



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

EESTI ELEKTRISÜSTEEMI MANDRI-EUROOPA
ÜHENDSÜSTEEMIGA LIITUMISE TEHNILINE
TEOSTATAVUS

TECHNICAL FEASIBILITY OF ESTONIAN ELECTRICITY SYSTEM'S
SYNCHRONIZATION WITH CONTINENTAL EUROPE
BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Kristjan Tervonen

Üliõpilaskood: 164805AAVB

Juhendaja: professor Arvi Hamburg

Tallinn, 2019

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Kristjan Tervonen

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Eesti elektrisüsteemi Mandri-Euroopa ühendsüsteemiga liitumise tehniline teostatavus

Kuupäev: 10.05.2019

47 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): professor Arvi Hamburg

Sisu kirjeldus:

Töö eesmärk oli uurida Eesti elektrisüsteemi desünkroniseerimist Venemaa ühendsüsteemist ja liitumist Mandri-Euroopa sagedusalaga. Praeguste plaanide kohaselt peab olema 2025. aasta lõpuks tehniline valmisolek sünkroniseerimiseks Mandri-Euroopasse. Sellega kaasnevad mitmed tehnilised küsimused nagu näiteks sageduse stabiilsus ja varustuskindluse tagamine. Peale tehniliste lahenduste on uuritud ka majanduslikku poolt ja tehnilisi nõudeid mõlemas sünkroonallas. Analüüsimiseks on kasutatud uuringuid, mis antud projekti raames on koostatud. Eesmärgiks oli uurida Eesti tehnilise võimekuse tagamisega seotud tegevusi ja investeeringuid seoses sagedusala vahetusega ning projektiga seonduvaid riske. Ohte võib ees oodata mitmeid ning tagamisel Eesti ohutu elektrivarustus tuleb neid silmas pidada. Olgu selleks nt varustuskindluse tagamisega seotud riskid või Venemaa enda tehnilised tegevused seoses desünkroniseerimisega. Ka bilansienergia küsimused võivad üles tekkida. Investeeringute põhjal on tarvis uurida, kas projekt Eestile uues sünkroonallas kasulikuks osutub.

Märksõnad: desünkroniseerimine, Eesti elektrisüsteem, Mandri-Euroopa, Venemaa, BRELL, ENTSO-E, elektriturg, investeeringud, bakalaureusetöö

ABSTRACT

Author: Kristjan Tervonen

Type of the work: Bachelor Thesis

Title: Technical feasibility of Estonian electricity system's synchronization with Continental Europe

Date: 10.05.2019

47 pages

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Professor Arvi Hamburg

Abstract:

The aim of the thesis was to study the desynchronization of the Estonian electricity system from Russia and synchronization to the frequency area of Continental Europe. By the plans, at the end of 2025, technical willingness must be ready to synchronize with continental Europe. This involves a number of technical issues, such as frequency stability and security of supply. In addition to technical solutions, the economic side has also been studied and the requirements in both synchronous areas. The studies that have been developed with the project have been used for analysis. The aim was to study the technical capability of Estonia in relation of changing the frequency band, investments and risks that might appear. There are a number of risks that can be expected, and it must be taken into account when ensuring safe electricity supply in Estonia. For example, risks related to security of supply or Russia's own technical activities in connection with desynchronization. Energy balance issues can also arise. On the basis of the investments, it is necessary to investigate whether the project will be useful for Estonia in the new synchronous area.

Keywords: desynchronizing, Estonian electricity system, Continental Europe, Russia, BRELL, ENTSO-E, electricity market, investments, bachelor's thesis

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Eesti elektrisüsteemi Mandri-Euroopa ühendsüsteemiga liitumise tehniline teostatavus
Lõputöö teema inglise keeles:	Technical feasibility of Estonian electricity system's synchronization with Continental Europe
Üliõpilane:	Kristjan Tervonen, 164805AAVB
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Arvi Hamburg
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	
Lõputöö esitamise tähtaeg:	24.05.2019 15:00

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Seoses Eesti sünkroonala vahetusega ja üleminekuga Mandri-Euroopa elektrisüsteemile aastaks 2025, on oluline uurida selle tehnilist teostatavust ja riske, et vältida tulevikus esineda võivaid ohte. Üleminekuga on juba algust tehtud, kuid tehnilisest küljest pole selge, kas projekt on elektrisüsteemile ohutu ja Eestile majanduslikult kasulik. Projekti Eestipoolne vastutaja on Elering, kelle jaoks võib antud töö huvi pakkuda.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärk on uurida Eesti elektrisüsteemi välja astumist BRELL ühendsüsteemist ja selle sünkroniseerimist Mandri-Euroopa ENTSO-E ühendsüsteemiga, eelkõige selle tehnilist teostatavust ja ohte.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Mandri-Euroopa ühendsüsteemile ülemineku tehnilised aspektid
- Mandri-Euroopa ühendsüsteemi ohud Eestile
- Bilansienergia tagamise meetmed
- Investeeringute orienteeruv suurus

4. Lähteandmed

Tehtud uuringud seoses Eesti ja laiemalt Balti energiasüsteemide desünkroniseerimisest BRELL ühendsüsteemist. Internetiartiklid. Eleringi aruanded ja juhendajalt saadud materjal

5. Uurimismeetodid

Lugeda teostatud uuringuid, aruandeid ja erinevat materjali seoses Eesti elektrisüsteemi liitumisega Mandri-Euroopa sagedusalaga. Loetud materjali analüüs ja kokkuvõte. Enda analüüs ja ettepanekud.

6. Graafiline osa

Üldised joonised töö põhiosas

7. Töö struktuur

Sissejuhatus

Eesti praegune elektrisüsteem

Eesti liitumine Mandri-Euroopa sagedusalaga

Kokkuvõte

Kasutatud kirjandus

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Peamiselt internetiartiklid ja tehtud aruanded antud teemal, aga ka raamatud ja teadusartiklid.

9. Lõputöö konsultandid

Juhendaja

10. Töö etapid ja ajakava

Töö tegemisega alustatud novembris.

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	3
ABSTRACT	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	5
EESSÕNA.....	8
SISSEJUHATUS.....	9
1. EESTI PRAEGUNE ELEKTRISÜSTEEM	11
1.1 Hetke olukord	11
1.2 Ohud BRELL süsteemis	12
1.3 Siseriiklikud tööd elektrisüsteemi tugevdamiseks	13
1.4 Töökindluse hinnang	14
1.5 BRELL-i nõuded	15
2. EESTI LIITUMINE MANDRI-EUROOPA SAGEDUSALAGA	16
2.1 Erinevad võimalused liitumiseks.....	16
2.1.1 Liitumine Põhjamaade alaga	16
2.1.2 Saartaliluseks jäämine	16
2.2 Tehnilised aspektid	17
2.2.1 Erinevad lahendused liitumiseks	18
2.2.2 Sageduse hoidmine.....	19
2.3 Ohud sünkroniseerimisel Mandri-Euroopa alasse.....	21
2.3.1 Küberohud	21
2.3.2 Suwałki kanal	21
2.3.3 Ühtne elektriturg	22
2.3.4 Venemaa tegevused lahtiühendamisel	24
2.3.5 Bilansienergia	24
2.3.6 Varustuskindluse tagamine	27
2.4 Majanduslik põhjendus	29
2.4.1 Eesti investeeringud.....	29
2.4.2 Eesti ja naaberregioonide uued võimsused	31
2.4.3 Kulud uues sünkroonallas	31
2.5 Mandri-Euroopa elektrisüsteemi nõuded	32
2.6 Teostatud uuringud.....	33
KOKKUVÕTE.....	36
SUMMARY	38
KASUTATUD KIRJANDUS.....	41

EESSÕNA

Lõputöö teema on seotud päevakajalise teemaga, sest sünkroniseerimisega Mandri-Euroopaga on juba algust tehtud. 2025. aasta lõpuks peaks projekt seniste plaanide korral lõppema. Kuigi poliitilistel põhjustel on Venemaast lahkumine atraktiivne samm, siis tehnilistest pooltest ei pruugi projekt kasulikuks osutuda. Neid tehnilisi samme antud töös uuritaksegi. Täpsete uurimisküsimuste ja andmetega abistas juhendaja Arvi Hamburg, keda siinkohal ka tänan.

Töö koostamisel ja algandmete kogumisel olid abiks erinevad uuringud ja projektid, mis seoses sünkroniseerimisel Mandri-Euroopasse tehtud on.

SISSEJUHATUS

Eesti elektrisüsteem planeeritakse viia Mandri-Euroopa sagedusalale aastaks 2025. Hetkel asub Eesti BRELL ühenduses koos Venemaa, Läti, Leedu ja Valgevenega. Projekt on saanud nii positiivset kui ka negatiivset vastukaja. Ühelt poolt on julgeoleku seisukohalt Eestile oluline Venemaa elektrisüsteemist eralduda, samas tehniliselt ja majanduslikult ei pruugi see projekt kasulikuks osutada. Eesti põhivõrgu ettevõtte Elering on võtnud selge sihi, et Eesti tuleb eraldada Venemaa elektrisüsteemist, sest idanaaber on Eleringi sõnul oht meie julgeolekule ja elektrivõrgud on julgeoleku üks peamisi alustalasid. Antud projekt nõuab palju uuringuid ning saavutamaks suurim energiapuudulikkus on tarvis lahendada tehnilisi küsimusi, kuidas end Euroopa elektrisüsteemiga ühendada. Variantide hulka kuulus nii Põhjamaade NORDELi süsteemiga liitumine kui ka Eesti, Läti ja Leedu saartalitlus. Uuringute käigus selgus, et parim alternatiiv Venemaa elektrisüsteemile on liitumine Mandri-Euroopa ENTSO-E-ga. Siiski võib sagedusala vahetus tekitada Eestile ja teistele Balti riikidele probleeme, mida antud töö käsitleb.

Enne sünkroniseerimist tuleb Eestil lahendada rida küsimusi, et tagada elektri varustuskindlus. Eesti peab suurendama oma ülekandevõimsusi, tagama stabiilse sageduse ja olema suuteline töötama ilma välisühendusteta.

Siiamaani on Eesti BRELL süsteemis edukalt hakkama saanud ja probleeme pole esinenud, aga see ei tähenda, et tulevikus oleks garanteeritud meie ühine töö, sest poliitiliselt on suhted Venemaaga keerulised. Tehniliselt on riikide vahelised ühendused tugevad ja probleeme sageduse kõrvalekaldega ning elektri ülekandega pole esinenud. Seega tuleb selgeks teha, kas ka Mandri-Euroopa süsteem on Eesti jaoks piisavalt turvaline, et Eesti elektriga varustus ei satuks ohtu. Majanduslikult on tegu kalliga projektiga, aga oma tähtsuse tõttu ei pruugi odavam lahendus osutada parimaks.

Samuti on vaja hoida tasemel elektrienergia tootmise võimekus, et me saaks teatud aja jooksul hakkama ilma välisühendusteta ja tipukoormuste ajal oleks piisavalt võimsust võtta. Selleks on vaja rakendada erinevaid meetmeid ning hoida praegused välisühendused töökorras. Eesti elektrit Venemaalt otse ei impordi ja ka alalisvooluühendusi Venemaa ja Eesti vahele ilmselt ei planeerita.

2019. aasta suvel plaaniti teha katse, kus Venemaa elektrisüsteem Balti riikidest eraldatakse, kuid see lükkub edasi seoses Venemaa enda katsetusega Kaliningradi regiooni eraldamisega Baltimaadest. Peale Baltimaade poolset eralduskatset saab teha järeldusi, kas Eesti on valmis töötama saartalitlusena ilma Venemaata. Eesti elektrivõrk peab olema piisavalt tugev, välisühendused piisavad ja bilansivõimsused tagatud tipukoormuste ajal. Samuti peab sagedus

jääma stabiilseks, 50Hz, ja seda süsteemi igas osas, nii et Eesti põhjapoolseima riigina antud ahelas oleks koormuste muutumiste korral elektriga varustatud.

Töö valik on seotud hetkel aktuaalse teemaga, sooviga saada teada tulevikus Eestit ees ootavatest elektrisüsteemi muutustest ja ohtudest, mis Eesti põhivõrku ees ootavad.

Antud töö keskendub Eesti elektrisüsteemi üleviimist Euroopa ühendelektrisüsteemi, erinevaid võimalusi liitumiseks, tehnilisi lahendusi, ohte liitumisel, bilansienergia meetmeid ja investeeringuid, mis liitumisega kaasnevad. Antud töö eesmärk on vaadelda tehnilisi aspekte Mandri-Euroopa elektrisüsteemis, erinevaid lahendusi ning ohtude minimiseerimiseks tehtavaid investeeringuid. Samuti on välja toodud mõned nõuded, mis kehtivad hetkel BRELLis ja ENTSO-E regioonis.

Baltimaade elektrisüsteemide Mandri-Euroopaga sünkroonühenduse loomise tehniliste võimaluste uuringuid alustati juba 1990. aastate alguses. Lähiperioodil (2013-2017) on erinevate osapoolte koostöös teostatud 4 suuremat analüüsi:

- JRC – Integration of the Baltic States into the EU electricity system: A technical and economic analysis
- Fingrid, Statnett, Svenska Kraftnät and Energinet - Impact of Baltic synchronization on the Nordic power system stability
- Gothia Power - Feasibility study on the interconnection variants for the integration of the Baltic States to the EU internal electricity market
- Tractebel - Study of the Isolated Operation of the Baltic Power System [1]

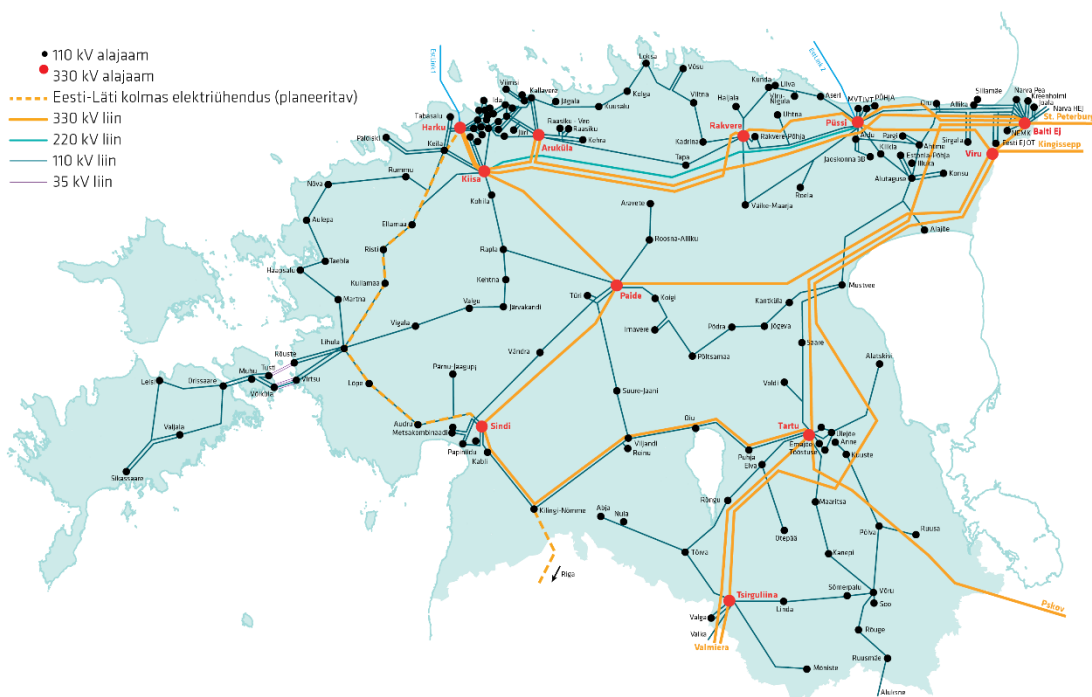
Antud töös on kasutatud ICDS-i aruannet „The Geopolitics of Power Grids“ ning erinevaid Eleringi, Teaduste Akadeemia jt. aruandeid.

