



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

Releekaitse väiketootmisseadmetega jaotusvõrgus

Elektroenergeetika õppekava

Energiasüsteemide õppetool

Magistritöö

Õppetooli juhataja

dots. Jako Kilter

Juhendaja

prof. Heiki Tammoja

Lõpetaja

Kaspar Liibert

Tallinn 2016

Autorideklaratsioon

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

Lõpetaja (allkiri ja kuupäev) _____

Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Kaspar Liibert	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Releekaitse väiketootmiseseadmetega jaotusvõrgus	
<i>Kuupäev:</i> 25.05.2016	65 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Energeetikateaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika instituut	
<i>Õppetool:</i> Energiasüsteemide õppetool	
<i>Töö juhendaja(d):</i> professor Heiki Tammoja	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i>	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Käesolev töö annab ülevaate väiketootmiseseadmete jaotusvõrku liitumisel esinevatest releekaitsega seotud probleemidest ning iseärasustest. Töös vaadeldakse erinevaid väiketootmiseseadmeid ning nende lühisvoolusid, mis on suurimaks mõjuriks releekaitsete tööle. Lõputöö kirjeldab senist releekaitse sätete arutamismeetodit ning juhib tähelepanu aspektidele, millega peab lisaks arvestama tootmiseseadmetega jaotusvõrgu sättearvutusel. Lisaks vaadeldakse väiketootmiseseadmetega võrgus esineda võivat saartalitlust ning analüüsitakse võimalikke kaitsefunktsioone selle vältimiseks. Töö praktilises osas modelleeritakse jaotusvõrgu lühiseid näitlikustamiseks voolukaitsetega esinevaid probleeme ning analüüsitakse nende esinemist erinevat tüüpi generaatorite korral.</p> <p>Töö tulemustest selgub, et väiketootmiseseadmetega jaotusvõrgus on tarvilik kasutusele võtta täiuslikumad kaitseadmed ning –funktsioonid, et tagada võrgu kindel kaitsmine lühisvoolude kahjuliku mõju eest ning vältida võimalikku võrguosa saartalitluse jäämist. Töö tulemusena valmivad nõuded väiketootmiseseadmetega võrgu releekaitse- ja automaatikaseadmetele ning esitatakse teoreetilised alused nende seadistamiseks.</p>	
<i>Märksõnad:</i> väiketootmine, releekaitse, selektiivsus, liigvoolukaitse, sättearvutus, saartalitlus	

Summary of the Diploma Work

<i>Author:</i> Kaspar Liibert	<i>Kind of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Protection of Distribution Network with Distributed Generation	
<i>Date:</i> 25.05.2016	65 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology <i>Faculty:</i> Faculty of Power Engineering <i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering <i>Chair:</i> Chair of Power Systems	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Professor Heiki Tammoja <i>Consultant(s):</i>	
<i>Abstract:</i> The paper gives an overview of problems and issues of relay protection in distribution networks with distributed generation. Different types of distributed generators are studied. The short circuit current contribution from different types of generators are analysed because the main protection of Estonian distribution network is overcurrent protection. The thesis describes the current practice of calculating the protection settings without distributed generation and gives an outline of issues which have to be taken into account when calculating protection settings for distribution network with generators. As islanding is a problem in network with distributed generation different loss of grid protection functions are discussed. Different cases of protection issues are studied and simulated in the practical part of the thesis to illustrate the impact of distributed generation to overcurrent protection relays. The results of the paper show the necessity of implementing more complex protection functions to ensure proper protection against the impact of short circuit currents and to avoid the islanded operation. As a result the requirements of protection functions are presented for feeder terminals in distribution network with generators. Furthermore, some theoretical instructions for setting the protection functions are given.	
<i>Key words:</i> distributed generation, overcurrent protection, protection settings coordination, selectivity, islanding protection	

Sisukord

Lõputöö ülesanne.....	6
Eessõna	8
Sissejuhatus.....	9
1. Hajatootmiseseadmed jaotusvõrgus	12
1.1 Klassikalise jaotusvõrgu kontseptsioon	12
1.2 Tootmiseseadmetega jaotusvõrgu kontseptsioon.....	13
1.3 Väiketootmiseseadmete olemus.....	14
1.4 Elektritootmiseseadmed jaotusvõrgus	15
1.4.1 Soojuselektrijaamad.....	16
1.4.2 Tuuleelektrijaamad.....	16
1.4.3 Päikeseelektrijaamad	17
1.4.4 Kütuselemendid	17
1.4.5 Sünkroongeneraator.....	17
1.4.6 Asünkroongeneraator.....	18
1.5 Nõuded jaotusvõrku liidetavatele generaatoritele ja nende releekaitsele.....	19
2. Jaotusvõrgu lühisvoolud ja kaitse.....	22
2.1. Lühisvoolude arvutamine.....	22
2.2. Tootmiseseadmete lühisvoolud.....	25
2.2.1 Sünkroongeneraatorid.....	25
2.2.2 Asünkroongeneraatorid.....	26
2.2.3 Muunduritel põhinevad väiketootmiseseadmed	27
2.3. Voolukaitsete arvutuspõhimõtted jaotusvõrgus	27
3. Väiketootmiseseadmed ja jaotusvõrgu releekaitse	32
3.1. Voolukaitsete liigtöötamine	33
3.2. Voolukaitsete mittetöötamine	34
3.2.1 Lühisekoha määramise funktsiooni häirumine.....	36
3.3. Kaitsete blokeeringuloogika töö häirumine	37
3.4. Saartalitluse teke	38
3.5. Mittesünkroonne automaatne taas- ja reservilülitus.....	42
4. Väiketootmiseseadmetega jaotusvõrgu voolukaitsete modelleerimine	45
4.1. Mudeli kirjeldus ja lähteandmed.....	45
4.2. Generaatoriteta võrgu releekaitse.....	47
4.3. Sünkroongeneraatori mõju releekaitsele.....	48
4.3.1 Sünkroongeneraatori mõju fiidrikaitsele sama fiidri lühisel.....	49
4.3.2 Sünkroongeneraatori mõju fiidrikaitsele naaberfiidri lühisel.....	51
4.4. Asünkroongeneraatori toime voolukaitsetele.....	52
4.5. Üle muunduri võrku ühendatud väiketootmiseseadmete mõju voolukaitsetele.....	53
5. Väiketootmiseseadmetega võrgu releekaitse ja selle sätestamine.....	55
5.1. Nõuded liitumispunkti releekaitsele.....	55
5.2. Nõuded võrgu liinikaitsetele väiketootmiseseadmetega võrgus	57
Lõputöö kokkuvõte	59
Lisad	66

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	Releekaitse väiketootmiseseadmetega jaotusvõrgus
Üliõpilane:	Kaspar Liibert, 144374AAVM
Lõputöö juhendaja:	Heiki Tammoja
Õppetool:	Energiasüsteemide õppetool
Õppetooli juhataja:	Jako Kilter
Lõputöö esitamise tähtaeg:	27.05.2016 kell 15.00

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppetooli juhataja (allkiri)

Teema põhjendus:

Väiketootjate liitumine jaotusvõrguga on päevakohaseks muutunud suuresti karmistuvate keskkonnanõuetega elektritootmiseseadmetele ning üha enam toetatud väiketootmise tõttu. Kohalike elektritootmiseseadmete liitumine jaotusvõrku muudab aga keerukamaks releekaitse- ja automaatikaseadmete talitluse ning võrgu kaitsmise rikete eest. Vaadeldav magistritöö uurib väiketootjate jaotusvõrku liitumisega kaasnevat mõju releekaitsele ning sellega kerkivaid probleeme elektrivõrgu kaitsmisel. Autori töö tulemusena valmib analüüs, kus vaadeldakse muutusi ja iseärasusi, mis tekivad releekaitse süsteemide töös juhul, kui võrku lisada generaatorid ja tekitada seeläbi kahepoolne toide. Tulemustes pakutakse välja kaitseskeeme ja –mehhanisme, et tagada võrgu ohutu töö ka väiketootmiseseadmetega paralleeltööl olles. Et elektritootmine jaotusvõrgus muudab elektrivõrgu kaitsmise põhimõtteid ning teemakohane analüüs eestikeelsena on puudulik, osutuvad töö tulemused heaks sisendiks jaotusvõrgu releekaitse planeerijatele ja operaatoritele.

Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on uurida jaotusvõrku liidetavate väiketootjate mõju releekaitse talitlusele.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Hajatootmisseedmed jaotusvõrgus

Elektritootmisseedmete mõju keskpinge võrgu lühisvooludele

Keskpinge võrgu releekaitse sätete arvutamine

Elektritootmisseedmete mõju keskpinge võrgu releekaitsele

Nõuded väiketootmisseedmetega võrgu releekaitsele ja automaatikale

Lähteandmed:

Andmed käesoleva töö läbiviimiseks saadakse:

- kirjandusest
- internetist
- Elektrilevi OÜ sisedokumentidest
- juhendajalt

Eessõna

Käesoleva magistritöö teema on välja pakutud professor Heiki Tammoja poolt Tallinna Tehnikaülikooli energeetikateaduskonnast ning ajendatud jaotusvõrguettevõtte Elektrilevi OÜ praktilisest vajadusest omandada teemakohast materjali ja teostada sellekohast analüüsi. Suur roll teemavalikul oli ka autori enda seotusel jaotusvõrgu releekaitse planeerimisel ja arvutamisel.

Töö põhilisteks teoreetilisteks alusteks on samal teemal kirjutatud võõrkeelsed diplomitööd, publitseeritud teadusartiklid ning konverentside materjalid.

Töö praktilise osa algandmetena on kasutatud Elektrilevi jaotusvõrgu parameetreid ning andmeid tootjate liitumistaotlustest. Andmete kogumisel on abiks olnud Elektrilevi OÜ Automaatikatööde sektori töötajad.

Autor soovib tänada praktiliste nõuannete eest töö juhendajat, Elektrilevi OÜ automaatika Tallinna piirkonna juhti Rein Aronit, Elektrilevi OÜ automaatika juhtivspetsialisti Kalle Luuki, Elektrilevi OÜ tehnilise kontrolli sektorijuhatajat Jaan Niitsood ning Elektrilevi OÜ varahalduse strateegilise planeerimise osakonna tootjaliitumiste eksperti Ott Antsmaad.

Kaspar Liibert

(+372) 5886 3793

kaspar@liibert.ee

Sissejuhatus

Elektrienergia on kujunenud üheks mugavaimaks ja ka odavaimaks energialiigiks. Esimesed elektritootmiseseadmed loodi esmalt tööstuste juurde, mille eesmärk oli katta vabrikute ja tehaste elektritarbimist. Üsna pea selgus, et optimaalsem on toota elektrienergiat tsentraalselt elektrijaamades ning liita tekkinud väikesed süsteemid ühtse juhtimise alla. See idee lõi arusaama klassikalisest energiasüsteemist kui organiseeritud ja juhitud süsteemist, kus elektrienergia toodetakse tsentraalselt elektrijaamades, transporditakse kõrgepinge-ülekandevõrku pidi tarbimiskeskustesse ning juhitakse edasi jaotusvõrkude kaudu tarbijateni.

Viimastel aastakümnetel on tehnoloogia arengu ja lihtsa kättesaadavuse tõttu hakatud tooma elektrienergia tootmist tarbimisele lähemale. Ajendiks sellele on olnud üha karmistuvad keskkonnanõuded, mis piiravad seniste klassikaliste fossiilsetel kütustel töötavate suurte elektrijaamade tööd ning sunnivad kasutusele võtma senistest kõrgema efektiivsusega tehnoloogiad või taastuvatel energiaallikatel (tuule- ja päikeseenergia) baseeruvaid tootmisvahendeid. Võimalikuks on saanud väikeste elektritootmiseseadmete ühendamine vahetult tarbimiskoha juurde, võimaldades nii kasutada kohalike energiaressursse ja vähendades läbi võrgu transporditava elektrienergia mahtu. Et selliste elektritootmiseseadmete (edaspidi kasutatakse töös mõistet tootmiseseadmed, mille all mõeldakse elektrienergia tootmiseseadmeid) võimsus on tavaliselt mõnekümnest kilovatist kuni kümne megavatini, ühendatakse sellised väiketootjad just jaotusvõrguga.

Jaotusvõrgud on nii Eestis kui ka maailmas varasemalt projekteeritud ja ehitatud eeldusel, et energia liigub võrgus ühes suunas – kõrgepingel talitlevatest piirkonna toitealajaamadest jaotuspunktide kaudu tarbijateni. Hajatootmiseseadmete liitmine jaotusvõrguga muudab tugevalt senist arusaama jaotusvõrgu radiaalsest skeemist. Väiketootmiseseadmetega jaotusvõrkude talitus hakkab sellisel juhul üha enam sarnanema ülekandevõrgu talitlusele, mida toidetakse mitmest punktist.

Jaotusvõrkude kaitsmiseks lühiste ja ülekoormuste eest on valdavalt kasutusel liigvoolukaitse. Voolukaitseid kasutatakse ennekõike nende lihtsa ehituse ja võrdlemisi kergelt mõõdetava tunnussuuruse tõttu. Voolukaitsete sätete arvutamisel on oluline roll võrgu lühisvooludel, mille alusel sätteid määratakse. Klassikalises radiaalses jaotusvõrgus on toide ühepoolne ning kaitsesätete määramisel saab lähtuda ühest punktist toiditava lühisega. Tootmiseseadmete

liitumisel jaotusvõrguga osutub senine lähenemisviis aga mõneti vääraks ning arvestada tuleb, et lühist toidetakse mitmest allikast ning seeläbi tõuseb võrgu lühisvool. Sõltuvalt tootmiseseadme võimsusest, tüübist ja tema võrku ühendamise viisist (otse või läbi muunduriseadme) sõltub ka tema poolt võrku antava lühisvoolu osakaal.

Käesolev töö keskendub ennekõike keskpingel jaotusvõrguga liidetud väiketootmiseseadmetele, nende lühisvooludele ning vaatleb nende mõju jaotusvõrgu releekaitsetele.

Töö esimene pool selgitab väiketootjate olemust, liike ja nende ühendamist jaotusvõrku. Töö teine osa tutvustab jaotusvõrgu releekaitset ning selle arvutamise põhimõtteid. Töö kolmandas osas analüüsitakse kirjanduse alusel võimalikke kerkivaid probleeme ja kitsaskohti klassikalise jaotusvõrgu releekaitstes, kui võrku lisatakse tootmiseseadmed. Samas peatükis käsitletakse ka aspekte, mida tuleb tähele panna tootmiseseadmetega jaotusvõrgu releekaitse planeerimisel. Analüüsitakse võimalikku tootmiseseadme ning sellega seotud võrguosa saarestumise probleemi ning arutletakse võimalike kaitsete rakendamise võimalikkuse üle, et sellist olukorda vältida. Lisaks peatutakse ka asjaoludel, mida tuleb tähele panna lülitusautomaatide kasutamisel väiketootmiseseadmetega jaotusvõrgus.

Töö neljas osa keskendub tootmiseseadmetega jaotusvõrgu modelleerimisele, et leida kinnitust eelnevalt kirjeldatud olukordadele. Probleemide näitlikustamiseks simuleeritakse läbi erinevate tootmiseseadmete mõju lühistele ja seeläbi voolukaitse töötamisele ning kaitsete selektiivsusele. Lisaks vaadeldakse ka tootmiseseadme asukoha mõju lühisvooludele ja releekaitsele ning võrreldakse modelleerimise käigus saadud tulemusi olukorraga, kus väiketootmiseseadmed võrgus puuduksid.

Jaotusvõrgu modelleerimiseks on käesolevas töös kasutatud võrgutarkvara DIgSILENT Power Factory 15.2. Tootmiseseadmete mudelitena on kasutusel tüüpmodelid, mis on võetud nimetatud programmiga kaasas olnud andmebaasist. Generaatorite ja trafode andmed on osaliselt pärit ka reaalsest võrgust.

Töö viimases osas töötatakse välja eelnevale analüüsile toetudes nõuded releekaitsele ja määratletakse minimaalsed vajalikud kaitseid kaitsemaks tootmiseseadmetega jaotusvõrku.

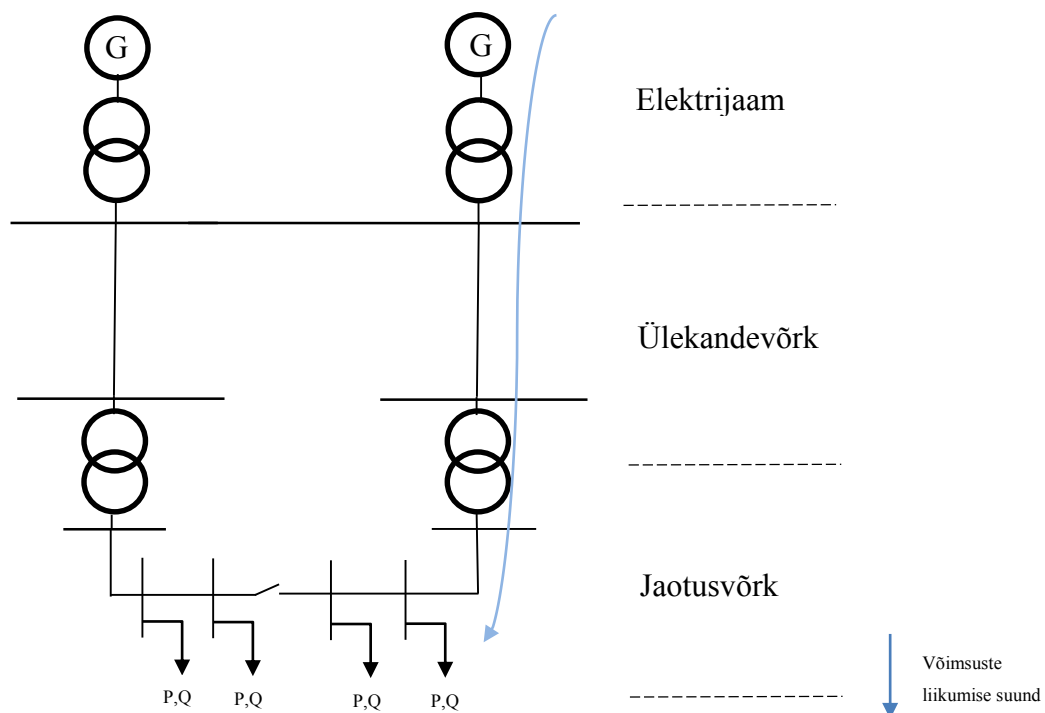
Töö tulemusi on võimalik kasutada jaotusvõrgu võrgu planeerimise, releekaitse planeerimise ning releekaitse sätete määramise eest vastutavatel isikutel, saamaks ülevaadet väiketootmiseseadmete liitumisel kerkivatest probleemidest ja võimalikest lahendustest. Lisaks on käesoleva töö alusel leitud tootmiseseadmetega jaotusvõrgu releekaitse nõudeid võimalik

rakendada tüüpnaetena liitumistingimustes ja alajaamade seadmete hankenõuetes. Töö tulemused osutuvad kindlasti kasulikuks materjaliks elektritootja esindajale, saamaks infot vajalikest muudatustest jaotusvõrgu releekaitse väiketootmiseseadme lisamisega võrku ning seeläbi ka liitumisel tehtavatest lisakulutustest jaotusvõrgu poolsele releekaitsele.

1. Hajatootmisseadmed jaotusvõrgus

1.1 Klassikalise jaotusvõrgu kontseptsioon

Kaasaja elektrivõrk on kujunenud välja viimase 50 aasta jooksul. Senine arusaam elektrisüsteemist on lähtunud suuresti põhimõttest, kus elektrienergia toodetakse tsentraalsetes, enamasti fossiilseid kütuseid kasutavates elektrijaamades, mis tihti asuvad kütuse leiukohale lähedal, samas kaugel elektri tarbimiskohast. Elektrienergia suunatakse elektrijaama generaatorist läbi plokitrafo kõrgepingel talitlevasse ülekandevõrku. Ülekandevõrgu eesmärk on transportida elektrienergiat suurte vahemaade taha – elektri tootmiskohast tarbimiskeskustesse. Tarbimiskeskustes paiknevad tavaliselt ülekande- ja jaotusvõrke ühendavad piirkonna toitealajaamad (edaspidi kasutatakse töös mõistet piirkonnaalajaam), milles alandatakse kõrgepingelise elektrienergia pinget keskpingele. Jaotusvõrk jaotab elektrienergiat keskpingel tarbimiskohtadeni, kus see jagatakse madalpingel tarbijateni (elektrit tarvitavate seadmeteni) [1]. Nn. klassikalise energiasüsteemi mudelit kujutab allolev joonis (Joonis 1.1).



