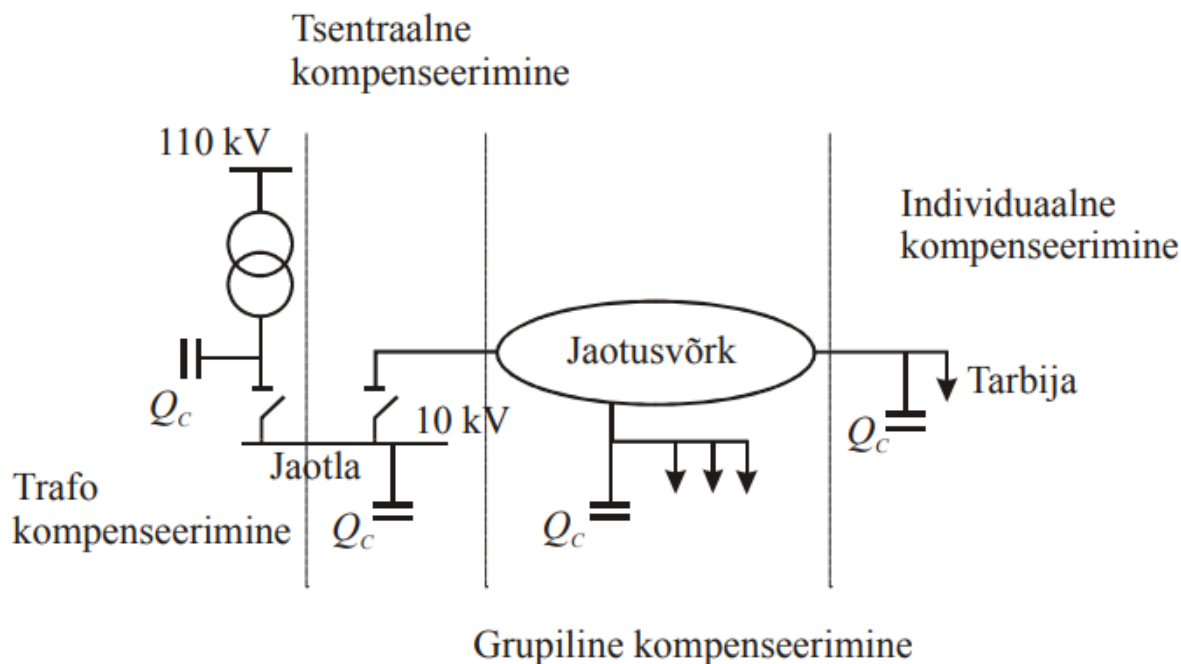
Aktiiv-, reaktiiv- ja näivvõimsuse vahelisi seoseid kirjeldatakse läbi täisnurkse kolmnurga, mida elektrotehnikas nimetakse võimsuste kolmnurgaks, kus x-teljega paralleelne olev kaatet iseloomustab aktiivvõimsust vektorina ja sellega risti olev kaatet reaktiivvõimsust vektorina. Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse vektoriaalne summa on seega vastavalt näivvõimsus. Tulenevalt geomeetria reeglitest iseloomustab võimuste kolmnurgas  $\cos \varphi$  aktiivvõimsuse ja näivvõimsuse suhet, kuid nurga suurus oleneb reaktiivvõimsuse vektori pikkusest. Võimsuste kolmnurga näidis on joonisel 1.2. [9]



*Joonis 1.2 Võimsuste kolmnurk [10]*

### **1.3. Elektrivõrkudes pinge ja reaktiivvõimsuse reguleerimise tehnilised võimalused**

Erinevalt aktiivvõimsusest ei ole reaktiivvõimsust kasulik üle pikkade vahemaad transportida. Seega on otstarbekam reaktiivvõimsust kompenseerida lokaalselt ja võimalikult lähedal reaktiivenergiat genereerivale allikale. Sõltuvalt reaktiivvõimsuse vajadusest eristatakse reaktiivvõimsuse kompenseerimist jaotusvõrgus järgnevalt: trafode, tsentraliseeritud, individuaalne ja seadmete grupikompenseerimine. Reaktiivvõimsuse kompenseerimise liigid on joonisel 1.3.



*Joonis 1.3 Jaotusvõrgu reaktiivvõimsuse kompenseerimise liigid [2]*

### 1.3.1 Sünkroongeneraatoriga pinge reguleerimine

Reaktiivvõimsust on kõige optimaalsem ja operatiivsem juhtida võrgus asuvate sünkroonjaamadega. Sünkroongeneraatori puhul saab reaktiivvõimsust muuta generaatori ergutust muutes. Juhul kui võrk vajab induktiivse iseloomuga reaktiivvõimsust, tuleb sünkroongeneraatorit üleergutada, mis tähendab, et elektromotoorjõud ületab klemmipinget  $E > U$  ja alaergutuse korral elektrimasin tarbib reaktiivvõimsust  $E < U$ . Sünkroonmootorid suudavad nii võrku genereerida kui ka tarbida reaktiivvõimust, mida tehakse sünkroongeneraatori ergutuse muutmisega. Sünkroongeneraatorites piirab reaktiivvõimekust ergutusvool ja staatori vool ning masina kütte piirid. Võrgu koormuste järsul muutumisel või lühiste korral tekivad järsud pinge muutused, mis mõjutavad elektrivõrgu stabiilsust ning käideldavust. [7][8]

### 1.3.2 Reaktorite ja kondensaatorpatareide kasutamine elektrivõrkudes

Elektrivõrkudes kasutatakse teatud sõlmedes veel piki- ja põikreaktoreid pinge reguleerimiseks. Kui reaktor lülitakse piki liine, väheneb liinis võimsusvoog ja ühtlasi piiratakse lühisvoole. Sageli kasutatakse pikireaktori kasutamise kohta mõistet lühisvoolu piirav reaktor. Süsteemides tekkiva üleliigse reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks kasutatakse põikreaktoreid, et vähendada alajaamas väikestel koormustel õhuliinide poolt

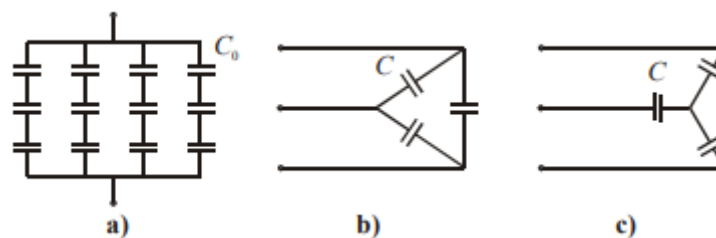


genereeritud mahtuvuslikke reaktiivvõimsusi. Reaktori poolt tarbitava reaktiivvõimsuse määrab reaktori induktiivjuhtivus  $B_R$  ja pinge  $U$ .

$$Q_r = B_r \cdot U^2 \quad (1.1)$$

Põikreaktori põhipuuduseks on selle kindel võimsus ja asjaolu, et võimsust saab reguleerida ainult astmeliselt, näiteks 15 Mvar reaktorit sammudega 5, 10 ja 15 MVar. Põikreaktorid ühendatakse autotrafo kolmanda mähise keskpinge poolele. Kasutatakse ka automaatselt reguleeritavaid reaktoreid (*shunt reactor*), milles on võimalik reaktiivvõimsuse voogu sujuvamalt juhtida.[11]

Kondensaatorpatareid toetavad vajadusel seadmeid või jaotusvõrku täiendava reaktiivvõimsusega, kuna reaktiivvõimsust pole otstarbekas elektrivõrgus edastada, sest reaktiivvõimsus põhjustab võrgus kadusid ja halvendab pinge kvaliteeti. Kondensaatorpatareid kasutatakse samuti nii piki- kui põiklülitustes. Lülitades kondensaatoreid piki liini, vähendab see õhuliini elektrilist pikkust ehk reaktiivtakistust, mis tõstab liinides pinget. Põiklülitusega kondensaatorpatareid kasutavad peamiselt tarbijad oma seadmete juures, näiteks elektrimootorites ja trafodes vajamineva reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks ehk reaktiivi tekitamiseks oma paigaldises elektriseadmete jaoks. Kondensaatorpatareid koostatakse omavahel rööbiti ja jadamisi ühendavatest kondensaatorelementidest. Jadamisi ühendatud kondensaatorpatareid tõstavad tööpinget ja rööbiti ühendatud patareid talitusvoolu. Kondensaatorite ühendamine on näidatud ka joonisel 1.4. Kondensaatorpatareiga pinge reguleerimise puuduseks on fikseeritud võimsus ning võimsuste muutmine astmeliselt.[7][11] Joonisel 1.5 on pilt Eleringi Harku alajaamas kasutusel olevast kondensaatorpatareist.



**Joonis 1.4 Kondensaatorite ühendamisskeemid: ühe kondensaatorpatarei kondensaatorite jada- ja rööpühendused (a), kolmefaasilise kondensaatorpatarei kolmnurkühendus (b) ja tähtühendus (c) [11]**



*Joonis 1.5 Harku alajaamas kasutusel olev 30 Mvar kondensaatorpatarei*

### 1.3.3 Ülevaade sünkroonkompensaatorist

Sünkroonkompensaator on elektrimasin, millel puudub aktiivkoormus ja seda kasutatakse ainult reaktiivvõimsuse ja pinge reguleerimiseks. Peamiselt on mõeldud sünkroonkompensaator kasutamiseks piirkondades, mis paiknevad väga kaugel tootmisest ja/või sõlmajaamades ning kus pinge järsud muutused põhjustavad otseselt mõju tarbijatele. Enamasti talitlevad kompensaatorid nimipingel 24 kV. Sünkroonkompensaatori tööpõhimõte on sarnane elektrijaamades asuvate generaatoritega, kuna ergutusvoolu muutus tingib väljastava elektromotoorjõu muutuse [7]. Sünkroonkompensaatori vool  $I$  on määratud järgmise valemiga, kus  $E$  on elektromotoorjõud ja  $x$  on reaktiivtakistus:

$$I = \frac{E - U}{\sqrt{3} \cdot X} \quad (1.2)$$

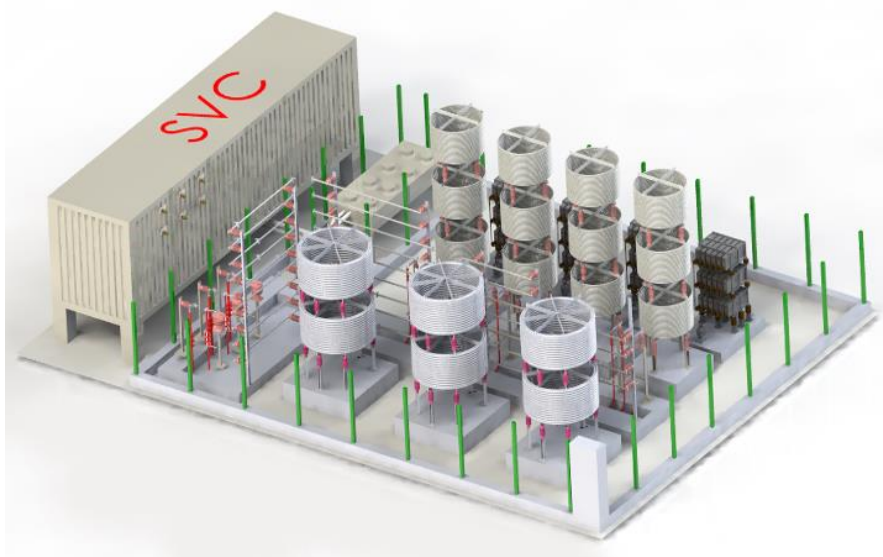
Valemist järeldub, et sünkroonkompensaatori voolu mõjutab elektrimootorjõu ja klemmipinge vahe. Kui  $E > U$  siis talitleb kompensaator üleergutatult ja genereeritav reaktiivvõimsus on positiivne, mis tähendab, et võimsus liigub võrgu suunas. Vastupidisel olukorral kui  $E < U$  on tegemist alaergutusega ning sünkroonkompensaator tarbib võrgust reaktiivvõimsust. Sünkroonkompensaatori eeliseks on sujuv reguleerimine, kuid puudusteks on kallis soetusmaksumus, kõrged hooldus- ja käidukulud. Sünkroonkompensaatoreid

eeltoodud põhjustel pinge reguleerimiseks enam ei paigaldata, kuigi nad on väga efektiivsed.[11]

### 1.3.4 Jõuelektronikal põhinevad reaktiivvõimsuse reguleerimisseadmed

Suuremates elektrisüsteemides on üha enam kasutusele võetud jõuelektronikal põhinevad reaktiivvõimsust reguleerivad seadmed, alljärgnevalt on kirjeldatud neist SVC (Static Var Compensator) ja STATCOM.[11]

Kuna reaktoreid ja kondensaatorpatareisid saab reguleerida üksnes astmete kaupa ning astmelised lülitused genereerivad võrku harmoonikuid, on reaktiivvõimsuse sujuvaks reguleerimiseks kasutusele võetud staatiline reaktiivvõimsuse kompensaator ehk SVC. Staatiline reaktiivvõimsuse kompensaator koosneb reaktorist, kondensaatorpatareist ja lülitus- ning reguleerimise seadmetest, mis enamasti põhinevad jõuelektronikal. SVC kontrollerid juhivad nii seadme reaktoreid kui kondensaatoreid, kus reaktoreid juhitakse türistorreguleerimisega ja kondensaatoreid türistorlülitamisega. Türistorlülitused ja -reguleerimine tagab reaktiivvõimsuse väga sujuva reguleerimise ja lisaks on need kiiretoimelisemad kui reaktorid ja kondensaatorpatareid. SVC saab lisaks kasutada jaotusvõrkudes asümmeetriliste koormuste tasakaalustamiseks ja pinge kõikumiste vähendamiseks.[7][11] Alajaamadesse paigaldatava staatilise reaktiivvõimsuse kompensaatori näidis on toodud joonisel 1.6.



*Joonis 1.6 Staatilise reaktiivvõimsuse kompensaatori näidis [24]*

Suurtes süsteemides, kus on vaja pinget juhtida sujuvalt ja kiiresti, on kasutusele võetud pinge reguleerimiseks seade STATCOM (Static Synchronous Compensator), mis kasutab pinge reguleerimiseks täielikult üksnes jõuelektroonikat. STATCOM koosneb kondensaatorist, mis on seadmes n.ö alalisvoolu allikaks, mida lülitatakse GTO (*gate turn-off*) konverteri abil võrku. Juhul kui pinge konverteris on suurem kui võrgus, tarbib seade mahtuvuslikku voolu ja vastupidisel korral induktiivset voolukomponenti. STATCOMi eeliseks on stabiilsus erinevate võrguhäiringute korral, lisaks saab nimetatud seadmega pinget reguleerida väga kiiresti ja väikeses reguleerimisvahemikus. STATCOMe kasutakse peamiselt suurtes elektrisõlmedes, kus järsud pinge muutused võivad viia pinge kollapsini. Ühtlasi puuduvad STATCOMiga pinge reguleerimisel võimsuslülititega lülitamised, mistõttu ei genereerita võrku nii suures koguses harmoonikuid ja transiente. Hetkel on selliste seadmete puuduseks kõrge hind. [11] [12]

Enam kasutatvate pinge reguleerimis seadmete tehniline võrdlus on välja toodud tabelis 1.1.

**Tabel 1.1 Reaktiivvõimsus kompenseerimisseadmete tehniline võrdlus [23]**

| <b>Reaktiivvõimsuse seade</b>    | <b>Reaktorid/kondensaator-Patareid</b>  | <b>Sünkroonkompensaator</b>   | <b>SVC</b>  | <b>STATCOM</b>  |
|----------------------------------|---|---|---|---|
| <b>Reguleerimiskiirus</b>        | >70 ms  | < 10 ms   | 20-30 ms  | <10 ms  |
| <b>Tehniliselt head omadused</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Võrdlemisi väikesed kulutused hooldusele ja soetusele</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Võimaldab reaktiivvõimsuse sujuvat reguleerimist</li> <li>• On komplektne masin, mis on võimeline reaktiivvõimsust nii tarbima kui võrku genereerima.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Võimeldab reaktiivvõimsust väga sujuvalt tarbima või väljastama</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Võimaldab reaktiivvõimsust väga sujuvalt juhtida</li> <li>• Ei genereeri võrku pinget ja voolu harmoonikuid</li> </ul> |
| <b>Puudused</b>                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reguleerimiseks fikseeritud samm,</li> <li>• On vaja Q+ ja Q- kahte eraldi seadet ja lülitusaparatuuri, võrku lülitamine põhjustab võrgus harmoonilisi.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Põhjustab tühijooksukadusid</li> <li>• Suured hooldus- ja käidukulud.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tekitab võrku pinget ja voolu harmoonikuid.</li> </ul>                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kallis soetusmaksumus</li> </ul>   |

## 2. Pinge reguleerimise nõuetest võrgueeskirjades ja reaktiivvõimsuse tasustamisest

Kõik elektrijaamad, mis ühendatakse ja sünkroniseeritakse elektrisüsteemidesse, peavad vastama konkreetsetele eeskirjadele, mis tagaksid elektrisüsteemi stabiilsuse ja tootmiseadmete juhtimise üldpõhimõtted. Vastavad reeglid määratakse hetkel riikliku võrgueeskirjaga (*grid code*), mis määrab seadusandlikul tasemel kohustused ja ülesanded elektrienergia tootjatele, süsteemihaldurile, võrguettevõtjale ja elektrijaamadele. Eeskirja eesmärk on tagada, et võrku liituvad tootmiseadmed töotaksid süsteemi jaoks ohutult, korrektselt ja et nende töö oleks korrektne nii normaal- kui avariiolektoos. Näiteks on Eestis kehtivas võrgueeskirjas (edaspidi viidatakse töös dokumendile kui võrgueeskiri) selgitatud mõisteid, nõudeid varustuskindlusele, määratud vastavalt tootmiseadme tüübile ja nimiaktiivvõimsusele tema tehniline võimekus, kirjeldatud tootmiseadmete liitumise üldpõhimõtted, koostatud reegleid bilansienergia kasutamise ja elektrienergia koguste mõõtmise kohta.[13] Olenevalt riigist ja süsteemi suuruselt erinevad võrgueeskirjas olevad nõuded ja detailsus, näiteks on Suurbritannia võrgueeskiri ligi 800 lehekülge ja täpse reeglistikuga [14].

Eestis hetkel kehtiv võrgueeskiri defineerib tootmiseadmeid sünkroongeneraatoriteks, asünkroongeneraatoriteks, tuuleparkideks ja päikeseelektrijaamadeks. Lisaks rühmitatakse elektrijaamasid nimiaktiivvõimsuse järgi järgnevalt: kuni 15 kW, kuni 200 kW, kuni 1 MW ja üle 5 MW elektrijaamad [13]. Järgmise aasta aprilliks rakendatakse Eestis nagu ka teistes Euroopa Liidu riikides üleeuroopalised võrguühenduste eeskirjad, mille alamdokumendiks on elektrienergia tootmiseadmete võrku ühendamise nõuete võrgueeskiri ehk RfG (*Requirements for Generators*) (edaspidi töös viidatakse sellele dokumendile RfG). RfG jõustus Euroopa Liidus 17.05.2016 ning määruse eesmärk on reguleerida tootmiseadmete ühtseid nõudeid kogu Euroopa Liidus [15]. Tasub rõhutada, et RfG-st tulenevaid nõudeid rakendatakse ainult uutele tootmiseadmetele.

RfG eristab tootmiseadmeid sünkroon- ja energiapargimoodulitena. Lisaks rühmitatakse tootmismoodulid võimsuste ja liitumispunkti pinge järgi nelja kategooriasse, vastavalt A-tüüpi, B-tüüpi, C-tüüpi ja D-tüüpi tootmiseadmeks.[16] A-tüüpi tootmismoodulid on võimsusega 0,8 kW kuni 0,5 MW ning liitumispunkti pinge alla 110 kV. Ülejäänud Balti

energiasüsteemis liituvate tootmismoodulite võimsuspiiride koha on RfG-s tehtud järgnev rühmitamise ettepanek:

- B-tüüp-alates võimsusest 0,5 MW ja liitumispunkt alla 110 kV,
- C-tüüp-alates nimivõimsusest 10 MW ja liitumispunkti pinge alla 110 kV ning
- D-tüüpi siis kui liitumispunkti pinge on üle 110 kV või nimiaktiivvõimsus on üle 15 MW.

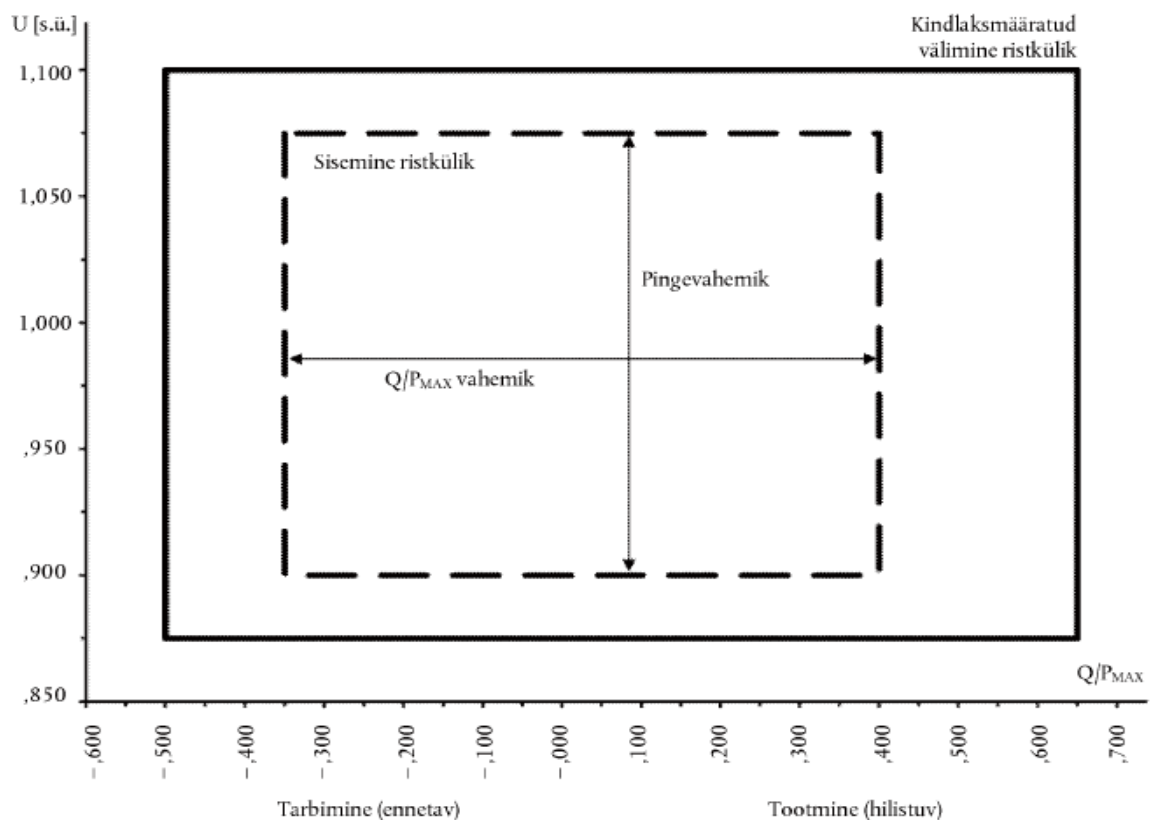
Kuna antud lõputöö uurib pinge reguleerimise võimekust alla 1 MW inverteri põhistel tootmiseadmetel, siis on alljärgnevalt välja toodud nõuded täna kehtivas võrgueeskirjas ja uued tehnilised nõuded, mis tulenevad RfG-st ning mis puudutavad tootmiseadmete reaktiivvõimekusele kehtestatud nõudeid. [16]

Hetkel kehtivas võrgueeskirja §21 on nõutud, et generaatorid reguleeriks pinget tavaolukorras automaatselt ning tootmiseadmetel on lubatud kasutada erinevaid reguleerimisviise. Lisaks on võrgueeskirja §18 lõikes 9 välja toodud, et kõik üle 200 kW tuulepargid ja päikeseelektrijaamad peavad olema võimelised osalema pinge reguleerimisel võrguhäiringute korral ning elektrivõrgu dispetšer peab saama kasutada tootmiseadme reaktiivvõimsust kogu tootmiseadme tehniliselt võimaliku reservi ulatuses. Ühtlasi on nõutud, et reaktiivvõimsust peab saama juhtida ühe signaali abil ning pingereguleerimise sätteid peab saama muuta kaugjuhtimise teel. Eeskirjast tuleneb täiendavalt, et võrguettevõtjal on kohustus tasuda reaktiivvõimsuse eest, kui selle kasutamise on aktiveerinud võrguettevõtja. Määruse kohaselt peab reaktiivvõimsuse juhtimine toimuma reaktiivvõimsuse ja pinge järgi. Küll aga ei selgu määrusest, kes määrab reaktiivvõimsuse ulatuse ja millise võrguettevõtja dispetšer peab pinget juhtima. Sama määruse paragrahv määrab, et tuulepargile või päikeseelektrijaamale vajalik reaktiivvõimsus toodetakse kohapeal ning võrku antav või võrgust võetav reaktiivvõimsus peab olema minimaalne, kuid lubatud on reaktiivvõimsuse kõikumine 10 % tootmiseadme nimiaktiivvõimsusest. Näiteks 1 MW päikeseelektrijaama puhul on lubatud kõikumine +/- 100 kVar liitumispunktis. [13]

RfG sõnastab selgelt, et asjaomastel võrguettevõtjatel on õigus määrata B-tüüpi energiapargimoodulitele reaktiivvõimsuse kasutamise võimekus, mis tähendab, et reaktiivvõimekuse määrab see võrguettevõtja, kuhu tootmismoodul liitub. Kuna üldiselt on kõige otstarbekam liita alla 1 MW tootmisüksused jaotusvõrkudesse, siis peavad järgmiseks aastaks jaotusvõrguettevõtjad kriitiliselt hindama, millist reaktiivi võimekust võrguettevõtjad oma võrku sünkroniseeritud tootmiseadmetelt vajavad [16]. Oluline oleks

valida reaktiivvõimsuse tarbimis- ja tootmisnõue, mis ei oleks liiga koormav ega ebamõistlik tootmiseseadme omanikele. Täiendavalt nähakse RfG-s võrguettevõtjale õigus määrata tootjatele erinevad reaktiivvõimsuse profiilid, kui võrgu tihedus ja koormused on piirkonniti ebahühtlased. Võrguettevõtjal tuleb leida n.ö tasakaalupunkt reaalse ja optimaalse reaktiivvõimsuse vajaduse järgi.

RfG-s on selgemalt määratud võrguettevõtjatele reaktiivvõimsussuutlikkuse nõuded tema võrku liituvatele tootmismoodulitele. Võrguettevõtjal lasub kohustus kooskõlastada vastav reaktiivvõimsuse võimekus põhivõrguettevõtjaga. Reaktiivvõimsuse suutlikkus tuleb määrata RfG-s välja toodud põhimõtetele  $Q/P_{\max}$  graafikuna. Samas peavad võrguettevõtjad reaktiivvõimsuse määramisel rakendama RfG-s välja toodud miinimumnõuded  $Q/P_{\max}$  diagrammina, mis on toodud joonisel 2.1.[16]



**Joonis 2.1 RfG-s määratud C-tüüpi energiapargimooduli U-Q/Pmax graafik [16]**

Joonisel 2.1 graafiku alusel kindlaksmääratud välimise risküliku sisse tuleb igal jaotusvõrguettevõtjal määrata tootmismoodulitele reaktiivvõimsuse võimekus, kusjuures tuleb arvestada sisemise risküliku mõõtmeid, mille maksimaalsed mõõtmed määratakse



sünkroonalade kaupa. RfG-s on defineeritud C-tüüpi tootmiseseadmetele Balti energiasüsteemis  $Q/P_{\max}$  suurimaks vahemikuks 0,8 suhtühikut energiapargimoodulitele ja 1,0 suhtühikut sünkroonmoodulile. Maksimalne püsitalituse pinge vahemik võib jääda mõlemat tüüpi tootmismoodulil 0,220 suhtühikuni.[16]

## **2.1. Reaktiivvõimsuse kasutamise tasustamise üldpõhimõtted Eestis ja teistes riikides**

Reaktiivvõimsuse turumehhanismid on alles välja kujunemas või kasutusele võtmise faasis ja seda peamiselt põhjusel, et aasta-aastalt liitub jaotusvõrkudesse üha rohkem tootmist ja suurlinnades asendatakse õhuliinid maakaablitega, milles tekkivaid reaktiivvõimsusi peavad võrguettevõtjad kompenseerima [11]. Sünkroongeneraatorite reaktiivvõimsusega pinge reguleerimist on kasutanud peamiselt põhivõrguettevõtjad, kus suurte, üle 100 MW generaatorite ergutust muutes reguleeritakse tootmiseseadme väljastatavat reaktiivvõimsust. Hetkel määratakse peamiselt võrgueeskirjades ära, milline peab olema tootmiseseadme võimekus pinge reguleerimiseks. Käesolevas peatükis on ära toodud täpsemad reaktiivvõimsuse teenuse kasutamise põhimõtted teaduskirjanduses oleva info põhjal.