Töö jaguneb kahte suuremasse peatükki. Esimeses on kirjutatud Eesti elektrisüsteemi hetkeseisust, selle positiivsetest omadustest, ohtudest ja töökindlusest. Teine peatükk on seotud Eesti elektrisüsteemi sünkroniseerimisega Mandri-Euroopa ühendsüsteemiga, ennekõike on välja toodud ohud ja tehnilised võimalused liitumiseks, aga ka majanduslik külg. Poliitilisi aspekte antud töö ei kajasta.

1. EESTI PRAEGUNE ELEKTRISÜSTEEM

1.1 Hetke olukord

Eesti elektrisüsteem kuulub suurde sünkroonselt töötavasse ühendüsteemi BRELL, mille moodustavad Eestiga vahelduvvooluliine kaudu ühendatud naaberriigid Läti ja Venemaa ning nende naabrid Leedu ja Valgevene. Venemaaga on Eesti ühendatud kolme 330 kV liiniga — kaks neist kulgevad Narvast Peterburgi ja Kingiseppa ning kolmas Tartust Pihkvasse. Läti elektrisüsteemiga ühendab meid kaks 330 kV liini — Tartu-Valmiera ja Tsinguliina-Valmiera. Aastal 2006 valmis Eesti ja Soome vahel alalisvooluühendus EstLink 1, mis oli Eesti ja Baltimaade esimeseks ühenduseks Skandinaaviaga. Teine Eesti-Soome alalisvooluühendus EstLink 2 valmis 2014. aastal ning tõstis ülekandevõimsuse kahe riigi vahel 1000 megavatini. [2] Ühendused on näidatud joonisel 1.1.

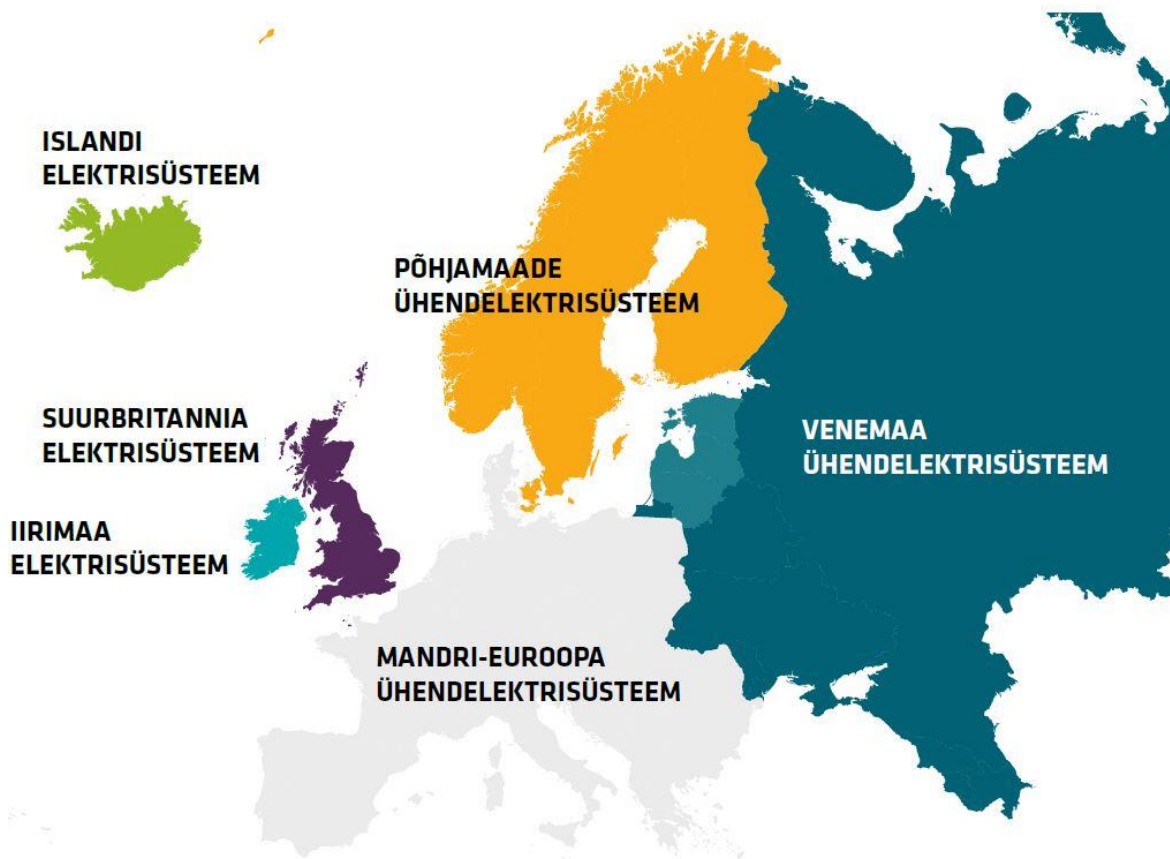


Joonis 1.1. Eesti põhivõrgu kaart. [3]

Laiemas plaanis võib täheldada, et Eesti elektrisüsteem paikneb kolme suure ühendelektrisüsteemi ristumiskohas: põhjas Põhjamaade ühendelektrisüsteem (NORDEL), lõunas Mandri-Euroopa

ühendelektrisüsteem (UCTE) ja idas Venemaa ühendelektrisüsteem (teise nimega IPS/UPS). [4]
Elektrisüsteemid on näidatud joonisel 1.2.

2009. aastal loodi Mandri-Euroopa, Põhjamaade, Baltimaade, Suurbritannia, Iirimaa ja Islandi elektrisüsteemide süsteemihaldureid koondav organisatsioon ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity). [5]



Joonis 1.2. Euroopa ühendelektrisüsteemid. [5]

Eesti elektrisüsteemi asukoha tõttu on võimalikud suured võimsusvood põhja-lõuna suunas. Toimub elektri transiit läbi Eesti elektrivõrgu Sankt Peterburgist Leedusse, eriolukordades ka vastupidi. Alalisvooluülekande Estlink 1 transiit on seni peamiselt suunaga Narva elektrijaamadest Soome. [4]

1.2 Ohud BRELL süsteemis

Balti riikide ühendustes on nõrgimaks lüliks Läti ja Eesti vahelised ühendusliinid. Praeguse seisuga jääks Eesti elektrisüsteemi naabritega (Lätiga) ühendama kaks 330 kV liini. Sel juhul võivad lühised olenemata kohast 330 kV võrgus põhjustada dünaamilise stabiilsuse rikkumise ülekandel Eesti-Läti

koos jaotusautomaatide töötamise- ja transiidi Eesti-Läti katkemisega ehk on võimalik elektriyaamade asünkroonrežiim, mille tulemuseks võib olla blackout. Kui sellise skeemi juures lühise tagajärjel lülitub välja ka L351 (Eesti-Balti), siis on üsna tõenäoline, et Eesti EJ-st Paide suunas üle 650 MW üle kanda ei õnnestu. Kui Balti EJ on sel ajal koormatud alla 700 MW on oodata tarbijate väljalülitamisi suures ulatuses (kuni 500 MW). [6]

Varasematel aastatel oli Balti ühendenergiastüsteemil Riias ka dispetšjuhtimise keskus. Nüüd on see likvideeritud ja energiasüsteemide talitlust koordineeritakse vastavate komisjonide ja lepingutega. Eesti energiasüsteemis on sama sünkroonne sagedus, mis on Venemaa ühtses energiasüsteemis, kuid alluvussuhted sealse operatiivjuhtimiskeskusega puuduvad. [7]

Venemaa teeb ettevalmistusi saavutamaks ennetavat valmisolekut oma elektrisüsteemi eraldamiseks Balti riikidest, mis ohustab viimaste energiajulgeolekut, muutes need enam haavatavaks geopoliitilistele pingetele. [8]

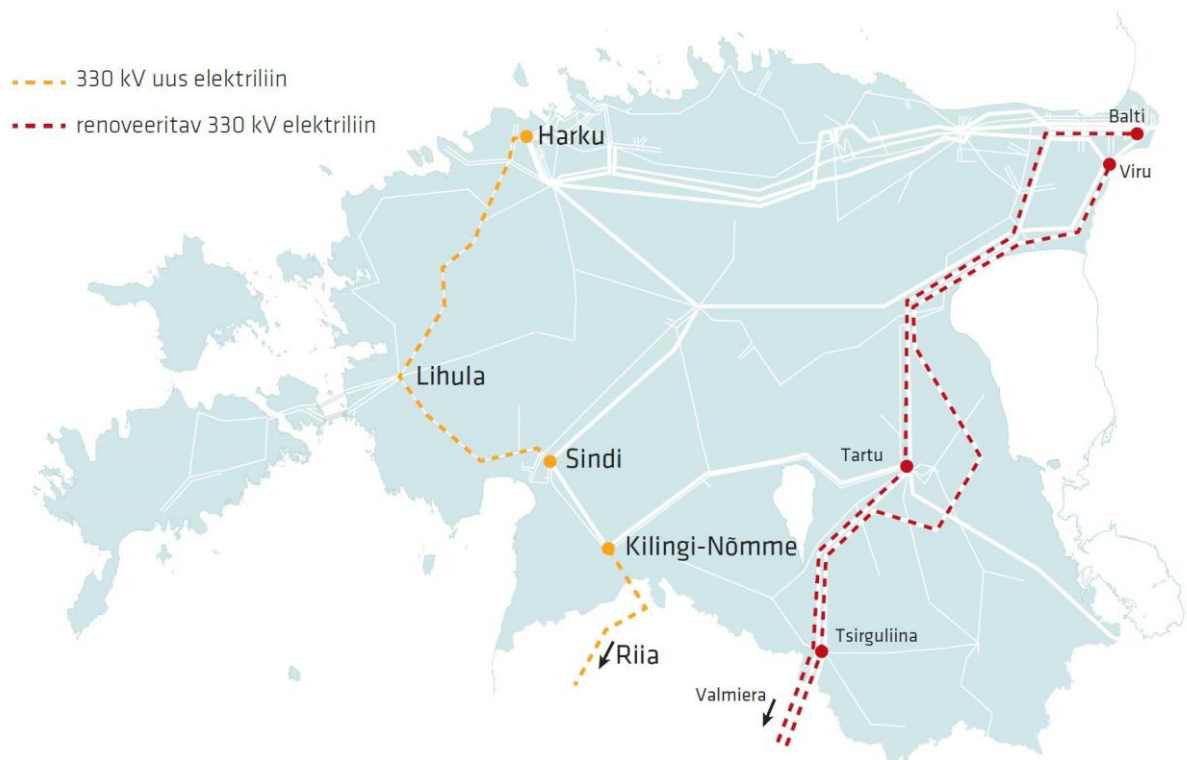
Vene elektrisüsteemi füüsilised vood häirivad ka Balti riikide elektrituru toimimist. [9]

Oht on suur geopoliitiliste erimeelsuste tõttu. Sagedust BRELL süsteemis, mille väike osa on Eesti, aitavad hoida Vene elektriyaamad, aga Venemaa ei saa Baltimaade sagedust muuta ilma, et nende enda sagedus stabiilsena püsiks. Baltimaadesse tuleb läbi Valgevene, Kaliningradi ja Soome Venemaa elektrit, mis on väga odav. See seab kohalikud elektritootjad ebavõrdsesse seisu, kes peavad järgima saastekvoote, erinevalt Venemaast, kelle elekter pääseb kvoodivabalt Balti riikidesse. Kui ka alalisvooluühendusi Baltimaade ja Venemaa vahele ei tule, siis elektritransiid peatuks sootuks ja Venemaa odav elekter ei pääseks otse meie turule. Samas seab see ohtu Leedu elektri varustuskindluse, kuna impordib suure osa oma elektrist just Venemaalt ja Valgevenest. Leedul on oluline hoida püsivaid ühendusi teiste naaberriikidega ja nt avada taas Ignalina tuumajaam. Venemaa ettevalmistuste tõttu on olemas oht, et üheksa vahelduvvoolu liini Venemaa suunal võivad ära katkeda enne, kui on valmis vahelduvvoolu liin Poola suunal.

1.3 Siseriiklikud tööd elektrisüsteemi tugevdamiseks

Eesti on astunud ka esimesi samme liitumiseks Mandri-Euroopa ülekandesüsteemiga. Aastaks 2020 valmib kolmas Eesti-Läti vaheline ühendus, mis koosneb Harku-Lihula-Sindi ja Kilingi-Nõmme - Riia liinist. Liin on näidatud joonisel 1.3.

Kolmanda Eesti-Läti vahelise elektriliini ehitusel on oluline julgeolekupoliitiline tähendus Eestile ja teistele Baltimaadele. Uus 330 kV õhuliin likvideerib „pudelikaela“ Eesti-Läti piiril, tõstes ülekandevõimsust kuni 600 MW võrra. [10]



Joonis 1.3. Eesti-Läti kolmas liin. [11]

Lisaks laiendatakse Harku 330 kilovoldist alajaama. Harku alajaama laiendus on osa kolmanda Eesti ja Läti vahelise elektriühenduse ehitamisest, mis kannab olulist geopoliitilist mõõdet Balti elektrisüsteemide desünkroniseerimisel Venemaa elektrivõrgust. Tööd lõpetatakse 2019. aasta septembris. [12]

Projekti käigus rekonstrueerib Elering Balti-Tartu, Tartu-Valmiera ja Viru-Tsirguliina 330-kilovoldised õhuliinid, uuendatakse juhtimissüsteeme ning paigaldatakse uued pingestabiliseerimise seadmed. Liinide uuendamine suurendab Eesti ja Läti vahelist ülekandevõimsust 700 megavati võrra. [13]

1.4 Töökindluse hinnang

Kogu süsteem on 60 aastat toiminud ilma raskusteta, sest Balti riikide süsteemid töötavad paralleelselt Venemaaga ja tänu sellele asub Eesti väike elektrisüsteem vaid 100 kilomeetri kaugusel suurest süsteemist, mis hoiab meie kvaliteeti väga heal tasemel. [14]

Süsteemi olulisemad „pudelikaelad“ asuvad Valgevene ja Leedu ning Eesti ja Läti vahelistel ühendustel. Ühendsüsteemi talitluse stabiilsust ja ühtlasi Eesti elektriülekandevõimalusi mõjutab

suurel määral Venemaa 750 kV elektrivõrgu talitus Sankt Peterburgi ja Moskva vahel. Oma mõju on ka Venemaa süsteemi muude ühenduse talitlusel. [4]

Töökindlus on uue Eesti-Läti vahelise liiniga paranemas. Samas suudab Venemaa enda liinid varsti Balti riikidest neutraalselt üleval hoida ja pikas perspektiivis on töökindlus häiritud, kui me suurele süsteemile vaid koormaks oleme.