Joonis 1.1 Traditsioonilise elektrisüsteemi skeem

Sellise käsitluse kohaselt liigub energia jaotusvõrgus alati ühesuunaliselt. Energia saadakse kõrgema pingega ülekandevõrgust ning toimetatakse kesk- ja madalpingevõrke mööda tarbijani. Jaotusvõrgud on ehitatud tavaliselt konfiguratsioonilt radiaal-, ring- või

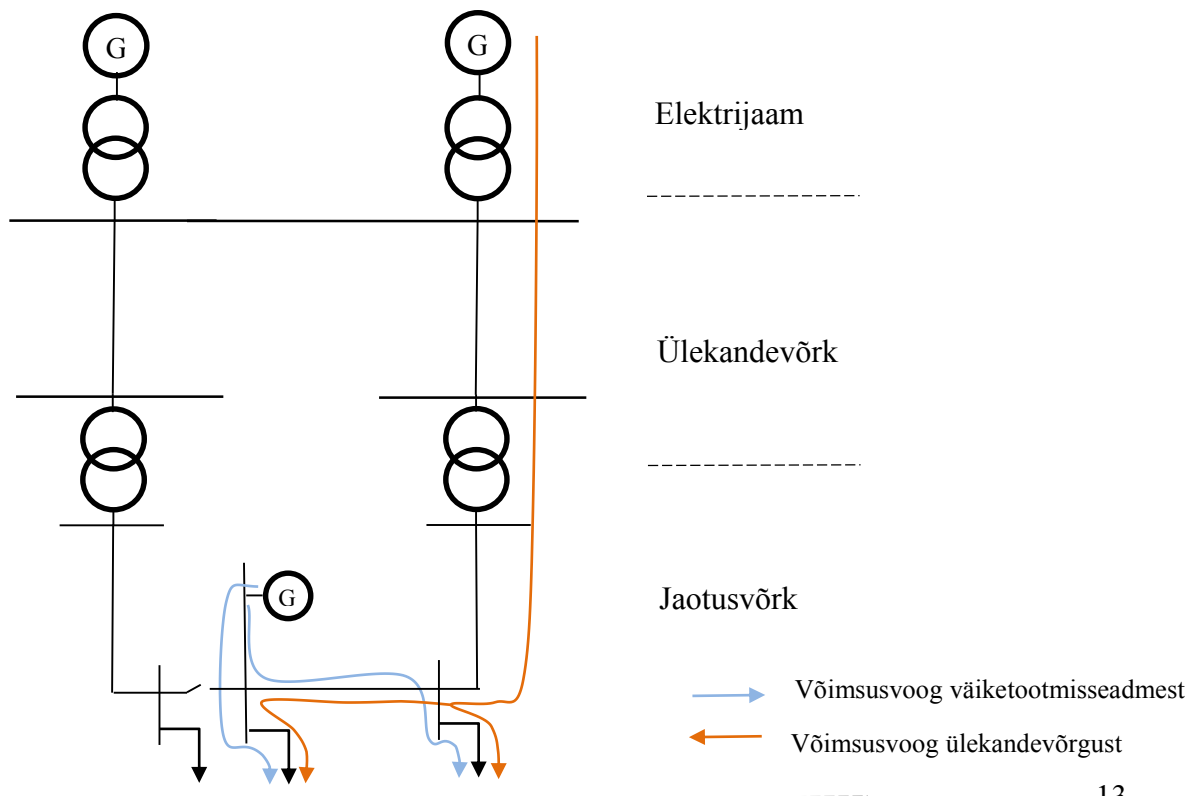
silmusvõrkudena, ent talitlevad avatuna, sest nõnda on releekaitse ja automaatika tunduvalt odavamad [2].

Et elektrienergia tarbimine näitab maailmas kasvutrendi, osutub traditsioonilise skeemi puhul (vt Joonis 1.1) vajalikuks tootmisvõimsuste lisamine esimesele tasemele (Elektrijaam). Suurem energia tootmine nõuab aga ka ülekande- ja jaotusvõrkude täiustamist ning parendamist [1].

1.2 Tootmisseedmetega jaotusvõrgu kontseptsioon

Elektriturgude avanemine, tehnoloogia areng ja piirangute vähenemine energiasüsteemides on loonud võimalused ka väiketootmiseks. Elektrituru areng, luues võimalused ka väiksematel investoritel siseneda elektritootmise valdkonda, ning tootmisseedmete tehniline areng, luues võimaluse toota kõrgema kasuteguriga kuid samas väiksema ühikvõimsusega generaatorseadmeid, on viinud võimalusteni ühendada elektrivõrkudesse ka väiksema võimsusega elektrijaamu. Sellised jaamad võimaldavad tihti ka madalamaid hindu toodetud elektrienergiale [1].

Et väiketootmisseedmete võimsused on väiksed, on majanduslikult otstarbekas need üldjuhul ühendada jaotusvõrguga tarbimisele kõige lähemas punktis. Tootmisseedmete lisandumine jaotusvõrku aga muudab selle traditsioonilist skeemi. Seni radiaalselt ja ühepoolse toitega töötanud jaotusvõrk peab talitlema hakkama mitmepoolselt toidetavana. Vaadeldavat olukorda elektrisüsteemis aitab iseloomustada alljärgnev joonis (Joonis 1.2).



Joonis 1.2 Väiketootmisega elektrisüsteem

Et väiketootmiseseadmed baseeruvad tihti taastuvatel energiaallikatel, mille puhul väljaantav võimsus on muutlik ning keerukalt prognoositav, tuleb valmis olla jaotusvõrgu toiterežiimideks mitmepoolse toitega kui ka ühepoolse ülekandevõrgu poolse toitega. Sellistele režiimimuutustele peab olema kohaldatud jaotusvõrgu skeem ja seadmed (k.a releekaitse). Üheltpoolt väheneb tootmiseseadmetega võrgus vajadus investeerida tugevdamiseks ülekandevõrku, teisalt peab aga tarbijate elektrivarustuse tagama ka N-1 tingimustes, kus väiketootmiseseade on tööst väljas. [1]

1.3 Väiketootmiseseadmete olemus

Väiketootjana saab vaadelda elektrienergia tootmiseseadmeid, mis vastavad järgmistele tingimustele [3] [4]:

- ühendatakse valdavalt jaotusvõrku;
- seadmete töö ei ole keskselt planeeritud;
- tootmiseseadmetele ei kohaldata võrguoperaatori dispetšijuhtimist;
- nimivõimsusega mitte üle 10 MW.

Eesti tingimustes saab lugeda väiketootmiseks generaatorseadmeid nimivõimsusega 0,011 MW kuni 10 MW [5]. Praktikas ühendatakse üle 5 MW nimivõimsusega tootjad üldjuhul juba ülekandevõrguga [6].

Väiketootmise eelistena saab välja tuua [7]:

- Väiketootmiseseadme eesmärk on tugevdada piirkonna varustuskindlust ning võimalusel vähendada ülekande- ja jaotusvõrgu kadusid;
- Väiketootjate ühendamise jaotusvõrguga peaks parendama elektri kvaliteeti ja pingestabiilsust. Seetõttu peaks süsteem taluma ka suuremaid koormusi;
- Väiketootmiseseadmel on lühike tasuvusaeg ning nendest toodetud elektrienergiat subsideeritakse üldjuhul riiklikest vahenditest;
- Mitmed väiketootmise tehnoloogiad on madala keskkonnasaastega ning kõrge kasuteguriga (mikroturbiinid, väikekoostootmisjaamad);

Väiketootmise puudusteks võib lugeda aga järgmist [4]:

- Osa väiketootjatest ühendatakse nende tehnoloogilise eripära tõttu võrku üle inverterseadmete, mis toodavad võrku kõrgemaid harmoonikuid, rikkudes seega elektrienergia kvaliteeti;

- Väiketootjate ühendamise jaotusvõrku võib teatud tingimustel esile kutsuda võrguosa lokaalseid kestvaid liigpingeid, laineprotsesse ja süsteemi ebasümmeetriat (ennekõike generaatori puudulikul sobitamisel süsteemiga);
- Sõltuvalt jaotusvõrgu konfiguratsioonist ja väiketootmise tehnoloogiast võib generaatorseadme lisamine jaotusvõrku suurendada selle kadusid;
- Võrgu lühisvoolude tase võib tõusta, kui generaator on töös. Seetõttu võib tekkida vajadus generaatorseadme väljasoleku korral kasutada võrgu releekaitsetel teistsuguseid sätteid kui sisse lülitatud generaatori korral, mis muudab releekaitse süsteemi keerukamaks ja kallimaks.

1.4 Elektritootmiseseadmed jaotusvõrgus

Jaotusvõrku liidetavaid väiketootmiseseadmeid saab liigitada mitmeti. Üheks levinumaks aluseks, mille järgi elektritootmiseseadmeid liigitada, on primaarenergia allika järgi. Selle järgi võib tootmiseseadmed jagada:

- soojuselektrijaamad
- tuuleelektrijaamad
- päikeseelektrijaamad
- kütuseelemendid

Lisaks eelnevale on oluline eristada tootmiseseadmeid võrku ühendamise viisi ja generaatorseadme tööpõhimõtte järgi. Üldjoontes saab jaotusvõrku ühendatavad jaotuseseadmed jagada eelnevalt sätestatu järgi kaheks:

- üle inverterseadme võrku ühendatavad tootmiseseadmed;
- pöörleva generaatoriga otse võrku ühendatavad tootmiseseadmed.

Viimaseid saab omakorda jaotada generaatori tüübi järgi kaheks:

- sünkroongeneraatorid;
- asünkroongeneraatorid.

Generaatorseadme tüübist ning võrku ühendamise viisist sõltub oluliselt tema poolt võrku antav lühisvool. Viimasest sõltub tugevasti releekaitsete õige töötamine.

Järgnevad alapunktid kirjeldavad lähemalt levinumaid elektri väiketootmise tehnoloogiaid.

1.4.1 Soojuselektrijaamad

Soojuselektrijaamadena saab vaadelda elektrijaamu, mis kasutavad generaatorit käitava soojusmasinana turbiini, sise- või välipõlemismootorit. Selliste jaamade kütustena on väiketootmises ennekõike kasutusel vedel- (kütteõli, diiselkütus) ja gaaskütused (maagaas, biogaas). Turbiin on seade, kus kuuma gaasi (Braytoni ringprotsess) või auru (Rankine'i ringprotsess) paisumisel vabanev energia muundatakse pöörlemiseks. Eestis on valdavalt soojusjaamad kasutusel koostootmisjaamadena [8], kus kohalikku katlamajja on paigutatud generaatorseade ning lisaks soojusele toodetakse jaotusvõrku ka elektrienergiat. Diiselmootoriga elektrijaamad on valdavalt kasutusel reservgeneraatoritena tundlike tarbijate juures, mida võrguliitumise olemasolul ka elektritootmiseks (näiteks tarbimise tipuperioodidel) kasutada võidakse.

Soojuselektrijaamade pöörlemissagedus on üldjuhul juhitav kütusekogusega (kiirusregulaatorid) ning seetõttu on võimalik kasutada sünkroon- või asünkroongeneraatoreid otseühendusega võrku. Erandiks siinjuures võivad olla kütusena gaasi kasutavad mikroturbiinid, mis võivad olla nii võrgusagedusliku pöörlemiskiirusega aga ka võrgusagedusest suurema pöörlemiskiirusega. Viimased ühendatakse võrku üle inverterseadme, kus muundatakse generaatorist saadav pöörlemiskiirusest sõltuva sagedusega vahelduvvool alaldis alalisvooluks ning siis vaheldis uuesti võrgusageduslikuks vahelduvvooluks [9].

1.4.2 Tuuleelektrijaamad

Tuuleelektrijaamad ehk elektrituulikud on seadmed, mis muundavad tuule kineetilise energia elektrienergiaks. Elektrituuliku mehaanilises osas muundab tuuliku rootor (labad) tuule liikumisenergia võlli mehaaniliseks momendiks. Võlli pöörav moment kantakse käigukasti vahendusel generaatorile. Elektrituuliku väljundvõimsus sõltub tema generaatori pöörlemiskiirusest, mis omakorda on sõltuv labadele liikuva tuule kiirusest. Elektrituuliku kiirust reguleeritakse labade ja gondli pööramisega [10], ent tuule juhuslikku iseloomu ja tuulekiiruse volatiilsuse tõttu ei ole võimalik tagada tuuliku pöörlemist võrgusagedusel. Seetõttu on kaasajal ka elektrituulikud võrku ühendatud valdavalt üle inverterseadmete. Kasutusel on nii asünkroon- kui ka sünkroongeneraatorid. Kaasaja tehnoloogiad lubavad kasutada ka püsimgnetgeneraatoreid [11]. Vanemates väikese võimsusega elektrituulikutes võib kohata ka võrku otse ühendatud generaatoreid, ent selliste tuulikute töötamine on võimalik vaid kitsas tuulekiiruste vahemikus.

1.4.3 Päikeseelektrijaamad

Päikeseelektrijaam on kogum päikesepaneelidest, mis muundavad päikeselt saabunud valgusenergiat elektrienergiaks. Päikesepaneelides on kasutusel pooljuhid, mis valguskiirguse toimel hakkavad genereerima alalispinget ja –voolu [9]. Paneelid võivad olla fikseeritud alusel või ka päikesevalguse suunas pöörataval platvormil. Päikesepaneeli võimsus on sõltuv temale langevast valguskiirguse intensiivsusest, aga ka ümbritsevast temperatuurist. Et päikesepaneelid genereerivad alalisvoolu, on võrku ühendamiseks vajalik inverter. Kuna algselt genereeritakse elektrienergia alalispingel, osutub selliste elektrijaamade juures majanduslikult ja tehniliselt otstarbekaks elektrienergia salvestamine akupatareides.

1.4.4 Kütuselemendid

Kütuselement on elektrokeemiline energiamuundamise seade, kus vesinikus salvestunud keemiline energia muundatakse elektrienergiaks ja soojuseks. Kütuselemendid on liikumatute osadega, müraavad ning kõrge efektiivsusega, tarvitades kütuseks vesinikku. Kütuseelement on ennekõike energiasalvesti, võimaldades elektrienergiat toota selleks sobivatel hetkedel (näiteks tipukoormuste katmiseks). Kütuselemendis pannakse katalüsaatorite kaasabil vesinik reageerima hapnikuga (oksüdatsiooniprotsess), millega lõhutakse vesinik positiivselt laetud ioonideks ja elektronideks, mis tekitavad seadme väljundklemmidel alalispinge [9]. Seadme suur eelis on tema väljundvõimsuse juhitavus ning reguleeritavus. Kütuselementidel põhineva elektrijaama elektrivõrku liitmiseks on vajalik inverterseadme olemasolu, mis muundab genereeritud alalisvoolu võrgusageduslikuks vahelduvvooluks.

1.4.5 Sünkroongeneraator

Sünkroongeneraator koosneb võrguga ühendatud staatorimähistest ning alalisvooluga toidetavast rootorile paigutatud ergutusmähisest, mille eesmärk on magnetvälja tekitamine. Rotor, mille mähistes voolab alalisvool, pannakse jõuseadme poolt sünkroonkiirusel pöörlema ja indutseeritakse seeläbi staatorimähistesse elektromotoorjõud. Sünkroongeneraatori pöörlemissageduse paneb paika pooluspaaride arv ning võrgusagedus [3]:

$$n_{syn} = \frac{f}{p} \quad (1.1)$$

kus n_{syn} – generaatori pöörlemissagedus (pööret sekundis)

f – võrgusagedus (50 Hz)

p – pooluspaaride arv.

Normaalselt pöörlevad sünkroonmasin rootor ja staatori magnetväli sama konstantse sagedusega. Sünkroongeneraatori aktiivvõimsus on juhitud jõuseadme kiirusregulaatori poolt, reaktiivvõimsus sõltub aga ergutusest, kusjuures sünkroongeneraator võib reaktiivenergiat nii toota kui tarbida sõltuvalt sellest, kas generaator on üle- või alaergutatud. Sünkroongeneraatori eeliseks on tema võime reguleerida reaktiivvõimsust süsteemis. Samas muudab selline reguleerimisvõimalus sünkroongeneraatori kalliks (võrreldes asünkroongeneraatoriga), kuna ergutussüsteem vajab alalispinge allikat (alaldit) või eraldiseisvat alalisvoolugeneraatorit. Tuleb mainida, et tugevasse jaotusvõrku ühendatud sünkroongeneraatori pöörlemissageduse ja klemmipingega paneb paika võrk ning nende reguleerimises väiketootmiseseade normaalselt ei osale [3] [7].

1.4.6 Asünkroongeneraator

Asünkroonmasin läheb generaatoritalitlusse ja hakkab elektrienergiat tootma, kui rootori pöörlemissagedus saab suuremaks võrgusageduslikust staatori mähise magnetvälja pöörlemissagedusest. Võrguga on asünkroongeneraatoril ühendatud staatorimähised, rootorimähis on üldjuhul lühistatud (lühisrootoriga asünkroonmasin). Asünkroongeneraator vajab magnetvälja loomiseks ja säilitamiseks reaktiivenergiat, mille ta tarbib elektrivõrgust. Seetõttu ei ole asünkroongeneraatori töötamine ilma võrguta üldjuhul võimalik ning erinevalt sünkroongeneraatorist ei saa asünkroongeneraatoriga reaktiivvõimsust reguleerida [3]. Reaktiivenergia tarbe vähendamiseks võrgust kasutatakse tavaliselt asünkroongeneraatorite juures reaktiivenergia kompenseerimisseadmeid (kondensaatorpatareid). Võimsustegur (ja reaktiivenergia tarve) on sõltuvuses asünkroongeneraatori koormusest [12].

Asünkroongeneraatori suur eelis sünkroongeneraatori ees on tema võime siluda tõukelisi kiirusmuutusi jõuseadme (mootor, turbiin) töös. Seda seetõttu, et asünkroongeneraator ei pea töötama võrgu sünkroonkiirusel. Võime töötada sünkroonkiirusest erinevalt tuleneb asünkroonmasin rootori ja staatori magnetvälja pöörlemiskiiruste erinevustest, mida nimetatakse libistuseks.

Asünkroongeneraatorite eritüüp on kaksistoitega asünkroongeneraator, mis on kasutust leidnud ennekõike elektrituulikutele. Kaksistoitega asünkroongeneraatorite puhul on tegemist faasirootoriga asünkroonmasinaga, mille rootoriahel on võrku ühendatud üle invertermuunduri, võimaldades asünkroongeneraatoril töötada laiemas kiirusvahemikus. Lisaks tööle erinevatel

kiirustel lubab selline süsteem ka reguleerida generaatori reaktiivvõimsust eraldiseisvalt aktiivvõimsusest (võimsustegurit) [13].

1.5 Nõuded jaotusvõrku liidetavatele generaatoritele ja nende releekaitsele

Võrku liidetav väiketootmiseseade peab vastama võrguettevõtja nõuetele ning Võrgueeskirjale. Käesolevas alapunktis vaadeldakse nõudeid jaotusvõrguga keskpingel liidetavatele generaatoritele releekaitse aspektist Elektrilevi OÜ nõuete näitel. Viimased on koostatud lähtudes kehtivatest rahvusvahelistest standarditest ning Võrgueeskirjast [14].

Jaotusvõrku liidetavad generaatorid jagatakse kolme klassi:

- Klass 1 elektriijaamad – väiketootmiseseadmed nimivõimsusega 0-200 kW, mis üldjuhul ühendatakse võrguga madalpingel, mistõttu jäävad käesoleva töö käsitlusalast välja;
- Klass 2 elektriijaamad – väiketootmiseseadmed nimivõimsusega 200 kW- 1 MW;
- Klass 3 elektriijaamad – 1 MW – 10 MW nimivõimsusega elektriijaamad.

Tootmiseseadmed peavad olema võimelised töötama ja püsima võrguga paralleeltöös võrguparameetrite teatavate kõrvalekallete puhul. Nõuded talitlusele sageduse ja pinge muutumisel koondab alljärgnev tabel (Tabel 1.1), kus sätestatakse ajaperiood, mille vältel peab generaator võrguga paralleeltöös püsima [14] [15] [16] [17].

Tabel 1.1 Generaatoritele esitatavad nõuded sageduse ja pinge muutumisel

Parameeter	Vahemik	Ajaperiood
Sagedus	47,5 – 49 Hz	Vähemalt 30 minutit
	49 – 51 Hz	Kestvalt
	51 – 53 Hz	Vähemalt 180 sekundit
Pinge	85 – 90 % tavapingest	Vähemalt 60 minutit
	90 – 105 % tavapingest	Kestvalt
	105 – 110 % tavapingest	Vähemalt 60 minutit

Nimetatud nõuded on aluseks nii generaatorite kui ka võrgu (reserv-)kaitsete sätete määramiseks.

