



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

Isetaastuv keskpinge võrk

Elektroenergeetika õppekava

Energiasüsteemide õppetool

Magistritöö

Õppetooli juhataja

Prof H. Tammoja

Juhendaja

Prof H. Tammoja

Lõpetaja

R. Rosenberg

Tallinn 2014

Töö kaitsmine

Lõputöö on kaitsstud 201.... a hindele

Kaitsmiskomisjoni esimees (nimi ja allkiri) _____

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 inseneri-diplomit taotletud.

Lõpetaja (allkiri ja kuupäev) _____

Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Raido Rosenberg		<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö	
<i>Töö pealkiri:</i> ISETAASTUV KESKPINGEVÕRK			
<i>Kuupäev:</i> 02.06.2014		77lk	
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool			
<i>Teaduskond:</i> Energeetika			
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika			
<i>Õppetool:</i> Energiasüsteemid			
<i>Töö juhendaja(d):</i> Professor Heiki Tammoja			
Sisu kirjeldus: Käesoleva töö eesmärgiks on uurida tarkvõrgu ühe komponendi - isetaastuva võrgu omadusi ja funktsionaalsusi ning selle teoreetilisest kasutamisest saadavat kasu ühes terviklikus piirkonnas. Esmalt kirjeldatakse jaotusvõrkude automatiseerimise vajadusi. Seejärel isetaastuva võrgu rakendamise võimalusi koos vastava süsteemi loomiseks vajalike elementidega. Analüüsitakse juhtimisloogikate põhimõtteid ning kriitilisi eeldusi. Selgitatakse erinevatele varustuskindluse piirkondadele kehtivaid varustuskindluse indekseid. Selgub minimaalne vajalik võrgu automatiseerimise konfiguratsioon selleks, et oleks tagatud isetaastuva võrgu funktsionaalsus. Vastavalt püstitatud hüpoteesile rakendatakse isetaastuva võrgu funktsionaalsuste saavutamiseks vajalikku minimaalset automatiseerimise konfiguratsiooni Hiiumaa kõikidel fiidritel. Saadud varustuskindluse indekseid väärtusi võrreldakse tänasel päeval reaalses võrgus teadaolevatega. Varustuskindluse indekseid väärtuste hindamiseks tehakse Tekla NIS tarkvaraga töökindlusarvutused. Täpsemate tulemuste saamiseks on lisatud käsitsi teostatud analüüs.			
<i>Märksõnad:</i>			
Automatiseerimine, isetaastuv võrk, varustuskindluse indeksid, SAIDI, varustuskindluse piirkonnad, rikke lokaliseerimine, rikke eraldamine, toite taastamine			

Summary of the diploma work

<i>Author:</i> Raido Rosenberg		<i>Kind of the work:</i> Master thesis
<i>Title:</i> SELF-HEALING MEDIUM VOLTAGE GRID		
<i>Date:</i> 02.06.2014		77 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology <i>Faculty:</i> Power Engineering <i>Department:</i> Electrical Power Engineering <i>Chair:</i> Power Systems		
<i>Tutor(s) of the work:</i> Heiki Tammoja		
Abstract: The purpose of this paper is to research the characteristics and functionalities of one of the smart grid's main components – self-healing grid and theoretically use it in a single region. Firstly, needs of distribution grid automation are discussed. After that application possibilities of the self healing grid with the corresponding elements necessary to create the system are discussed. Different control logic principles and critical preconditions are analyzed. Also reliability indicators applicable for different reliability areas are explained. Minimal required grid automation configuration is determined for ensuring functionality of the self-healing grid. According to the hypothesis the minimal automation configuration to achieve self-healing functionalities is applied to all of the feeders in Hiiumaa. The resulting reliability indicators are compared to the ones existing today. Reliability calculations are done with Tekla NIS software to evaluate the resulting reliability indicators. Manual analysis are included for more accurate results.		
Key words: Automation, self-healing grid, reliability indicators, SAIDI, reliability areas, fault location, fault isolation, restoration of the supply		

Sisukord

Lõputöö ülesanne.....	7
Eessõna	9
Sissejuhatus	10
1. Jaotusvõrkude areng ning põhilised suunad.....	12
1.1 Automatiseerimine	13
1.2 Tarkvõrk.....	14
1.2.1 Targa fiidri funktsionaalsused	16
1.3 FLIR (<i>Fault Location, Isolation and Service Restoration</i>).....	24
1.3.1 Juhtimisloogika hübriidlahendus	28
1.4 Vajadused isetaastuva võrgu realiseerimiseks	31
1.4.1 Rikke lokaliseerimine	31
1.4.2 Varustuskindluse piirkondade määramine.....	35
1.4.3 Tüviliinide, haruliinide ja taandliinide määramine.....	40
1.4.4 Tüviliinide sektsioneerimine	44
1.4.5 Väljalülitatava võrguosa suuruse määramine	46
2. Hiiumaa isetaastuv võrk	49
2.1 Tekla NIS	49
2.2 Isetaastuva võrgu minimaalse kontseptsiooni mõju Hiiumaal	50
2.2.1 Tänapäevane võrgu automatiseerituse tase Hiiumaal	55
2.2.2 Plaanitav automatiseerimine Hiiumaal.....	57
2.2.3 Fiidrite käsitsi analüüs	66
2.2.4 Maksumus.....	72
Lõputöö kokkuvõte.....	73
Kirjandus.....	76

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	Isetaastuv keskpingevõrk
Üliõpilane:	Raido Rosenberg, 122288
Lõputöö juhendaja:	Heiki Tammoja
Õppetool:	Energiasüsteemid
Õppetooli juhataja:	Heiki Tammoja
Lõputöö esitamise tähtaeg:	02.06.2014

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppetooli juhataja (allkiri)

Teema põhjendus:

Isetaastuva võrgu temaatika on oluline tänapäeva võrguettevõtjatele. Küsimuseks on, kuidas ja mis loogika alusel rakendada tänapäevaseid tehnilisi võimalusi selleks, et võrk suudaks maksimaalselt iseseisvalt toimida ja ootamatute olukordadega hakkama saada. Vajalik on välja töötada põhimõtted, mida hakata rakendama selleks, et oleks võimalik liikuda isetaastuva võrgu rakendamise suunas.

Antud töös on kirjeldatud potentsiaalseid funktsionaalsusi ja vajadusi, mida selline võrk võimaldab ning vajab. Kirjeldatud infole toetudes luuakse isetaastuva võrgu vajadustele vastavalt automatiseeritud piirkond.

Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on uurida isetaastuva võrgu rakendamiseks vajalikke eeldusi ning selle mõju Hiiumaa näitel.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Isetaastuva võrgu funktsionaalsused.

Kriitiliste elementide ning vajaliku info defineerimine.

Automatiseerituse tase isetaastuva võrgu funktsionaalsuse rakendamiseks.

Lähteandmed:

Olulisemad lähteandmed teoreetilise osa jaoks pärinevad vastavat temaatikat käsitlevatest teadusartiklitest, mis on kajastatud kasutatud kirjanduse nimekirjas. Praktilise osa jaoks vajalikud algandmed on kogutud autori poolt kasutades Tekla NIS võrguinfosüsteemi ning sealt kättesaadavaid andmeid.

Lõputöö konsultandid (vajadusel):

Konsultant nimi (allkiri, kuupäev)

Konsultant nimi (allkiri, kuupäev)

Eessõna

Eelkõige ajendas antud teema valida ja selle kallal töötada autori huvi ja asjaolu, et üle maailma on isetaastuv võrk ning selle lahendamise loogika tekitanud elavat huvi, kui üks tähtsamaid elemente tuleviku tarkvõrgust. Käesoleva lõputöö teema valikul olid abiks Heikki Kolk ettevõttest Elektrilevi OÜ ja Heiki Tammoja Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika Instituudist.

Põhiliste algandmete kogumine praktilise osa lahendamiseks toimus koostöös Elektrilevi OÜ spetsialistidega.

Konsultatsioonide eest tahab autor tänada Elektrilevi OÜ peaspetsialisti Heikki Kolki ja spetsialisti Lembit Läänat. Tarkvaraliste probleemide ja küsimuste lahendamise eest tahab autor tänada Elektrilevi OÜ peaspetsialist Aaro Põtra ja analüütikut Kristjan Lasti.

Raido Rosenberg

E-post: raido.rosenberg@gmail.com

Telefon: 56645514

Elukoht: Liivalaia 7-46, Tallinn

Töökoht: Elektrilevi OÜ

Amet: Vanemspetsialist

Sissejuhatus

Võrgu varustuskindluse parandamisel on kaks olulist suunda, esimeseks õhuliinide asendamine maakaabliga ning teiseks võrkude automatiseerimine. Täiendavate kaitseseadmete lisamine võrku on efektiivne viis võrgu rikkelisuse vähendamiseks. Lisaks ei ole õhuliinide maakaablistse viimine paljudes piirkondades rentaabel, mistõttu on võrkude automatiseerimine nendes piirkondades rikkelisuse vähendamiseks ainuke reaalselt mõeldav variant.

Automatiseeritud võrk on tänapäeval põimitud infotehnoloogiaga ning ühildades seadmete võimalused tarkvaraliste võimalustega, on võimalik ellu viia paljud senini ideetasandil olnud lahendused. Kokkuvõtlikult tuntakse mainitud lahenduste kooslust tarkvõrgu nime all.

Töö eesmärk on anda ülevaade tarkvõrgu osadest, keskendudes ühele selle kõige tähtsamale funktsionaalsusele – isetaastuvale võrgule ning töös arutelu tulemusena saadud hüpoteeside kontrollimisele Hiiumaa näite baasil. Töö on jaotatud kaheks suuremaks osaks:

1. Jaotusvõrkude areng ning põhilised suunad
2. Hiiumaa isetaastuv võrk

Töö esimene osa kuulub idee selgitamisele ning teoreetilisele analüüsile ja töö teine osa näitepõhisele analüüsile.

Esimeses osas kirjeldatakse tarkvõrgu omadusi ning isetaastuvat võrku. Selgitatakse välja, mis on sellise idee rakendamise põhjused, võimalused ning eeldused. Selle jaoks analüüsitakse isetaastuva võrgu funktsionaalsusi, alates rikke tuvastamisest kuni tervetel võrguosadel paiknevatele tarbijatele toite taastamiseni. Lisaks on kirjeldatud automaatse juhtimisega võrgu täiendavaid võimalusi, mis peavad kõik toimima tuleviku tarkvõrgu rakendamiseks (võrgu saartalitlus, automaatne ümberkonfigureerimine optimaalsema talitluse saavutamiseks).

Võetakse kokku vajadused isetaastuva võrgu rakendamiseks. Selguvad olulisemad küsimused, mida peab lahendama selleks, et oleks võimalik sellise süsteemi rakendamine elektrivõrkudes:

- Seadmed peavad olema planeeritud vastavalt soovitud funktsionaalsustele
- Vajadus defineeritud varustuskindluse piirkondadele vastavate lahenduste ja seeläbi ka vastavate töökindlusnäitajate loomine
- Võrguinfosüsteemide andmekvaliteet
- Võrgu juhtimisloogika ning vajalikud funktsionaalsused võrgujuhtimissüsteemides

Eesmärgiga luua eeldused isetaastuva võrgu loogika rakendamiseks on välja pakutud nii lahendus rikkekoha tuvastamiseks, minimaalne võrgu automatiseerituse tase, kui ka SCADA ja DMSi poolne juhtimisloogika.

Isetaastuva võrgu automatiseeritud toimimiseks on vajalik vastava võimekusega juhtimismooduli olemasolu, mille sisse on ehitatud loogika rikkeline liinilõigu otsimiseks, eraldamiseks ning tervetele võrguosale toite taastamiseks. Loogika ei erine sisuliselt dispetšeri poolt teostatavatest lülitamistest, kuid süsteem on võimeline haldama ning arvestama kordades rohkem infot, mille alusel on võimalik teha kiiremini järeldusi ning otsuseid. Vältimaks ohtlikke eksimusi, on vajalik sellise süsteemi toimimine vähemalt katsetamisfaasis dispetšeri kontrolli all.

Teises osas minnakse esimeses osas kirjeldatu alusel katsetuse faasi. Selles osas on suur maht algandmete paika seadmisel. Vajalik on kõikidel Hiiumaa fiidritel paiknevate tarbijate ja nende tarbimise info kättesaadavus ning ülevaade tänasest automatiseerituse tasemest. Võrku analüüsides on selge, et soovitud konfiguratsiooni täitmiseks on Hiiumaa automatiseerituse taset vaja oluliselt tõsta. Keskendutakse eelkõige ümbertoitmisvõimaluste loomisele tänaste tehnoloogiatega, mis hõlmavad võimsuslüliteid koos RLA (reservilülitusautomaatika) funktsionaalsustega. Luuakse kõikidele Hiiumaa fiidritele, välja arvatud radiaalliinidele, automaatsed ümbertoitmise võimalused. Sektsioneeritakse kõik fiidrid (välja arvatud radiaalliinid) vähemalt kaheks, tekitades võimalus olenemata rikke asukohast poole fiidri automaatseks ümbertoitmiseks.

Vajalikud töökindlusarvutused tehakse Tekla NIS RNA (Reliability Network Analysis) mooduliga, mille alusel võrreldakse varustuskindluse indekse muutumist tänase ning hüpoteetilise automatiseerimise korral.

Kuna Tekla NIS funktsionaalsused on piiratud, siis on teostatud tulemuste reaalsemaks kujutamiseks käsitsi teostatud analüüs, milles on arvestatud ka automaatsest ümbertoitmisvõimalusest tulenevat kasu.

Töös on esitatud kõikide fiidrite loodavad konfiguratsioonid ning arvutuste tulemused varustuskindluse indeksi SAIDI võrdlemiseks. Kirjeldatud tulemuste ja konfiguratsiooni saavutamiseks on arvutatud maksumus, arvestades töös kirjeldatud orienteeruvate seadmete hindadega.

1. Jaotusvõrkude areng ning põhilised suunad

Suure majanduskasvuga on kasvanud oluliselt ka nõudmised elektrienergia järele. Kliendid on üha tundlikumad elektrikatkestuste ning elektri kvaliteedi suhtes. Enamlevinud varustuskindluse indeksiteks on kujunenud SAIFI (Katkestussageduse indeks), SAIDI (Katkestuskestuse indeks) ja CAIDI (Kliendi katkestuskestuse indeks). Varustuskindluse indeksite, seega ka otseselt varustuskindluse parandamine on jaotusvõrgu ettevõtete suurimaid eesmärke. [16]

- **Katkestussageduse indeks SAIFI** /*System Average Interruption Frequency Index*/ – vaadeldava toitepiirkonna keskmine katkestuste arv ühe kliendi kohta aastas:

$$SAIFI = \frac{\text{kliendikatkestuste koguarv}}{\text{teenindatavate klientide arv}} (1/\text{klient}) \quad (1.1)$$

SAIFI arvestab reeglina ainult püsikatkestusi. SAIFI vähenemine viitab üldiselt töökindluse tõusule. [13]

- **Katkestuskestuse indeks SAIDI** /*System Average Interruption Duration Index*/ – keskmine katkestuste kogukestus ühe kliendi vaadeldavas toitepiirkonnas aasta jooksul:

$$SAIDI = \frac{\text{klientide katkestuste kogukestus}}{\text{teenindatavate klientide arv}} = SAIFI \times CAIDI \text{ (min)} \quad (1.2)$$

SAIDI on agregeeritud näitaja, mis iseloomustab kogu vaadeldava võrgu või selle osa toimimist. Reeglina väljendatakse SAIDI minutites teenindatava kliendi kohta. Tema vähenemine viitab otseselt töökindluse tõusule. [13]

- **Kliendi katkestuskestuse indeks CAIDI** /*Customer Average Interruption Duration Index*/ – ühe katkestuse keskmine kestus, iseloomustab aega kliendi elektritoite taastamiseks:

$$CAIDI = \frac{\text{klientide katkestuste kogukestus}}{\text{kliendikatkestuste koguarv}} = \frac{SAIDI}{SAIFI} \text{ (min)} \quad (1.3)$$

CAIDI vähenemine pole otseselt seotud töökindluse tõusuga. Indeks näitab sisuliselt ühe katkestuse keskmist kestust. [13]

Võrgu töökindluse tõstmisel on kaks olulist suunda, esimeseks on võrgu viimine maakaablisse ning teiseks on võrgu automatiseerimine.

1.1 Automatiseerimine

Üks efektiivsemaid abinõusid elektriliinide rikkelisuse vähendamisel on täiendavate kaitseseadmete lisamine – see vähendab eelkõige katkestatud klientide arvu ja katkestusaega. Õhuliinivõrkudes on efektiivne lahendus mastivõimsuslülitite paigaldamine. [13]

Mastivõimsuslülitite (MVL) paigaldamisel tarbija seisukohalt vaadatuna rikete arv ja kogukestus vähenevad. Summaarne rikete arv võrgus jääb samaks, kuid läbi automatiseerimise on väiksem arv tarbijaid nendest mõjutatud.

Võimsuslülitiga (VL) saadav tulemus sõltub VL taga oleva kaitstava võrguosa pikkusest ehk rikete määrast ja eelneva võrguosa tarbijate arvust. Õigesti reguleeritud toimeagade korral VL järel oleval liiniosal esinevad püsirikked, kiired välja- ja taaslülitused ei mõjuta VL ees oleva liiniosa tarbijaid.[3]

Elektrilevi jaotusvõrku on aastatel 2008 – 2013 paigaldatud kokku 348 mastivõimsuslülitit. [7]

2009/2010 majandusaastal paigaldati Elektrilevi OÜ võrkudesse 210 mastivõimsuslülitit, mille tulemusel hoiti ära 127 496 kliendikatkestust ja vähendati kliendikatkestuste arvu 9%. SAIFI vähenes 0,2 võrra. Keskmine mastivõimsuslüliti maksumus on ca 12800 €, seega oli investeeringu kogumaksumus 2 700 000€. Tulemusena vähenes klientide katkestuskahju vähemalt 0,25 miljoni ja jaotusvõrgu katkestuskahju 0,064 miljoni euro võrra. Seega on investeeringu lihttasuvusaeg 8,8 a. Läbi detailsema analüüsi tehti kindlaks, et mõned lülitid on oma investeeringu ära tasunud juba ühe aastaga. Kaugjuhitavad liinilülitid võimaldavad vähendada seisakute kestust kümnetest minutitest mõne minutini, mille sisse kuulub nii rikkalise lõigu eraldamine kui ka toite taastamine tervetele liiniosadele. [13]

Rikke tekkimisel toimivad elektrivõrgus kaitseseadmed (kaitserleed), mis tuvastavad rikke toimumise ning seejärel avavad lüliti, mis kaitseb ülejäänud võrku esinenud rikke eest. Minimaalselt on elektrivõrk kaitstud fiidripõhiselt piirkonnalajaamas asuvate võimsuslülititega. [16]

Teatavasti on õhuliinide riketest 70-80% olemuslikult mööduva iseloomuga. [13] Tihti on mööduva lühise tekitajaks kas liiga kõrgeks kasvanud ja elektriliinidega kokku puutuv võsa või liinidele langenud puuksad, mis söestuvad või põlevad ära peale esialgset kokkupuudet pingestatud õhuliiniga. Seetõttu kasutatakse jaotusvõrkudes taaslülitusseadmeid, mis automaatselt lülitavad peale ajalist viidet kaitsega lüliti, mis esialgse rikke tuvastamise korral avanes, uuesti sisse. Kui taaslülituse käigus rike taandus ning seadmed kahjustada ei saanud, siis jääb lüliti sisse ja vaatluse all olevatele klientidele on toide taastatud. Kui taaslülitus on

ebaedukas, siis jääb lüliti välja ning liiniosa pingetuks ja jäädakse ootama rikke likvideerimist juba rikkebrigaadi poolt. [16]

„Püsikatkestuste arvu vähendab taaslülitusseadmete paigaldamine. Efektiivsed on taaslülitusautomaatikaga võimsuslülitid. Õhuliinidega võrkudes on soovitatav rakendada kahekordset taaslülitust. Taaslülitusseadmete paigaldamine tüviliinile ja/või haruliinidele vähendab ka toite poole jäävate tarbijate katkestuskestust. Taaslülitusseadmeid ei paigaldata tavaliselt kaabelliinidele kuna nende rikked pole reeglina mööduva iseloomuga. Küll aga võib paigaldada kaabelliinilt jätkuvale õhuliinile või kaabelliinilt hargnevatele õhuliinidele“. [13]

Arengusuunad

Ajendatuna vajadusest vähendada varustuskindluse indekseid SAIDI, SAIFI ja CAIDI on erinevad elektrienergia jaotamisega tegelevad ettevõtted üle maailma hakanud uurima lahendusi, mis suudavad võrku kaitsta ning ümber konfigureerida automaatselt. [2]

Elektrilevi OÜ varahalduse põhimõtetes on kirjas: „Nutikas võrgus peavad jaotusvõrgu tüüpsed kooslused võimaldama FLIR (Fault Location, Isolation and Service Restoration) tehnoloogia rakendamist aastaks 2030“ [17]. Nutikas võrk on antud juhul samaväärne tarkvõrgu mõistega.

Sellest lähtuvalt võib väita, et ka Elektrilevis on eesmärgiks võetud isetaastuva võrgu funktsionaalsuse rakendamine ning soositaks arendustööd ja ka automatiseerimise põhimõtete muutmist vastavalt sellele eesmärgile.

1.2 Tarkvõrk

Aktuaalne teema üle maailma on tarkvõrk, kuid selle definitsioon on erinevates töödes ja valdkondades sageli erinevalt kirjeldatud vastavalt valdkonnale ja teemale, millega seoses seda kasutatakse.

Tarkvõrgus on ühildatud olemasolevad elektri jaotamiseks vajalikud taristud digitaal tehnoloogiaga ja uute funktsionaalsustega, et pakkuda palju efektiivsemat, usaldusväärsemat ning tasuvamat moodust elektrienergia jaotamiseks koos uute lisaväärtustega. Tarkvõrgu üks peamisi funktsioone on tarbimise haldamine ning optimeerimine, pakkudes ühtlasi ka paindlikkust kriisiolukordades. [6]

Tarkvõrk mitte ainult ei aita kulusid kokku hoida, vaid parandab oluliselt ka elektrisüsteemi töökindlust ja efektiivsust. [19]

Selleks, et tarkvõrk seatud eesmäärke oleks suuteline täitma, peab ta olema tihedalt seotud kommunikatsioonivõrkudega. Paraku seeläbi ei muutu võrk mitte ainult targemaks, vaid ka haavatavamaks. [4]

Nagu ka mujal valdkondades, siis elektritootmise ja jaotamise süsteemides on riskikohaks küberturvalisus ning olulisemad nõuded tarkvõrgule infotehnoloogilise turvalisuse osas on järgmised:

- **Rünnakute tuvastamine ning nendele vastupidamine**

Elektrivõrk katab väga suurt maa-ala ning on peaaegu võimatu tagada iga elemendi turvalisust. Seetõttu peab kommunikatsioonivõrk pidevalt tegelema jälgimise, testimise ja seisundite võrdlemisega, et leida ja tuvastada esineda võivaid ebanormaalsuseid. Lisaks peab sidevõrk olema võimeline töötama ka rünnakute korral. [18]

- **Identifitseerimine, autentimine ja juurdepääsu kontroll**

Tarkvõrk võib hõlmata endas miljoneid elektroonilisi seadmeid ja kasutajaid. Identifitseerimise autentimine on võtmeprotsess tuvastamiseks seadme või kasutaja identiteeti enne infosüsteemidele juurdepääsu võimaldamist. Juurdepääsu kontrolli mõte on selles, et süsteemile pääseksid ligi ainult need, kellel selleks ka tegelikult õigus on. [18]

- **Turvalised ja efektiivsed sideprotokollid**

Erinevalt tavalistest võrkudest, vajab tarkvõrk arvestamist nii ajakriitilisusega, kui ka turvalisusega. Need kaks vajadust on tavaliselt üksteisele vastukäivad. Kuna võrgud ei saa alati kasutada turvalisi, füüsiliselt kaitstud ning kiireid kanaleid, siis tuleb vastavalt olukorrale leppida erinevate kompromissidega, et tasakaalustada side efektiivsus turvalisusega. [18]

Tarkvõrgu omadused

Rahvusliku Energia Tehnoloogia Laboratooriumi */National Energy Technology Laboratory (NETL)/* projektis „Moodsa Võrgu Strateegia“ */The Modern Grid Strategy/* on kirjeldatud targa võrgu omadused järgmiselt [15]:

- Elektrisüsteemi häirete korral võrgu isetaastumine (probleemide tuvastamine ja katkestuse ulatuse minimiseerimine)
- Tarbijate aktiivse osavõtu võimaldamine nõudlusele reageerimisel
- Töökindlus küberrünnakute ja füüsiliste rünnakute vastu
- 21. sajandi vajadustele vastava elektrikvaliteedi pakkumine

- Kõikide elektri genereerimise ja salvestamise võimaluste mahutamine
- Uute toodete, teenuste ja turgude võimaldamine
- Varade ja talitluse efektiivsuse optimeerimine

[15]

Tarkvõrgu komponendid võivad neid karakteristikuid mõjutada mitmel viisil:

- Kaudselt – Tarkvõrgu komponent pakub informatsiooni või toetavat infrastruktuuri, et võimaldada teistel süsteemi rakendustel eespool kirjeldatud omadusi saavutada (Isetaastuva võrgu puhul näiteks elektrienergia tootmine, kaugloetavad arvestid).
- Otseselt – Tarkvõrgu komponent sisaldab vahendeid, mis saavutab karakteristiku või omaduse väliste süsteemide kaasamiseta (Isetaastuva võrgu puhul näiteks kaitseseadmed).