Eestis on kehtivas võrgueeskirjas sätestatud, et üle 200 kW nimiaktiivvõimsusega tootmiseseadmed peavad olema võimelised osalema pinge reguleerimisel. Nõue on, et elektrivõrgu dispetšeril peab olema avariolukorras õigus ja võimalus juhtida selliste elektrijaamade reaktiivvõimsust pinge reguleerimiseks. Lisaks on täpsustatud, et juhul kui võrguettevõtja kasutab tootmiseseadme reaktiivvõimsust pinge juhtimiseks, tasub võrguettevõtja tootmiseseadme omanikele selle aja eest, mil tootmiseseadme reaktiivvõimsuse juhtimise võimekus on dispetšeri poolt aktiveeritud. Vastav hinnakiri kooskõlastatakse Konkurentsiametiga.[13]

Eesti põhivõrguettevõtja Elering lähtub Eesti elektrisüsteemi läbiva reaktiivvõimsuse maksustamisel põhimõttest, et kui põhivõrguettevõtja jaoks on reaktiivvõimsusvoog kontrollimatu, siis maksab reaktiivvõimsust genereeriv või tarbiv turuosaline reaktiivvõimsuse eest 1,54 EUR/Mvarh kohta [17]. Juhul kui põhivõrguettevõtja juhtimiskeskuse poolt on aktiveeritud tootmiseseadmega pinge kontrollimise funktsioon, tasub Elering reaktiivvõimsuse eest tootjatele 0,64 EUR/Mvarh eest perioodil, mil Eleringil oli vajadus kasutada tootmiseseadme reaktiivvõimsust [17]. Tasu makstakse ainult tootmiseseadmetele, mille omanikud sõlmivad Eleringiga vastava reaktiivvõimsuse kompenseerimisteenuse osutamise kokkuleppe. Avariolukorras, kus põhivõrgu

juhtimiskeskusel on vajadus kasutada elektrijaama reaktiivvõimekust, kuid tootmiseseadme omanik ei ole sõlminud kompenseerimise teenuse osutamise lepingut, arvestab Elering antud reaktiivvõimsuse kasutamise perioodil mõõtepunkte läbinud reaktiivvõimsuse kogused tootja jaoks nullhinnaga ehk tootjal ei tule tasuda reaktiivvõimsuse eest 1,54 EUR/Mvarh [17]. Eesti suurim jaotusvõrguettevõtja Elektrilevi OÜ reaktiivvõimsuse kasutamise eest tootjatele hetkel ei tasu ega pole vastavaid reegleid välja töötanud.[18]

Soome põhivõrguettevõtja *Fingrid OYJ* nõuab oma juhtimiskeskusele reaktiivvõimsuse kontrollimissignaale elektrijaamadelt, mille näivvõimsus on üle 10 MVA. Pinge reguleerimiseks paigaldab Soome põhivõrguettevõtja ise võrku täiendavaid reaktiivvõimsuse kompenseerimise seadmeid [20]. Rootsis reaktiivvõimsusturg ja vastav hinnastamise mehhanism puudub, tootmiseseadmete omanikel on kohustus hoida reaktiivvõimsust liitumispunktis tingimusel  $Q=0$ . Rootsi põhivõrguettevõtjal *Svenska Kraftnät* on õigus kontrollida ja tarnida reaktiivvõimsust tootmiseseadmetelt ja sünkroonkompensaatoritelt, mis on ühendatud otse põhivõrguga. Norras makstakse reaktiivvõimsuse pakkumise teenuse eest üksnes juhul kui tootmiseseadmel on reaktiivvõimsuse võimekus üle nõutud võimsusteguri -0,92 kuni +0,98. [19]

Austraalias vastutab reaktiivvõimuses olemasolu eest süsteemioperaator *National Electricity Market Management* (NEMMCO-süsteemioperaator). See ettevõtte kasutab oma võrku sünkroniseeritud elektrijaamade reaktiivvõimsust ning lisaks peab neile tasuta reaktiivvõimsuse reservi tagama *Transmission Network Service Providers* (TNSP). Sellise mehhanismi eesmärk on tagada Austraalia elektrisüsteemis pingestabiilsus. Juhul kui süsteemioperaatoril tekib täiendav vajadus reaktiivvõimuse reservi jaoks korraldab süsteemioperaator täiendava pakkumismenetluse. NEMMCO maksab sellisel juhul parimale teenusepakkujale nii valmisoleku tasu kui kasutamise tasu. Süsteemioperaator nõuab tootmiseseadmetelt reaktiivvõimuse saadavust võimsusteguriga -0,9 kuni -0,93 ning kui tootmiseseade on võimeline reaktiivvõimsust genereerima üle eelnimetatud piiri siis tasutakse tootmiseseadme omanikule ka reaktiivvõimsusest saamata jääv tulu.[19]

Suurbritannia süsteemioperaator National Grid nõuab reaktiivvõimsuse kasutamist üle 47 MW tootmiseseadmetelt, kus sünkroongeneraatorid peavad suutma pinget reguleerida võimsusteguri vahemikus -0,85 kuni 0,95 ja mittesünkroonsed tootmiseseadmed -0,95 kuni +0,95.[21] Süsteemioperaator tasub jaamadele kasutatud reaktiivvõimsuse eest üksnes tundidel, mil süsteemioperaator vastavat võimekust kasutas. Hinna arvutab süsteemihaldur

iga kuu kohta vastavalt turu olukorrale ning lõpphinna koostamise põhimõtted ja valemid on leitavad National Grid kodulehelt. Juhul kui tootmiseadme omanik, kellel ei ole kohustus pakkuda reaktiivvõimsuse teenust süsteemioperaatorile soovib seda siiski teha, saab teha vastava pakkumise süsteemioperaatorile. Võimalik teenusepakkuja peab täitma vastavad National Grid kodulehel olevad nõuded, muuhulgas tegema süsteemioperaatorile omapoolse pakkumise kasutushinna ja võimekushinna osas. Süsteemioperaator hindab seejärel pakkumist ning tingimuste sobivusel sõlmib teenusepakkujaga fikseeritud ajaks lepingu. Küll aga ei ole viimastel aastatel National Gridile täiendavaid reaktiivvõimsuse teenuse pakkumisi tehtud. [11] [19]

## **2.2. Tootmiseadmete omanike ja jaotusvõrguettevõtjate arvamused reaktiivenergia kohta**

Lõputöö raames pöördus lõputöö autor Eesti suuremate elektrienergia tootjate ja jaotusvõrguettevõtjate poole küsimustega, mis käsitlesid reaktiivvõimsuse kasutamise põhimõtteid ja osapoolte ootusi pinge reguleerimisega seotud regulatiivse poole kui võimaliku vastastikuse koostöö osas. Vestlust puudutavad teemad saadeti intervjuueeritavatele enne kohtumist ette, vastavad küsimused asuvad käesoleva lõputöö lisas Lõputöö autor lubas vestlusel osalenutele anonüümsust ning et lõputöös välja toodud vastused ei ole seostavad konkreetse ettevõtte ega elektrijaamaga. Järgnevalt on toodud välja elektrijaamade esindajate ja jaotusvõrgu esindajate vestluste kokkuvõtted.

### **2.2.1 Elektrijaamade esindajate nägemus reaktiivvõimsuse kasutamisest elektrivõrkudes pinge reguleerimiseks**

Töö autor pöördus 2018. aasta veebruaris-märtsis kuue Eesti suurema elektrijaama esindaja poole, kellest kolm leidsid aja tunniajaseks vestluseks. Tootmiseadme omanikele esitatud küsimused saab rühmitada järgnevasse valdkondadesse: üldised tehnilist laadi küsimused, küsimused mis puudutasid reaktiivvõimsuse tasustamist ning seadusandlust ja võrgueeskirjasid puudutavad teemad. Tootjatele esitati järgmised küsimused, mis puudutasid tootmiseadme reaktiivvõimsuse tehnilisi küsimusi.

1. Milline on teie ettevõtte nägemus täna reaktiivenergia teenuse osutamise ja arendamise koha pealt? Kas näete, et lähitulevikus (ca viie aasta perspektiivis) on Teie ettevõttel mõtet/potentsiaali osaleda pinge reguleerimise teenuse osutamises võrguettevõtjale?

2. Kui suurt tähelepanu pöörate täna planeeritava elektriijaama arendamisel tootmiseseadme reaktiivenergia võimekusele?
3. Millist tehnilist lahendust kasutate oma tootmiseseadmetes pinge reguleerimiseks ja miks? Kas on täna olulist vahet millist pinge reguleerimise funktsiooni kasutada?
4. Oleks täna otstarbekam mingil muul viisil tuuleparkides pinget reguleerida? (küsimus tuuleparkidele)

Eelnimetatud küsimuste vastuste põhjal selgus, et võrku sünkroniseeritud elektriijaamadel on piisav pingejuhtimise võimekus, mida tootmiseseadmete nõuetekohasuse protsessis võrguettevõtjad testivad, kuid reaalselt võrguettevõtjad pingejuhtimise funktsiooni täna ei kasuta. Täiendavalt selgus vestlustest, et tänapäeval rajatud täiskonverter lahenduse korral ei ole elektriijaama rajamisel enam vahet, millist pinge reguleerimise funktsiooni kasutada, kuid tootjad ehitavad reaktiivvõimekuse välja nii, et pinge reguleerimine toimub võrgu pinge (*U-control*) järgi. Lisaks nähakse tulevikus, et tootmiseseadme ehitamisel tarbijast kliendi juurde oleks otstarbekas pakkuda kliendile lokaalset reaktiivvõimekuse tuge ning siis ei peaks suurtarbijad ise omama ega paigaldama kompenseerimiseadmeid oma elektripaigaldisse.

Elektriijaamade esindajatele pakkusid enim huvi küsimused, mis puudutasid reaktiivvõimekuse tasustamist. Vestluse käigus esitati reaktiivvõimekuse tasustamise kohta järgmised küsimused:

1. Millistel tingimustel kaaluksite aktiivselt reaktiivenergia turul osalemist?
2. Milliseid täiendavaid kulusi tähendaks teie ettevõttele reaktiivenergia teenuse pakkumine?
3. Kui suuri lisakulusi nõuaks reaktiivenergia funktsiooni pidev kasutamine Teie ettevõttele? Konkreetse summa asemel võite välja tuua võimaliku püsikulu protsendina võrreldes aastaste püsikuludega.
4. Kui palju keskmiselt kuus peavad teie ettevõtte tootmisüksused tasuma võrku edastatud reaktiivenergia eest? On see teie ettevõttele juba täna probleemiks, et mõnedel tundidel tuleb tasuda reaktiivenergia komponendi eest? On vastav reaktiivkulu komponent märkimisväärne? Kas teie arvates oleks mõistlik seda tasu vähendada ning kas teil on motivatsiooni midagi muuta, et seda kulukomponenti optimeerida oma vahenditega. .

Tasustamist puudutavate küsimuste kokkuvõtteks võib öelda, et kõik vestlusel osalenud elektriyaamade esindajad teadsid, et peavad tasuma võrguettevõtjatele tasu, kui nad tarbivad või genereerivad võrku reaktiivenergiat. Vastustest küsimusele, mis motiveeriks tootmiseseadme ettevõtteid osalema reaktiivvõimsuse teenus pakkumiseks selgus, et tootmiseseadmetega opereerijad kaaluksid pidevat reaktiivvõimsuse toe pakkumist ning seda oleks otstarbekas täna üksnes pakkuda fikseeritud hinna puhul, mis kataks vähemalt ära aktiivenergia vähenemise tundidel, mil kasutati tootmiseseadme reaktiivvõimsust. Seda põhjusel, et tootmiseseadme reaktiivvõimsuse kasutamine pinge kontrollimiseks vähendab võrku antavat aktiivvõimsust vastavalt generaatori P-Q kõverale. Reaktiivenergiaturu tekkimist elektriyaamade kõneisikud veel reaalseks ei pidanud, kuna reaktiivenergia on lokaalse mõjuga, eriti Eestis, kus uued elektriyaamad paiknevad ja liituvad võrguga suhteliselt hajali. Üks intervjuueeritav tõi välja, et nende ettevõttele täiendavaid kulutusi reaktiivenergia pidev võimekuse pakkumine ei tingiks, kuna võimekus on elektriyaama liitumisel välja ehitatud ning selle kasutamiseks on kõik eeldused täidetud. Võimalik, et lisanduvad tööjõu ja täiendavad hooldusega seotud kulutused, kuid nende osakaal oleks marginaalne. Kaks teist tootjat arvasid, et kui reaktiivenergia hind oleks sama, mis täna on aktiivvõimsusel ehk umbes 30EUR/Mvarh eest, siis oleks neil huvi pakkuda võrguettevõtjatele pidevat reaktiivvõimsuse tuge. Tootjad ei pidanud võimaliku püsitasu komponenti kehtestamist eelduseks, aga lisasid, et see annaks turuosalistele selgema signaali, et pakkuda elektriyaamast süsteemile täiendavat reaktiivvõimsuse tuge.

Täiendavalt oli soov teada saada tootjate arvamust järgnevatele regulatiivset poolt puudutavatele küsimustele:

1. Mil viisil suudaks võrguettevõtja või seadusandlus motiveerida elektriyaamasid osalema reaktiivenergia võimekuse tagamiseks võrguettevõtjatele?
2. Millised reaktiivvõimekuse tehnilised nõuded ja tingimused peaksid olema võrguettevõtjate poolt selgemalt reguleeritud? Mida annaks juba täna paremini teha või millele peaksid teie arvates võrguettevõtjad oma võrgus olevate tootmiseseadmete puhul tähelepanu pöörama?
3. Kuidas peaks teie arvates seadusandlikult reaktiivenergiaga seotud tingimused olema reguleeritud? Kas Euroopa võrgueeskirjas (RfG) kirjeldatud regulatsioon on piisav või peaks sõnastus olema täpsem või leebem?

Elektrijaamade kõneisikute meelest on hetkel kehtiv võrgueeskirja regulatsioon piisav, kuid tõdesid, et uues üle-euroopalises võrgueeskirjas on regulatsioon selgem, kuigi seal kirjeldatud pingeuhtimise nõuded on elektrienergia tootjate meelest oluliselt rangemad kui täna kehtivas võrgueeskirjas. Kaks tootmiseseadme esindajat rõhutasid, et kui vastav reaktiivvõimsuse turumehhanism välja ehitada, siis peab turuosalistele andma selge signaali, et loodud tasustamise mehhanismi lähiaastatel ei muudetakse. Selles osas peaksid tootjate meelest pingutama peamiselt võrguettevõtjad.

Läbi viidud intervjuude põhjal selgus, et üldiselt ei olnud ükski vestlusel osalenud tootmiseseadme esindaja väga kursis, mis põhjusel peaksid või võiksid nad tulevikus pakkuda reaktiivvõimsuse tuge võrguettevõtjatele või osalema reaktiivvõimsusturul. Vestlustest selgus, et elektrijaamad oleksid nõus kaaluma reaktiivvõimsuse toe pakkumist võrguettevõtjatele, kuid selle eelduseks on tootjate meelest lihtne reeglistik ja hind, mis kataks ära vähemalt aktiivvõimsuse kaotuse hetkedel, mil võrgu jaoks reaktiivvõimsust kasutatakse. Võimalik, et võrguettevõtjad peaksid tegema elektrijaama omanikele paremat selgitustööd elektrijaamadele reaktiivvõimsuse kasutamise osas.

## **2.2.2 Võrguettevõtjate esindajate nägemus reaktiivvõimsuse kasutamisest elektrivõrkudes pingereguleerimiseks**

Lõputöö raames pöörduti märtsis 2018 kahe Eesti jaotusvõrguettevõtja poole, et saada teada, milline on jaotusvõrguettevõtjate nägemus reaktiivvõimsuse kasutamiseks. Jaotusvõrguettevõtjatele esitatud küsimused puudutasid samuti kolme grupi teemasid. Esmalt küsiti kuidas teostakse jaotusvõrkudes täna pingereguleerimist, lisaks uuriti millist mõju ja kuidas saaks tulevikus kasutada jaotusvõrku liitunud tootmiseseadmeid pingereguleerimiseks. Täiendavalt sooviti teada jaotusvõrguettevõtjate arvamust reaktiivvõimsuse tasustamise ja võrgueeskirja nõuete kohta.

Jaotusvõrguettevõtjatele küsiti pingereguleerimise kohta järgmisi küsimusi:

1. Kuidas teostate täna kesk ja madalpingevõrgus pingereguleerimist? On teil mõtteid kuidas seda võiks paari aasta pärast teha?
2. Kuidas teostate täna reaktiivvõimsuse kompenseerimist oma võrgus? Kuidas võiks see välja näha paari aasta pärast.
3. Millist tehnilist lahendust kasutate oma võrgus tootmiseseadmete liitumiseks? Palun tooge näiteid ja võimalusel selgitage tehnilisi lahendusi täpsemalt.

4. On teil täna juhuseid, et täiendavate genereerivate tootmiseseadmete lisandumine võrku on põhjustanud mõnes fiidris ülepinget, millest tingituna peab tootja tegema täiendavaid investeeringuid või järgima mingeid piiranguid?

Vestlustest selgus, et üldiselt reguleeritakse võrgus pinget peamiselt jõutrafoaste astmelülititega. Lisaks kasutatakse suuremates piirkonnaalajaamas kondensaatorpatareisid, et kompenseerida vaja minevat reaktiivvõimust. Jaotusvõrguettevõtjate sõnul tekivad neil keskpingevõrgus pingeprobleemid juhul, kui suurem tootja, näiteks 1 MW elektripaigaldise liitumispunkt või mitme väikese elektritootja liitumispunktid jäävad keskpingefiidri algusesse. Seda põhjusel, et fiidri algustes hoitakse pinget nii kõrgel kui võimalik ning täiendavate tootmiseseadmete lisandumine põhjustab pingetõusu fiidri alguses. Küll aga ei või võrguettevõtjad keelduda ühegi turuosalise liitumisest ning kui elektrijaam tekitab antud piirkonnas pingeprobleeme arvestatakse tema liitumistasusse täiendavad võrgutugevduse kulud, mis ei pruugi alati kõige otstarbekam lahendus olla. Toodi välja, et täna ei ole enamusi kliente maksma liitumistasuna rohkem kui tema liitumispunkti välja ehitamisega seotud kulutused ning enamasti tuleb liitumise käigus paigaldada fiidrile uus komplektalajaam või olemasolev alajaam uuendada kaasaegseks alajaamaks. Üle 0,5 MW tootmiseseadmete liitumispunktid on üldjuhul keskpinge poolel.

Jaotusvõrguettevõtjate esindajatelt küsiti täpsemalt võrku liituvate tootmiseseadmetega pingereguleerimise kohta järgmisi küsimusi:

1. Kas ja millal on teie ettevõttel plaan hakata kasutama täna juba võrgus olevate tootmiseseadmete reaktiivenergia võimekust või mis seda täna takistab?
2. Millist tehnilist lahendust oleks otstarbekas kasutada tootmiseseadmetega pingereguleerimise teostamiseks? Nõuab see mingite tehniliste lahenduste üle vaatamist või investeeringuid võrguettevõtja poolt.
3. Täna reguleeritakse jaotusvõrgus pinget peamiselt jõutrafoaste astmelülititega. Mitme aasta pärast oleks reaalne, et pingereguleerimine toimuks pidevalt teie võrku ühendatud tootmiseseadmetega?

Vestlusel osalenud ei välistanud, et tulevikus võiks täiendavalt kasutada inverteripõhiste seadmetega pinget juhtimist, kuid seda üksnes piirkondades, kus on nõrgem võrk ehk väiksem lühisvõimsus ja väiksemad koormused. Linnapiirkondades ei näe jaotusvõrguettevõtjad põhjust osta tootjatelt pingereguleerimiseks täiendavat

reaktiivvõimsust. Hetkel jaotusvõrguettevõtjad toimivaid tootmiseseadmeid pingereguleerimiseks ei kasuta.

Regulatiivse poole ja tasustamise kohta esitati järgmised küsimused:

1. Kui palju keskmiselt kuus peavad tootjad tasuma võrku edastatud reaktiivenergia eest? On see teie võrgus olevatele tootjatele juba täna probleemiks, et mõnedel tundidel tuleb tasuda reaktiivenergia edastamise eest võrgutasu?
2. Hetkel kehtiv võrgueeskiri ei reguleeri täpseid reaktiivenergia tarbimise ja genereerimise piire tootmisüksusele ega elektrijaamale kui tervikule. On nõue, et jaam peab tagama reaktiivvõimsuse kogu tehniliselt võimaliku reaktiivvõimsuse reservi ulatuses. Milline on jaotusvõrguettevõtja nägemus elektrijaamades reaktiivenergia võimekuse osas, arvestades ka uut Euroopa võrgueeskirja nõuet?
3. Kuidas võiks võrguettevõtja arvates reaktiivenergiaga kasutamise seotud tingimused olema reguleeritud? Kas Euroopa võrgueeskirjas (RfG) kirjeldatu on piisav või peaks sõnastus olema täpsem või hoopis leebem?

Seadusandlikku poolt puudutavatele küsimustele vastates on võrguettevõtjate meelest tänane regulatsioon liialt kontrolliv ja ajale jalgu jäänud. Muret tekitab asjaolu, et täna on üle 200 kW nimivõimsusega elektrijaamadel kohustus välja ehitada pingereguleerimise võimekus võrguettevõtjaga, mille toimist tootmiseseadme nõuetekohasuse kontrollimiseks testitakse, kuid pärast tootmiseseadme nõuetekohaseks kinnitamist seda võimekust jaotusvõrguettevõtjad praktiliselt ei kasuta. Ühe jaotusvõrguettevõtja spetsialisti meelest võiks jaotusvõrguettevõtja tulevikus ise otsustada, millistes jaamades on otstarbekas pingereguleerimise võimekus välja ehitada ja millistes mitte. Tema arvates on otstarbetu lasta mõnel juhul tootmiseseadmel pingereguleerimise võimekus välja ehitada kui jaotusvõrguettevõtjal ei ole vajadust antud funktsiooni vastavas piirkonnas kasutada.

Küsimustele, millist hinda ja mis tingimustel võiksid elektrijaamad reaktiivvõimekust pakkuda on jaotusvõrguettevõtjate hinnangul täna veel vara öelda, enne peaks selgeks saama kindlad reaktiivvõimsuse määramise ja kasutamise reeglid, kuna seoses üle-euroopaliste võrgueeskirjadega on ühe võrguettevõtja meelest selgusetu, mis alustel määraksid jaotusvõrguettevõtjad jaamadele reaktiivvõimekuse piirid.



### 2.2.3 Kokkuvõte ja järeldused turuosalistega läbi viidud vestluste põhjal

Kokkuvõttes töid jaotusvõrguettevõtjate spetsialistid välja, et reaktiivvõimsusega seotud teemade arutelu on vajalik ja aktuaalne, kuid täna võrguettevõtjad aktiivselt antud küsimustega ei tegele. Võrguettevõtjad tõdesid, et elektri jaotusvõrkudes jääb pinge reguleerimine ilmselt mitmeid aastaid peamiselt toimima jõu trafode astmelülititega. Teisalt arvati, et inverteripõhised elektri jaamad võivad olla tulevikus alternatiiviks kondensaatorpatareidele, et jaotusvõrgus pinget reguleerida ja reaktiivvõimsusest põhjustatud kadusid vähendada. Igas tootmisseadmes aga pinge juhtimise võimekuse välja ehitamine jaotusvõrguettevõtjate meelest otstarbekas ei ole, kuna reaktiivvõimsus on lokaalse mõjuga. Vestlustest selgus, et turuosalistelt tänasel kujul tootmisseadmega pinge reguleerimine ei ole otstarbekas, kuna hetkel nõutakse pinge reguleerimist elektrisüsteemi seisukohast üsna väikse nimiaktiivvõimsusega tootmisseadmetelt, kuid jaotusvõrguettevõtjatel puudub vajadus kasutada tootmisseadmeid pinge juhtimiseks.

Küll aga peaksid jaotusvõrguettevõtjad arvestama, et hajali paiknev elektrienergia tootmine ja selle pidev võrku liitmine võib tulevikus mõjutada teatud fiidrites pingete kõikumisi oluliselt rohkem kui käesoleval hetkel. Näiteks on Eesti suurima jaotusvõrguettevõtja Elektrilevi võrku 2017. aasta lõpu seisuga liidetud 69 elektri jaama, mis on üle 200 kW nimiaktiivvõimsusega [22]. Seetõttu tekib ilmselt tulevikus pidev vajadus tootmisseadmetega pinge reguleerimiseks, mis tundub otstarbekam, kui täiendavate kompenseerimisseadmete soetamine olukorras, kus tarbijad kasutavad aina vähem seadmeid, mis vajavad reaktiivvõimsust ning teisalt liituvad elektrivõrku tootmisseadmed, mis on võimelised paindlikult reaktiivvõimsust tarbima või genereerima. Jaotusvõrguettevõtjatel tasuks kaaluda võimalust rakendada RfG-s välja toodud õigust rakendada erinevaid reaktiivvõimsusprofile, kuid jaotusvõrguettevõtjate meelest ei ole võimalik kasutada kõiki liituvaid tootmisseadmeid pinge reguleerimiseks. Elektrienergia tootjad võiksid kaaluda jaotusvõrguettevõtjatega koostööd reaktiivvõimsuse mehhanismi välja töötamisel ja selle võimalikul rakendamisel. Võrguettevõtjad peaksid kindlasti ajakohastama reaktiivvõimsusega seotud võrgutasusid, sest tänased hinnad ei motiveeri tootjal pakkuma reaktiivvõimsust võrguettevõtjatele. Lisaks peaksid jaotusvõrguettevõtjad kasutama oma võrgus paiknevate tootmisüksuste tehnilist võimekust ära maksimaalselt, sest lokaalne pinge kontrollimine ja genereerivate tootmisüksuste olemasolu vähendab jaotusvõrkudes ülekantavat reaktiivvõimsust ning elektrisüsteemist üle kantav võimsusvoo vähenemine vähendab õhuliinides koormusi. Hetkel teostakse tootmisseadmetele katsetusi

võrgueeskirjas ja liitumistingimustes ette nähtud mahus ja nõudmiste järgi, kuid pärast võrgukatsetusi kaob motivatsioon nii tootjatel kui jaotusvõrguettevõtjatel kasutada tootmiseseadmeid pinge reguleerimiseks. Sellist olukorda peaksid jaotusvõrguettevõtjad kindlasti tulevikus vältima.

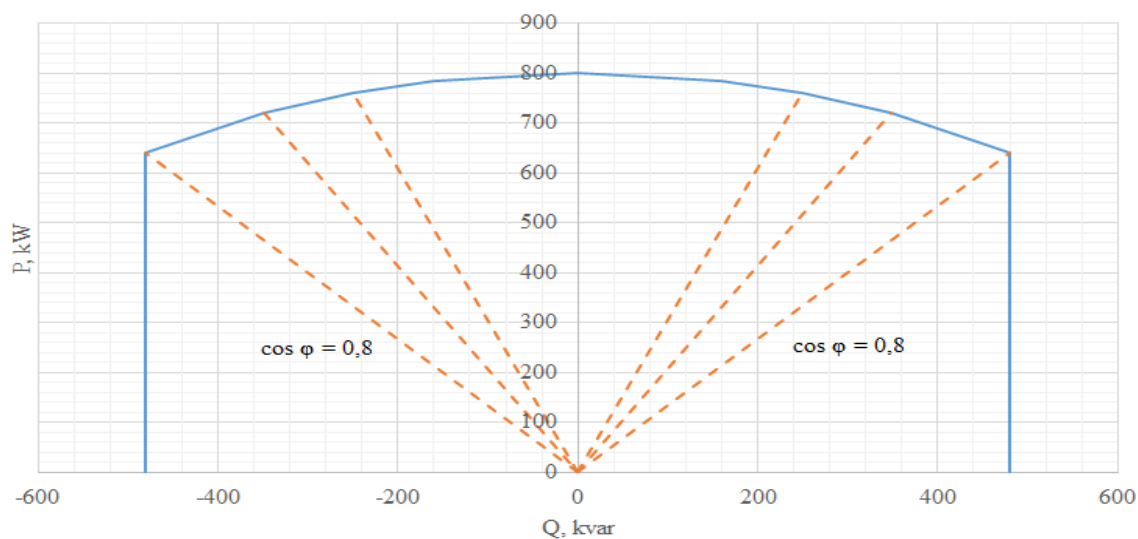
Järgnevas peatükis uuritakse, kas jaotusvõrguettevõtjatel oleks otstarbekas kasutada tootmiseseadmete reaktiivvõimsust pinge reguleerimiseks ja millist võimekust peaksid jaotusvõrguettevõtjad nõudma liituvatelt elektrijaamadelt.

### 3. Tootmisseedmega pingereguleerimine keskpingeüldri mudelite näitel

Kontrollimaks, kas inverteripõhised tootmisseedet saab kasutada jaotusvõrgu piirkondades keskpingeüldri pingereguleerimiseks ja milline peaks olema sellise tootmisseedme optimaalne reaktiivvõimsuse kasutamise võimekus, teostati antud lõputöö raames võrgu modelleerimine. Selleks koostati mudelid programmis *PowerWorld Simulator*, kuna lõputöös käsitletavate pingete muutuste võrdlemiseks ei ole vajadust arvestada elektrivõrgu dünaamikaga. Mudeli koostamisel tehti enamik tehnilisi eeldusi kirjanduse põhjal, kuid piirkonnaalajaamade lühisvoolude andmed küsiti Eleringi Releekaitse ja automaatika talitusest.

#### 3.1. Tootmisseedmega keskpingeüldri mudeli koostamine

Koostatud mudelite eesmärgiks oli võrrelda tootmisseedmetega pingereguleerimise mõju liitumispunkti alajaama ja piirkonnaalajaama latipingetele. Lisaks kontrolliti mudelitest kas jaotusvõrguettevõtted võiksid tulevikus kasutada näiteks päikeseelektrijaamasid pingereguleerimiseks tava- või avariiolektrijaamasid pingereguleerimiseks. Elektrivõrgu modelleerimiseks kasutati programmi *PowerWorld Simulator*, mille abil koostatud mudelites lisati erinevatesse keskpinge alajaamadesse inverteripõhine tootmisseed. Vastava elektrienergia tootmisseedme nimiaktiivvõimsuseks oli 800 kW ning reaktiivvõimsuse muutmisel võeti arvesse tootmisseedmele projekteeritud reaktiivvõimsuse väärtusi. Mudelis kasutatava inverteripõhise tootmisseedme PQ-diagramm on toodud joonisel 3.1.



Joonis 3.1 0,8 MW inverteripõhise tootmisseedme P-Q diagramm

Mudelisse konstrueeritud fiidrite koormused ei põhine konkreetse võrgupiirkonna andmetel. Reaktiivenergia tarbe määramisel arvestati, et alajaamas, kuhu on ühendatud kodutarbijad on võimusteguri  $\cos \varphi$  väärtuseks 0,97 ja tööstustarbija kasutati väärtust  $\cos \varphi=0,85$ .

Pinge reguleerimise mõjude uurimiseks koostati mudelis fiidrid kahe võrgupiirkonna kohta, neist üks hajaasustusega piirkonna ja teine linnapiirkonna kohta. Antud lõputöös hinnati ning võrreldi pinge muutuste mõju suhtühikutes (pu - *per unit*) piirkonnaalajaama ja ühendusalajaama lattidel. Pinge muutuste hindamiseks keskpingefiidris hajaasustusega ja linnaasustusega piirkonnas, lisati mudeli erinevatesse alajaamadesse 0,8 MW inverteripõhine tootmiseseade, milles muudeti tootmiseseadme erinevaid reaktiivvõimsuse sätteid. Reaktiivvõimsust muudeti tootmiseseadme võimsusteguri  $\cos \varphi$  väärtuste muutmisega. Kuna tootmiseseadmete liitumisel ei ole võrguettevõtjal enne liitumist ette teada, millisesse alajaama tootmiseseade soovib liituda, teostati mudelarvutused tootmiseseadmega iga alajaama lati juures. Mudeli koostamisel pidi piirkonnaalajaama defineerima kui *slack bus*, mis hoidis pidevalt piirkonnaalajaama pinget 1 pu juures ning selleks on piirkonnaalajaama latile ühendatud *slack generator*, mis simuleeris elektrivõrku, millega piirkonnaalajaam seoti. Piirkonnaalajaama baaspingeks määrati 21 kV ja jaotusalajaamades 20,5 kV. Keskpingefiidris pinge muutuste võrdlemiseks lisati mudelisse piirkonnaalajaamale lisalatt ehk *bus*, mis seoti 0,1 km liiniga, mille  $r$  ja  $x$  on võrdsustati võrgutakistuse  $r$  ja  $x$  väärtustega. Mudelis kontrolliti igas stsenaariumis esmalt algset võrgu olukorda, kus tootmiseseade ei genereeri võrku aktiivvõimsust ning seega ei mõjuta piirkonnas võrgupinget ega osale pinge reguleerimisel. Seejärel muudeti erinevate stsenaariumite jaoks tootmiseseadme  $\cos \varphi$  väärtust järgnevatele väärtustele: -0,90, -0,95, +0,90, +0,95. Vastavalt reaktiivvõimsuse sätteväärtustele muutus elektrivõrku genereeritav aktiivvõimsus, mille aluseks võeti joonisel 2.1 olev P-Q diagramm. Mudelites tootmiseseadmes reaktiivvõimsuse muutmiseks erinevatel fiidritel koostati järgmised stsenaariumid, mis on toodud tabelis 3.1.