1.5 BRELL-i nõuded

Vastavalt BRELL-i süsteemihaldurite vahelisele kokkuleppele peab Eesti elektrisüsteemi vahelduvvoolu saldo (piiriülene võimsusvoog vahelduvvoolu liinide kaudu) tunni kokkuvõttes olema vahemikus ± 30 MWh võrreldes planeerituga (Läti elektrisüsteemi vahelduvvoolu saldo ± 30 MWh võrreldes planeerituga ja Leedu elektrisüsteemi vahelduvvoolu saldo ± 50 MWh võrreldes planeerituga).

Vastavalt „BRELL-i elektrilises ringis avariireervõimsuste hoidmise ja kasutamise lepingule“ tagavad kõik BRELL-i lepingu osapooled vähemalt 100 MW avariireervõimsuse hoidmise. Seda avariireervõimsust võib kasutada ainult BRELL-i elektrisüsteemide toimunud sündmuste korral. Kõik BRELL-i lepingu osapooled on võtnud endale kohustuse võimaldada vastastikku 100 MW avariireervõimsuse kasutamist. Seega võimaldab see leping Eleringile juurdepääsu täiendavalt 400 MW-le avariireervõimsusele (100 MW nii Lätist, Leedust, Valgevenest kui ka Venemaalt). BRELL-i jaoks hoitav avariireervõimsus peab olema täies mahus aktiveeritav maksimaalselt 20 minuti jooksul alates aktiveerimise korralduse andmisest ning selle katkematu täies mahus realiseerimine peab olema tagatud vähemalt 12 tunni jooksul. Vajaduse ja tehnilise võimaluse olemasolul võib süsteemihaldurite kokkuleppel pikendada avariireervõimsuse realiseerimise aega pikemaks ajaperioodiks kui 12 tundi. Alalisvooluühenduste Estlink 1 ja EstLink 2 maksimaalse impordi võimaldamiseks peab Elering täiendavalt vastavas BRELL-i lepingus sätestatule tagama veel 150 MW avariireervõimsuse hoidmise (kokku 250 MW). Elering hoiab avariireervõimsust Elering kuuluvates avariireservelektrijaamades – Kiisa AREJ 1 (110 MW) ja Kiisa AREJ 2 (140 MW). [15]

Vastavalt BRELL-i lepingutele tuleb Baltikumi süsteemihalduritel hoida süsteemi eabilansi kõrvalekallet lubatud piirides (Baltikumi summaarne kõrvalekalle: +/- 110 MWh). Baltikumi süsteemihaldurid tasuvad Venemaa elektrisüsteemile summaarse eabilansi eest iga kWh kohta vastavalt Venemaa vastaspoole poolt esitatud hinnakirjale. [16]

2. EESTI LIITUMINE MANDRI-EUROOPA SAGEDUSALAGA

2.1 Erinevad võimalused liitumiseks

Kuigi sünkroniseerimise otsus on vastu võetud ja Eesti liitub Mandri-Euroopa ühendelektorisüsteemiga, siis võimalusi liitumiseks oli ka teisi.

2.1.1 Liitumine Põhjamaade alaga

Tänu ühistele väärtusele Põhjamaadega ja vastastikule usaldusele tundub Eesti elektrivõrgu ühildamine Põhjamaadega atraktiivne samm. See aga nõuab suuremaid investeeringuid ja uuringuid. Norra ja Rootsi on idee osas skeptilised, sest ei taha Põhjamaadesse geopoliitilist lisariski ja näevad Eesti liitumises enda jaoks vähe kasu. Soome on välja öelnud, et pooldab Eesti sünkroniseerimist Põhjamaade alaga, kui investeeringud teevad teised osapooled – Euroopa Liit ja Eesti.

Ka tehnilisest küljest oleks liitumine Põhjamaadega keerulisem, sest see nõuab merekaableid. Vahelduvvoolu merekaablitel on suur reaktiivtakistus, mille tõttu on sünkroonselt töötamine raskendatud. Antud liitumine nõuaks kolme 220 kV vahelduvvoolukaablit, igaüks võimsusega 250 MVA.

Põhjamaade elektrisüsteem on võrreldes Mandri-Euroopa süsteemiga väiksem ja sageduse kvaliteet nõrgem. Seda eriti olukorras, kus Rootsi on kõrvaldamas oma tuumajaamu. Samuti jääks Eesti otseselt ühendatuks Soomega, mis on Põhjamaadest kõige nõrgema elektrisüsteemiga, olles ühenduses vaid kahe sünkroonliiniga ülejäänud alast.

Kui Mandri-Euroopa sagedusalaga on aja jooksul liitunud mitmed riigid, siis Põhjamaade omaga mitte ühtegi. [17]

Kuigi ka Põhjamaadel endal polnud tahet Balti riike enda sagedusalasse võtmiseks, siis pikkade merekaablite tõttu oleks see variant majanduslikult ja tehniliselt ebamõistlik.

2.1.2 Saartalitluseks jäämine

Väikeses elektrisüsteemis on igal võimalikul elektrijaama rikkel tohutu süsteemne mõju ning see võib ohustada isegi süsteemi tervikuna. Isoleeritud Baltimaade süsteemis tähendaks näiteks Narva

elektrijaamade võrgust väljalangemine märkimisväärset sageduse langust. Samas on suures süsteemis, näiteks Venemaa praeguses süsteemis Narva jaama kadumise mõju sisuliselt olematu, kuna mastaap annab vajalikku inertsi. [18]

Arenenud riikides on eeldus, et väiksem süsteem peab ise hakkama saama. Majanduslikult on ebaefektiivne kogu aeg saartalitluses olla, aga võimekus peab olema, muidu muutub väiksem süsteem suurele süsteemile koormavaks. [19]

Venemaa, Valgevene ja Euroopa Komisjoni vaheliste läbirääkimiste protsessiks Balti riikide ja kolmandate riikide süsteemide tehnilise koostamise tagamiseks kuni desünkroniseerimiseni on loodud EURUBY. Seal on Venemaa välja tulnud ka lahendusega, et sünkroniseerida Venemaa süsteemid tervikuna Euroopaga, mis omakorda lahendaks ka kohe Balti riikide küsimuse. Arvestades praegust rahvusvahelist olukorda ja lahkelsid Euroopa ja Venemaa vahel, ei ole antud lahendus hetkel reaalne. [20]

Eespool öeldud eralduskatse on küll edasi lükatud, aga mingil hetkel tuleb see siiski teha. Jäädagi saartalitluseks oleks aga majanduslikult kehv variant ja ka tehniliselt oleks tegu kõige ohtlikuma variandiga. Iga elemendi välja lülitamine annaks suurema kaalu ja oht süsteemile niisiis suurem.

2.2 Tehnilised aspektid

Baltimaade elektrisüsteemi sünkroniseerimine on jaotatud kolmeks suuremaks etapiks:

1. Eesti- ja Baltikumisiseste põhja-lõuna-suunaliste ülekandeliinide rekonstrueerimine ja tugevdamine, millele lisanduvad täiendavad tehnilised lahendused elektrisüsteemi paremaks juhtimiseks. Selle tulemusena paraneb Baltimaade elektrisüsteemi valmisolek isoleeritud talitluseks avariiolukordades. Esimesse etappi kuuluvad sellised investeeringud, mille peaks lähema 5-10 aasta jooksul nii või teisiti tegema, kuna põhiobjektideks olevad ülekandeliinid on ehitatud põhiliselt 1950. ja 1960. aastatel ja nende eluiga on lõppemas.
2. Püsiva saartalitlusvõimekuse arendamine. Sõltumata sünkroniseerimise stsenaariumist ja ajakavast, on iga elektri põhivõrgu stabiilsuse ja juhtimisvõimekuse kriteeriumiks suutlikkus talitleda isoleeritult oma naabersüsteemidest. Seda sätestavad nii Euroopa süsteemihaldurite kokkulepped kui vajadus tagada varustuskindlus igas olukorras. Samas annab koostöö häid võimalusi süsteemi optimaalsemaks juhtimiseks. Selles etapis teostatakse peamiselt investeeringuid elektrisüsteemi juhtimisega seotud tehnoloogiasse, muuhulgas sagedusstabiilsust tagavatesse seadmetesse ja süsteemidesse. Täpne maht on seotud Mandri-

Euroopa sagedusalaga liitumise tingimustest tulenevate meetmetega, mis selguvad peale tingimuste väljastamist 2019. aasta alguses.

3. Viimases etapis on eesmärgiks lõplikult eralduda Venemaa elektrisüsteemist ja ühineda Mandri-Euroopa sünkroonalaga. [11]

2013. aastal valminud põhjalikuma tehnilise ja majandusliku uuringu „Feasibility study on the interconnection variants for the integration of the Baltic States to the EU internal electricity market“ (Gothia Power) tulemused kinnitasid, et sünkroniseerimine Mandri-Euroopa elektrisüsteemiga on tehniliselt teostatav, kuid sealjuures on vajalikud teostada investeeringud elektrivõrgu tugevdamiseks läbi Balti riikide ja Poola. [1]

Stabiilse töö tagamiseks ja ekspordi/importivõime säilitamiseks on vaja tugevdusi elektrisüsteemis:

- tugevdada ühendusi naabersüsteemidega (Eesti-Läti vaheline kolmas ühendus)
- sageduse primaarreguleerimise teostamiseks peab 5-8 turbiinile paigaldama primaarregulaatorid.
- varustuskindluse tõstmiseks ning võimsuse reguleerimiseks on vaja paigaldada kiirelt käivituvaid tootmiseseadmeid (nt gaasiturbiinid), mida oleks võimalik käivitada ka pinge puudumise korral Eesti elektrisüsteemis [6]

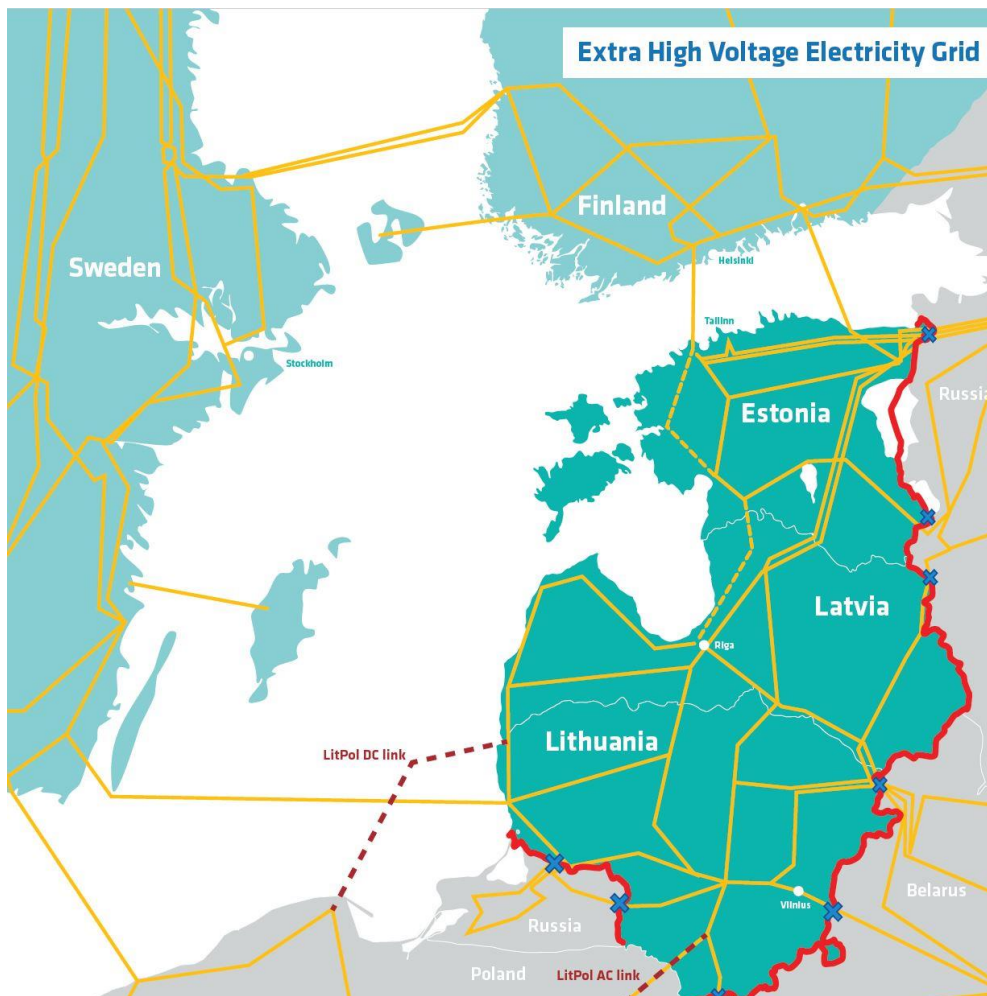
2.2.1 Erinevad lahendused liitumiseks

Mandri-Euroopa ühendsüsteem on võimalikest variantidest kõige suurem. Seetõttu on süsteemis genereeritav võimsus suurem ja sagedus stabiilsem.

Balti elektrisüsteemide ühildamiseks läbi Poola Euroopaga oli töös kolm võimalust: kaks vahelduvvoolu liini, üks vahelduvvoolu liin või üks vahelduvvoolu liin koos ühe alalisvoolu ühendusega. [21]

Baltikumi põhivõrkude sünkroniseerimine Mandri-Euroopa sünkroonalaga toimub ühendamise stsenaariumi järgi olemasoleva 400 kilovoldise EfK-Alytus vahelduvvoolu õhuliini ehk LitPol Linki ja juurde ehitatava merealuse alalisvoolukaabli kaudu. [22] Vastav variant on näidatud joonisel 2.1.