1.2.1 Targa fiidri funktsionaalsused

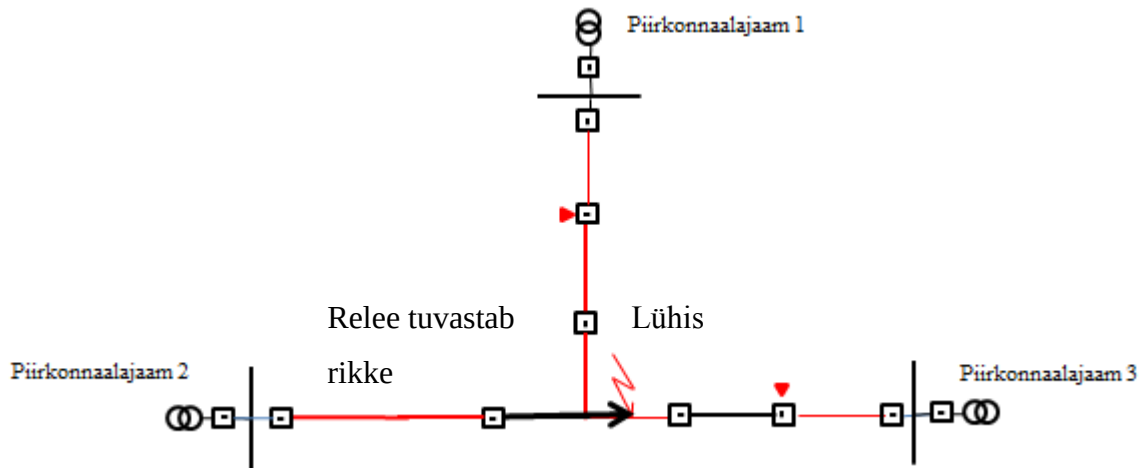
Järgnevalt on kirjeldatud olulisemaid funktsionaalsuseid, mida tark fiider peab omama. Kirjeldatud funktsionaalsused on seotud teatud moodulitega, mis suudavad vajalikke toiminguid teha. Isetaastuva võrgu puhul on üheks selliseks näiteks Tekla FLIR moodul.

Isetaastuv võrk – automaatne rikke lokaliseerimine, isoleerimine ja toite taastamine (FLIR) /*Fault Location, Isolation, and Service Restoration*/

Rikke lokaliseerimine, isoleerimine ja tervetele fiidriosadele toite taastamine on targa fiidri tavapärane funktsionaalsus, mis kiiresti ja automaatselt taastab elektritoite pärast püsirikke poolt põhjustatud katkestust nii paljudele klientidele kui võimalik. FLIR on võimeline pärast esialgse rikke toimumist toite taastama tervele elektrivõrgu osale kiiremini kui minutiga. Selline kiirus toob kaasa tuntava töökindluse paranemise, võrreldes manuaalsete lülitamisprotsessidega. [15]

Isetaastuval võrgul (FLIR) on 4 olulist funktsiooni:

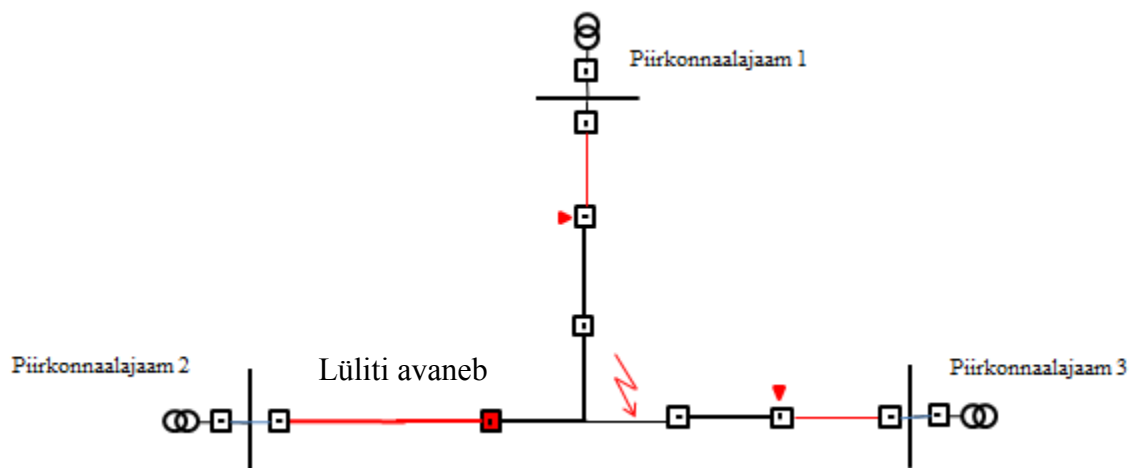
- Rikke tuvastamine (joonis 1.1)



Joonis 1.1. Rikke tuvastamine

Rikke (nt. lühise) tekkimisel tuvastab lähim kaitserelee rikke toimumise. Joonisel 1.1 on selleks liinil asuv mastivõimsuslüliti. Rike tuvastatakse vähemalt fiidripõhiselt piirkonnaalajaamas juhul, kui liinil ei ole täiendavaid kaitseaparatuuriga seadmeid, mis on võimalised iseseisvalt rikkevoole tuvastama.

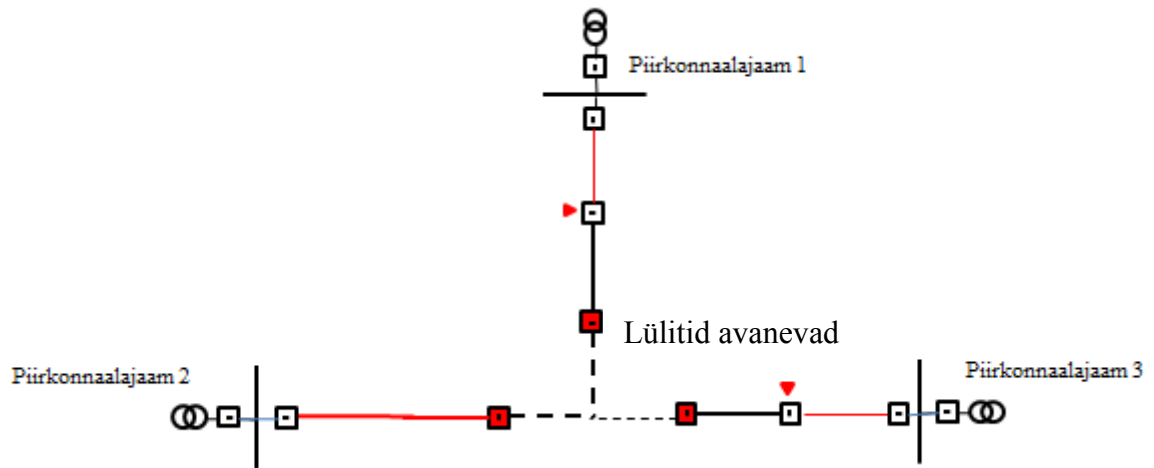
- Rikkeline liinilõigu lokaliseerimine (joonis 1.2)



Joonis 1.2. Rikke lokaliseerimine

Kaitsereleelt saadud info alusel lülitub mastivõimsuslüliti, millest rikkevool läbi läks, välja. Selle tulemusena jääb MVL'i taga olev võrgu toiteta (joonisel 1.2 mustaga tähistatud liiniosa). Kui süsteemis kasutatakse lahküliteid, siis rikke korral jääks terve fiider toiteta, kuni lahkülitid indikaatorite abiga suudavad määrata rikkeline liinilõigu.

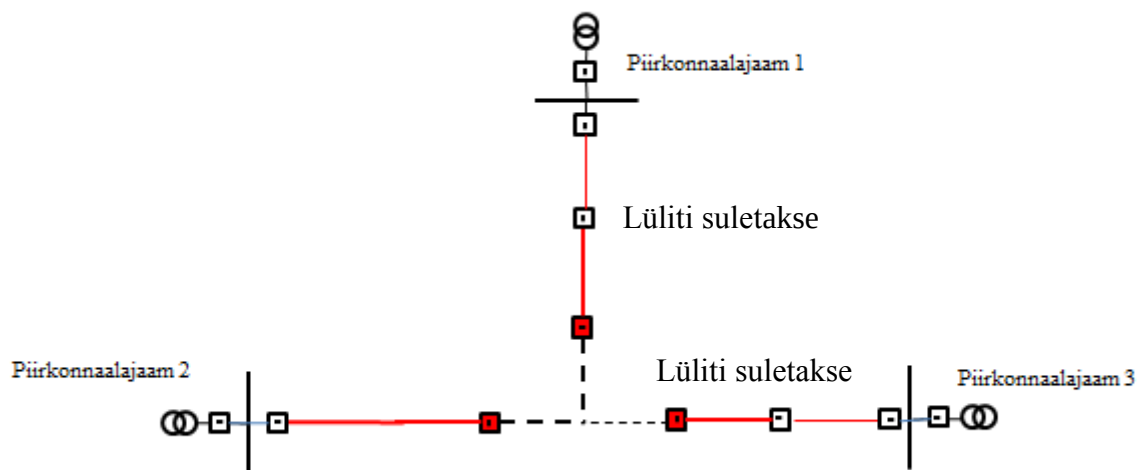
- Rikkeline liinilõigu isoleerimine kaugjuhitavate lülitite avamisega. (joonis 1.3)



Joonis 1.3. Rikkeline liinilõigu isoleerimine

Kuna info, millist lüliti rikkevool läbis ning milliseid mitte, on olemas, siis on võimalik tuvastada, kus on rikkeline liinilõik. Seejärel on võimalik avada kõik lülited rikkeline liiniosa ümber nii, et rike saaks eraldatud ülejäänud võrgust. Isoleeritava võrguosa suurus sõltub sellest, kui tihedalt on fiidritele paigaldatud kaitselüliteid. Juhul kui fiidril on üks lüliti, siis see tähendab, et piltlikult pool fiidrit jääbki tooteta.

- Taastab toite fiidril rikkest puutumata lõikudele läbi fiidri põhitoite allika ja kahe või enama varuallika kaudu, kasutades normaalvahedes asuvaid kaugeltjuhitavaid lüliteid. (joonis 1.4)



Joonis 1.4. Toite taastamine tervetele liini osadele

Pärast rikkeline liinilõigu eraldamist on võimalik sulgeda normaallahutuspunktides asuvad lülited ning seeläbi taastada toide klientidele, kes asuvad tervetel liiniosadel.

Kui tervetele liiniosadele on toide taastatud, siis on häiritud ainult need kliendid, kes asuvad rikkelisel võrguosas ning peavad ootama remonditööde teostamist võrgu parandamiseks. Reaalsuses peavad teatud hulk kliente vaheetapina ootama rikkebrigaadide poolt teostatavaid manuaalseid lülitamisi, peale mida jäävad toiteta remonttööde ajaks ainult need kliendid, keda enam rikkelisest liinilõigust eraldada ei ole võimalik.

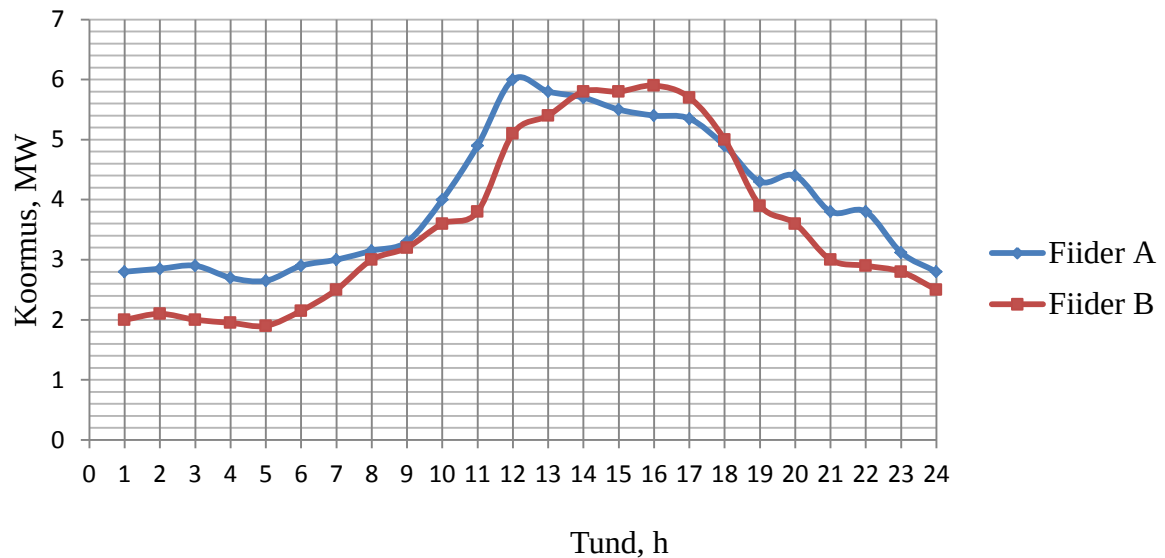
Nagu eespool kirjeldatud, siis on teostatud kõik vajalikud toimingud, et fiidril toimunud rikke järel taastada toide suurele osale fiidril olevatest klientidest ning seeläbi saavutab otseselt isetaastumise funktsiooni tervetele liiniosadele. Esialgu toiteta jääva liiniosa suurus sõltub kaugeltjuhitavate lülite paigaldamise tihedusest.

Võrgu ümberkonfigureerimine – ONR /*Optimal Network Reconfiguration*/

ONR tuvastab erinevad moodused, kuidas seadmed on võimelised omavahel ühendatud fiidreid ümber konfigureerima, selleks, et saavutada optimaalne talitus fiidri piirangute ületamise vältimiseks. ONR funktsionaalsus võimaldab saavutada järgnevad eesmärgid:

- Minimeerida valitud fiidritel energiakadusid, mis otseselt parandab süsteemi üldist efektiivsust.
- Minimeerida tipunõudlust valitud fiidritel teatud ajaperioodi jooksul, lubades olemasolevat võrku ja võrguvarasid paremini kasutada ning ilma võrguosade parameetreid muutmata rohkem võimsusi üle kanda.
- Koormuste jagamine valitud fiidrite vahel, ehk suuremate koormustega fiidritelt koormuste üleviimine vähemkoormatud fiidritele. [15]

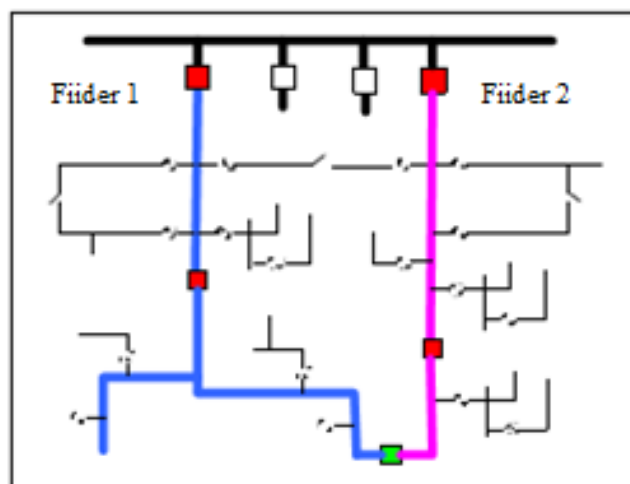
Joonis 1.5 illustreerib situatsiooni, kus vähendatakse kahe omavahel ühendatud fiidri maksimaalset nõudlust, juhul kui nende fiidrite tiputarbimised esinevad erinevatel aegadel. Joonisel 1.5 kujutatud kahe fiidri puhul kantakse kummagi tiputarbimise ajal osa koormusest fiidrile, kus sellel hetkel ei esine tiputarbimist ja nii on võimalik kahe fiidri maksimumid madalamale tuua. [15]



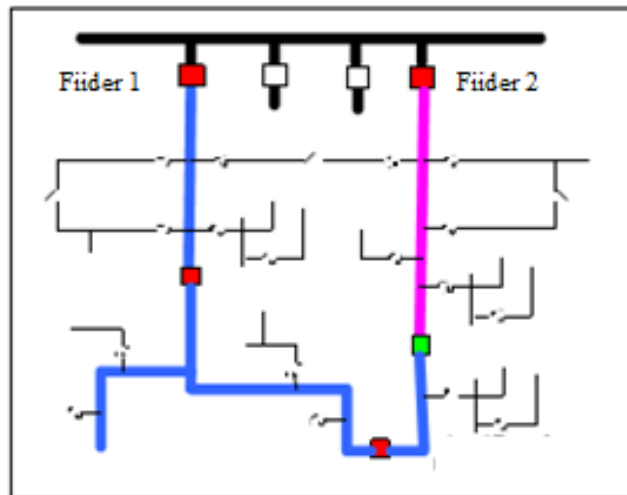
Joonis 1.5. Kahe fiidri ööpäevane nõudlus

Fiider A tiputarbimise korral kaheteistkümnenenda tunni juures kantakse osa koormusest fiidrile B ning analoogselt toimitakse ka kuueteistkümnenenda tunni juures vastupidi. Reguleerimata olukorras kerkiksid kummagi fiidri tipukoormused 7 MW-ni.

Joonised 1.6 ja 1.7 kujutavad kahe omavahel seotud fiidri ümberkonfigureerimist. Nagu näha, siis normaalvahede liigutamisega on võimalik fiidrite koormused ümber jagada ning tipukoormust vähendada.



Joonis 1.6. Fiider 1 tipukoormusel [14]



Joonis 1.7. Fiider 2 tipukoormusel [14]

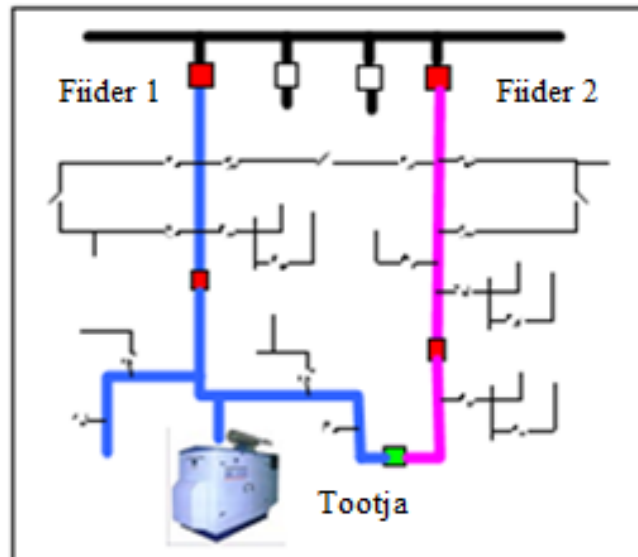
Joonistel 1.6 ja 1.7 kujutab suletud lüliti punane ning avatud lüliti roheline värv.

Ümberkonfigureerimine optimaalsete režiimide loomiseks aitab jagada koormuseid fiidrite vahel ning seeläbi ka pikendada varade eluiga. Ümberkonfigureerimise ulatuse võimalused sõltuvad kaugeltjuhitavate lülitite olemasolust ja paiknemisest. [15]

Saartalitlus

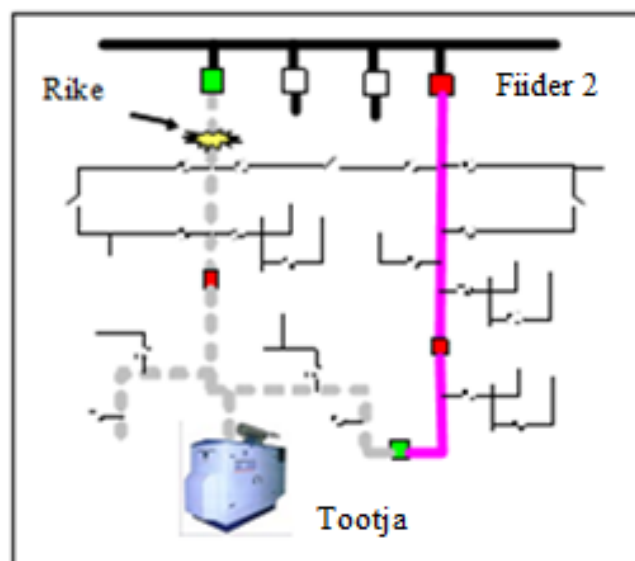
Tark fiider toetab ajutiselt isoleeritud ja mikrotootjate poolt toidetud jaotusvõrgu osade juhtimist ja jälgimist. Seda omadust tuntakse mikrovõrgu tekitamisena, mis on sisuliselt juhitud võrgu saarestumine selleks, et suurendada klientide töökindlust ja energia kvaliteeti. Selline funktsionaalsus on eriti kasulik maavõrkudes, kus on tegu enamasti radiaalvõrkudega, mis ei oma ühenduskohti teiste fiidritega. Saartalitlus on võimalus ka juhtudeks, kus reservtoiteks mõeldud fiidrid on ülekoormatud ja ei suuda üle kanda vajalikku võimsust. [15]

Joonistel 1.8-1.10 on kujutatud saarestumise toimumist peale fiidril esinenud riket. Selle võimaluse kasutamiseks on vaja elektritootmise olemasolu iseseisvaval võrgu osal.



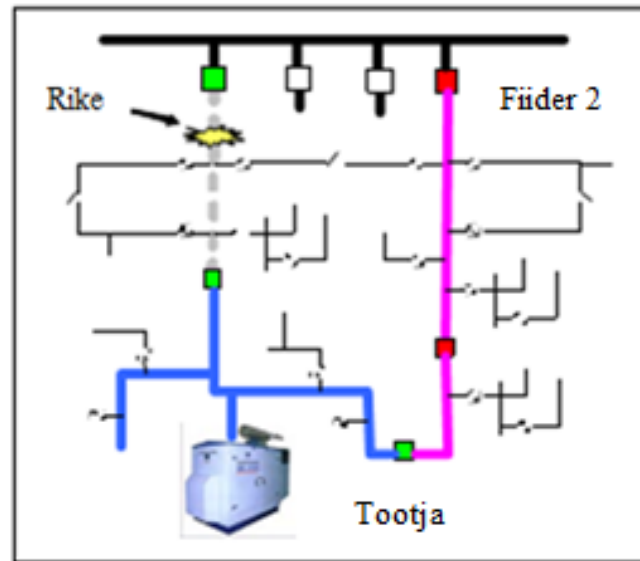
Joonis 1.8. Algne olukord [15]

Joonisel 1.8 on kujutatud kahte fiidrit ning ühte elektritootjat, mis on ühendatud fiidrile 1.



Joonis 1.9. Fiidril esineb püsirike [15]

Joonisel 1.9 on kirjeldatud püsirikke esinemist, mille tagajärjel avaneb piirkonnalajaamas olev võimsuslüliti ning toiteta jääb terve fiider 1.