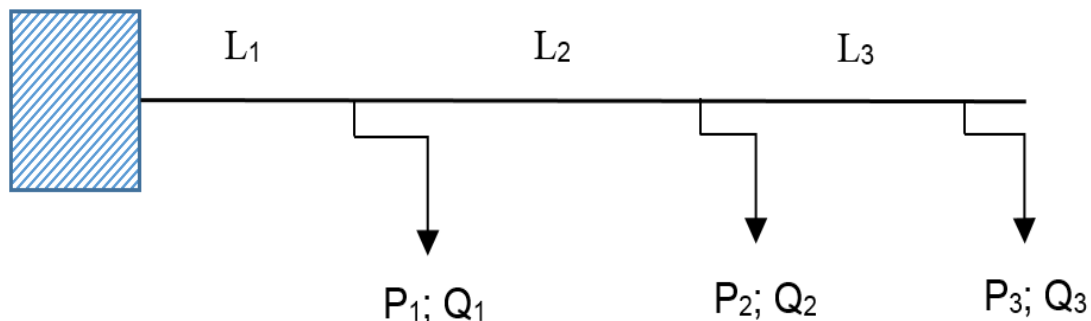
**Tabel 3.1 Mudeldamise stsenaariumite kirjeldus koos tootmisseedmele määratavate reaktiivvõimsuse sätteväärtustega**

| <b>Stsenaariumite kirjeldus</b>   | <b>Sätted tootmisseedmel</b> |
|---|------------------------------|
| Ilma tootmisseedmeta (TS) -n.ö basecase , tootja asub AJ Tarbijad 1       | 0 MW                         |
| TS sees/reaktiivi ei anna. -n.ö basecase, tootja asub AJ Tarbijad 1       | 0,8 MW ja 0 Mvar             |
| TS sees/reaktiivi jaoks peal cos +0,95, tootja tootja asub AJ Tarbijad 1  | 0,76 MW ja 0,22 Mvar         |
| TS sees/reaktiivi jaoks peal cos -0,95, tootja tootja asub AJ Tarbijad 1  | 0,76 MW ja -0,22 Mvar        |
| TS sees/reaktiivi jaoks peal cos +0,90., tootja tootja asub AJ Tarbijad 1 | 0,72 MW ja 0,24 Mvar         |
| TS sees/reaktiivi jaoks peal cos -0,90., tootja asub AJ Tarbijad 1        | 0,72 MW ja -0,24 Mvar        |
|   |                              |
| TS sees/reaktiivi ei anna. -n.ö basecase, tootja asub AJ Tarbijad 2       | 0,8 MW ja 0 Mvar             |
| TS sees/reaktiivi jaoks peal cos +0,95, tootja asub AJ Tarbijad 2         | 0,76 MW ja 0,22 Mvar         |
| TS sees/reaktiivi jaoks peal cos -0,95, tootja asub AJ Tarbijad 2         | 0,76 MW ja -0,22 Mvar        |
| TS sees/reaktiivi jaoks peal cos +0,90., tootja asub AJ Tarbijad 2        | 0,72 MW ja 0,24 Mvar         |
| TS sees/reaktiivi jaoks peal cos -0,90., tootja asub AJ Tarbijad 2        | 0,72 MW ja -0,24 Mvar        |
|   |                              |
| TS sees/reaktiivi ei anna. -n.ö basecase, tootja asub AJ Tarbijad 3       | 0,8 MW ja 0 Mvar             |
| TS sees/reaktiivi jaoks peal cos +0,95, tootja asub AJ Tarbijad 3         | 0,76 MW ja 0,22 Mvar         |
| TS sees/reaktiivi jaoks peal cos -0,95, tootja asub AJ Tarbijad 3         | 0,76 MW ja -0,22 Mvar        |
| TS sees/reaktiivi jaoks peal cos +0,90, tootja asub AJ Tarbijad 3         | 0,72 MW ja 0,24 Mvar         |
| TS sees/reaktiivi jaoks peal cos -0,90, tootja asub AJ Tarbijad 3         | 0,72 MW ja -0,24 Mvar        |

### **3.2. Tootmisseedmega keskpinge pingeregulatsioon keskpingefiidris hajaasustusega piirkonnas**

Hajaasutusega piirkonna kohta koostatud mudelis kontrolliti pingemuutusi ühe 20 kV keskpingefiidri näitel, mille kogupikkus oli 10 km. Hajaasutusega piirkonna fiidritele lisati kolm 20,5/0,410 kV alajaama, kuhu olid ühendatud tavatarbijad - näiteks suvilad,

kodumajapidamised või väiketalud. Kekspinge fiidrile lisati järgmised alajaamad: Tarbijad 1, Tarbijad 2 ja Tarbijad 3. Vastava keskpingefiidri skeem on joonisel 3.2.



*Joonis 3.2 Kekspingefiidri lihtsustatud skeem ilma tootmiseseadme liitumiseta, mis võeti aluseks mudelite koostamisel*

Mudelis kasutatavate hajaasustusega piirkonna alajaamade koormused, reaktiivvõimsuse tarve ja  $\cos \varphi$  väärtused on toodud tabelisse 3.2.

*Tabel 3.2 Mudelis kasutava hajaasustusega piirkonna tarbimisvõimused ning latipinged*

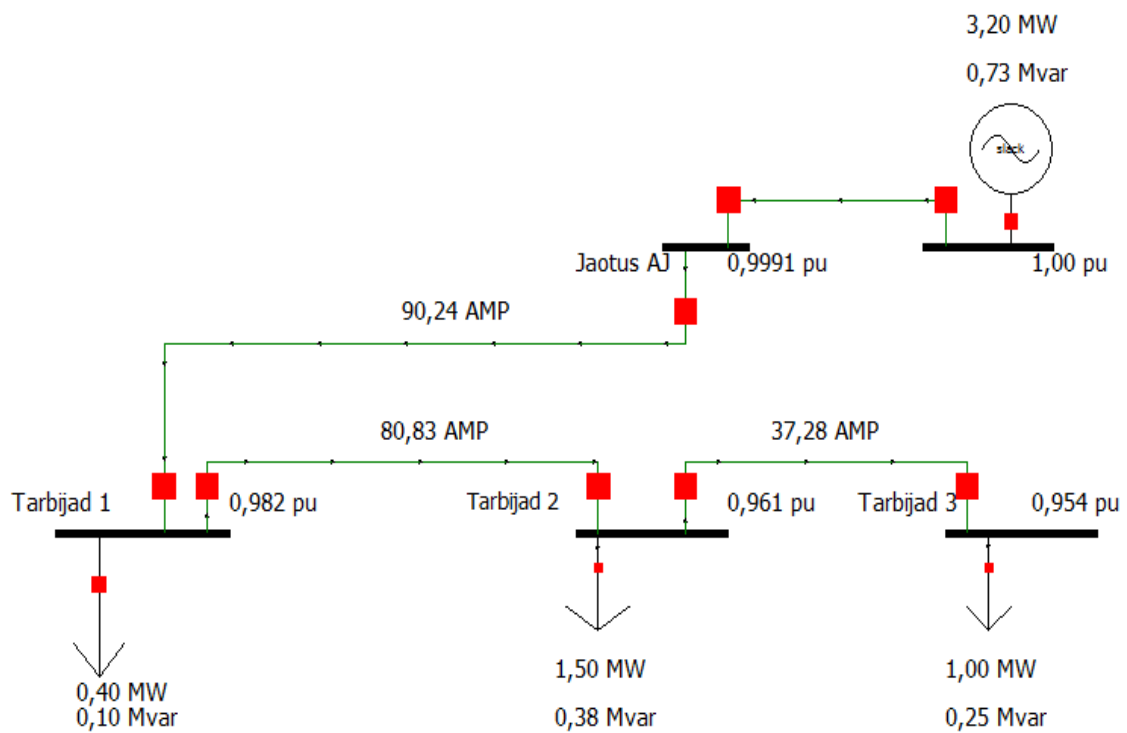
| Alajaam    | P, MW | Q, Mvar | $\cos \varphi$ | baaspinge, kV |
|------------|-------|---------|----------------|---------------|
| Tarbijad 1 | 0,4   | 0,1     | 0,97           | 20,5          |
| Tarbijad 2 | 1,5   | 0,38    | 0,97           | 20,5          |
| Tarbijad 3 | 1     | 0,25    | 0,97           | 20,5          |

Fiidris paiknevad alajaamad ühendati mudelis isoleeritud õhuliinijuhtmega SAX-50, mille aktiiv- ja reaktiivtakistuse parameetrid on võetud allikast [2]. Hajaasustusega piirkonnas kasutatud liinide mark, takistused ja pikkused on toodud tabelisse 3.3.

**Tabel 3.3 Hajaasustusega piirkonna keskpinge õhuliinide parameetrid**

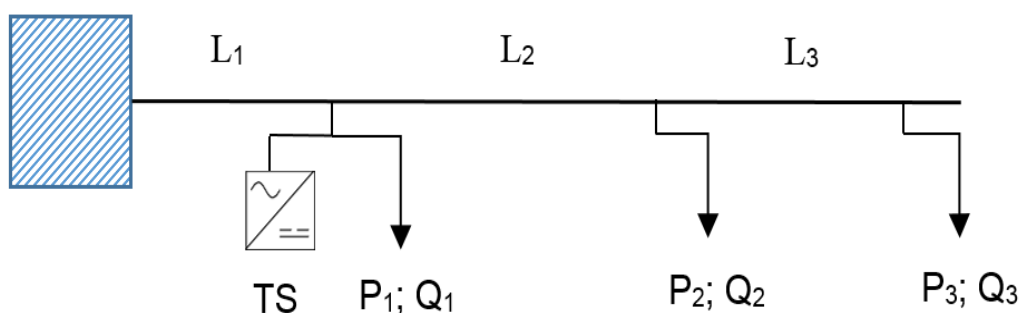
| Liin | Juhtme mark | r, $\Omega/\text{km}$ | x, $\Omega/\text{km}$ | l, km |
|------|-------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| L1   | SAX-50      | 0,72                  | 0,316                 | 3     |
| L2   | SAX-50      | 0,72                  | 0,316                 | 4     |
| L3   | SAX-50      | 0,72                  | 0,316                 | 3     |

Hajaasustusega jaotusvõrgu piirkonna lühivooluks oli 3059 amprit ja sellisele lühisvoolule vastava võrgutakistuse korral on  $r=0,27445 \Omega/\text{km}$  ja  $x=4,02914 \Omega/\text{km}$ . Vastavate andmete põhjal koostatud mudelid on joonisel 3.3.



**Joonis 3.3 Baasolukord hajaasustusega piirkonnas**

Tootmiseseadme lisamisel kordamööda erinevatesse alajaamadesse sai mudeli põhjal hinnata tootmiseseadme genereerimise ja reaktiivvõimsuse mõju pinge muutustele fiidris paiknevatele alajaamadele. Joonisel 3.4 on liitunud inverteripõhine tootmiseseade alajaama Tarbijad 1.



**Joonis 3.4** Kekspingefiidri lihtsustatud skeem ilma tootmiseseadmeta liitumiseta, mis võeti aluseks mudelite koostamisel

Tootmiseseadme asukoha ja võimsusteguri  $\cos \varphi$  muutmisele, mis teostati tabeli 3.1 toodud stsenaariumite põhjal, saadud pinge muutuste hindamiseks koondati mudelist saadud tulemused alajaamade kaupa tabelitesse 3.4, 3.5 ja 3.6.

**Tabel 3.4** Pinge muutused piirkonnaalajaamas ja liitumispunkti alajaamas Tarbijad 1 hajaasutusega piirkonnas olukorras, kus tootmiseseade oli liitunud alajaama Tarbijad 1

| $\cos \varphi$ | Tarbijad 1 latipinge, pu | Piirkonna AJ latipinge, pu |
|----------------|--------------------------|----------------------------|
| 1              | 0,985                    | 0,9991                     |
| 0,95           | 0,986                    | 0,9993                     |
| -0,95          | 0,984                    | 0,9989                     |
| 0,9            | 0,986                    | 0,9993                     |
| -0,9           | 0,984                    | 0,9989                     |
|                |                          |                            |
| Max            | 0,986                    | 0,9993                     |
| Min            | 0,984                    | 0,9989                     |
| Max muutus %   | 0,406                    | 0,02                       |
| Min muutus %   | 0,203                    | 0,020                      |



**Tabel 3.5 Pinge muutused piirkonnaalajaamas ja liitumispunkti alajaamas Tarbijad 2 hajaasutusega piirkonnas olukorras, kus tootmiseseade oli liitunud alajaama Tarbijad 2**

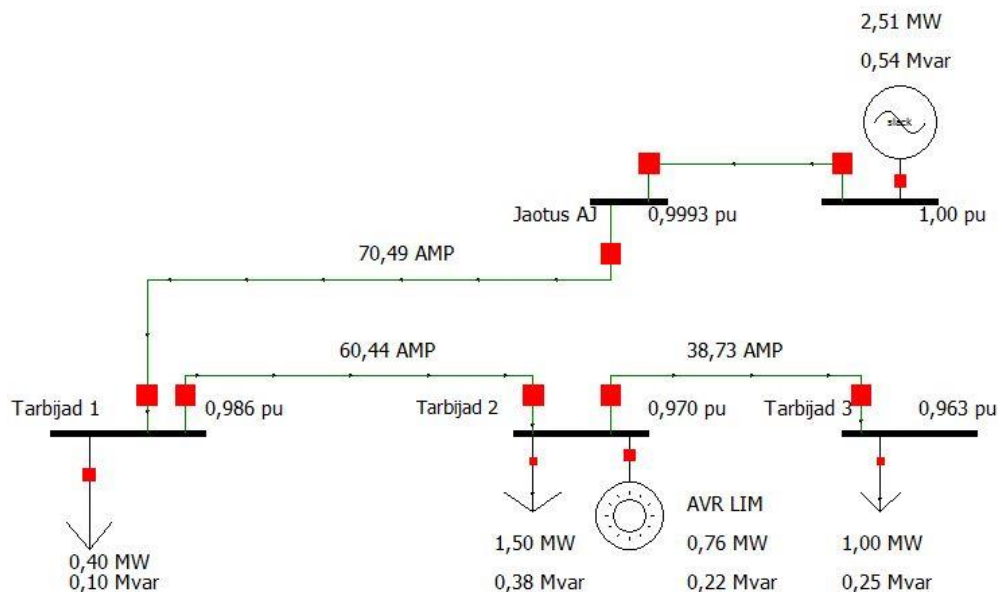
| <b>cos φ</b> | <b>Tarbijad 2<br/>latipinge, pu</b> | <b>Piirkonna<br/>AJ<br/>latipinge,<br/>pu</b> |
|--------------|-------------------------------------|---|
| 1            | 0,969                               | 0,9991  |
| 0,95         | 0,97                                | 0,9993  |
| -0,95        | 0,967                               | 0,9989  |
| 0,9          | 0,97                                | 0,9994  |
| -0,9         | 0,967                               | 0,9989  |
|              |                                     |   |
| Max          | 0,97                                | 0,9994  |
| Min          | 0,967                               | 0,9989  |
| Max muutus % | 0,93                                | 0,03  |
| Min muutus % | 0,620                               | 0,020   |

**Tabel 3.6 Pinge muutused piirkonnaalajaamas ja liitumispunkti alajaamas Tarbijad 3 hajaasutusega piirkonnas olukorras, kus tootmiseseade oli liitunud alajaama Tarbijad 3**

| <b>cos φ</b> | <b>Tarbijad 3<br/>latipinge, pu</b> | <b>Piirkonna AJ<br/>latipinge, pu</b> |
|--------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 1            | 0,966                               | 0,9992                                |
| 0,95         | 0,967                               | 0,9993                                |
| -0,95        | 0,963                               | 0,9989                                |
| 0,9          | 0,967                               | 0,9994                                |
| -0,9         | 0,963                               | 0,9989                                |
|              |                                     |                                       |
| Max          | 0,967                               | 0,9994                                |
| Min          | 0,963                               | 0,9989                                |
| Max muutus % | 1,344                               | 0,03                                  |
| Min muutus % | 0,935                               | 0,020                                 |

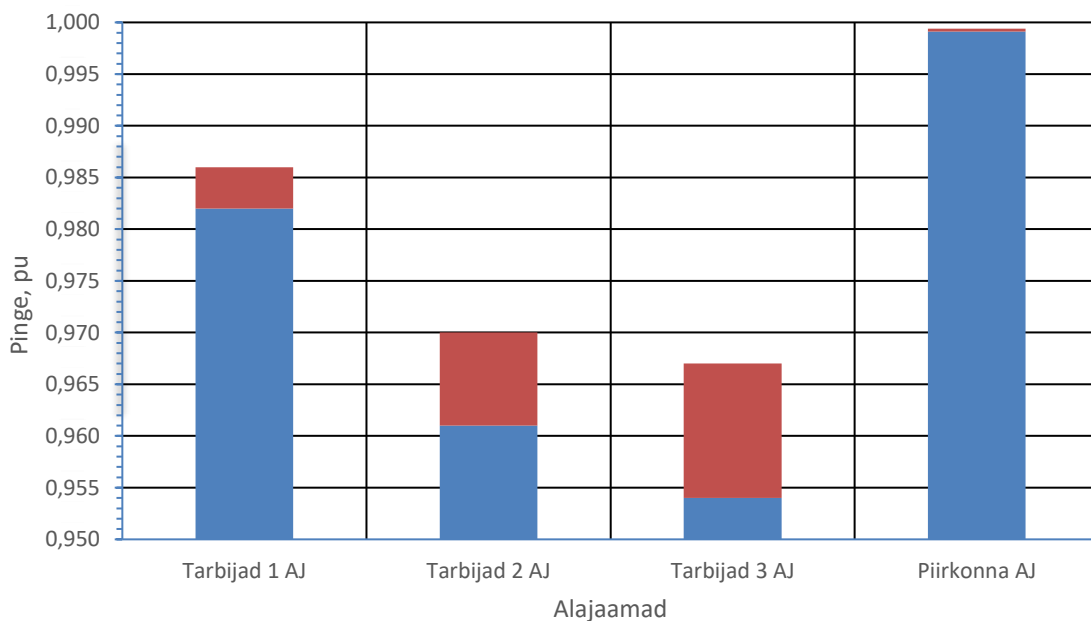
Esmane mõju, kui tootmiseseade lisati võrku tootma üksnes maksimaalselt nimiaktiivvõimust, oli õhuliinijuhtmetes koormuste märgatav vähenemine ja mõningane pingetõus igas jaotusalajaamas. Selline tulemus oli ootuspärane, kuna kohalik elektrienergia tootmine katab kohalike tarbijate koormused ning seetõttu vähenes piirkonnaalajaamast tarbitav võimsus. Täiendav elektrimootorjõud peabki fiidris mingil määral pinget tõstma. Koostatud mudelite põhjal oli pinge suurim stsenaariumis, kus tootmiseseade genereeris

elektrivõrku aktiivvõimsust 0,76 MW ja genereeris reaktiivvõimsust 0,22 Mvar. Vastav mudeli olukord on joonisel 3.5



**Joonis 3.5 Hajaasustusega piirkonna modelleerimise tulemused kui tootmiseseade on liitunud alajaama Tarbijad 2 ning genereerib võrku 0,22 Mvar**

Maksimaalse pingemuutuse leidmiseks arvutati tabelarvutusprogrammi Excel abiga pingemuutuste juurdekasvud baasolukorra vastu. Enim pingemuutusi tekitanud stsenaariumite tulemused koondati joonisele 3.6.



**Joonis 3.6 Maksimaalsed pingemuutused hajaasustusega piirkonnas iga alajaama kohta**

Joonise 3.6 põhjal selgus, et maksimaalne pinge muutus oli suurim stsenaariumis, kus fiidri lõpus paiknevas alajaamas Tarbijad 3, milles määrati tootmiseseadmele reaktiivvõimsuse genereerimine võimsusteguril  $\cos +0,95$ . Sellise stsenaariumi korral tõusis alajaamas pinge 0,013 pu, mida võib pidada võrdlemisi väikseks pinge tõusuks. Alajaamades Tarbijad 1 ja 2 oli mõju kriteeriumil  $\cos +0,95$  samuti olemas.

Võrreldes iga stsenaariumi pinge muutusi üksnes piirkonnaalajaamas võib järeldada, et stsenaariumite koostamisel tehtud eelduste ja parameetrite korral olid pinge muutused küll olemas, kuid pigem tagasihoidlikud. Kokkuvõttes on 10 km keskpingefiidris hajaasustusega piirkonnas, pinge fiidri lõpus alati madalam kui fiidri alguses ja seda peamiselt õhuliinijuhtme takistuse tõttu. Seega võiksid jaotusvõrguettevõtjad kasutada inverteripõhist tootmiseseadet pinge reguleerimiseks hajaasustusega piirkonnas. Genereeriva üksuse lisamine vähendab elektrisüsteemist üle kantavat aktiiv- ja reaktiivvõimsust ning vähendab koormusvoolusid liinides, mis aitab kaasa fiidris pinge tõusule. Täpsemad mudelid hajaasustusega piirkonna kohta on lisas L.1.

### **3.3. Tootmiseseadmega pinge reguleerimine keskpingefiidris linnapiirkonna näitel**

Linnapiirkonna kohta koostati mudelid, kus asus samuti kolm 20,5/0,410 kV alajaama ning kuhu ühendati erinevat tüüpi tarbijad näiteks korterelamud, koolid, eramajad ja suured ettevõtted. Linnapiirkonna aluseks võeti sama keskpingefiider mis joonisel 3.2. Mudelis kasutatavate linnapiirkonna alajaamade koormused, reaktiivvõimsuse tarve ja  $\cos \varphi$  väärtused on toodud tabelisse 3.7.

***Tabel 3.7 Mudelis kasutava linnapiirkonna tarbimisvõimused ning latipinged***

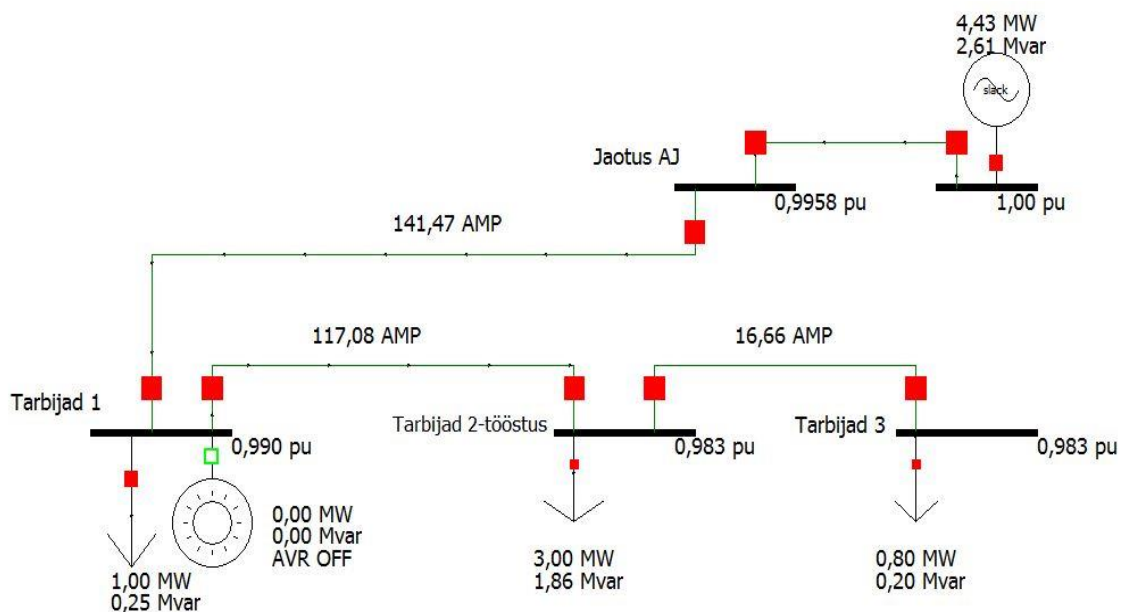
| <b>Alajaam</b>     | <b>P, MW</b> | <b>Q, Mvar</b> | <b>cos <math>\varphi</math></b> | <b>baaspinge, kV</b> |
|--------------------|--------------|----------------|---------------------------------|----------------------|
| Tarbijad 1         | 1            | 0,25           | 0,97                            | 20,5                 |
| Tarbijad 2-tööstus | 3            | 1,86           | 0,85                            | 20,5                 |
| Tarbijad 3         | 0,8          | 0,20           | 0,97                            | 20,5                 |

Fiidris paiknevad alajaamad ühendati mudelis 20 kV keskpinge maakaabliga AXLJ-TT 14/24 kV juhtmega 3x150/25, mille mille aktiiv- ja reaktiivtakistuse parameetrid on võetud allikast [23]. Linnapiirkonnas kasutatud liinide mark, takistused ja pikkused on toodud tabelisse 3.8.

**Tabel 3.8 Linnapiirkonna keskpinge maakaabli parameetrid**

| Liin | Kaabli mark         | r, $\Omega/\text{km}$ | x, $\Omega/\text{km}$ | l, km |
|------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| L1   | AXLJ-TT<br>3x150/25 | 0,206                 | 0,10                  | 2     |
| L2   | AXLJ-TT<br>3x150/25 | 0,206                 | 0,10                  | 3     |
| L3   | AXLJ-TT<br>3x150/25 | 0,206                 | 0,10                  | 1     |

Mudelis määrati linnapiirkonnas lühivoolu väärtuseks 5900 amprit ja sellisele lühisvoolule vastava võrgutakistuse korral  $r=0,4758 \Omega/\text{km}$  ja  $x=6,9406 \Omega/\text{km}$ . Linnapiirkonna algolukorra mudel on joonisel 3.7.



**Joonis 3.7 Baasolukord linnapiirkonnas ilma tootmiseseadmeta**

Tootmiseseadme asukoha ja võimsusteguri  $\cos \varphi$  muutmisel saadud pingete muutuste hindamiseks koondati mudelist saadud tulemused alajaamade kaupa tabelitesse 3.9, 3.10 ja 3.11.

**Tabel 3.9 Pinge muutused piirkonnaalajaamas ja liitumispunkti alajaamas Tarbijad 1 linnapiirkonnas olukorras, kus tootmisseade oli liitunud alajaama Tarbijad 1**

| <b>cos φ</b> | <b>Tarbijad 1 latipinge, pu</b> | <b>Piirkonna AJ latipinge, pu</b> |
|--------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| 1            | 0,985                           | 0,9991                            |
| 0,95         | 0,986                           | 0,9993                            |
| -0,95        | 0,984                           | 0,9989                            |
| 0,9          | 0,986                           | 0,9993                            |
| -0,9         | 0,984                           | 0,9989                            |
|              |                                 |                                   |
| Max          | 0,986                           | 0,9993                            |
| Min          | 0,984                           | 0,9989                            |
| Max muutus % | 0,406                           | 0,02                              |
| Min muutus % | 0,203                           | 0,020                             |

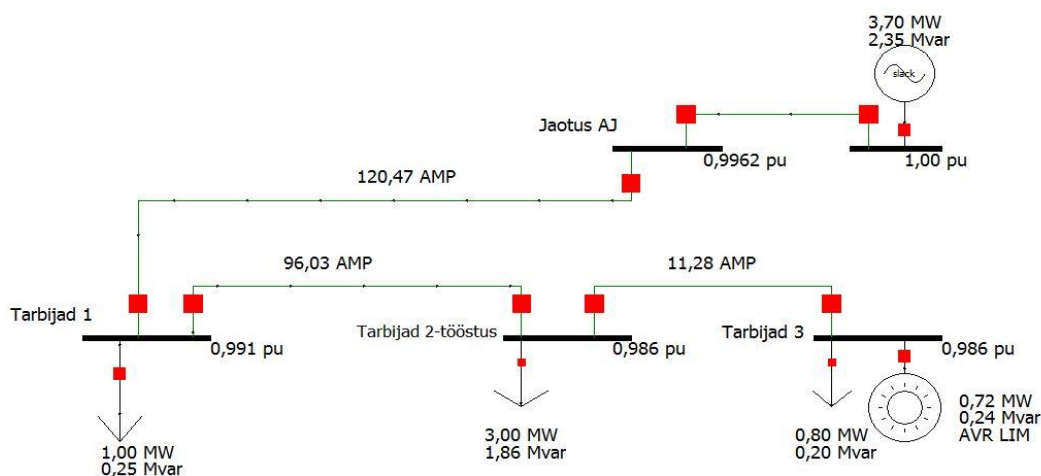
**Tabel 3.10 Pinge muutused piirkonnaalajaamas ja liitumispunkti alajaamas Tarbijad 2 linnapiirkonnas olukorras, kus tootmisseade oli liitunud alajaama Tarbijad 2**

| <b>cos φ</b> | <b>Tarbijad 2 latipinge, pu</b> | <b>Piirkonna AJ latipinge, pu</b> |
|--------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| 1            | 0,986                           | 0,9959                            |
| 0,95         | 0,986                           | 0,9959                            |
| -0,95        | 0,985                           | 0,9956                            |
| 0,9          | 0,986                           | 0,9962                            |
| -0,9         | 0,986                           | 0,995                             |
|              |                                 |                                   |
| Max          | 0,986                           | 0,9962                            |
| Min          | 0,985                           | 0,995                             |
| Max muutus % | 0,30                            | 0,04                              |
| Min muutus % | 0,203                           | 0,080                             |

**Tabel 3.11 Pinge muutused piirkonnaalajaamas ja liitumispunkti alajaamas Tarbijad 3 hajaasutusega piirkonnas olukorras, kus tootmiseseade oli liitunud alajaama Tarbijad 3**

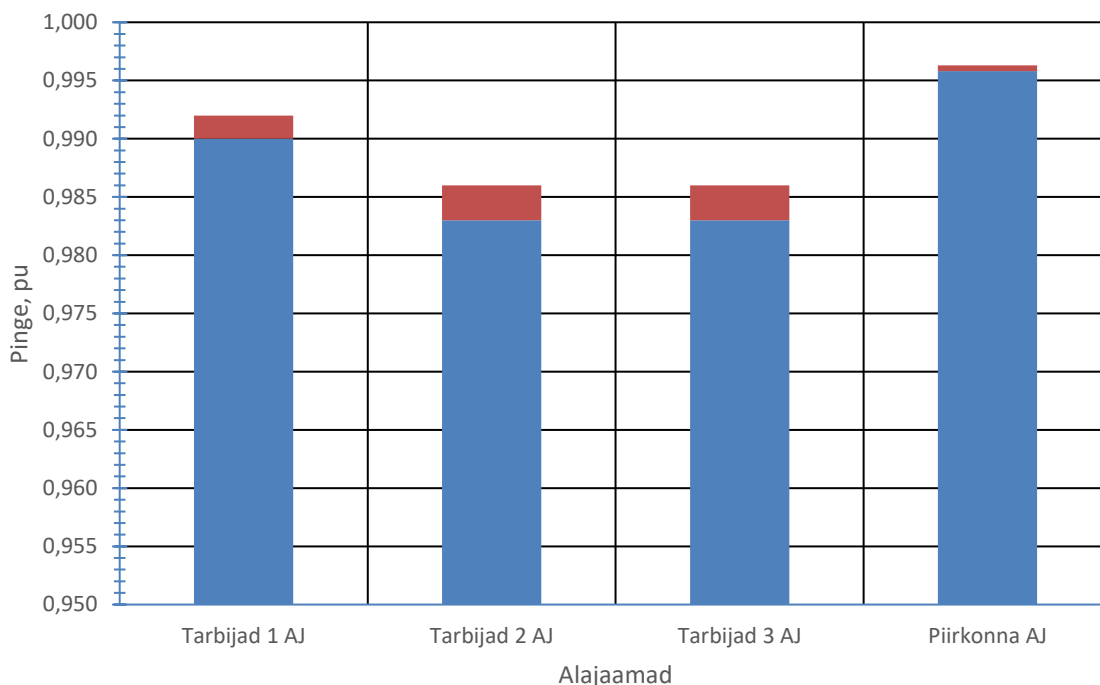
| $\cos \varphi$ | Tarbijad 2 latipinge, pu | Piirkonna AJ latipinge, pu |
|----------------|--------------------------|----------------------------|
| 1              | 0,986                    | 0,9959                     |
| 0,95           | 0,986                    | 0,9959                     |
| -0,95          | 0,985                    | 0,9956                     |
| 0,9            | 0,986                    | 0,9962                     |
| -0,9           | 0,986                    | 0,995                      |
|                |                          |                            |
| Max            | 0,986                    | 0,9962                     |
| Min            | 0,985                    | 0,995                      |
| Max muutus %   | 0,30                     | 0,04                       |
| Min muutus %   | 0,203                    | 0,080                      |

Tabelitest 3.9, 3.10 ja 3.11 selgus, et pingete mõju erinevates alajaamades, kuhu tootmiseseade lisati oli maksimaalselt 0,3 protsenti. Sellest järeldus, et üksiku tootmiseseadme lisamine keskpingefiidrile ei oma suurema koormuse ja lühisvõimsusega võrgus sellist mõju kui hajaasustusega piirkonnas. Ühtlasi ei muuda erinevate pinge reguleerimise funktsioonide kasutamine antud mudelis oluliselt alajaamade latipingeid. Näiteks ei tõusnud pinge oluliselt ka stsenaariumis kus lisati tootmiseseade fiidri lõppu tootma reaktiivvõimsust 0,24 Mvar. Vastava stsenaariumi tulemus joonisel 3.8.



**Joonis 3.8 Hajaasustusega piirkonna modelleerimise tulemused kui tootmiseseade on liitunud alajaama Tarbijad 3 ning genereerib võrku 0,24 Mvar**

Linnapiirkonna pinge muutuste välja toomiseks koostati joonis 3.9, millelt on näha maksimaalsed pinge muutused suurimat muutust põhjustatud stsenaariumi korral. Mõningast mõju on märgata siis kui tootmiseseade on liitunud fiidri lõpus olevatesse alajaamadesse Tarbijad 2 ja 3.