Klass 2 elektriijaamad (kuni 1 MW nimivõimsusega) peavad olema varustatud järgnevate kaitsetega [14]:

- liigvoolukaitse;
- üle- ja alapingekaitse;

- sageduskaitse;
- pingeasümmeetriakaitse;
- pöörlemiskiiruskaitse.

Klass 3 elektrijaamad nimivõimsusega kuni 5 MW peavad olema varustatud järgnevate kaitsetega:

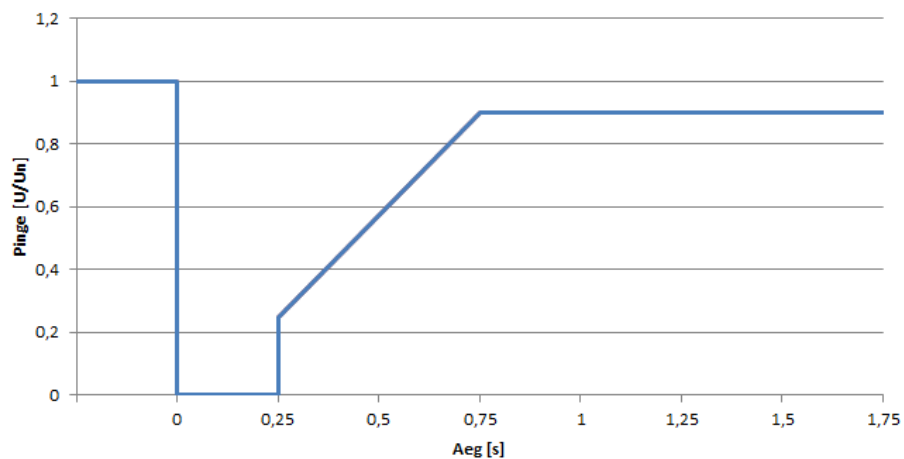
- liigvoolukaitse;
- üle- ja alapingekaitse;
- sageduskaitse;
- pingeasümmeetriakaitse;
- asünkroontalitlusekaitse.

Üle 5 MW elektrijaamade generaatorid peavad olema varustatud järgnevate kaitsetega:

- välislühisekaitse;
- siselühisekaitse;
- rootori ja staatori maalühise kaitse;
- faasivoolu ebasümmeetria kaitse;
- staatori või rootori ülekoormuse kaitse;
- sageduse languse ja tõusu kaitse;
- asünkroontalitlusekaitse;
- tootmiseadme võimsuslüliti tõrke kaitse, kui lüliti on olemas.

Reserveerivate kaitsete olemasolu võrguettevõtte poolel on nõutav alates 1 MW elektrijaama nimivõimsusest. Praktikas paigaldatakse liitumispunkti generaatori kaitseid reserveerivad kaitseid ning kaitsefunktsioonid üldjuhul kõikide keskpingel liituvate väiketootjate puhul.

Klass 3 elektrijaamade generaatorid peavad võrgust väljalülitumata taluma võrgulühistest põhjustatud pingelohkusi. Läbi trafo võrku ühendatud generaator ei tohi vigastuda ega kaitsetest välja lülituda, kui pingelang jääb alloleval joonisel (Joonis 1.3) esitatud kõverast ülespoole.



Joonis 1.3. Pingelohu kõver tootmiseseadmele [17]

Otse võrku ühendatud generaatorite puhul peab generaator võrku jääma pingelohul kuni 25% nimipingest kestvusega 0,25 sekundit ning sellele järgneval pingetõusul kuni 95%-ni nimipingest 0,5 sekundi jooksul. Nimetatud tingimused on olulised kriteeriumid generaatori ja võrgu liitumispunkti pingekaitsete sätete määramisel ning võrgu kiiretoimeliste volukaitsete viidete seadmisel.

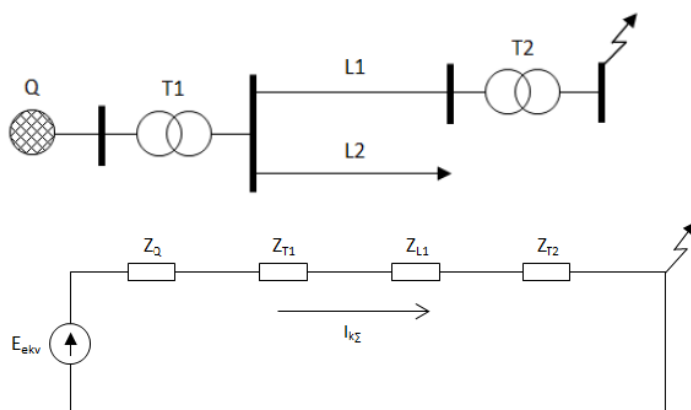
2. Jaotusvõrgu lühisvoolud ja kaitse

Lühist võib pidada jaotusvõrgu kõige ohtlikumaks rikkeks. Lühisvoolu kahjuliku mõju ja tagajärgede vältimiseks on jaotusvõrgus kasutusel voolukaitsed. Käesolevas peatükis tutvustatakse lühisvoolude arvutamise eeskirju ja meetodikat, vaadeldakse väiketootmiseadmete mõju võrgu lühisvooludele ning kirjeldatakse kasutusel olevaid releekaitse arvutamise põhimõtteid.

2.1. Lühisvoolude arvutamine

Lühisvoolude arvutamise aluseks on rahvusvaheline standard IEC 60909 [18]. Võrguosa lühisvoolude leidmiseks koostatakse esmalt võrguosa skeem. Skeemil on tarvilik ära näidata kõik lühist mõjutada võivad elektrisüsteemi elemendid nagu trafod, liinid, generaatorid, voolu piiravad reaktorid ja pöörlevad koormused (mootorid). Standardi kohaselt mittepöörlevaid koormusi ja kondensaatoreid lühiste arvutamisel arvesse ei võeta [19]. Vaatluse all oleva võrguosa ühendus toitva võrguosa kujutatakse skeemis süsteemiharuna. Traditsioonilisel väiketootjateta jaotusvõrgul on selliseid süsteemiharusid võrgus vaid üks.

Lühisvoolude leidmiseks on vajalik teisendada esmalt leitud skeem ekvivalentseks resulteerivaks aseskeemiks lühisekoha suhtes. Joonis 2.1 kujutab jaotusvõrgu osa skeemi ning lühisekohale vastavat resulteerivat aseskeemi.



Joonis 2.1. Jaotusvõrgu osa skeem ning resulteeriv aseskeem [20].

Elektrivõrgu elementide takistuste arvutamise eeskirjad on leitavad mitmetest käsiraamatutest. Lühisvoolu leidmisel on oluline teisendada elementide takistused lühisekoha pingele. Takistusi saab teisendada järgneva eeskirja järgi (valem 2.1):

$$z'' = z' * \frac{U_F^2}{U'^2} \quad (2.1)$$

kus z'' – lühisekoha pingele taandatud võrguelemendi takistus;

z' – lühisekoha pingest erinevale pingele arvatud võrguelemendi takistus;

U_F – lühisekoha pinge;

U' – lühisekoha pingest erinev pinge.

Joonisel (Joonis 2.1) näidatud ekvivalentse elektromotoorjõuks E_{ekv} võetakse lühisekoha nimipinge U_{nF} , mis korrutatakse läbi pingeteguriga c .

$$E_{ekv} = c \frac{U_{nF}}{\sqrt{3}} \quad (2.2)$$

Pingeteguri c väärtused on toodud allolevas tabelis (Tabel 2.1).

Tabel 2.1. Pingeteguri c väärtused [19]

Lühisekoha nimipinge	Suurim lühisvool c_{max}	Vähim lühisvool c_{min}
$U_{nF} \leq 1 \text{ kV}$	1,05 ¹ 1,10 ²	0,95
$U_{nF} > 1 \text{ kV}$	1,1	1,00
¹ Madalpingevõrkudes suurima lubatud pingehälbega +6%		
² Madalpingevõrkudes suurima lubatud pingehälbega +10%		

Kolmefaasiline (ülimööduv) lühisvool avaldub eelneva näite alusel järgneva eeskirja (valem 2.3) järgi:

$$I_k = \frac{E_{ekv}}{Z_{\Sigma}} = \frac{E_{ekv}}{Z_Q + Z_{T1} + Z_{L1} + Z_{T2}} \quad (2.3)$$

Kolmefaasiliste lühiste kõrval tekivad võrgus ka kahefaasilised ja ühefaasilised ning kahefaasilised maalühised. Selliseid lühiseid nimetatakse üldnimetusega asümmeetrilised lühised.

Asümmeetrilisi lühisvoole arvutatakse kolmefaasilises süsteemis sümmeetriliste komponentide meetodiga. Sümmeetrilised komponendid moodustavad kolm sümmeetrilist süsteemi: päri-,

vastu- ja nulljärgnevussüsteemi. Nii on võimalik mistahes kolmefaasilise süsteemi vektoreid avaldada päri-, vastu- ja nulljärgnevuskomponentide abil. [19]

Kolmefaasiliste lühiste arvutamisel on tarvilikud vaid pärijärgnevuskomponendid. Asümmeetrilistel lühistel mõjutavad pärijärgnevustakistuste kõrval lühisvoole ka vastu- ja nulljärgnevustakistused. Päri-, vastu- ja nulljärgnevustakistuste omavaheline suhe sõltub eelkõige elektrisüsteemi elemendi faasidevaheliste magnetsidemete olemasolust. Elektrivõrgu elementide päri-, vastu- ja nulljärgnevustakistused ning nende leidmise eeskirjad on hõlpsalt leitavad käsiraamatutest.

Elektrivõrgu käitumist asümmeetrilise lühise korral mõjutab suuresti ka neutraali maandamisviis. Jaotusvõrgud (keskpingevõrgud) on Eestis ja lähiriikides valdavalt isoleeritud (maandamata) neutraaliga või maandatud läbi kaarekustutuspooli (resonantsmaandatud) [2]. Sellistes võrkudes nimetatakse ühefaasilist lühist maaühenduseks, kuna tekkiv maaühendusvool on väike (kuni paarkümmend amprit).

Jaotusvõrgu kahefaasilisel (faasidevahelisel) lühisel ühendust maaga ei teki ning lühisvool avaldub järgmise valemi (valem 2.4) alusel [20]:

$$I_{k(2)} = \frac{\sqrt{3} * E_{ekv}}{z_{1\Sigma} + z_{2\Sigma}} \quad (2.4)$$

kus $z_{1\Sigma}$ – lühiseahela summaarne pärijärgnevustakistus;

$z_{2\Sigma}$ – lühiseahela summaarne vastujärgnevustakistus.

Kahefaasilise lühise suurus sõltub võrgu elementide vastu- ja pärijärgnevustakistuste suhtest.

Vähim on $I_{k(2)}/I_{k(3)}$ suhe lühise ülümööduvas seisundis ning siis suhe $\frac{I_{k(2)}}{I_{k(3)}} = \frac{\sqrt{3}}{2}$. Suurim on aga suhe generaatori lähedal asuva püsilühise korral, siis suhe $\frac{I_{k(2)}}{I_{k(3)}} = \sqrt{3}$ [19].

Keskpingevõrkude lühisearvutuste levinud praktikas loetaksegi vähimaks võimalikuks lühisvooluks võrgus kahefaasiline lühis. Et leida võimalik halvim juhul, on kujunenud üldlevinud praktikaks, et vähim võimalik lühisvool jaotusvõrgus leitakse minimaalse kolmefaasilise lühisvoolu alusel (valem 2.5):

$$I_{k(2)min} = \frac{\sqrt{3}}{2} * I_{k(3)min} \quad (2.5)$$

Vähima lühisvoolu väärtus võrgus on oluline kaitserakendumise ning releekaitse tundlikkuse kontrollimiseks.

2.2. Tootmisseadmete lühisvoolud

2.2.1 Sünkroongeneraatorid

Sünkroongeneraatorid on suurima lühisvooluga generaatoritüüp ning on võimelised tootma lühist püsivalt eraldiseisva ergutussüsteemi tõttu. Sünkroongeneraatori takistus ja elektromotoorjõud on lühise suhtes tundlikud ja muutuvad lühise käigus. Generaatori takistuse muutumise tõttu muutub lühise käigus ka kogu ahela takistus, millest tulenevalt ei jää lühisvoolu efektiivväärtus I_k ajas konstantseks, vaid muutub siirdeprotsessi käigus ülimööduvast väärtusest I_k'' kuni püsiväärtuseni I_k^∞ [19].

Lühisvoolude arvutamise korral on oluline just ülimööduv lühisvool. Sünkroongeneraatori ülimööduva lühisvoolu leidmiseks on vajalik lisada võrgu askeemi sünkroongeneraatori takistus $Z_G = R_G + jX_G''$

kus X_G'' - sünkroongeneraatori ülimööduv reaktants, mis on leitav generaatori suhtelise ülimööduva takistuse alusel (valem 2.6) [19]:

$$X_G'' = x_d'' \frac{U_n^2}{S_{nG}} \quad (2.6)$$

kus x_d'' - generaatori ülimööduva reaktiivtakistuse pikikomponent;

U_n - generaatori nimipinge;

S_{nG} - generaatori nimivõimsus.

Kui generaatori aktiivtakistus ei ole teada, võib selleks lugeda madalpingelistel (alla 1 kV nimipingega) generaatoritel $R_G = 0,07X_d''$, kõrgematel nimipingetel talitlevatel $R_G = 0,15X_d''$. Juhul, kui generaator talitleb võrgupingest madalamal või kõrgemal pingel, on tarvilik arvestada ka generaatori ees paikneva trafo takistusega, millel on lühisvoolu piirav toime [21].

Ligikaudselt saab lugeda, et sünkroongeneraatori lühisvool ulatub 4 ... 10 kordse generaatori nimivooluni lühise algul, langedes seejärel lühise püsirežiimis 2 ... 4 I_{nG} -ni [22].

2.2.2 Asünkroongeneraatorid

Asünkroongeneraatorid erinevalt sünkroongeneraatoritest lühist püsivalt toita ei saa, kuna sümmeetrilisel lühisel ei ole võimalik võrgust saada asünkroongeneraatoril magneetamiseks vajalikku reaktiivvõimsust. Seetõttu lühisvool küll tekib lühise algfaasis, kestab mõned võnkeperioodid, kuid kahaneb siis kiiresti nullini. Püsilühist asünkroongeneraator ei toida [21] [23].

Oma ehituselt ja tööpõhimõttelt on asünkroongeneraator sarnane asünkroonmootorile. Nii saab ka asünkroongeneraatori takistuse arvutada samadel põhimõtetel nagu asünkroonmootori oma. Lühisvoolude arvutuseks aseskeemis vajaliku asünkroonmasina takistuse saab leida järgneva eeskirja alusel [21]:

$$z_G = \frac{I_{nG}}{I_{LR}} \cdot \frac{U_{nG}^2}{S_{nM}} \quad (2.7)$$

kus I_{LR} – nimipingele lülitatud pidurdatud (lukustatud) rootoriga generaatori (mootori) vool;

I_{nM} – generaatori nimivool;

S_{nG} – generaatori niminäivvõimsus;

U_{nG} – generaatori nimipinge.

Täpsemate lähteandmete puudumisel võib lugeda suhte $\frac{I_{LR}}{I_{nG}}$ väärtuseks ligikaudu 8 ning arvestada generaatori aktiivtakistuseks $R_G = (0,10 \dots 0,15)X_G$ sõltuvalt generaatori nimivõimsusest [21]. Asünkroongeneraatori ülimööduv lühisvool on ligikaudu 5-kordne masina nimivool ning see ei kesta enam, kui 10 voolu tsüklit [22].

Asünkroongeneraatorite eritüüp on kaksistoitega asünkroongeneraatorid, mida ennekõike kasutatakse tuulegeneraatorites. Selle faasirooriga generaatoritüübi lühisvoolu määrab suuresti rootoriahelas kasutatava inverteri karakteristika ning lühisvoolude toime vähendamise seadmete (lühisetõrjeahel, staatoriahela kiire eraldamine) kasutamine. Arvutuslikult ei eksita väga palju, kui kaksistoitega asünkroongeneraatori ülimööduv lühisvool ja selle kestvus lugeda suuruselt sarnaseks tavalise asünkroongeneraatori lühisvooluga ($I''_{kG} = 5I_{nG}$ ja kestvus 5-10 voolutsüklit) [21]. Täpsete tulemuste saamiseks on tarvilik teada konkreetse masina ehitust ja juhtimisloogikat.

2.2.3 Muunduritel põhinevad väiketootmiseadmed

Muundursüsteemidega võrguga ühendatud väiketootmiseadmete korral puudub otsene sidetus primaarenergia allika ja elektrivõrgu vahel. Nii ei ole olulist rolli võrku antava lühisvoolu suuruse määramisel primaarenergiaseadmel (sisepõlemismootor, mikroturbiin, elektrituulik, kütuseelemendid vm), vaid see sõltub enam muundurseadme ehitusest ja juhtimisloogikast. Muunduri alalisvoolulüli võimaldab kontrollida väljundvõimsust sõltumata sisendvõimsusest primaarenergiallika poolt rakendatava sisendpinge ulatuses. See tähendab, et selliste tootmiseadmete käitumine lühistel erineb oluliselt pöörlevatest masinatest [20].

Lühise alghetkel (esimesel perioodil) toimub muunduris küll kiire voolutõus, mis võib ulatuda 3...4 kordse nimivooluni [21] [22], kuid see piiratakse muunduri enda kontrolleri poolt selliseks, et mitte kahjustada selle jõupooljuhte. Piirang sõltub suuresti muunduritootja poolsetest seadistustest ning seadme termilisest vastupidavusest. Katsed ja uurimused näitavad, et üldjuhul inverterseadme poolt võrku antav lühisvool jääb vahemikku 1,2 kuni 1,5 inverteri nimivoolust [21] [24] [25], ent leidub ka seadmeid, mille puhul võrku antav lühisvool ületab nimivoolu vähemalt kahekordselt [26]. Seetõttu ei saa inverterseadme lühisvoolu leidmisel lähtuda kindlatest reeglitest, vaid tuleb silmas pidada konkreetse seadme tüübikatsetustel saadud suuruseid.

Et lisada inverteri kaudu võrku ühendatud väiketootmiseadme lühisvoolude arvutamiseks koostatavale aseskeemile, osutub vajalikuks tema takistuse leidmine. Ühe võimaliku viisina on pakutud inverterseadmete takistuste leidmiseks vaadelda teda kui asünkroonmootorit (valem 2.8), mille peatatud rootori vooluna vaadeldakse inverteri andmelehel või tüübikatsetuselt pärinevat maksimaalset lühisvoolu [20] [21]:

$$z_k = \frac{I_n}{I_k} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (2.8)$$

kus I_k – inverteri tehaseandmetes määratud maksimaalne (lühis-)vool;

I_n – inverteri nimivool;

U_n – inverteri nimipinge;

S_n – inverteri niminäivvõimsus.

2.3. Voolukaitsete arvutuspõhimõtted jaotusvõrgus

Jaotusvõrgu releekaitse peab vastama järgmistele tingimustele [27]:

1. Lihtsus ja töökindlus
2. Kiirus
3. Selektiivsus
4. Tundlikkus

Eesti keskpingevõrkudes kasutatakse põhikaitseks valdavalt liigvoolukaitseid ennekõike nende lihtsuse, töökindluse ja jaotusvõrkude kaitseks piisava tundlikkuse tõttu. Lisaks voolukaitsetele on kasutusel vähesel määral ka distantskaitsed (35 kV liinidel) ja diferentsiaalkaitseid (trafodel, liinidel).

Keskpingevõrkudes kasutatakse valdavalt kaheastmelist, harvem ka kolmeastmelist voolukaitset. Kaitse esimene aste (ANSI/IEEE 50TD [28], tähis $I \gg$, voolulõige) on ette nähtud reageerima faasidevahelistele lühistele ning on viiteta (hetkkaitse) või võrgu toitepoolses otsas ka lühikese, kuni 0,5 s viitega, et tagada järgnevate kaitsete rakendumine võrgus. Kaitse teine aste (ANSI/IEEE 51 [28], tähis $I >$, maksimaalvoolu kaitse) peab võrku kaitsma ülekoormuste eest. Võimalusel kasutatakse kaitse teisel astmel voolust sõltuvat viidet, mille leidmise aluseks kaasaegsetel releedel Eestis ja Euroopas võetakse valdavalt standardi IEC 60255 põhised kaitsekõverad, kuid viide võib olla ka voolust sõltumatu. Kaitse teine aste reserveerib tinglikult ka kaitse kiiremat astet juhul, kui see peaks tõrkuma. Kaitse kolmas aste on harva kasutusel. See leiab mõnikord kasutust pikalt kestva ülekoormuse eest kaitsmisel (trafodel, liinidel).