Eesti seisukohast oleks parim variant kahe vahelduvvoolu liiniga ühendus, sest suurendaks võimsusvooge ja energiatulgeolekut. Poola on sellele ideele vastu, kuna liin peaks läbima looduskaitseala ja nad oleks sunnitud investeerima 300 miljonit eurot. Praegu on Leedut ja Poolat ühendav Litpol Link võimsusega 500 MW, aga aastaks 2020 suurendatakse 1000 MW-le. [17]



Joonis 2.1. Balti riikide ühendused pärast sünkroniseerimist. [11]

Varasemalt on Euroopa sünkroonalasse liikunud Poola, Ungari, Tšehhi ning Slovakkia (1995. aastal) ja Rumeenia ning Bulgaaria (2002. aastal). [23]

Seega parimat varianti Balti riikidel ei õnnestunud saada, aga ühe vahelduvvoolu liini ja alalisvoolu merekaabliga variant rahuldab kõiki osapooli. Kuigi see pole kaubanduse seisukohast nii hea, siis paremat varianti laual samuti polnud. Ka töökindluse poolest pole see variant parim, sest Balti riikide vahelduvvooluliinide arv teiste riikidega väheneb.

2.2.2 Sageduse hoidmine

Sageduse stabiilsus on elektrisüsteemi võime säilitada süsteemi sagedus suurte häiringute korral, kus tekib genereeritava ja tarbitava võimsuse oluline ebabalanss. Üldiselt on sageduse mittestabiilsus seotud regulaatorite ja kaitseseadmete halva koordineerimisega ja mitteküllaldase võimsuse reserviga. [24]

Eesti tänase suurima elektrijaama ploki (300 MW) ootamatul väljalülitumisel sageduse langus $\sim 0.7 \dots 1.5$ Hz – kaasneb tundlikumate tarbijaseadmete seiskumine ja avariitõrjeautomaatika rakendumine. Sageduse normaliseerimiseks kulub 12-14 tundi (põlevkivi elektrijaama käivitamise aeg), mille jooksul võivad esineda järgmise generaatori väljalülitumisega massiline tarbijate väljalülitamine ja võimalik süsteemi kustumine. [25]

Balti riikide energiasüsteemi lisamine Mandri-Euroopa süsteemi ei muudaks sagedust rohkem kui 2-6 rad/s ehk 0,3-1 Hz. Seega on tarvis ehitada hästitoimivad elektrisüsteemi stabilisaatorid Baltimaade suuremates generaatorites. [26]

Ulatuslike elektrisüsteemide korral ei ole isegi samas sünkroonsageduse piirkonnas kõigis süsteemi punktides ühel samal ajahetkel sama sagedus, vaid sõltub sellest, kas mingis piirkonnas elektrijaamade võimsust parasjagu suurendatakse (sagedus seal tõuseb veidi), või langetatakse (sagedus langeb veidi). Mõjuvad ka koormuse muutused. Täiesti muutumatut seisundit esineb elektrisüsteemis väga harva.

Praegu toimub sageduse hoidmine läbi Loode-Venemaa süsteemiosa, kus soojuselektrijaamad kasutavad kütusena gaasi. Tasakaalustamine ENTSO-E abil toimuks aga peamiselt Poola elektrijaamade abil, kus põhilisteks kütusteks on pruun- ja kivisüsi. Esimene elektrijaam selles ahelas on OSTROŁĘKA B kivisüsiel töötav 621 MW elektrijaam. [27]

Eesti elektrisüsteemi eralduskatsed on läbi viidud aastatel 1993, 1995, 1997, 2001, 2006, viimane eralduskatse toimus 2009. aasta aprillis ning see kestis umbes poolteist tundi. Toimunud eralduskatsed on olnud edukad ning Eesti elektrisüsteemi võimekus sageduse reguleerimisel eralduskatsete ajal on vastanud ootustele, seda eriti aastal 2009. toimunud eralduskatse ajal, kus täiendavalt elektrijaamadele oli võimalik kasutada ka EstLink 1 sageduse reguleerimise funktsionaalsust. [28]

Balti süsteemis vajaliku inertsi olemasolu tagatakse läbi olemasolevate hüdrojaamade (LT, LV) ning täiendavate sünkroonkompensaatorite kasutamise. Sünkroonkompensaatorite kasutamine sageduse hoidmiseks on praktikas kasutusel (nt Sitsiilias) [23]. Sünkroonkompensaator on tühijooksul (ilma aktiivkoormuseta) talitlev sünkroonmasin, mida on traditsiooniliselt kasutatud reaktiivvõimsuse ja pinge reguleerimiseks pikemate ülekannete puhul kaugemal elektrijaamadest ja süsteemi tähtsamates sõlmedes, eriti seoses alalisvooluülekannete inverteralajaamadega. Sünkroonkompensaatorite nimipinged jäävad tavaliselt alla 24 kV [29].

Ka Mandri-Euroopa sagedusala on suhtelist suur ja see annab vajaliku inertsi. Küll aga võib külmadel ilmadel suure tarbimise puhul sellest väheks jääda, kui pole piisavalt pöörlevaid võimsusi ja sünkroonkompensaatoreid.

2.3 Ohud sünkroniseerimisel Mandri-Euroopa alasse

Järgnevalt on toodud aspektid, millega peaks arvestama liitumisel Mandri-Euroopa elektrisüsteemiga.

2.3.1 Küberohud

Küberturvalisus antud töö puhul tähendab vastupanu elektriülekandjatele tahtliku või tahtmatu ründe korral inimeste või loodusõnnetuste läbi.

Poolal on tugev kriitilise infrastruktuuri kaitseprogramm, kuid seos selle programmi ja mis tahes konkreetse küberjulgeoleku vastase rünnaku vahel ei ole selge.

Rahvusvahelise küberturvalisuse indeksi järgi on Eesti 2017. aastal juhtivate riikide hulgas, samas Läti ja Leedu mitte. Juhtivgrupis on Mandri-Euroopa ühendelektrisüsteemi riikidest vaid 3 riiki.

Eesti ja Venemaa on vahelduvvoolulinkide läbi ühendatud, seega ka andmed SCADAdes (Elektrisüsteemi juhtimise ja andmete kogumise tehniline süsteem, mida kasutatakse elektrisüsteemi reaalajas juhtimise funktsionaalsuses [30]) on jagatavad, aga kummalgi poolel ei ole juurdepääsuõiguseid mis tahes liiki infosüsteemile või muule tööstuskontrolli varale. Elering rakendab võrgupõhiseid vastumeetmeid, nt võrgu eraldamine, võrgupõhine juurdepääsu kontroll, sissetungimise avastamine ja viirusetõrje seadmeid. Venemaa ja Balti riikide vahel puudub ametlik kokkulepe turvaelementide kohta vahetatud andmetest.

Mitmetes riikides on loodud CERTid (Computer Emergency Response Team), mis uurivad küberkaitsega seotud probleeme.

Desünkroniseerimiseks on oluline Balti põhivõrguettevõtjate poolt suurendada kontrolli SCADA tarkvara üle ja parandada töötajate julgeolekualast teadlikkust. [17]

2.3.2 Suwałki kanal

Suwałki kanal on alla 100 km pikk maakitsus Kaliningradi ja Valgevene vahel, mis eraldab Balti riigid Poolast ja ülejäänud Mandri-Euroopast. Sinna vahele mahub LitPol Link, mis ühendab Balti riikide elektriühenduse ülejäänud Euroopaga. Liin on Valgevene piirile suhteliselt lähedal. Kui sõjaliselt Balti riigid Suwałki kanalist lahutada ülejäänud Euroopast, oleks elektriülekanne muu Euroopaga lahutatud ja Balti riigid jääksid saartalilusse. Liikumisvabadus Schengeni piirkonnas võimaldab valmistada ette ja läbi viia füüsilist rünnakut sünkroniseerimise infrastruktuuri vastu. [17]

Suwalki kanalis peaks suurendama kaitset, sest ühe liini välja lülitamisel oleks Balti riigid teistest Mandri-Euroopa riikidest lahtiühendatud.

2.3.3 Ühtne elektriturg

Eesti elektrituru arengu seisukohast on oluline pöörata tähelepanu järgmistele faktidele:

- Narva elektriyaamade kasutatav võimsus väheneb juba lähiaastatel rohkem kui 600 MW võrra, sest vanimate, filtriteta plokkide lubatud töötunnid ammenduvad. Esialgsete plaanide järgi peaks see toimuma 2023. aastal. 2030. aastaks suletakse plokkide tööea ammendumise tõttu veel 670 MW ulatuses.
- 2018. aasta veebruari lõpus Eestis olnud suhteliselt külmade ilmade ajal oli Eesti maksimaalne tunnikeskmine elektritarbimine 1544 MW, mõni päev hiljem oli töös maksimaalselt 1860 MW. Elektri börsihinnad olid nendel tundidel keskmisega võrreldes kuus kuni kaheksa korda kõrgemad. Pärast 2020. aastat peab Eesti sellistes ilmastikutingimustes lootma oma elektrivarustuses naaberriikidele ning elektri hind tõuseb sellistel perioodidel veel kordades kõrgemaks.
- Eesti elektriturg on naaberriikidega paremini ühendatud elektriturg maailmas. Kõige positiivse kõrval tähendab see ka seda, et elektrituru toimimist mõjutavad oluliselt teiste riikide rakendatavad regulatsioonid. Näiteks Vene ja Poola elektrituru eripärad kanduvad üle Baltimaade elektriturgudele ning mõjutavad negatiivselt siinset investeerimiskliimat. [31] Venemaa ja Poolal pole avatud elektriturgu ja Baltimaades liigutakse üha rohkem digitaliseerimise suunal, mida Venemaal ja Poolas ei tehta.

Praegu on kõikide Balti riikide süsteemihaldurid (Eestis Elering) taganud Vene elektrimüüjale eeliskohtlemise ja seda kohalike turuosaliste arvel. Vene elektrimüüja pääseb hetkel Balti riikide turgudele läbi Kaliningradi, Soome ja Leedu, samas kui Eesti elektritootjad peavad saastekvoote arvestades lunastama õiguse müüa elektrit Lätisse [32]. Venemaa elekter tekitab Balti ja Põhjamaade elektriturul ebavõrdset konkurentsi, kuna Euroopa Liidust väljaspool asuvad tootjad ei pea ostma CO₂-kvooti ning neile ei rakendu ka muid karme Euroopa Liidu keskkonnanõudmisi [33]. Seega on Vene elektrimüüja eeliskoheldud odava hinna tõttu, mis muudab kohalike elektrimüüjate olukorra kehvemaks. Kuigi ka Venemaalt pärit elekter on fossiilsetest allikatest nagu põlevkivigi, siis nendele täiendavaid makse ei lisata.

- Viimase viie aasta jooksul on väikeste elektritootjate hulk Eesti elektrivõrgus toetuste abil ületanud tuhande piiri, 2017. aastal lisandus neid kolmandiku võrra. Need tootjad suudavad toota

ligi 10% jaotusvõrguga (st ilma põhivõrgu tarbijateta) ühendatud tarbijate aastasest elektrivajadusest. Samal ajal on nende võimsus vaid 1-2% tipukoormusest.

Eelnevast lähtudes tuleb riigil kaaluda vajadust anda süsteemihaldur Eleringile suunis asuda korraldama uute võimsuste oksjone või sõlmima olemasolevate elektrijaamadega tipukoormuse lepinguid tagamaks, et Eestis oleks piisavalt mõistliku hinnaga elektritootjaid nii tavaolukorras kui ka külmade ilmadega kaasnevate tipukoormuste puhul. [31]

Valgevene kaudu tuleb jätkuvalt elektrit Balti riikidesse sisse, aga Leedu elektrisüsteemi operaator ei taga sellele alates 01.02.2019 enam eeliskohtlemist. Väärrib mainimist, et Valgevene kaudu sisenes 2018. aastal Baltikumi üksnes 19% siin müüdud Vene elektrist. Ilma piiranguteta tuleb elekter Baltikumi ka Kaliningradi ja Soome kaudu. Kaliningradi on viimasel aastatel ehitatud mitmeid uusi elektrijaamu, mis võimaldavad elektri müüki Baltikumi turule veelgi kasvatada. [33]

Seni kuni toetust või impordipiiranguid rakendatud ei ole, pole võimalik ainsatki turupõhist investeeringut teha. 15 aasta perspektiivis ei jätku Eestis elektrit isegi keskmise tarbimise nõudluse katmiseks. Kuna elektrijaamade rajamine võtab üldjuhul vähemalt viis aastat, oleks pidanud energiamajanduse arengukava raamistikku arvesse võttes teha esimesed otsused oksjonite kohta juba 2018. aastal. Olukorra muudab tõenäoliselt keerulisemaks kavandatav Balti elektrisüsteemide desünkroniseerimine, mis suurendab tavavõimsuste defitsiiti. Koos Poola sünkroonühendustega tuleb Balti regiooni rajada uusi elektrijaamasid vältimaks tipukoormuste defitsiiti. Olukorda saab leevendada nii elektritootmisse kui ka akutehnoloogiate arendamisse tarbijate endi tehtavate teadlike investeeringute toetamisega. Näiteks saab elektril ja ka vesinikul põhinev transport mõnel määral kaasa aidata elektri tiputarbimise probleemide lahendamisele. Arvestades tehnoloogia jõudsat arengut, tuleks olla valmis rakendama vajalikke meetmeid uute lahenduste kiireks turule toomiseks. [31]

Ühtse elektrituru seisukohast on oluline Venemaa elektri vähendamine Baltimaades. Hetkel jõuab Baltimaadesse elekter läbi Leedu-Valgevene liini ja Kaliningradist. Siinsed tootjad on kehvemas olukorras, sest peavad maksma saastetasusid, samas Venemaal toodetud elekter on nendest prii ja jätab tootjad ebavõrdsesse seisu. Peale desünkroniseerimist antud probleem laheneb, sest Venemaa ja Valgevenega elektrikaubandus otseselt katkeb. Eesti on juba praegu Vene impordi ära keelanud, aga Leedu ostab siiski Venemaalt hetkel elektrit edasi. Siiski on tarvis uusi elektritootmisüksusi, et tiputarbimise ajal vähendada importimist.

2.3.4 Venemaa tegevused lahtiühendamisel

Kuivõrd Venemaa arendab tempokalt Kaliningradi regiooni elektritootmisvõimekust ja 2018. aastal avati seal kaks uut soojuselektrijaama, peavad Baltimaad ja Poola kiirendama elektrivõrgu sünkroniseerimist. Venemaa võib Baltimaad Vene ja Valgevene elektrivõrgust (BRELL) lahti ühendada, enne kui riigid jõuavad oma sünkroniseerimisprojektiga lõpule.

Elektritootmise kasv Kaliningradis on seotud Baltimaade lahtiühendamisest Venemaast – see tähendaks, et Kaliningrad jääks ilma elektriühendustest välisriikidega. [34]

Uute elektrijaamadega saavutab Venemaa valmisoleku sujuvaks sagedusekontrolliks ning kindlustab elektri varustuskindlust juhaks, kui Kaliningradi regiooni võrke opereeritakse isoleerituna; samuti on neil valmisolek katta Kaliningradi nõudlus vaid kohalike ressurssidega juhul, kui mõni tootmisüksus langeb rivist välja. Kaliningradi tarbimine tipp hetkel on ligikaudu 800MW. Täiendava garantiina iseseisva kütusetarnekindluse saavutamiseks Kaliningradi LNG terminal valmis 2018. aasta lõpuks.