**Joonis 3.9 Linnapiirkonna maksimaalsed pinge muutused suhteühikutes alajaamade lattidel**

Kokkuvõttes järeldus, et tootmiseseadme lisamisel linnapiirkonna alajaamades on pinge muutused kõikides alajaamades väiksemad kui hajaasustusega piirkonnas. Peamiselt seetõttu, et linnapiirkonnas on võrgus koormused suuremad, fiidrid lühemad ning lühisvõimsus suurem. Selgus, et üksiku tootmiseseadme lisamine lõputöös koostatud linnapiirkonna fiidrisse olulist mõju alajaamade latipingetele ei omanud. Täpsemad mudelid linnapiirkonna kohta on lisas L.2.

### **3.4. Tootmiseseadmega keskpingefiidris pinge reguleerimine äärmuslikes olukordades arvestades üleeuroopalisi võrgueeskirju**

Lõputöö raames uuriti lisaks, millist pingejuhtimise tuge võiksid tootmiseseadmed pakkuda tulevikus jaotusvõrguettevõtjatele. Selle hindamiseks võeti aluseks 2019. aastal Eestis rakenduva üleeuroopalise tootmiseseadmete võrgueeskirja nõuded ehk RfG. RfG annab võrguettevõtjatele õiguse määrata oma võrku liituvatele tootmiseseadmetele

reaktiivvõimsuse genereerimise ja tarbimise võimekuse. Lõputöö käigus tehti selliste mudelite koostamisel eeldus, et Eesti jaotusvõrguettevõtjad määravad uutele tootmiseademetele maksimaalse reaktiivvõimsuse tootmise võimekuse, mis on vastavalt RfGs toodud nõuetele energiapargimoodulitel  $Q/P_{\max}$  suhtel 0,65 pu ning suurim erinevus maksimaalse ja minimaalse reaktiivvõimsuse kohta võib olla kuni 0,8 suhteühikut. Sellest lähtuvalt saab mudelisse lisatud tootmiseseade maksimaalselt tarbida reaktiivvõimsust  $Q/P_{\max}$  suhtele -0,15 pu. Antud stsenaariumite kohta koostatud mudelitesse lisati pingete mõju täiendavaks uurimiseks kaks inverteripõhist tootmiseseadet, millest üks on nimiaktiivvõimsusega 0,5 MW ja teine 1 MW. Mudelis muudeti võrgus koormused maksimaalseks, mida fiidril olevad õhuliinijuhtmed ja maakaablid võimaldasid. Lisaks eeldati antud stsenaariumeid koostades, et jaotusvõrguettevõtjad kasutavad pingereguleerimist olukorras, kus mingil põhjusel on võrgupinge lubatud maksimaalse või minimaalse pingel lähedal, mida võrguseadmed ja releekaitse lubavad. Pinge muutuste paremaks hindamiseks muudeti jaamade asukohtasid fiidris ning kontrolliti mõlema tootmiseseadme mõjusid fiidri pingetele. Stsenaariumid on toodud tabelitesse 3.12 ja 3.13

**Tabel 3.12 Stsenaariumid võrgu olukorras, kus piirkonnaalajaama latipinge on lubatud pingmaksimumil**

| <b>Stsenaariumi kirjeldus</b>   |
|---|
| Algne olukord ilma tootmiseseadmeta                                   |
| Tootmiseseadmed alajaamadesse 2 (1MW) ja 3 (0,5 MW) ning P ja Q- max  |
| Tootmiseseadmed AJ 1 (1 MW) ja 3 (0,5 MW) ning P ja Q- max            |
| Tootmiseseadmed AJ 2 (0,5 MW) ja 3 (1 MW) ning P ja Q- max            |
| 0,5 MW tootmiseseade AJ 1 ja 1 MW tootmiseseade 3 AJ ning P ja Q- max |
| 0,5 MW tootmiseseade AJ 1 ja 1 MW tootmiseseade AJ 3 P ja Q=0         |

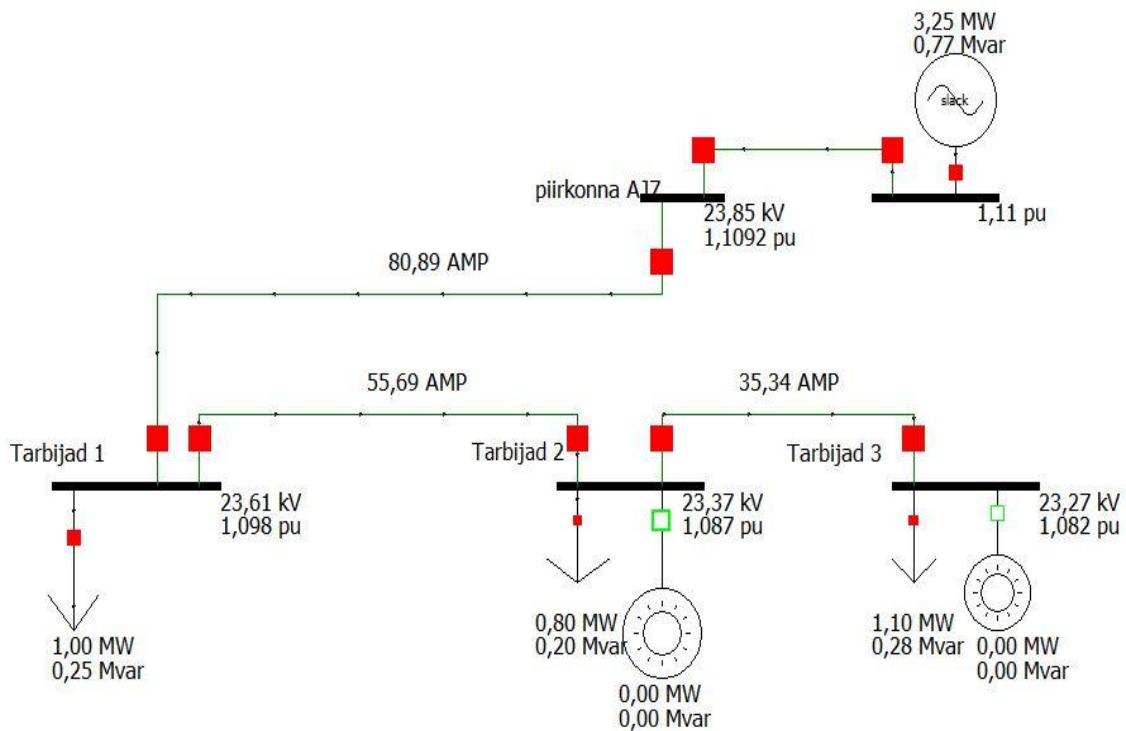
**Tabel 3.13 Stsenaariumid võrgu olukorras, kus piirkonnaalajaama latipinge on lubatud pingmiinimumil**

| <b>Stsenaariumi kirjeldus</b>   |
|---|
| Algne olukord ilma tootmiseseadmeta   |
| Tootmiseseade 1 MW AJ 1 P max ja Q=0  |
| Tootmiseseade 1 MW AJ 1 P max ja Q=0,650 Mvar   |
| Tootmiseseade 0,5 MW AJ 1 P max ja Q=0,32 Mvar  |
| Tootmiseseade 0,5 MW AJ 1 P max ja Q=0  |
| Tootmiseseade 0,5 MW AJ 1 P max ja Q=0,32 Mvar  |
| Tootmiseseade 1 MW AJ 2 P max ja Q=0,65 Mvar  |
| Tootmiseseade 1 MW AJ 2 P max ja Q=0,65 Mvar ja TS2 AJ 3 0,5 MW AJ 1 P max ja Q=0,32 Mvar |
| Tootmiseseade 0,5 MW AJ 3 P max ja Q=0,32 Mvar  |

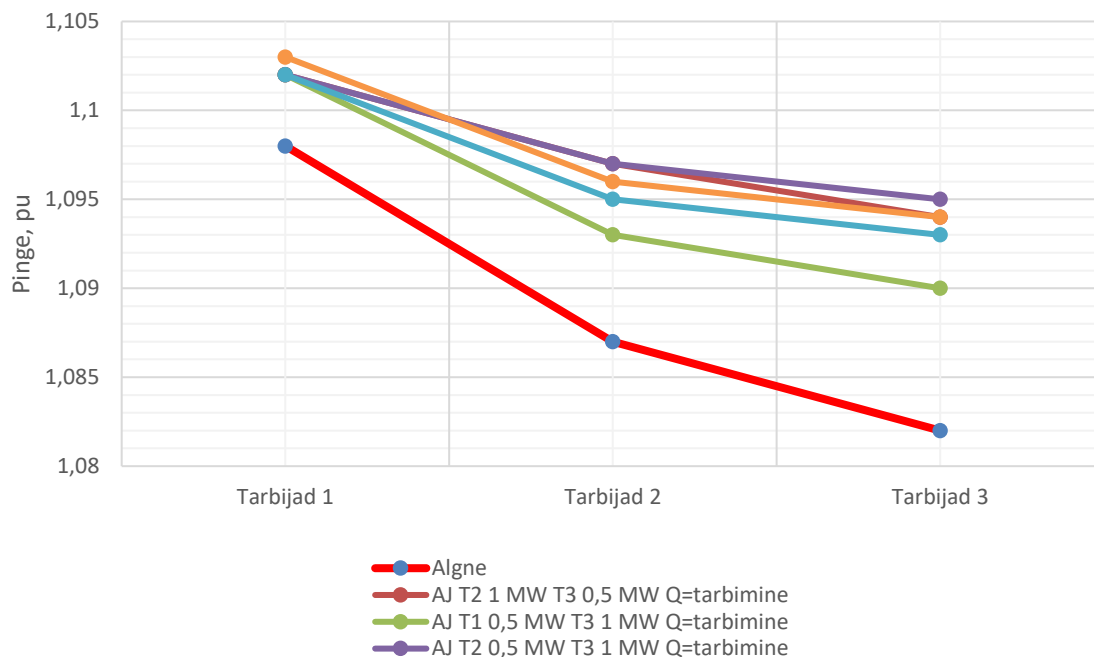


### 3.4.1 Hajaasustusega piirkonnas pinge muutused kahe tootmiseadmega arvestades RfG nõudeid

Hajaasustusega piirkonna fiidri kogupikkuseks oli 10 km, millel esimene alajaam asub nelja kilomeetri kaugusel, teine alajaam seitsme kilomeetri kaugusel ning fiidri lõpus kolmas kümne kilomeetri kaugusel piirkonnaalajaamast. Õhuliini juhtmena kasutati isoleeritud õhuliinijuhet Sax-50. Stsenaariumites võeti alajaamades baaspingeks 21,5 kV, mis on 1 pu ning pinged tõsteti kogu mudelis 1,11 suhteühikule ehk maksimaalsele püsivalt lubatud tasemele. Lisatud tootmiseadmete maksimaalsed reaktiivvõimsuse genereerimised on 1 MW tootmiseadme korral 0,65 Mvar ja 0,5 MW jaama korral 0,32 Mvar. Koostatud stsenaariumite eesmärk oli kirjeldada võimalikke pinge muutusi ning teha järeldusi, kas kahe tootmiseadmega ning uut RfG-d arvestades oleks otstarbekas kasutada tootmiseadmeid pinge reguleerimiseks avariiolukordades. Algne olukord on vastavatel joonistel märgitud punase joonega ning sellise stsenaariumi korral on tegemist võrgu olukorraga, mis oli joonisel 3.10 Hajaasustusega piirkonna pinge muutused maksimaalse võrgupinge korral koos stsenaariumite kirjeldusega on toodud joonistel 3.11.

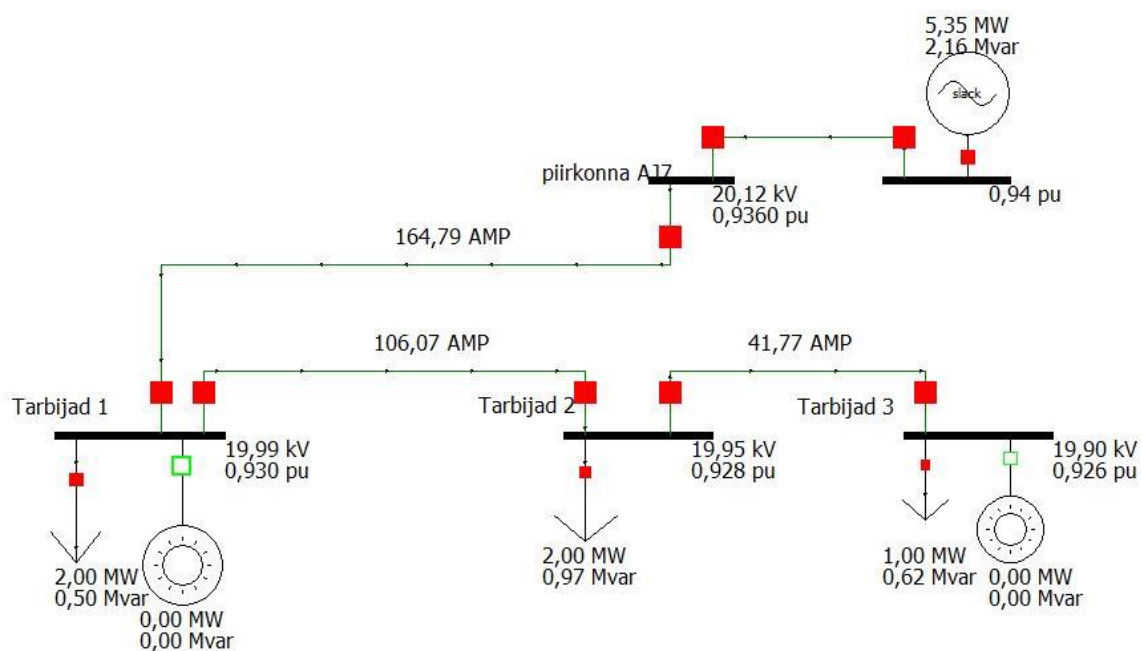


Joonis 3.10 Algne mudeli olukord pinge maksimumi korral hajaasustusega piirkonnas

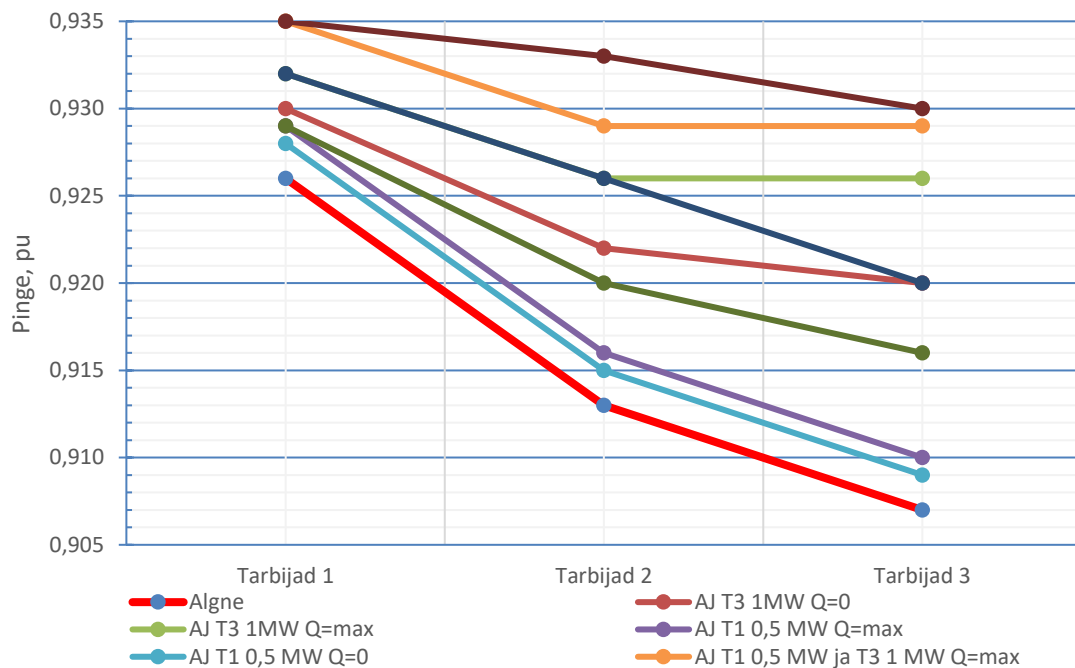


**Joonis 3.11 Tootmisseadmega pinge reguleerimine lubatud pingemaksimumi korral hajaasustusega piirkonnas, arvestades RfG-s lubatud maksimaalset reaktiivvõimsuse tarbimist**

Pingemiinimum stsenaariumil muudeti mudelis piirkonnaalajaamas latipinget 0,94 pu-le. Hajaasustusega piirkonna pinge muutused minimaalse võrgupinge korral koos stsenaariumite kirjeldusega on toodud joonistel 3.12 ja 3.13.



**Joonis 3.12 Algne mudeli olukord pingemiinimumi korral hajaasustusega piirkonnas**



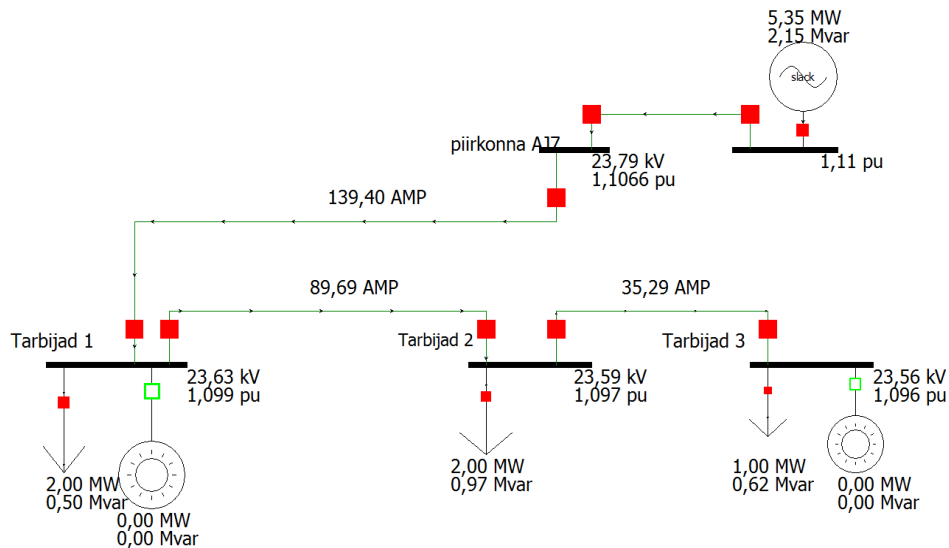
**Joonis 3.13 Tootmiseseadmega pinge reguleerimine lubatud pingemiinimumi korral hajaasustusega piirkonnas, arvestades RfG-s lubatud maksimaalset reaktiivvõimsuse genereerimist**

Hajaasustusega piirkonna mudelite hindamisel selgus, et suurim muutus esines pinge miinimumi stsenaariumites olukorras, kus täiendavad tootmiseseadmed on lisatud alajaamadesse 2 ja 3 ning nende võrku genereeritav reaktiivvõimsus on maksimaalne. Sellise stsenaariumi korral tõuseb pinge neis alajaamades 0,023 pu, mis on peaaegu 0,5 kV, millest on pinge miinimumi olukorras oluline mõju võrgupinge suurendamiseks. Hinnates pinge muutuse mõju pinge maksimum stsenaariumite kohta selgus, et pinge muutusele ei ole mõju nii märkimisväärne kui pinge miinimumide stsenaariumites. Selliste stsenaariumite puhul pinged pigem tõusid, kuigi tootmiseseadmed tarbisid reaktiivvõimsust. Kuna aga tootmiseseadmed töötasid maksimaalse võimsusega, tõusid kõikides alajaamades pinged, mistõttu lubatud maksimumpinge olukordades mudelisse lisatud tootmiseseadmetest pinge allareguleerimise tugi puudus. Täpsemad mudelid hajaasustusega piirkonna pingemiinimumi ja -maksimumi kohta on lisas L.3. ja L.4.

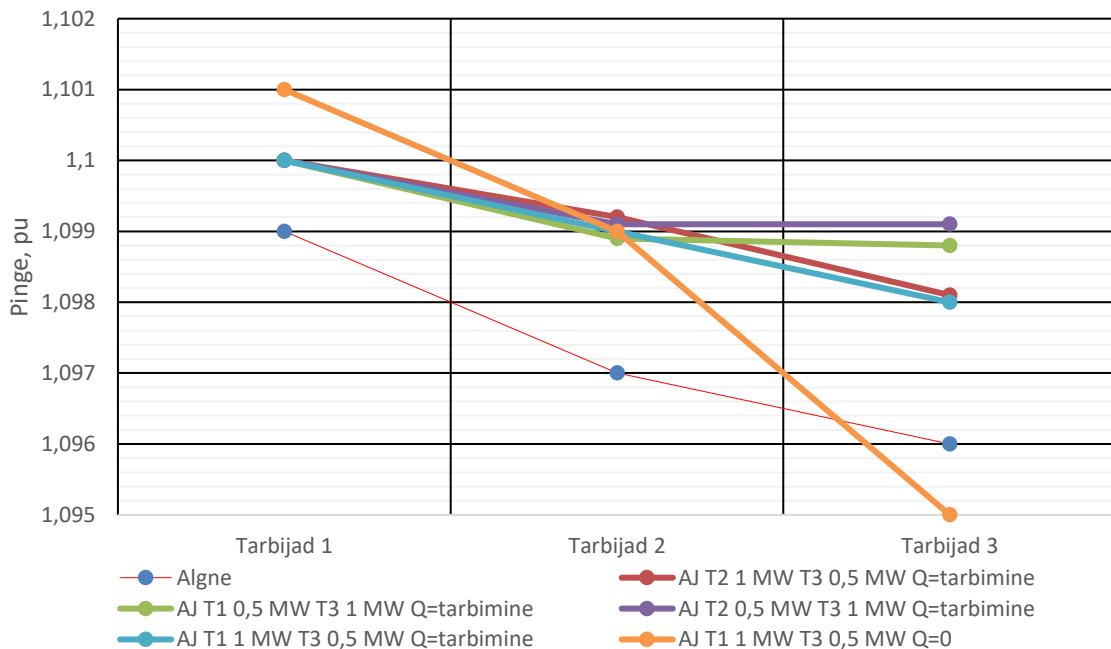
### 3.4.2 Pinge muutused kahe tootmiseseadmega linnapiirkonnas arvestades RfG nõudeid

Linnapiirkonna stsenaariumite fiidri kogupikkuseks määrati 5 km, millel esimene alajaam asus kahe kilomeetri kaugusel, teine alajaam kolme kilomeetri kaugusel ja fiidri lõpus kolmas alajaam viie kilomeetri kaugusel piirkonnaalajaamast. Fiidris kasutati maakaablit

AXLJ-TT 14/24 kV juhtmega 3x150/25 ning alajaama baaspingeks määrati 21,5 kV, mis on mudelis kui 1 pu. Linnapiirkonnas viidi fiidri pinged samuti lubatud maksimaalse lähedale ehk 1,1 pu nimipingest. Tootmisoadmete lisamisel ja neis reaktiivvõimsuse tarbimine on 1 MW tootmisoadme korral -0,15 Mvar ja 0,5 MW jaama korral -0,08 Mvar. Võrguolukord ilma tootmisoadmeid lisamata on joonisel 3.14. Linnapiirkonna pinge muutused maksimaalse võrgupinge korral koos stsenaariumite kirjeldusega on toodud joonisel 3.15.

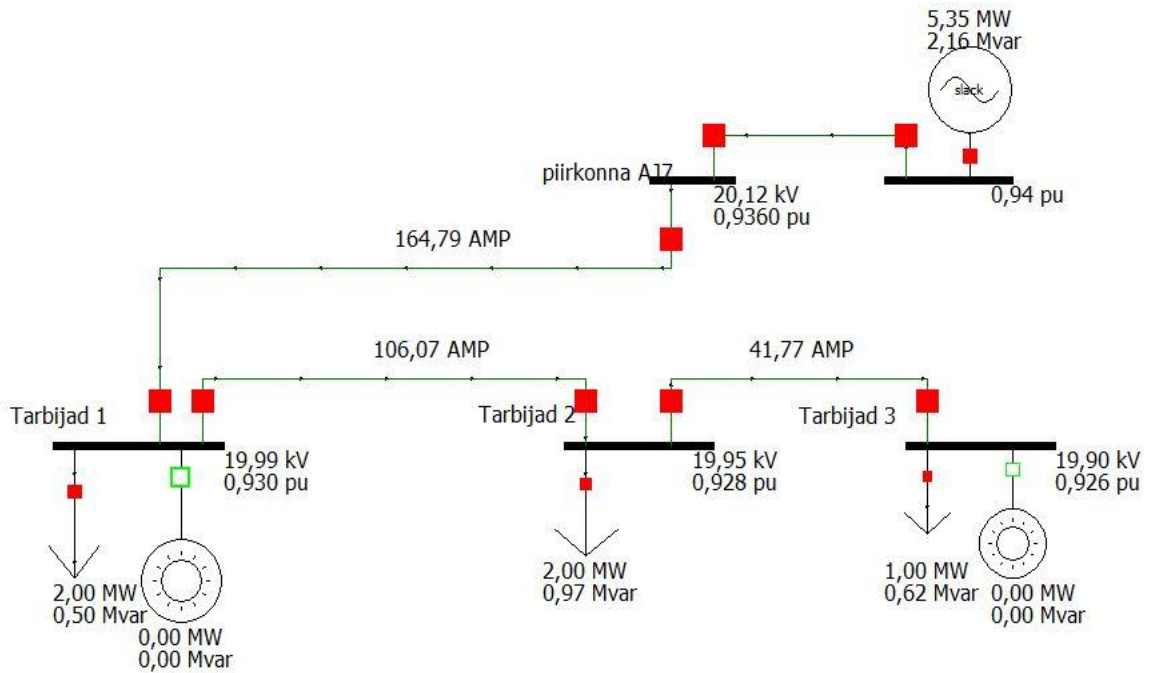


**Joonis 3.14** Algne mudeli olukord pingemaksimumi korral linnapiirkonnas

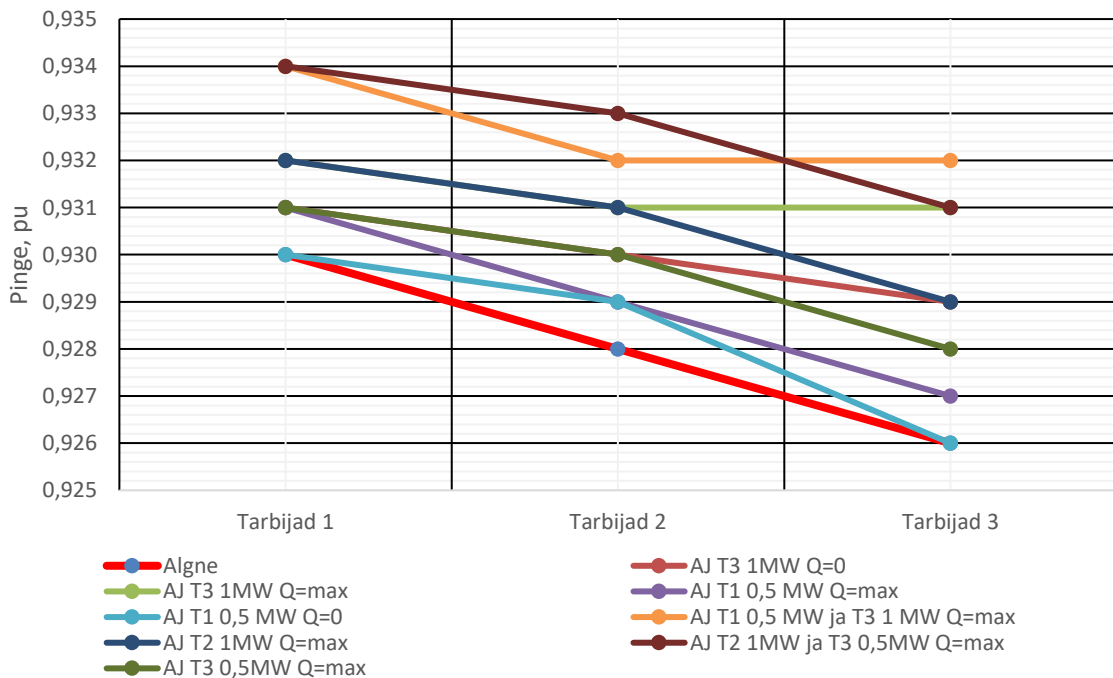


**Joonis 3.15** Tootmisoadmepinge reguleerimine lubatud pingemaksimumi korral linnapiirkonnas, arvestades RfG-s lubatud maksimaalset reaktiivvõimsuse tarbimist

Linnapiirkonna pinge muutused minimaalse võrgupinge korral koos stsenaariumite kirjeldusega on toodud joonistel 3.16 ja 3.17.



**Joonis 3.16** Algne mudeli olukord pingete miinimumi korral linnapiirkonnas

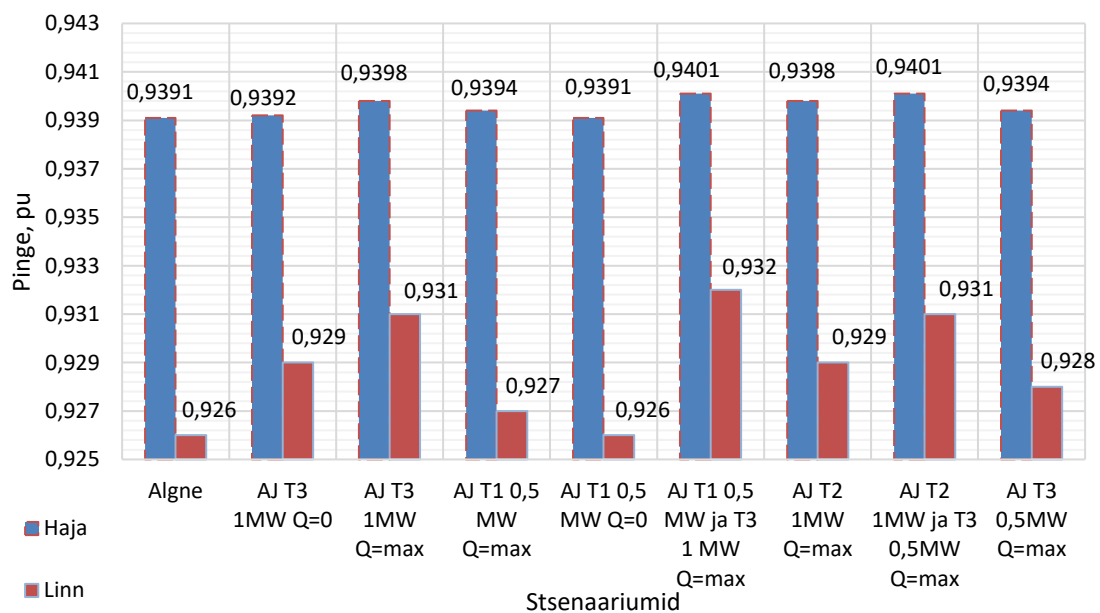


**Joonis 3.17** Tootmisestadmega pinge reguleerimine lubatud pingemaksimumi korral linnapiirkonnas, arvestades Rfg-s lubatud maksimaalset reaktiivvõimsuse tarbimist

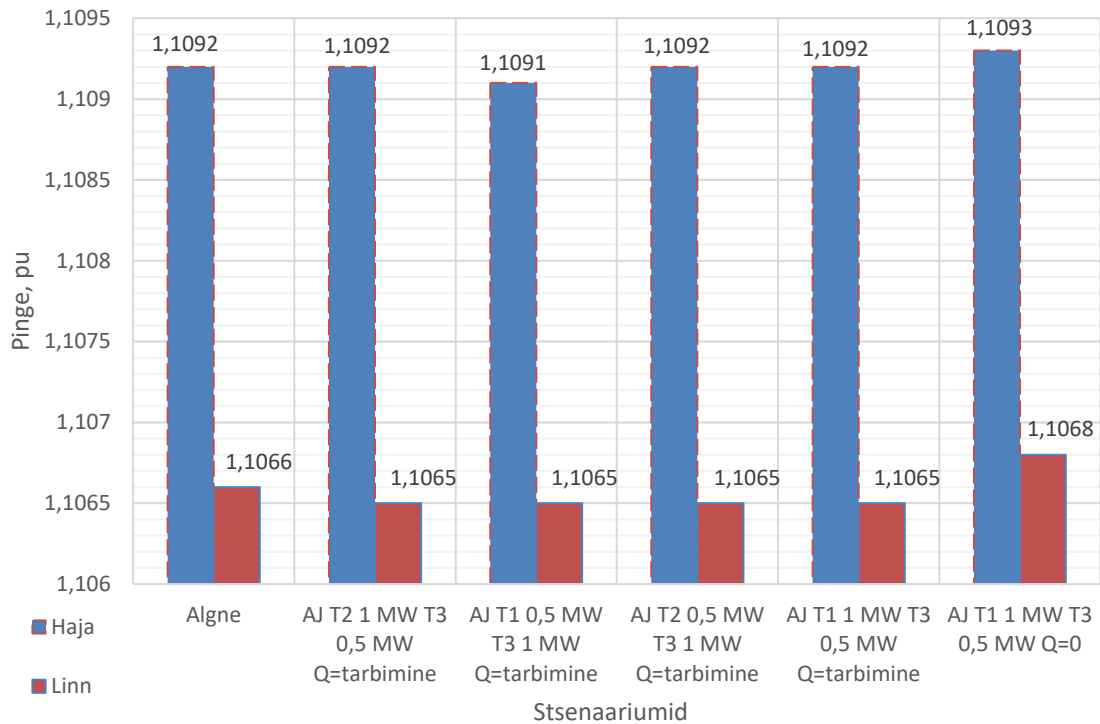
Linnapiirkonna kohta koostatud mudelitest on näha, et tootmisseedmete mõju erinevate koostatud stsenaariumite korral on alajaama lattidele praktiliselt olematu. Pinge tõusis kõige rohkem alajaamas Tarbijad 3 pingemiinimum stsenaariumi korral, kuid muutused pole suuremad kui 0,07 pu ehk 0,13 kV. Seega pingemiinimumi stsenaariumite põhjal saab tootmisseedmetega linnavõrgus pinget pisut tõsta, kuid muutus on väga väike. Pingemaksimumi stsenaariumite tulemustest järeldus, et mõju pinge muutustele praktiliselt ei ole kuigi pinge tõuseb pisut, kuna tootmisseedmed genereerivad võrku maksimaalset aktiivvõimsust. Täpsemad mudelid linnapiirkonna pingemiinimumi ja -maksimumi kohta on lisas L.5. ja L.6.