Joonis 1.10. Saartalitlus [15]

Joonisel 1.10 on kujutatud saartalitluse teket. Rikkeline liiniosa eraldatakse võimsuslülite poolt ning hajatootja toidab fiidri 1 tervel osal asuvaid kliente. Fiider 2 on kas liiga koormatud selleks, et oleks võimalik fiidri 1 tarbijaid automaatselt ümber toita või on teada, et tootja poolt genereeritav võimsus on piisav antud fiidriosal asuvate klientide toitmiseks.

Võrgu saarestumine on vajalik, et taastada toide isoleeritud või ülekoormatud fiidritele.

Pinge ja reaktiivenergia reguleerimine

Pinge ja reaktiivenergia on lähedalt seotud ja üksteisest sõltuvad muutujad. Ühe muutmine võib kaasa tuua teise vastumuutumise. Näiteks alajaama trafode abil pinge tõstmine võib kaasa tuua kondensaatorpatareide eraldamise süsteemist, mis omakorda alandab pinget. Analoogne stsenaarium võib toimuda ka vastupidises olukorras. Kuigi sellised toimingud üldiselt ei tekita mitteaktsepteeritavaid elektrilisi tingimusi fiidril, siis nad võivad tekitada talitluse, mis on vähem efektiivne ja mitteoptimaalne. Optimaalsete toimingute jaoks on vaja koordineeritud pinge ja reaktiivenergia reguleerimist. [15]

Integreeritud pinge ja reaktiivenergia kontroll on automaatika funktsionaalsus, mis määrab parimad reguleerimistoimingute järgnevused kõikidele pinget ja reaktiivenergiat reguleerivatele seadmetele, et saavutada soovitud talitluse eesmärgid. Seejuures välditakse süsteemi piirangutega (üle- ja alapinge, koormuste piirid jms.) vastuollu minekut. Eesmärkideks on: minimaalsed elektrilised kaod, minimaalne elektriline nõudlus, energia tarbimise vähendamine. [15]

Tarbijate juhtimine

Kui ka tarbijad ja nende tarbimispunktid on keskse süsteemiga ühendatud, siis on võimalik vajadusel ka tarbijaid reguleerida. See tähendab, et võrgu ülekoormumisel on võimalik teatud tarbijaid välja lülitada. Teatud tarbijate tarbimist on võimalik reguleerida aegadele, kus elektri turuhind on madal ning seeläbi võidab tarbija. Tarbimiste juhtimine ja reguleerimine võimaldab ühtlustada koormusgraafikuid analoogselt joonisel 1.5 kujutatule, mille puhul konfigureeriti võrk ümber tipukoormuste vähendamiseks.

1.3 FLIR (*Fault Location, Isolation and Service Restoration*)

Antud alapunktis on kirjeldatud isetaastuva võrguga seotud olulisemaid arengusuundi ja probleeme.

(Masti)Võimsuslülite kasutamine koormuslahklülite asemel

Isetaastuvat võrku võib teostada nii lühisvoolude lahutamise võimekusega (masti)võimsuslülitega, koormuslahklülitega, mis ei oma lühisvoolude katkestamise võimekust, kui ka mõlemat tüüpi lüliteid korraga kasutades. Ainult koormuslahklülite kasutamise korral on lühisvoolude lahutamise ülesanne jäetud piirkonnaalajaamades olevatele võimsuslülitele, kuid selle tulemusena kannatab fiider rikke korral rohkem toitekatkestusi. Mastivõimsuslüliteid kasutades jääb ainult osa fiidrist rikke korral toiteta, välja arvatud rikete korral, mis toimuvad enne esimest (masti)võimsuslülitit. Kuid tänu enamike rikete ulatuse vähendamisele väheneb ka ajutiste katkestuste arv. Võrguettevõtjad on võtnud suuna kasutamaks õhuliinidel (masti)võimsuslüliteid koormuslahklülite asemel, kuna hinnavahe koormuslahklülitiga on kahanenud tunduvalt. [16]

Isetaastuva võrgu rakendamiseks on mõistlik ära kasutada võrgus olemasolevad lülid, mis omavad vajalikku funktsionaalsust. Täielikult uue süsteemi ehitamine oleks põhjendamatult kallis. Seega on võrgus sageli vaja kasutada lisaks võimsuslülitele lahküliteid. [16]

Ohutuse säilitamine

Suurim tingimus FLIR'ile on turvalisuse tagamine töid tegevatele elektrikutele ja läheduses viibivatele inimestele. Tavaks on FLIR'i funktsionaalsuse blokeerimine olukorras, kus võrgus teostatakse töid, mille puhul võib olla potentsiaalseid kokkupuute võimalusi pingestatud osadega. [16]

Teine ohutuse kohalt tähtis punkt on kõigi isetaastuva võrgu poolt teostatavate lülitite sulgemise protseduuride lõppemine vähem kui kolme minutiga. See aitab vältida maha langenud juhtmete taaspingestamist kohalike võimude ja tavakodanike sündmuskohale sattudes. [16]

Tsentraliseeritud ja lokaalne juhtimisarhitektuur

Saadaval on erinevaid tooteid ja mooduleid isetaastuva võrgu (FLIR'i) rakendamiseks. Need sisaldavad nii tsentraliseeritud arhitektuuriga FLIRi süsteeme, kui ka lokaalseid detsentraliseeritud süsteeme. [16]

Tsentraliseeritud süsteemi korral asub kontrolli ja juhtimise funktsioon juhtimiskeskuses moodulina SCADA ja DMSi külge integreerituna. Tsentraliseeritud lähenemine on sobivaim lahendus ettevõtetele, kes soovivad FLIR'i laiemat kasutamist terves süsteemis. Tsentraliseeritud lähenemine on eelistatud ka fiidritel, kus on integreeritud palju elektritootjaid ja fiidritel, mida on vaja tihti ümber konfigureerida koormuste jagamise ning ka muude eesmärkide tõttu. [16]

Lokaalse süsteemi loogika põhineb alajaamades ja mastidel asuvate lülitite protsessorite seadistamises. Lokaalse süsteemi suuremaid eeliseid on jaotusvõrgu mudeli mitte vajamine ja see sobib hästi ka üksikutele probleemsetele fiidritele. [16]

Hajatootmiste mõju

FLIR'i rakendamist raskendab oluliselt suurte hajatootmiste olemasolu, mis võivad tekitada rikkevoole. Hajutatud generaatorid, mis on rikkelisest fiidri sektsioonist eespool võivad põhjustada ebatäpset rikkekoha lokaliseerimist. Sellisel juhul on rikkelise lõigu lokaliseerimiseks vajadus suunafunktsiooniga rikkeindikaatorite järele, mis tuvastavad rikke ning selle suuna. [16]

Hajatootjate tõttu võivad rikkele eelnenud talitluse arvutused valed olla. Näiteks võib generaator toita suurt osa fiidrist ning seeläbi vähendada võrgu poolt kaetud koormust rikkele eelnenud olukorras. Rikke korral eraldub hajatootja generaator võrgust ja tekitab peale toite taastamist suurema energia vajaduse võrgust. Sellest tingitud võimsuse ülekanne võib tekitada ülekoormuse reservtoite allikal ning põhjustada ülekoormuskaitsete töötamise. [16]

Isetaastuva võrgu funktsionaalsuse kasutamine tormide korral

FLIR'i funktsionaalsus on soovituslikult välja lülitatud suurte, aeglaselt liikuvate tormide ajal, eriti aga tormide ajal, mille puhul esineb palju välgulööke. Lähtutud on sellest, et FLIR võib anda ebatäpseid rikke asukohti mitmete rikete esinemisel fiidri erinevatel osadel orienteeruvalt samal ajal. Kirjeldatud stsenaariumi korral võib FLIR isoleerida ainult alajaamast kaugeimal

asuvad lõigud ning seeläbi põhjustada toitepoolsetel lõikudel ebavajalikke toitekatkestusi. Mitmed ettevõtted, kes on FLIR'i juurutanud, on jäänud ka tormide ajal FLIR'i töötamise pooldajateks, väites, et üheaegsete rikete toimumine on väga haruldane ning pigem on FLIR'i rakendamisest ekstreemsete olukordade puhul oluliselt kasu. [16]

Toite taastamine ringtoitevõrgus

Mõningaid süsteeme kasutatakse ringvõrkude puhul poolautomaatsel režiimil. Enamikel juhtudel tähendab see seda, et rikke tuvastamine ja isoleerimine töötab täisautomaatselt, kuid toite taastamine, mis on tunduvalt riskantsem ja raskem ülesanne, toimib nõustamistasandil, mille puhul teeb dispetšer lõpliku lülitamisotsuse toetudes FLIR mooduli poolt genereeritud lülitamiskavale. [16]

Toite taastamine on kahtlemata raskeim ülesanne, kuna on vaja vältida ülekoormuseid, alapingeid ja teisi võimalikke fiidri ümberkonfigureerimisest tekkida võivaid häiringuid. Suurem osa lokaalseid süsteeme kasutab täisautomaatseid lahendusi, samas kui enamik tsentraalseid lahendusi toimivad poolautomaatselt või manuaalselt. Peamine põhjus selleks on, et DMS'i FLIR'i lahendused on juurutamise algjärgudes, kuid lokaalne lähenemine on praeguseks juba küpsem tehnoloogia. [16]

Toimingud peale fiidri ümberkonfigureerimist

Elektriettevõtete tarkvõrgu juurutamise edenedes on oodata sagedamini fiidrite ümberkonfigureerimist muudel põhjustel kui toite taastamiseks. Näiteks ümberkonfigureerimine fiidri topoloogia muutmiseks eesmärgiga tasandada koormusi kadude vähendamiseks ja pingekvaliteedi parandamiseks. [16]

Varajased FLIR'i rakendused olid keelatud, kui fiidri konfiguratsioon erines normaalskeemist. Arenenumad süsteemid suudavad uut konfiguratsiooni kalibreerida uueks normaalskeemiks ning jätkata toimimist. Arendustegevust on vaja jätkata kindlustamaks FLIR'i ja ONR'i täielikku integreeritust. [16]

Ühefaasiline FLIR

Elektriettevõtjad, kellel on suur hulk ühefaasilisi koormusi, otsivad võimalusi rakendamaks igale faasile eraldi individuaalseid kontrollereid efektiivsuse ja töökindluse parandamiseks. Siiani on ühefaasilisi kontrollereid kasutatud eelkõige pingete reguleerimiseks faaside kaupa. Suur huvi on ühefaasiliste kondensaatorpatareide vastu. Mitmed kolmefaasilised liinilülitid nagu

koormuslahklülitid ja mastivõimsuslülitid toetavad ka ühefaasilist töötamist. Tihti töötavad uued mastivõimsuslülitid ühefaasilise avanemise ja sulgemisega, kuid kolmefaasilise avanemisega toitekatkestuste korral. Võimalus faasikaupa töötada on olemas. [16]

Kuigi faaside kaupa juhtimine võimaldaks lokaliseerida ainult rikkalise faasi, siis sellise süsteemi kasutamisele on praktilised piirangud, nagu näiteks elektrikute ohutus, mis ei võimalda antud funktsionaalsuse kasutamist isetaastuva võrgu funktsionaalsusena. Seega on antud omadus piiratud kasutamiseks ainult spetsiaalsetel juhtudel. [1]

Tarbimise vähendamine raskelt koormatud fiidritel toite taastamiseks

Fiidrite koormused on aastast aastasse pidevalt kasvanud ning järjest raskem on toidet taastada raskelt koormatud reservtoitefiidritelt. Sellest lähtuvalt võib väita, et toitetaastamine on sageli piiratud koormatuse ja alapinge probleemide tõttu. [16]

Üks võimalus on sektioneerida liin kaugjuhitavate lülititega piisavalt väikesteks osadeks, et oleks kergem ümber toita sellist osa fiidrist, mis ei põhjusta toitvatele fiidritele ülekoormusest tingitud probleeme. Jaotusvõrgu ettevõtetel on variandiks ja tihtipeale ka vajaduseks asendada võrgus tekkivaid pudelikaelu ning seeläbi võimaldada suuremate võimsuste ülekandmist. [16]

Lisades lüliteid või suurendades võrgu läbilaskevõimet, võivad kulud olla väga suured ja mitteaktsepteeritavad. Teiseks võimaluseks on tarbimise kontrollimine ning vajadusel selle vähendamine. Paljud meetmed on ka tänapäeval kasutuses, kuid eespool olevad lahendused võimaldaksid automaatset isetaastumist rakendada vähemalt mingil osal fiidrist, mille reservtoide pärineb väga koormatud fiidritelt. [16]

Dispetšeri väljaõpe (*Operator Training and Certification*)

Turvaline ja edukas FLIR'i rakendamine nõuab täielikku usaldust dispetšeritelt ja liinidel tööd tegevatest elektrikutelt. Tõhusad koolitused on vajalikud FLIR'i rakendamiseks. Dispetšerid peavad täielikult mõistma, miks süsteem töötab nii nagu ta seda tegi, et saada jälile süsteemi loogikavigadele ning need parandada enne, kui need muutuvad ohtlikuks inimestele. FLIR'i lülitamiste üle peab dispetšeril olema olemas täielik ülevaade ning peab olema selge, kuidas iga jaotusfiidri lõik on toidetud. FLIR ei tohi ilma dispetšerit teavitamata võrku ümber konfigureerida. Isetaastuva võrgu juurutamise strateegia, mis on osutunud ka edukaks, näeb ette süsteemi toimimist esialgu nõustamisrežiimis, mille puhul FLIR'i rakendus annab dispetšerile lülitamiste järjekorra kohta soovitusel, kuid ei tee juhtimistoiminguid automaatselt. Kõik tegevused peavad olema dispetšeri poolt kontrollitud ning algatatud. [16]

1.3.1 Juhtimisloogika hübriidlahendus

Eelnevalt on kirjeldatud tarkvõrgu ja tema osade üldisi omadusi. Kuna eesmärk, mille poole eelkõige püüeldakse ei saa olla kohe valmis tarkvõrk, vaid järkjärgult tema erinevad omadused, millest isetaastuva võrgu funktsionaalsus aitab enim kaasa varustuskindluse parandamisele ja on seetõttu ka üks kriitilisemaid osasid tarkvõrgu funktsionaalsuste realiseerimisel.

Punktis 1.2.3 on märgitud isetaastuva võrgu jaoks 2 põhilist lähenemist: tsentraliseeritud ja lokaalne lähenemine. Seal on öeldud, et tsentraalse FLIR'i korral toimub kogu juhtimine DMSi ja SCADA baasil tervele süsteemile, lokaalse puhul toimib juhtimine lülitite protsessorites programmeeritava loogika alusel.

Tegelikult ei ole küsimus selles, et kas juhtimiseks tuleks valida tsentraalne või lokaalne lahendus ning kumb on parem. Süsteemi terviklikuks koostööks on vaja omadusi nii tsentraalse juhtimisega süsteemilt, kui ka lokaalse juhtimisega süsteemilt. Nimetame seda lahendust hübriidlahenduseks, millel on kummagi süsteemi omadused olemas. [10]

Kummagi süsteemi omadused on omavahel seotud teatava tasandite järjekorraga. Igal tasandil on erinevad otsustusõigused ja võimekused ning seeläbi võib hübriidlahenduse korral rääkida erinevatest intelligentsikihtidest. Igal seadmel on võimalus teha otsuseid vastavalt oma intelligentsi tasemele. Lokaalsel tasandil on võimalus kohalike mõõtmiste tasemel teha hetkelisi otsuseid, nagu näiteks lühisvoolule või pingekadumisele reageerimine. Kõrgematel tasanditel kogutakse erinevaid andmeid optimeerimise jaoks. [10]

Intelligentsi kihid on esitatud järgmiselt:

- Lokaalne tase – üksik seade
- Lokaalne hajutatud tase – seadmete kogum
- Piirkondlik tase – piirkonnaalajaam, fiidrite kogum
- Tsentraalne – terve süsteem

[10]

Hübriidlahenduse korral luuakse ühendused kirjeldatud intelligentsitasemete vahele.

Lokaalne mõõtmiste, järeldamiste ja lülitamiste võimekus võimaldab kaitset liigvoolude eest ja fiidri automaatset sektioneerimist. Üksikute seadmete intelligentsust tuleb kasutada kohesele riketele reageerimiseks, 0,5%-lise täpsusega pingete ja voolude mõõtmiseks, sündmuste logide lugemiseks. [10]

Lokaalse hajutatud taseme korral iga seade mõõdab, suhtleb, töötleb andmeid ja tegutseb. Kasutatakse võrgu reaalamöötmisi, seadmete vahelist suhtlemist, rikke või pingekadumise korral kohest reageerimist vastavalt programmeeritule, kaitse süsteemide omavahelist põimitust ning tänu kõigele sellele on toite taastamine võimalik sekunditega. [10]

Piirkondlik juhtimistase hõlmab endas erinevate seadmete ja seadmekogumite poolt teostatud mõõtmiste kokkukogumist ja nende esitamist.

Tsentraalne intelligentsi tähtsamaid osasid on DMS, mis võimaldab isetaastumise süsteemset funktsionaalsust skaleerida ning seda tervele süsteemile rakendada. DMS mängib läbi koormusvoogude jagunemise erinevate stsenaariumite korral, et kinnitada lahenduse teostatavus. Valmistab ette optimaalsed lülitamiste järgnevused, mille sees on ka manuaalsete lülitamiste vajadused rikke mõju minimiseerimiseks. Joonisel 1.11 on näitena kujutatud DMS'i FLIR'i mooduli poolt genereeritav lülitamiskava. Märgitud on lisaks lülitite lülitamiste vajadusele ja järjekorrale ka tulemusena toiteta jäävate klientide arv ning tarnimata jääv energia

The screenshot shows a software interface titled 'RT - Viewport B - DMS'. It contains a menu bar (File, Navigate, HABITAT Applications, EMP Applications, DMS Applications, OMS, Fantasy Island Stations, Help) and a toolbar. Below the toolbar, a status bar indicates 'RAVEN - FISIR Plan (Execution Time: 2011-02-01 22:58:09 Evaluation Time: 2011-02-01 22:58:09 Pe)'. The main content area displays two tables.

Rank	Number of Moves	Show Steps	Number of Customers Not	Unreserved kW	Maximum Segment Loading	Maximum Load Voltage	Minimum Load Voltage	Protection Validation	Protection Validation Results	Plan Details	Mark Devices
1	4		925	2923.22	80.7	129.35 (12...	108.13 (12...	Valid			

RAVEN Plan 1 - Switching Plan Control Moves									
Step Number	Device Type	Device Name	Device Id	Device Substation	Initial State	Recommended	Switch Order	Mark Device	Locate
1	Switch	51731	22239714	RAVEN	Close	Open			
2	Switch	8864F	2FDE8FA...	RAVEN	Open	Close			
3	Switch	51729	22239698	RAVEN	Close	Open			
4	Switch	50916	22239364	RAVEN	Open	Close			

PAGE 1 2/1/2011 10:58:41 PM

Joonis 1.11. FLIR-mooduli poolt esitatud lülitamiskava [10]

Hübriidlahendus (kihiline lahendus) võimaldab isetaastuva võrgu funktsionaalsuse kasutamist mistahes võrgus ning ei ole eraldi vaja süsteemi ülesehitamist, vaid saab ära kasutada kõiki seadmeid, mis võrgus juba olemas on. Ehk siis süsteemi abil on meile garanteeritud lokaalne kaitse ning toite taastamine, vajadusel hajutatud automaatika poolne toite taastamine, piirkondlik andmete kogumine ja haldamine ning tsentraalne juhtimine koos ülevaatega võrgu olukorrast. Elektri jaotamine targalt läbi kihilise intelligentsuse võimaldab kohest, reaajas reageerimist

süsteemi olukorra muutustele, kasutades lokaalset taset. Lisaks süsteemi tasemel rakendused nagu optimaalsete režiimide planeerimine tsentraalselt.[10]

Oluliste plusspunktidenä pelgalt tsentraalse lahenduse ees on see, et riketele reageerimine toimub võrgus koheselt ilma ajaviiteta, mis tsentraalse lahenduse puhul tekib andmete töötlemise vajaduse tõttu. Lisaks ei teki SPOF'i (single-point-of-failure), mis tähendab, et SCADA rikke või ka muude süsteemsete probleemide puhul on kogu võrk halvatud ning rikete eraldamist ei toimu. See tekitab suure riskikoha, kuna oht kirjeldatud stsenaariumiks on olemas. Hübriidlahenduse puhul on lahendatud nii palju kui võimalik lokaalsel tasandil (vähemalt rikete eraldamine) ning täiendavad funktsionaalsused näiteks toite taastamiseks on disainitud osaliselt tsentraalse juhtimise peale.

Lokaalse lahenduse ees on olulisemateks plussideks süsteemivaate omamine ning selle alusel võimalus teha ulatuslikemaid otsuseid terve võrgu olukorda arvestades.

Lahendus kärgvõrkudes

Kuna Elektrilevi OÜ võrk sisaldab endas väga palju erinevaid elemente, mis on tihtipeale erinevate funktsionaalsustega ning omavahel mitteühilduvad, siis pelgalt lokaalse lahenduse kasutamise võimalused on piiratud. Samuti on puuduseks ühe kindla loogika kasutamiseks võrgu konfiguratsioon, mida võib nimetada kärgvõrguks. Erinevate fiidrite vahel on palju ühendusi ja võrgu osad on erinevate sündmuste korral võimalik ümber toita mitmetest allikatest.

Võrgu uuendamise ja planeerimise käigus on võimalik luua vastavad kooslused, mis võimaldavad lokaalsel tasandil isetaastuva võrgu funktsionaalsust rakendada. Lisaks on võrk keeruline ja sisaldab väga palju erinevate fiidrite ühenduskohti, normaalvahesid, mida lokaalne seadmete tasand ei suuda alati optimaalselt ära kasutada.

Võrku on aastate jooksul paigaldatud kaugjuhitavaid lüliteid, mis on nii kaitseaparatuuriga (mastivõimsuslülid ja võimsuslülid), kui ka ilma (lahklülid). Paljudel fiidritel on seega olemas riketele reageerimiseks ning rikkelse lõigu automaatseks eraldamiseks ja toite taastamiseks vajalikud seadmed, kuid kõikide lülite juhtimiseks puudub ühesuguse loogika kasutamise võimalus.

Lokaalsed automaatsed lülitamised on lahendatud üksikseadmete baasil. Keskse süsteemi poolne juhtimine rakendub peale lokaalsel tasandil tehtud lülitamiste lõppemist.

Võimalikult palju tuleb lahendada ümbertoitmine lokaalselt, mida saab teostada RLA-de abil. Süsteemi lokaalne toimimine kindlustab rikete korral juhtimissüsteemis võrgu toimimise ning rikkemõjude kontrolli all hoidmise.

Tsentraalsesse juhtimisse on vaja integreerida rikkekoha info ning tervetel võrguosadel olevate klientide toite taastamise loogika, juhul kui ei ole võimalust RLA'd kasutades lahendada ümbertoitmist lokaalselt. Isetaastuva võrgu loogika on vaja üles ehitada kõikide kaugjuhitavate lülitamisvõimaluste baasil. Juhtimissüsteemil peab olema ülevaade ka manuaalselt lülitatavatest lülititest, mille lülitamisvõimalusi samuti arvestada lülitamiskavade koostamisel.

1.4 Vajadused isetaastuva võrgu realiseerimiseks

Üks ilmselgemaid vajadusi isetaastuva võrgu funktsionaalsuse loomiseks on SCADA koos uute funktsionaalsustega. FLIR-moodul peab olema võimeline töötama DMSi baasil ning lülitamiskorraldused edastama SCADAse, mis on võimeline edastatud lülitamiskava täide viima. Nii kaua, kui DMS'i ja SCADA küljes ei ole isetaastuva võrgu funktsionaalsust tagavat moodulit, ei hakka süsteem ka automaatselt tööle.

Siiski ülejäänud eeldused ja vajadused ei ole seotud erinevate moodulitega, mis on võimelised teatavaid tegevusi automatiseeritult tegema. Seadmete paigutamise ning võrgu planeerimise aluseks peab olema vaade sellest, kuidas oleks võimalik isetaastuva võrgu funktsionaalsust tagada, kuid seda esialgu käsitsi juhitavana dispetšerite poolt.

