



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

# **Elektertransport ja selle mõju elektrisüsteemi talitlusele**

Uurimustöö 1.1-4/12/347 / Lep12183 aruanne

**Tallinn 2013**

Uurimustöö täitjad:

Ivo Palu	dotsent, tellimustöö vastutav täitja, TTÜ elektroenergeetika instituut
Jelena Šuvalova	vanemteadur, TTÜ elektroenergeetika instituut
Tanel Jalakas	vanemteadur, TTÜ elektrotehnika instituut
Argo Rosin	vanemteadur, TTÜ elektrotehnika instituut
Jaan Niitsoo	assistent, TTÜ elektroenergeetika instituut
Mari Andresen	laborant, TTÜ elektroenergeetika instituut
Elsa Lepp	laborant, TTÜ elektroenergeetika instituut
Jako Kilter	elektrisüsteemi ekspert, Elektertranspordi R&D projekti juht, Elering AS
Mart Landsberg	elektrivõrgu planeerimise osakonna juhataja, Elering AS

# SISUKORD

SISUKORD .....	3
Uurimustöö püstitus .....	5
Elektertransport ja selle mõju elektrisüsteemi talitlusele .....	5
1. Elektertransport Euroopas .....	7
1.1 Elektriautod .....	7
1.2 Elektrirongid .....	10
2 Elektertranspordi areng Eestis .....	15
2.1 Elektriautode areng ja levik Eestis .....	15
2.2 Elektrirongide areng ning uued FLIRT-tüüpi elektrirongid .....	16
3 Elektertranspordi ühendusviisid ja kasutatavad parameetrid .....	18
3.1 Elektriauto ühendusviisid ja laadimise moodused .....	18
3.2 Elektriraudteesüsteemide areng .....	21
3.3 15 kV vahelduvvoolu 16 2/3 Hz elektriraudteesüsteem .....	21
3.4 25 kV vahelduvvoolu 50 Hz süsteem .....	23
3.5 Kontaktvõrkude põhimõtted .....	24
3.6 Eesti 3 kV alalisvoolu kontaktvõrk .....	26
4 Elektertranspordi mõju elektrisüsteemi talitlusele .....	28
4.1 DC elektertranspordisüsteemid .....	28
4.2 25 kV 50 Hz vahelduvvoolu elektriraudteesüsteem .....	30
4.3 Ebasümmeetrilisest koormusest tingitud püsitalitluse probleemid .....	31
4.4 Pinge asümmeetria .....	33
4.5 Pinge- ja voolukõverate moonutused .....	36
4.6 Elektriraudtee regeneratiivse pidurdussüsteemi siirdeprotsessid .....	37
4.7 Ebäühtlane kontakt pantograafi ja kontaktliini vahel .....	37
4.8 Elektromagnetiline ühilduvus .....	39
5 Elektertranspordi uurimistöö edasiste stsenaariumite määratlemine .....	41
5.1 Elektriautode stsenaariumid .....	41
5.2 Elektrirongide stsenaariumid .....	42
6 Kokkuvõte .....	46
7 Kasutatud kirjandus .....	49
Lisa 1. Valik Euroopa Liidus elektriautodega seonduvaid projekte .....	54

Joonis 1	Investeeringud transportisektorisse aastatel 2007 kuni 2011 [11].....	11
Joonis 2	TEN-T koridoride alusplaan [12].....	12
Joonis 3	TEN-T planeeritud ühendused 2030. a. [12].....	13
Joonis 4	Laadimiseks kasutatavate seadmete ja ühenduste põhimõtteskeem [23].....	19
Joonis 5	Pinge ja vool elektriauto laadimisperioodil [18].....	19
Joonis 6	Võimsused (P, Q, S) elektriauto laadimisperioodil [18].....	20
Joonis 7	Elektriauto laadimisel kulunud energia (autosse sisenev energia) [18].....	20
Joonis 8	Saksamaa 15 kV AC 16,7 Hz elektriraudteesüsteemi energiasüsteemi skeem [25].	22
Joonis 9	Lihtsustatud 25 kV AC 50 Hz energiasüsteemi skeem [25] .....	24
Joonis 10	Kahe rööpapaariga kontaktvõrgu trassi ristlõige [27].....	25
Joonis 11	Kontaktliini liinilõigu lihtsustatud plokskeem .....	26
Joonis 12	1,5 kV alalisvoolu kergraudtee kontaktvõrgus regeneratiivsel pidurdamisel tekkinud liigpinge, kui puudub samas piirkonnas teine vedur [30] .....	29
Joonis 13	25 kV 50 Hz vahelduvvoolu elektriraudtee lihtsustatud ühendusskeem [32].....	31
Joonis 14	Pinge ja voolu vektordiagrammid liitumispunktis sümmeetrilise ning elektriraudtee poolt põhjustatud asümmeetrilise koormuse järgselt [33].....	35
Joonis 15	Pinge ja koormusvoolu kuju kaarleegi poolt tekitatud häiringu korral [40].....	38
Joonis 16	Elektertranspordi uurimissuunad ja stsenaariumid .....	41
Joonis 17	Rail Baltica projekti võimalikud raudteetrassid [43] .....	43
Joonis 18	Rail Baltica projekti trasside pikkused ning võimalikud keskmised kiirused [43].	44