### 3.4.3 Pinge muutused piirkonnaalajaamas erinevate stsenaariumite korral

Täiendavalt võrreldi veel linna ja maapiirkonna mudelist saadud piirkonnaalajaama latipingeid. Eesmärk oli hinnata kas tootmisseedmetega pinge reguleerimine omab olulist mõju piirkonnaalajaama lattidele. Tulemused on toodud joonistele 3.18 ja 3.19. Joonistel on x-teljele kantud stsenaariumid ja y-teljele vastavad pinge väärtused suhteühikutes



**Joonis 3.18 Tootmisseedmetega pinge reguleerimine pingemiinimumi korral hajaasustusega ja linnapiirkonna stsenaariumil**



***Joonis 3.19 Tootmiseseadmetega pinge reguleerimine pingemaksimumi korral hajaasustusega ja linnapiirkonna stsenaariumil***

Joonistelt 3.18 ja 3.19 on näha, et enim muutus pinge hajaasustusega piirkonnas madala pingega olukorras, kus iga stsenaariumil esines pinge muutusi ka piirkonna alajaamas. Linnapiirkonnas pinge muutusi piirkonnaalajaamas praktiliselt ei esinenud, vastavad muutused olid väga väikesed, enamasti baasolukorrast kuni 0,002 pu suuremad või väiksemad, millest järeldub, et mõju praktiliselt puudub.

Kõiki mudeleid vaadeldes võib tõdeda, et tootmiseseadmetele võiks määrata RfG-s maksimaalselt lubatud reaktiivvõimsuse tootmise kriteeriumi. Vastavate tootmiseseadmete reaktiivvõimsust võiksid jaotusvõrguettevõtjad kasutada hajaasustusega piirkondades ehk kohtades, kus koormused on madalad, fiidrid pikad ning elektrisüsteemi häiringute korral pinged lubatud kriitilistele piiridele ka lähemad kui linnapiirkonnas. Võimalusel võiksid sellist lähenemist arvesse võttes jaotusvõrguettevõtjad motiveerida tootjaid liituma fiidri lõpus olevatesse alajaamadesse.

## Lõputöö kokkuvõte

Antud lõputöö eesmärk oli uurida jaotusvõrkudes inverteripõhiste tootmiseseadmetega pingereguleerimise võimalusi. Töö koostamisel eeldati, et jaotusvõrguettevõtjad kasutavad tulevikus oma võrku liitunud tootmiseseadmeid pingereguleerimiseks keskpingses jaotusvõrgus. Eeldus põhineb asjaolul, et juba täna peavad kõik üle 200 kW tuule- ja päikeselektrijaamad olema võimelised osalema pingereguleerimisel ning aasta aastalt seda tüüpi tootmiseseadmete liitumine suureneb.

Töö esimeses peatükis antakse ülevaade pingeklassidest ja pingereguleerimise olulisusest elektrisüsteemides ning kirjeldatakse üldiselt seadmeid, millega võrguettevõtjad elektrisüsteemis pinget reguleerivad. Teises peatükis kirjeldatakse võrgueeskirjas ja üleeuroopalises tootmiseseadmete ühendamise võrgueeskirjas kehtivaid nõudeid pingereguleerimisele jaotusvõrku liituvatele tootmiseseadmetele. Lisaks kirjeldatakse kirjanduse põhjal lühidalt reaktiivvõimsuse tasustamist teistes riikides. Peatüki lõpus on kokkuvõtte Eestis paiknevate elektrijaamade ja võrguettevõtjate nägemusest reaktiivvõimsuse kasutamise ning reaktiivvõimsusturu kohta. Kolmas peatükk kirjeldab lõputöö käigus koostatud mudeleid, nendes tehtud eeldusi ja stsenaariume, millega teostati võrguarvustused näidiskeskpingses jaotusvõrgus. Mudelitelt saadud tulemused on koondatud tabelitesse ja joonistele ning nende põhjal tehtud järeldused.

Lõputöös selgus, et jaotusvõrguettevõtjad võiksid kasutada maapiirkonnas tootmiseseadmeid pingereguleerimiseks võrgu olukorras, kus pingereguleerimise madalam. Mudelite põhjal selgus, et jaotusvõrguettevõtjatel tasuks kaaluda üleeuroopalistes võrgueeskirjades toodud maksimaalset reaktiivvõimsuse genereerimise väärtust 0,65, mis on tootmismooduli  $Q/P_{\max}$  suhe, ka B-tüüpi energiapargimoodulitele. Lisaks selgus, et hajaasustuses paiknevate tootmisüksusega reaktiivvõimsuse genereerimine vähendab võrgust võetavat reaktiivvõimsust. Seda peamiselt seetõttu, et enamasti paiknevad jaotusvõrgus ka kliendid, kes tarbivad mingil määral reaktiivvõimsust. Ühtlasi pidevalt üksnes reaktiivvõimsust genereeriv seade tõstab alajaamades alati võrgupinget. Seega oleks otstarbekas kasutada tootmiseseadmeid pingereguleerimiseks ilmselt olukorras, kus neid on fiidritel mitu, kuna üksik tootmiseseade ei mõjuta jaotusvõrkudes võrgupinget märkimisväärselt ja seda eriti tugevates võrgusõlmedes, kus lühisvoolud on suured ning tarbimise osakaal suur. Ilmselt oleks jaotusvõrguettevõtjatel otstarbekas kasutada erineva võimsusega tootmiseseadmeid võrgupiirkondades, kus keskpingseliinid on pikad ja koormused madalad.



Edasi tasuks uurida reaktiivvõimsuse tasustamise võimalikkuse kohta, kui jaotusvõrguettevõtjad oleksid huvitatud sellist teenust üldse tootmiseseadme omanikelt hankima. Lõputöö raames läbi viidud vestluste põhjal selgus, et tootjad oleksid sellise teenuse pakkumisest huvitatud, kui võrguettevõtjad tasuksid reaktiivvõimsuse kasutamise eest tasu, mis kataks ära aktiivvõimsuse kaotuse. Tõdeti, et reaalne reaktiivvõimekuse juhtimine võrguettevõtjate poolt on nõuetekohastel elektrijaamadel toimiv ning selle kasutamine ei nõua tootjalt täiendavaid investeeringuid. Võib eeldada, et juhul kui tulevikus on jaotusvõrguettevõtjatel soov välja töötada mõni reaktiivvõimsuse kasutamise tasustamise mehhanism, siis selle peamiseks eelduseks peab olema toimiv konkurents reaktiivvõimsuse pakkumiseks. Teisisõnu tootjatele reaktiivvõimsuse eest tasustamine mehhanismi välja töötamise eelduseks on rohkem kui ühe tootja paiknemine vastava piirkonna alajaama toitel ning jaotusvõrguettevõtjate reaalne huvi tootmiseseadme omanikelt teenuse ostmiseks.

Koostatud lõputöö tulemused ei kajasta konkreetset võrgupiirkonda kuna mudelites kasutatud koormused ei põhine realselt mõõdetud andmetel, kuid antud lõputöö peamine eesmärk oli hinnata, kas ja kui suur mõju on jaotusvõrkudes tootmiseseadmetega pingereguleerimisel. Võimalusel tuleks edasi uurida ja analüüsida, millised on jaotusvõrguettevõtjate kulutused reaktiivvõimsuse kompenseerimise seadmetele, arvestades seadmete soetamise- ja käidukulusid, võrreldes tootmiseseadmetele tasumise mehhanismiga. Lisaks oleks hea teada saada, mis on see piir pingereguleerimise teenusele, alates millest oleksid jaotusvõrguettevõtted huvitatud reaktiivvõimsuse mehhanismi välja töötamisest

#### Kokkuvõtteks

- Võrguettevõtjad võiksid kasutada tootmiseseadmete reaktiivvõimsusega pingereguleerimist hajaasustusega piirkondades. Nõuded võiksid olla jaotusvõrguettevõtjate poolt selgelt määratletud.
- Üleeuroopalise tootmiseseadmete ühendamise võrgueeskirjast lähtuvalt võiksid jaotusvõrguettevõtjad määrata hajaasustusega piirkondadesse maksimaalse reaktiivvõimekuse klass C järgi.
- Reaktiivvõimsuse kasutamise tasustamise mehhanismi puhul võiks rakendada motiveerivat püsitasu või hajatootjate jätkuval liitumisel jaotusvõrkudesse turupõhist mehhanismi.

# Kirjandus

- [1] E. Tiigimägi, „Elektrivõrgud“. Tallinn: TTÜ kirjastus, 1997.
- [2] H. Tammoja, Ü. Treufeldt, J. Kilter, M. Meldorf, „Jaotusvõrgud“. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2007.
- [3] Elering AS, „Ettevõttest“. [Võrgumaterjal]. <https://elering.ee/ettevotest>.
- [4] M. Meldorf, T. Tikk, J. Kilter, „Elektrivõrgu operatiivjuhtimissüsteem“. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2010.
- [5] T. Lehtla, T. Vinnal, „Elektrivarustuse tulevikuvisionid“. TTÜ Kirjastus, 2016.
- [6] J. Kilter, M. Meldorf, „Elektrisüsteemi stabiilsus“. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2011.
- [7] P. Kundur, „Power System Stability and Control“. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [8] K. Janson, A. Kallaste, „Elektrimasinate alused“. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2017.
- [9] A. Kassatkin, „Elektrotehnika“. Tallinn: „Valgus“, 1974.
- [10] Circuit Zoom, „Understanding Active, Reactive and Apparent Power“. [Võrgumaterjal]. <http://www.circuitzoom.com/understanding-active-reactive-apparent-power/>.
- [11] „Reaktiivvõimsuse kompenseerimine Eesti Elektrisüsteemis“. [Võrgumaterjal]. [https://elering.ee/sites/default/files/attachments/20180220\\_reaktiivv%C3%B5imsuse\\_aruanne\\_v2\\_Limited.pdf](https://elering.ee/sites/default/files/attachments/20180220_reaktiivv%C3%B5imsuse_aruanne_v2_Limited.pdf).
- [12] D. Lijie, L. Yang, M. Yiqun, „Comparison of high capacity SVC and STATCOM in real power grid“, Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2010 International Conference on pp. 993-997.
- [13] Vabariigi Valitsuse määrus, „Võrgueeskiri“ 19.02.2016. [Võrgumaterjal]. <https://www.riigiteataja.ee/akt/116022016014>
- [14] UK National Grid, „Grid Code Overview“. [Võrgumaterjal]. <https://www.nationalgrid.com/uk/electricity/codes/grid-code>
- [15] Elering AS, Lõppenud konsultatsioonid- „Määruse 2016/631 siseriiklikult reguleeritavad sätted ja ettepanekud (lõppenud 15.03.2018)“, [Võrgumaterjal], <https://elering.ee/loppenud-konsultatsioonid#tab1>

[16] Euroopa Komisjon, „Komisjoni määrus (EL) 2016/31, 14 aprill 2016, millega kehtestatakse võrgueeskiri elektritootmisüksuste võrku ühendamise nõuete kohta“, [Võrgumaterjal],

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0631&from=EN>

[17] Elering AS, Võrguteenused.“, [Võrgumaterjal], <https://elering.ee/susteemiteenused>

[18] OÜ Elektrilevi, „Hinnakirjad, tingimused, vormid ja aruanded.“, [Võrgumaterjal], <https://www.elektrilevi.ee/abi/hinnakirjad-tingimused-vormid-aruanded>

[19] A. Saraswat, A. Saini, A.K. Saxena, „Reactive Power Management and Pricing Policies in Deregulated Power System: A Global Perspective“, National Conference on Emerging Trends in Electrical, Instrumentation and Communication Engineering (ETEIC), Vol 4 No 7, pp 63-68.

[20] Fingrid Oyj, „Supply of reactive power and maintenance of reactive power reserves.“, [Võrgumaterjal], [https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/en/customers/power-transmission/supply-of-reactive-power-and-maintenance-of-reactive-power-reserves\\_2017.pdf](https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/en/customers/power-transmission/supply-of-reactive-power-and-maintenance-of-reactive-power-reserves_2017.pdf)

[21] National Grid UK, „Reactive power services.“, [Võrgumaterjal], <https://www.nationalgrid.com/uk/electricity/balancing-services/reactive-power-services>

[22] OÜ Elektrilevi, „Aastaga on väikeste elektritootjate arv kasvanud kolmandiku võrra“, [Võrgumaterjal], <https://www.elektrilevi.ee/et/uudised/pressiteated/-/newsv2/2018/02/21/-->  
-----

[23] AS Draka Keila Cabels, „Jõukaablid-AXLJ-TT 14/24 kV (3-juhtmeline)“, [Võrgumaterjal], <http://www.draka.ee/public/product/AXLJ-TT%2014-24%20kV%20%283-core%29%20est.pdf>

[24] Electric Power Research Laboratory (EPRLAB)“ Static Var Compensator (SVC)“ [pilt-Võrgumaterjal], [http://www.eprlab.com/static\\_VAr\\_compensator.html](http://www.eprlab.com/static_VAr_compensator.html)

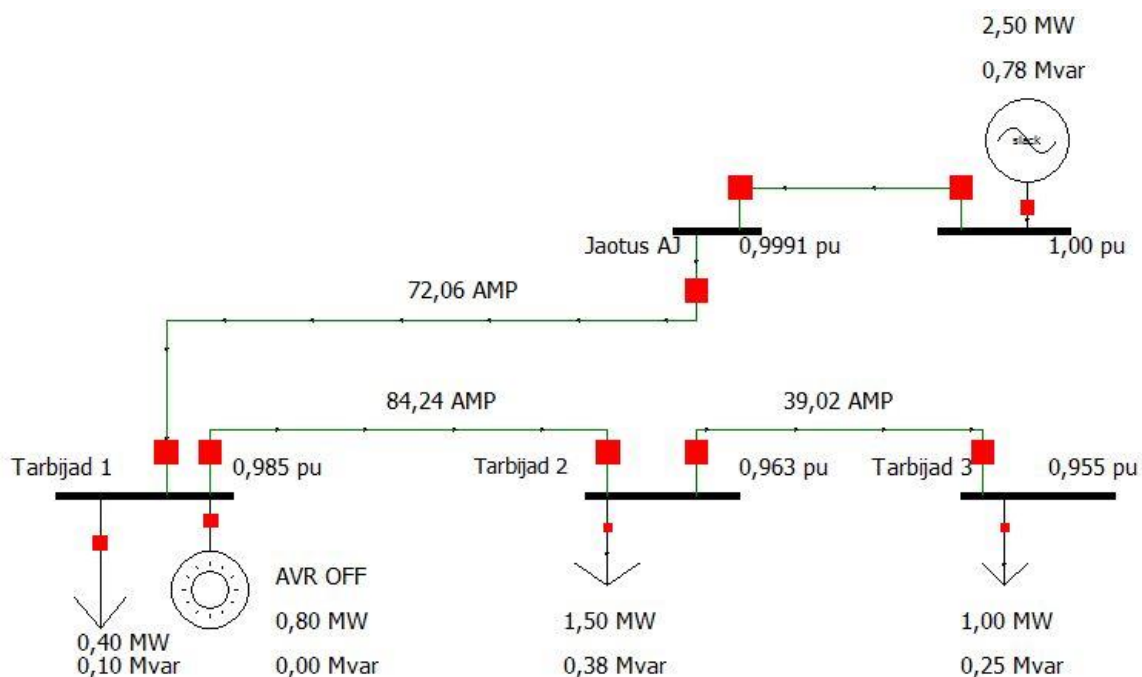
# Lisad

## L.1. Hajaasustusega piirkonna mudelite tulemused

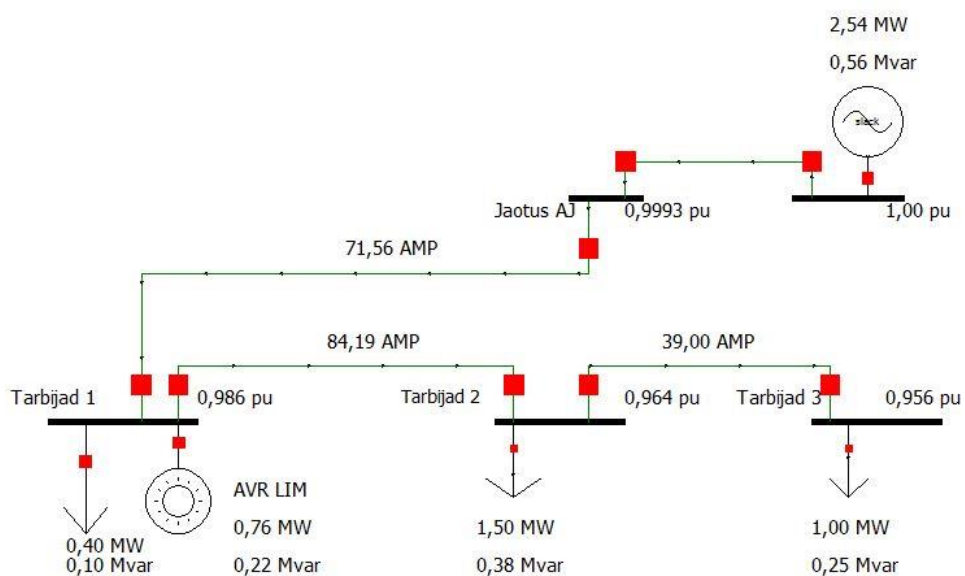
fiider 10 km ilma PV tootmiseta. -n.ö basecase, tootja 3 km alguses fiidri alguses latil 1

On joonisel 3.3.

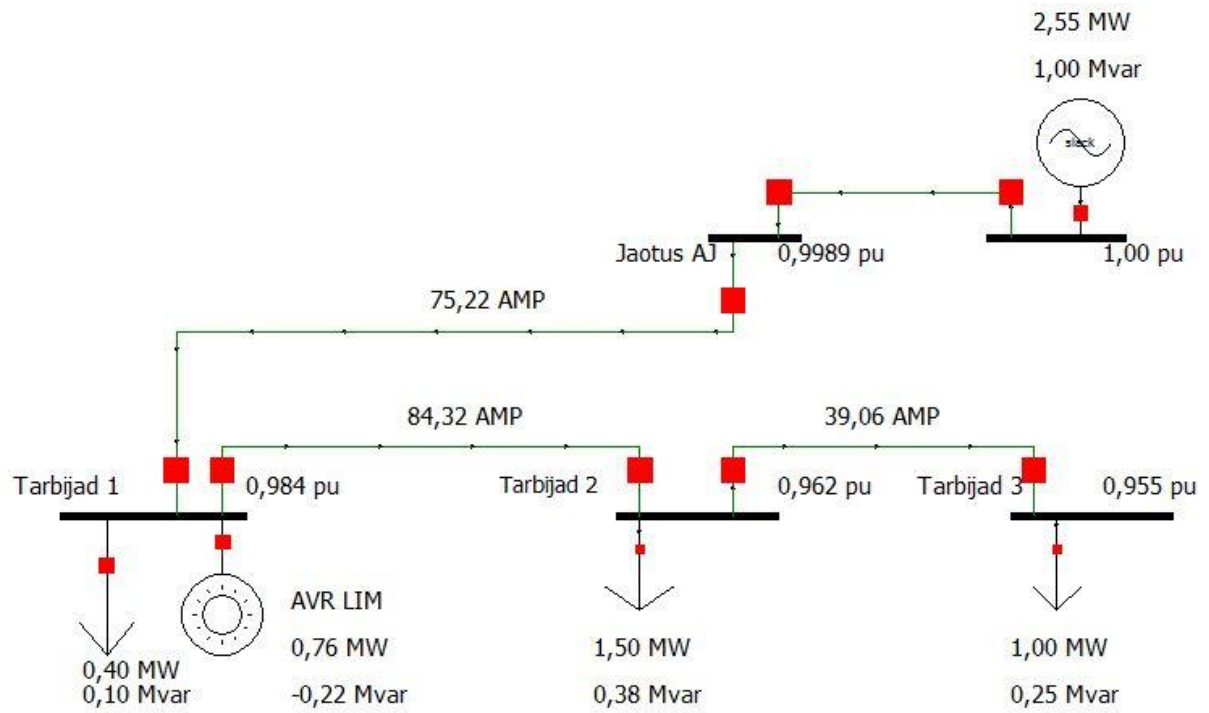
fiider 10 km, PV sees/reaktiivi ei anna. -n.ö basecase, tootja 3 km alguses latil 1



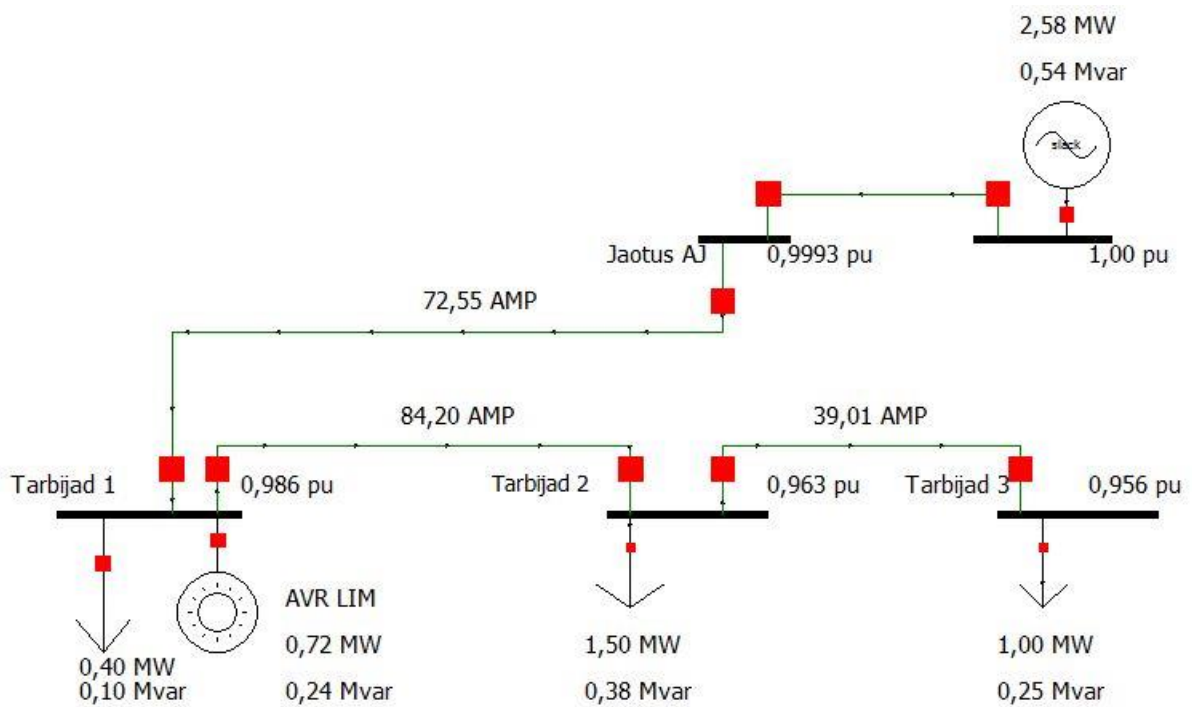
fiider 10 km PV sees/reaktiivi jaoks peal cos +0,95, tootja 3 km alguseslatil 1



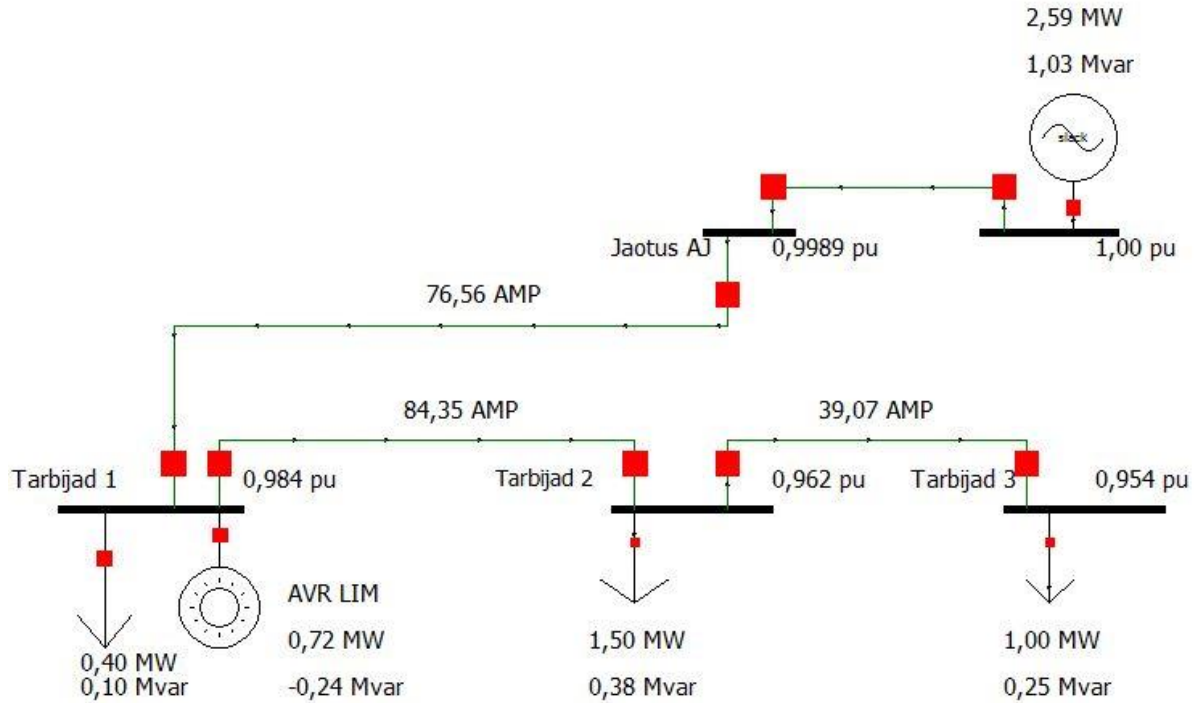
fiider 10 km, PV sees/reaktiivi jaoks peal cos -0,95, tootja 3 km alguseslatil 1



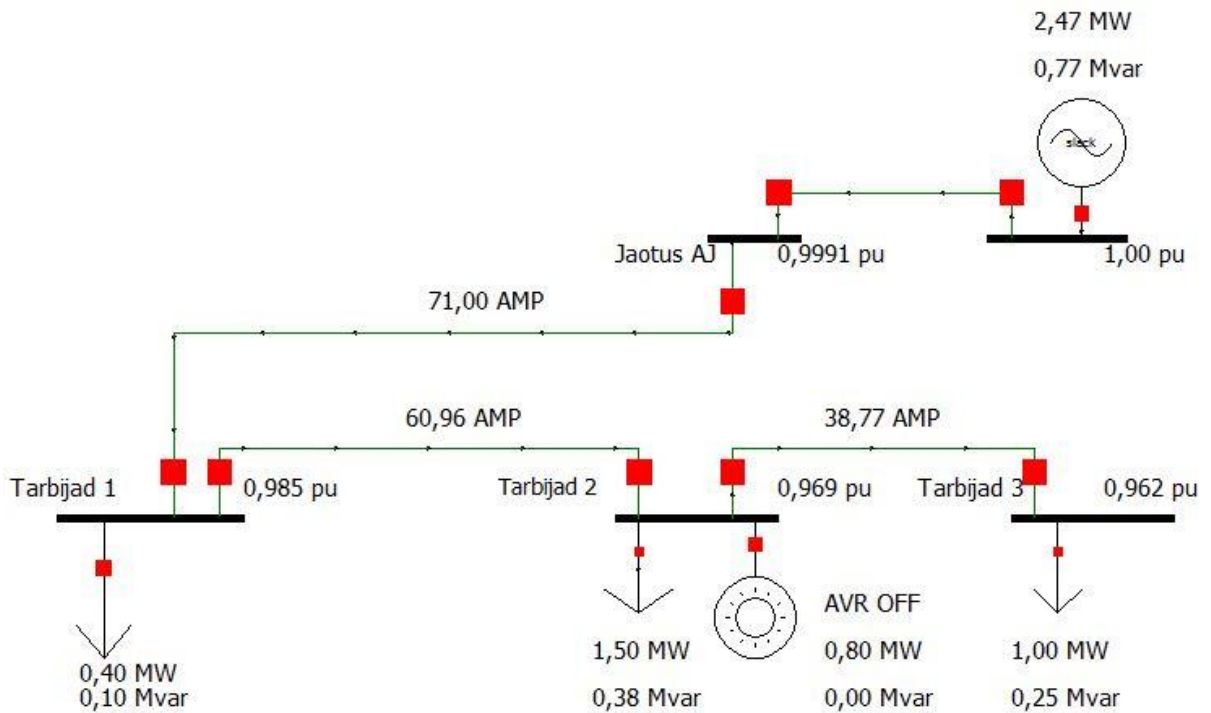
fiider 10 km, PV sees/reaktiivi jaoks peal cos +0,90., tootja 3 km alguses fiidri alguses latil 1



fiider 10 km, PV sees/reaktiivi jaoks peal  $\cos -0,90.$ , tootja 3 km alguses fiidri alguses latil  
1