Võrguinfosüsteemi andmekvaliteet

Kui võrgu juhtimisotsustega peab kirjutatud algoritmide alusel hakkama saama FLIR juhtimismoodul, siis kriitiliseks eelduseks muutub võrguinfosüsteemi andmekvaliteet. Kõik sisestatud võrguelemendid ning nende andmed peavad vastama tegelikkusele. Ühtlasi peavad jõudma süsteemi ka kõik vajalikud mõõtmistulemused.

Andmekvaliteedi puudulikkuse korral võib juhtimissüsteem teha küll õigeid otsuseid temale teada olevate andmete põhjal, kuid otsused võivad osutuda reaalses võrgus valeks. Kui süsteemil on kasutada valed parameetrid, siis lühise asukoha määramine muutub ka automaatselt vigaseks, kuna arvutused on tehtud valede andmete alusel.

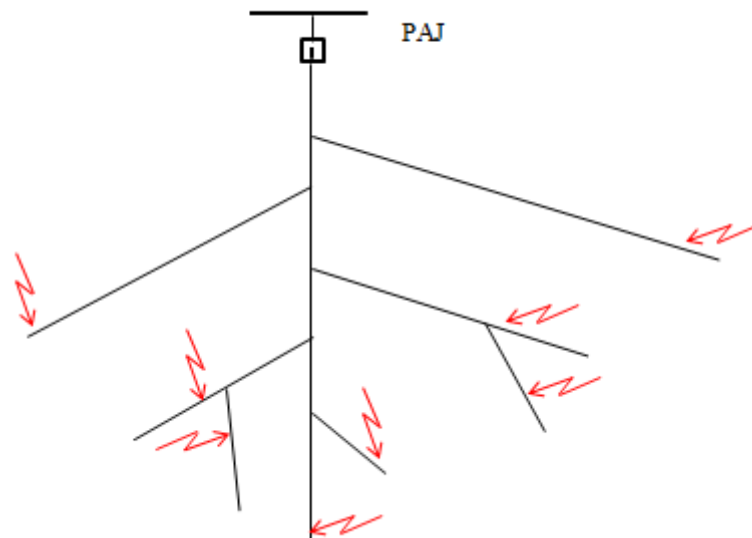
1.4.1 Rikke lokaliseerimine

Teoreetiliselt piisab rikke lokaliseerimiseks rikkeindikaatoritest koos lühisekoha määramise funktsiooniga fiidriterminalidest.

Rikkeindikaatorid jagunevad õhuliini ning kaabelliini rikkeindikaatoriteks. Nad peavad näitama lühist ja maaühendust ning nende signaali peab olema võimalik siduda SCADA-ga. [9]

Renoveeritud piirkonna- ja jaotusalajaamades toimub faasidevahelisel lühisel rikkekoha kauguse määramine fiidriterminalis. Renoveerimata piirkonna- ja jaotusalajaamades, kus puudub kaasaegne releekaitse, paigaldatakse sellised terminalid trafo- või sisendfiidritesse. Fiidriterminalid võimaldavad väljalülitunud fiidril rikkekoha määramist (kaugus kilomeetrites, asukoht lühisvoolu või reaktiivtakistuse kaudu Tekla NIS DMS moodulis). Terminalid edastavad rikkekoha info SCADA süsteemi. [8]

Lühisekoha kauguse määramisest üksi rikkekoha lokaliseerimisel ei piisa, kuna tekivad situatsioonid, nagu kirjeldatud joonisel 1.12, mille korral võib potentsiaalseid rikkekohti olla mitu.



Joonis 1.12. Võimalikud rikke toimumise kohad ainult lühise kauguse andmetel

Joonisel 1.12 edastab fiidriterminal lühisekoha kauguseks 15 km, paraku on fiidril potentsiaalseid rikke asukohti, mis asuvad piirkonnaalajaamast (PAJ) 15 km kaugusel 8. Sellises olukorras ei oma rikkeline haru määramiseks lühisekoha kauguse info olulist kasu. Antud juhul on eeldatud, et harude ees ei ole kaitsetega võimsuslüliteid või mastivõimsuslüliteid, mis haru rikke korral automaatselt eraldaks. Selleks, et nii dispetšer kui potentsiaalselt ka automaatne isetaastuva võrgu rakendus (FLIR) suudaks kiiresti rikkekoha tuvastada, on vaja lisaks lühisekoha kaugusele selekteerida välja ka rikkeline liini osa. Seda ülesannet on võimalik täita rikkeindikaatorite abil.

Rikkeindikaatorite paigaldamiskohad tuleb erinevate juhtumite korral otsustada vastavalt konkreetsele vajadusele.

Üldiselt on rikkeindikaatorite asukohtade valik esitatud järgmiselt:

- Alajaamadesse
- Lahutuspunktidest
- Tüviliinile
- Haruliinide ette
- Metsas kulgevate liinilõikude ette

[8]

Kõige levinumad indikaatorid õhuliinidele on elektromagnetvälja muutustele reageerivad rikkeindikaatorid. Seda tüüpi rikkeindikaatorid töötavad akude/patareide toitel ning võimalusena omavad sidevõimekust rikkeinfo edastamiseks. Kallimad, kuid ka täpsemad lahendused nõuavad omatarvet ning sobivad õhuliinide korral eelkõige kaugjuhitavatesse jaotuspunktidest ja komplektalajaamadesse. Võimalik on neid ka mujale paigutada, kuid siis peab neile olema tagatud omatarve, mis teeb indikaatori hinna kalliks, eriti kui variandina on üleval nende massiline paigaldamine rikkekoha täpselt lokaliseerimiseks.

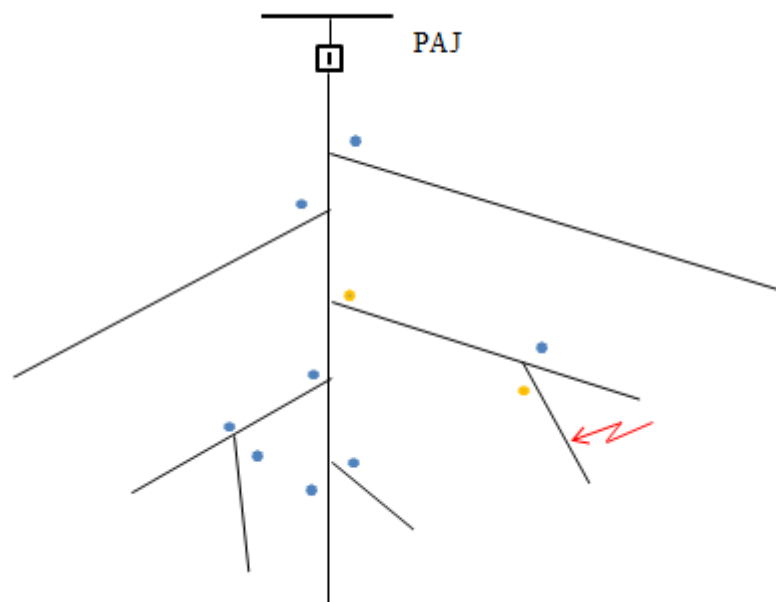
Odavamate elektromagnetvälja muutustele reageerivate õhuliiniindikaatorite suureks puuduseks on nende tundlikkus elektrivõrgus toimuvatele häiretele ning seetõttu ka suur valerakendumiste hulk. Tundlikkust on enamikel juhtudel võimalik maha keerata, kuid siis tekib omakorda probleem indikaatorite mitterakendumisega. Kompenseeritud võrgus, kus mahtuvuslikud maaühendusvoolud kompenseeritakse on maaühenduse tuvastamist lisaks rikkeindikaatoritele ka vanematel releekaitse seadmetel keeruline rakendada. Kaasaegsed digitaalsed fiidriterminalid, kus kasutatakse maaühenduse tuvastamiseks palju erinevaid algoritme, annavad võimaluse oluliselt paremini tuvastada maaühendust kompenseeritud võrgus.

Elektrilevi OÜ paigaldas aastal 2011 õhuliinidele 100 elektromagnetvälja muutustele reageerivat indikaatorit Nortroll Linetroll 3100. Töötamise statistika põhjal sai järeldada, et suurusjärgus 40% kordadest kui indikaator rakendus oli võrgus ka tegelikult rike. Nii madala usaldusväärsusega ei ole paraku rikke lokaliseerimisel sellist indikaatorit võimalik kasutada.

Eeskujuks siinkohal on Läti võrguettevõtja Tikls AS, kes on analoogseid DMSiga ühendatud indikaatoreid paigaldanud võrku 2013nda aasta lõpu seisuga 2371 [5]. Lätlaste eeskujul põhineb

lahendus antud probleemile ka Elektrilevi OÜ jaoks müra filtreerimisel ning valeinfo edastamata jätmisel. Filtreerimine antud kontekstis tähendab indikaatori rikkeinfo võrdlemist releekaitse infoga piirkonnaalajaamas. See eeldab SCADA külge kontrollmehhanismi disainimist, mis automaatselt kirjeldatud rikkeinfo võrdlemist teostab, nimetame antud kontrollmehhanismi rikkeindikaatorite kesksüsteemiks. Juhul kui rikkeindikaator rakendus, kuid piirkonnaalajaamast infot rikke kohta ei ole, siis kesksüsteemi poolt infot rikkeindikaatori rakendumise kohta dispetšerini edasi ei anta. Nii rikkeindikaatori kui ka piirkonnaalajaamast pärineva info kattumisel rikke toimumise osas edastatakse info rakendunud indikaatorite kohta. Kui rikkeindikaatori rakendumise tingimused on täidetud ning piirkonnaalajaama fiidriterminalidest pärit info põhjal lühisekoha kaugus välja arvutatud, siis on DMS võimeline rikkekohta näitama, mis suure tõenäosusega vastab ka tegelikkusele.

Varem kirjeldatud joonise 1.12 edasiarendusena tekib nüüd joonisel 1.13 kujutatud olukord. Joonisel 1.13 on paigutatud indikaatorid kirjeldatud väikese ringina. Rakendunud indikaator on kollane ning mitterakendunud indikaator sinine. Antud juhul on rikke täpsemaks lokaliseerimiseks indikaator paigaldatud iga hargnemise ette. Suurt efekti annab juba ka rikkeline haru määramine indikaatoriga, mille korral saab koostöös lühisekoha kauguse infoga rikkekohta piisavalt täpselt ning väiksemate hargnemiste vahel on rikkekohta otsimine sihipärasem ja kiirem.



Joonis 1.13. Tõenäosuslik rikke toimumise koht rikkeindikaatori ja lühisekoha kauguse andmetest lähtudes

Rikkekohta süsteemne ja automaatne lokaliseerimine annab suurt efekti kliendikatkestusajale. Kiireneb nii rikkeline haru tuvastamine, võimalusel selle eraldamine ning ka kohapeale manuaalne otsimine.

Rikkeindikaatorite koht automatiseeritud süsteemi

Rikkekohtalokaliseerimine on kriitiline osa isetaastuva võrgu funktsionaalsuse rakendamisel. Kuhu sobituvad indikaatorid süsteemi kirjeldatud tüviliinide sektioneerimisel ning kuidas avaldub nende kasu?

Rikkeindikaatorite eesmärgiks jääb ka peale põhjalikku automatiseerimist rikkekoha või rikkeline sektiooni indikeerimine. Kui MVL on rikkele reageerinud ning terve sektioon on tooteta, siis on vajalik edasiste liigutuste kiirendamiseks samuti teada rikke asukohta. Juhul kui asukoht on teada, siis on võimalik ka analüüsida rikkekoha konkreetset eraldamise ning ümbertoitmise võimalusi. Tüviliinide sektioneerimisel jääb ühte sektiooni palju harusid, millel rike olla võis. Juhul kui haru ees on kaitsega lüliti, siis on rikkeline haru teada ning indikaatori eesmärk saaks olla vastavalt paigalduskohale veelgi täpsem lokaliseerimine. Eeldusel, et haruliinide ette on paigaldatud kaugjuhitavad LL'id, siis on oluline, et rikkeline haru oleks teada ning seeläbi oleks automaatselt võimalik vajalik lüliti avada ning rikkeline haru eraldada.

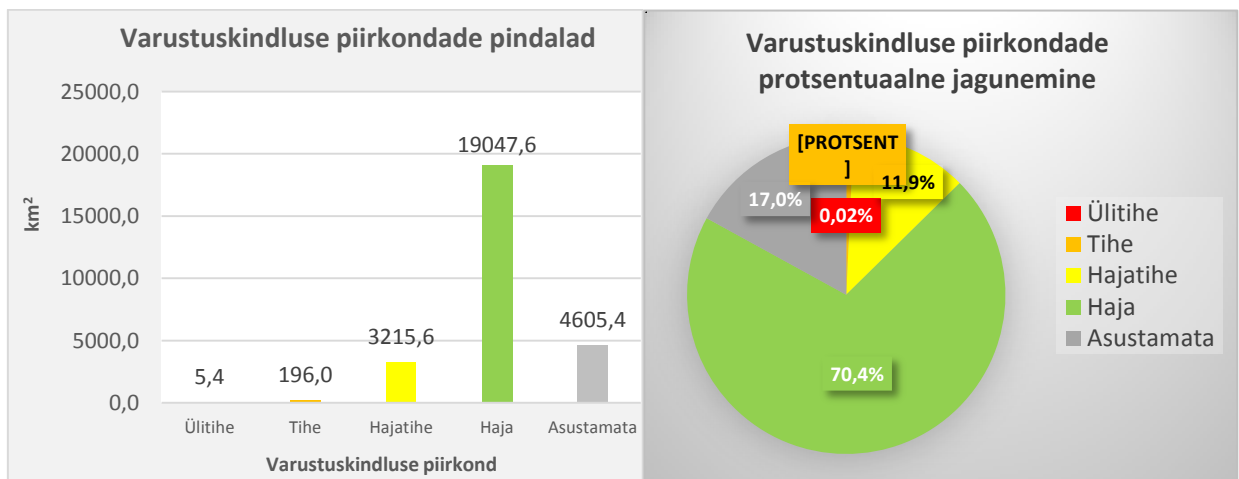
Kui terve süsteem on üles ehitatud MVL'ide ja VL'ide baasil, siis on indikaatoritest vähem kasu kaugelt tehtavate lülitamiste osas, samas kui süsteemis mängivad olulist rolli ka kaugelt- ja manuaalselt juhitavad lahkülitid, siis on indikaatorite laialdase paigalduse vajadus suurem. Rikkeindikaatorite abil kiireneb sellises süsteemis rikke otsimine ning rikkebrigaadide juhtimine oluliselt, kuid selleks on vajalik, et indikaatoreid oleks süsteemi paigaldatud suures mahus.

1.4.2 Varustuskindluse piirkondade määramine

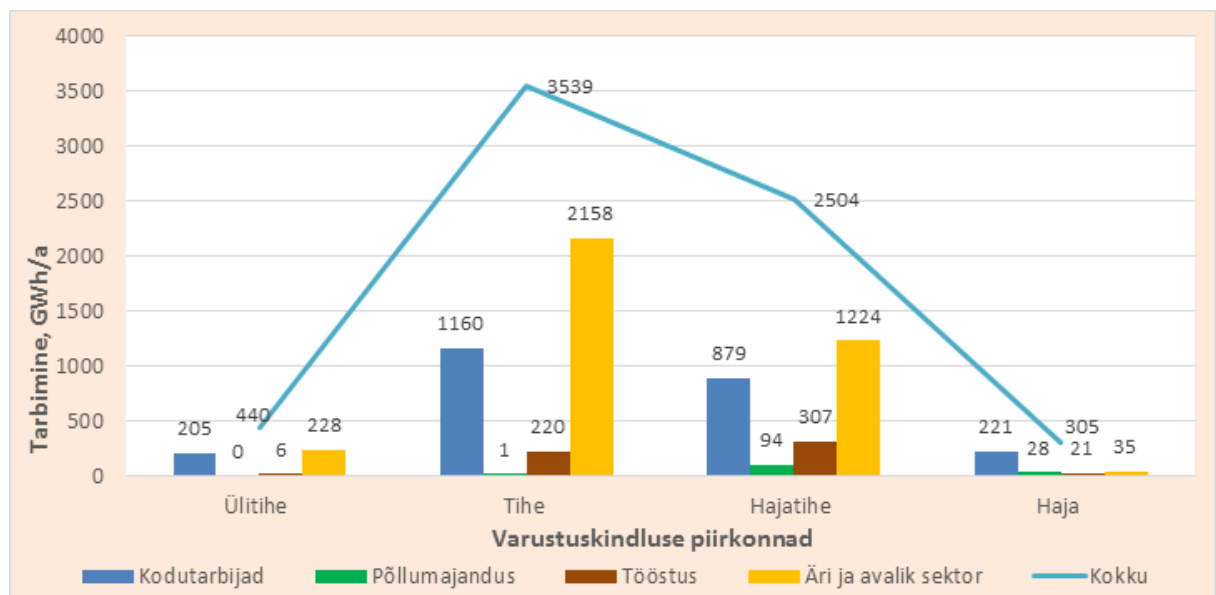
Investeeringute otsuste tegemine peab lähtuma sellest, kui palju ning millist tüüpi on tarbijaid mingis võrgupiirkonnas. Mida suurem hulk tarbijaid või mida suuremat energiakogust tarbitakse, seda suuremad on ka nõudmised elektrivarustuskindlusele. Ei ole otstarbekas teha väga suuri investeeringuid piirkondades, kus efekt investeeringutest on väike. Selleks, et oleks võimalik muuta investeeringute strateegiaid klientide arvust ning tarbimisest sõltuvaks, on vajalik piirkondade defineerimine varustuskindluse piirkondadeks ning seejärel on nendele piirkondadele võimalik määrata tüüpeid põhimõtteid ja lahendusi.

Varustuskindluse piirkonnad on Eestis mõttekas jaotada neljaks: ülitihed, tihed, hajatihed ja hajakas piirkond. Uurimistöös [13] jagati piirkonnad vastavalt klienditihedusele (kl/km^2),

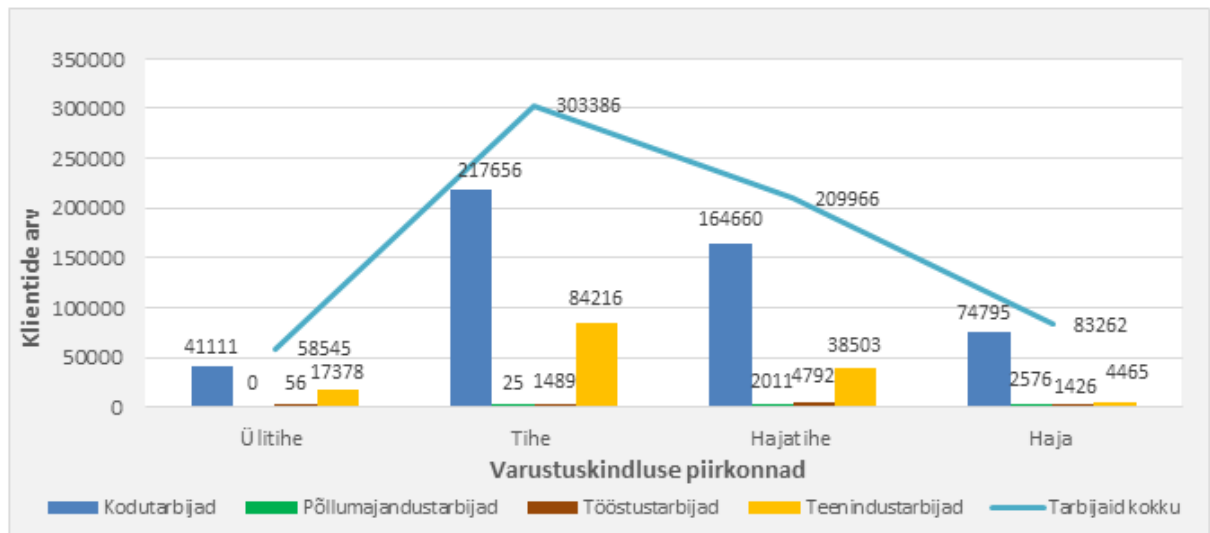
tarbimistihedusele (GWh/km^2) ja liinide tihedusele (km/km^2) ning tulemused klientide paiknemise osas on kujutatud joonistel 1.14-1.17. Joonised näitavad varustuskindluse piirkondade pindalade, klientide arvu ja tarbimise jagunemist. Elektrilevi võrgu territooriumist kuulub 70% hajapiirkonda, kuid selles piirkonnas paikneb kõigest 13% klientidest ja 5% tarbimisest (joonis 1.14). Suurim klientide arv paikneb tihepiirkonnas ning ühtlasi on selles piirkonnas ka suurim tarbimine – vastavalt 46% ja 52% (joonised 1.14 – 1.17). Ülitihed piirkond moodustab 0,02% Elektrilevi võrgu territooriumist, samas on sinna koondunud 9% klientidest ja 6% tarbimisest. [13]



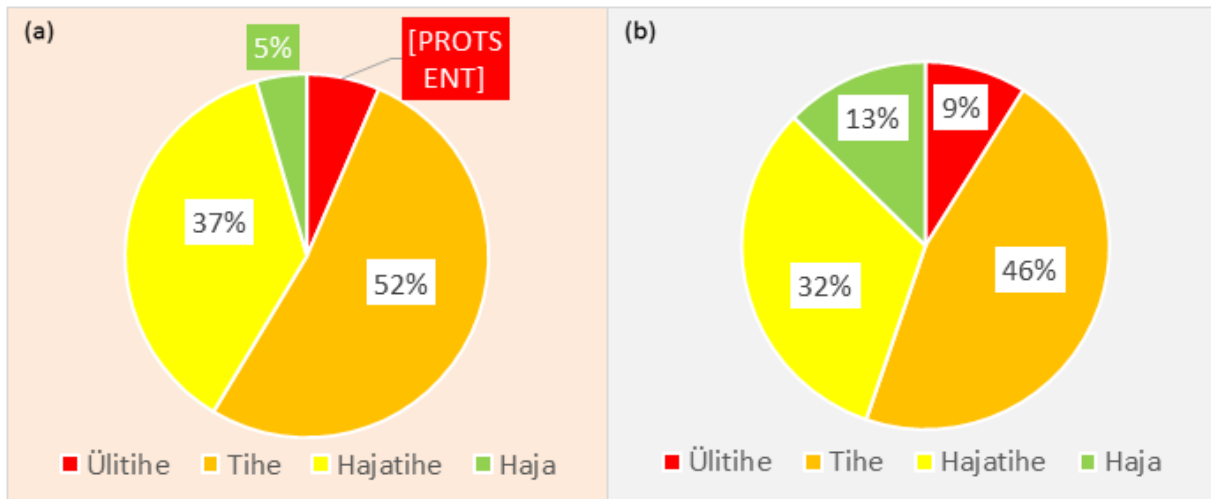
Joonis 1.14. Varustuskindluse piirkondade pindalad ja nende protsentuaalne jagunemine
[13]



Joonis 1.15. Tarbimine varustuskindluse piirkondade lõikes [13]



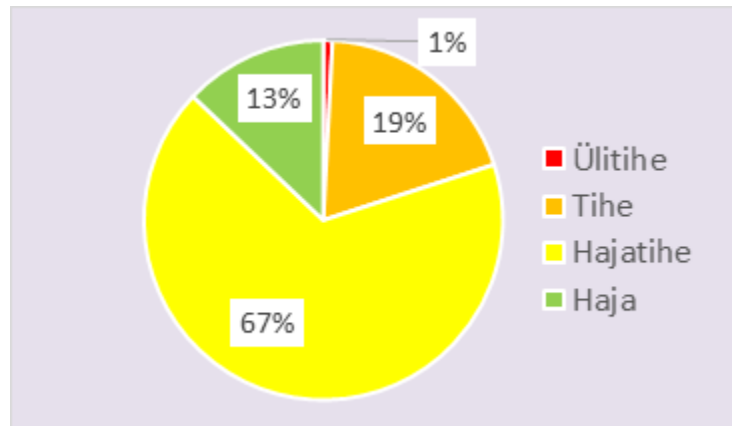
Joonis 1.16. Klientide jagunemine varustuskindluse piirkondade vahel [13]



Joonis 1.17. Tarbimise (a) ja klientide (b) suhteline jagunemine varustuskindluse piirkondade vahel [13]

Kui eelnevatelt joonistelt oli võimalik välja lugeda tarbimise ja klientide jagunemist piirkondade vahel, siis samaväärselt oluline on katkestuskulude jagunemine varustuskindluse piirkondade lõikes.