Samuti on Venemaa viimastel aastatel tugevdanud jõudsalt võrke sise-Venemaal eesmärgiga tagada elektri ülekande otse, lootmata Baltimaade ja Valgevene võrkudele. Viimaseks sammuks nende tegevuste rivis on 2017. aasta lõpus käiku lastud 330 kV ülekandeliin, mis ühendasid kaks Venemaa territooriumil asuvat ja varem üle Valgevene võrgu ühendatud alajaama. Seega rajati võrguühendus, mis on juba füüsiliselt Baltimaade ja Valgevene territooriumilt väljas. [18]

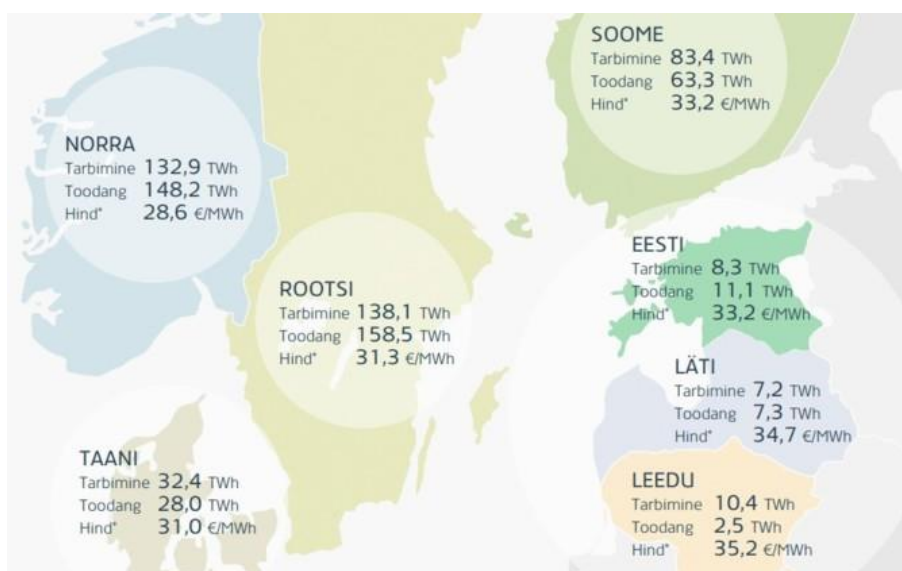
Praeguste prognooside korral on Venemaa valmis töötama ilma Balti riikidega varem, kui Balti riigid ilma Venemaata. See tähendab, et enne 2025. aastat, kui Balti riigid Mandri-Euroopasse sünkroniseeritakse, võib Venemaa meid saartalitlusse jätta, kuna ka Kaliningrad on valmis saanud uued elektrijaamad ja saavad Leeduta hakkama.

2.3.5 Bilansienergia

Bilansienergia on elektrienergia, mida bilansi hoidmise eesmärgil ostab ja müüb süsteemihaldur bilansihalduriga sõlmitud bilansilepingu alusel [35]. Bilansienergia hind sõltub nõudlusest. Mida rohkem kliente jätab elektrimüüja valimata, seda kõrgem on bilansienergia nõudlus ja seda kallim on selle hind. Välistada ei saa ka olukordi, kus riigis tekib elektrienergia ülejääk – elektrit on ostetud rohkem, kui seda tegelikult tarbitakse. See lööb bilansienergia hinna alla. Bilansienergia üle peab arvestust ja selle hinda arvutab kindla metoodika alusel elektrisüsteemi haldur Elering. [36]

Eesti elektrisüsteemi bilansi tagamine toimub koordineeritult teiste BRELL-i koostööorganisatsiooni kuuluvate süsteemihaldurite juhtimiskeskustega ning samuti seoses Eesti ja Soome vaheliste alalisvooluühenduste opereerimisega ka Soome süsteemihalduri juhtimiskeskusega. [37]

Elektrienergia tarbimine moodustas 2017. aastal kokku 8,5 teravatt-tundi, kasvades aasta varasemaga võrreldes ühe protsendi võrra. Eesti elektrenergia bilanss oli 2,7 teravatt-tunniga ülejäägis. Aasta varem oli ülejääk kaks teravatt-tundi. Piiriüleste elektriühenduste kaudu jõudis aasta jooksul Eestisse 2,3 teravatt-tundi elektrit ning Eestist välja läks viis teravatt-tundi. Seejuures ulatus Eestit läbinud transiit 2,2 teravatt-tunnini. [38] Joonisel 2.2 on näidatud Põhjamaade regiooni ja Baltimaade elektritarbimine, toodang ja hind aastal 2017. Tabelis 2.1 on elektrenergia bilanss aastatel 2006-2016, mis näitab, et Eestis ületas import eksporti vaid aastal 2009. Tabelis 2.2 on näidatud, et eksport ületas importi ka aastatel 2018.



Joonis 2.2. Balti riikide ja Põhjamaade elektritarbimine aastal 2017 [39]

Tabel 2.1. Eesti elektrenergia bilanss aastatel 2006-2016. [40]

Elektrienergia bilanss, GWh	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Toodang (neto)	8 728	10 954	9 498	7 884	11 732	11 356	10 526	11 823	11 013	9 062	10424
Import	251	345	1 369	3 025	1 100	1 690	2 710	2 712	3 730	5 452	3573
Tarbimine	6 901	7 180	7 427	7 080	7 431	6 845	7 407	7 332	7 417	7 440	7675
Kadu	1 077	1 354	1 130	886	1 047	949	879	903	842	697	711
Eksport	1 001	2 765	2 310	2 943	4 354	5 252	4 950	6 300	6 484	6 377	5613

Tabel 2.2. Eesti elektrienergia tootmine, tarbimine ja bilanss aastal 2018. [41]

<i>Elektribilanss, GWh</i>	<i>2018</i>	<i>2017</i>	<i>Muutus %</i>
Elektri tootmine Eestis	10 583	11 234	-6%
Eleringi võrku sisemiselt antud elektri tootmine	10 225	10 925	-6%
Taastuenergia tootmine Eestis	1 665	1 653	1%
Välisliinidelt võrku sisenenud elektrienergia	3 485	2 313	51%
• sh võrku sisenenud elektrienergia Soomest	2 391	1 679	42%
• sh võrku sisenenud elektrienergia Läti ja Venemaa liinidelt	1 094	634	72%
Võrku antud elektrienergia kokku	14 068	13 547	4%
Elektritarbimine Eestis	8 717	8 500	3%
Eleringi sisemaine ülekandeteenus tarbimiseks	7 980	7 865	1%
Eleringi võrgukaod	380	325	17%
Välisliinidele võrgust väljunud elektrienergia	5 350	5 047	6%
• sh võrgust väljunud elektrienergia Soome	874	872	0%
• sh võrgust väljunud elektrienergia Läti ja Venemaa liinidele	4 477	4 175	7%
Võrku läbinud elektrienergia kokku	14 068	13 547	4%
Bilanss	1 866	2 734	-32%

Ühendused teiste energiasüsteemidega suurendavad Eesti energiasüsteemi häiringukindlust. Korralikud ja toimivad ühendused loovad paremad võimalused elektri impordiks ja ekspordiks ning võimaldavad abi saada avariisituatsioonides. Elektrivõrkude ühendamine iseenesest ei tekita sõltuvust teisest riigist vaid sõltuvus tekib siis, kui puuduvad piisavad genereerimisvõimsused ja alalisvoolu ühendused naabritega. [20]

Eesti elektrisüsteemi sageduse automaatse reguleerimise tagab tavaolukorras Venemaa süsteemihaldur (välja arvatud juhul, kui Eesti elektrisüsteem töötab erandolukorras isoleeritult teistest elektrisüsteemidest). Sisuliselt tähendab see, et Eesti elektrisüsteemis reaajas tekivad planeeritud bilansi ja tegeliku bilansi erinevus ehk eabilanss kaetakse automaatselt Venemaa ühendalektrisüsteemi bilansiga ja reguleerimisreservidega. Elering kasutab reaajas Eesti elektrisüsteemi bilansi tasakaalustamiseks reguleerimisreservide ja avariireservvõimsuste aktiveerimist.

Olgugi, et Venemaaga elektrikaubandust pole, on tehniliselt võimalik Eesti-Venemaa suunal edastada 800 MW ja Venemaa-Eesti suunal 950 MW võimsust. Reaalsuses eksisteerib energia liikumine Eesti ja Venemaa suunal. Eesti-suunalised võimsusvood on põhiliselt põhjustatud transiidist Venemaalt Leetu ning ringvooludest ja Venemaa-suunalised füüsilised võimsusvood on põhjustatud Põhjamaade ja Eesti tootjate ekspordist Läti. [42]

Peale desünkroniseerimist ei kaeta Eestis enam eabilanssi Venemaa poolt, vaid Mandri-Euroopa ühendüsteemis olevate riikide abil. Uude süsteemi minekul on niisiis tarvis Balti riikidel toimivaid ühendusi teiste riikidega, et tagada avariilukorras tekkida võiv eabilanss. Olukorrale aitaks kaasa ka Venemaa liinide alalisvooluna ühendusse jätmine Baltimaadega. Bilansienergia on olnud Eestis positiivne ehk eksport ületab importi, aga tänu kõrgenevale CO₂ hinnale see enam nii ei jää. Narva jaamade sulgemisel aitaks kaasa uute võimsuste ehitamine.

2.3.6 Varustuskindluse tagamine

Varustuskindlus näitab, kas tarbijale on tagatud energia kättesaadavus vajalikul hulgal, nõutud ajal ja vastuvõetava hinnaga.

Elektrisüsteemi töökindlus tähendab elektrisüsteemi võimet tagada elektrijaamade ja elektrivõrkude koostöö elektrisüsteemi talitluses.

Energiajulgeolek hindab riigi energiaga varustatuse tagatust harva esinevate konkreetsete looduslike, tehnilike, poliitiliste ja geopoliitiliste ohtude realiseerumisel. [43]

Varustuskindluse tagaja peab silmas pidama kolme põhilist asja:

- Vajaliku võimsuse tagamine – selleks on olulised ühendused naaberriikidega ja riigisiseseid tootmisvõimsused
- Tugev riigisisene elektrivõrk, et elektrit oleks võimalik tarbijani transportida
- Energiavaru olemasolu, et riik suudaks ka iseseisvalt toime tulla

Eesti, Läti ja Leedu sageduse viimiseks Mandri-Euroopaga ühtseks tugevdatakse praegu riigisiseseid võrke ja luuakse uusi ühendusi Leedu ja Poola vahele.

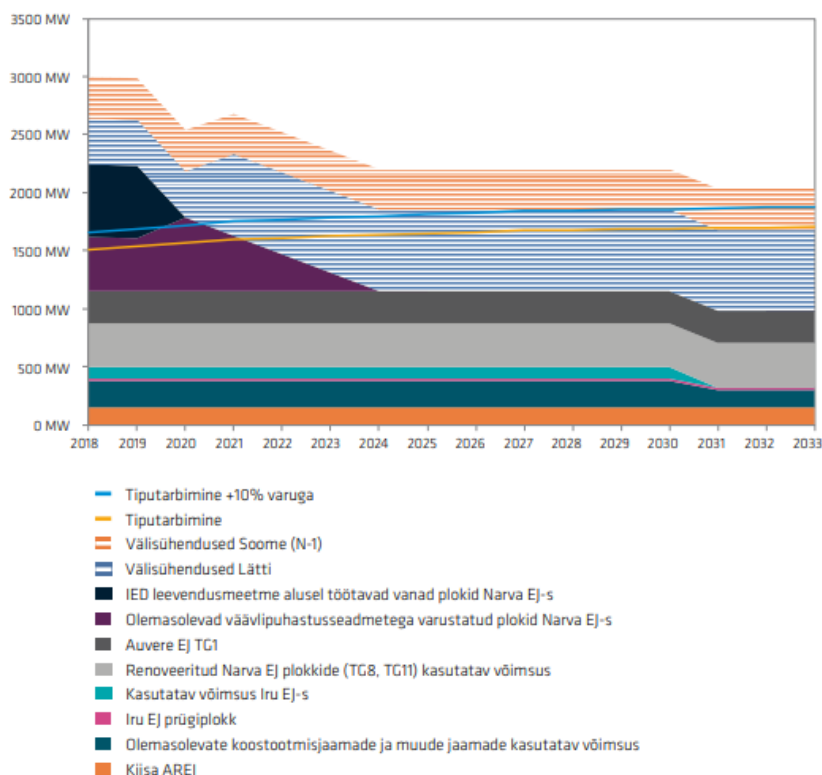
Eestis on olukord elektritootmiseks vajalike kütuste piisavuses hea, kasutusel on neli põhilist allikat – põlevkivi, biomass, turvas ja tuuleenergia. Elektritootmises kasutatavatest kütustest ostetakse välisriikidest vaid maagaasi. [44]

Eesti varustuskindlust tuleb mõõta regionaalsel tasandil. Kuna N-1-1 (ühe elektrisüsteemi elemendi avariiline väljalülitamine, kui mõni elektrisüsteemi tööd oluliselt mõjutav element on hoolduses) häiringuolukorras on arvestatud 750 MW impordivõimalusega Lätist, siis on oluline, et see impordivõimalus ka reaalselt tootmisvõimsuste näol eksisteeriks. [45]

Tulenevalt süsteemihalduri kohustusest tagada igal ajahetkel süsteemi varustuskindlus ja bilanss, peab süsteemis olema piisav reservvõimsus. Avariireservelektrijaamad (AREJ-d) peavad olema

võimelised autonoomselt käivituma, nad peavad olema võimelised reguleerima sagedust ning pingeniivoosid ja võimaldama läbi viia tegevusi Eesti elektrisüsteemi järk-järguliseks pingestamiseks, teiste elektrijaamade elektrisüsteemiga sünkroniseerimiseks ning neil on nullist taastamise võimekus. [46]

Varustuskindluse seisukohast on oluline vaadata ka süsteemi avariiolekordi. Käesolevalt (joonisel 2.3) on vaadeldud häiringu olukorda N-1-1, kui süsteemi kaks suurimat elementi on tööst väljas. Perioodil kuni aastani 2033 on praeguse teadmise järgi Eesti süsteemi kaks suurimat elementi merkaabel EstLink 2 ning üks Eesti ja Läti vahelistest ülekandeliinidest. Sellises olukorras väheneb perioodil 2020-2033 Eesti välisühenduste võimsus ja sellest ka impordivõime 1050 MW-ni - Lätist 700 MW ning Soomest 350 MW (Estlink 1). Kirjeldatud stsenaariumi korral on Eestis piisavalt tootmis- ning ülekandevõimsusi kogu vaadeldaval perioodil. Lisaks on tagatud ka 10% varu tarbimise kiirema kasvu rahuldamiseks. [28] Koos 10% suurema tarbimise varu korral oleks tiputarbimine ca 1800 MW. Võimsusi aga N-1-1 olukorras ilma Estlink 1 ja ühe Eesti-Läti vahelise liinita 2100 MW.