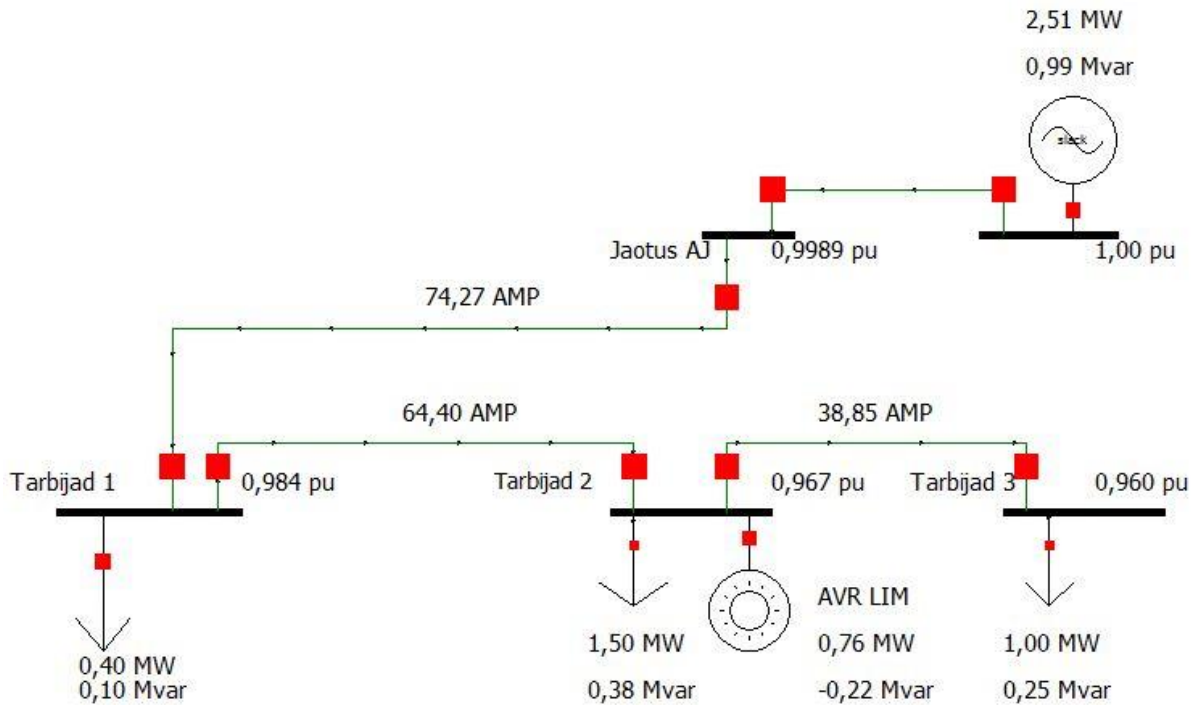
fiider 10 km, PV sees/reaktiivi ei anna. -n.ö basecase, tootja 7 km alguses latil 2



fiider 10 km, PV sees/reaktiivi jaoks peal cos +0,95, tootja 7 km algusest latil 2

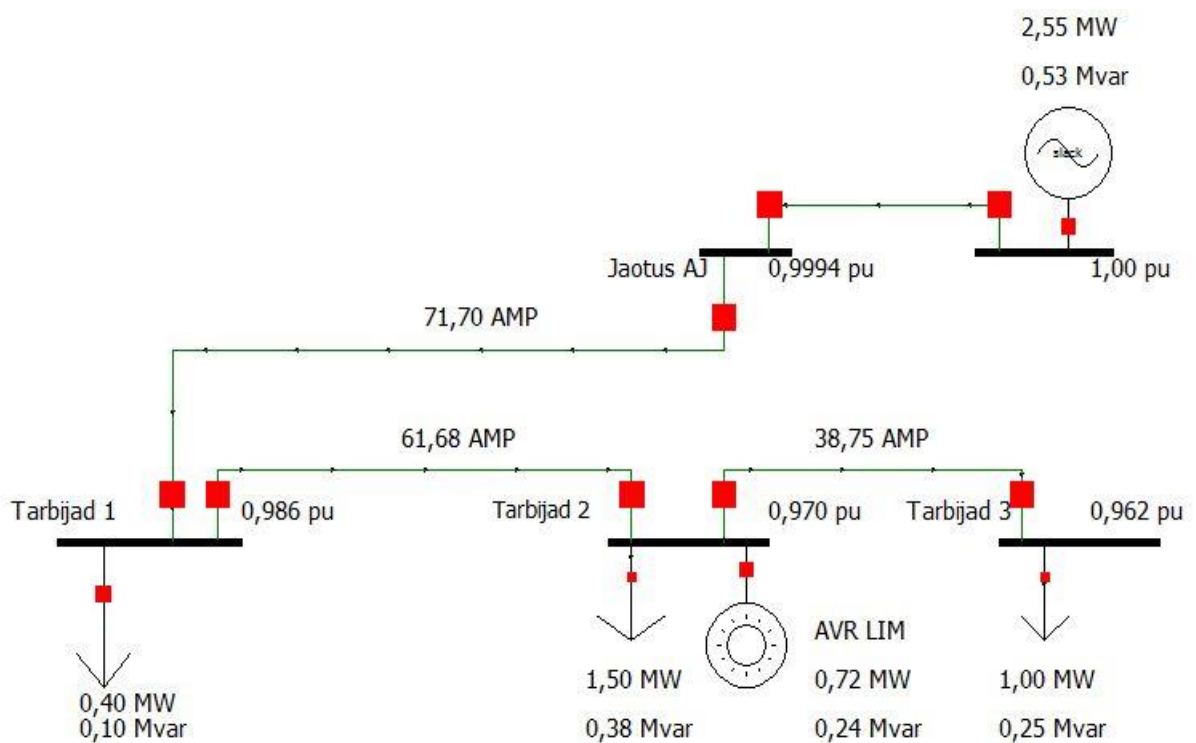
Toodud joonisel 3.5

fiider 10 km, PV sees/reaktiivi jaoks peal cos -0,95, tootja 7 km alguses latil 2

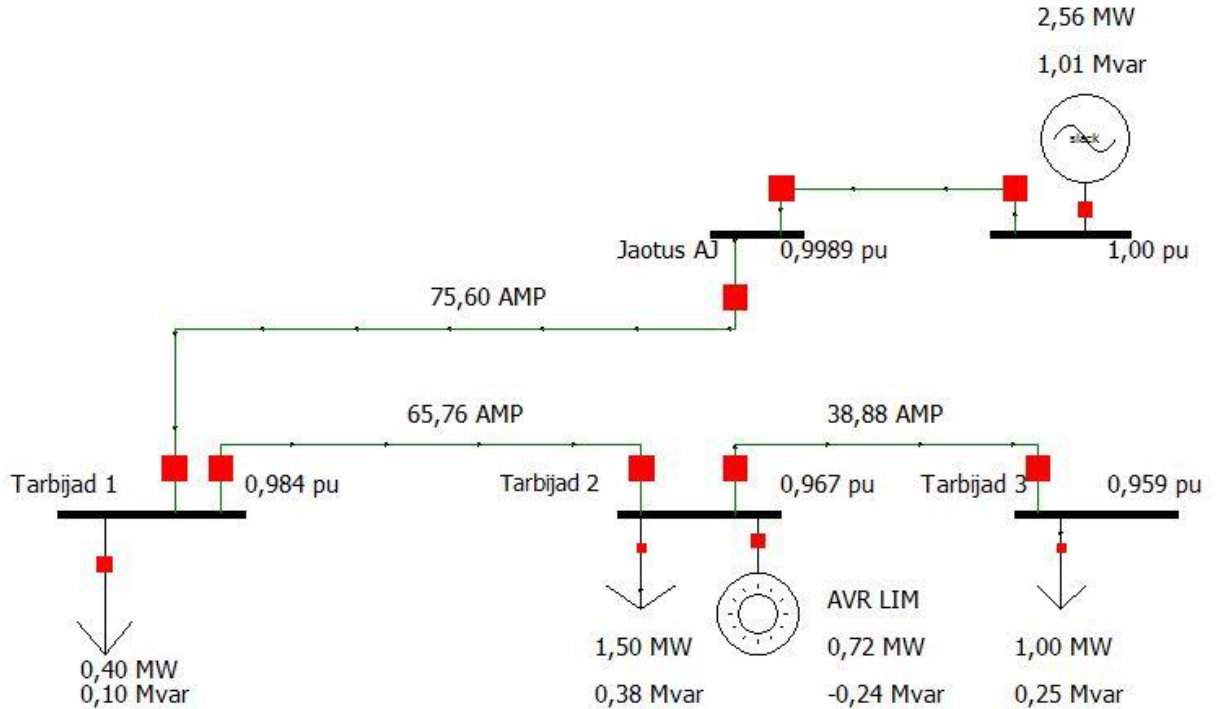


fiider 10 km, PV sees/reaktiivi jaoks peal cos +0,90., tootja 7 km alguses fiidri alguses latil

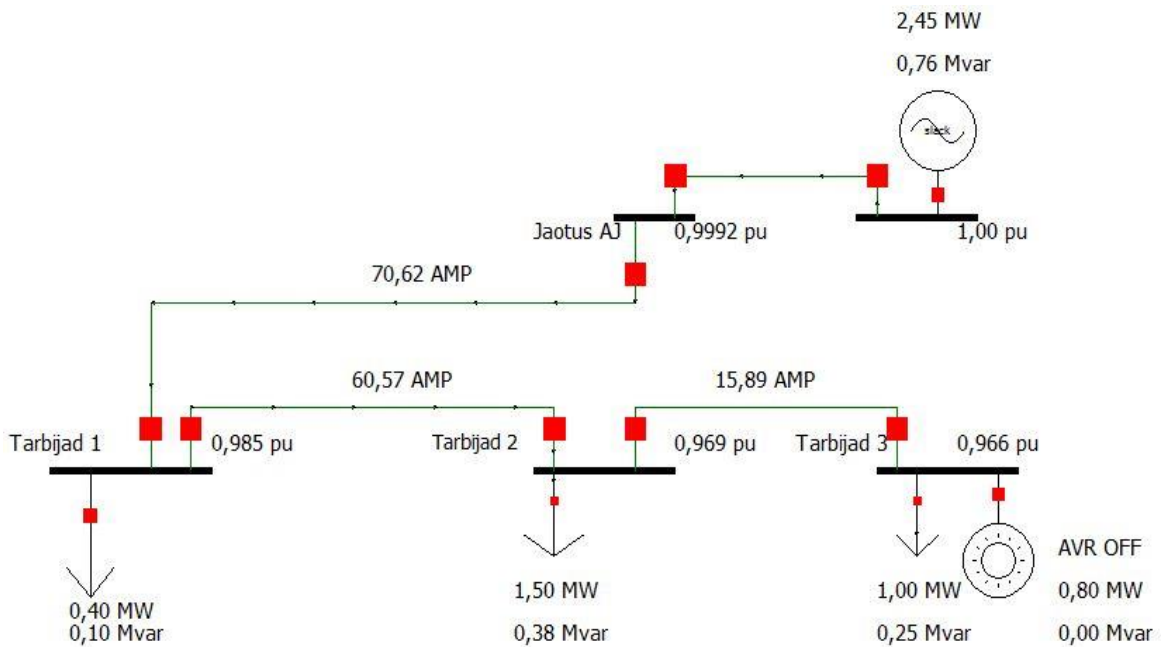
2



fiider 10 km, PV sees/reaktiivi jaoks peal  $\cos -0,90$ ., tootja 7 km alguses fiidri alguses latil  
2

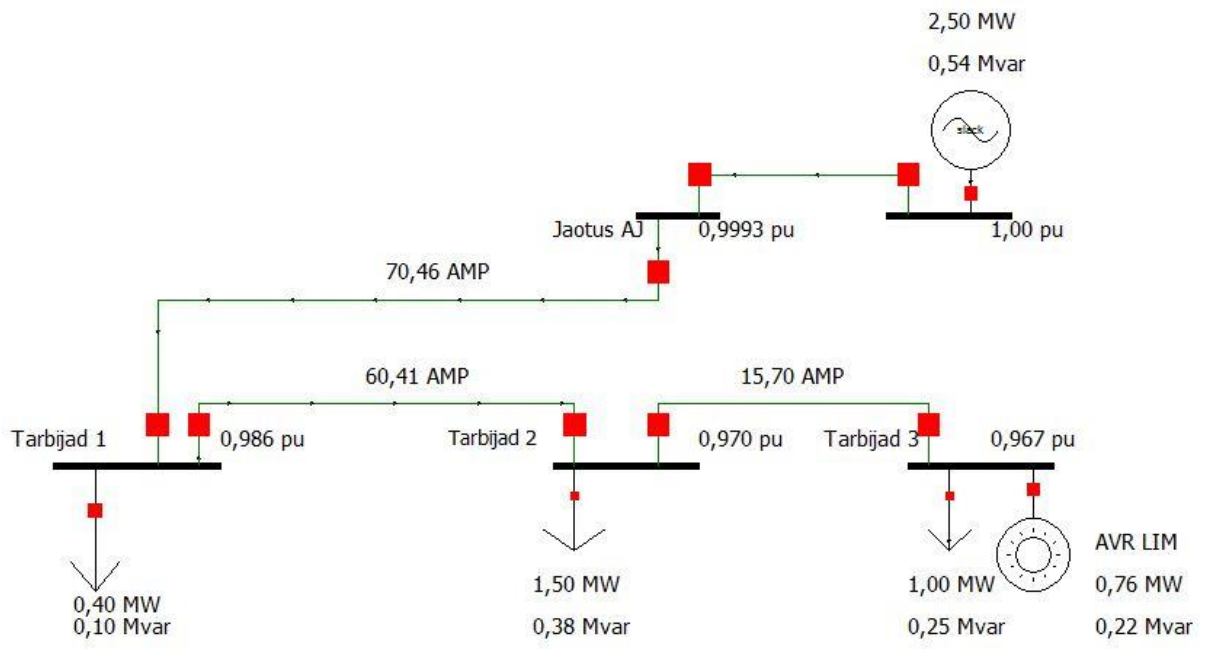


fiider 10 km, PV sees/reaktiivi ei anna. -n.ö basecase, tootja 10 km alguses latil 3

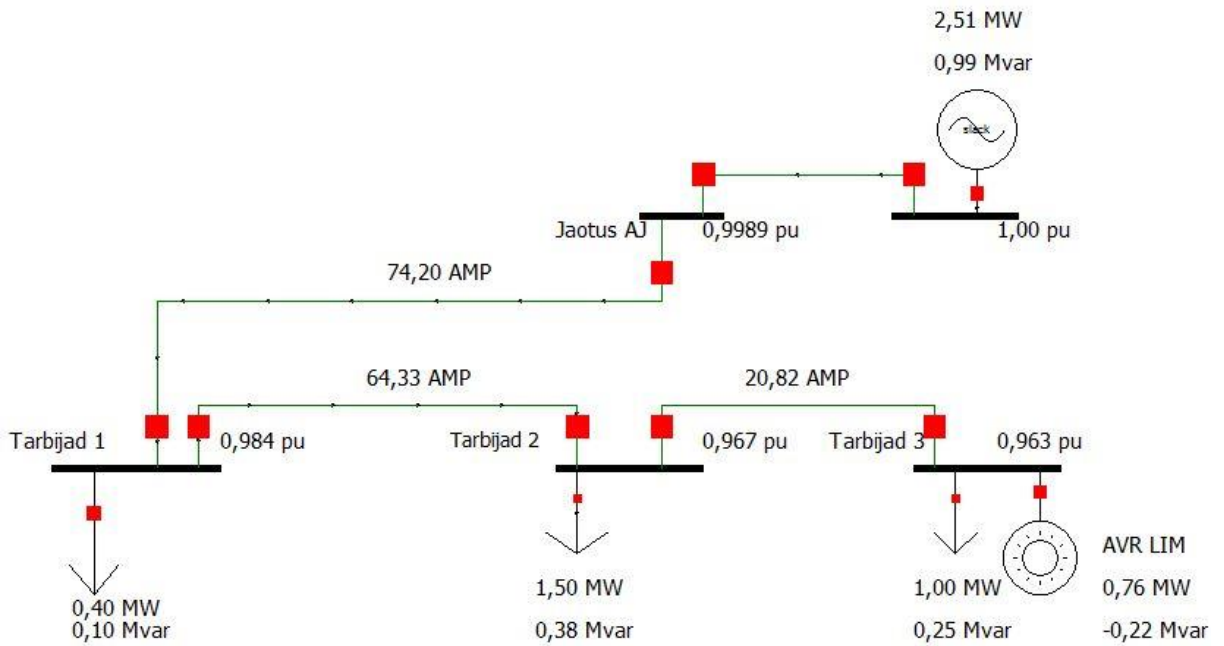


fiider 10 km, PV sees/reaktiivi jaoks peal  $\cos +0,95$ , tootja 10 km alguseslatil 3



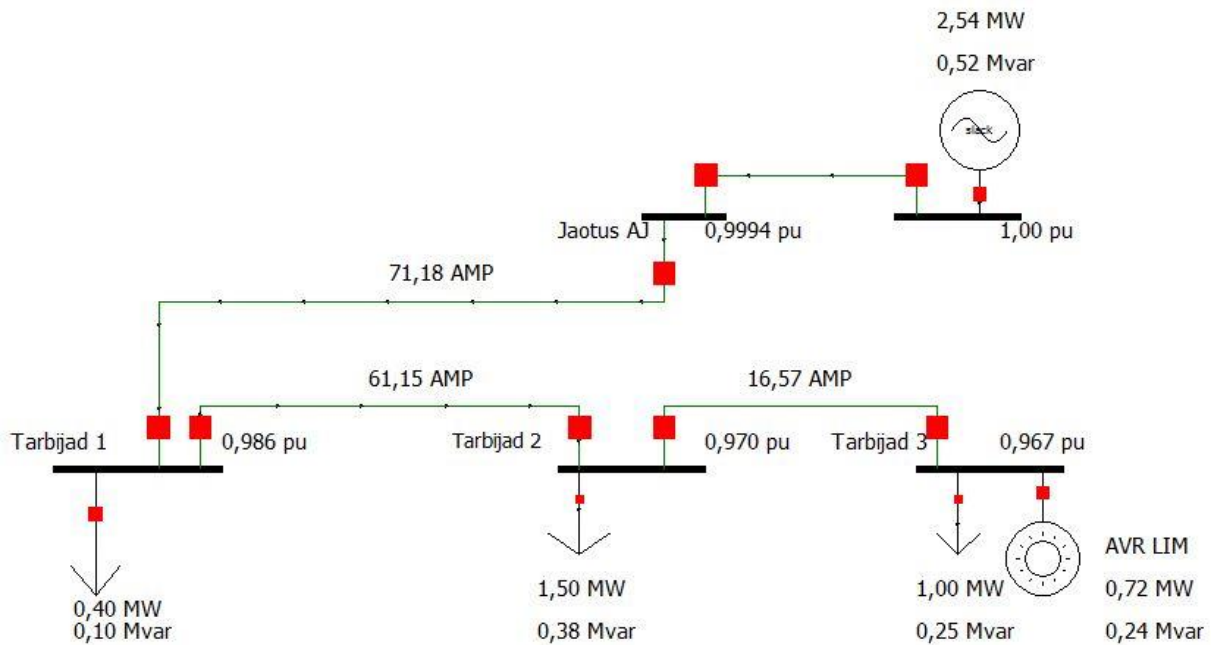


fiider 10 km, PV sees/reaktiivi jaoks peal  $\cos -0,95$ , tootja 10 km alguseslatil 3



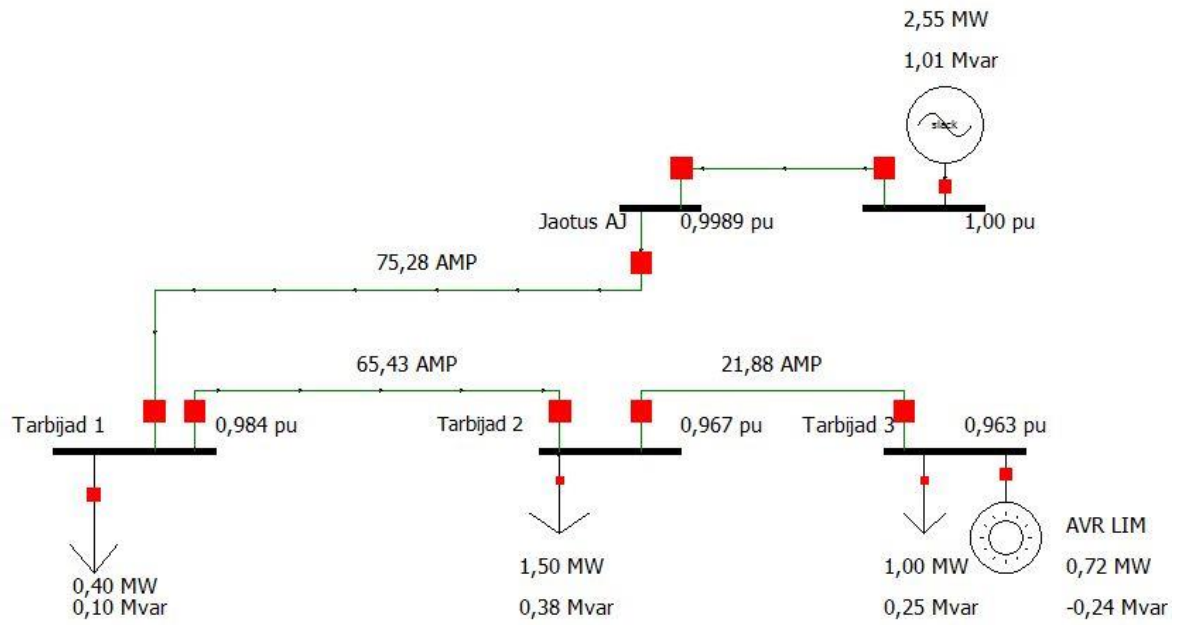
fiider 10 km , PV sees/reaktiivi jaoks peal  $\cos +0,90$ ., tootja 10 km alguses fiidri alguses latil

3



fiider 10 km, PV sees/reaktiivi jaoks peal  $\cos -0,90.$ , tootja 10 km alguses fiidri alguses latil

3

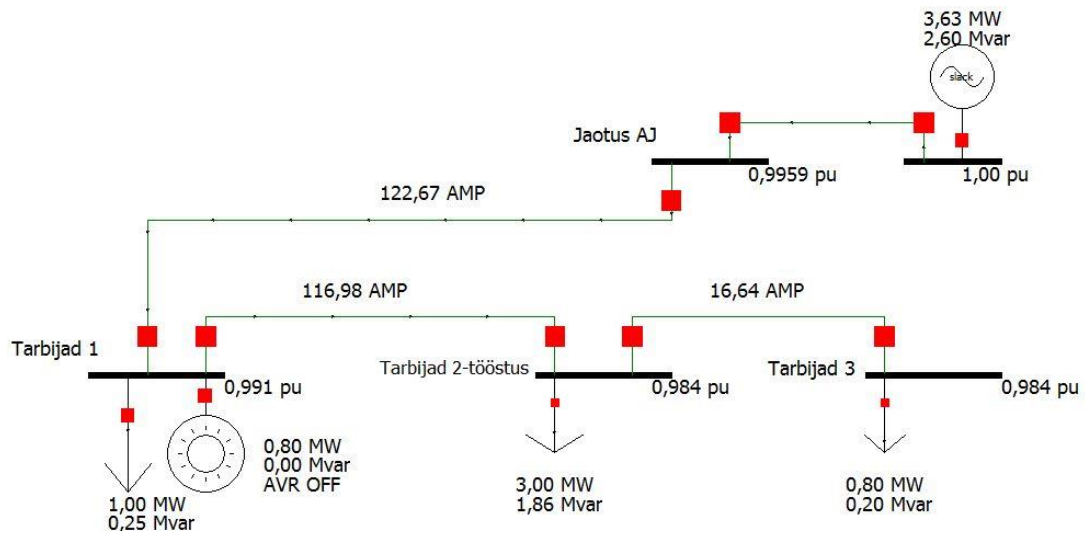


## L.2. Linnapiirkonna mudelite tulemused

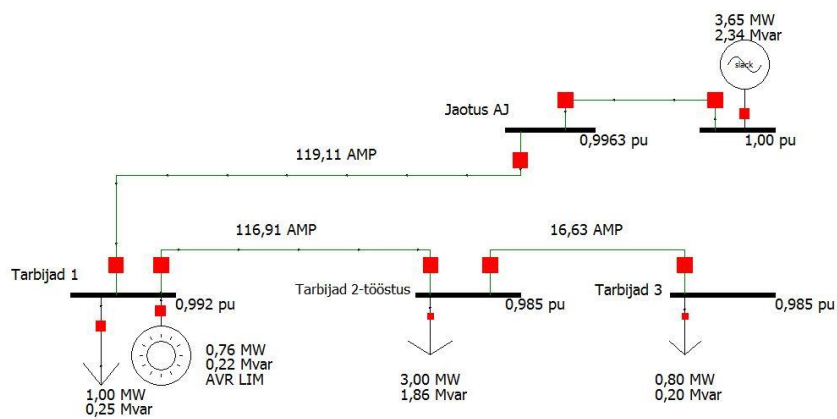
ilma PV tootmiseta. -n.ö basecase , tootja 2 km fiidri algusest latil 1

Toodud joonisel 3.7

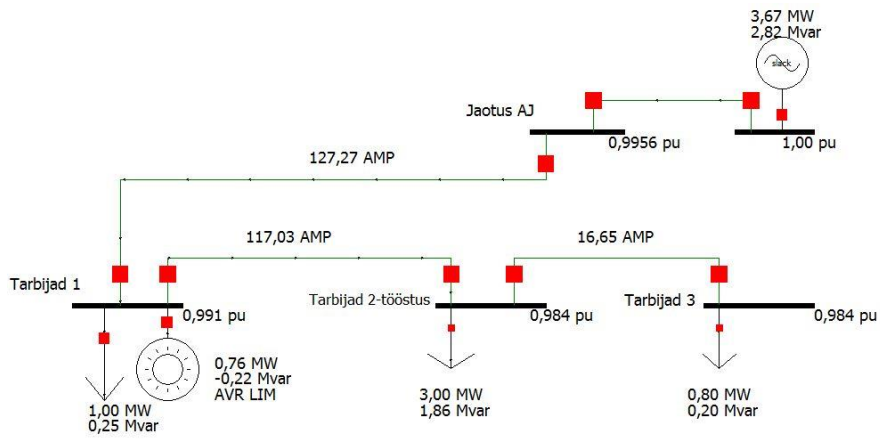
PV sees/reaktiivi ei anna. -n.ö basecase, tootja 2 km algusest latil 1



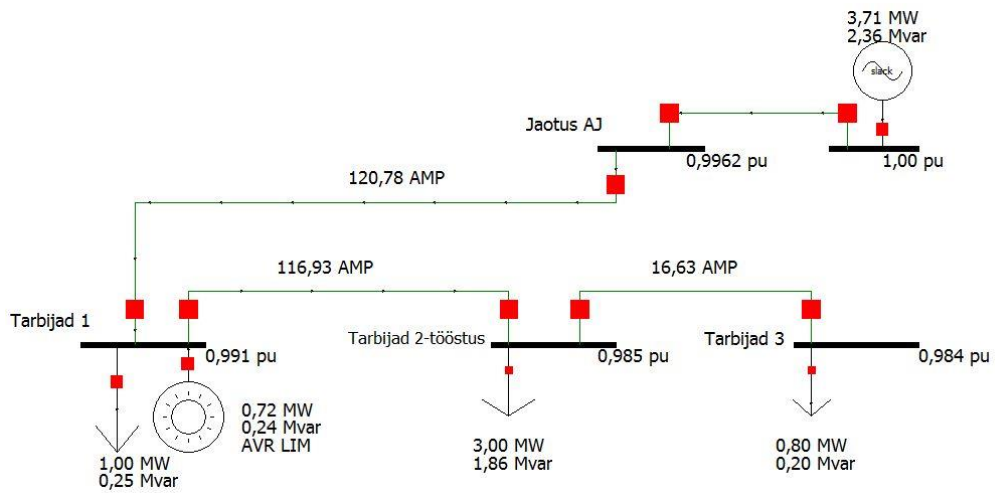
PV sees/reaktiivi jaoks peal  $\cos +0,95$ , tootja 2 km algusest latil 1



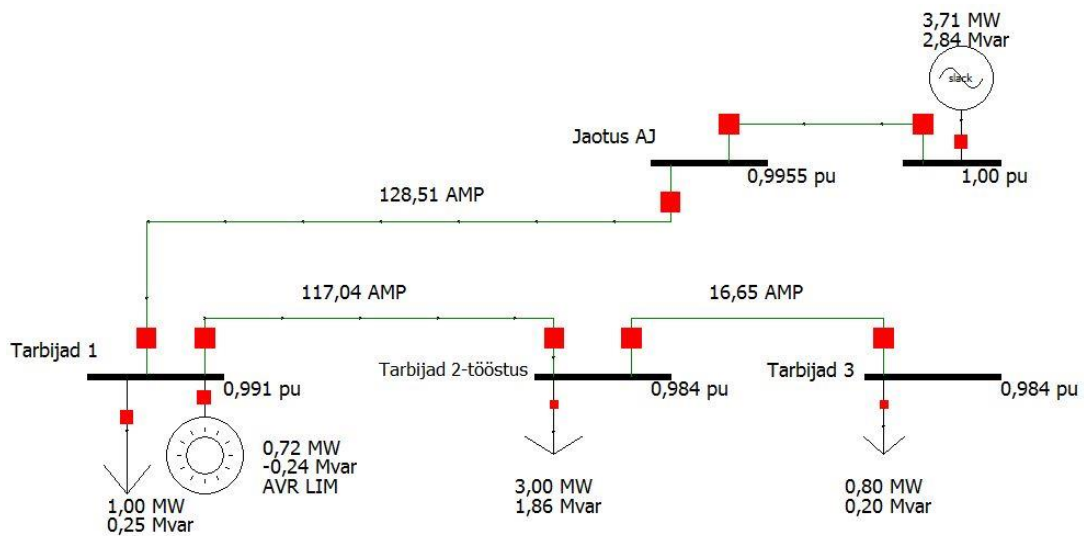
PV sees/reaktiivi jaoks peal  $\cos -0,95$ , tootja 2 km algusest latil 1



PV sees/reaktiivi jaoks peal  $\cos +0,90.$ , tootja 2 km alguses fiidri algusest latil 1

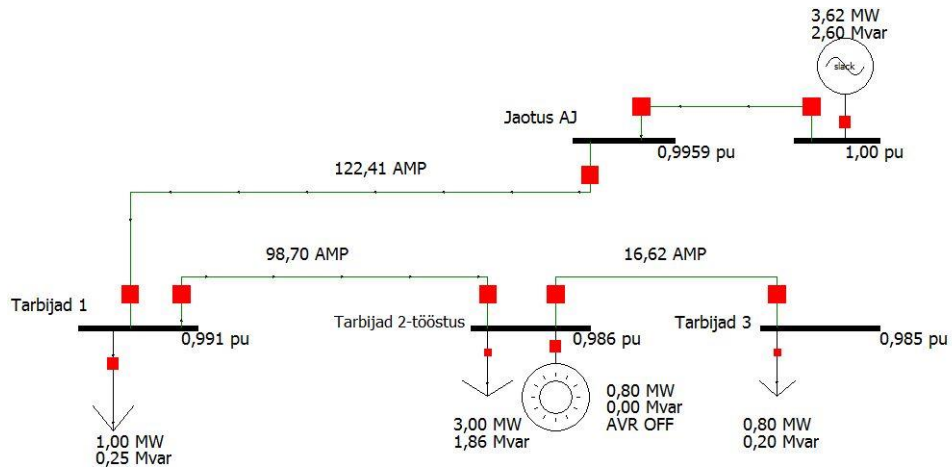


PV sees/reaktiivi jaoks peal  $\cos -0,90.$ , tootja 2 km alguses fiidri algusest latil 1