Katkestuskulude protsentuaalne jagunemine varustuspiirkondade lõikes on toodud joonisel 1.18.



Joonis 1.18. Katkestuskulude protsentuaalne jagunemine varustuspiirkondade lõikes [13]

Jooniselt 1.18. on näha, et 2012 aasta andmete järgi olid suurimad katkestuskulud hajatihedas piirkonnas – 67%. Seega suurim võit katkestuskulude vähendamisel saab tulla selle piirkonna elektrivarustuskindluse parandamisest.

Igale varustuskindluse piirkonnale on mõistlik rakendada erinevad eesmärgid, kuna investeeringute mõju SAIDI-le on erinev.

Haja varustuskindluse piirkonnas on investeeritud eurol vähem mõju SAIDI-le kui hajatihedas varustuskindluse piirkonnas. SAIDI eesmärkide saavutamiseks on mõistlikum suunata rohkem investeeringuid hajatihedasse piirkonda.

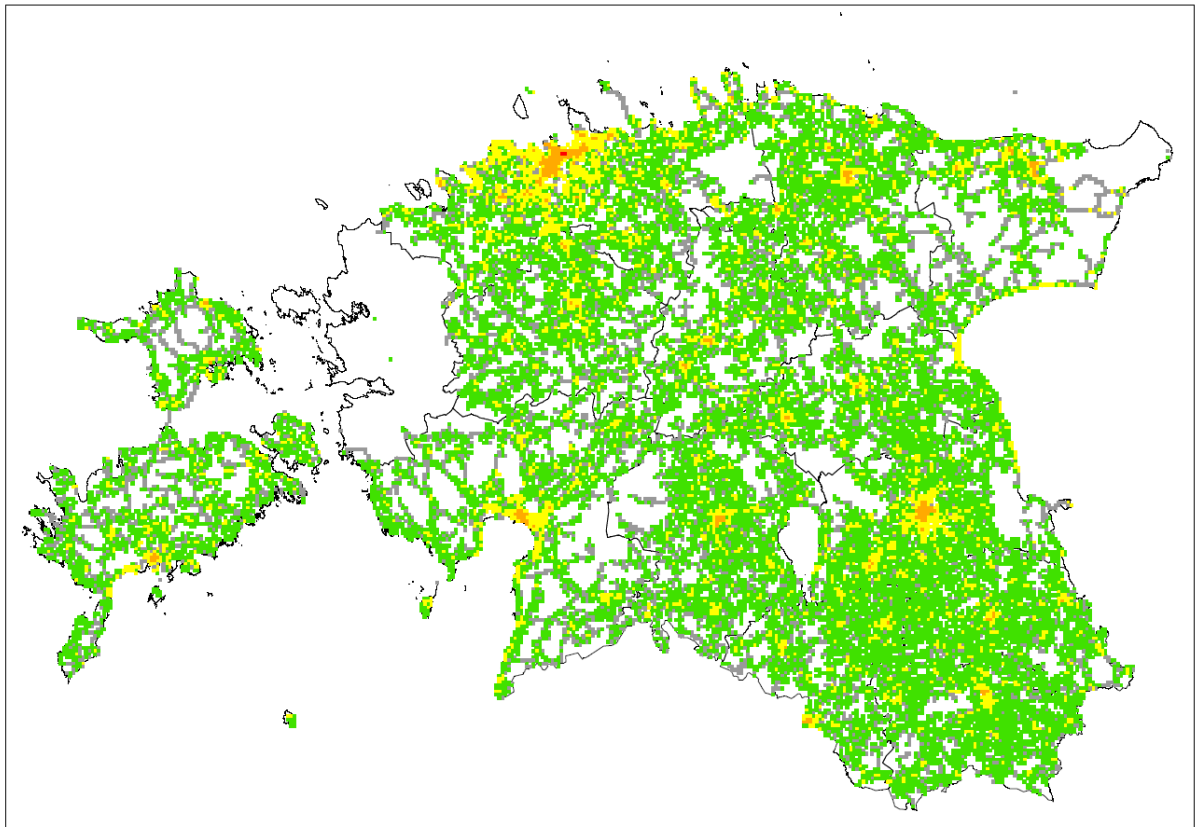
Tabelis 1.1 on esitatud varustuskindluse piirkondade liigitamise piirmäärad. Tekla NIS'is on väljavõtete jaoks kasutatud ruudustike mõõte: 200 mx200 m ruutkaart Tallinna, Tartu ja Pärnu kohta, 500 mx500 m ruutkaart linnade Kuressaare, Jõhvi, Paide, Rakvere, Viljandi ja nende tagamaade kohta ning 1 km x1 km ruutkaart ülejäänud Elektrilevi OÜ käidulade kohta. [13]

Tabel 1.1. Keskpinge võrgu liigitamine varustuskindluse piirkondadeks erineva suurusega ruutude alusel [13]

Piirkond	GWh·kl km ⁴	Ülitihedus	Tihedus	Hajatihedus	Hajatus	Asustamatus	Kokku
Piirid		≥ 400000	2000 ...400000	1 ... 2000	< 1		
Pindala	km ²	5,4	196,0	3215,6	19047,6	4605,4	27070,0
Kodutarbijad	tk	41111	217656	164660	74795	0	498222
Põllumajandustarbijad	tk	0	25	2011	2576	0	4612
Tööstustarbijad	tk	56	1489	4792	1426	0	7763
Teenindustarbijad	tk	17378	84216	38503	4465	0	144562
Tarbijaid kokku	tk	58545	303386	209966	83262	0	655159
Klienditihedus	kl/ki	10842	1548	65	4	0	24
Kodutarbijad	GWh	205	1160	879	221	0	2466
Põllumajandus	GWh	0	1	94	28	0	124
Tööstus	GWh	6	220	307	21	0	553
Äri ja avalik sektor	GWh	228	2158	1224	35	0	3645
Kokku	GWh	440	3539	2504	305	0	6788
Tarbijatihedus	GWh/km ²	81,4	18,1	0,78	0,02	0,00	0,25
Liitumispunktide võimsus	MW	580	4398	3993	1254	0	10225
Liitumispunkti keskmine võimsus	kW/LP	9,9	14,5	19,0	15,1	0	15,6
Kliendikatkestuste arv	tk	20780	256238	629810	471537	0	1378365
Kliendikatkestuste kogukestus (2012)	min	1158302	14883700	56429976	58672054	0	131144032
SAIFI	katkestust	0,35	0,84	3,00	5,66	0	2,10
SAIDI	min	20	49	269	705	0	200
KP õhuliin	km	0,0	49,3	3872,6	10418,6	1887,3	16227,7
KP isoleerjutmega õhuliin	km	0,0	16,2	365,9	844,0	131,0	1357,0
KP maakaabel	km	177,6	2023,7	2368,4	2002,5	540,5	7112,8
KP kokku	km	177,6	2089,2	6606,9	13265,1	2558,7	24697,5
MP õhuliin	km	0,4	121,5	2685,7	9741,7	348,6	12898,0
MP õhukaabel	km	2,9	1252,1	4275,2	6455,2	135,2	12120,6
MP maakaabel	km	257,9	2647,7	3370,2	2328,2	71,6	8675,7
MP kokku	km	261,3	4021,3	10331,2	18525,1	555,5	33694,2
Komplekt AJ	tk	49	1293	4251	5197	181	10971
Mast AJ	tk	0	37	2134	5856	150	8177
Kiosk AJ	tk	131	1232	1517	322	18	3220
AJ hoones	tk	47	327	219	26	2	621
AJ kokku	tk	227	2889	8121	11401	351	22989
Keskpinge liinide tihedus	km/km ²	32,9	10,7	2,1	0,7	0,6	0,9
Madalpinge liinide tihedus	km/km ²	48,4	20,5	3,2	1,0	0,1	1,2
Kokku liinide tihedus	km/km ²	81,3	31,2	5,3	1,7	0,7	2,2

Joonisel 1.19 on väljavõtte Elektrilevi võrgu territooriumi varustuskindluse piirkondadest.

Väljavõtte on tehtud Tekla NISist ruudu küljepikkusega 1 km.



Joonis 1.19. Varustuskindluse piirkonnad Eesti kaardil, ruudu küljepikkus 1000 m [13]

Värvid piirkondade tähistamiseks joonisel 1.19:

- punane – ülitihedapiirkond;
- oranž – tihedapiirkond;
- kollane – hajatihedapiirkond;
- roheline – hajapiirkond;
- hall - ruudud, kus paikneb ainult võrk;
- valge või must - ülejäänud alad.

[13]

1.4.3 Tüviliinide, haruliinide ja taandliinide määramine

„Sektioneerivate lülite paigaldamine vähendab lülitist toite poole jäävate klientide katkestusaega, kuna toite saab osaliselt taastada enne katkestuse põhjustanud rikke ja selle tagajärgede kõrvaldamist. Sektioneerivad lülitid paigaldatakse eelkõige piki tüviliini. Võib paigaldada ka haruliinidele (eelkõige pikemate ja/või rikkelisemate lõikude ette).“ [13]

Viidatud lõigus on kirjeldatud vajadust paigaldada sektsioneerivad lülitid piki tüviliini. Tüviliin on defineeritud kui elektriliin, millelt hargnevad haruliinid. Tüviliin ulatub lahutuspunktini või radiaalliini puhul kaugeima hargnemiseni. [13]

Haruliini definitsiooniks on elektriliin, mis hargneb tüviliinilt. Samuti on planeerimisel oluline eristada ka taandliine, mis on defineeritud kui elektriliin, mis võrgu arendamise käigus kavatsetakse likvideerida. [13]

Seega üks automatiseerimise lahenduste planeerimise kriitilisemaid aluseid on tüviliini, haruliini ning taandliini määramine. Praktilise kasutamise jaoks on antud mõistete definitsioone vaja täiendada.

Täpsustatud definitsioonideks praktilise planeerimise jaoks on Elektrilevi OÜ-s kokkulepitud järgnev:

Tüviliin – reeglina kahepoolsest vajalikku koormatavust tagava toitevõimalusega keskpinge liin, mis kindlustab tema toitel olevate alajaamade klientidele tihe varustuskindluse piirkonnale nõutava varustus- ja rikkekindluse, taastamis- ja energia edastusvõimekuse.

Tüviliinid moodustavad tihe varustuskindluse piirkonnas kõrgstruktuuriga võrgu. Tüviliin ulatub piirkonna- või jaotusalajaamast lahutuspunktini teise tüviliiniga. Radiaalliini puhul kasutatakse tüviliini mõistet piirkonna- või jaotusalajaamast väljuvale liinile kuni kaugeima hargnemiseni. [12]

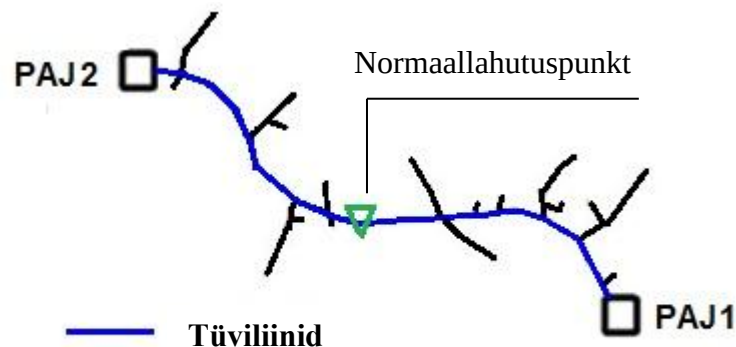
Haruliin - reeglina ühepoolsest vajalikku koormatavust tagava toitevõimalusega keskpinge liin. Haruliini varustuskindluse näitajad on oluliselt kehvemad tüviliini näitajatest, sest tüviliini varustuskindluse kahjustamisel haruliin reeglina eraldatakse tüviliini toitelt. Haruliinideks loetakse ka tüviliine täiendavalt ühendavaid ja lahutuspunkti omavaid silmusliine hajatihe- ja haja varustuskindluse piirkondades. [12]

Taandliin – tulevikuvaateta KP liin, mis edaspidi likvideeritakse. Reeglina likvideeritakse taandliin, kui antud võrgu piirkonnas ehitatakse välja suurema (või piirkonnale vastuvõetava) töökindlusega liin või kui antud piirkonna varustuskindluse nõuetest lähtuvalt puudub tehnilis-majanduslik otstarve liini säilitada, uuendada ja remontida. [12]

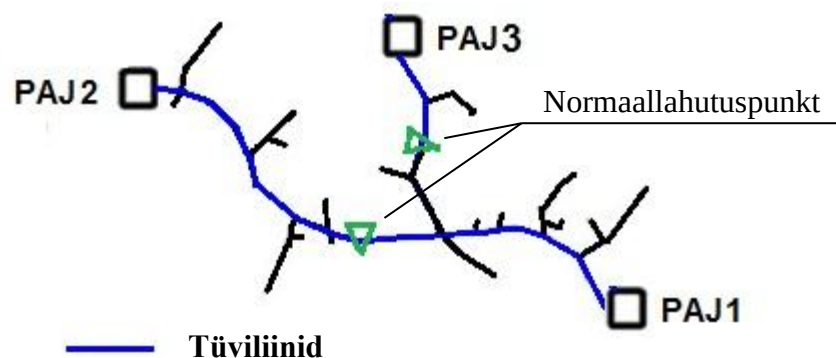
Tüviliinide, haruliinide ja taandliinide määramine on vajalik selleks, et kujundada piirkondade varustuskindluse taseme nõuetele vastav võrgu konfiguratsioon ja teostus, tõsta keskpinge võrgu automatiseerimise ja väljaehitamise investeringute sihipärasust ja efektiivsust. [12]

Kuna võrgu planeerimise etapis on oluline, et pakutud lahendused vastaksid liini perspektiivsusele, siis peavad võrgu planeerijatele olema ka perspektiivsed liinitüübid üheselt mõistetavad. Sisuliselt on vajadus Tekla NISi Xpoweri moodulis selge visualiseeringu olemasolu tüviliinide kohta. Ilma konkreetse määratluseta on oht, et esikohale kerkib planeerimisel subjektiivne arvamus liinide perspektiivi osas ning lahenduste kvaliteet võib kannatada.

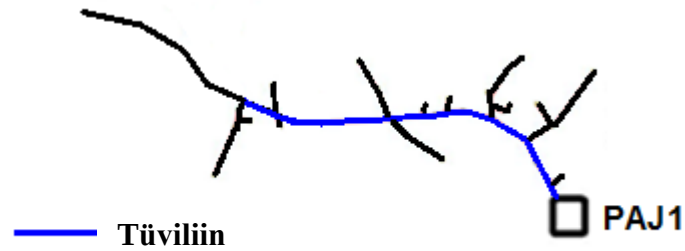
Järgnevalt on kujutatud täpsustavad näited tüviliinide määramiseks vastavalt kirjeldatud definitsioonidele (joonised 1.20 – 1.23):



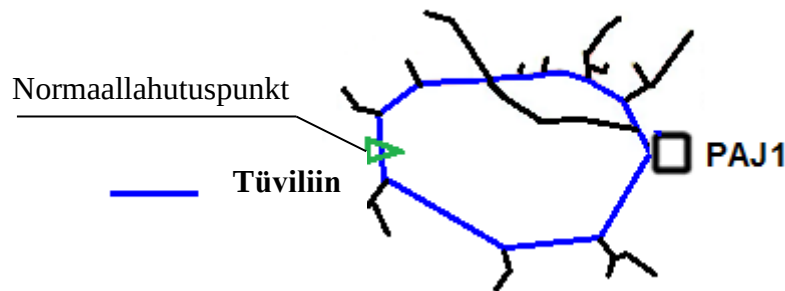
Joonis 1.20. Piirkonnaalajaamade vaheline kuni normaallahutuspunktini täistoitevõimsusel reserveeritav keskpingeliin [12]



Joonis 1.21. Piirkonnaalajaamade vaheline kuni normaallahutuspunktini täistoitevõimsusel reserveeritav keskpingeliin [12]



Joonis 1.22. Radiaalliini korral ühepoolse täistoitega KP liin kaugema hargnemiseni [12]



Joonis 1.23. Silmusvõrk [12]

Silmusvõrgu korral, kus võrgus on mitu silmust, lähtutakse tüviliini valikul keskpinge võrgu tulevikuvaatest ja suurema energiavooga liiniosast [12]

Tüviliinide määramiseks on võimalik kasutada matemaatilist mudelit, milles tüviliiniks määramine on seotud klientide arvu ning liini läbiva energiavooga. Lahendamist vajab küsimus muutujate ja konstantide osakaalude määramise osas.

Kuna varustuskindluse piirkonnad erinevad üksteisest oluliselt, siis on raske määrata valemile üldiseid, igas piirkonnas kasutatavaid parameetreid. Võimalik on fiidripõhine lähenemine, kus on mitmeid ühendusi kõrvalfiidritega. See tähendab, et ühel liinil on üks või kaks tüviliini vastavalt sellele, kui palju kliente on nendel liinidel ning kui suur on energiavoog. [12]

Tüviliini matemaatiline mudel on käsitletav valemiga:

$$T = k_1 \cdot K_L + k_2 \cdot E \quad (1.4)$$

kus T - tüviliin

$K_{1,2}$ - konstandid

K_L - klientide arv

E - liini läbiv energiavoog

[12]

1.4.4 Tüviliinide seksioneerimine

Lähtekohaks lülitusseadmete valikul ja paigutamisel peab võtma isetaastuva võrgu funktsionaalsuse rakendamise võimaluse, millega kaasneb ka SAIDI paranemine. Nagu varem mainitud, siis oluline on tüviliinide seksioneerimine kaugjuhitavate lülititega, mis vähendab toite taastamist tervetele liinilõikudele kümnetest minutitest paari minutini. [13]

Üks efektiivsemaid võimalusi SAIDI't kiiresti parandada on rikkeliste harude ette kaitsefunktsiooniga lüliteid pannes. Sellisest põhimõttest on seni ka lähtutud: säästa suuremat klientide hulka rikkeliste harude eraldamisega. Suure rikketõenäosusega harude eraldamine, tänu millele jäävad toiteta ainult kliendid konkreetset harul, vähendab oluliselt kliendikatkestusminuteid. Samas, kui rike on tüviliinil või kaitsmata haruliinil, siis on väga suur osa fiidrist toiteta, sõltuvalt kaitsega lülite olemasolust, kas terve fiider või mingi osa sellest. Paraku haruliinide ette lüliteid paigaldades ei teki automaatset või kaugeltjuhitavat ümbertoitmise võimalust.

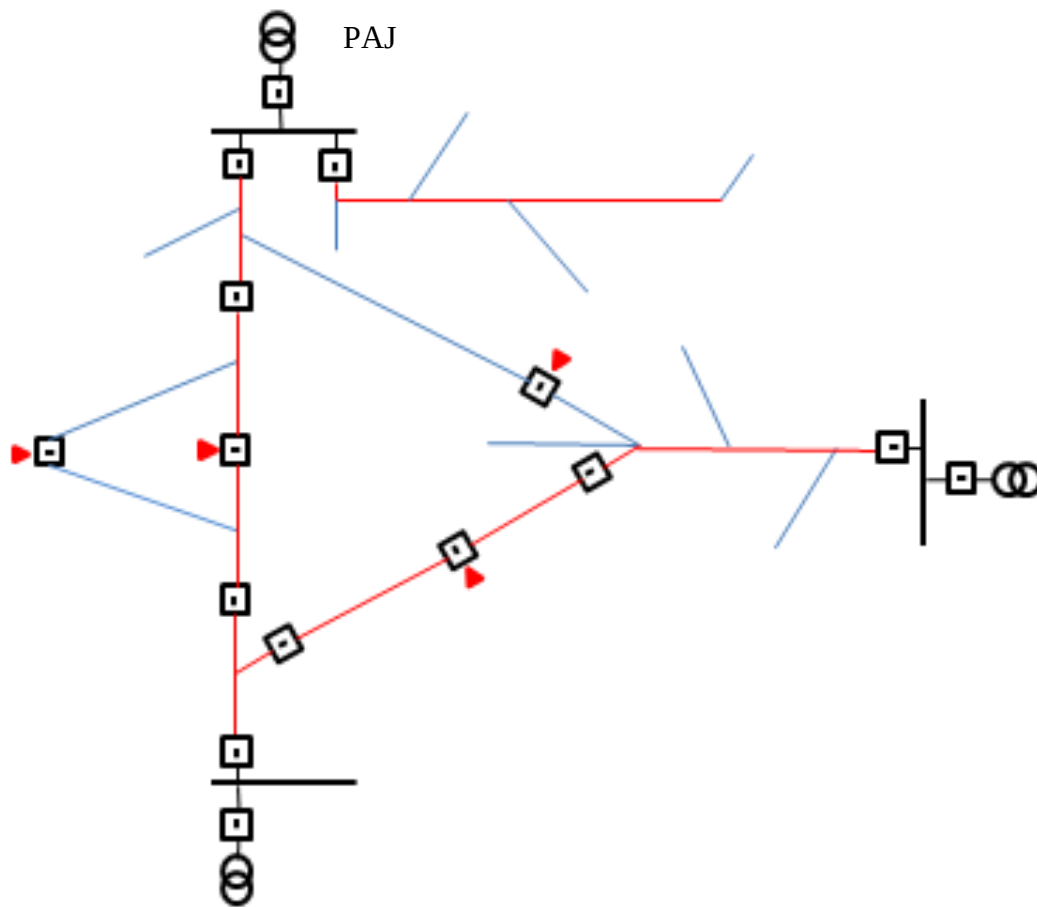
Juhul kui fiidril igasugused kaugeltjuhtimise võimalused puuduvad, siis on fiider toiteta kuni manuaalsete lülitamiste abil rikkelse liinilõigu eraldamiseni. Kaugelt juhitavate lülite olemasolul on võimalik katse-eksitusmeetodil riket eraldada, rikkelokaliseerimise süsteemiga koos on rikke eraldamine kiirem, kuid toob endaga ikkagi kaasa toitekatkestuse. Kaitsefunktsiooniga lülite olemasolul (MVL, VL) jääb toiteta ainult osa liinist, mille peal rike on ning mille suurus sõltub kaitseaparatuuriga lülite hulgast, ülejäänud tarbijaid rike ei mõjuta. Seega tuleb lokaalsel seadmete tasandil rikke eraldamiseks tüviliinidele paigutada kaitsega lülitid, sõltuvalt võimalusest, kas võimsuslülitid alajaama või mastivõimsuslülitid õhuliinidele.

Isetaastuva võrgu kontseptsioon eeldab, et on võimalik kaugelt teostada lülitamisi tervetele liiniosale toite taastamiseks. Selle jaoks on vajalik, et fiidri tüviliin oleks sekstioneeritud. See tähendab, et minimaalselt peab iga fiider olema jagatud kaheks, ehk igale fiidri peab olema paigaldatud vähemalt üks võimsuslüliti. Tüviliini seksioneerimine peab samuti toimuma kliente ja tarbimist arvestades.

Et ümbertoitmisel rikke laienemist vältida ning kaitsefunktsionaalsust säilitada iga seksiooni jaoks, siis on vajalikud kaitsega lülitid ka normaalvahedesse. Kokku tähendab see 1,5 MVLi/VLi fiidri kohta, ehk piirkonnaalajaamast piirkonnaalajaama vähemalt 3 kaitsega lüliti tüviliinil. Joonisel 1.24 on kujundlik näide tekitatavast võrguskeemist ning seksioonide tekkimisest.

Radiaalliinide korral peab tüviliinide seksioneerimine lähtuma nähtavast vajadusest eraldada rikkelist osa fiidri algusest. Selline seksioneerimine on mõttekas juhtudel, kus fiidri alguses on

suur osa tarbijaid, kuid fiidri lõpp on suure rikketõenäosusega, näiteks õhuliin, mille liinitrass kulgeb läbi metsa.