Et traditsiooniliselt talitleb jaotusvõrk ühepoolselt toidetuna (generaatoriteta võrk), toimub ka kaitseastete määramine valdavalt tarbija poolt alustades ning liikudes edasi võrgu toitepoolsesse otsa. Klassikalise jaotusvõrgu voolukaitsete arvutamist alustatakse kaitse esimese astme voolusätte määramisest. Kaitse kiirem aste ei tohi töötada jaotustrafode tagustele madalpingelühistele (peab töötama madalpinges olev kaitseautomaat või sulavkaitse), seetõttu peab hetkkaitse voolusätte olema suurem maksimaalsest trafotagusest kolmefaasilisest lühisvoolust (valem 2.9) [29]:

$$I \gg_{rak} \geq k_v I_{k max}^{(3)} \quad (2.9)$$

kus $I \gg_{rak}$ – voolukaitse esimese astme rakendussäte;

k_v – välistustegur (1,1...1,5);

$I_{k max}^{(3)}$ – maksimaalne 3-faasiline trafotagune lühisvool.

Sätte valimisel peab veenduma, et kaitse kiirem aste ei hakkaks tööle trafo sisselülitusel esinevale tõukevoolule. Selleks puhuks peaks kaitse esimese astme säte ületama järgneva avaldisega (valem 2.10) leitavat voolu:

$$I \gg_{rak} \geq (4 \dots 5) \cdot \frac{\Sigma S_{ntr}}{\sqrt{3}U_n} \quad (2.10)$$

kus ΣS_{ntr} – vaadeldava kaitse (võimsuslüli) taha ühendatud trafode summaarne niminäivvõimsus;

U_n – trafode primaarnimipinge.

Juhul, kui arvutatava kaitse poolt kaitstavale liinile järgneb teine kaitsega liin või releekaitsega trafo, tuleb selektiivsuse eesmärgil ka sellega arvestada. Toitepoolsema (järgneva) kaitse säte saadakse valemi 2.11 alusel [27]:

$$I \gg_{rak} \geq \frac{k_v I \gg_{eelnev}}{k_{tag}} \quad (2.11)$$

kus k_v – välistustegur (1,1...1,5);

$I \gg_{eelnev}$ – eelneva (tarbimise poolse) kaitse esimese astme säte;

k_{tag} – tagastustegur, mis on relee tagastusvoolu (ennistusvoolu) ja rakendusvoolu suhe (0,8...0,98 sõltuvalt relee tüübist).

Kuigi voolukaitsete esimene aste on ettenähtud kõrvaldama lühise kaitstavalt elektrivõrgu elemendilt võimalikult kiiresti (hetkkaitse), on siiski üksteisele järgnevate kaitsete vahelise selektiivsuse tagamiseks vajalik kasutada toitepoolsetel kaitserleedel ajaviidet. Iga järgneva kaitse viide eelneva suhtes avaldub järgmiselt (valem 2.12):

$$t_k = t_{k eelnev} + \Delta t \quad (2.12)$$

kus $t_{k eelnev}$ – eelneva kaitse esimese astme viide;

Δt – välistusaeg, mis sõltub kasutatavate releede ja võimsuslülitite tüüpidest. Jääb jaotusvõrgus vahemikku 0,5 s (elektromehaanilised releed) kuni 0,1 sekundit (mikroprotsessortehnikal põhinevad releed).

Voolukaitse teine aste, mis peab võrguelemente kaitsma ülekoormuste eest, määratakse valdavalt võrguseadmete nimivoolust (trafod) või termilisest taluvusest (liinid) lähtudes.

Voolukaitse teise astme sätet on senistes jaotusvõrkudes leitud järgneval põhimõttel (valem 2.13):

$$I >_{rak} \geq \frac{k_v I_{max}}{k_{tag}} \quad (2.13)$$

kus $I >_{rak}$ – kaitse teise astme käivitusvool;

I_{max} – kaitstava elemendi maksimaalne lubatav vool.

Vaadeldav kaitse töötab alati viitkaitsena. Kaasaegsed releed võimaldavad kasutada voolust sõltuvat viidet, mis võimaldab lubada väiksematel ja vähem ohtlikel ülekoormustel võrgus esineda pikemat aega, suuremad ning võrguelementide termilisele vastupidavusele lähenevad ülekoormused lülitab aga kiiremini välja. Eesti võrkudes on kasutusel üldiselt IEC 60255 standardi kohased kaitsekarakteristikud. Nende puhul arvutatakse kaitseviide järgneva valemiga (valem 2.14):

$$t = \frac{k\beta}{\left(\frac{I}{I >_{rak}}\right)^\alpha - 1} \quad (2.14)$$

kus I – vool, mille juures rakendusviidet otsitakse;

$I >_{rak}$ – kaitse käivitusvool;

k – sättejategur;

α, β – karakteristiku tüübist sõltuvad tegurid.

Nimetatud standard määrab neli tüüpset voolu-aja tunnusjoont (karakteristikut) [2]:

- Normaalne (*normal inverse - NI*)
- Pikaajaline (*long time inverse - LI*)
- Järsk (*very inverse - VI*)
- Väga järsk (*extremely inverse - EI*)

Vastavate tunnusjoonte tegurid α ja β on esitatud allolevas tabelis (Tabel 2.2):

Tabel 2.2. IEC 60255 järgsed tegurite α ja β väärtused

Tunnusjoone tüüp	α	β
Normaalne (NI)	0,02	0,14
Järsk (VI)	1	13,5
Väga järsk (EI)	2	80
Pikaajaline (LI)	1	120

Järgneva kaitse teise astme rakendusvool saadakse analoogse arvutusega nagu kaitse esimese astme juures (valem 2.15):

$$I >_{rak} \geq \frac{k_v I >_{rak.eelnev}}{k_{tag}} \quad (2.15)$$

kus $I >_{rak.eelnev}$ – eelneva kaitse teise astme rakendusvool.

Voolukaitse teise astme selektiivsus (kooskõlastus) järgnevate ja eelnevate kaitsetega võrgus pannakse paika kõvera tüübi, rakendusvoolu ja sättejateguri valikuga. Hoolsa rakendusvoolu ja sättejateguri k valikuga on võimalik hõlpsalt ka sama tunnusjoonega üksteisele järgnevaid kaitseid sobitada.

Veendumaks leitud kaitsetsätete sobivuses, on tarvilik kontrollida kaitse tundlikkust. Tundlikkus osutab kaitse võimele reageerida võimalikult väikestele voolumuutustele selektiivsust kaotamata. Voolukaitse tundlikkust väljendab tundlikkustegur, mis avaldub järgneva valemiga (valem 2.16) [2]:

$$k_{tund} = \frac{I_{k \min}}{I_{rak}} \quad (2.16)$$

kus $I_{k \min}$ – vaadeldava kaitse kaitsetsoonis esinev minimaalne võimalik lühisvool;

I_{rak} – kontrollitava kaitse rakendusvool.

Nagu alapunktis 2.1 täheldati, osutub radiaalselt toidetavas isoleeritud neutraaliga keskpinge võrgus minimaalseks lühisvooluks kahefaasiline lühisvool.

Põhikaitse tundlikkustegur $k_{tund} \geq 1,5 \dots 2,0$, reservkaitsel osutub piisavaks, kui tundlikkustegur on $k_{tund} > 1,2$ [29].

3. Väiketootmiseadmed ja jaotusvõrgu releekaitse

Väiketootmiseadmete integreerimine jaotusvõrku muudab seni passiivselt talitlenud võrguosa aktiivseks võrguelemendiks. Senine ühepoolse toitega radiaalvõrk peab talitlema hakkama mitmepoolse toitega võrguna. Väiketootmiseadmete liitmine võrku kutsub esile muuhulgas järgmisi asjaolusid [7]:

- probleemid pingereguleerimisel ja pingemuutused

Radiaalses ühepoolset toidetud võrgus toimus pingereguleerimine piirkonnaalajaama toitetrafo astme muutmisega, aga ka reaktiivenergia bilansi reguleerimisega. Selline pingereguleerimine arvestas võrgu radiaalse toitega ning eeldas teatavat pingelangu võrgus. Nii hoiti toitepoolses otsas võrgus veidi kõrgemat pinget, et tagada normikohane pinge ka fiidri lõpus paiknevatele tarbijatele. Juhul, kui fiidri lõppu lisatakse tootmiseseade, võib see muutunud aktiiv- ja reaktiivenergia bilansi tõttu kergitada võrgu pinget. Lisaks peab arvestama kiirete pingemuutustega, kui tootmiseseade ühendatakse või lahutatakse võrgust [20].

- võrgu energiakadude muutumine

Tarbimisele lähedal asuva tootmise korral väheneb energiatarve võrgust väiketootmiseadmest tarbitud energia võrra. Seetõttu väheneb ka võrgu koormus ning sellega ka võrgukaod. Võrku aga ei saa ehitada sellevõrra väiksema läbilaskevõimega, kuna arvestada tuleb ka N-1 olukorraga, kus generaatorid võrgus ei tööta. Võrgukadude muutus sõltub suuresti tootmiseadmete arvust, võimsusest ja asukohast võrgus.

- mõju elektrienergia kvaliteedile

Tootmiseadmed võivad olla kõrgemate harmoonikute allikaks võrgus. Kõrgemad harmoonikud moonutavad 50 hertsise põhisageduse lainekuju. Lubatavad harmoonikute tasemed on paika pandud standardite ja võrgueeskirjadega.

- lühisvoolude taseme muutus

Nagu eelnevalt alapunktis 2.2 esitatud, on väiketootmiseadmed võimelised toitma lühist võrgus sõltuvalt kasutatava generaatori tüübist ja võrkuühendamise viisist. Väiketootmiseadmete töösolek tõstab lühisvoolude taset võrgus. Viimane asjaolu on ka aluseks käesolevas töös esitatavale analüüsile, kuna keskpingevõrku kaitstakse põhiliselt releekaitsega, mille tunnussuuruseks on vool.

Radiaalse konfiguratsiooniga keskpinge võrgus on reledevaheline kooskõlastus ja kaitsete üldine selektiivsus lihtsalt saavutatav (vt arvutuspõhimõtteid alapunktist 2.3). Juhul, kui võrguga töötab paralleelselt ka väiketootmiseseade (või mitu), muutub võrguosa lühisvoolu suurus ning mõningal juhtudel ka suund ning see muudab voolukaitsete omavahelise kooskõlastuse põhimõtteid.

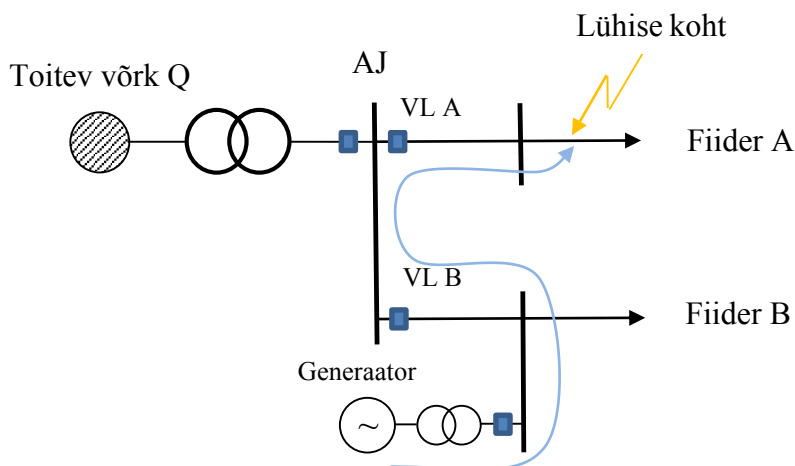
Tootmiseseadmetega jaotusvõrgus võivad esineda järgnevad releekaitsega seotud nähtused :

1. Voolukaitsete liigtöötamine
2. Voolukaitsete mittetöötamine
3. Kaitsete blokeeringuloogika töö häirumine
4. Kaitsete töö tagajärjel saartalituse teke
5. Mittesünkroonne taas- ja reservilülitus

Järgnevates punktides peatutakse kõigil nähtustel pikemalt.

3.1. Voolukaitsete liigtöötamine

Releekaitse liigtöötamiseks saab lugeda kaitse töötamist (võimsuslülitit väljalülitamist) juhul, kui selektiivsuse seisukohalt oleks pidanud seda tegema lühisele lähem olev kaitse. Kaitse töötamine juhtub, kui kaitse tuvastab eksikombel lühise, mis asub tema kaitsetsoonist väljaspool. Vaadeldavat olukorda illustreerib allolev joonis (Joonis 3.1).



Joonis 3.1 Releekaitse liigtöötamine

Lühise korral fiidril A toidavad lühist nii võrk Q kui ka naaberfiidril paiknev väiketootmiseseade (generaator). Lühisvool läbib nii võimsuslülitit A kui ka võimsuslülitit B, kusjuures võimsuslülitis A on lühisvool tunduvalt suurem, kuna seda läbib nii võrgu kui ka generaatori lühisvool. Generaatori olemasoluga mitteamvestamise korral releekaitse sätete valimisel osutub,

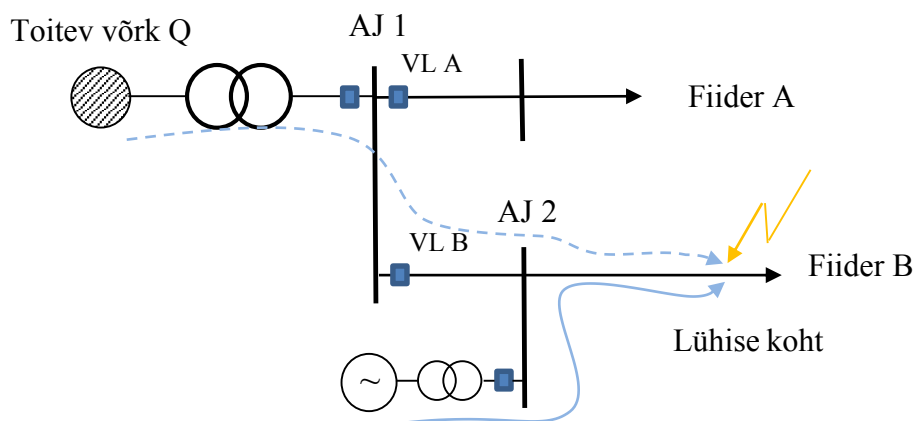
et piisavalt suure generaatori lühisvoolu korral võib rakenduda ka võimsuslüliti B releekaitse ning lülitada välja fiidri B kiiremini, kui seda teeks fiidri A releekaitse. Selline töötamine osutub valeks, kuna fiidril B puudus rike ning tarbijad jäävad elektrivarustusest ilma põhjuseta. Rakenduma peab antud juhul fiidri A releekaitse, et isoleerida rikkeline võrguosa [30].

Releekaitse liigtöötamise tõenäosus sõltub suuresti generaatorseadme(-te) võimsusest, tema võrku antavast lühisvoolust ja selle karakteristikutest, tootmiselise asukohast võrgus ning releekaitse sätetest [31]. Tuleb mainida, et selline valetöötamine võib esineda kõigil haruliinidel väiketootmiselise võrgus, mistõttu sellise asjaoluga arvestamata jätmine võib suurendada oluliselt releekaitsete väärtöötamisi võrgus. Nimetatud probleemi näitlikustatakse simulatsiooniga töö neljandas osas.

Vaadeldavat nähtust saab vältida suunatud voolukaitsete kasutamisega võrgus. Suunatud voolukaitse on voolukaitse, mille tunnusuuruseks lisaks voolule on ka voolu- ja pingvektori vaheline nurk. Kaitset saab seadistada töötama eri suundadele erinevate sätetega. Suunatud kaitse rakendumise viide on mõnevõrra aeglasem suunamata voolukaitsest, kuna fiidriterminal peab läbima lisaks pingekontrollimise tsükli. Lisaks nõuab suunatud kaitse paigutamine erinevalt suunamata kaitsest pingetrafo olemasolu kogumislattidel või liinil. Olenemata suunatud kaitse kasutuselevõtust, on tarvilik releekaitse sätete arvutus, et tagada suunatud ja suunamata kaitseelementide omavaheline kooskõlastus.

3.2. Voolukaitsete mittetöötamine

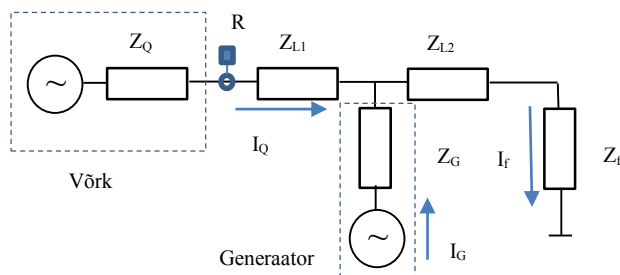
Voolukaitse mittetöötamiseks saab lugeda juhust, kus lühis on küll kaitse poolt kaitstavas tsoonis, kuid kaitse ei rakendu. Selline nähtus saab esineda, kui releekaitse ei tunne lühist oma kaitsetsoonis ära. Nähtust aitab seletada alljärgnev joonis (Joonis 3.2).



Joonis 3.2 Voolukaitse mittetöötamine

Lühist toidavad nii generaator kui ka võrk. Juhul, kui võrgu lühisvool (lühisvõimsus) ning generaatori lühisvool ei erine mitmekordselt, võib juhtuda, et fiidri B kaitse lühise korral ei tööta, sest viimase säte on kõrgem teda läbivast lühisvoolust. Tegelik lühisvool rikkekohas moodustub aga võrgu ja generaatori lühisvoolude summamana ning võib osutada võrguseadmetele ohtlikult kõrgeks. Lühis kõrvaldatakse võrgust, kui ära on töötanud väiketootmiseadme liitumispunktis olev kaitse ning seejärel võrguharu kaitse aeglasem aste (teine aste).

Kaitse poolt rikkele reageerimine või mittereageerimine sõltub generaatori ja võrgupoolse lühisvoolu suhtest, lisaks generaatori asukohast võrgus, võrguelementide takistusest, lühise tüübist ja asukohast ning releekaitse sätetest võrgus. Lühisekohas tekkivate osavoolude suhet (võrgust ja generaatorist) saab hinnata järgneva aseskeemi (Joonis 3.3) ja avaldise (valem 3.1) abiga [32]:



Joonis 3.3 Osalühisvool generaatorist [32]

$$\frac{I_Q}{I_G} = \frac{Z_G}{Z_Q + Z_{L1}} \quad (3.1)$$

kus I_Q – lühisvool võrgust;

I_G – lühisvool generaatorist;

Z_G – generaatori takistus;

Z_Q – võrguharu (süsteemi) takistus;

Z_{L1} – liini L1 takistus (Joonis 3.3).

Kaheastmelise voolukaitse kasutamise puhul võib vaadeldaval juhul kaitse teine aste siiski reageerida, kui tegemist on piisavalt madala sättega ning kaitse viide sõltub voolust. Nii võib kaitse teine aste töötada reserveeriva kaitsena kaitse esimesele astmele. Küll aga töötab kaitse

sel juhul viitega ning rikkega võrguosa eraldamine võrgust viibib, millega võib kaasneda võrguelementide kahjustumine lühisvoolu termilisel toimel [33].

Vaadeldavat nähtust saab vältida kaalutletud võrguplaneerimisega ning ühe lisanduva võimsuslüliti paigaldamisega väiketootmiseseadme liitumispunktist (alajaamast) väljuvate liinide ette. Juhul, kui paigutada vaadeldavas näites fiidriale B alajaama 2 (vt. Joonis 3.2) releekaitsega võimsuslüliti, läbiks vaadeldav lühisvool nimetatud lüliti täies mahus (nii võrgu kui ka generaatori osalühisvool) ning sealne releekaitse omaks piisavat tundlikust, et lühis kiiresti ning ohutult võrgust kõrvaldada.

3.2.1 Lühisekoha määramise funktsiooni häirumine

Lisaks voolukaitse mittetöötamisele võib eelnevas punktis vaadeldud olukorras häiruda ka lühisekoha määramise funktsiooni töö. Lühisekoha määramise funktsiooni kasutatakse ennekõike õhuliinidega aga ka pikemate kaabelliinidega maavõrkudes. Nimetatud funktsioon töötab põhimõttel, kus fiidriterminal mõõdab lühise esinemise ajal lühisvoolu ning pinget. Viimaste suhtest saadakse lühise takistus Z järgnevalt:

$$Z = \frac{U_Q}{I_k} \quad (3.2)$$

kus U_Q – pinge lühise hetkel liini alguses;

I_k – lühisvool.

Saadud takistusest arvutab fiidriterminal lühisekoha kauguse, kui eelnevalt on funktsioonile teada antud liini takistuse väärtus kilomeetri kohta.