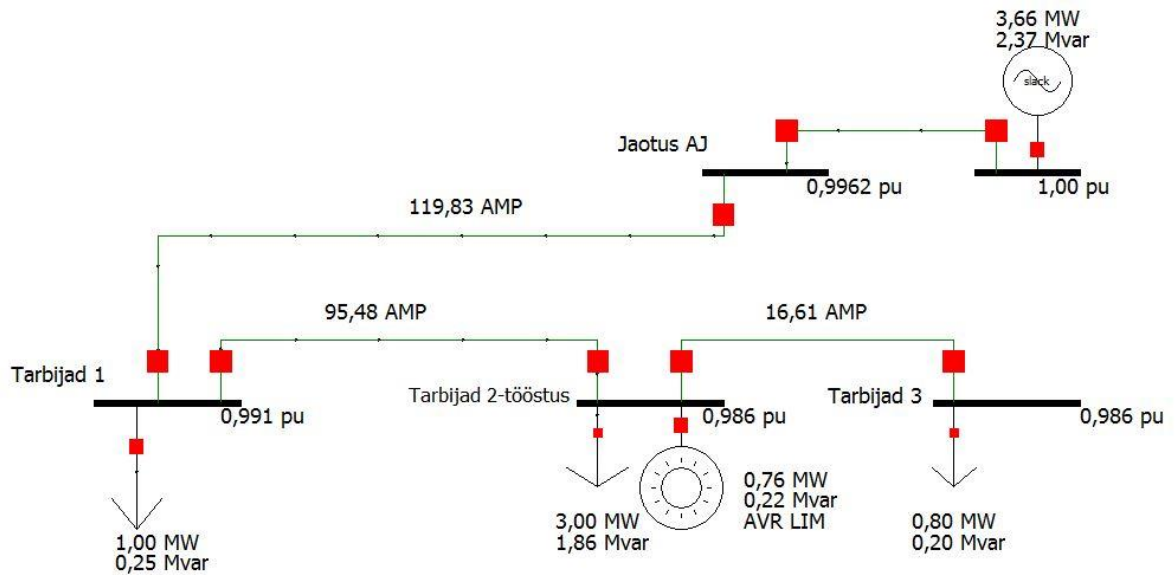


PV

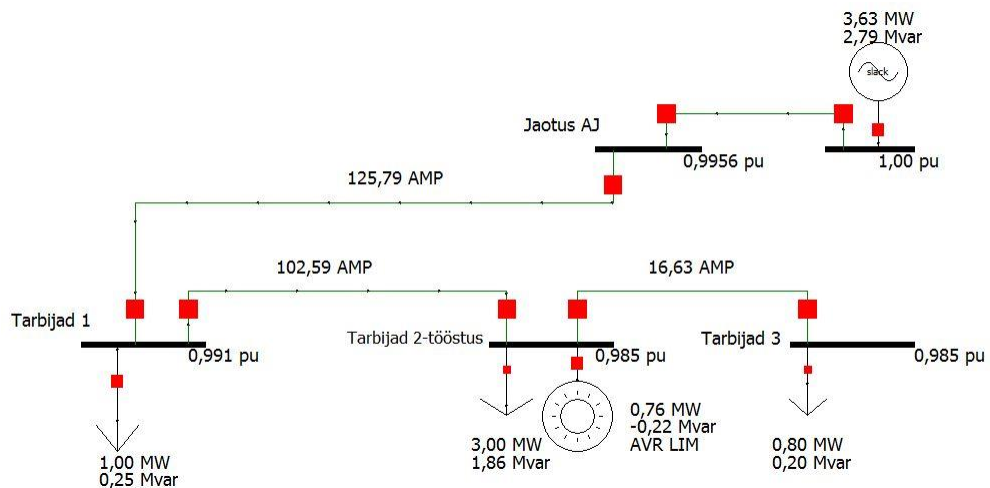
PV sees/reaktiivi ei anna. -n.ö basecase, tootja 3 km algusest latil 2



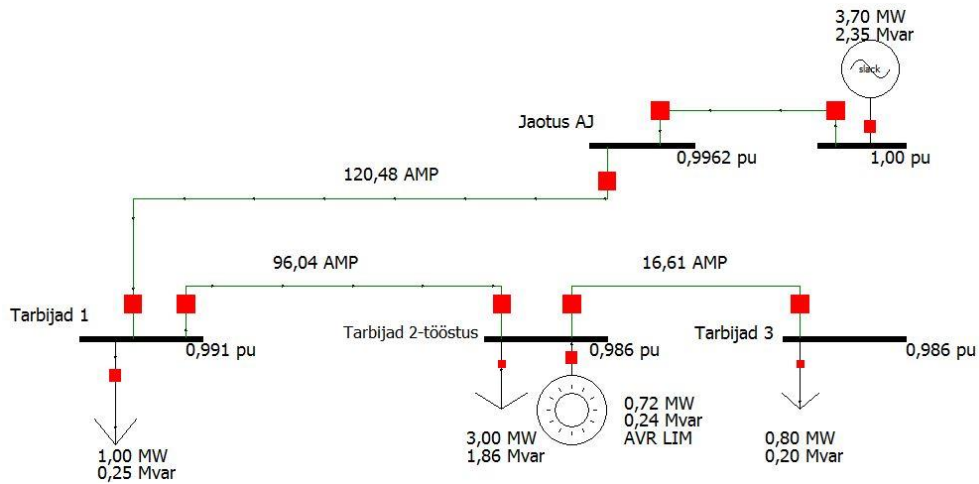
PV sees/reaktiivi jaoks peal cos +0,95, tootja 3 km algusest latil 2



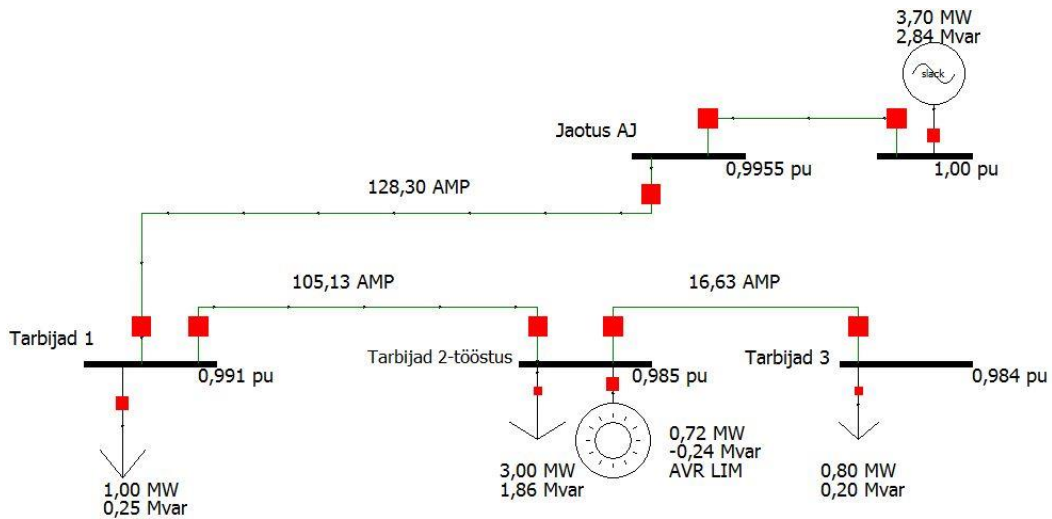
PV sees/reaktiivi jaoks peal cos -0,95, tootja 3 km algusest latil 2



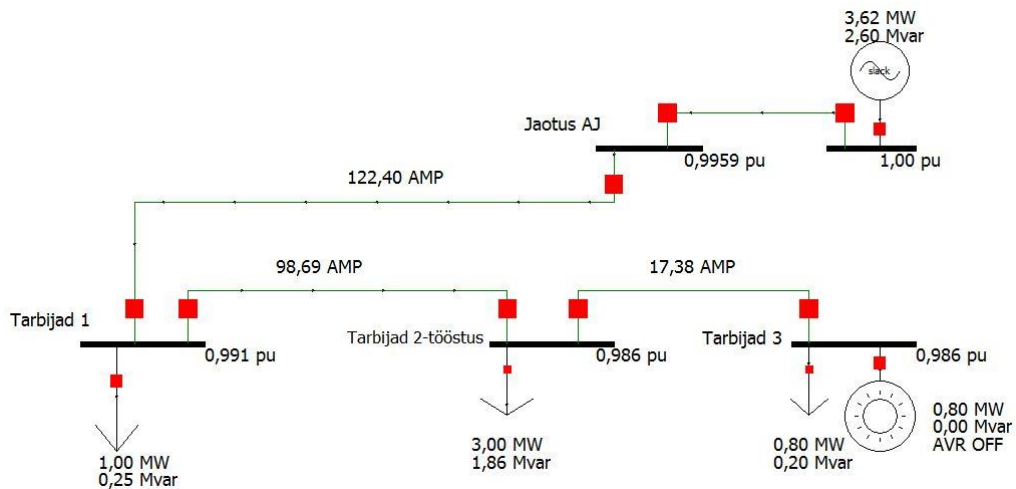
PV sees/reaktiivi jaoks peal  $\cos +0,90.$ , tootja 3 km alguses fiidri algusest latil 2



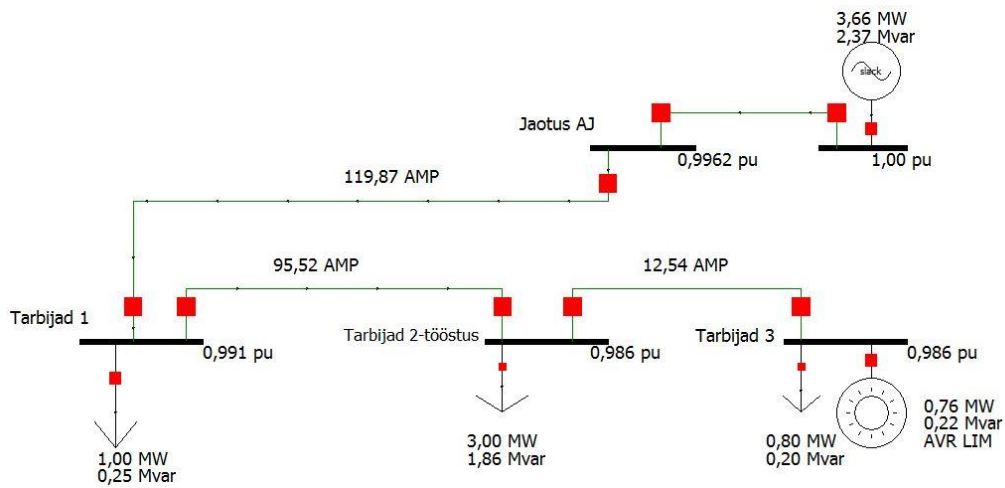
PV sees/reaktiivi jaoks peal  $\cos -0,90.$ , tootja 3 km alguses fiidri algusest latil 2



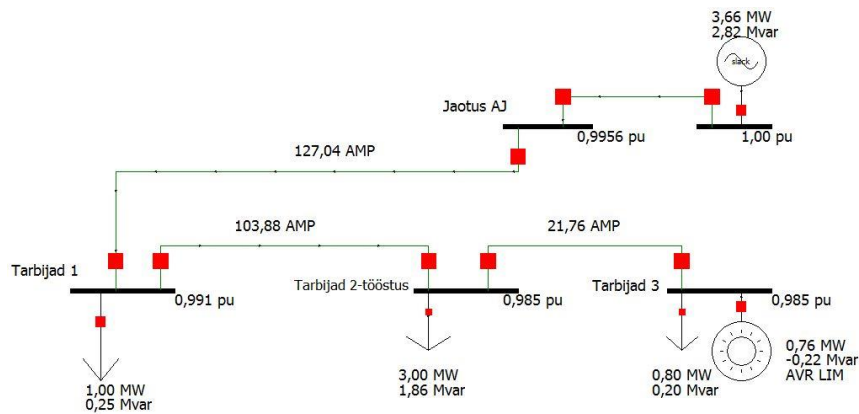
PV sees/reaktiivi ei anna. -n.ö basecase, tootja 1 km algusest latil 3



PV sees/reaktiivi jaoks peal  $\cos +0,95$ , tootja 1 km algusest latil 3



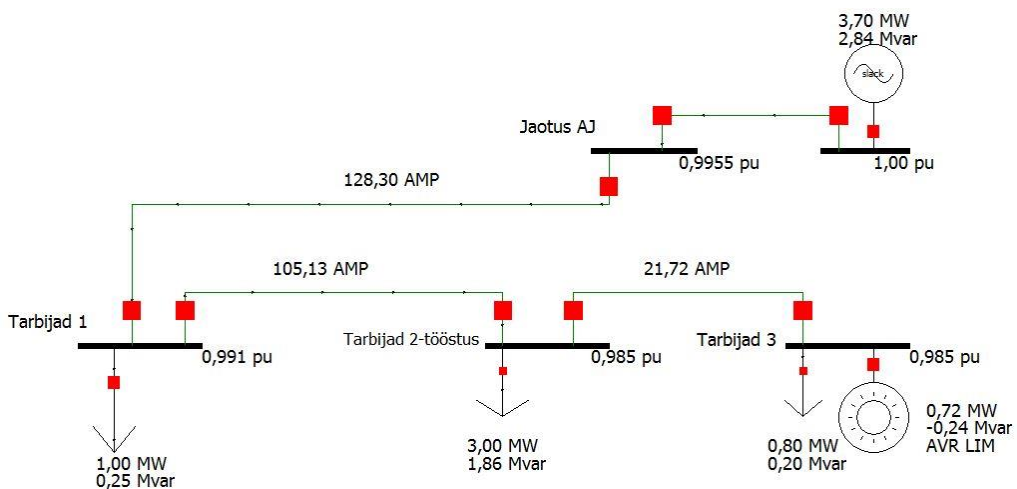
PV sees/reaktiivi jaoks peal  $\cos -0,95$ , tootja 1 km algusest latil 3



PV sees/reaktiivi jaoks peal  $\cos +0,90$ ., tootja 1 km alguses fiidri alguses latil 3

Toodud joonisel 3.8

PV sees/reaktiivi jaoks peal  $\cos -0,90$ ., tootja 1 km alguses fiidri algusest latil 3



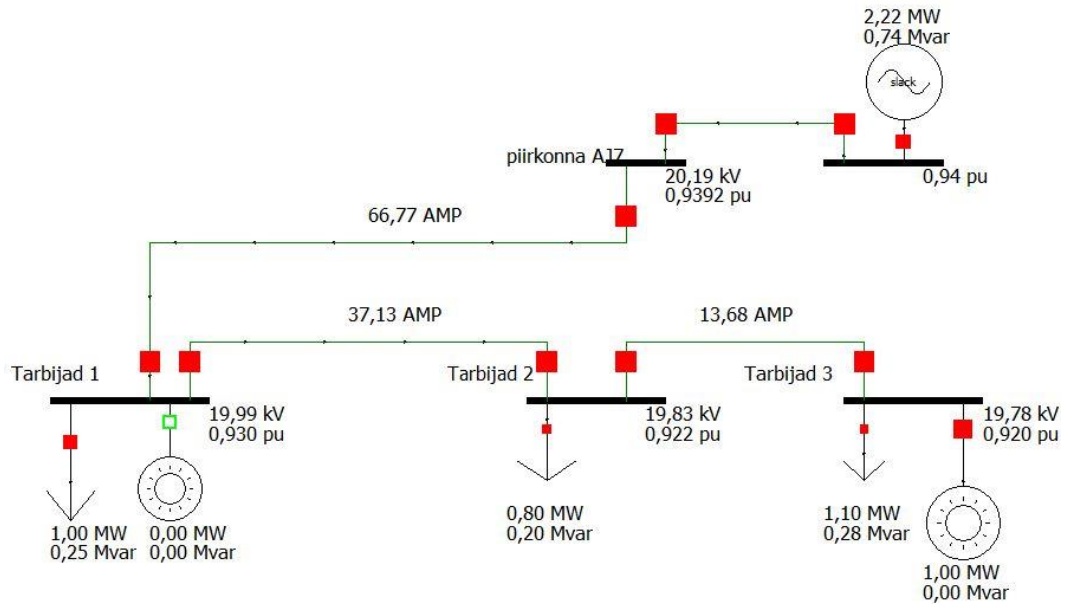


### L.3. Hajaasustusega piirkonna mudelid lubatud pingemiinimumi korral

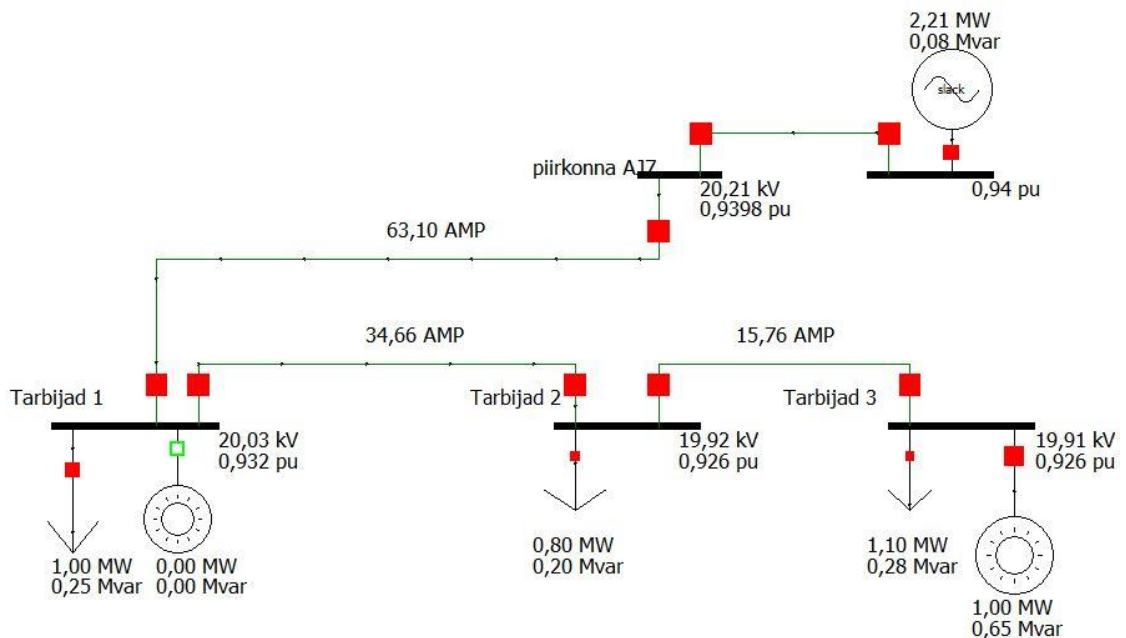
Baas olukord

Toodud joonisel 3.12

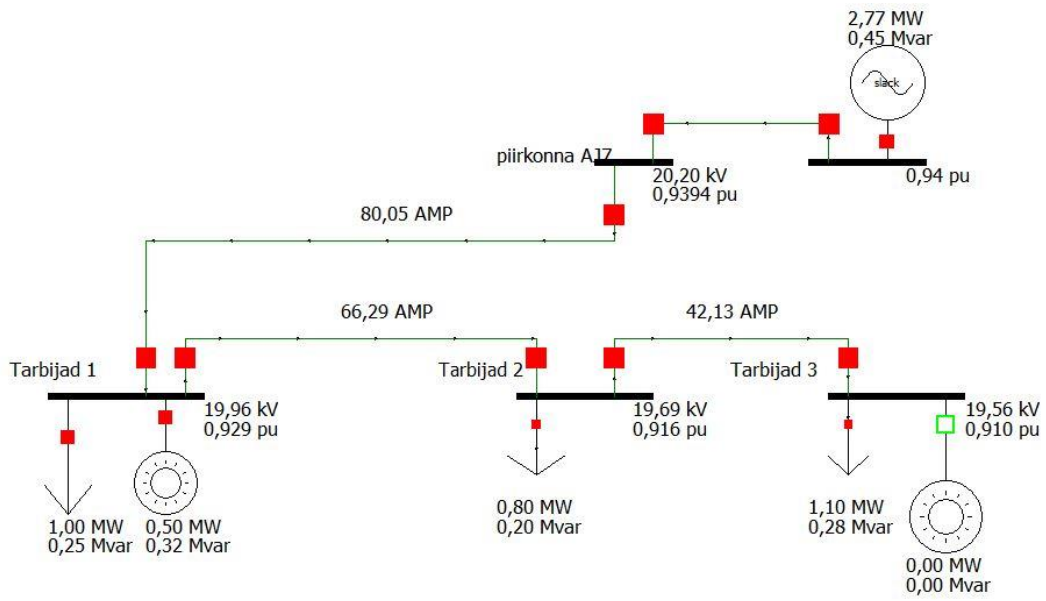
Fiidri lõpus 1 MW jaam sees ilma reaktiivita.



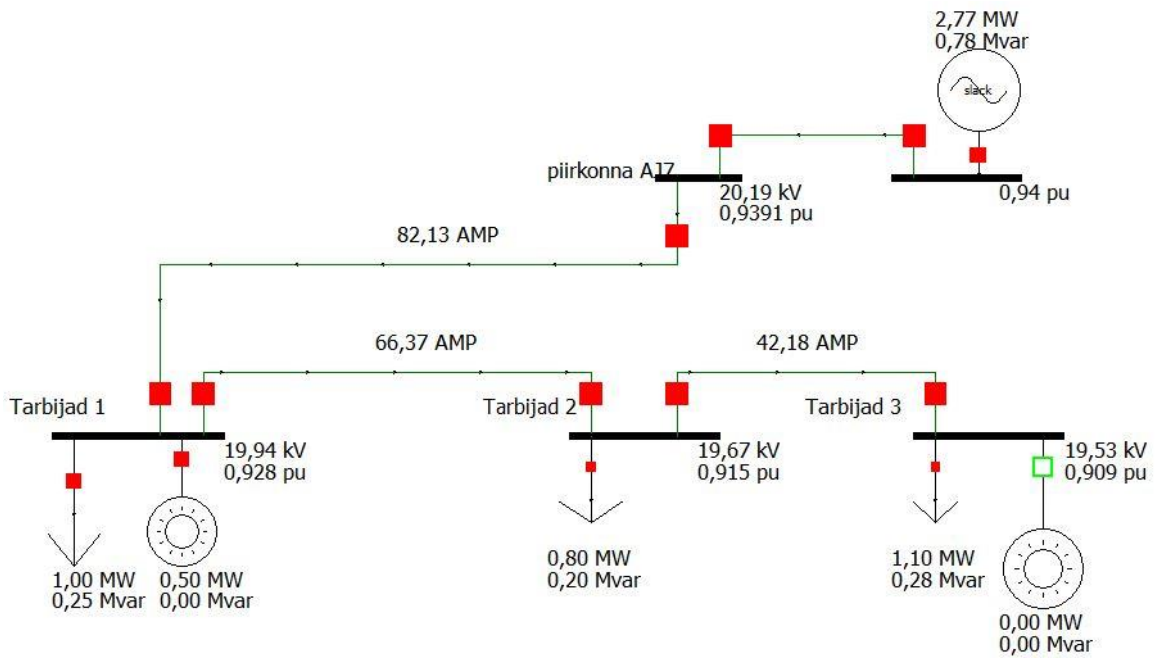
Fiidri lõpus 1MW jaam reaktiiv 0,650 MVar ehk Rfg lubatud maxiga



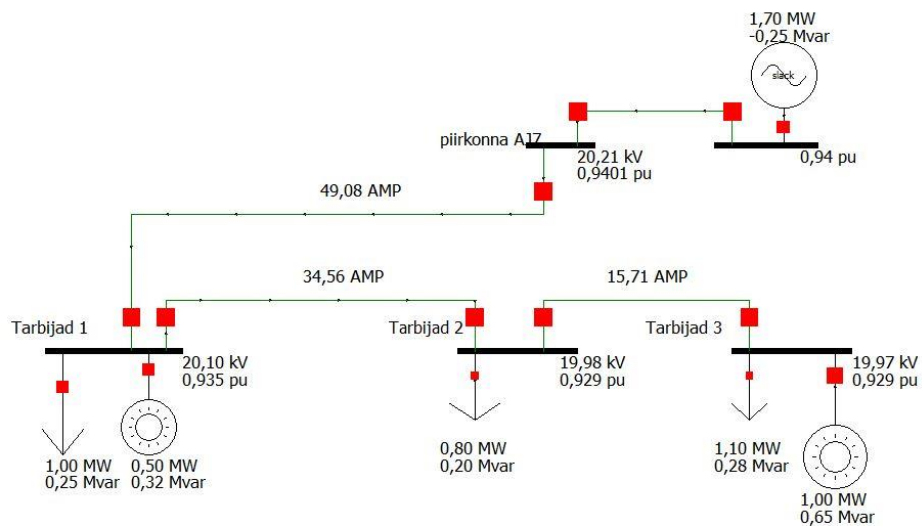
Fiidri alguses 0,5 MW jaam sees 0,32 MVar reaktiiviga



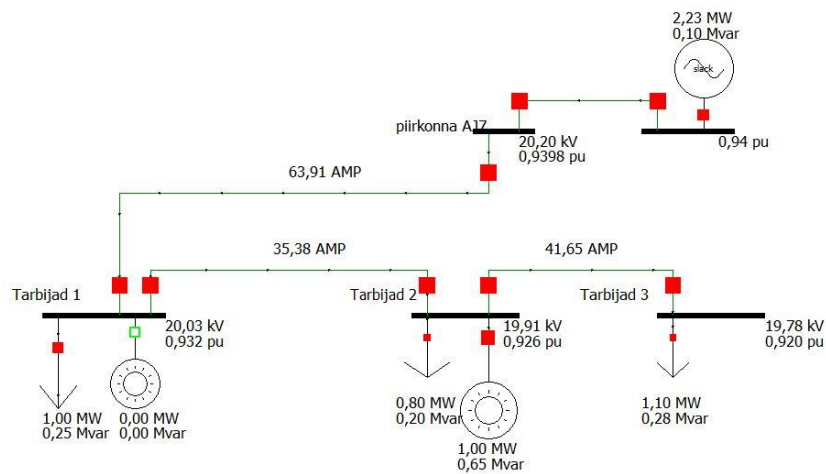
50 MW jaama sees ilma reaktiivita



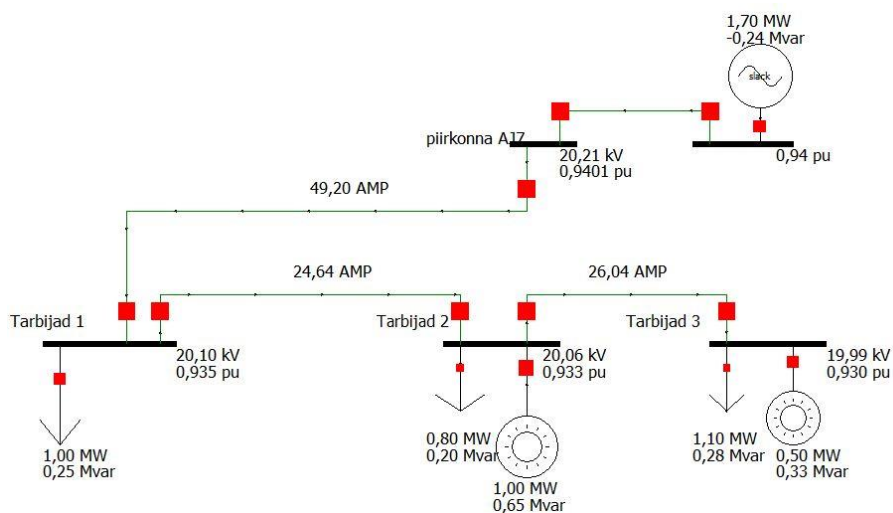
## Mõlemad jaamad maksimaalse reaktiiviga ja P



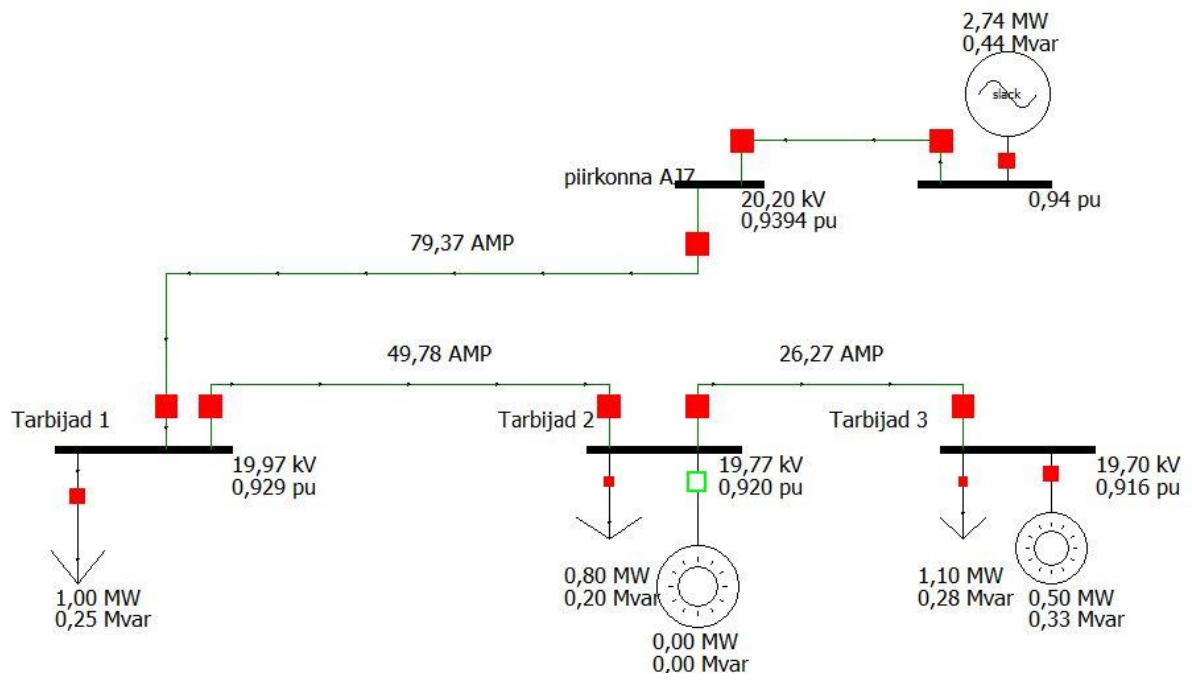
## 1MW jaam keskmisel fiidril max reaktiivi ja võimsusega



## Jaamad fiidri lõpus max võimsuse ja reaktiiviga.



Jaam üksnes fiidri lõpus.