Joonis 2.3. Eesti elektrienergia varustuskindlus N-1-1 olukorras kuni aastani 2033. [28]

Eleringi hinnangul on Eestis ja regioonis elektrienergia puudujäägi tõenäosus väike ka pärast 2025. aastat. Siiski on oma oluline roll ülekandevõimsustel teiste piirkondadega ning sellest tulenevalt Euroopa varustuskindluse tase tervikuna. Näiteks võib Soome puudujääk kanduda naaberriikidesse,

sealhulgas Eestisse. Sellest tulenevalt on varustuskindluse küsimus muutunud kogu Energialiidu üleseks küsimuseks, mida lokaalsete meetmetega lahendada ei saa või on sellised lahendused ebaefektiivsed. Eleringi hinnangul tuleb arendada elektrituru disaini, et see annaks täpseid hinnasignaale investeerimisotsusteks ja tagaks sellega varustuskindluse. [28]

Desünkroniseerimisega väheneb Balti riikides Venemaa elektri osakaal, mis tähendab, et defitsiiti jäämise oht pärast 2025. aastat suureneb. Välisriikidest ostmise võimalused regioonis on piiratud, sest enamik riike on elektrit importivad, välja arvatud Norra ja Rootsi. Sellest aga ei piisa, et pikemas vaates oleks terves regioonis varustuskindlus tagatud. Uute elektrijaamade, nt tuumajaamade, tulek aitaks kaasa varustuskindluse tagamisele. Eestil on ka oma põlevkivi energiaplokke sulgemas, misjärel oleks kindlasti uute võimsuste turule tulek vajalik.

2.4 Majanduslik põhjendus

2.4.1 Eesti investeeringud

Eesti elektrivõrgu sünkroniseerimise projekti raames teostatavad tegevused on esitatud alljärgnevas tabelis 2.3. Projekt viiakse ellu Balti riikide koostöös.

Tabel 2.3. Investeeringud [47]

Investeeringu nimetus	PCI number	Investeeringu maht, mln €	Aeg
L386 Kilingi-Nõmme-Riga	4.2.1	120	2020
L735 Harku-Sindi	4.2.2	60	2021
L300 Balti-Tartu	4.8.2	51	2024
L301 Tartu-Valmiera	4.8.1	31	2025
L353 Viru-Tsireguliina	4.8.4	73	2025
Eesti elektrisüsteemi juhtimissüsteemide uuendamine	4.8.9	33	2024
Kokku		368	

Eesti plaanib sünkroniseerimise projekti esimeses etapis investeerida ligi 188 miljonit eurot, millest Euroopa ühendamise rahastu CEF-i toetus katab 141 miljonit eurot. Ülejäänud 47 miljonit kuludest katab Elering ise ja see raha on Eleringil juba olemas riikidevaheliste ülekandevõimsuse oksjonitulude näol. Sünkroniseerimise investeeringute esimesse etappi kuuluvad Eesti territooriumil tehtavad tööd Narva piirkonnast algavate ning Valga lähistelt Läti suunduvate 330-kilovoldiste õhuliinide rekonstrueerimiseks ning pinge reguleerimisseadmete rajamiseks. Elering peaks ilma desünkroniseerimiseta järgmisel kümnendil investeerima elektrivõrgu rekonstrueerimisse vähemalt 222 miljonit eurot. [48]

Balti riikide liine pole enam vaja Venemaa elektri transiidiks (Venemaa on oma elektrisüsteemid ehitanud Balti riikide neutraalseks, nende elektrisüsteem ei ole enam Baltimaade-suunalistest elektriühendusest sõltuv, 2018. aasta lõpuks on nad selle suuresti saavutanud nii Venemaa põhiterritooriumi kui Kaliningradi oblasti osas [49]), mis tähendab, et elektrivõrgu sageduse hoidmise eest hakkab Venemaa edaspidi arveid esitama. Praeguses BRELLi süsteemis hoolitsevad 50hertsise sageduse hoidmise eest tsentraalse regulaatoriga niinimetatud Volga hüdroelektrijaamade kaskaadil, selle teenuse eest pole Eesti seni maksnud. [50]

Euroopa on etapiviisiliselt järjest enam liikumas elektrienergia vaba turu mudeli suunas. Kui täna saab juba iga kodumajapidamine osta elektrit turuhinnaga, siis tulevikus muutuvad järjest turupõhisemaks ka süsteemi teenused, sh sageduse hoidmine. See tähendab paljusid teenusepakkujaid ja läbipaistvat hinnakujunemist. Sünkroniseerimise abil muutume ka meie selle turu osaks. [51]

Lisaks võib Baltikumi elektrisüsteemi tihedam ühendamine Põhja-Euroopa ja Mandri-Euroopa süsteemidega pakkuda huvi investoritele, kes oleksid huvitatud uute elektritootmisüksuste ehitamisest. [42]

Euroopa Liidu rahastuse toel väheneb Eesti enda investeerimise osakaal, mistõttu vanade liinide rekonstrueerimise saab teha väliste vahendite kaasabil. Tarbijate võrgutasude tõus suurinvesteeringu tõttu ilmselt jätkub, aga tõus ei oleks nii suur, kui desünkroniseerimist ei toimuks. Siis tuleks varustuskindluse parandamiseks nt Eesti-Läti kolmas liin teha tarbija kuludega. Pikemas perspektiivis on majanduslik kasu suurem, nagu ka Estlinkide puhul, mis esialgu tõstsid võrgutasusid, aga on toonud hiljem riigile kasumit ja parandanud varustuskindlust.

2.4.2 Eesti ja naaberregioonide uued võimsused

Kuni aastani 2025 pole Läti ja Leedu uusi elektrijaamu juurde ehitamas, Leedu on ka külmutanud Visagina tuumajaama ehituse vähemalt aastani 2030. Soome on rajamas kahte tuumajaama: aastal 2019 avatakse 1600 MW jaam Olkiluoto ja järgmise kümnendi keskel võimsusega 1200 MW Hanhikivi poolsaarel. Poola on võtnud sihi aastaks 2040 ehitada omale tuumaelektrijaam, et asendada vanu kivisöejaamu, mille CO₂ emissioonid on väga kõrged. Lisaks on plaan hakata tegema gaasijaamu, aga nii tuuma- kui ka gaasijaamade projektid on algusjärgus ja täpsed aastaarvud ning võimsused on teadmata. Taastusenergiaallikate osakaal on Eestis ja naaberregioonides suurenemas. [52]

Viies ellu Baltimaade energiajulgeoleku kõige tähtsamat projekti – Balti elektrivõrgu sünkroniseerimist Euroopa võrguga – peab Leedu kindlustama ka kohaliku kindla ja stabiilse elektritootmise. Elektrijaam, mis kasutab nullemissioonidega (nt tuulepark) tehnoloogiat (Leedu sõlmis 15. märtsil 2019 kavatsuste protokollid sellise jaama tasuvusanalüüsiks), võiks olla selline usaldusväärne elektritootja.

Möödunud aastal tegid Kaunase tehnikaülikooli teadlased uuringu, mis näitas, et lähitulevikus on Leedul vaja luua sellised kohalikud võimsused, et tagada elektrivõrgu toimimine ning varustuskindlus. Sama kinnitas Balti võrguoperaatorite ühine pikaajalise adekvaatsuse analüüs. [53]

Eesti regioonis on seega uute võimsuste turule tulek reaalne, Soomes Hanhikivi ja Olkiluoto tuumajaamad ja Leedu on näitamas initsiatiivi uue elektrijaama ehituseks ning ka Eesti ise on otsimas võimalust uue IV põlvkonna tuumajaama rajamise ettevalmistamiseks, mis kõik aitab varustuskindluse tagamisele kaasa.

Uue põlvkonna tuumajaam oleks varasematega võrreldes 20 korda väiksem, kuid selle võimsus oleks sama. Neis toodetakse energiat kiirete neutronite abil, kütusena kasutatakse juba tekkinud tuumajäätmeid. Omanike sõnul võiks jaam valmida 2030. aastate algul. Uue põlvkonna tuumajaam aitaks tagada ühtaegu kohalikku energiajulgeolekut ja langetada elektrihinda. [54]

2.4.3 Kulud uues sünkroonlas

Ainult ühe vahelduvvooluühenduse kaudu sünkroniseerituks jäädes tuleb piisava varustuskindluse taseme tagamiseks kasutusele võtta täiendavaid meetmeid, et olla igal ajahetkel valmis selle ainsa ühenduse katkemiseks. Sisuliselt tähendab see, et Baltimaades tuleks ehitada juurde ja hakata pidevalt töös hoidma varuelektrijaamasid. Varuvõimsuste hoidmisest tekkivad kulud tuleks lisada põhivõrgu ülekandetasudele ja tarbija peaks selle kõik kinni maksma.

Baltikumi eraldamisel Venemaa ja Valgevene võrkudest tuleb tagada piirkonnas primaarreservi võimekus. Põhimõtteliselt tuleb rajada reservelektrijaamad, mis töötavad pidevalt miinimumvõimsusel, kuid on võimelised mõne minutiga käivituma täisvõimsusel. Mingi osa sellisest võimsusest võiks kanda ka näiteks kokkuleppel Narva elektrijaamadega, kuid neistki ei piisa. Kiisale rajatud elektrijaam on avarielektrijaam ning käivitub 10 minutiga, aga kui midagi peaks võrgus sagedusega juhtuma, siis jääb sellisest reageerimisajast väheks. [55]

Praegu maksab Eesti Venemaa elektrikauplejale Inter RAO piiriülese eabilansi eest. Avatud tarne müügile ja ostule on kehtestatud hinnad ning kuigi bilanssi on paremini juhitud, on ühiku hind Eesti jaoks kasvanud. [56]

Uues sünkroonallas sageduse hoidmise eest kulutused puuduvad, mille Venemaa võib Balti riikidele kehtestada. Küll aga on uutesse reservjaamadesse investeerimine vajalik, sest vahelduvvooluliinide arv Baltimaade ja välisriikidega vahel väheneb ning seega kulutused reservide hoidmiseks tõusevad suuremaks, kui need seni BRELLis on. Lisaks juurde veel kolmanda Eesti-Läti hoolduskulud ja uued primaarregulaatorid.

2.5 Mandri-Euroopa elektrisüsteemi nõuded

ENTSO-E nõuab, et iga regioon oleks suuteline lühikest aega töötama isoleeritud sünkroonallas. Tavaliselt tähendab see paar nädalat suvel ja talvel töötamist eraldi suurest süsteemist. Eesti elektrisüsteem on mitmel korral seda ka katsetanud, vahemikus 1995. ja 2009. [17]

Mandri-Euroopas kehtivate põhimõtete kohaselt on uutel võrgupiirkondadel võimalik sünkroonselt ühenduda ainult sel juhul, kui nende piirkondade ümberühendamisega ei tekitata varustuskindluse probleeme nendele võrkudele, mille küljest lahti ühendutakse. Samuti tekib energiatransiidi võimekuse väga olulisel määral vähendamisel risk kahjunõude esitamiseks kolmandate riikide poolt, kuna nende poolt on oma võrku tehtud investeeringuid, mis tänu kaubandusvõime vähendamisele osutuvad mittetasuvaks. [42]

UCTE ja NORDEL-i nõuete kohaselt peab igas elektrisüsteemis olema kiirelt käivituvad generaatorid (käivitusajaga kuni 15 minutit) st. avarijärgne olukord (kus N-1 kriteerium ei ole täidetud) peab 15 minuti jooksul olema likvideeritud. Eesti elektrisüsteemis puuduvad kiirelt käivituvad elektrijaamad. Praegu reservist käivitamise aeg 12 tundi. Gaasiturbiine on võimalik käivitada 5-15 minuti jooksul.

UCTE ja NORDEL-i nõuete kohaselt peab igas elektrisüsteemis olema välise pingeta käivitamise võimalusega genereerivaid üksusi, mille asukoht on soovitatavalt teiste genereerivate üksuste lähikonnas. Nendeks "nullist käivitamise" generaatoriteks sobivad kas hüdroelektrijaamad või

gaasiturbiinid. Kuna Eesti elektrisüsteemis puuduvad piisava võimsusega hüdrojaamad, siis peab kasutama selleks gaasiturbiine.

UCTE nõuded primaarreguleerimisele:

1. Primaarreguleerimise diapasoone (tööpunkti suhtes) $\pm 5\%$ nimivõimsusest.
2. Võimsuse muutumise kiirus: 50% diapasoone - 5 s, 100% - 30 s.
3. Blokeeringu aeg $t_{\text{blok}} \leq 10$ min. (Blokeeringu aeg on aeg, mille ulatuses blokeeritakse regulaator peale töötamist kogu diapasoone ulatuses.)
4. Tundetuse tsoon nii väike kui võimalik kuid mitte üle ± 10 mHz.
5. Surnud tsoon peab olema seadistatav vahemikus ± 200 mHz.
6. Turbiini regulaatori statism peab olema diapasoone 2 - 6 %.
7. Peab olema võimalus kasutada kohalikke või distantsjuhtimisvahendeid. [6]

Kuna Eestisse hüdroelektrijaamu teha pole võimalik, siis lisaks Kiisale tuleks töökindluse tõstmiseks ja avariijärgse olukorra nõuete täitmiseks gaasiturbiine juurde ehitada. Arvestades, et Kiisa reservjaam maksis 135 miljonit eurot, siis praeguste turuhindade juures läheks see veel enam maksma ja kulud reservide hoidmiseks kahekordistuksid.

Hetkel on reservide hoidmiseks kulud ca 5,5 miljonit eurot aastas [6]. Selle hulka kuuluvad Estlinkide ja Kiisa AREJ hooldused.

Kaubandusvõime Venemaaga on Baltikumil väga väike ja Venemaa ei sõltu enam meie liinidest, seega kahjunõuet energiatriansiidi võimekuse vähenemise tõttu oodata ei ole.

2.6 Teostatud uuringud

1) JRC – Integration of the Baltic States into the EU electricity system: A technical and economic analysis

Aruanne analüüsib Venemaa võrgule alternatiive: Balti riikide saartalitlus nii Estlinkide ja Nordbalti töösolekul kui ka ilma, ühildumine Põhjamaadega ja ühinemine Mandri-Euroopaga olemasoleva Litpol 1 abil kui ka juurdeehitatava Litpol 2 olemasolul. Lisaks on arvesse võetud Leetu ehitatava Visagina tuumajaama ehitust. Kõige odavamaks variandiks osutus liitumine Mandri-Euroopa alaga kahe vahelduvvooluliini abil. Tuumajaama ehitusel oleks tootmiskulud variantidest kõige väiksemad, aga nõuaks Leetu avariireservide juurde ehitamist.