Joonis 1.24. Minimaalne isetaastuva võrgu konfiguratsioon võimsuslülititega

Joonisel 1.24 on kujutatud eespool kirjeldatud olukorda, kus tüviliinil (kujutatud punasega) on fiidri kohta 1,5 MVLi. Kujundlikult on lülitid paigutatud distantsiliselt fiidri keskele, kuid reaalsuses peab asukoha valima ikkagi tarbimise ja klientide järgi ning seksioneerima kliente, mitte liini.

3 lülitit piirkonnaalajaamast piirkonnalajaamani tähendab, et nende vahele jääb neli seksiooni. Ükskõik, millisel seksioonil tekib rike, on võimalik teist seksiooni toita. Tänu kaitsega lülitele normaalvahes on viidud minimaalseks ka rikke laienemise oht, näiteks lühisele lülitamise ning kaitseaparatuuri olemasoluta ka kõrvalfiidri väljalülitamine. Antud konfiguratsiooni puhul jääb toiteta ikkagi suur osa tarbijaid, kuid iga täiendava lülitiga loodud seksiooni abil väheneb toiteta jäävate tarbijate hulk.

Esimene oluline eeldus on, et kõik fiidrid oleksid piki tüviliini jaotatud vähemalt kaheks. Normaalkahe vahel olevate kaitseaparatuurita lülititega on võimalik isetaastumise toimimine, kuid sel juhul on võrk haavatav uute rikete poolt, mis tekkida võivad ning mida peavad lahutama juba tootval fiidril olevad kaitsetega lülid.

Haruliinide eraldamine

Juhul kui tüviliinid on sektsioneeritud, siis piisaks haruliini eraldamisel lühisvoolu ära tundvast lihtsast lülitist. Antud lüliti peab tuvastama temast läbi läinud lühisvoolu ning vastavalt seadistusele konkreetse voolupausi ajal ennast välja lülitama. Oluline on, et rikkeline haru kohta jõuaks info ka juhtimiskeskusesse ning seda on võimalik teostada rikkeindikaatorite abil. Analoogsed kirjeldatud seadmetele on sektsionaliseerijad. Kuna antud tüüpi lülid on odavamad KLLidest ja MVLidest, siis oleks võimalik neid paigaldada massiliselt. Kirjeldatud lülitite puhul on tegu eelkõige alternatiiviga täiuslikumate lülitite ees.

Juhul, kus tüviliinid on sektsioneeritud kaitsetega lülititega, on taaslülitamistsüklist häiritud vähem tarbijaid kui ilma sektsioneerimata ning ei ole suurt funktsionaalset võitu ka sellest, et haruliinidel olevaid lüliteid saab kaugelt sisse lülitada. Riket parandav brigaad peab rikkeline haru remontimiseks kohale sõitma. Seega suurt ajalist vahet enam ei teki sellest, et peale rikke kõrvaldamist ka sektsionaliseerija käsitsi sisse peab lülitama.

Teise alternatiivina kasutada haruliinide ees ainult indikaatoreid, mis piisava tüviliinide sektsioneerimise taseme korral suudavad määrata rikkeline haru, mida brigaadid manuaalsete lülitamistega eraldama peavad.

Siiski võimalusel tuleb eelistada tunduvalt töökindlamaid ning suuremate funktsionaalsete omadustega lahtüliteid ning mastivõimsusüliteid.

1.4.5 Väljalülitatava võrguosa suuruse määramine

Tabelis 1.2 on toodud releekaitse ja automaatika alased soovituslikud lahendused varustus-kindluse piirkondadele vastavalt Elektrilevi OÜ varahalduse põhimõtetele. Üheks oluliseks näitajaks on tarbijate võimalikud katkestuskahjud ning sellest lähtuvalt lubatud väljalülitatavate klientide orienteeruvad arvud. Tiheasustuse korral võiks see olla hinnanguliselt 500 ± 100 , hajatiheasustuse korral 300 ± 50 ja hajaasustuses 100 ± 25 . [13]

Tabel 1.2. Releekaitse ja automaatika varustuskindluse piirkondades [17]

	Ülitihe	Tihe	Hajatihe	Haja
Võrgu kaugjuhtimine ja releekaitse ning automaatika (RA)	Kõik alajaamad on kaugjuhitavad ja varustatud automaatikaga. Madalpinge sektsioonide vahel reservilülitus-automaatika.	Alajaamad kaugjuhitavad ja varustatud RA-ga sõltuvalt väljalülitatava ja rikkelse võrguosa suurusest	Jaotusalajaamad tüvi- ja haruliinidel ning pikemate haruliinide ühendused kaugjuhitavad ja varustatud RA-ga sõltuvalt väljalülitatava ja rikkelse võrguosa suurusest.	Jaotusalajaamad tüvi- ja haruliinidel ning pikemate haruliinide ühendused kaugjuhitavad ja varustatud RA-ga sõltuvalt väljalülitatava ja rikkelse võrguosa suurusest
Releekaitsega väljalülitatava võrguosa suurus	Võimalikult väike - sõltub releekaitse ja automaatika võimalustest (selektiivsusest)	Sõltub seatud töökindluse eesmärkidest: klientide arvust ja isoleerimust, tarbimisvõimsusest, võimalikust katkestuskahjust. (kuni 500 madalpinge klienti)	Sõltub seatud töökindluse eesmärkidest: klientide arvust ja isoleerimust, tarbimisvõimsusest, võimalikust katkestuskahjust. (kuni 300 madalpinge klienti)	Sõltub seatud töökindluse eesmärkidest: klientide arvust ja isoleerimust, tarbimisvõimsusest, võimalikust katkestuskahjust. (kuni 100 madalpinge klienti)
Rikke lokaliseerimine	Keskpingel automaatselt kuni 3 minutit. Madalpingel OVB poolt kuni 1 tund.	Keskpingel automaatselt kuni 3 minutit või kaugjuhtimisega kuni 10 min Madalpingel OVB poolt kuni 1 tund.	Keskpingel automaatselt kuni 3 minutit või kaugjuhtimisega kuni 20 min Madalpingel OVB poolt kuni 2 tundi.	Keskpingel automaatselt kuni 3 minutit või kaugjuhtimisega kuni 20 min, OVB poolt kuni 2 tundi Madalpingel OVB poolt kuni 3 tundi.
Plaanilistel töödel väljalülitatava võrguosa suurus	Üks alajaam või alajaama sektsioon (100 madalpinge klienti või üks hoone)	Kuni 100 madalpinge klienti	Kuni 100 madalpinge klienti	Kuni 100 madalpinge klienti

Tiheasustuse korral on olulisemaks määrajaks tarbijate arvu ees tarbimise suurus, kuna tarbijate profiilid erinevad tõenäoliselt hajaasustuse omadest ning ühe keskmise tarbija aastane tarbimine on oluliselt suurem ja seetõttu on ka katkestuskahjud suuremad. Tiheasustuse korral peaks arvestama esitatud 500 kliendi asemel samaväärse hulga klientide keskmist aastast tarbimist kogu võrgus ning automatiseerimisel lähtuma sellise tarbimishulga väljalülitamisest.

2. Hiiumaa isetaastuv võrk

Hiiumaa teoreetilise automatiseerimise lähtekohaks on varasemalt kirjeldatud isetaastuva võrgu kontseptsioon, mis eeldab iga fiidri telejuhitavat ümbertoitmise võimalust ning vähemalt ühte kaitsega lülitit fiidrit sektioneerimas. Normaalvahedesse paigaldada vastavalt võimalusele võimsuslülid või mastivõimsuslülid. Olulisemad lähteandmed on varustuskindluse piirkondade paiknemine Hiiumaal, tüviliinide määramine ning klientide jagunemine nendel fiidritel.

2.1 Tekla NIS

Võrgu analüüsiks kasutan Tekla NISi (*Network Information System*) – (elektri)võrgu infohaldussüsteemi. Süsteemi keskmeks on intelligentne võrgumudel geoinfosüsteemi (GIS) ja võrguvarade dokumenteerimise ning haldamise funktsionaalsusega. [14]

Tekla NIS'i laialt kasutatavamateks mooduliteks Elektrilevi OÜ-s on võrguinfosüsteem, Xpower ja jaotusvõrgu talitluse tugisüsteem DMS.

Võrguinfosüsteem Xpower sisaldab andmeid elektrivõrkude ehituse, remondi ning muude vajalike tehniliste näitajate kohta. Võrguinfosüsteemis säilitatakse kõiki andmeid, mis kuuluvad Elektrilevi OÜ võrguvarade hulka, alates liini andmetest (juhtmete tüübid, mastide andmed jms.) kuni lülitite andmeteni. Samuti hõlmab infot tarbijate kohta (liik, prioriteetsus, aastane tarbimine). [11]

Xpower'i aluseks on geoinfosüsteem, kuid tegemist on laiema tervikuga, mille lisavõimalusteks on

- Elektrivõrgu plaanimise, käidu ja hoolduse tugi
- Võrgu elutsükli jälgimise tugi
- Rakenduste integreerimine
- Võrguvarade
- Liidesed muude vajalike infosüsteemidega [11]

Võrkude planeerimisel ning analüüsimisel on väga tähtis osa võrguinfosüsteemide erinevatel moodulitel. Antud moodul võimaldab teostada erinevaid arvutusi praegustele ning planeeritavatele radiaal- ning ringvõrkudele. Planeerimise käigus on võimalik seega kontrollida võrkude vastavusi jaotusvõrgu tehnilistele nõuetele. [14]

- Kontrollitakse võrguelementide (kaablite, trafode jms.) sobivusi võrkude koormusvoogudele ning vajadusel teha vastavad korrektuurid.
- Lühisvoolude ja maaühendusvoolude arvutamisega on võimalik kontrollida kaitseseadmete sobivusi.
- Töökindlusarvutused (RNA – Reliability Network Analysis) võimaldavad võrrelda kulusid ning erinevate stsenaariumite töökindlusnäitajaid, et leida sobivaim võrgukonfiguratsioon.

Tekla RNA pakub võimekust erinevate stsenaariumite arvutamiseks. Moodul võimaldab võrgu või võrgu elemendi mehaanilise ja elektrilise seisukorra uurimist. Samuti võimaldab uurida ning hinnangut anda võrgu töökindlusele erinevate võrgutrasside kulgemisel looduses – näiteks soise pinnase mõju, liini kulgemine läbi metsatrasside. [14]

Kõikidel elementidel on Xpoweris teatavad parameetrid, mille alusel määratakse igale elemendile tema töökindlus. Selle alla kulub nii rikkelisus, hooldustööde teostamise vajadus ja palju muud, mis osalevad arvutustes ning mille abil on võimalik määrata, kui kaua mingi osa võrgust on aastas näiteks toitekatkestusega ning ühtlasi ka kui palju kliente sellega seotud on.

Tulemusena võimaldab Tekla RNA arvutada nii põhilisi töökindlusindekseid (SAIDI, CAIDI, SAIFI) ning muid huvipakkuvaid näitajaid, nagu klientide arve (tk), rikete arve (tk), fiidrite pikkuseid (m), kliendi püsikatkestuste kestuseid (h/a), pingelohkused ning muid võrgu kohta infot andvaid näitajaid. Samuti on võimalik igat fiidrit võrguosade kaupa eraldi analüüsida ning niimoodi kõige rikkelisemad lõigud eraldi tähelepanu alla võtta. Niimoodi kujuneb arusaam sellest, millises järjekorras on mõistlik tegeleda kaabeldusega, automatiseerimisega ja liiniosade väljavahetamisega.

2.2 Isetaastuva võrgu minimaalse kontseptsiooni mõju Hiiumaal

Joonisel 2.1 on kujutatud Hiiumaa keskpinge võrk, kus fiidrid on eristatud värvidega.



Joonis 2.1. Hiiumaa keskpingevõrk

Hiiumaal on neli 35/10kV piirkonnaalajaama: Kärkla, Emmaste, Lauka ja Käina ning kokku 23 fiidrit. Fiidrite jagunemine vastavalt piirkonnaalajaamadele on esitatud tabelis 2.1. Tarbijaid on Hiiumaal kokku 6838 ning aastane tarbimine 50 139 MWh.

Tabel 2.1. Hiiumaa fiidrid, klientide arvud ning nende aastased tarbimised

PAJ	Fiider	Klientide arv (tk)	Aastane tarbimine (kWh)
Emmaste	Tohvri	201	1196836
Emmaste	Valgu	277	1512504
Emmaste	Õngu	299	2440625
Käina	Heltermaa	583	3160482
Käina	Jausa	149	362545
Käina	Kassari	307	1268398
Käina	Kopli	144	2354924
Käina	Käina	483	6374906
Käina	Männamaa	233	741712
Käina	Nõmme	169	815963
Kärdla	Kaluri	1	1819470
Kärdla	Kogri	136	431556
Kärdla	Lehtma	17	2093116
Kärdla	Linumäe	519	7135065
Kärdla	Metsatööstuse	126	3359774
Kärdla	Saia	672	3797473
Kärdla	Sõpruse	817	4096942
Kärdla	Värsso	522	2424380
Lauka	Isabella	135	673449
Lauka	Kõpu	418	1408078
Lauka	Metsaküla	58	156596
Lauka	Reigi	254	658018
Lauka	Viskoosa	318	1856185
Kokku		6838	50138997

Joonisel 2.2 on väljavõte Hiiumaa varustuskindluse piirkondadest., kusjuures varustuskindluse määramise kriteeriumiks on klientide arvu ja aastase tarbimise korrutis:

$$\frac{Klienti}{km^2} \cdot \frac{GWh}{km^2} = Klienti \cdot \frac{GWh}{km^4} \quad (2.1)$$

Piirid on seatud järgnevalt:

> 400 000 - ülitihed;

< 400 000 - tihe;

< 2 000 - kesktihe;

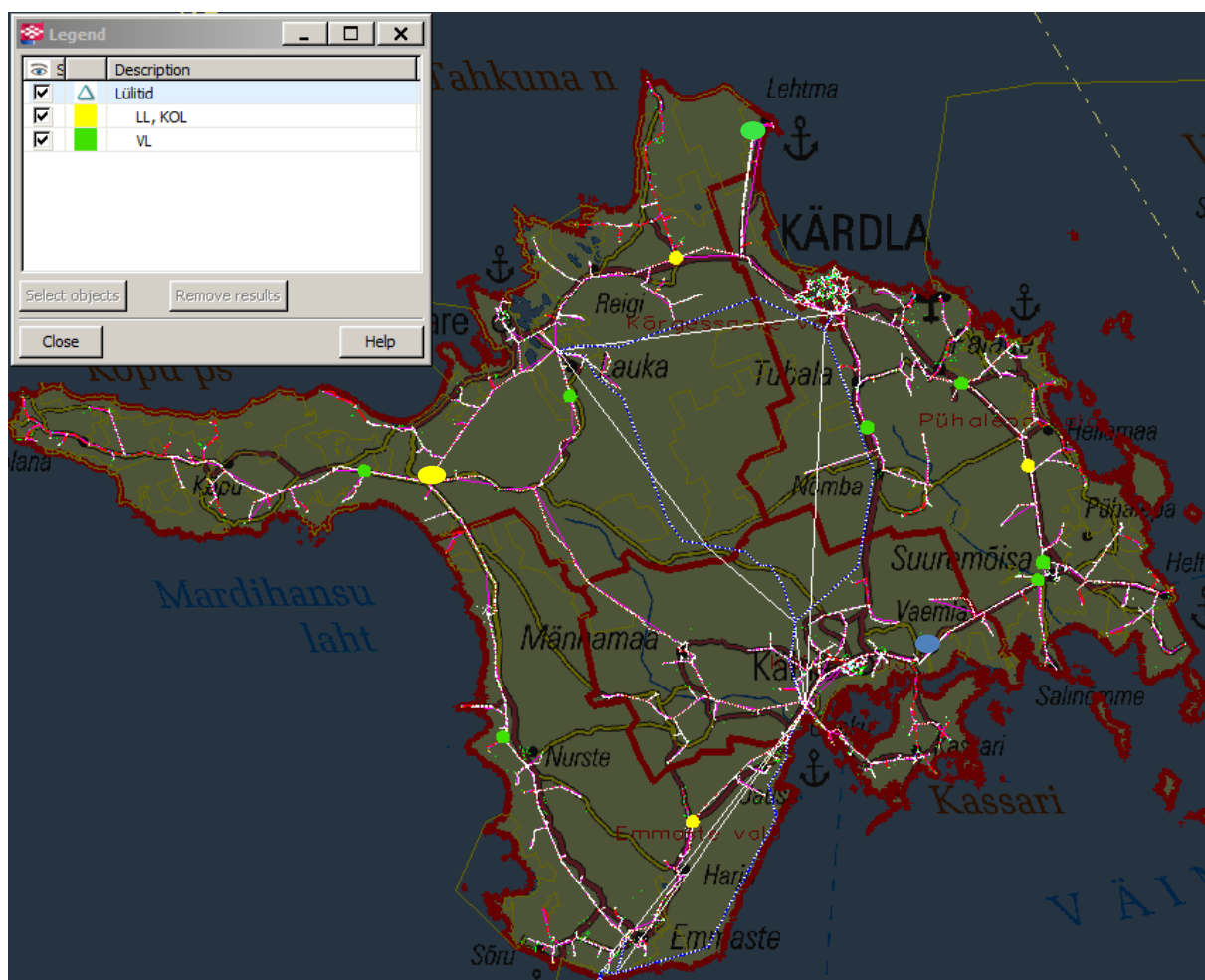
< 1 - haja.

Joonisel 2.2 kujutab roheline värv haja piirkonda, kollane hajatihedat piirkonda ning oranž tihedat piirkonda. Nagu näha, siis Hiiumaa puhul on valdavalt tegu haja piirkonnaga, eranditeks on Kärkla, Käina, Emmaste ning Lauka keskus ja nende ümbrus, kus on kohati nii tihe – kui ka hajatihedaid piirkondi.

Hiiumaal on keskmiselt 5,31 tarbijat ning 63MWh suurune tarbimine ruutkilomeetri kohta. Metsatrasside osakaal kogu võrgust on 40,87% ning kaabelliinide osakaal 26,6%. [13]

2.2.1 Tänane võrgu automatiseerituse tase Hiiumaal

Joonisel 2.3 on kujutatud Hiiumaal olevad telejuhitavad lülitid. Siinkohal ei eristata võimsuslüliteid mastivõimsuslülititest kuna funktsionaalsuse mõttes ei oma see tähtsust. Kokku on Hiiumaal 15 kaugeltjuhitavat võimsuslülitit ning 7 lahklülitit. Joonisel on märgitud suurema kollase ovaaliga Puski LP, kus on nelja liini ristumiskoht ning igale liinile on paigutatud kaugjuhitav lahklüliti. Suurem roheline ovaal tähistab Lehtma 10 kV jaotlat, kus asub 5 kaugeltjuhitavat võimsuslülitit, helesinine ovaal tähistab Vaemla komplektalajaama 3 võimsuslülitiga, ülejäänud kaugeltjuhitavad lahlülitid ning võimsuslülitid asuvad õhuliinidel.



Joonis 2.3. Tänane automatiseerituse tase Hiiumaal

RNA arvutuste tulemused varustuskindluse indeksite määramiseks tänasele Hiiumaa võrgule fiidrite kaupa on esitatud tabelis 2.2.

Tabel 2.2. Varustuskindluse indeksid RNA arvutuste alusel

PAJ	Fiider	Klientide arv	SAIDI	SAIFI	CAIDI
Emmaste	Tohvri	201	8,166	3,357	2,432
Emmaste	Valgu	277	8,031	3,367	2,385
Emmaste	Õngu	299	14,462	5,370	2,693
Käina	Heltermaa	583	18,420	11,530	1,598
Käina	Jausa	149	10,016	3,386	2,958
Käina	Kassari	307	8,081	3,721	2,172
Käina	Kopli	144	7,339	3,075	2,387
Käina	Käina	483	3,645	1,648	2,212
Käina	Männamaa	233	16,106	5,704	2,824
Käina	Nõmme	169	12,140	3,861	3,145
Kärdla	Kaluri	1	1,318	0,415	3,175
Kärdla	Kogri	136	11,082	6,070	1,826
Kärdla	Lehtma	17	10,311	3,471	2,971
Kärdla	Linumäe	519	3,148	1,632	1,928
Kärdla	Metsatööstuse	126	1,500	0,774	1,938
Kärdla	Saia	672	1,455	0,674	2,159
Kärdla	Sõpruse	817	3,416	1,544	2,212
Kärdla	Värsso	522	16,616	7,520	2,209
Lauka	Isabella	135	6,001	5,385	1,114
Lauka	Kõpu	418	35,612	14,120	2,522
Lauka	Metsaküla	58	5,784	1,794	3,224
Lauka	Reigi	254	28,824	10,972	2,627
Lauka	Viskoosa	318	7,099	2,953	2,404
Kokku		6838	238,572	4,5	2,396

Nagu tabelist 2.2 näha, siis SAIDI väärtuseks Hiiumaal kokku on arvutuslikult 238,6 minutit. See hõlmab nii rikkelist kui plaanilist SAIDI't. Arvutuslikud näitajad toetuvad erinevate sündmuste tõenäosuslikule esinemisele ning seetõttu võivad esitatud arvud reaalsest näitajatest

erineda. Uurimistöös [12] on esitatud erinevate käidupiirkondade SAIDI ning SAIFI näitajad, kusjuures Hiiumaa käidupiirkonna SAIDI väärtuseks on 515,6 ning SAIFI väärtuseks 5,07.

Võttes arvesse reaalse SAIDI ning arvutusliku SAIDI erinevust, arvutatakse nendevahelise orienteeruva koefitsiendi, milleks on 2,16. Koefitsienti kasutatakse selleks, et edasistes arvutustes oleks võimalik SAIDI viia reaalsele numbritele ligilähedale ning võrrelda neid teadaolevate SAIDI väärtustega.

Edasistes analüüsides kasutatakse eelkõige põhimõtet, et eesmärgiks on SAIDI vähendamine ning teistele varustuskindluse indeksitele ei keskenduta.

Tabel 2.3. SAIFI ja SAIDI normväärtused varustuskindluse piirkondadele [13]

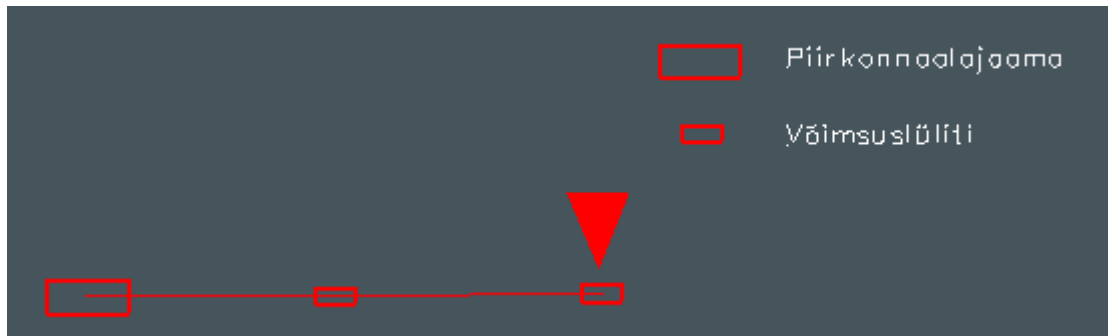
Varustuskindluse piirkond	SAIFI, 1/a		SAIDI, min	
	Sihtväärtus	Miimumnivoo	Sihtväärtus	Miimumnivoo
Ülitihe	0,25	0,8	20	30
Tihe	0,8	1,5	50	70
Hajatihe	1,5	2,5	150	300
Haja	2,5	5,0	300	500
Kogu võrk	1,6	2,0	150	200

Tabelis 2.3 on esitatud SAIFI ja SAIDI normväärtused varustuskindluse piirkondadele. Antud töös on olulisemateks näitajateks haja ning hajatihedale esitatud näitajad, mille miimumnivood on vastavalt 500 minutit ja 300 minutit ning sihtnivood vastavalt 300 minutit ja 150 minutit. Hiiumaal kuuluvad tihedasse piirkonda järgmised fiidrid: Kärkla – Saia fiider, Kärkla – Linnumäe fiider, Kärkla – Sõpruse fiider, Käina – Käina fiider.