Osutub, et tootmiseseadmete olemasolul fiidril ei ole lühisekoha kauguse õige väärtuse saamine enam võimalik. Juhul, kui eelnevalt vaadeldud skeemis (Joonis 3.3) on tegu metallilise lühisega ning rikkekoha takistus $Z_f = 0 \Omega$, osutub relee R poolt mõõdetav pinge lühise ajal järgmiseks (valem 3.3):

$$U_r = I_Q Z_{L1} + (I_Q + I_G) Z_{L2} \quad (3.3)$$

Et relee R mõõdab vaid võrgupoolset lühisvoolu komponenti I_Q , siis mõõdetud lühisekoha takistus avaldub:

$$Z_r = \frac{U_r}{I_Q} = Z_{L1} + Z_{L2} + \underbrace{\frac{I_G}{I_Q} Z_{L2}}_{viga} \quad (3.4)$$

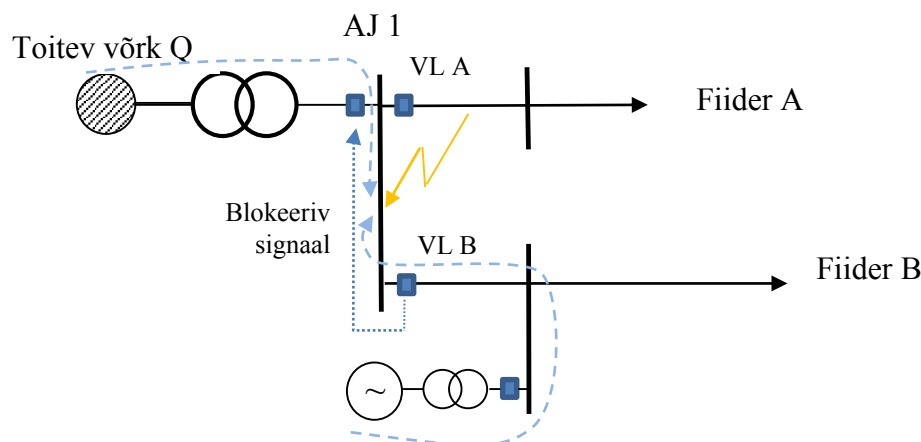
Saadud takistus on suurem tegelikust lühisekoha kogutakistusest viimase liidetava (valem 3.4) võrra ning seetõttu väljastab relee ka lühisekauguseks suurema väärtuse kui realselt.

Analoogse tööpõhimõttega töötab ka distantskaitse, mille puhul võib kirjeldatud situatsiooni tekkimisel distantskaitse relee pidada lühist kaugemas tsoonis olevaks ning teostada rikkelse liiniosa väljalülituse viitega.

3.3. Kaitsete blokeeringuloogika töö häirimine

Eesti keskpinge võrkude kaasaegsetes piirkonna- ja jaotusalajaamades on kasutusel sisendliinide (sisendid trafolt) voolukaitsete blokeerimine eesmärgiga tagada sisendikaitsete (lattide kaitseks) selektiivsus väljuvate liinide kaitsetega. Sisendite kaitseid blokeeritakse juhul, kui lühis asub alajaamast väljas ning sellele peaks reageerima väljuval liinil paiknev kaitse. Väljuva liini lühise korral selle fiidri voolukaitse teine aste käivitub ning algab viite lugemine. Käivitusega edastatakse ka signaal kas releekontaktidega või andmesideprotokollil teel alajaama sisendfiidril (tihti ka sektsioonidevahelisel võimsuslülitil) olevale releele, millega blokeeritakse selle kaitse kiireim aste. Et keskpinge võrgu lühisvoolud on suurimad just piirkonnaalajaamades, peab sisendi voolukaitse viide olema minimaalne, ent selline, mis võimaldaks blokeeringul töötada (kaitse ei tohi rakenduda kiiremini kui saabub blokeeringusignaal). Juhul, kui lühis tekib alajaama sektsiooni kogumislattidel, siis radiaalse skeemiga võrgus lühis väljuvat liini ei läbi ning blokeerivat signaali väljuva liini relee ei väljasta. Kogumislattide lühisel töötab sellisel juhul sisendfiidril olev kiiretoimeline voolukaitse ning isoleerib rikkelse võrguosa.

Väiketootjatega keskpinge võrgus võib aga blokeeringuloogikate töötamine osutuda puudulikuks. Probleemi olemust illustreerib allolev joonis (Joonis 3.4).



Joonis 3.4 Kaitse blokeeringute töö häirimine põhjustatuna väiketootmiseseadme lühisvoolust

Lühise tekkimisel piirkonna- või jaotusalajaama (AJ 1) kogumislattidel, millega on võrgu kaudu ühendatud tootmiseseade (-seadmed), toidetakse lühist nii generaatorist alajaama lattide suunas kui ka kõrgema pingega võrgust. Traditsiooniline väljuva fiidri kaitse on suunamata voolukaitse. Juhul kui generaatori lühisvool (lattide suunas) ületab fiidri B kaitse sätteväärtuse, väljastatakse sealt blokeeriv signaal sisendfiidri kaitserellee ajal, kui seda läbib võrgupoolne lühisvool. Viimase signaaliga blokeeritakse kogumislattide kaitsva sisendfiidri kiiretoimelise kaitse töötamine ning lühist võrgust ei lahutata.

Et lühisvoolud alajaama kogumislattidel võrgu poolt on kõrged (linnavõrkudes normaalrežiimis kuni ≈ 20 kA), võib mõne kaugemal asuva reserveeriva kaitse viide olla liialt pikk, et vältida kogumislattide lühise tekitatud ulatuslikke kahjusid. Vaadeldavas situatsioonis osutub vajalikuks suunatud voolukaitsete kasutamine väiketootmiseseadmetega väljuvatel fiidritel. Probleemi saaks vältida, kui blokeeriv signaal väljastataks vaid alajaamast liini (väljuv suund) suunatud lühise korral. Lisaks eelnevale on siinjuures tarvilik kasutada lattide kaitseks veel mõnd teist kaitset (optiline kaarekaitse, rõhukaitse).

3.4. Saartalitluse teke

Lühise esinemisel keskpingevõrgus ei lahutata väiketootmiseseadet võrgust juhul, kui lühisvool generaatorist ei osutunud sellele ohtlikuks (ei ulatunud voolusätteni – kauge lühis) või võrgu pinge langus ei olnud piisavalt suur eraldamiseks generaatorit võrgust (sätestatud Võrgueeskirjaga [14]). Sellise lühise korral võib aga töötada võrgus mõni releekaitse ning eraldada generaatorit sisaldava võrguosa muust võrgust. Sellisel juhul võib jääda võrguosa toitma väiketootmiseseade (võrku on suutelised toitma sünkroongeneraatorid, aga ka mõned invertermuunduriga võrku ühendatud tootmiseseadmed), kui võrguosa koormus on piisavalt väike. Tekib saartalitlus, millega kaasnevad järgnevad probleemid [34]:

- võrguga taasühendamine on komplitseeritud (generaatori sagedus ja võrgu sagedus ei ühti enam);
- kaitserakendumised eraldunud võrguosas ei ole tagatud vähenenud lühisvoolu tõttu (puudub võrgupoolne lühisvool);
- võrguoperaator ei saa tagada elektrienergia kvaliteeti saartalitlusel olevas võrguosas;
- esineb oht võrku teenindavale personalile tagasitoitmise võimaluse tõttu.

Seetõttu on oluline tagada saartalitluse tekkel generaatori kiire eraldamine võrgust. Saartalitluse kaitsed võivad olla generaatori kaitsetega ühitatud või ka mitte ning sellisel juhul on vajalik teostada need kaitsed võrgupoelses liitumispunktis. Saartalitluse tuvastamise kaitsena kasutusel olevad meetodid on võimalik jagada passiivseteks, aktiivseteks ja sidekanaleid kasutatavateks [34].

Traditsiooniliseks passiivseks meetodiks saartalitluse avastamiseks on sagedus- ja pingekaitsete kasutamine generaatoril ja reserveerivana ka liitumispunktis. Võrguühenduse kadumisel muutub generaatori koormus ning esinevad muutused generaatori klemmpinges ning sageduses. Nendele muutustele peaksid reageerima sagedus ja pingekaitsete (ANSI: 81, 59, 27 [28]), ent nende seadistamisel peab arvestama Võrgueeskirjas [14] ettenähtud suurustega, mille jooksul generaator peab taluma häiringut, ning ka piirkonna toitealajaamas olemasolevate sagedus- ja pingekaitsetega (koormusvähendusautomaatikaga) ning seetõttu jääb sätestamisel nendele kaitsetele teatav tundetussoon. Lisaks suudavad kaasaegsed väiketootmiseseadmed oma sageduse kiiresti pärast häiringut taastada, mistõttu kiiret generaatori eraldamist võrgust nende kaitsetega ei ole võimalik teostada. Piisavaks võib lugeda nende kaitsete kasutamist väikesevõimsuseliste generaatorite kaitseks või juhul, kui võimaliku saarestuva võrgu koormus ületab igal ajahetkel selgelt generaatori võimsust.

Passiivsetest kaitsetest efektiivsem on sageduse muutumise kiirust jälgiv kaitse (*ROCOF* – *rate of change of frequency*, ANSI 81R). Kaitse jälgib sisuliselt sageduse muutumise kiirust, s.o sageduse esimest tuletist aja järgi (df/dt). Generaatori saartalitluse tekkimise korral esineb saarestunud võrguosas kiire sagedusmuutus, mille nimetatud kaitse (generaatoritel, reserveerivana ka generaatori liitumispunktis) registreerib ning seejärel kiiresti generaatori võrguosast lahutab. Kaitse säte peab olema valitud selline, et kaitse rakenduks vaid saartalitluse tekkimise korral ja mitte järskudele koormusmuutustele võrgus. Ligilähedaselt saab hinnata sagedusmuutuse kiirust järgmise valemi (valem 3.5) abil [35]:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\Delta P}{2S_n H} f_0 \quad (3.5)$$

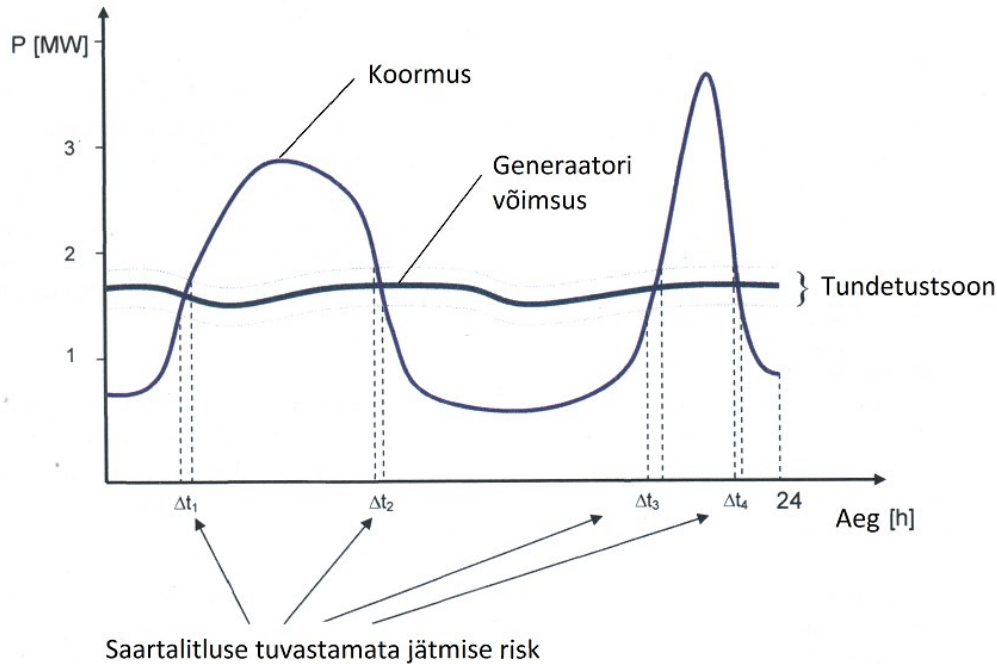
kus ΔP – generaatori koormuse hinnanguline muutus;

S_n – generaatori nimivõimsus;

H – generaatori inertsikonstant;

f_0 – sagedus enne saartalitluse teket (võrgusagedus).

ROCOF kaitse võib muutuda ebaefektiivseks, kui lokaalne koormus on ligilähedane generaatori võimsusega ning suurt koormuste muutust saartalitlusse sattumisel väiketootmisel ei esine. Situatsiooni illustreerib Joonis 3.5, kus päevasiseselt esinevad ajavahemikud, kus fiidri tarbimine ja generaatori võimsus on võrdsed. Neil ajavahemikel Δt esineb reaalne võimalus, et ROCOF kaitse ei tuvasta saartalitlust [32].



Joonis 3.5 ROCOF kaitse võimalik mittetöötamine [32]

Lisaks võib nimetatud kaitse liigtööd esineda süsteemi sageduse häirete korral, ent süsteemiülelised sagedushäired on pigem harv nähtus. Keeruline on kaitse viite kooskõlastamine süsteemi sageduskaitsetega tagamaks kiiret generaatori eraldumist võrgust saartalitlusel, samas vältimaks kaitse vale töötamist süsteemi rikete ja häiringute korral. Tüüpiliselt määratakse säte vahemikus 0,1...1 Hz/s viitega 0,1...0,5 s. Kaasajal olemasolevatest passiivsetest tehnoloogiatest on ROCOF kaitse efektiivselt saartalitluse tuvastamiseks, kuid siiski mitte täielikult kindel meetod. Töökindluse tõstmiseks on otstarbekas kasutada ROCOF kaitsete kõrval ka pinge- ning sageduskaitset, võimalusel ka võimsuse muutusele rakenduvaid kaitseid [3].

Passiivsetest meetoditest on lisaks ROCOF kaitsele kasutusel ka pingevektori nihet arvestav kaitsefunktsioon. Paralleeltööl võrguga jääb generaatori klemmipinge teatud nurga võrra maha generaatori elektromotoorjõust. Saartalitlusse sattumise korral (võrgutoite kadumisel) toimub

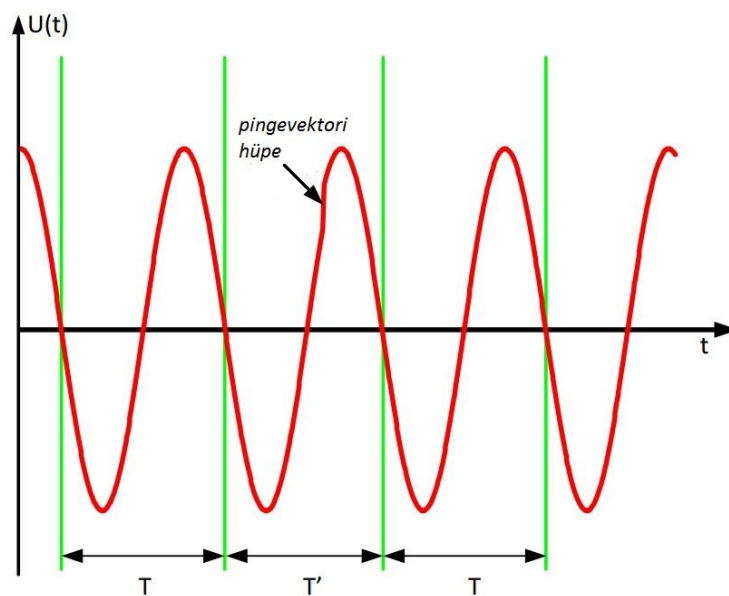
generaatoril järsk koormuse muutus, mis avaldub ka generaatori rootori nurga muutuses. Generaatori klemmipinges toimub hüpe, mida kujutab Joonis 3.6. Pingevektori nihe avaldub (valem 3.6) [36]:

$$\Delta\theta = 2\pi \left(\frac{T' - T}{T} \right) \quad (3.6)$$

kus $\Delta\theta$ – pingvektori nihe;

T' – nihkega perioodi kestvus;

T – normaalse perioodi kestvus (50 Hz võrgus 20 ms).



Joonis 3.6. Generaatori pingehüpe [36].

Vastav rele mõõdab poolperioodi pikkust ning võrdleb seda eelnevaga. Juhul, kui nurgaerinevus ületab sätet (tüüpiliselt $6^\circ \dots 12^\circ$ [3] [37]), siis eraldatakse generaator võrgust. Meetodi puuduseks on sarnaselt ROCOF kaitsega tundetus tuvastada saartalitlust generaatori koormuse väikese muutuse korral (võrguosa tarbimine ja generaatori koormus on ligilähedased). Nõrkades võrkudes on oht ka tekitada pingvektori nihe suurte koormuste kommuteerimisel, mistõttu tuleb kaaluda sellistes võrkudes sätte suurendamist.

Aktiivsed meetodid põhinevad ideel, kus genereeriva süsteemi mingeid parameetreid muudetakse ning jälgitakse muutuste mõju. Vastavalt muutuse iseloomule tuvastatakse, kas generaator töötab paralleelselt võrguga või on saarestunud. Nii näiteks muudetakse generaatorseadme võrku antavat reaktiivvõimsust ning jälgitakse reaktiivvõimsusvoo püsivust

(võrgutoite kadumisel reaktiivvõimsusvoog katkeb) või muudetakse hetkeks generaatori pingeline faasinurka (võrgu toel häiring generaatori töös kaob, võrgu puudumisel jääb kestma). Selliseid meetodeid on mitmeid ning need leiavad enam kasutust just inverterseadmete vahendusel võrku ühendatud generaatorite puhul (kaitsed ühitatud inverteri juhtimisseadmesse). Vaadeldavate meetodite puuduseks saab lugeda nende tegevusega kaasnevat elektrienergia kvaliteedi rikkumist ning erinevate laine protsesside teket võrgus [38].

Sidekanalit kasutavad meetodid põhinevad ideel, kus võrguosa toiteliini(-de) väljalülitamisel saadetakse sideliini kaudu väljalülitussignaali ka väljalülitunud võrguosas olevatele generaatorseadmete võimsuslülititele. Nii ei ole elektriliste parameetrite mõõtmine oluline ning generaatori võrgust lahutamine sõltub ainult toitva liini võimsuslüliti asendist. Meetod on kulukas, kuna nõuab sideliinide olemasolu generaatorite ning võrgu alajaamade vahel [39]. Sidekanalit on otstarbekas kasutada selliste generaatorite puhul, mis on ettenähtud tööks nii võrguga paralleelis kui ka võrgu katkestuste ajal reservgeneraatoritena. Võimalus töötada väiksema võrgu (ettevõtte või kompleksi sisevõrgu, näiteks haigla) reservgeneraatorina muudab keeruliseks passiivsete saartalitluse tuvastamise meetodite kasutamise, kuna eeldab nende kaitsete väljalülitamist reservgeneraatorina töötades. Kaugväljalülitus on kindel saartalitluse vältimise mehhanism ka võrguosades (keskpingefiidritel), mille tarbimiskoormus võib ühtida teatud ajahetkedel väiketootmiselise võimsusega (vt. Joonis 3.5).

3.5. Mittesünkroonne automaatne taas- ja reservilülitus

Automaatne taaslülitus võimaldab lühise tõttu väljalülitunud liini või võrguosa kiiret uuesti sisselülitamist. Õhuliinidega võrgus on kuni 90% rikestest mööduva iseloomuga ning seega ka taaslülitused edukad. Taaslülitusautomaati (TLA) rakendatakse ka kaablivõrkudes, kus mitteselektiivse releekaitse töötamise korral saab taastada toite väiksemale võrguosale. Taaslülituse korral osutub reservelemendiks sama, äsja lühise tõttu väljalülitunud talitluselement [2].

Olulisemate tarbijate juures ning tiheasustusega aladel kasutatakse reservelemendina ka teist liini või alajaama naaberseksiooni. Kasutusel on reservilülitusautomaat (RLA), mis on ette nähtud reservtoite sisselülitamiseks põhitoite (rikkelisel) väljalülitumisel. Jaotusvõrkudes on kasutusel sektsioonide, trafode ning liinide RLA-d. Reservilülitusautomaatika töötamisega küll kaasneb lühiajaline katkestus (jaotusvõrkudes üldjuhul 3-20 s), ent automaatse toite taastamisega vähendatakse oluliselt võrgu katkestuskestvuse näitajaid.