Aruanne võtab arvesse vaid 330 kV võrgu ehituskulusid, aga mitte 110 kV ja jaotusvõrgu ehituskulusid. Samuti ei võeta arvesse Balti riikide väliseid investeeringuid (nt Poolas) ja Venemaa võrgust lahkumise kulusid. Seega rahalise võrdluse erinevate võimaluste vahel uuring annab, aga lõplikku majanduslikku mõju antud uuring ei kajasta. Peale Visagina tuumajaama ehituse oleks võidud arvesse võtta ka teiste uute elektrijaamade ehituse.

2) Fingrid, Statnett, Svenska Kraftnät and Energinet - Impact of Baltic synchronization on the Nordic power system stability

Uuring analüüsib Baltimaade elektrisüsteemi liitumist NORDELiga ja selle mõju Põhjamaadele. Tulemuseks saadi, et sageduse stabiilsus paraneb ja inerts suureneb, aga seevastu pinge pole nii stabiilne ja nõuab reaktiivvõimsuse kompenseerimist. Samuti on see projekt väga kallis – 550-600 mln eurot ilma Baltimaade võrgu arendamise ja reservide ehitamiseta, mis ei olnud Põhjamaade vastuvõetav.

Tehnilise ja majandusliku poole analüüs on põhjalik ja määrab ära, et Balti riikidel on lihtsam ja odavam jääda kas Vene süsteemi või liituda Mandri-Euroopa süsteemiga. Põhjamaade süsteemi stabiilsusele mõjuks Balti riikide liitumine negatiivselt. Süsteemi stabiilsuse puhul on põhjalikult arvestatud pinge ja sageduse muutusi terves sagedusalas. Majanduslik hinnang on küll välja toodud, aga konkreetseid summasid kõikidele investeeringutele pole toodud, nt primaarreservi hoidmisele, ning uuring võtab arvesse vaid Estlink 1 ja Estlink 2 olemasolu, aga mitte juurde ehitatavaid lisavõimsusi. Lisa vahelduvvoolu merekaablid võivad tehniliselt kasuks tulla ja süsteemi stabiliseerida, kuigi selle maksumus võib olla vastuvõetamatu.

3) Gothia Power - Feasibility study on the interconnection variants for the integration of the Baltic States to the EU internal electricity market

Uuring näitab Baltimaade Mandri-Euroopa alaga liitumise teostatavuse taset tehnilisest, majanduslikust ja juriidilistest aspektidest lähtudes. Tulemus näitab, et liitumine on võimalik, kui Baltimaade siseseid ühendusi suurendatakse ja ka Poola arendab oma võrke Leedu lähedal. Juriidiliselt IPS/UPS alast väljumine on võimalik, aga arvestama peab nt Kalinigradi regiooni varustuskindluse tagamisel.

Uuringu tulemus näitab, et Kaliningradi jäämisel asünkroonseks Balti riikidest, siis oleks töökindluse tarvis ka teist vahelduvvooluliini Leedu ja Poola vahele. Praktikas seda aga ei tehta. Küll aga tehakse alalisvooli merekaabel samade riikide vahele, mida antud uuring ei kajasta. Seega uuring erineb tegelikest sammudest.

Majanduslikus analüüsis pole mainitud summasid, mis Kaliningradi liitumine Baltimaadele tähendaks ning erinevate kulutuste maksumusi. Visaginase tuumajaama ehitusel peaks sekundaar-

ja tertsiaalreserviks tegema samuti kulutusi. Majanduslikust küljest ei saa seega selle uuringu põhjal hinnata, kas Mandri-Euroopasse liikumine oleks hea või mitte.

4) Tractebel - Study of the Isolated Operation of the Baltic Power System

Analüüsib Balti riikide isoleeritud olekut teistest süsteemidest. Planeeriti teha 2019 suvel isoleeritud süsteemi katse, kui Balti riigid eraldatakse Venemaa sagedusalast, sealhulgas Kaliningradist. Katse oleks kestnud 18 tundi. Tehniliste nõuete järgi on see võimalik, kuid nõuab treenitud dispetšereid. Uuring võtab arvesse tehnilisi aspekte, nagu nt sageduse stabiilsus ja mitu elektrijaama peab kindlasti töös olema.

Kuna eralduskatse on edasi lükatud, siis oleks tarvis teha täiendavaid analüüse, kas ka talvel oleks eralduskatse mõeldav ning kas kaugemas tulevikus on meie saartalitus võimalik, sest võimsused regioonis on vähenemas. Majandusliku kasu või kahju uuring samuti ei näita, aga tehniliselt on eralduskatse teostatav.

5) ICDS „The Geopolitics of Power Grids“

Raport annab ülevaate poliitilistele ja energiajulgeolekualastele aspektidele, mida Venemaa võib plaanida. Peatutakse Venemaa tegevusel Eestis, Lätis, Leedus ja Poolas sõjaliste mõjutuste läbi. Enamasti peetakse silmas hübriidsõda, mille hulka kuuluvad nt küberrünnakud, valeinformatsiooni levitamine ja Vene vähemuste toetamine Baltimaades, aga ka otsesest sõjalist rünnakut elektrisüsteemile nagu tehti Donetskis ja Luganskis. Lisaks antakse ülevaade, kas parem oleks liituda Euroopa või Põhjamaade suunal.

Raport edastab, et liitumine Mandri-Euroopasse on tehniliselt veidi mõistlikum, aga kaks vahelduvvoolu liini Poola ja Leedu vahel oleks Balti riikidele kaubandusliku ja julgeoleku seisukorrast parem. Põhjamaadega liitumine nõuaks rohkem aega, sagedus pole nii stabiilne kui Mandri-Euroopa süsteemis ja uute vahelduvvoolu merekaablite puhul nõuaks julgeoleku suurendamist Läänemerele.

Peale sünkroniseerimist võib Venemaa Balti riikide elektriliinid ohtu seada, seda nii füüsiliste rünnakute kaudu Suwalki kanalis kui ka küberrünnakute kaudu. Seetõttu oleks Poolal ja Leedul tarvis Suwalki kanalis suurendada kaitset tähtsate taristu objektide juures. Ka küberturvele peab rohkem tähelepanu suunama – nt EU ülese küberkaitse agentuuri loomine.

Julgeoleku seisukohast annab raport tugeva ülevaate ja antud soovitudele kaitse suurendamise koha pealt peaks kindlasti tähelepanu pöörama. Samuti saab kinnituse, et Põhjamaadesse liitumine oleks tehniliselt ja majanduslikult kehvem variant kui teostatav ühendamine Mandri-Euroopa suunal.

KOKKUVÕTE

Aastaks 2025 on Balti riigid soovinud oma elektrivõrgud liita Mandri-Euroopa sagedusalaga. Projekt on äärmiselt oluline ja vastutusrikas, sest elektrivarustus peab säilima. Tehniliselt on vaja leida sobivaim lahendus ja investeringud ei tohi oluliselt suureneda, kui liitumist ei toimuks. Lisaks peab arvestama uute võimsuste vajadusega.

Eesti on BRELLis olnud pikki aastakümneid ja süsteem on olnud väga töökindel. Idasuunalised võimsusvood on piisavad, et tagada elektri varustuskindlus N-1 olukordades. Kui lõuna suunal võis enne pidada ühendusi nõrgaks, siis Eesti-Läti kolmas liin lahendab probleemi, tõstes võimsusvoogu 700 MW võrra ning lisaks renoveeritakse ülejäänud Eesti-Läti liine. Põhja suunal on olemas ühendused Soomega Estlink 1 ja Estlink 2 abil, seega on välisühendusi hetkel Eestis piisavalt.

Sageduse stabiilsus on olnud BRELLis samuti hea, küll aga juhib suure süsteemi, mille väike osa on ka Eesti, sagedust hetkel dispetšerkeskus Moskvast. Venemaa ise ei saa Eesti sagedust muuta, ilma et nende enda sagedus kannatada ei saaks. Venemaa on tegemas oma elektriliinid täielikult Baltimaadest neutraalseks, Venemaa elektrisüsteemist eraldumine enne sünkroniseerimist Mandri – Euroopa elektrisüsteemiga on meile isoleeritud saartalitus ja tõsine oht Eestile. Seega on oht Eestile Venemaast eraldumise puhul siis, kui Eesti ei jõua sünkroniseerida Mandri-Euroopaga.

BRELList lahkumisel oli Eestil mitmeid alternatiive: liitumine NORDELiga põhjas, saartalitluseks jäämine ja Mandri-Euroopa elektrisüsteem lõunas. Neist esimest oli tehniliselt keeruline teostada, sest see oleks nõudnud vahelduvvoolu merekaableid ja majanduslikult ei oleks Eesti nõustunud ilma Põhjamaade panuseta projektis osalema. Põhjamaad ei näinud liitumises kasu, vaid pigem poliitilist riski. Saartalitus tähendaks Eestile, Lätile ja Leedule vahelduvvoolu ühenduste puudumist. Väike süsteem on aga töökindluse poolest ebakindel ja iga elektrijaama rike omab suurt kaalu. Mandri-Euroopa elektrisüsteem, kuhu Eesti liigub, on kolmest süsteemist suurim ja majanduslikult oli sellega reaalne liituda tänu Euroopa Liidu kaasfinantseerimisele.

Mandri-Euroopa elektrisüsteemiga liitumisel toimub sünkroniseerimine läbi Poola Litpol Linki, mille võimsust tõstetakse poole võrra, 1000 MW-ni. Lisaks ehitatakse kaubanduse jaoks juurde alalisvoolukaabel Poola ja Leedu vahele. Eesti pakkus ka II vahelduvvoolu ülekandeliini ehitust, mis ülekandevõimsusi veel suurendanud oleks, aga Poola oli ideele vastu. Liitumine Mandri- Euroopa sagedusalaga toob meile sageduse reguleerimise kohustuse, aga meie liitumine ei tohi mõjutada Mandri- Euroopa sagedusala. Ka Eestil endal tuleb ehitada sünkroonkompensaatorid, mis lisavad süsteemi inertsi ja hoiab sageduse stabiilsena.

Uues sagedusalas hakatakse eabilanssi katma Venemaa hüdro- ja gaasielektrijaamade asemel peaaesjalikult Poola kivisööelektrijaamadega, mis on suure inertsiga, aga asuvad kaugemal ja ühendused Baltimaadega nõrgad. Bilanss on Eestil olnud erinevalt teistest Balti riikidest valdavalt positiivne, aga prognooside järgi lähitulevikus see nii enam ei ole ja ilma uute võimsusteta muutume elektrit importivaks riigiks. Bilanssi saaks edaspidi hakata katma Poola, aga ka nemad on defitsiidis ja regioonis tervikuna on seega uued võimsused vajalikud.

Mandri-Euroopa ühendsüsteemi astumisel on varustuskindluse kolmest punktist (vajaliku võimsuse tagamine, tugev riigisisene elektrivõrk, energiavaru olemasolu) olulisim silmas pidada võimsuse tagamist, sest riigisiseseid võrke tugevdatakse uue Eesti-Läti liini abil ja energiavaru on aastani 2025 samuti piisav. Et tipukoormuse ajal vajalik võimsus olema oleks, on meil hetkel võtta Estlink 1 ja Estlink 2. Varustuskindlus peale 2025. aastat väheneb, seega on pikas perspektiivis tarvis ehitada juurde elektrijaamu. Eestil peavad säilima välisühendused nii põhja kui ka lõuna suunal. Tipukoormuste jaoks on olulised Estlinkide töökindlus ja investeeringud tarbijate toetamisel akutehnoloogia ja vesiniktranspordi arendamisel. Soome lisanduvad tuumajaamad aitavad terves regioonis varustuskindluse taset tõsta ning kõik riigid meie piirkonnas, eriti Leedu, arendavad uute elektrijaamade tehnoloogiaid.

Kui Venemaa seab eesmärgiks end Baltimaadest lahti ühendada, enne kui Balti riigid Mandri-Euroopa elektrisüsteemiga liituvad, siis peame valmis olema saartalitluses töötama. Selleks on tarvis esialgu teha eralduskatse ning analüüsida, kui kaua saame isoleeritud süsteemis hakkama, ilma et varustuskindlus ohtu satuks.

Tehniliselt oleks parim variant Venemaa ja Mandri-Euroopa elektrisüsteemid tervikuna kokku ühendada, aga tänases poliitilises olukorras pole see võimalik. Suuremas süsteemis oleks N-1 olukorras igas süsteemi punktis ohutum.

Majanduslikult Eesti sünkroniseerimise investeeringutega esialgu suurt ei kaota, aga hiljem sünkroontöö tagamiseks kulud tõusevad. Ka ilma Mandri-Euroopa süsteemi astumiseta oleks Eestil vaja oma võrke uuendada, nüüd on aga Euroopa Liit kaasfinantseerija. Euroopa Liidu abi tõttu võrgutasude suuremat tõusu oodata pole, pikemas vaates tagavad investeeringud varustuskindluse tõusu, nt Eesti-Läti kolmanda liini olemasoluga ja sünkroonkompensaatorite ehitamisega. Venemaa kvoodivaba elektri osakaal väheneb ja kohalike elektritootjate olukord paraneb, me liigume süsteemi, kus turg on läbipaistvam. Samas peab reservjaamu uues süsteemis juurde ehitama, et tagada varustuskindlus ka Litpoli ühenduse mittetöötamisel.

SUMMARY

By 2025, the Baltic States have wished to connect their electricity networks to the Continental Europe frequency band. The project is extremely important and responsible, because electricity supply must be maintained. Technically, it is necessary to find the most appropriate solution and investments should not increase significantly, if joining would not happen. Furthermore, the addition of new capacities are needed.

Estonia has been in BRELL for decades and the system has been very reliable. The eastern power flows are sufficient to ensure security of electricity supply in N-1 situations. If the connections were weak in the south, then the Estonian-Latvian third line solves the problem by increasing the capacity by 700 MW and in addition the remaining Estonian-Latvian lines are being renovated. In the north, there are connections to Finland with Estlink 1 and Estlink 2, so there are enough external connections in Estonia at the moment.

Frequency stability has also been good in BRELL, but the big system's, where Estonia also is, stability is currently controlled by the dispatch center in Moscow. Russia itself cannot change the frequency of Estonia without suffering its own frequency. Russia is making its electricity lines completely neutral from the Baltic States, separation from the Russian electricity system before synchronization with the Continental European electricity system means isolated island activity and a serious threat to Estonia. Thus, the danger occurs when Estonia fails to synchronize with mainland Europe before Russia desynchronizes from Baltics.

When leaving BRELL, Estonia had several alternatives: joining NORDEL in the north, staying on the island mode and the continental European electricity system. The first of these was technically difficult to implement because it would have required AC power cables and economically, Estonia would not have agreed to participate in the project without the Nordic contribution. The Nordic countries did not see the benefits of joining, but rather the political risk. Island mode would mean that Estonia, Latvia and Lithuania had no AC connections. The small system, however, is insecure in terms of reliability and every power plant's failure has a great weight. The continental European electricity system, to which Estonia is moving, is the largest of the three systems, and economically it was real to join them because of economical help from European Union.