2.2.2 Plaanitav automatiseerimine Hiiumaal

Hiiumaa täiendaval automatiseerimisel selleks, et luua isetaastuva võrgu jaoks vajalik konfiguratsioon lähtutakse tänasest seisust, see tähendab, et olemasolevaid kaitsega lüliteid maha ei võeta ning asukohti ei vahetata. Küll aga asendatakse vajadusel lahkülitid, lähtudes põhimõttest, et fiider peab tüviliinil olema sektioneeritud kaitsefuntsionaalsust tagavate võimsuslülititega. Juhul kui telejuhitav lahküliti asub haru ees, siis teda ei asendata.

Lülite paigutamisel arvestatakse klientide arvu, kes jäävad toiteta, varustuskindluse piirkonda, töönaosuslikku rikkelisust ning ümbertoitmiseks vajaliku automatiseerimise taseme loomist. Kõik normaalvahed, mida mööda on võimalik fiidrit toita asendatakse mastivõimsuslülititega või võimsuslülititega. Samuti arvestatakse täiendava sektsioneerimise vajadust erandkorras fiidritel, mis on pikad ja kus on palju kliente.



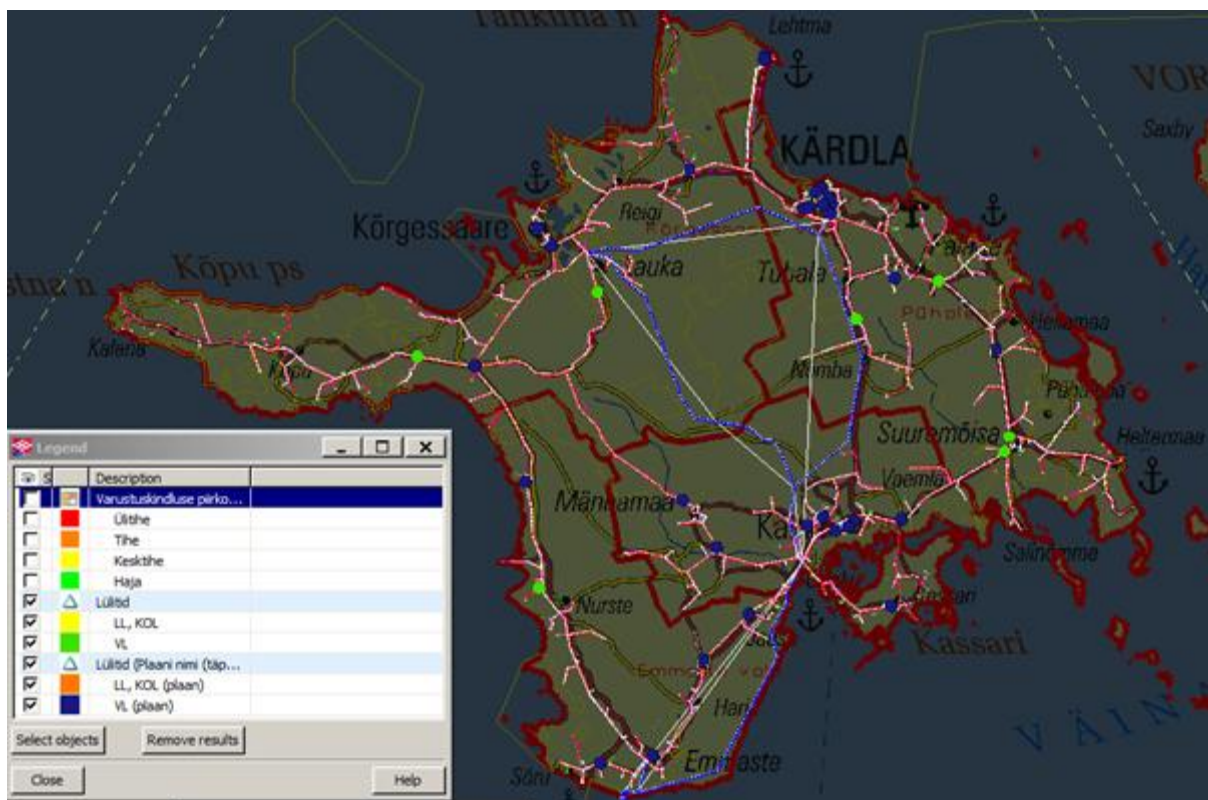
Joonis 2.4. Fiidri minimaalne vajadus

Joonisel 2.4 kujutatud fiidri skeemi korral on võimalik enamiku võrgu isetaastumine lokaalsel tasandil. Sisuliselt tähendab see RLA laialdast kasutamist normaalvahedes olevate lülite abil pingetuse kontrolli abil kummalgi pool lülitit.

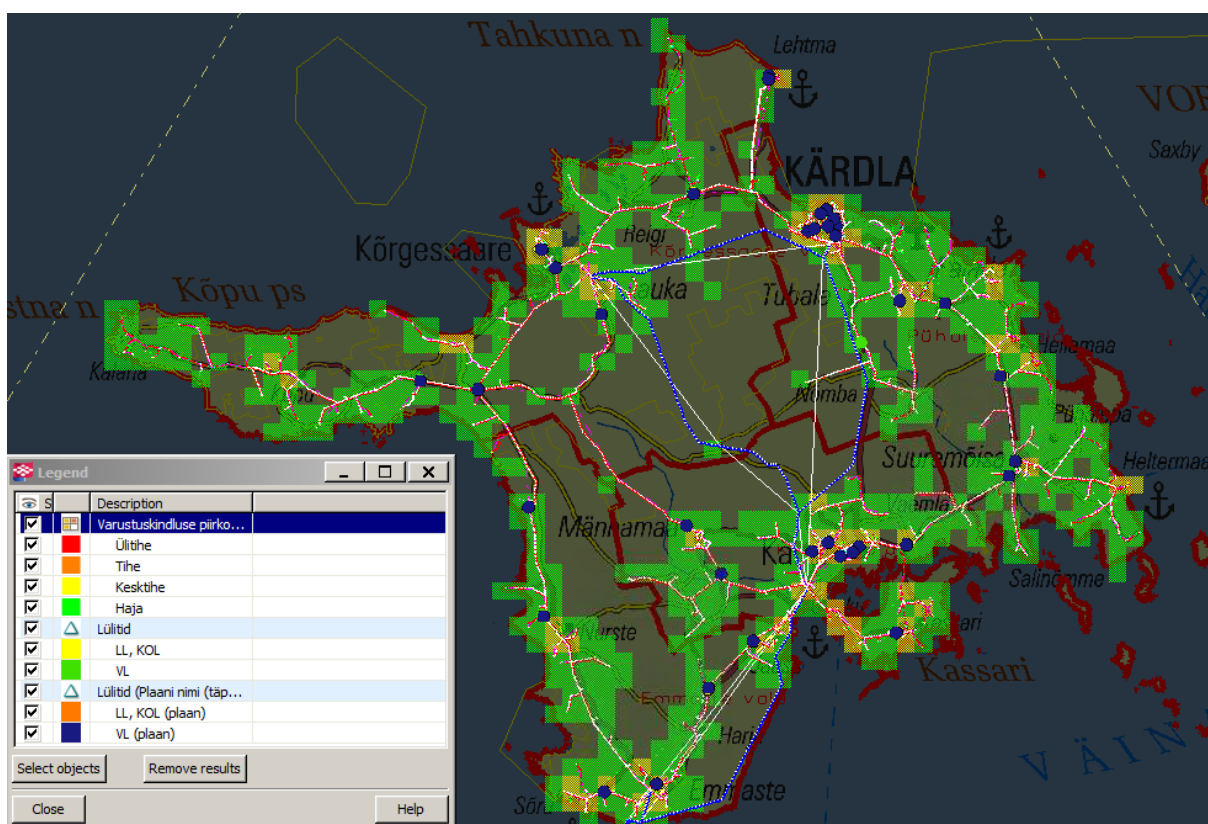
Kui haja ja hajatiheda piirkonna automatiseerimisel lähtutakse eelkõige klientide arvust, siis tihe piirkonnas ei anna klientide arv alati tegelikku ülevaadet kliendi tähtsusest. Loomaks suhet klientide arvu ning tarbimise vahel leitakse Hiiu maal keskmise tarbimise ühe kliendi kohta.

Tabeli 2.4 andmete alusel on kogu klientide arv 6838 ning kogutarbimine 50 139 MWh. Tarbimine kliendi kohta on seega keskmiselt 7,33 MWh. Lubatud toitekatkestus tiheasustatud piirkonnas on määratletud kui 500 ± 100 tarbijat, mis vastaks antud juhul 3665 ± 733 MWh-le.

Viimast lähendust kasutatakse juhul, kui kliente on vähe ning SAIDI'le suurt mõju ei avalda, kuid katkestuskahjud kliendile on suured ning tegelikult oleks mõistlik antud kliente kaitsta.



Joonis 2.5. Kaugeltjuhitavate lülite paiknemine peale täiendusi



Joonis 2.6. Kaugeltjuhitavate lülite paiknemine peale ümbertoitmiseks vajalike muudatuste tegemist koos varustuskindluse piirkondadega

Tabel 2.4. Varustuskindluse indeksid RNA arvutuste alusel

PAJ	Fiider	Klientide arv	SAIDI	SAIFI	CAIDI
Emmaste	Tohvri	201	7,282	2,840	2,564
Emmaste	Valgu	277	5,751	2,435	2,362
Emmaste	Õngu	299	11,950	5,343	2,237
Käina	Heltermaa	583	15,228	9,042	1,684
Käina	Jausa	149	6,948	2,376	2,924
Käina	Kassari	307	4,946	3,080	1,606
Käina	Kopli	144	4,631	2,727	1,698
Käina	Käina	483	1,476	1,262	1,169
Käina	Männamaa	233	11,099	4,801	2,312
Käina	Nõmme	169	12,129	3,856	3,146
Kärdla	Kaluri	1	1,318	0,415	3,175
Kärdla	Kogri	136	10,835	4,290	2,526
Kärdla	Lehtma	17	10,095	3,364	3,001
Kärdla	Linumäe	519	1,463	1,330	1,100
Kärdla	Metsatööstuse	126	0,979	0,570	1,718
Kärdla	Saia	672	1,011	0,587	1,721
Kärdla	Sõpruse	817	1,973	1,195	1,652
Kärdla	Värsso	522	13,628	7,458	1,827
Lauka	Isabella	135	5,818	5,365	1,084
Lauka	Kõpu	418	35,394	11,788	3,003
Lauka	Metsaküla	58	5,784	1,794	3,224
Lauka	Reigi	254	23,859	8,573	2,783
Lauka	Viskoosa	318	5,189	2,694	1,923
Kokku		6838	198,786	3,8	2,193

Tabelist 2.4 on näha, et täiendava automatiseerimisega loomaks kaugjuhitavat ümbertoitmise süsteemi annavad RNA arvutustulemused SAIDI paranemiseks 39,786 minutit ning arvestades

ka koefitsienti 2,16, siis paranes tulemus 85,94 minutit ja uueks SAIDI väärtuseks Hiiumaal on 429,38 minutit.

SAIDI paranemine on märgatav, kuid arvestada tuleb siinkohal Tekla NIS RNA arvutuste loogikat ning programmi arusaamist lülitite süsteemsest üksteise võimalusi arvestavast töötamisest. Probleemi selgitatakse joonise 2.7 põhjal.



Joonis 2.7. Isetaastuva võrgu tüüpskeem

Nimelt kaitserелеedega lülitite puhul on Tekla NIS võimeline RNA arvutuste teostamisel arusaama, et liini rikkelse osa lülitab välja lähim võimsuslüliti, mille taha rike jääb. Joonisel 2.7 tähendab see, et rikete korral sektsioonis 1 rakendub fiidril olev võimsuslüliti ning rikete korral sektsioonis 2 piirkonnaalajaamades olevad võimsuslülid. Rikke korral sektsioonis 2 jääb toidet terve fiider olenemata sellest, et on ümbertoitmise võimalus, mida oleks võimalik teostada väga kiiresti. Tekla NIS arvestab normaalvahes oleva kaugjuhitava lüliti puhul küll lühemat lülitamisaega, kuid vooluta jääb arvutuslikuks katkestusajaks terve fiider.

Arusaamaks, kui palju isetaastuva võrgu teostamiseks vajalikust automatiseerimisest tegelikult kasu on, tuleb teostada fiidripõhine käsitsi analüüs. Kuna käsitsi teostatav analüüs on põhimõtteline, siis kasutatakse keskmistatud andmeid. Igal fiidril arvestatakse RNA arvutustele tuginevate rikete arvuga, rikestest põhjustatud katkestusaegadega, töökatkestuste arvuga ning töökatkestustest põhjustatud katkestusaegadega. Samuti antakse igale sektsioonile fiidril mingi rikkelisuse osakaal hinnangu järgi, mis baseerub liinitüüpidel, -pikkusel ja võrgutrasside marsruutidel. Arvutuskäiku on täpsemalt kirjeldatud alapunktis 2.2.3.

Joonisel 2.7 kirjeldatud tüüpskeemile vastavad Hiiumaal peale täiendavat automatiseerimist järgmised fiidrid, sulgudes klientide arvud vastavalt joonisel 2.7 kirjeldatud sektsioonidele 2;1:

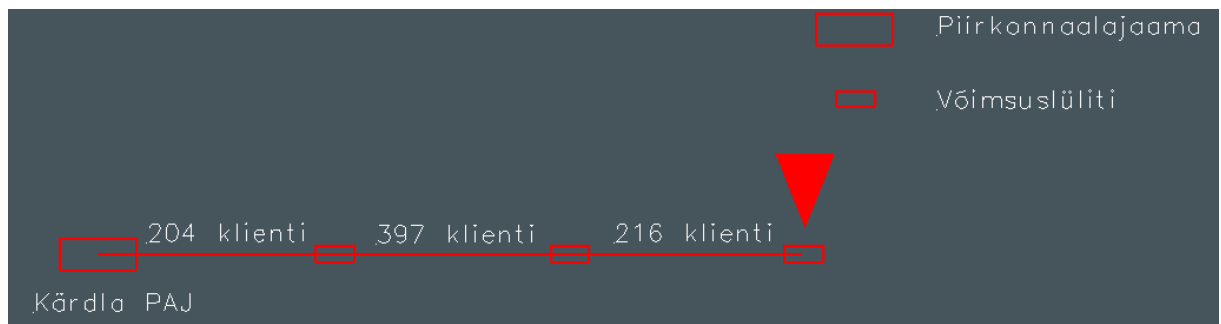
Käina – Kopli (77;67), Käina – Kassari (121;186), Lauka – Isabella (116;19), Käina – Jausa (116;33), Käina – Männamaa (137;96), Kärkla – Värssu (310;212), Lauka – Viskoosa (58;260), Lauka – Reigi (128;126), Kärkla – Saia (422;250), Kärkla – Lehtma (12;5), Emmaste – Valgu (153;124), Emmaste – Õngu (198;101).

Ülejäänud lihtsustatud fiidrite skeemid ning klientide jagunemised on esitatud joonistel 2.8 – 2.18.



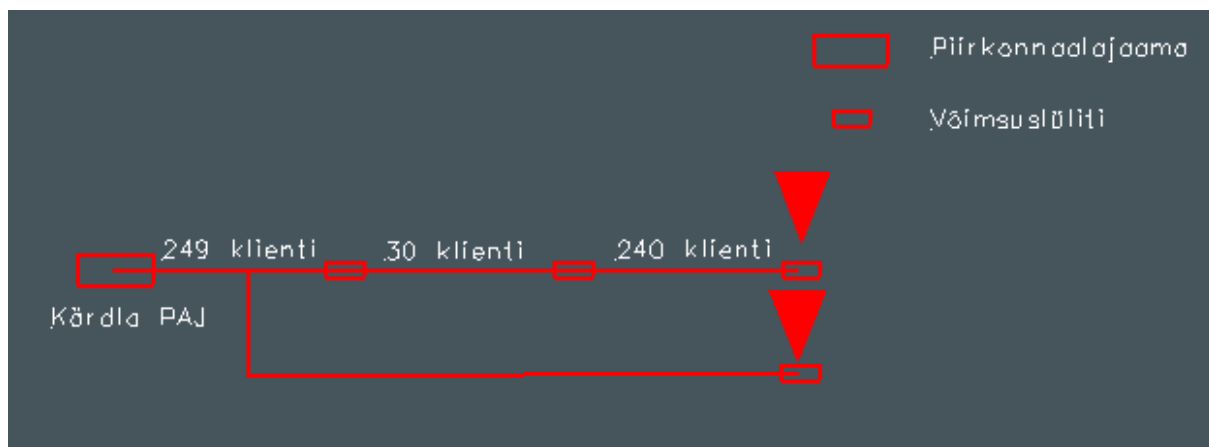
Joonis 2.8. Kärkla – Metsatööstuse fiider

Metsatööstuse fiidri toitel on 3 alajaama, kusjuures suurima tarbimisega normaalvahes asuv Saia alajaam on kaugjuhitav ning võimsuslülitega. Fiidri aastane kogutarbimine 3360 MWh. Saia alajaamas olevad 79 klienti aastase tarbimisega 2242MWh on võimalik kaugelt ümber toita. Vooluta jääks ja käsitsi lülitamist vajavad 2 alajaama 47 tarbijaga ning aastase tarbimisega 150,9 MWh. Tegu kaablivõrguga, kus rikketõenäosus on madal. Kasutada reservtoiteks Kärkla – Saia fiidriks, mis on Hiiumaa üks enim koormatud fiidreid.



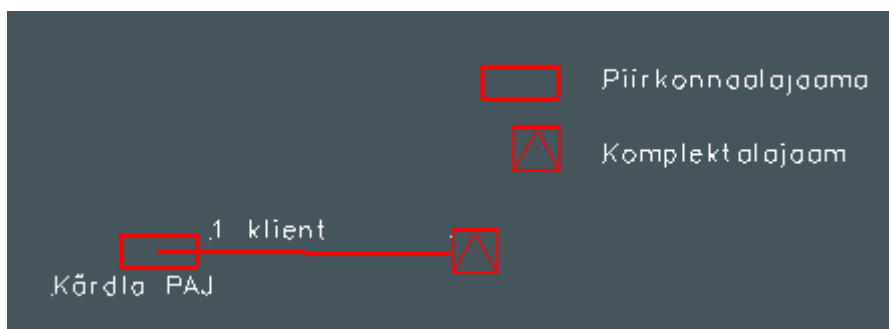
Joonis 2.9. Kärkla – Sõpruse fiider

Tegu enamjaolt kaabeldatud võrguga. Paljasjuhtmetega õhuliinid fiidri alguses, seega rikkeliisim osa põhjustab alati terve fiidri toitekatkestuse. Kliendid ja tarbimine fiidril ühtlaselt jaotunud. Aastane tarbimine kokku 4096 MWh.



Joonis 2.10. Kärkla – Linnumäe fiider

Linnumäe fiider on suuremas osas kaabeldatud, erandiks fiidri algus. Rikkelisem osa seega samuti fiidri alguses, mis põhjustab toitekatkestuse kogu fiidrile. Antud fiider on Hiiumaa kõige suurema tarbimisega fiider, aastane tarbimine 7135 MWh.



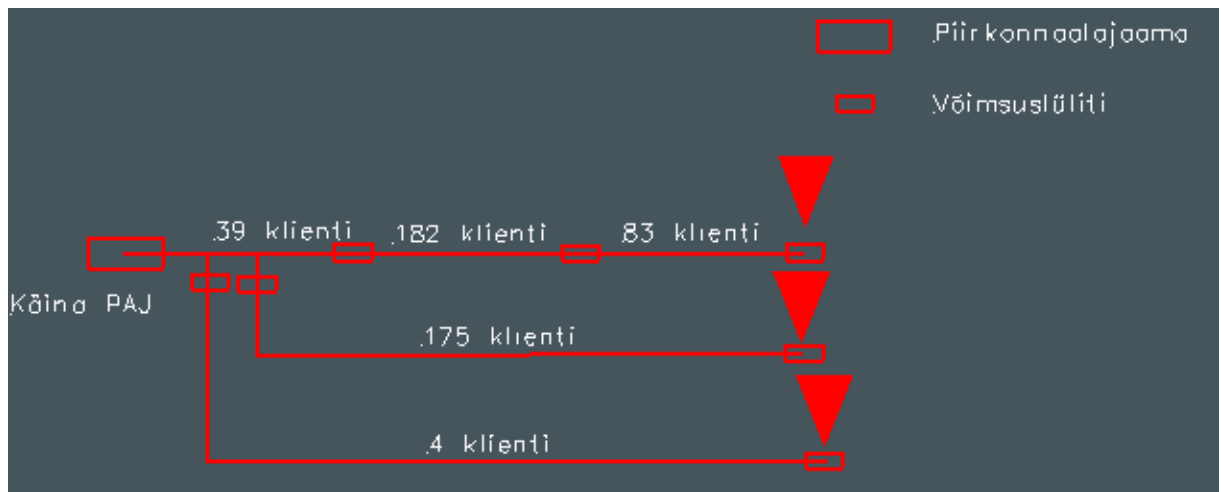
Joonis 2.11. Kärkla – Kaluri fiider

Kaluri fiidri puhul tegu radiaalvõrguga, kus asub üks suurtarbija aastase tarbimisega 1819 MWh. Tegu kaablivõrguga ning rikketõenäosus väike, ümbertoitmise võimalus puudub.



Joonis 2.12. Kärkla – Kogri fiider

Kogri fiidril on rikkeline haru eraldatud ning täiendavalt tüviliini sektioneerida ei ole mõtet, klientide arv ja aastane tarbimine on selleks liiga väike – 431 MWh. Kogri fiidri kaudu on võimalik vajadusel toita Kärkla – Värssu fiidrit.



Joonis 2.13. Käina – Käina fiider

Käina fiider on valdavalt kaablivõrk, väljaarvatud fiidri algus, kus on paljasjuhtmeline õhuliin. Kogutarbimine fiidril 6374 MWh, kusjuures õhuliinil toimuvate rikete eest kaitstud 4 ja 175 tarbijat on aastase tarbimisega vastavalt 3262 MWh ja 1787 MWh.



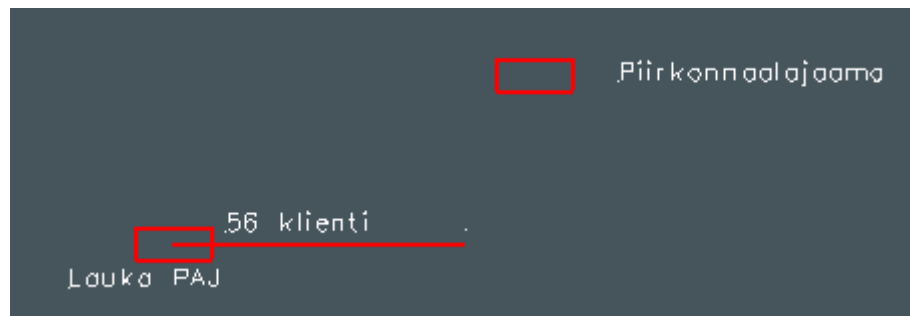
Joonis 2.14. Käina – Heltermaa fiider

Heltermaa fiider on valdavalt õhuliinidega lahendatud, aastane tarbimine 3160 MWh. Tüviliini sektioneerimine lahendatud vastavalt haja ja hajatihedas piirkonnas lubatud toiteta jääda võivate klientide hulgaga. Fiidri lõpus asub Heltermaa sadam.



Joonis 2.15. Käina – Nõmme fiider

Sisuliselt radiaalliin, ühinemiskoht kõrvalasuva fiidriga fiidri alguses enne tarbijaid. Võimaldab fiidrit toita piirkonnalaajas Nõmme fiidril toimunud rikke korral. Aastane tarbimine 816 MWh, seega fiider ei oma automaatse ümbertoitmise võimaluse loomiseks piisavalt kliente ja tarbimist.