Väiketootmiseseadmetega võrgus võib aga TLA või RLA töötamine osutuda probleemseks eelnevas alapunktis käsitletud saartalitluse tekke tõttu. Klassikalises keskpinge võrgus olevad taaslülitusautomaadid kontrollivad vaid võimuslüliti väljaminekut kaitsest ning teatava viite möödumise (0,5...3 s) korral lülitavad võimsuslüliti uuesti sisse (taaspingestavad liini). Generaatoritega võrgus saab piisava kindlusega lühise välja lülitatud vaid juhul, kui mõlemad rikkelist võrguosa toitvad punktid välja lülitatakse. Sellega on aga võimalus viia generaatori poolt toidetud võrguosa saartalitlusse. Liini kiire taaslülituse muudab keerukaks asjaolu, et saartalitluses võrguosa ning jaotusvõrgu poolse toitega seotud võrguosa ei pruugi töötada enam samas faasis (võrguühenduseta generaatorid kiirenevad või aeglustuvad) ning tulemuseks on mittesünkroonne taaslülitus, mille tagajärjel võivad esineda voolud, mis ületavad ka võrgu lühisvoolusid.

Sarnane oht on ka RLA töötamisel, kus alajaama põhitoiteliini või trafo väljalülitumisel lülitatakse sisse reservliin või –trafo. Võimalik on ka pingetuks jäänud alajaama sektsiooni viimine automaatselt pinges oleva sektsiooni toitele (sektsioonide vaheline RLA). Sarnaselt TLA töötamisele on ka siin võimalik mittesünkroonne lülitus. Et RLA või TLA töö oli põhjustatud põhitoiteliini rikkelisest väljalülitumisest, siis mittesünkroonsele lülitusele järgnev reservliini kaitsest väljalülitumine võib viia pikema katkestuseni suuremas võrguosas.

RLA-ga varustatud alajaamasid võib kõrget varustuskindlust nõudvates võrkudes olla ka mitmeid järjestikku ning sellisel juhul võib senine generaatoriga ühendatud võrk ja toiteskeem asendada teisega, kus puuduvad väiketootmiseseadmetega võrgule vajalikud kaitseadmed ja -astmed. Väiketootmiseseadme integreerimisel keeruka skeemiga jaotusvõrku tuleb läbi kaaluda kõik võimalikud toiteskeemid ning lülitused, mis suure võrgu ja mitme tootmiseseadme puhul võib osutada keerukaks ja ajamahukaks ettevõtmiseks.

Mittesünkroonse taaslülituse vältimiseks ja võimalike ohtude ennetamiseks on järgnevad võimalused:

1. Sünkronismikrolliga lülitite ja fiidriterminalide kasutamine võrgus.
2. Saartalitlusse sattunud generaatori kiire lahutamine võrgust enne liini taaslülitust.
3. TLA ja RLA-de mittekasutamine väiketootmiseseadmetega võrgus.

Sünkronismikrolliga lülitite kasutamine on jaotusvõrkude praktikas vähelevinud (kasutatakse ülekandevõrkudes), ent vajalik väiketootmiseseadmetega võrguosa sisselülitusel. Sünkronismikrolliga võimsuslüliti töötab põhimõttel, et enne lülitust kontrollitakse nii lattide kui liinide pingete, sageduste ja faasinurkade erinevust. Juhul, kui erinevused ei ületa

teatavat vahemikku, antakse lülitile sisselülituskäsk väikese ennetusajaga, mis arvestab lüliti enda viidet. Sünkronismikrolliga lüliti vajab pingetrafoot nii kogumislattide poolele kui ka liinile (tavaliselt kasutatakse faasidevahelist pinget) ning lisaks ka vastava funktsiooni ja võimekusega fiidriterminali, mis muudab selliste lülitite kasutamise jaotusvõrgu mastaabis kalliks. Lihtsustatud variandina on võimalik blokeerida taaslülitus, kui liinil on pinge olemas (lubatakse lülitamine ainult pingetule liinile). Sellise lahenduse puhul ei pea kasutama sünkronismikrolliga fiidriterminali, kuid vajalik on sellegipoolest liini pingetrafo.

Saartalitlusse sattunud generaatori lahutamine peab toimuma kiiremini, kui seda on TLA pingepaus või lülitust teostava RLA viitaeg. Et erinevad passiivsed meetodid nagu üle- ja alasagedus ning –pinge kaitsed, ROCOF või faasinihet mõõtvad kaitsed või eelnevate kombinatsioon ei pruugi kõikidel tingimustel saarestunud generaatorit kiiresti võrgust lahutada, osutub kindlaimaks viisiks kasutada sidekanaliga lahendust. Generaatorite lahutamine võrgust on võimalik näiteks teostada standardi IEC 61850-8-1 [40] kohaste kiirete GOOSE teadete abil, kus generaatori ja muud võrku ühendava (tupik-) liini(-de) väljalülitumisel saadetakse signaal ka generaatori liitumispunkti lülitile, et välja lülitada generaatori toitele jäänud võrguosa. See eeldab kaasaegsete fiidriterminalide (nimetatud sideprotokolli toega) kasutamist nii võrgus kui generaatoril.

Juhul kui võrgu töökindlusele ei esitata nii kõrgeid nõudeid, on lihtsaim ja ka odavaim võimalus väiketootmisseadmetega võrgus loobuda lülitusautomaatide kasutamisest. Sellega välditakse täielikult automaatsete mittesünkroonsete lülituste võimalikkust. Siiski saab sellist lahendust lubada vaid võrguosades, mis ei vaja tingimata TLA või RLA kasutamist (näiteks väiksemat varustuskindlust nõudvate tarbijatega jaotusvõrk).

4. Väiketootmisseadmetega jaotusvõrgu voolukaitsete modelleerimine

4.1. Mudeli kirjeldus ja lähteandmed

Käesoleva peatüki eesmärgiks on modelleerida väiketootmisseadmetega keskpinge võrku, analüüsida seeläbi tootmisseadmete võrkulisandumisega kaanevat mõju võrgu voolukaitsetele ja näitlikustada võimalikke tekkivaid probleeme. Keskpinge võrgu modelleeritakse tarkvarapaketi DIGSILENT PowerFactory 15.2.

Näidisvõrguna modelleeritakse Eesti jaotusvõrgule tüüpilist tihepiirkonna (suuremate linnade elamu- ja tööstusrajoonid) elektrivõrgu osa, mida toidetakse 110 kV piirkonna toitealajaama ja vahepealse 6 kV jaotusalajaama (fiiderpunkti) kaudu (Joonis 4.1). Vaatluse all on jaotusalajaamast (JAJ) väljuvad kaks fiidrit, mis on ehitatud ringvõrguna, kuid omades lahtuskohta, talitleb radiaalselt. Lisaks vaadeldakse üht hargnevat tupikfiidrit, mis olemuselt on tüüpilisem väiksema asustustihendusega piirkondadele, ent esineb ka linnavõrkudes.

6 kV võrku toitvad trafod on kahemähiselised võimsusega 16 MVA. Trafod on identsed ning nende parameetreid koondab alljärgnev tabel (Tabel 4.1).

Tabel 4.1. Võrgu toittrafode andmed

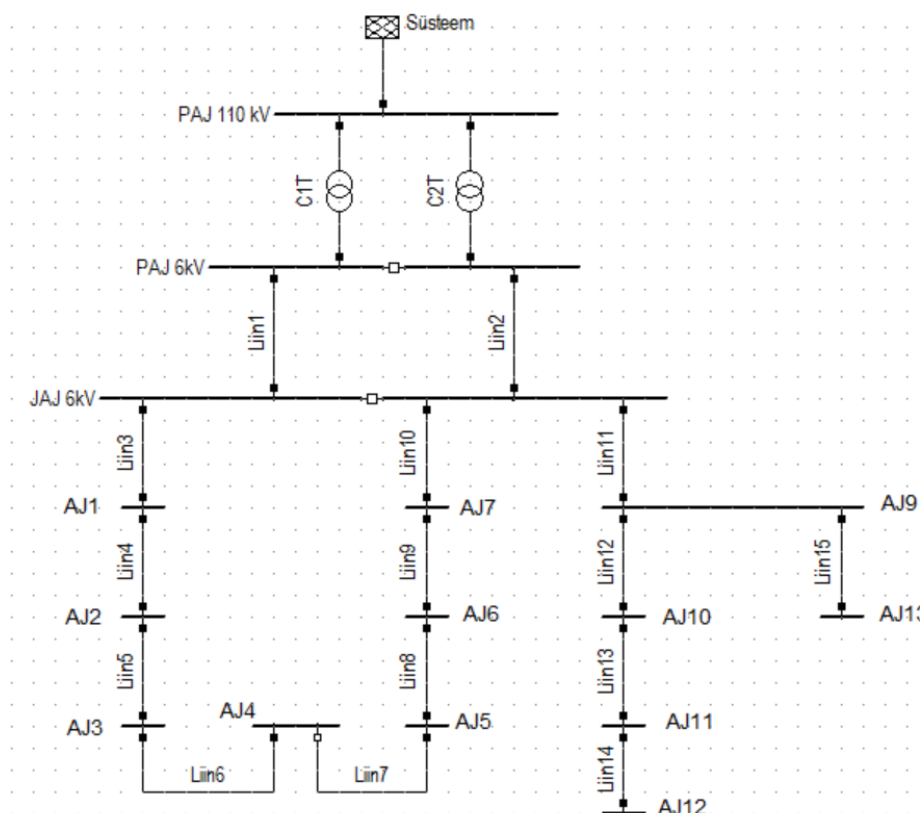
Parameeter	Arvsuurus
Võimsus	16 MVA
Lühispinge	10,5%
Lühiskadu	80 kW
Tühijooksukadu	13 kW
Tühijooksuvool	0,25% I_n

Kogu modelleeritav võrk on kaabelvõrk ning nende parameetrid on koondatud allolevasse tabelisse (Tabel 4.2). Lühisvoolusid arvutatakse standardi IEC 60909 järgi, mis mittepöörlevaid võrgukoormusi ei arvesta.

Võrgu maksimaalne lühisvool vaadelduna piirkonnaalajaama (PAJ) 6 kV lattidel on 11,84 kA (lühisvõimsus 129,2 MVA), minimaalrežiimis (sõltuvana ülekandevõrgu režiimist) aga 8,74 kA (lühisvõimsus 95,4 MVA).

Tabel 4.2 Modelleeritava võrgu liinide parameetrid

Liini nimetus	Pikkus, km	Kaablimark ja ristlõige
Liin 1	2,1	NA2YSY 3x240se/25 6/10kV
Liin 2	2,1	NA2YSY 3x240se/25 6/10kV
Liin 3	0,4	NA2YSY 3x120se/16 6/10kV
Liin 4	0,5	NA2YSY 3x95se/16 6/10kV
Liin 5	0,4	NA2YSY 3x95se/16 6/10kV
Liin 6	1,0	NA2YSY 3x95se/16 6/10kV
Liin 7	0,4	NA2YSY 3x95se/16 6/10kV
Liin 8	0,4	NA2YSY 3x95se/16 6/10kV
Liin 9	0,7	NA2YSY 3x95se/16 6/10kV
Liin 10	0,8	NA2YSY 3x120se/16 6/10kV
Liin 11	1,2	NA2YSY 3x120se/16 6/10kV
Liin 12	1,0	NA2YSY 3x95se/16 6/10kV
Liin 13	0,6	NA2YSY 3x95se/16 6/10kV
Liin 14	0,8	NA2YSY 3x95se/16 6/10kV
Liin 15	1,6	NA2YSY 3x95se/16 6/10kV



Joonis 4.1. Modelleeritava keskpinge võrgu skeem

Väiketootmisseadmete mõju olemasoleva võrgu releekaitsetele uuritakse kolmes etapis. Esimesel juhul uuritakse üksiku sünkroongeneraatori mõju keskpinge võrgu voolukaitsetele sõltuvana generaatori võimsusest, generaatori asukohast ning lühise asukohast võrgus. Teisel juhul vaadeldakse esimesele juhule sarnaseid situatsioone asünkroongeneraatoritega võrgus. Viimasel juhul uuritakse inverterseadme abil võrku ühendatud generaatorite lühisvoole ja nende mõju voolukaitsetele.

4.2. Generaatoriteta võrgu releekaitse

Modelleeritavas keskpinge võrgus on kaheastmelised (suunamata) voolukaitsete piirkonnaalajaama (PAJ) väljuvatel liinidel (Liin 1 ja Liin 2) ning jaotusalajaama (JAJ) väljuvatel liinidel. Lisaks on kaitse AJ 9 väljuval liinil (Liin 12). Kaitsete sätted on arvutatud alapunktis 2.3 kirjeldatud põhimõtteid kasutades eeldusel, et maksimaalne trafo võimsus KP/MP alajaamas on 630 kVA. Mudelisse kantud releekaitse sätteid esitab alljärgnev tabel (Tabel 4.3). Relee rakendumisviiteks arvestab mudel 20 ms. Võimsuslülitiviidetega käesolevas mudelis selguse tagamise huvides arvestatud ei ole.

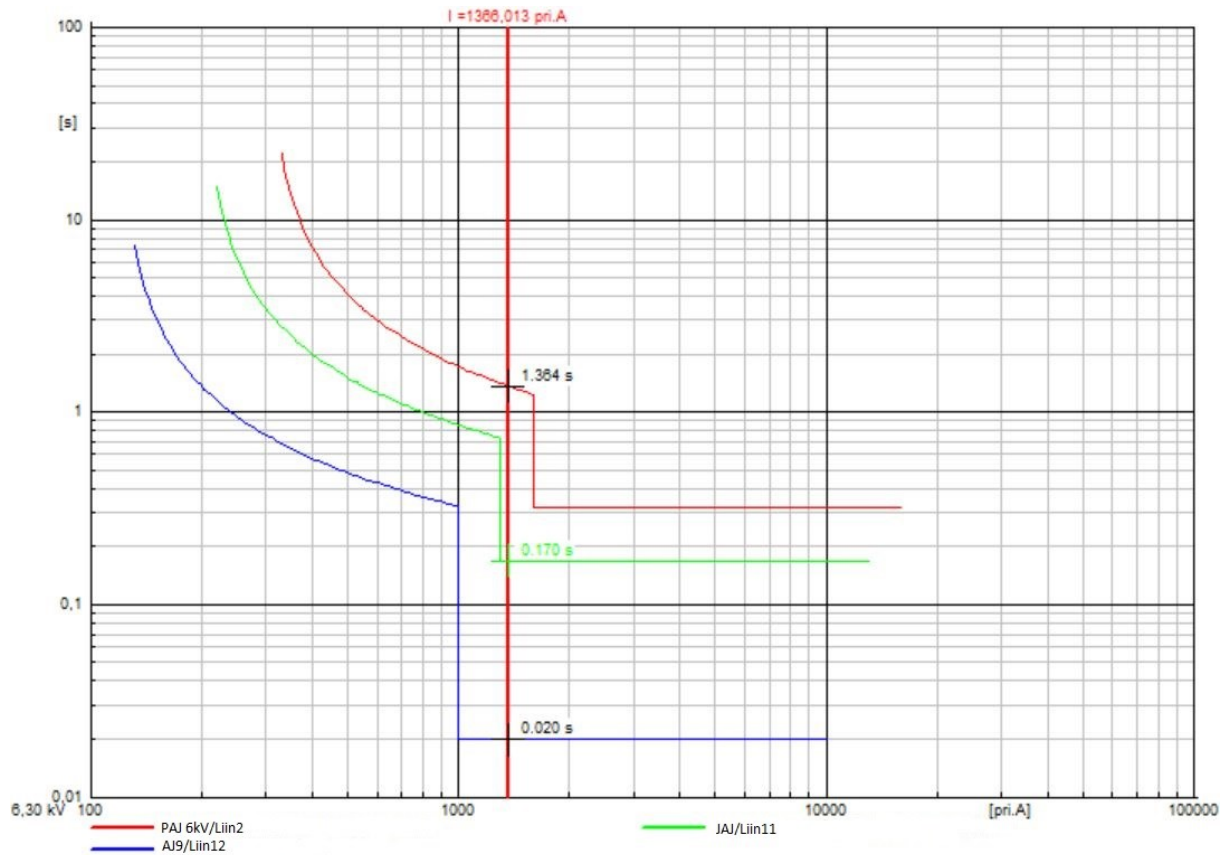
Tabel 4.3 Modelleeritava võrgu voolukaitsete

Kaitstav element	Kaitseaste	Rakendus-säte, A	TMS / Viide, s	Tunnusjoon
Liin 1	I>	300	0,3	IEC 255-3 NI (normaalne)
	I>>	1600	0,3	(DT)
Liin 2	I>	300	0,3	IEC 255-3 NI (normaalne)
	I>>	1600	0,3	(DT)
Liin 3	I>	200	0,1	IEC 255-3 NI (normaalne)
	I>>	1300	0	(DT)
Liin 11	I>	200	0,2	IEC 255-3 NI (normaalne)
	I>>	1300	0,15	(DT)
Liin 10	I>	200	0,1	IEC 255-3 NI (normaalne)
	I>>	1300	0	(DT)
Liin 12	I>	120	0,1	IEC 255-3 NI (normaalne)
	I>>	1000	0	(DT)

Kaitsete välistusae on valitud lähtudes, et tegemist on mikroprotsessorkaitsetega. Välistusae kaitse esimesel astmel on 0,15 s.

Kaitsete tundlikkuse kontrollimiseks simuleeritakse minimaalset võimalikku lühist võrgus. Väikseim lühisvool võrgus esineb AJ 12 lattidel kahefaasilisel maalühisel. Simuleeritud on

lühist võrgu minimaalrežiimis lühisekoha takistusega $0,1 \Omega$. Kaitsete tunnusjooni koos nimetatud lühisel tekkiva vooluga kujutab alljärgnev diagramm (Joonis 4.2).



Joonis 4.2 Näidisvõrgu kaitsete tunnusjooned ja rakendumine võrgu minimaalsel lühisel.

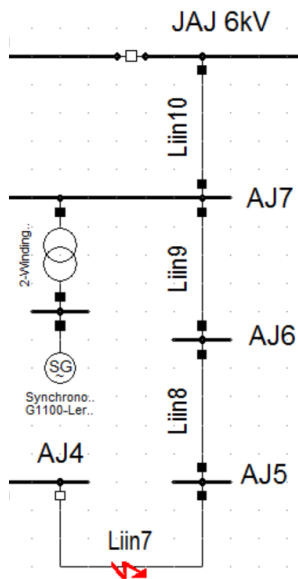
Jooniselt on näha, et kõige kiiremini (viiteta) rakendub AJ 9 paiknev kaitse ning isoleerib rikkeline võrguosa. Selliselt töötavaid kaitseid võib lugeda selektiivseteks.

4.3. Sünkroongeneraatori mõju releekaitsele

Järgnevas mudelis paigutatakse sünkroongeneraator võrgu erinevatesse punktidesse ning analüüsitakse võrguga paralleelselt töötava generaatori mõju voolukaitsete tööle. Lühiseid simuleeritakse erinevate võimsusega generaatorite puhul. Kasutatakse 1,1 MVA, 3,3 MVA ja 4,9 MVA nimivõimsustega generaatorite mudeleid. 1,1 MVA ja 3,3 MVA modelleeritavad generaatorid on madalpingelised ning neid modelleeritakse koos pingetõstmiseks kasutatava trafoga, mis mõnevõrra vähendab generaatori võrku antavat lühisvoolu. 4,9 MVA võimsusega generaator töötab keskpingel (10,5 kV) ning ühendatakse võrku läbi 10,5/6,3 kV pingelendus trafo. Generaatorite ja trafode parameetrid on leitavad käesoleva töö lisadest (Lisa 1 ja lisa 2).

4.3.1 Sünkroongeneraatori mõju fiidrikaitsele sama fiidri lühisel

Vaadeldavas katses paigutatakse alajaama 7 lattidele 1,1 MVA sünkroongeneraator ja simuleeritakse maksimaalset ja minimaalset lühist liinis 7, mis asub generaatorist ja võrgutoitest kaugel (allavoolu). Lühis simuleeritakse liini 7 keskel (50% pikkusest) ning vaadeldakse jaotusalajaama liini 10 kaitse töötamist. Katseskeemi kujutab alljärgnev joonis (Joonis 4.3).



Joonis 4.3 Generaatori mõju kaugel võrgulühisel - katseskeem

Katset korratakse 3,3 MVA ja 4,9 MVA generaatoritega.

Katsetulemused on koondatud alljärgnevasse tabelisse (Tabel 4.4).

Tabel 4.4 Lühisvoolud ja releekaitse rakendumine sünkroongeneraatoriga võrgus kaugel lühisel

Generaatori võimsus	1,1 MVA	3,3 MVA	4,9 MVA
3-f. maksimaalne ülimööduv lühisvool lühisekohas, kA	3,842	4,097	4,261
Lühisvool Liin 10 fiidris / kaitse rakendusviide, kA/s	3,219/0,02	3,248/0,02	3,156/0,02
2-f. minimaalne ülimööduv lühisvool lühisekohas, kA	1,969	2,319	2,414
Lühisvool Liin 10 fiidris / kaitse rakendusviide, kA/s	1,800/0,02	1,785/0,02	1,716/0,02

Katsetulemustest ilmneb selgelt, et generaatori olemasolul võrgus osutub vool lühisekohas oluliselt suuremaks fiidri kaitse poolt nähtavast lühisvoolust. Lühisvoolude erinevus on tingitud generaatori osalühisvoolust. Korraldatud katses osutus fiidrikaitse säte piisavalt madalaks ning osalühisvool võrgust piisavalt suureks ja seetõttu kaitse töötas õigesti.