When connected to the Continental European electricity system, synchronization will take place through the Polish Litpol Link, which will increase its capacity by half to 1000 MW. In addition, a DC power cable between Poland and Lithuania will be built for trade. Estonia also offered the construction of an alternating current line II, which would have increased the transmission capacity,

but Poland opposed the idea. Also, Estonia has to build synchronous compensators, which adds inertia to the system and keeps the frequency stable.

In the new frequency band, the imbalance, which is now covered by Russian coal power plants, will be then covered by Poland hydro and gas power plants which have large inertia, but located further away and the connections with the Baltic countries will be weaker. The electrical balance has been largely positive for Estonia, unlike other Baltic countries. However, according to forecasts, this is not like that in the near future and without new capacity, we will become an importing country. The balance could be covered by Poland, but they too are in deficit and the region as a whole needs new capacities.

In the interconnection of the continental Europe, the most important of the three points of security of supply (ensuring the necessary capacity, a strong domestic electricity network, the availability of energy supply) is to ensure capacity, as domestic networks will be strengthened by the new Estonian-Latvian route and the energy supply will be sufficient until 2025. In order to have the required power at peak load, we currently have Estlink 1 and Estlink 2. The security of supply after 2025 is reduced, so in the long run it is necessary to build power plants. Estonia must maintain its external connections both north and south. For peak loads, reliability of Estlinks and investments in supporting consumers in developing battery technology and hydrogen transport are important. The Finnish nuclear power plants will help to increase the security of supply throughout the region, and all countries in our region, especially Lithuania, will develop technologies for new power plants.

If Russia aims to desynchronize itself from the Baltic States before the Baltic States are joined with the mainland electricity system, then we must be ready to work on the island mode. To do this, it is necessary to make a separation test initially and analyze how long we can handle the isolated system without problems with security of supply.

Technically, the best option would be to connect the electricity systems of Russia and continental Europe as a whole, but this is not possible in today's political situation. In a larger system, the N-1 situation would be safer at every point of the system.

Economically, Estonia does not lose from synchronization investments, but later the costs increase as a result of synchronous work. Even without a continental European system, Estonia would need to upgrade its networks, but now the European Union is a co-financer. There is no expectation of higher network charges due to EU help, and in the long run investments will increase security of supply, e.g. the existence of the third line of Estonia-Latvia and the construction of synchronous compensators. Russia's share of quota-free electricity is declining and the situation of local electricity producers is improving, we are moving into a system where the market is more

transparent. At the same time, the reservoirs must be built in the new system to ensure security of supply when the Litpol connection is not working.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Teaduste Akadeemia, „TA energeetikanõukogu istung,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.akadeemia.ee/_repository/file/TEGEVUS/ENERGEETIKANOUKOGU/Lisa%201%20TA%20energeetikanoukogu%20seisukoht%2017_04_%20arutelus%20RKs%20ja%20TAs.pdf. [Kasutatud 12 12 2018].
- [2] Elering, „Elektrisüsteem,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/elektrisusteem>. [Kasutatud 7 11 2018].
- [3] Elering, „Elektri põhivõrgu kaart,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/elektri-pohivorgu-kaart>. [Kasutatud 7 11 2018].
- [4] M. Meldorf, T. Tikk ja J. Kilter, Elektrivõrgu operatiivjuhtimissüsteem, 2010.
- [5] Elering, „Eesti elektrisüsteem,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/book/export/html/1152>. [Kasutatud 6 11 2018].
- [6] Juhendaja, „VÕIMALIKUD VARIANDID EESTI JA BALTIMAARDE ENERGIASÜSTEEMIDE ÜHENDAMISEKS NAABERSÜSTEEMIDEGA“.
- [7] Horisont, „Mati Valdma: Energiasüsteemid,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAV0160/HORISONT_5_2011_mati_valdma_energiasysteemid.pdf. [Kasutatud 12 02 2019].
- [8] Elering, „RKK analüüs: desünkroniseerimine on geopoliitiliselt hädavajalik,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/rkk-analuus-desunkroniseerimine-geopoliitiliselt-hadavajalik>. [Kasutatud 7 11 2018].
- [9] ERR. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.err.ee/527906/veskimagi-balti-riikide-vene-elektrivorgust-lahutamine-voib-toimuda-2025-aastal>. [Kasutatud 04 20 2019].
- [10] Elering, „Eesti-Läti kolmas ühendus,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/eesti-lati-kolmas-uhendus>. [Kasutatud 7 11 2018].

- [11] Elering, „Sünkroniseerimine Mandri-Euroopaga,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/sunkroniseerimine-mandri-euroopaga#tab0>. [Kasutatud 22 1 2019].
- [12] Postimees, „Elering laiendab Venemaa võrgust desünkroniseerimiseks Harku alajaama,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://majandus24.postimees.ee/4833074/elering-laiendab-venemaa-vorgust-desunkroniseerimiseks-harku-alajaama>. [Kasutatud 15 12 2018].
- [13] Postimees, „Veskimägi: Venemaa elektrisüsteemist lahkumine langetab võrgutasusid,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://majandus24.postimees.ee/6426618/veskimagi-venemaa-elektrisusteemist-lahkumine-langetab-vorgutasusid>. [Kasutatud 28 12 2018].
- [14] Postimees, „Teadlased arvustavad elektrisüsteemi Venemaast lahtiühendamist,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://majandus24.postimees.ee/4482918/teadlased-arvustavad-elektrisusteemi-venemaast-lahtiuhendamist>. [Kasutatud 28 11 2018].
- [15] Elering, „Bilansi tagamise ehk tasakaalustamise eeskirjad,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://elering.ee/sites/default/files/attachments/Bilansi_tagamise_ehk_tasakaalustamise_eeskirjad_11_2016.pdf. [Kasutatud 28 12 2018].
- [16] Elering, „Elektrituru käsiraamat,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/sites/default/files/elektrituru-kasiraamat.pdf>. [Kasutatud 12 12 2018].
- [17] ICDS, „The Geopolitics of Power Grids,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://icds.ee/wp-content/uploads/2018/03/ICDS_Report_The_Geopolitics_of_Power_Grids_Tuohy_Jermalavicius_Bulakh_March_2018.pdf. [Kasutatud 18 11 2018].
- [18] Postimees, „Taavi Veskimägi, Tomas Jermalavičius: elektrivõrkude geopoliitika,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://arvamus.postimees.ee/4472839/taavi-veskimagi-tomas-jermalavicius-elektrivorkude-geopoliitika>. [Kasutatud 13 12 2018].

- [19] K. Kilk ja K. Stoicescu, Interviewees, <https://vikerraadio.err.ee/821347/reporteritund-elektrisusteemi-eraldamine-venemaast>. [Intervjuu].
- [20] U. Kikas, „Energiajulgeolek Eesti Vabariigis“.
- [21] Vabariigi Valitsus, „Ratas kohtumisel Poola peaministriga: Balti elektrisüsteemide ühildamine Euroopaga on väga oluline energiajulgeoleku küsimus,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.valitsus.ee/et/uudised/ratas-kohtumisel-poola-peaministriga-balti-elektrisusteemide-uhildamine-euroopaga-vaga>. [Kasutatud 22 01 2019].
- [22] Elering, „Balti riigid ja Poola käivitasid ametlikult liitumise Mandri-Euroopa elektrisüsteemiga,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/balti-riigid-ja-poola-kaivitasid-ametlikult-liitumise-mandri-euroopa-elektrisusteemiga>. [Kasutatud 12 12 2018].
- [23] Teaduste Akadeemia, „J. Uiga: Sünkroniseerimine,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.akadeemia.ee/_repository/file/TEGEVUS/ENERGEETIKANOUKOGU/180927_Synkroniseerimine_%20J_%20Uiga.pdf. [Kasutatud 23 01 2019].
- [24] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt ja J. Kilter, Jaotusvõrgud, 2007.
- [25] K. Kilk, „Loengusari TTÜ,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.energia.ee/-/doc/10187/pdf/concern/loengusari_tty_kalle_kilk.pdf. [Kasutatud 16 12 2018].
- [26] Litgrid, „The Baltic States integration to the EU internal electricity market,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.litgrid.eu/uploads/files/dir80/dir4/8_0.php. [Kasutatud 24 01 2019].
- [27] EEES, „Rein Oidram: Balti Riikide Syn,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.eees.ee/images/EEES/artiklid/ReinOidramBaltiRiikideSyn.pdf>. [Kasutatud 6 11 2018].
- [28] Elering, „Varustuskindluse aruanne 2018,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://elering.ee/sites/default/files/public/Infokeskus/elering_vka_2018_web.pdf. [Kasutatud 12 12 2018].

- [29] Elering. [Võrgumaterjal]. Available: https://elering.ee/sites/default/files/attachments/20180220_reaktiivv%C3%B5imsuse_aruanne_v2_Limited.pdf. [Kasutatud 13 05 2019].
- [30] Elering, „SCADA,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/taxonomy/term/184>. [Kasutatud 21 1 2019].
- [31] Riigikogu, „Pikksilm Einari Kisel,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.riigikogu.ee/wpcms/wp-content/uploads/2017/11/pikksilm_einari_kisel.pdf. [Kasutatud 11 2 2019].
- [32] Postimees. [Võrgumaterjal]. Available: <https://arvamus.postimees.ee/1150802/andres-troop-milleks-meile-avatud-elektriturg>. [Kasutatud 01 04 2019].
- [33] Äripäev. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.aripaev.ee/uudised/2019/02/06/balti-riigid-plaanivad-vene-elektrile-importitole->. [Kasutatud 04 04 2019].
- [34] Tuuleenergia, „Leedu: Baltimaad peavad sünkroniseerimisega kiirustama,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.tuuleenergia.ee/2018/03/leedu-baltimaad-peavad-sunkroniseerimisega-kiirustama/>. [Kasutatud 23 11 2018].
- [35] Energiatalgud. [Võrgumaterjal]. Available: <https://energiatalgud.ee/index.php/M%C3%B5iste:Bilansienergia>. [Kasutatud 03 04 2019].
- [36] Elektrilevi, „Hinnapaketid,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.elektrilevi.ee/abi/hinnapaketid#pricepackage_q5. [Kasutatud 7 11 2018].
- [37] Konkurentsiamet, „Bilansi tagamise ehk tasakaalustamise eeskirjad 2017,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.konkurentsiamet.ee/public/Bilansi_tagamise_ehk_tasakaalustamise_eeskirjad_082017.pdf. [Kasutatud 27 11 2018].
- [38] Elering, „<https://elering.ee/elektri-tootmine-kasvas-mullu-kaheksa-ja-tarbimine-uheprotsendi>,“ [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 28 12 2018].

- [39] ERR, „Elektri tootmine kasvas Eestis mullu kaheksa protsenti,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.err.ee/686728/elektri-tootmine-kasvas-eestis-mullu-kaheksa-protsenti>. [Kasutatud 15 12 2018].
- [40] bestpaths-project, „Baltic energy systems synchronisation by 2025,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.bestpaths-project.eu/en/news/543-baltic-energy-systems-synchronisation-by-2025>. [Kasutatud 21 11 2018].
- [41] Elering. [Võrgumaterjal]. Available: https://elering.ee/sites/default/files/public/Investorile/Elering_AA_210x280_2018_EE_18032019_pages.pdf. [Kasutatud 17 05 2019].
- [42] A. Kõks, „Energia infrastruktuuri töö- ja häirekindlus ning energia“.
- [43] Energiatalgud. [Võrgumaterjal]. Available: https://energiatalgud.ee/img_auth.php/8/8b/WEC-Eesti_Varustuskindlus%2C_energiajulgeolek_Seminari_kokkuv%C3%B5te_30.04.2014.pdf. [Kasutatud 03 04 2019].
- [44] TTÜ, „Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ttu.ee/instituut/elektroenergeetika-ja-mehhatroonika-instituut/oppetoo-55/95802/95813/95814/>. [Kasutatud 13 12 2018].
- [45] Energiatalgud, „Varustuskindlus,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://energiatalgud.ee/index.php/Varustuskindlus?menu-115#cite_note-VKA_2014-3. [Kasutatud 23 11 2018].
- [46] Elering, „Varustuskindluse aruanne 2017,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://elering.ee/sites/default/files/public/Elering_VKA_2017.pdf. [Kasutatud 10 12 2018].
- [47] osale.ee, „Eesti riiklik energia- ja kliimakava,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.osale.ee/konsultatsioonid/files/consult/299_REKK%202030.pdf. [Kasutatud 16 2 2019].
- [48] Elering, „Elering saab Euroopa Liidult esimesed 141 miljonit eurot sünkroniseerimise investeeringuteks,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://elering.ee/elering-saab>

euroopa-liidult-esimesed-141-miljonit-eurot-sunkroniseerimise-investeeringuteks.
[Kasutatud 27 01 2019].

- [49] T. Veskimägi, „Ilma elektrita pole mitte midagi,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.aripaev.ee/arvamused/2018/05/17/taavi-veskimagi-ilma-elektrita-pole-mitte-midagi>. [Kasutatud 26 11 2018].
- [50] T. Veskimägi, „Äripäev,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.aripaev.ee/uudised/2018/12/27/venemaa-voib-elektrivorgu-sageduse-hoidmise-eest-kusida-miljoneid-aastas>. [Kasutatud 28 11 2018].
- [51] M. Kruus, „Tuuleenergia,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.tuuleenergia.ee/2018/06/martin-kruus-eestil-pole-euroopa-elektrisusteemiga-liitumisele-alternatiivi/>. [Kasutatud 16 02 2019].
- [52] ENTSO-E, „Regional Investment Plan 2017,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://docstore.entsoe.eu/Documents/TYNDP%20documents/TYNDP2018/rgip_BS_Full.pdf. [Kasutatud 23 1 2019].
- [53] Ž. Vaičiūnas, „Eesti Päevaleht,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://epl.delfi.ee/news/arvamus/versus-kas-balti-riigid-voivad-jaada-lootma-ainult-euroopa-elektrile?id=85647849>. [Kasutatud 22 3 2019].
- [54] ERR. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.err.ee/923641/eesti-ettevete-solmis-uu-polvkonna-tuumareaktori-tasuvusuuringu-kokkuleppe>. [Kasutatud 19 04 2019].
- [55] Äripäev. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.aripaev.ee/uudised/2018/03/22/baltikumi-sunkroniseerimise-kokkulepe-solmitakse-tanavu>. [Kasutatud 03 04 2019].
- [56] Pealinn. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.pealinn.ee/koik-uudised/elering-venemaa-voib-tulevikus-susteemiteenuste-eest-tasu-kusida-n234046>. [Kasutatud 05 04 2019].
- [57] Elering, „Varustuskindluste aruanne 2014,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://elering.ee/sites/default/files/public/Elering_varustuskindluse_aruanne_2014_1.pdf. [Kasutatud 9 12 2018].

[58] TööstusEST. [Võrgumaterjal]. Available:
<https://toostusest.ee/uudis/2018/09/04/elektrivorgu-uhendamiseks-euroopaga/>.
[Kasutatud 19 04 2019].