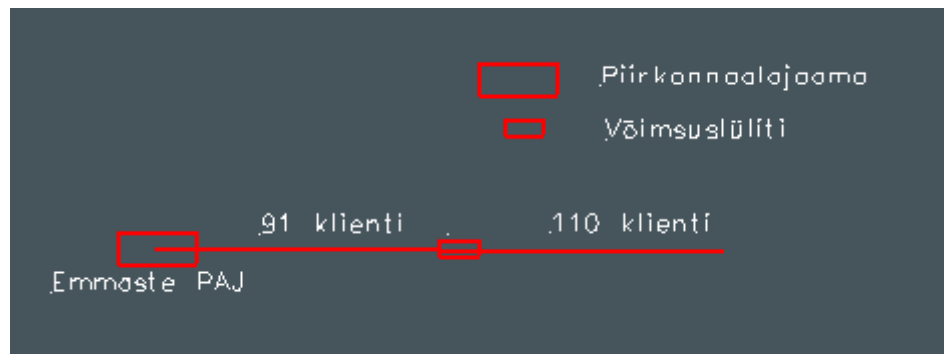
Joonis 2.16. Lauka – Metsaküla fiider

Radiaalliin ning liiga vähe kliente selleks, et kaaluda planeerimisel fiidrite ümbertoitmise võimaluse loomist.



Joonis 2.17 Lauka – Kõpu fiider

Kõpu fiidril nelja liini ristumiskoht Puski LP-s. Fiider valdavalt paljasjuhtmeline õhuliin. Aastane tarbimine 1408 MWh. Täiendaval automatiseerimisel ning Elektrilevi OÜ varahalduse põhimõtetes kirjeldatule vastavusse viimiseks võimalus fiidri lõpus olevat liinilõiku (joonisel 228 klienti) täiendavalt sektsioneerida.



Joonis 2.18. Emmaste – Tohvri fiider

Tohvri fiider on radiaalliin. Sektsioneeritud kliendikatkestuste vähendamiseks juhul, kui rike tekib fiidri lõpus. Aastane tarbimine kokku 1197 MWh.

2.2.3 Fiidrite käsitsi analüüs

Kogu järgnev analüüs on teostatud keskmistatud väärtustega ning ei arvesta iga elemendi rikkelisust eraldi, seega on ka tulemused pigem kujundlikud, et anda edasi automaatsest ümbertoitmisest saadavat ajalist võitu. Ümberlülitamisele kuluvat aega ei ole arvestatud, kõik ümberlülitamised toimuvad antud juhul arvutuste lihtsustamiseks hetkeliselt, välja arvatud Lauka - Kõpu fiidril paiknevad telejuhitavad lahkliitid, mille lülitamise kiiruseks arvestati 0,5 minutit. Kuna kõiki võimsuslülite poolt tehtavaid lülimisi loetakse hetkelisteks, siis on ilmselge, et katkestusaegade arvutamisel ei ole TLA tsükleid sisse arvestatud. Reaalsuses peaks vähemalt ühekordne TLA enamustel lülititel olema, et vältida mööduvate rikete korral tervete liiniosade asjata tooteta jäämist.

Fiidrite analüüsimiseks ning peale täiendavat automatiseerimist ja isetaastuva võrgu funktsionaalsuse rakendamist SAIDI arvutamiseks vajalik info on esitatud joonistel 2.7 – 2.18 ning tabelis 2.5. Võimalik on hinnata, milline osa fiidrist põhjustab suurema osa rikkeid ning vastavalt lülite paigutusele iga stsenaarium eraldi läbi arvutada. Teada on ka Tekla NIS'i infole tuginedes rikete ning plaaniliste katkestuste prognoositav arv ja nende kestus. Seega on teada kliendikatkestuste arv, nende koguskestus ning nende tõenäosuslikud esinemise kohad. Kliendikatkestuste arvu ja kestuse põhjal on võimalik arvutada ühe katkestuse keskmine pikkus.

Seda omakorda klientide arvuga jagades on võimalik teada saada keskmiselt ühest katkestusest tingitud mõju kliendile. Kuna teatud osale fiidrist on arvestatud mingisugune osakaal kogu riketest, siis on võimalik anda ka antud osale keskmiselt toimuv rikete arv aastas ning nende kestus. Kui kliendikatkestuse kestused on olemas fiidri erinevatele osadele, siis on võimalik kogu katkestusaja ning klientide arvu põhjal leida uued SAIDI väärtused.

Tabelis 2.5 on kirjeldatud kõikide fiidrite töökatkestuste arve ning nende summaarseid kestusi Tekla NIS'i andmetele toetudes. Töökatkestuse alla on arvestatud rikked ning plaanilised tööd kokku.

Tabel 2.5. Töökatkestuste arvud ja kestused

PAJ	Fiider	Kliendikatkestuste arv (tk/a)	Kliendikatkestuste kogukestus (min/a)
Emmaste	Tohvri	5,037	928,298
Emmaste	Valgu	6,917	1247,935
Emmaste	Õngu	14,096	2836,042
Käina	Heltermaa	27,632	5394,756
Käina	Jausa	5,497	1183,343
Käina	Kassari	7,925	1441,785
Käina	Kopli	5,6	1157,2
Käina	Käina	5,059	951,909
Käina	Männamaa	9,588	2019,506
Käina	Nõmme	6,086	1223,803
Kärdla	Kaluri	0,415	79,097
Kärdla	Kogri	10,549	2234,291
Kärdla	Lehtma	5,689	1399,765
Kärdla	Linumäe	5,866	1018,739
Kärdla	Metsatööstuse	1,199	215,854
Kärdla	Saia	2,121	384,246
Kärdla	Sõpruse	4,38	903,35
Kärdla	Värsso	20,411	3966,184
Lauka	Isabella	8,371	2006,792
Lauka	Kõpu	25,931	5869,166
Lauka	Metsaküla	2,622	551,32
Lauka	Reigi	17,403	4154,95
Lauka	Viskoosa	4,834	891,56
Kokku		203,228	42059,891

Tehtud arvutuste kohta tuuakse näide joonise 2.19 põhjal.



Joonis 2.19. Lauka – Viskoosa fiider

Näite aluseks võetakse Lauka – Viskoosa fiider, mille skeem vastab joonisel 2.19 esitatule. Fiidril on kokku 318 klienti, kellest 58 asuvad enne võimsuslüliti ning 260 peale võimsuslüliti. Kuna fiidri teisel poolel on mõned harud kaabeldatud, siis selle osa katkestuste tõenäosust hinnatakse madalamaks. Autori subjektiivse hinnangu alusel on võimalik väita, et 1/3 katkestustest asub fiidri teisel poolel ning 2/3 katkestustest fiidri esimesel poolel enne võimsuslüliti.

Tabelis 2.5 on esitatud keskmiseks kliendikatkestuste arvaks fiidril 4,834 katkestust aastas, kogukestusega 891,56 minutit. Nende omavahelise jagatise tulemusena saadakse summaarne ajakulu keskmiselt ühe katkestuse kohta. Vastavaks väärtuseks on 184,4 minutit. Jagades selle tulemuse tarbijate arvuga 318, saadakse aeg, mille jooksul tarbija on keskmiselt ühe katkestuse korral toiteta. Antud juhul on selleks tulemuseks 0,58 minutit tarbija kohta.

Vastavalt varem mainitule toimub 2/3 katkestustest fiidri esimeses pooles, seega aastane katkestuste toimumiste arv fiidri esimesel poolel saadakse järgnevalt:

$$\text{Aastane katkestuste toimumiste arv} = \frac{4,834}{3} \cdot 2 = 3,22 \text{ (katkestust aastas)}$$

Järelikult fiidri teises pooles toimub 1,61 katkestust aastas.

Kuna on teada, et fiidri esimeses pooles toimub 3,22 katkestust aastas, sellel liiniosal on 58 klienti ning keskmine katkestusaeg kliendi kohta on 0,58 minutit, siis nende väärtuste omavahelise korrutisena saadakse tulemuseks, et fiidri esimese poole kliendid kannatavad katkestusi kokku 107,65 minutit aastas. Analooget arvutuskäiku kasutatakse ka fiidri teise poole kohta, kuid katkestuste arv aastas on 1,6 ning klientide arv 260. Saadakse, et fiidri teises pooles olevad kliendid kannatavad katkestusi kokku 241, 28 minutit aastas. Kogu fiidril olevate klientide katkestusaeg on kahe fiidripoole summa ning tulemuseks on 348,93 minutit.

Valemi 1.2 järgi leitakse uus SAIDI väärtus antud fiidril:

$$SAIDI = \frac{\text{klientide katkestuste kogukestus}}{\text{teenindata vate klientide arv}} = \frac{348,93}{318} = 1,1(\text{min}) \quad (1.2)$$

Seega tingimusel, et ümberlülitamine aega ei võta ning mõlemas fiidri pooles korraga katkestust ei esine, saadakse uueks SAIDI väärtuseks 1,1 minutit.

Analoogselt on väärtused leitud ka kõikidele ülejäänud fiidritele, mille puhul automaatne ümbertoitmine ajalist võitu annab. Tulemused on esitatud tabelis 2.6.

Tabel 2.6. SAIDI näitaja peale fiidrite manuaalsed analüüsi

PAJ	Fiider	Klientide arv	SAIDI	Kliendikatkestuste aeg (min/a)
Emmaste	Tohvri	201	7,281	928,298
Emmaste	Valgu	277	2,25	622,7
Emmaste	Õngu	299	4,72	1411,9
Käina	Heltermaa	583	2,5	1457,83
Käina	Jausa	149	3,96	590,04
Käina	Kassari	307	2,17	666,65
Käina	Kopli	144	3,24	466,65
Käina	Käina	483	0,35	171,1
Käina	Männamaa	233	4,69	1093,75
Käina	Nõmme	169	12,126	1223,803
Kärdla	Kaluri	1	1,318	79,097
Kärdla	Kogri	136	9,85	1339
Kärdla	Lehtma	17	8,5	796,99
Kärdla	Linumäe	519	1,4	1018,739
Kärdla	Metsatööstuse	126	0,892	215,854
Kärdla	Saia	672	0,44	185,3
Kärdla	Sõpruse	817	0,37	298,2
Kärdla	Värsso	522	3,92	2045,1
Lauka	Isabella	135	5,65	763,07
Lauka	Kõpu	418	14,6	6122,7
Lauka	Metsaküla	58	5,784	551,32
Lauka	Reigi	254	8,22	2087,31
Lauka	Viskoosa	318	1,1	348,93
Kokku		6838	105,331	24484,331

Et tabelis 2.6 esitatud SAIDI't jällegi paremini reaalsete tulemustega võrrelda, siis tuleb see korrutada läbi koefitsiendiga 2,16 ning tulemuseks on 227,5 minutit. Tabelis 2.3. esitati SAIDI

sihtnivood erinevates varustuskindluse piirkondades, haja piirkonnas oli selleks 300 ja hajatihedas 150 minutit. Arvestades, et Hiiumaa on valdavalt haja piirkond, üksikute eranditega, siis antud tulemus rahuldab seatud kriteeriume. Teostatud automatiseerimise abil vähenes SAIDI Hiiumaal algselt 515,6 minutilt 227,5 minutini, mis tähendab SAIDI vähenemist 288,1 minuti võrra.

2.2.4 Maksumus

Kokku paigaldati Hiiumaale 15 mastivõimsuslüliti. Nendest 3 puhul oli antud asukohtades varem paigaldatud kaugjuhitav KOL, seega saaks natukene nõrgema, kuid siiski funktsionaalse tulemuse ka 12 MVLi paigaldamisega. Keskmine mastivõimsuslülitit maksumus on orienteeruvalt 12800 €. [13] Seega kirjeldatud lahenduse realiseerimisel kulub mastivõimsuslülitele 192 000€.

Lisaks automatiseeriti 12 komplektalajaama (Kärdlas 8, Käinas 4), mis varem ei olnud automatiseeritud. Kokku tekkis võrku seeläbi 37 võimsuslüliti. Keskmiselt võib komplektalajaama hinnaks, mis on kaugjuhitav ja võimsuslülitega, arvestada vahemiku 20 000€ – 30 000€. Arvutamiseks on siinkohal võetud summa 30 000€. Seega investeeringu vajadused uute komplektalajaamade ostmiseks on 360 000€. Lisaks alajaamade projekteerimise ning paigaldamisega seotud kulud, mis on komplektalajaama kohta suurusjärgus 10 000€. Antud juhul tähendab see komplektalajaamade hankimiseks ja paigaldamiseks kokku 480 000€.

Kui arvestada mastivõimsuslülite ja komplektalajaamade investeeringud kokku, siis kogu investeeringuks on 672 000€.

Lõputöö kokkuvõte

Antud töö eesmärk oli anda ülevaade tarkvõrgu osadest, eelkõige keskendudes ühele selle kõige tähtsamale omadusele – isetaastuvale võrgule ning töös arutelu tulemusena saadud hüpoteeside kontrollimisele Hiiumaa näitel.

Probleemi kirjeldamiseks toodi välja jaotusvõrkude põhilise eesmärgina varustuskindluse parandamine. Hea ülevaate võrgu varustuskindluse kohta annavad varustuskindluse indeksid, millest laialt levinuimad on SAIDI, SAIFI ja CAIDI.

Selleks, et mainitud varustuskindluse indekseid vähendada, on kaks levinud moodust: õhuliinide viimine maakaablistesse ning võrgu automatiseerimine. Automatiseerimise abil on võimalik luua eeldused tuleviku tarkvõrgu loomiseks.

Tarkvõrk peab sisaldama mitmeid funktsionaalsuseid:

- Elektrisüsteemi häirete korral võrgu isetaastumine (probleemide tuvastamine ja katkestuse ulatuse minimiseerimine)
- Tarbijate aktiivse osavõtu võimaldamine nõudlusele reageerimisel
- Töökindlus küberrünnakute ja füüsiliste rünnakute vastu
- 21. sajandi vajadustele vastava elektrikvaliteedi pakkumine
- Kõikide elektri genereerimise ja salvestamise võimaluste mahutamine
- Uute toodete, teenuste ja turgude võimaldamine
- Varade ja talitluse efektiivsuse optimeerimine

Loetelust olulisim funktsionaalsus on võrgu isetaastumine. Isetaastuv võrk (FLIR) sisaldab nelja olulist elementi – rikke tuvastamine, rikke lokaliseerimine, rikke isoleerimine ning toite taastamine tervetel võrguosadel olevatele klientidele. Olulise funktsionaalsusena on kirjeldatud võrgu automaatset ümberkonfigureerimist, mis annab võimaluse täiendavate lahenduste kasutamiseks.

Isetaastuva võrgu funktsionaalsuse kasutamisel on mitmeid arvestamist vajavaid punkte: tuleb kindlustada elektrikute ohutus igal ajahetkel, isetaastuva võrgu funktsionaalsuse toimimine tormide korral, hajatootmiste mõju.

Järgnevalt on selgitatud isetaastuva võrgu juhtimismooduli toimimist, rikke lokaliseerimise võimalikku loogikat, vajalikku automatiseerituse taset ning oodatud varustuskindluse indeksite suuruseid erinevates varustuskindluse piirkondades.

Võrku juhtiva mooduli jaoks on enamikes teadusartiklites kaks varianti – kas lokaalne või tsentraalne isetaastuva võrgu juhtimislahendus. Antud töös on selgitatud, et küsimus ei ole selles, kumba lahendust kasutada, vaid selles, mis taseme otsuseid erinevatel tasanditel teha võib.

On arvestatud erinevaid intelligentsikihite, mis on esitatud järgmiselt:

- Lokaalne tase – üksik seade
- Lokaalne hajutatud tase – seadmete kogum
- Piirkondlik tase – piirkonnaalajaam, fiidrite kogum
- Tsentraalne – terve süsteem

Kuna kaitseseadmed on piisavalt „targad“, et aru saada toimingutest mida nemad teatud olukordades tegema peavad, siis esmased lülitamised peaksid jääma lokaalsele tasemele. Seade teostab iseseisvalt lülitamised, kui tuvastab endast läbimineva rikkevoolu või tunneb ära pinge kadumise võrgus. Tsentraalset taset läbi SCADA ja DMSi on vaja, et teha järgnevaid lülitamisi, milles on juba oluline arvestada, kust kaudu toimub ümbertoitmine, milliseid seadmeid täiendavalt lülitada käsitsi, kuidas on mõistlik jagada koormuseid fiidritel ning muid võimalikke aspekte.

Rikkelokaliseerimiseks on mitu võimalust, üks levinuimaid ning odavamaid mooduseid on rikkeindikaatorite kasutamine nii õhuliinidel kui ka kaabelliinidel. Juhul kui kaitseseadmeid on fiidril palju ning need sektsioneerivad tüviliini, siis on rikkeindikaatorite jaoks sobivaim koht haruliinide ees, kus aitavad määratleda täpsemalt rikkelist haru.

Enamjaolt ei piisa õhuliinidel ainult rikkeindikaatoritest suure valerakendumiste hulga tõttu. Mõistlik on luua süsteem, mis filtreerib indikaatorite valerakendumisi õigetest ning edastab dispetšeritele ainult tõesed indikatsioonid.

Paraku raskuspunktiks antud lahenduse korral on ja jääb maaühendusvoolude tuvastamine. Probleem on eelkõige tehniline, kus maaühendustel on erinevad parameetrid ning nende esinemisel rakenduvad voolu liikumissuuna tõttu kõik indikaatorid, mis ei oma suunafunktsiooni ja mis asuvad suurte mahtuvuslike vooludega haruliinide ees.

Järgmiseks suuremaks töös analüüsitud küsimuseks oli minimaalne automatiseerituse tase isetaastuva võrgu jaoks sobiva koosluse loomisel. Minimaalne vajadus tähendab antud tööle toetudes vähemalt 1,5 võimsuslülitit fiidril, kus üks lüliti asub fiidril ning üks lüliti normaalvahes. Kui selline konfiguratsioon on loodud, siis piirkonnaalajaamast

piirkonnaalajaamani tekib neli sektsiooni. Ükskõik, millises sektsioonis fiidril rike tekib, siis automaatselt on võimalik alati ümber toita teisi sektsioone.

Täiendav automatiseerimine on seotud eelkõige tarbijate hulgaga, kes võivad rikke korral toiteta jääda. Siinkohal on vaja eristada erinevaid varustuskindluse piirkondi. Toiteta jäävate klientide arv võiks tiheasustuse korral olla hinnanguliselt 500 ± 100 , hajatiheasustuse korral 300 ± 50 ja hajaasustusel 100 ± 25 .

Magistritöös tõi autor vastavalt eespool kirjeldatule süsteemi toimimisest saadava kasu Hiiumaa keskpingevõrgu näitel. Kõik fiidrid automatiseeriti vähemalt minimaalse vajaliku tasemega selleks, et tagada ümbertoitmise võimalused vähemalt poolele fiidritele. Kõik lülitid, mis lisati olid võimsuslülitid (k.a. mastivõimsuslülitid). Muutma ei hakatud olemasolevate lülitite asukohti, kuid muudeti vastavalt vajadusele nende lülitite tüüpe.

Hiiumaa on valdavalt hajaasustatud piirkond, kus on kokku 4 piirkonnalajaama, millest väljub 23 fiidrit. Tekla NIS andmebaaside alusel on Hiiumaal kokku 6838 tarbijat, kelle aastane tarbimine on 50 139 MWh.

Loomaks töös kirjeldatud konfiguratsiooni, tuli paigaldada Hiiumaale täiendavalt 12 mastivõimsuslülitit ning 12 võimsuslülititega komplektalajaama. Kokku vähenes SAIDI Tekla NIS andmetel seeläbi 85,94 minutit.

Autor on kirjeldanud töös Tekla NIS programmi puuduseid töökindlusarvutuste tegemisel ning on teostanud fiidrite analüüsi käsitsi täpsemate suurusjärkude saavutamiseks. Selle tulemusel on saadud SAIDI paranemiseks töös kirjeldatud automatiseerimise järel 288,1 minutit. Uueks SAIDI väärtuseks Hiiumaal on 227,5 minutit. Kasutatud arvutuskäiku ning selle puudujääke, mis muudavad saadud tulemuse eelkõige orienteeruvaks, on autor töös ka kirjeldanud.

Magistritöö peamine eesmärk oli anda ülevaade tarkvõrgu osadest, eelkõige keskendudes ühele selle kõige tähtsamale omadusele – isetaastuvale võrgule ning töös arutelu tulemusena saadud hüpoteeside kontrollimisele Hiiumaa näitel. Tulemuseks oli oodatult suur SAIDI paranemine, mis annab kindlust analoogse konfiguratsiooni kasutamiseks reaalsel võrgu planeerimisel. Seda eriti haja ning hajatihedas piirkonnas ning piirkondades, kus maakaablist üleminek on kaugem perspektiiv või ei ole rentaabell.

Kirjandus

- [1] Agüero J. R. Applying Self-Healing Schemes to Modern Power Distribution Systems. IEEE, Power and Energy Society General Meeting, 22 – 26 July 2012, San Diego, CA, 4p.
- [2] Angelo C., Selejan P. Technologies of the self healing grid. CIRED 22nd International Conference on Electricity Distribution Stockholm, 10 – 13 June 2013, Paper 0850. 4p.
- [3] Aru K., Roosnurm M. „Juhend (6-20) kv lülitus-kaitseseadmete valikuks ja paigalduskoh-tade määramiseks keskpinge võrgus, arvestades üleminekut kaablivõrgule,“ Elektrilevi OÜ, Tallinn, 2013. [Ettevõtte sisedokument].
- [4] Berl A., Niedermeier M., de Meer H. Smart Grid Considerations: Energy Efficiency vs. Security. Memon A. Advances in Computers – Green and Sustainable Computing: Part II, Volume 88, Elsevier, 2013, Pages 159 – 198.
- [5] Budahs, M. Technical policy and Masterplan of Sadales Tikls AS. 2013, 29 sl.
- [6] Gies D. Safety Considerations for Smart Grid Technology Equipment. IEEE, Symposium on Product Compliance Engineering (ISPCE), 18-20 Oct. 2010 Boston, MA, 5 p.
- [7] Luus H. Mastivõimsuslüliti „ENTEC EPR-2 ETR300-R“ presentatsioon, Elektrilevi OÜ, Tallinn, 2014, 8 sl. [Ettevõtte sisedokument].
- [8] Lääne L., Haavik M. „Kaugjuhtimise ja automatiseerimise abil 6-20 kv elektrivõrgu rikete lokaliseerimise põhimõtted,“ Elektrilevi OÜ, Tallinn, 2013. [Ettevõtte sisedokument].
- [9] Lääne L., Haavik M. „Nõuded rikkeindikaatoritele,“ Elektrilevi OÜ, Tallinn, 2013. [Ettevõtte sisedokument].
- [10] McCarthy C., Jayantial A. Smart distribution through layered intelligence for next generation self-healing distribution networks. CIRED 22nd International Conference on Electricity Distribution Stockholm, 10 – 13 June 2013, Paper 0514, 15 pp.
- [11] Meldorf M., Tammoja H., Treufeldt Ü., Kilter J. Jaotusvõrgud. TTÜ kirjastus, Tallinn, 2007, 546 lk.
- [12] Rebane R., Kolk H., Pihlak A., Lillemäe U., Aps I. „Memo – Tüviliinide, haruliinide ja taandliinide defineerimine,“ Elektrilevi OÜ, Tallinn, 2013. [Ettevõtte sisedokument].
- [13] Tammoja H., Raesaar P., Valtin J. Elektrilevi OÜ kesk- ja madalpingevõrgu varustuskindluse näitajad ja muutuste mõjurid erinevates varustuskindluse piirkondades üleminekul kaablivõrgule. TTÜ Elektroenergeetika instituut. Tallinn, 2013. 140 lk.

- [14] Tekla Oy, „<http://www.tekla.com>,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.tekla.com/us/products/tekla-nis>. [Kasutatud 5 mai 2014].
- [15] Uluski R.W. The Role of Advanced Distribution Automation in the Smart Grid. IEEE, Power and Energy Society Meeting, 25 – 29 July 2010, Minneapolis, MN, 5p.
- [16] Uluski R.W. Using Distribution Automation for a Self-Healing Grid. IEEE, Transmission and Distribution Conference and Exposition, Orlando, FL, 2012. 5 p.
- [17] Varahalduse põhimõtted. Elektrilevi OÜ, 2013. 18 lk.
- [18] Wang W., Lu Z. Cyber security in the Smart Grid: Survey and challenges. Computer Networks, Volume 57, Issue 5, Elsevier, 7 April 2013, Pages 1344–1371.
- [19] Yuan X., Qian Z., Zhou Y., Wang Y., Yan M. Discussion on the development trend of smart grid and its key technology. 2012 China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2012) Shanghai, 5-6 Sep. 2012, Paper No CP0325. 8 p.