Probleemi näitlikustamiseks korraldati katset võrgus, mille lühisvõimsust vähendati ligikaudu poole võrra. Katses sätestati võrgu lühisvõimsuseks PAJ 6 kV lattidel maksimaalrežiimis 63,1 MVA, miinimumrežiimis 43,3 MVA. Lisaks vaadeldakse minimaalse lühisena kahefaasilist lühist lühisetakistusega 0,6 Ω. Saadud tulemusi koondab alljärgnev tabel (Tabel 4.5)

Tabel 4.5 Lühisvoolud ja releekaitse rakendumine sünkroongeneraatoriga kaugel lühisel väikese lühisvõimsusega võrgus.

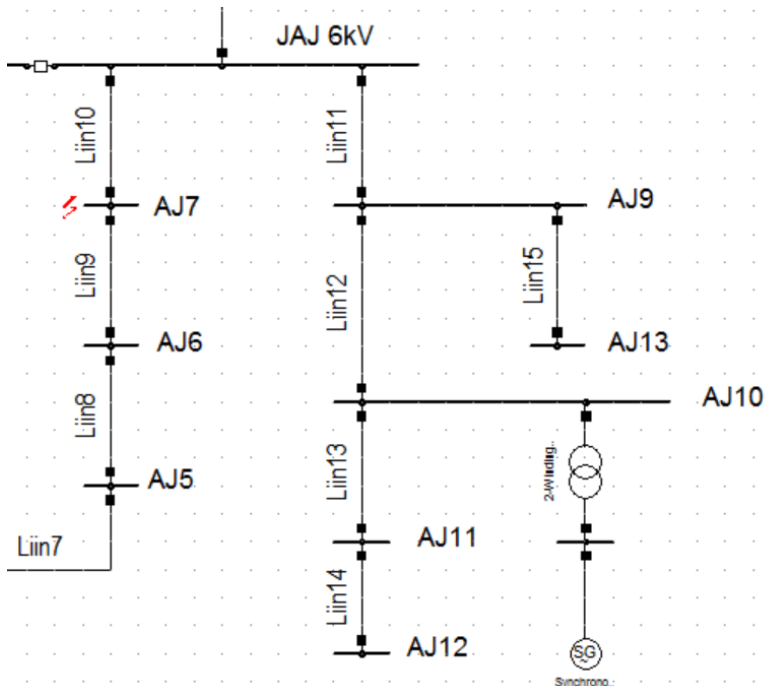
Generaatori võimsus	1,1 MVA	3,3 MVA	4,9 MVA
3-f. maksimaalne ülimööduv lühisvool lühisekohas, kA	3,094	3,643	3,834
Lühisvool Liin10 fiidris / kaitse rakendusviide, kA/s	2,747/0,02	2,604/0,02	2,521/0,02
2-f. minimaalne ülimööduv lühisvool lühisekohas, kA	1,626	1,910	2,0
Lühisvool Liin10 fiidris / kaitse rakendusviide, kA/s	1,404/0,02	1,282/0,368	1,211/0,373

Katse tulemustest ilmneb tõsiasi, et madalama lühisvõimsusega võrgu korral osutub fiidri lühiskaitse töötamine suure võimsusega generaatori korral puudulikuks. Fiidrikaitset läbiv lühisvool ei ületa kaitse kiirema astme sätet ning viiteta väljalülitust ei toimu. Et kaitse on kaheastmeline, osutub kaitse teine aste reserveerivaks ning lülitab võrgu rikkeline osa viitega välja. Tekkinud viide väljalülitusel võib põhjustada kaitsete ebaselektiivsust võrgus. Tuleb mainida, et rikkeline võrguosa täielikuks väljalülituseks peab rakenduma ka generaatori ees asuv kaitse, mida käesoleval juhul ei vaadeldud.

Eelnevatest katsetest selgus, et fiidrikaitse mittetöötamine on võimalik vaid võimsa generaatori ning nõrga võrgu puhul. Kaitse mittetöötamise nähtusele ei pea tähelepanu pöörama, kui võrgu lühisvõimsus ületab generaatori nimivõimsust enam kui kümme korda. Lihtsaimaks lahenduseks osutub sellistel juhtudel voolukaitse kiireima astme sätte vähendamine, tagades sellega releele piisava tundlikkuse. Juhul, kui sätte langetamine osutub võimatuks (vältimaks hetkkaitse töötamist trafotagustel lühistel, mille peab kõrvaldama madalpinge poolel asuv kaitse), on võimalik kasutusele võtta lisaks täiendav voolukaitse aste (kolmas aste).

4.3.2 Sünkroongeneraatori mõju fiidrikaitsele naaberfiidri lühisel

Katsega uuritakse sünkroongeneraatori mõju jaotusalajaama JAJ naaberfiidril toimuva lühise korral. Selleks ühendatakse AJ 10 lattidele sünkroongeneraator ning simuleeritakse 3-faasilist lühist maksimaalrežiimis alajaama 7 lattidel. Jälgitakse AJ 9 liini 12 ning jaotusalajaama liini 11 ja 10 releekaitsete töötamist. Analoogselt eelmisele katsele kasutatakse ka siin 1,1 MVA, 3,3 MVA ning 4,9 MVA generaatoreid samade parameetritega. Katseskeemi kujutab allolev joonis (Joonis 4.4).



Joonis 4.4 Generaatori mõju naaberfiidri lühisel – katseskeem

Releekaitsete rakendumisviiteid erinevate võimsustega generaatorite korral koondab alljärgnev tabel (Tabel 4.6). Sulgudes on näidatud viited juhul, kui peaks tõrkuma kaitse, mis peab lühise kõrvaldamiseks võrgust töötama.

Tabel 4.6 Võrgukaitsete rakendumisviited naaberfiidri lühisel

Kaitse asukoht, rakendusviide s	SG 1,1 MVA	SG 3,3 MVA	SG 4,9 MVA
Liin 12	Ei rakendu (0,613)	0,020	0,020
Liin 11	Ei rakendu (2,252)	Ei rakendu (0,848)	Ei rakendu (0,768)
Liin 10	0,020	0,020	0,020
Liin 2	Ei rakendu (0,320)	Ei rakendu (0,320)	Ei rakendu (0,320)

Tulemustest selgub, et õigesti töötavad kaitsed vaid 1,1 MVA generaatori korral. Kahel järgneval juhul esineb liini 12 kaitse väärakendumine. Lühise peab välja lülitama liini 10 kaitse, ent generaatori osalühisvoolu toimel rakendub ka liini 12 kaitse ning alajaamade 10, 11 ja 12 tarbijad jäävad elektrivarustuseta. On võimalus ka alajaamade 10, 11, 12 saartalitluse tekkeks, kui puuduvad vastavad kaitseseadmed. Liini 12 kaitse liigrakendumist saab vältida järgmiste abinõude rakendamisel:

1. Tõsta liini 12 kaitse sätet selliseks, et see ei reageeriks generaatori lühisvoolule. Samas tuleb sellisel juhul arvestada, et kõrgema sättega peab olema tagatud kaitse tundlikkus ka generaatorist tahapoole jäävatel lühistel (vt. alapunktis 4.3.1 analüüsitud kaitse mitterakendumine). Tihti ei ole sobiva sätte leidmine võimalik.
2. Panna liini 12 kaitsele viide ning kooskõlastada see jaotusalajaamast väljuvate liinide kaitsete viidetega. Selline viidete kooskõlastamine osutub keeruliseks ning pikendab lisaks lühise väljalülitamise aega.
3. Kasutada liinil 12 suunatud voolukaitset. Voolukaitse peaks olema olemasoleva sättega suunaga liini. Sellisel juhul rakendub kaitse vaid tahapoole (liinipoolsetele) jäävatel lühistel. Viimast kinnitab ka simulatsioonitulemus, kui liini 12 kaitsel viia töösse suunaelement.

4.4. Asünkroongeneraatori toime voolukaitsetele

Asünkroongeneraatori osalühisvoolu mõju uurimiseks korraldatakse eelnevat katset asünkroongeneraatoritega elektrijaamaga. Katset tehakse 1260 kVA (2x630 kVA generaatorid), 3150 (5x630 kVA) ning 5040 kVA (8x630 kVA) võimsusega elektrijaamaga. Generaatori parameetrid on leitavad käesoleva töö lisadest (Lisa 3). Võrgu ja trafode parameetrid on analoogsed eelneva katsega. Kaitsete rakendumisi koondab alljärgnev tabel (Tabel 4.7).

Tabel 4.7 Võrgukaitsete rakendumisviited naaberfiidri lühisel – asünkroongeneraatoritel elektrijaam

Kaitse asukoht, rakendusviide s	AsG 1260 kVA	AsG 3150 kVA	AsG 5040 kVA
Liin 12	Ei rakendu (0,487)	0,020	0,020
Liin 11	Ei rakendu (1,530)	Ei rakendu (0,820)	Ei rakendu (0,170)
Liin 10	0,020	0,020	0,020
Liin 2	Ei rakendu (0,320)	Ei rakendu (0,320)	Ei rakendu (0,320)

Saadud tulemused ei erine oluliselt sünkroongeneraatoriga võrgu simulatsiooni tulemustest. Asünkroongeneraatorid annavad võrku ennekõike ülimööduvat lühisvoolu, mistõttu ei erine kiirete voolukaitsete käitumine asünkroongeneraatoritega ja sünkroongeneraatoritega võrgus märkimisväärselt.

4.5. Üle muunduri võrku ühendatud väiketootmisseadmete mõju voolukaitsetele.

Invertermuunduri kaudu ühendatud väiketootmisseadme mõju uuritakse DIGSILENT PowerFactory programmpaketis oleva päikeseelektrijaama (*PV system – Photovoltaic system*) mudeli alusel. Mudel koosneb võrguinverterist ja sellega ühendatud 140-st päikesepaneelist ühikvõimsusega 3,2 kW. Jaama koguvõimsus on 448 kW (500 kVA). Mudeli parameetrid on leitavad käesoleva töö lisadest (Lisa 4). Mudelis olev inverter on madalpingeline (0,4 kV), mistõttu ühendatakse elektrijaam keskpingevõrku läbi trafo. Katsete käigus muudetakse jaama võimsust vaid paralleelsete inverterite (päikesejaamade) lisamise teel.

Päikeseelektrijaam ühendati olemasolevasse võrku alajaama 10 klemmidele läbi 630 kVA trafo. Et teada saada inverterseadme maksimaalset võimalikku osalühisvoolu, simuleeriti lühist AJ 10 lattidel. Modelleeritava inverterseadme lühisvooluks osutub katsetulemuste kohaselt (keskpinge poolel) 56 A, mis osutub ligikaudu 1,22-kordseks elektrijaama nimivooluks.

Näitlikustamaks inverterseadmega ühendatud tootmisseadme vähest mõju releekaitsele, viidi läbi varasemast tuttav katse naaberfiidri lühisel (lühis AJ 7 lattidel). Simuleeriti ühe, kolme ja kuue paralleelselt töös oleva inverteriga. Tulemusi koondab tabel (Tabel 4.8).

Tabel 4.8 Võrgukaitsete rakendumisviited naaberfiidri lühisel – inverterseadmega võrku ühendatud tootmisseeade

Kaitse asukoht, rakendusviide s	PV 500 kVA (trafo 630 kVA)	PV 3x500 kVA (trafo 1600 kVA)	PV 6x500 kVA (trafo 3300 kVA)
Liin 12	Ei käivitu	Ei rakendu (0,653)	Ei rakendu (0,959)
Liin 11	Ei käivitu	Ei rakendu (2,403)	Ei rakendu (6,531)
Liin 10	0,020	0,020	0,020
Liin 2	Ei rakendu (0,320)	Ei rakendu (0,320)	Ei rakendu (0,320)

Tulemustest selgub, et kaitsed töötavad selektiivselt (liin 10 kaitse rakendub võrgu osalühisvoolu tõttu) ning tootmisseadme mõju kaitsete selektiivsusele mõju ei avalda. Seetõttu ei ole eriaabinõude (näiteks suunatud voolukaitsete) kasutuselevõtmine võrgukaitsete juures

inverterseadmetega võrgus üldjuhul vajalik. Inverterseadme lühisvool osutub kestvuselt lühiajaliseks, kuna üldjuhul peab inverterseade lühisest tingitud pingelanguse tõttu võrgust välja lülituma (minimaalselt viitega 0,25 s). Suuremate (üle 1000 kVA) inverteriga võrku ühendatavate väiketootmiseseadmete korral on otstarbekas kasutada ka reserveerivaid pinge-, sagedus- ja voolukaitseid liitumispunktis, mida sätestab ka Võrgueeskiri [14].

Simuleerides viimasel juhul (PV 6x500 kVA) lühist jaotusalajaama lattidel osutub, et liini 11 kaudu toidetakse lühist 0,325 kA osalühisvooluga. Praktikas kasutatakse liinikaitse teise astme käivitussignaali ka alajaamas sisendil olevate kiirete latikaitsete blokeerimiseks (kirjeldatud alapunktis 3.3). Käesoleval juhul ületab tootmiseseadme lühisvool kaitse teise astme sätet (200 A) ning liini 11 kaitse väljastab blokeeriva signaali jaotusalajaama (JAJ) liini 2 sisendi kaitsele (vt. Joonis 4.1). Viimane takistab selle kaitse töötamist ning lattide lühis kõrvaldatakse võrgust alles piirkonnaalajaamas liini 2 kaitse rakendumisel (viitega 0,320 s). Seetõttu on oluline ka inverterseadmetega tootmiseseadmete olemasolul kontrollida võimalikke tekkivaid lühisvoole võrgus. Käesoleval juhul tuleks blokeeringusignaali andmine teostada kaitse kiirema astmega või kasutada kaitsetel suunaorganit, mis annab blokeeriva signaali vaid liini suunatud liigvoolu korral.

5. Väiketootmiseseadmetega võrgu releekaitse ja selle sätestamine

Käesolevas peatükis esitatakse väiketootmiseseadmetega varustatud keskpinge võrgule vajalikud releekaitse ja automaatika funktsioonid, põhjendatakse nende vajalikkust ning antakse juhtnööre sätete valimiseks.

5.1. Nõuded liitumispunkti releekaitsele

Keskpingel oleva liitumispunkti releekaitse eesmärk on kaitsta liitumispunkti ja liituja (väiketootja) seadmeid ülekoormuse ning võrgupoolsete lühisvoolude eest ning teisalt tagada võrgu kaitsmine generaatori poolt antava lühisvoolu mõju eest. Et generaatorseadmetele on nõutud iseseisvad kaitseseadmed, osutub liitumispunkti kaitse nende reservkaitseks. Vajalikud kaitsefunktsioonid liitumispunkti fiidril on:

- Suunamata kaheastmeline voolukaitse

Kaitse eesmärk on tagada liitumispunktist tootmiseseadmeni jäävate seadmete (kaabelliin, trafo) kaitse võrgulühiste eest. Kaitse kiirema astme säte on otstarbekas määrata kaitstava elemendi lõpus esineva võrgupoolse lühisvoolu järgi. Vaadeldaval juhul ei pea lähtuma klassikalise jaotusvõrgu arvutamisel kehtinud põhimõttest, et keskpinge võrgu voolukaitse esimene aste ei tohiks töötada trafo madalpingepoolse lühiste jaoks. Tootmiseseadme pingetõstmisraha puhul on vajalik trafotagusel lühisel katkestada toide ka keskpinge võrgu poolelt. Liigvoolukaitse teine aste sätestatakse trafo lubatava ülekoormuse järgi. Kaitse esimene aste on otstarbekas teha hetkkaitseks, teine aste viitkaitseks. Juhul, kui võrgupoolne lühisvool ei ületa tunduvalt tootmiseseadme lühisvoolu ning kaitse võib rakenduma panna ka tootmiseseadme lühisvool, on vajalik ette näha kirjeldatud kaitseaste suunatuna tootmiseseadme poole.

- Suunatud kaheastmeline voolukaitse

Kaitse eesmärk on olla reserveeriv kaitse tootmiseseadme kaitsetele aga ka kaitseks lülitamiseks välja generaatoripoolse toite võrgu lähilühiste korral. Kaitse nähakse ette töötama vooludele suunaga võrgu (alajaama lattide) poole. Voolukaitse sätestatakse üldjuhul töötama reserveeriva kaitseks generaatori kaitseks. Sätteid valitakse mõlemale kaitseastele seetõttu välistustegur korda suuremad generaatori enda kaitsestetest. Analoogselt käsitatakse ka viidete valikut. Voolukaitse säte peab olema valitud selliselt, et oleks tagatud tootmiseseadme poolt võrku

antava lühisvoolu katkestamine lähedal asuva lühise korral (vaadeldava kaitse tsoonis). Kaugema lühise korral (järgneva kaitse tsoonis s.o mõnel alajaama releekaitsega varustatud väljuval liinil) tootmiseseadme kaitsed rakenduda ei tohi. Suunatud kaitse vajadus üldjuhul puudub väikesevõimsuselistel (alla 1000 kVA nimivõimsusega) inverterseadme kaudu võrguga ühendatud väiketootmiseseadmete korral.

- Kaheastmeline üle- ja alapingekaitse
- Kaheastmeline üle- ja alasageduskaitse

Pinge- ja sageduskaitsete eesmärk on eraldada elektriyaam võrgust pinge või sageduse anormaalsete väärtuste korral. Pinge- ja sageduskaitsetel väldivad ka generaatori tööd ilma võrguta (saartalitluses). Liitumispunkti pinge- ja sageduskaitsetel on ennekõike generaatori pinge- ja sageduskaitsete reserveerimiseks, mistõttu paigaldatakse liitumispunkti kaitsele välistusaja võrra suuremad viited. Oluline on tagada, et generaator ei lülituks võrgust välja lühiajalise pingelohu (kestvusega 0,25 s ning pinge tõus 95%-ni nimipingest 0,5 s jooksul) tõttu, mis on põhjustatud kaugemal asuvast võrgulühisest. Sätete määramisel on otstarbekas lähtuda Võrgueeskirjast [14] ning generaatorseadme kaitsetest.

- sageduse muutumise kiirus (ROCOF)

Kaitse eesmärk on tuvastada võrgutoite kadumine (generaatori saartalitlus). Juhul, kui generaatoril on vastav kaitse olemas, täidab liitumispunktis olev eralduskaitse reserveeriva kaitse ülesannet ning tuleks sätestada töötama pikema viitega, kui generaatoril on kaitse. Kui generaatoril vastav kaitse puudub või on generaator ettenähtud töötama ka reservtoite seadmena (toitma võrgukatkestuse ajal mingit piirkonda), tuleb rakendada kiiretoimelist eralduskaitset liitumispunkti kaitsele. Standard IEEE 1547 [41] sätestab, et jaotusvõrku ühendatud väiketootmiseseade ei tohiks töötada saartalitluses enam kui 2 sekundit. Juhul, kui generaatori toiteliinil on kasutusel TLA, tuleb saartalitlusesse sattunud generaator võrgust eraldada kiiremini, kui seda on TLA pingepaus. Kaitse sättesuuruse leidmist on kirjeldatud käesoleva töö alapunktis 3.4.

- Võimsuse piiramise kaitse

Kaitse on vajalik juhul, kui tootmiseseadme nimivõimsus on suurem kokkuleppelisest liitumisvõimsusest. Kaitse sätestatakse varuteguri kordselt suuremaks kokkuleppelisest võimsusest.

- Suunamata maalühiskaitse

Suunamata maalühiskaitse peab reageerima keskpingevõrgus (liitumispunkti ja generaatori vahelistel) esinevatele kahefaasilistele maalühistele. Kaitse töötab faasivoolude summavoolu järgi ning on üldjuhul kuni 0,3 sekundilise viitega. Kaitse säte peab olema piisavalt suur, et kaitse ei reageeriks faasivoolude ebasümmeetriale või ühefaasilisele maahendusvoolule.

- Kaheastmeline suunatud maahenduskaitse

Suunatud maahenduskaitse tuvastab ühefaasilise maahenduse tootmiseseadme toiteliinil või trafol. Kaitse töötab summavoolutrafolilt ning töötab Eestis üldjuhul signaalile (väljalülitust kaitsest ei toimu).