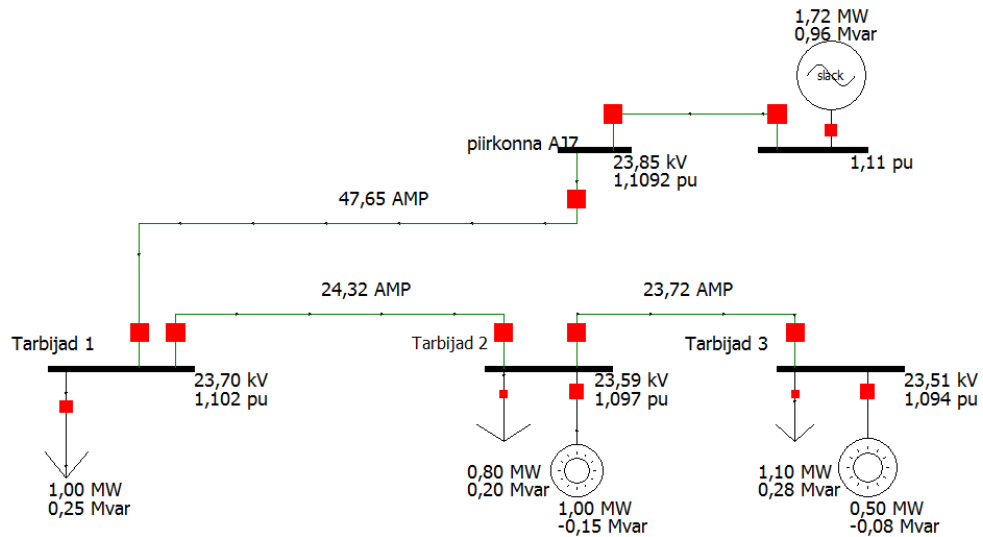


## L.4. Hajaasustusega piirkonna mudelid lubatud pingemaksimumi korral

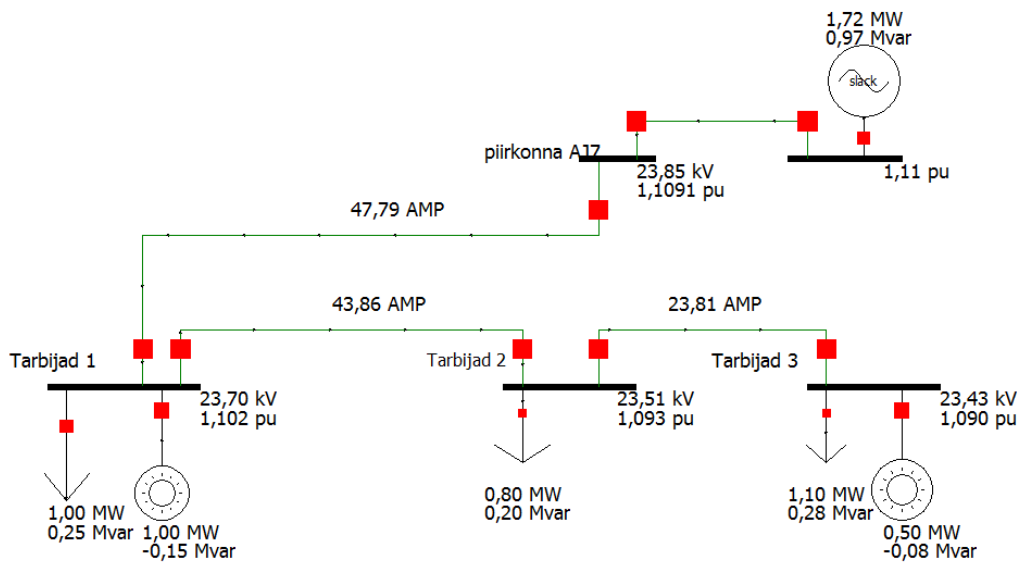
Baas olukord

Toodud joonisel 3.10

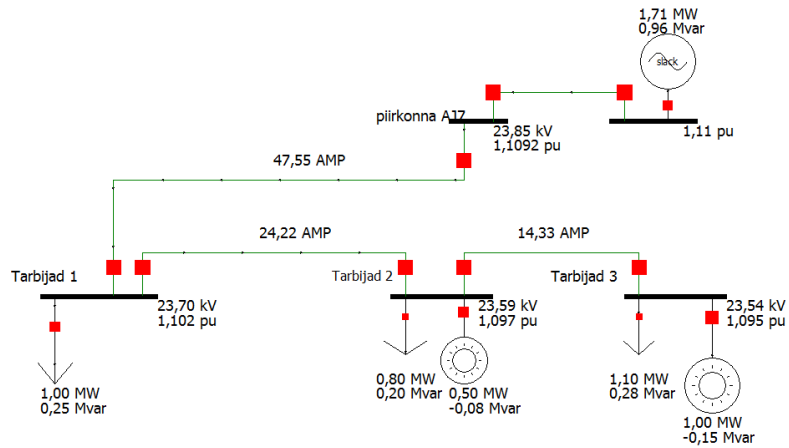
Baas olukorrale lisatud kaks jaama 2 ja 3 fiidritele koos maksimaalse reaktiivi tarbimisega



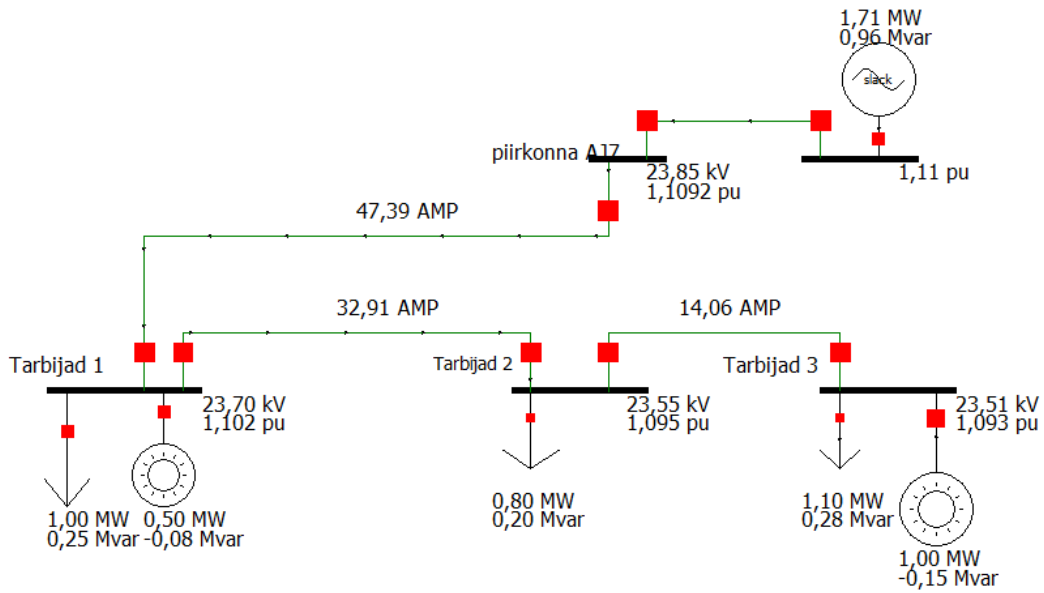
Jaamad 1 ja 3 fiidritele maksimaalse reaktiivi ja nimiaktiivvõimsusega



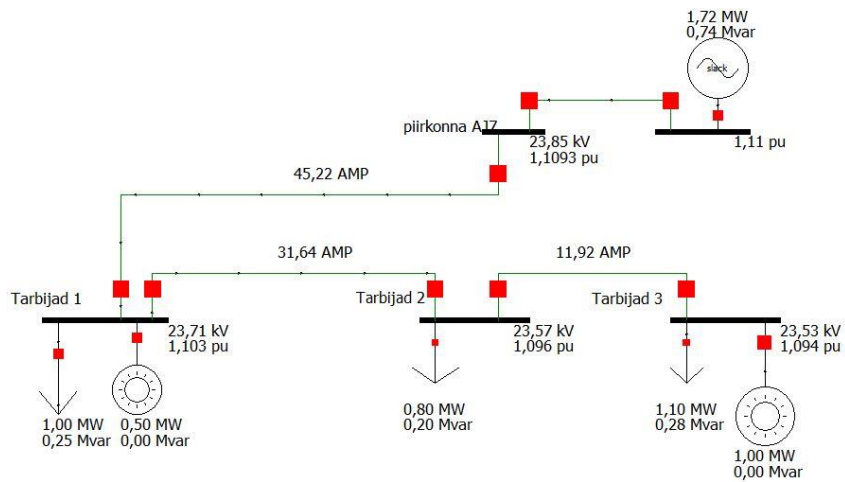
Jaamad 2 ja 3 fiidri lõpus maksimaalse reaktiiviga ja nimiaktiivvõimsusega



0,5 MW jaam latil 1 ja 1 MW jaam 3 latil P ja Q max.



0,5 MW jaam latil 1 ja 1 MW jaam 3 latil P ja Q=0

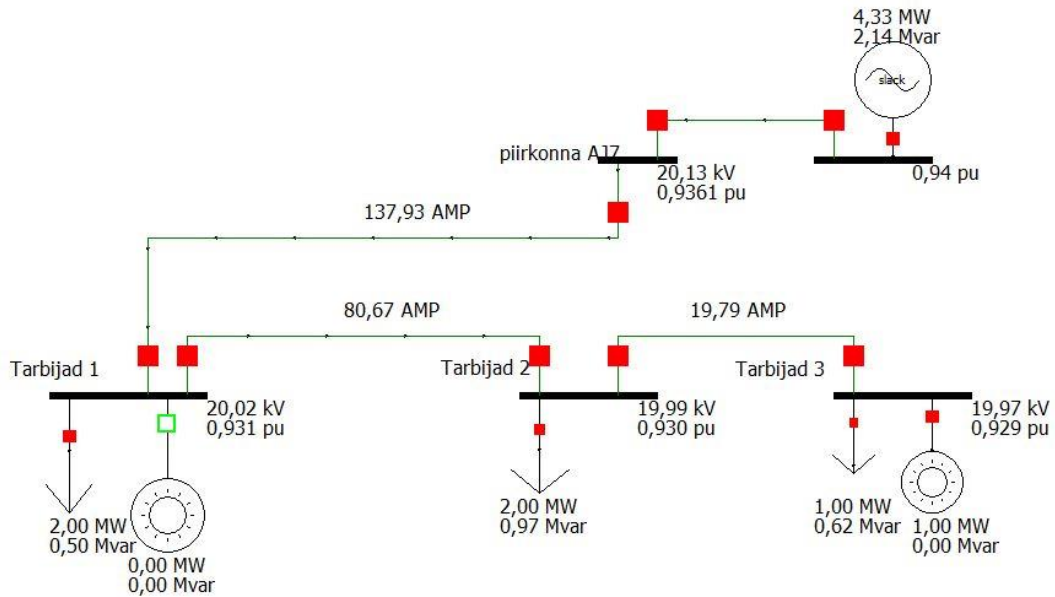


## L.5. Linnapiirkonna mudelid lubatud pingemiinimumi korral

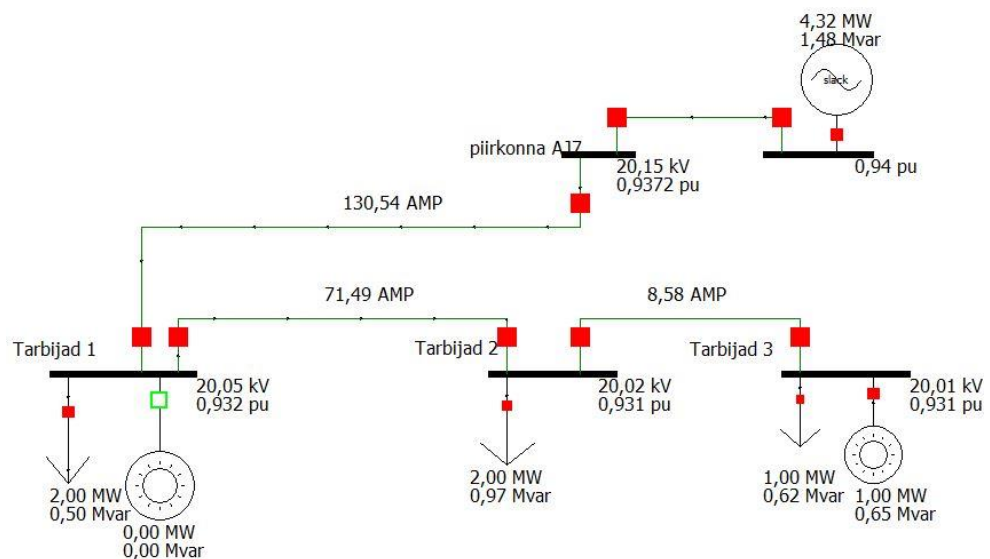
Baas olukord

Toodud joonisel 3.16.

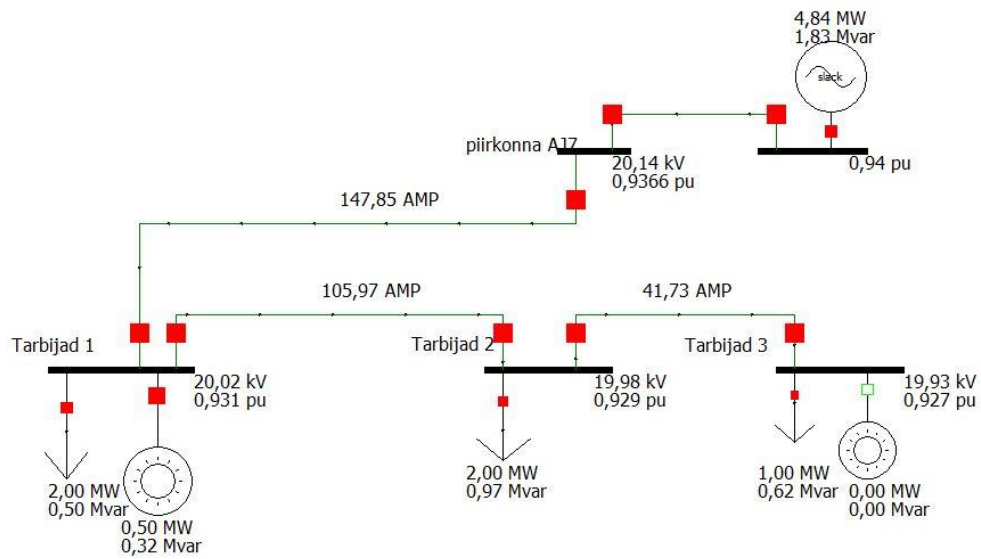
Fiidri lõpus 1 MW jaam sees ilma reaktiivita.



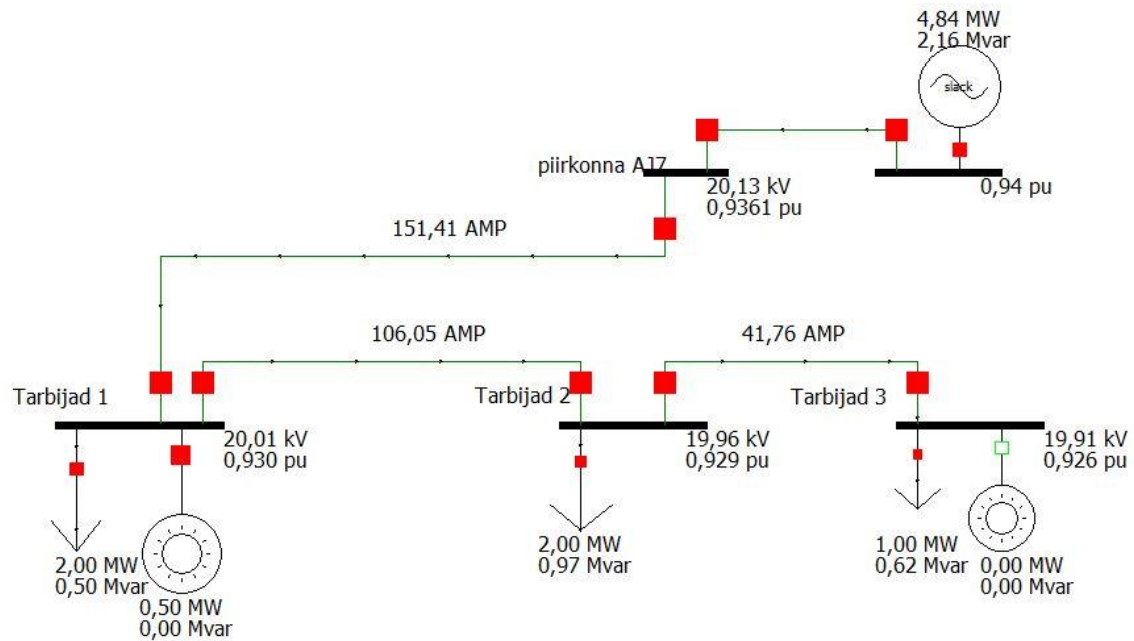
Fiidri lõpus 1MW jaam reaktiiv 0,650 MVar ehk Rfg lubatud maxiga



Fiidri alguses 0,5 MW jaam sees 0,32 MVar reaktiiviga

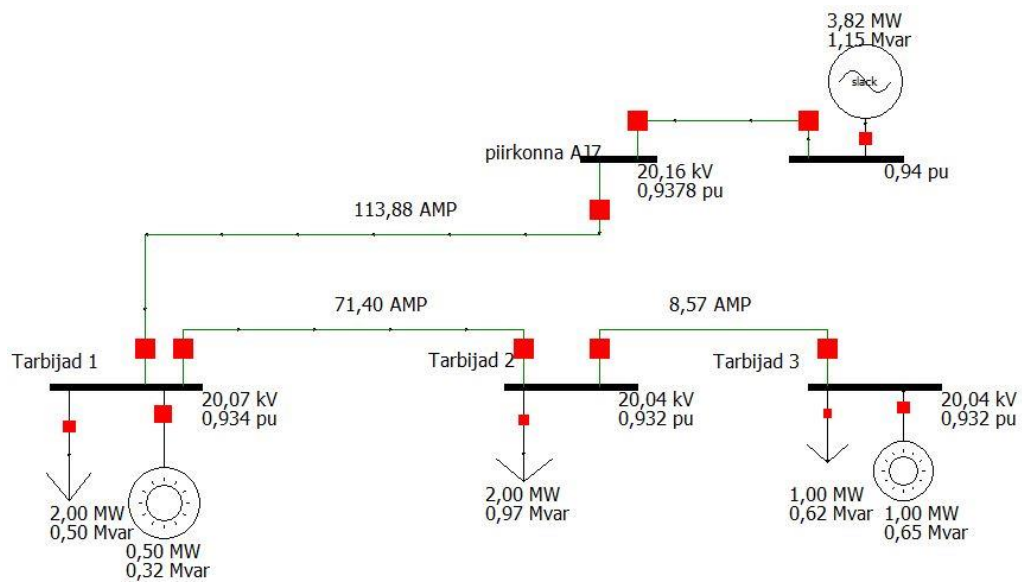


50 MW jaama sees ilma reaktiivita

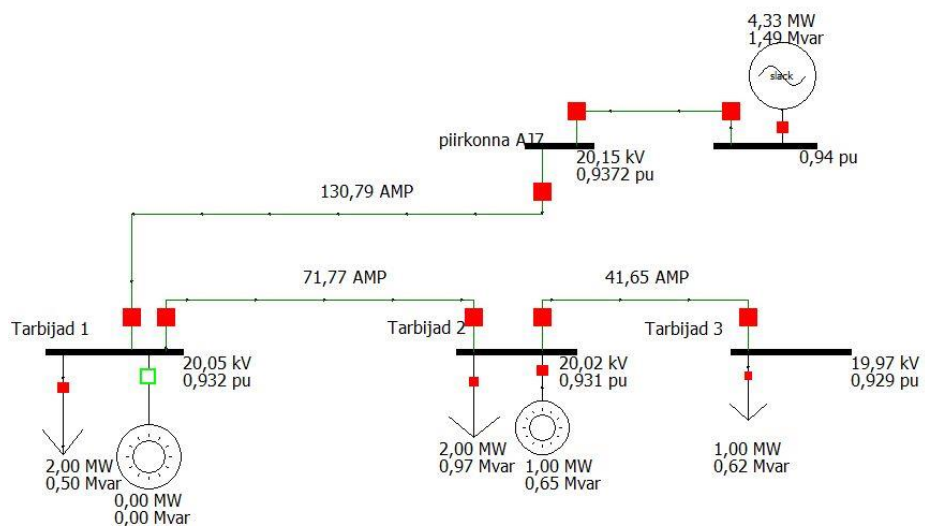




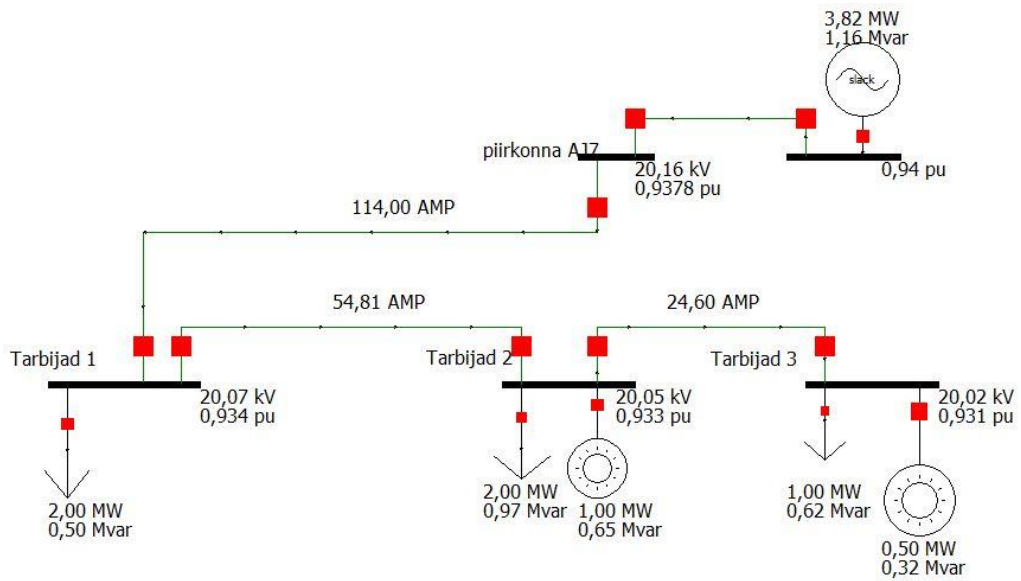
## Mõlemad jaamad maksimaalse reaktiiviga ja P



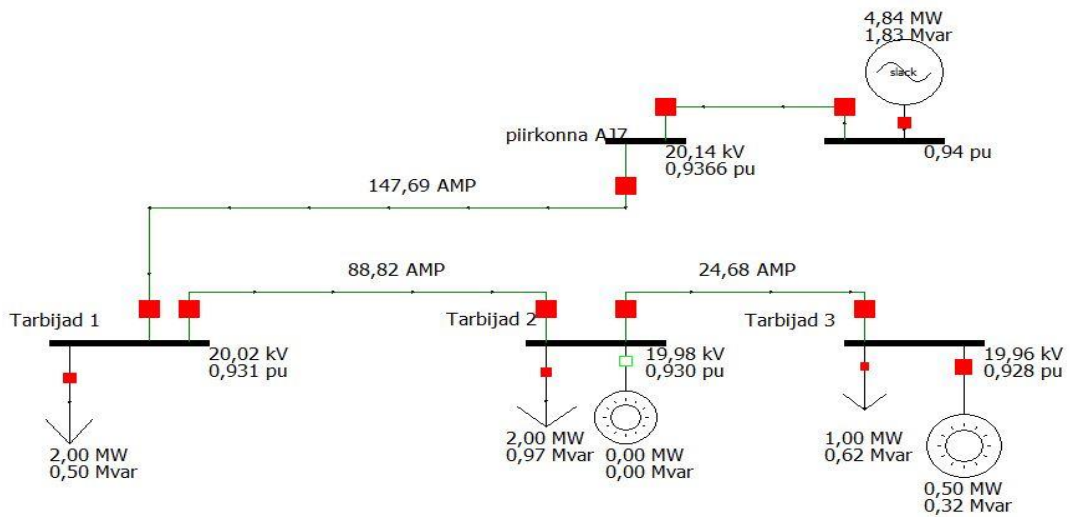
## 1 MW jaam keskmisel fiidril max reaktiivi ja võimsusega



Jaamad fiidri lõpus max võimsuse ja reaktiiviga.



Jaam üksnes fiidri lõpus.

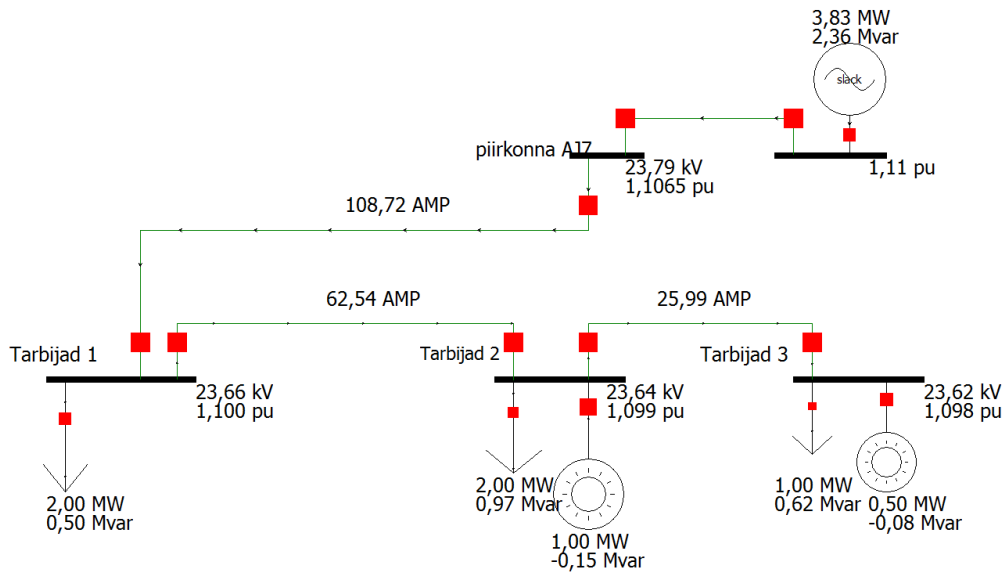


## L.6.Linnapiirkonna mudelid lubatud pingemaksimumi korral

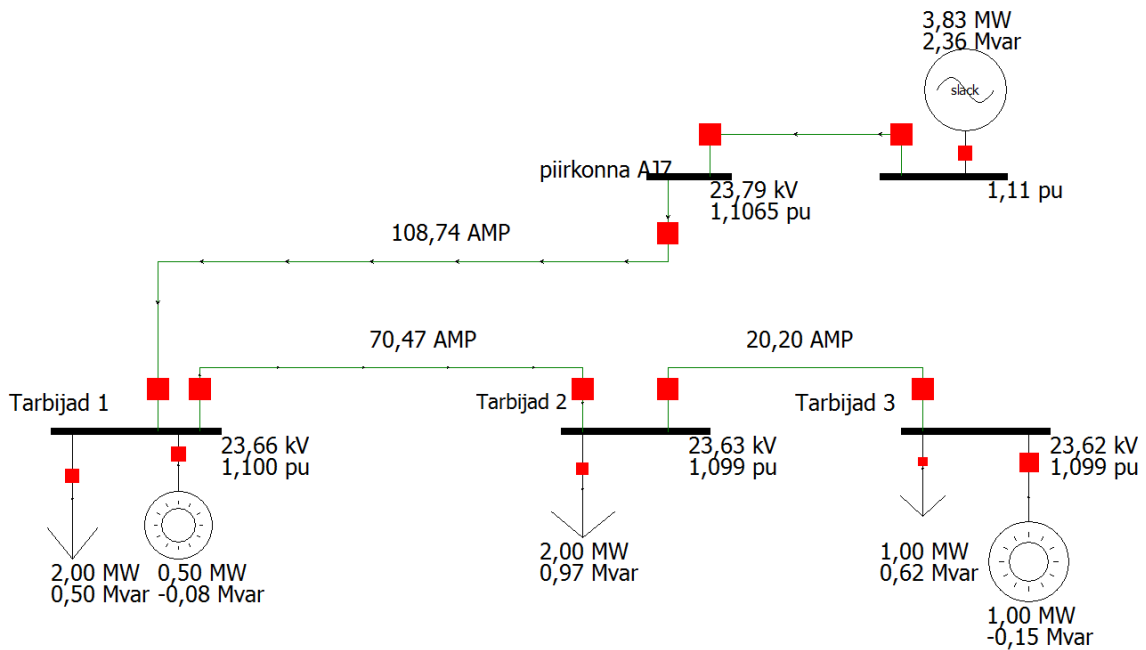
Baas olukord

Toodud joonisel 3.14.

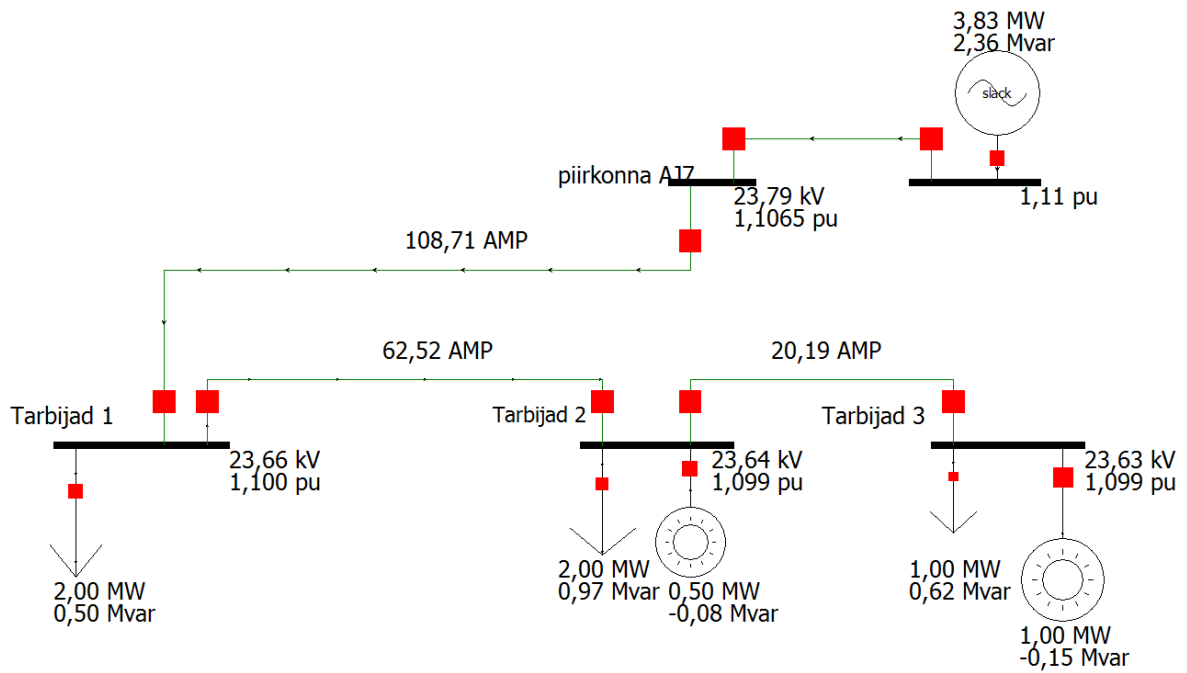
Baas olukorrale lisatud kaks jaama 2 ja 3 fiidritele koos maksimaalse reaktiivi tarbimisega



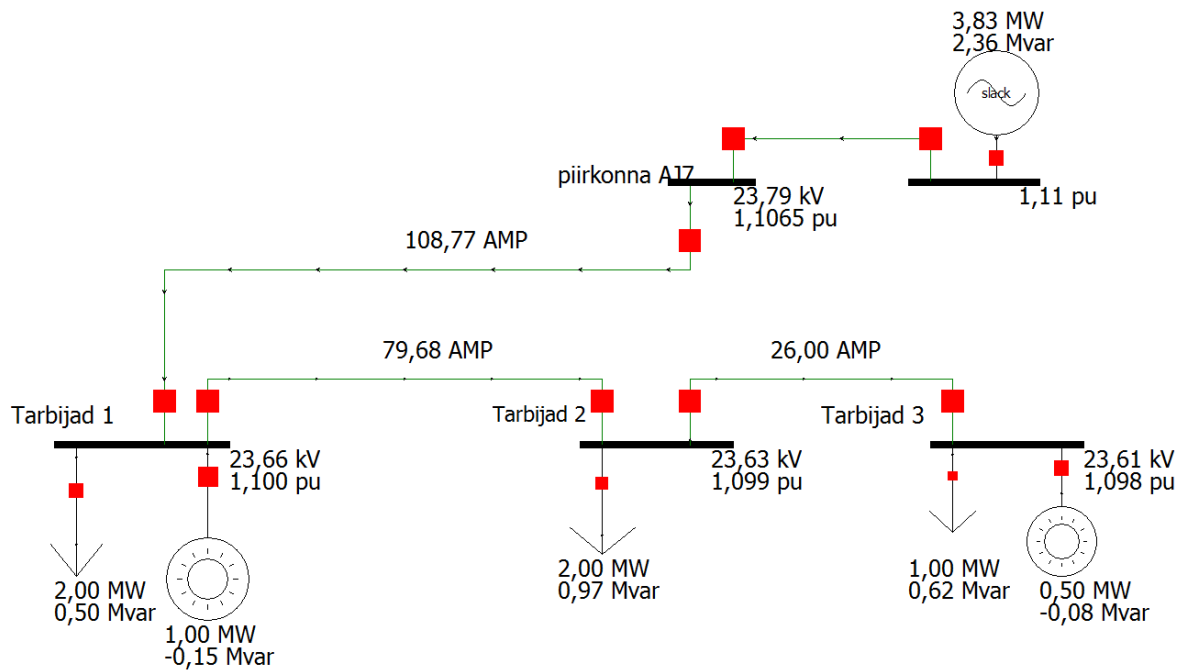
Jaamad 1 ja 3 fiidritele maksimaalse reaktiivi ja nimiaktiivvõimsusega



Jaamad 2 ja 3 fiidri lõpus maksimaalse reaktiiviga ja nimiaktiivvõimsusega



0,5 MW jaam latil 3 ja 1 MW jaam 1 latil P ja Q max.



0,5 MW jaam latil 1 ja 1 MW jaam 3 latil P ja Q=0