- Nulljärgnevuspinge kaitse

Kaitse eesmärk on signaliseerida maahenduse olemasolust. Nulljärgnevuspinge üksi ei ole piisav tingimus maahenduse tuvastamiseks, mistõttu nulljärgnevuspinge kaitse töötab üldjuhul signaalile (väljalülitust ei toimu).

5.2. Nõuded võrgu liinikaitsetele väiketootmiseseadmetega võrgus

Liinikaitse (jaotus- ja piirkonnalaajamades) eesmärgiks on kaitsta liini lühiste ja ülekoormuste eest. Väiketootmiseseadmetega võrgus omab liinikaitse teatavaid erisusi, sest vool võib liini läbida erinevalt klassikalisest radiaalsest võrgust mitmes suunas. Vajalikud kaitsefunktsioonid väiketootmiseseadmetega võrgus olevale liinikaitsele on:

- Kaheastmeline suunatud voolukaitse

Kaitse on üldjuhul suunatud liini ning suunaorgani vajadus tuleneb ennekõike sellest, et vältida kaitse väärakendumist mujal võrgus (naaberfiidril) esinevast lühisest. Liini suunatud kaitse ei reageeri generaatorist lähtuva suunaga lühisvoolule (liinilt, millel generaator asub, suunaga lattidele). Liini suunatud kaitse sätestamisel võib lähtuda klassikalise voolukaitsete arvutamise põhimõtetest.

Suuremate tootmiseseadmete olemasolul fiidril võib vajadusel sätestada ka lattidele suunatud voolukaitse. Kaitse eesmärk on olla reserveerivaks kaitseks tootmiseseadme liitumispunkti kaitsele ning fiidri suunamata kaitsele tagamaks alajaama lati- või toiteliini lühisel väljalülituse ka tootmiseseadme poolelt. Kaitse tuleb sätestada nii, et see ei reageeriks naaberfiidritel toimuvatele lühistele ning rakenduks vaid lattide või alajaama toiteliini lühisel.

Suunatud voolukaitsete kasutusel on vajalik vältida kaitsete blokeeringusignaali andmist alajaama latikaitsetele, kui voolu suund väljuvas liinis oli kogumislattide suunaline. Blokeerimine tohib toimuda vaid liinisuunalise kaitse käivitumisel.

Juhul, kui generaatori töösolekul muutuvad tugevalt võrgu lühisvoolud ning võrgu kaitsmine generaatori ajutisel väljasolekul valitud sätetega osutub raskeks või puudulikuks (näiteks esineb kaitsete puudulik tundlikkus), on tarvilik kasutada kaht erinevat sättegruppi (generaator töö ja väljas). Nende ümberlülitamine võib toimuda käsitsi või kaugjuhtimisega (automaatselt).

- Sünkronismikontroll või liini pingetuse kontroll TLA kasutamisel

Taaslülitusautomaatika kasutamisel on vajalik tagada sünkronismikontrolliga lülitus või lülitusblokeering pingestatud liinile lülitamisel. Funktsioon väldib mittesünkroonset lülitust ning sellega kaasnevaid suuri lühisvoolusid. Eeldab pingetrafo või pingesensorite olemasolu liinil.

- Lühisele lülitamise kaitse (kaitse kiirendus)

Kaitse tagab kiire (viiteta) väljalülituse juhaks, kui ekslikult (näiteks blokeeringute mittetöötamisel) lülitatakse lühisele või toimub lülitus vales faasis (saartalitluses olevale liiniosale). Kaitsega on võimalik vältida suuremaid eksliku lülituse tagajärgi.

- Lülitite väljalülitumise signaal fiidril olevatele väiketootmiseseadmetele (kaugväljalülitus)

Sidekanali kaudu edastatava generaatorseadmete väljalülituse vajalikkus seisneb ennekõike fiidritel, mille puhul ROCOF kaitse töö võib osutada puudulikuks genereeriva võimsuse ja tarbimise võrdsuse tõttu. Sellisel juhul on kindlaim viis vältida saartalitlust lülitades võrgu ainukese toiteliini väljalülitumisel ka sellel oleva(-d) generaatori(-d) välja.

- Suunamata maalühiskaitse
- Kaheastmeline maaühenduskaits
- Nulljärgnevuspinge kaitse

Lõputöö kokkuvõte

Üha karmistuvad keskkonnanõuded energeetikasektoris on viinud asjaoluni, et kasutusele on üha enam võetud taastuvaid energiasursse ning efektiivset koostootmist. Klassikaliste suurte elektrijaamade kõrvale on energiasüsteemi lisandumas ka väiketootmiseadmed, millest suur osa paiknevad tarbimiskeskuste vahetus läheduses. Seetõttu liidetakse väiketootmiseadmed ennekõike just jaotusvõrguga. See aga kutsub esile seni tundmata probleeme jaotusvõrgu talitluses.

Käesolevas töös analüüsiti väiketootmiseadmete liitumisel esinevat mõju jaotusvõrgu releekaitsele. Väiketootmiseadmete lisamine jaotusvõrku muudab klassikaliselt ühepoolset toidetava võrgu mitmepoolse toitega võrguks. Muutub ka lühisvoolude tase ning suund võrgus ja kuna keskpinge jaotusvõrkude põhikaitse on kasutusel voolukaitse, esineb ka viimaste talitluses mitmeid probleeme. Töös vaadeldi erinevaid elektritootmiseadmete tüüpe ning võrku ühendamise viise. Töö teine peatükk tutvustas klassikalise ühepoolse toitega keskpingevõrgu releekaitse arvutamispõhimõtteid. Kolmandas peatükis analüüsiti elektritootmiseadmete jaotusvõrku lisamisel esinevaid releekaitsega seonduvaid probleeme. Lisaks voolukaitsetele vaadeldi ka generaatorite saartalitlust, võimalusi selle vältimiseks ning analüüsiti lülitusautomaatide kasutamise kaasnemise probleeme väiketootmiseadmetega keskpingevõrgus. Saamaks selgemat ülevaadet tootmiseadmete mõjust voolukaitsetele, modelleeriti generaatoritega keskpingevõrku töö neljandas osas. Töö viimases peatükis esitati nõuded releekaitsetele väiketootmiseadmetega võrgus. Lisaks erinevate kaitsefunktsioonide välja pakkumisele on esitatud ka autoripoolne nägemus vajalikest aspektidest, mida peaks nimetatud kaitseätete arvutamisel ja seadistamisel arvesse võtma lisaks klassikalistele jaotusvõrgu releekaitse seadistamise põhimõtetele.

Töö tulemusena saab välja tuua järgmist:

1. Väiketootmiseadmete paigutamine jaotusvõrku tõstab võrgus esinevaid lühisvoole.
2. Suurem mõju voolukaitsetele on ennekõike sünkroon- ja asünkroongeneraatoritel, väiksem läbi inverteri võrku ühendatavatel generaatoritel. Mõju voolukaitsetele sõltub ka tootmiseadme võimsusest ning selle ühenduskohast võrgu releekaitsete suhtes.
3. Väiketootmiseadmete olemasolul võrgus võib esineda voolukaitsete mitterakendumist ning liigrakendumist.

Kaitsete mitterakendumine (puudulik tundlikkus) on suuresti esinev nõrkades (madala lühisvooluga) keskpinge võrkudes. Kaitse liigrakendumine on esinev ennekõike pöörlevate generaatoritega jaotusvõrkudes, kusjuures releekaitse rakendumine või mitterakendumine on tugevas sõltuvuses tootmiseadme võimsusest. Tarkvaras DIgSILENT PowerFactory modelleerimine tõestas, et inverterseadmete kaudu ühendatud tootmiseadmed mõjutavad võrgu releekaitset vähesel määral, kuid täielikult tähelepanuta võrgu releekaitsete arvutustel neid jätta ei saa.

4. Voolukaitsete liigrakendumise probleemi saab vältida suunatud kaitsete kasutuselevõttuga. Kaitsete mitterakendumise puhul on tarvilik generaatorseadmega fiidrite voolukaitsete sätete alandamine, et oleks tagatud piisav kaitse tundlikkus. Mitterakendumine saab esineda vaid madala lühisvõimsusega jaotusvõrkudes.
5. Releekaitse seisukohalt on kõige lihtsam ja majanduslikult otstarbekam ühendada tootmiseadmed jaotusvõrgu toitepunktile võimalikult lähedale. Parimaks osutub generaatorite ühendamine piirkonna toitealajaama lattidele, kuna sel juhul jääb kaugemal keskpinge võrgus releekaitsete töö endiseks (võrk jääb talitlema ühepoolse toitega).
6. Generaatorseadmetega jaotusvõrgus võib toiteliini väljalülitusel esineda mõne võrgu osa generaatori toitele jäämine – tekib ohtlik saartalitlus.
7. Jaotusvõrkude tingimustes on otstarbekas saartalitluse vältimiseks üldjuhul kasutada sageduse muutumise kiirust arvestavat kaitset (ROCOF). Juhtudel, kus väiketootmiseadme võimsus ja võrguosa koormus võivad võrdseks muutuda, peab edastama signaali otse sidekanali kaudu võrgutoite kadumisest generaatoritele, et need võrgust eraldataks.
8. Generaatorseadmetega võrgus on oht mittesünkroonseteks lülitusteks. Lülitusautomaatide kasutamisel on tarvilik rakendada sünkronismikontrooli või blokeerida lülitused pingestatud liinidele.
9. Väiketootmiseadmetega keskpinge võrgus vajalikud kaitsefunktsioonid (suunatud voolukaitse, saartalitluse tuvastamise kaitsed, sidekanaliga kaugväljalülitus jm) eeldavad väiketootmiseadmetega võrguosas kaasaegsete kaitsereleede (mikroprotsessortehnikal põhinevate fiidriterminalide) kasutuselevõtmist koos uute sideprotokollide rakendamisega. Esineb vajadus võrgu releekaitse rekonstrueerimiseks.

Töö tulemused osutuvad nõutud sisendiks Eesti jaotusvõrkude releekaitse planeerijatele ja sätete arvutajatele, oskamaks keskpinge võrgu releekaitse arvutamisel ja planeerimisel

arvestada väiketootmiseseadmetega võrgu erisustega. Lisaks on töö tulemusest reaalne kasu võrguliitumiste planeerijatele ja võimalike tootmiseseadmega liitujatele, saamaks ettekujutust vajalikest muudatustest ja investeeringutest võrgu kaitseks.

Käesolevas töös leiti, et väiketootmiseseadmed jaotusvõrgus muudavad võrgu lühisvoolusid ning seeläbi ka releekaitse tööd. Olenemata, et töös käsitleti mitmeid generaatoritega jaotusvõrgu releekaitsetega seotud probleeme, on võimalik töö ideed mitmeti edasi arendada:

- Töös vaadeldi valdavalt keskpingevõrku ühendatavaid väiketootmiseseadmeid. Käsitlemata jäid mikrotootjate liitumine madalpingevõrku. Uurimisteemana osutuks huvitavaks madalpingeliste mikrotootjate massilisel liitumisel esinev mõju keskpingevõrgu talitlusele ja releekaitse tööle.
- Töös lähtuti inverterseadmete modelleerimisel ja analüüsil kirjanduse andmetest ning kasutatud tarkvarapaketi poolt koostatud seadmemudelist. Võimsate inverterseadmete liitmisel keskpingevõrku osutub vajalikuks uurida üksikasjalikumalt erinevat tüüpi inverterite dünaamilist käitumist võrgulühistel ning seeläbi nende mõju releekaitsele.
- Väiketootmiseseadmete massilisel liitmisel võrku osutub lühise- ning releekaitse arvutamine keerukaks ja ajamahukaks protsessiks. Mitme tootmiseseadme mõju samas võrguosas on keerukas hoomata käsitsiarvutustel. Seetõttu osutub otstarbekaks arvutus- ja modelleerimistarkvarade kasutamine. Vajalik on sobiva arvutustarkvara leidmine Elektrilevi OÜ releekaitsearvutusteks, arvestades vajadust modelleerida väiketootmiseseadmeid ning kaasaegseid kaitseid.

Kirjandus

- [1] M. Vignolo ja R. Zeballos, „Transmission network or distributed generation,“ %1 *IASTED EUROPE*, Grecia, 2001.
- [2] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt ja J. Kilter, Jaotusvõrgud, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2007.
- [3] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen ja G. Strbac, *Embedded Generation*, London: The Institution of Electrical Engineers, 2000.
- [4] P. P. Barker ja R. W. de Mello, „Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems,“ Power Technologies, Inc., 2000.
- [5] *Elektrituruseadus*, Riigi Teataja, 2015.
- [6] Elektrilevi OÜ, „Liitumine elektritootjale,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.elektrilevi.ee/et/liitumine-elektritootjale>. [Kasutatud 6 03 2016].
- [7] A. F. Sarabia, *Impact of distributed generation on distribution system*, Aalborg, 2011.
- [8] Elektrilevi, „Elektrilevi võrguga liitunud väiketootjad,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.elektrilevi.ee/-/doc/6305157/kliendile/el_info_liitunud_tootjad.pdf. [Kasutatud 03 2016].
- [9] N. Hatziargyriou, M. Donnelly, S. Papathanassiou, J. P. Lopes, M. Takasaki, H. Chao, J. Usaola, R. Lasseter, A. Efthymiadis, K. Karoui ja S. Arabi, „CIGRE Technical Brochure on Modelling New Forms of Generation and Storage,“ 2000.
- [10] National Instruments, „Wind Turbine Control Methods,“ 22 12 2008. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/8189/en/pdf>. [Kasutatud 12 03 2015].
- [11] K. Liibert, P. Nargla ja R. Kebja, „Elektrituulikute generaatorite tüübid,“ Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2015.

- [12] T. Fladerer, „The Asynchronous Generator in Small Power Plants,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://educyclopedia.karadimov.info/library/asynchronous_generator.pdf. [Kasutatud 12 03 2015].
- [13] S. Müller, M. Deicke ja R. W. De Doncker, „Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines,“ 05 2002. [Võrgumaterjal]. Available: <http://web.mit.edu/kirtley/binlustuff/literature/wind%20turbine%20sys/DFIGinWindTurbine.pdf>. [Kasutatud 13 03 2015].
- [14] *Võrgueeskiri*, Riigi Teataja, 2016.
- [15] Elektrilevi OÜ, *Tehnilised nõuded klass 1 elektrijaamadele*, 2016.
- [16] Elektrilevi OÜ, *Tehnilised nõuded klass 2 elektrijaamadele*, 2016.
- [17] Elektrilevi OÜ, *Tehnilised nõuded klass 3 elektrijaamadele*, 2016.
- [18] *EVS-EN 60909-0:2002: Short circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents*, Tallinn: Eesti Standardikeskus, 2002.
- [19] Ü. Treufeldt, *Lühised elektrisüsteemides*, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2002.
- [20] O. Antsmaa, *Elektritoomisseadmete mõju analüüs jaotusvõrgu talitlusele ja pingekvaliteedile*, Tallinn: TTÜ Elektrotehnika instituut, 2013.
- [21] T. N. Boutsika ja S. A. Papathanassiou, *Short-circuit calculations in networks with distributed generation*, kd. 78, Athens: Elsevier B.V., 2007.
- [22] P. P. Barker ja R. W. d. Mello, *Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems*, Power Technologies, Inc, 2000.
- [23] P. Karaliolios, A. Ishchenko, E. Coster, J. Myrzik ja W. Kling, „Overview of Short-Circuit Contribution of Various Distributed Generators on the Distribution Network,“ %1 *Universities Power Engineering Conference. UPEC 2008. 43rd International*, Padova, 2008.
- [24] R. J. Bravo ja C. Ly, „Electronic-Coupled Generators Short Circuit Impacts,“ %1 *Seventh Annual IEEE Green Technologies Conference*, Southern California Edison, 2015.

- [25] D. Turcotte ja F. Katiraei, „Fault Contribution of Grid-Connected Inverters,“ %1 *IEEE Electrical Power and Energy Conference*, Montreal, Quebec, 2009.
- [26] J. Keller ja B. Kroposki, „Understanding Fault Characteristics of Inverter-Based Distributed Energy Resources,“ National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, 2010.
- [27] K. Liibert, „Rekonstrueeritava Mustamäe alajaama 6 kV voolukaitsete sätete arvutus - bakalaureusetöö,“ Tallinn, 2013.
- [28] *IEEE C37.2-2008: Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations*, IEEE Power and Energy Society, 2008.
- [29] А. М. Шабад, Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей, Ленинград: Энергия, 1976.
- [30] M. Häger, F. Sollerkvist ja M. Bollen, *The Impact of Distributed Energy Resources on Distribution-system Protection*, Ludvika, Sweden: STRI AB, 2006.
- [31] K. I. Jennett, C. D. Booth, F. Coffele ja A. J. Roscoe, „Investigation of the sympathetic tripping problem in power systems with large penetrations of distributed generation,“ *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10 10 2014.
- [32] CIGRE Working Group B5.34, „The Impact of Renewable Energy Sources and Distributed Generation on Substation Protection and Automation,“ CIGRE, 2010.
- [33] A. R. Haron, A. Mohamed, H. Shareef ja H. Zayandehroodi, „Analysis and Solutions of Overcurrent Protection Issues in a Microgrid,“ %1 *IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, Kota Kinabalu Sabah, Malaysia, 2012.
- [34] K. Kauhaniemi ja L. Kumpulainen, *Impact of Distributed Generation on the Protection of Distribution Networks*, Stevenage: The Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [35] M. Guillot, C. Collombet, P. Bertrand ja B. Gotzig, „Protection of embedded generation connected to a distribution network and loss of mains detection,“ %1 *Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIRED. 16th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ No. 482)*, Amsterdam, 2001.

- [36] S. M. d. Lafuente, F. U. J. Tavallo ja J. García, *Improving Vector Shift Relaying for Islanding Detection*, 2011.
- [37] M. Geidl, Protection of power systems with distributed generation: state of the art, Zürich: Power Systems Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), 2005.
- [38] P. Mahat, Z. Chen ja B. Bak-Jensen, „Review of Islanding Detection Methods for Distributed Generation,“ %1 *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008*, Nanjuing, 2008.
- [39] S. Conti, „Analysis of distribution network protection issues in presence of dispersed generation,“ *Electric Power Systems Research*, nr 79, pp. 49-56, 2008.
- [40] *EVS-EN 61850-8-1: Communication networks and systems for power utility automation*, Eesti Standardikeskus, 2011.
- [41] *IEEE Std 1547. IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems.*, New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003.

Lisad

L.1. Modelleerimisel kasutatud sünkroongeneraatorite andmed

L.2. Modelleerimisel kasutatud trafode andmed

L.3. Modelleerimisel kasutatud asünkroongeneraatori andmed

L.4. Modelleerimisel kasutatud PV-paneelide mudeli andmed

L.1. Modelleerimisel kasutatud sünkroongeneraatorite andmed

	SG1100	SG3300	SG4900
Nimivõimsus, kVA	1100	3300	4855
Nimipinge, kV	0,4	0,4	10,5
cosφ	0,8	0,8	0,8
Ülimööduv reaktants X''_d , %	14,5	15,0	16,8
Ülimööduv reaktants X''_q , %	15,2	18,7	18,4
Mööduv reaktants X'_d , %	17,0	26,4	25,6
Vastujärgnevustakistus X_2 , %	14,89	16,9	20,0
Nulljärgnevustakistus X_0 , %	3,6	3,0	10,0
Staatori X/R suhe	8,3	8,6	3,33

L.2. Modelleerimisel kasutatud trafode andmed

	T630	T1250	T3300	T5000
Nimivõimsus, kVA	630	1250	3300	5000
Nimipinged, kV	6,3/0,4	6,3/0,4	6,3/0,4	10,5/6,3
Lülitusgrupp	Dyn5	Dyn11	Dyn11	Dyn11
Lühispinge u_k , %	4	5,8	6	7,5
Vaseskaod, kW	7,3	12,8	22,65	25,5

L.3. Modelleerimisel kasutatud asünkroongeneraatori andmed

	ASG0,6
Nimivõimsus, kW	630
Nimipinge, kV	0,4
cosφ	0,92
Vool pidurdatud rootoriga I_r/I_n , s.ü	7,0
R/X suhe pidurdatud rootoriga	0,429

L.4. Modelleerimisel kasutatud PV-paneelide mudeli andmed

	PV0,5
Nimivõimsus, kW	448
Nimipinge, kV	0,4
cosφ	0,9-1,0
Kp Gain, Active Power PI-Controller	0,005
Integration Time Constant Tip, s	0,03
Measurement Delay Tr, s	0,001
Time Delay MPP-Tracking, Tmpp, s	5,0
Deadband for Dynamic AC Voltage Support, p.u	0,1
Gain for Dynamic AC Voltage Support, KFRT	2,0
Minimal allowed DC-voltage, V	200
Max. Active Current Limit, p.u	1,2
Max. Reactive Current Limit, p.u	1,2