# Uurimustöö püstitus

## ***Elektertransport ja selle mõju elektrisüsteemi talitlusele***

TTÜ energeetikateaduskond on viimastel aastatel uurinud mitmeid elektrivõrguga seonduvaid probleeme. Uuritud on tuulikute mõju süsteemile ja võimalusi neid võrku liita, nende koostööd suurte elektrijaamadega ja võimalusi nende võimsuste tasakaalustamiseks. Uuritud on lühiste tekke põhjusi ja nende esinemissagedust ja välja on pakutud ka viisid nende vähendamiseks. Lisaks on uuritud elektertranspordis jõumuundureid ja parandatud skeemide topoloogiat. Uuritavaid teemasid on veel palju, kuid siiani on vähe tähelepanu pööratud elektertranspordile ja selle mõju elektrivõrgule ja energiasüsteemile tervikuna. Seda tühimiku on täitnud meie lõpetajad, kes on oma lõputöodes uurinud elektriautode mõju ja arenguid ning kiirlaadijate ühendamise võimalikkust ja kulu võrgule. On tõsiasi, et enamus Eestis kasutatavast transpordikütusest põhineb naftal, mistõttu on seos elektrivõrguga pea olematu ja antud teema jäänud senini TTÜ energeetikateaduskonnas käsitlemata.

Seoses Eesti plaaniga võtta kasutusele suur hulk elektriautosid ja tänu üle-eestilise kiirlaadijate võrgustiku rajamisele, on transpordialaste uuringute läbiviimiseks vaja nüüd ka elektroenergeetikute abi. Elektrivõrkude süsteemioperaatorile on antud teema vastu huvi tekitanud plaan rajada elektrirongidel põhinev kiirrongi ühendus Kesk-Euroopaga, millega kaasneb elektriliste võimsuste täiendav voog ülekandevõrkudes. Põhjus käesolevaks uurimustööks ongi kaks arendatavat elektertranspordisüsteemi, elektriautod ja plaanitav Euroopa riikide vaheline kiirraudtee projekt.

### **Projekti vajalikkus Elering ASile**

Suuremahulise elektertranspordi lisandumine energiasüsteemi põhjustab mitmesuguseid muutuseid väljakujunenud struktuuris. Käesolev projekt aitab määrata erinevate muutuste ulatust lähtudes ennekõike tehnilistest kriteeriumitest. Saadud tulemuste alusel on hiljem võimalik täpsemalt hinnata elektertranspordisüsteemide üldmajanduslikku mõju.

Oluline on mainida, et elektriautode kasutuselevõtu mõju elektrivõrgule on pikaajaline protsess, samas kui elektrifitseeritud kiirraudtee mõjud võivad ilmnedä koheselt pärast vastava taristu valmimist. Samuti on iga riigi elektrisüsteem ja kasutatav energiaportfell unikaalne ning sellest tulenevalt on võimalikud lahendused erinevad.

Projekti vajalikkus tulenedes elektertranspordi kasutuselevõtust:

- muutub elektritarbimise asukoht ja iseloom, mistõttu tekib vajadus hinnata piirkondlike tarbimismahtusid;

- elektriautode laiema leviku korral muutub määravaks laadimissüsteemi häiringu-kindlus ülekandevõrgus esinevate häiringute korral;
- elektriautode suurema osakaalu puhul muutub oluliseks neile vajaliku elektrienergia ja võrguühenduse tagamine;
- kontseptsiooni loomise vajalikkus mittetraditsioonilise tarbija (nt elektriraudtee) liitumise korral ülekandevõrguga;
- elektertranspordi mõjude hindamiseks ja elektrivõrgu talitluse arvutamiseks kasutatavate elektertranspordi mudelite puudus.

### **Projekti oodatavad tulemused**

Projekt on oma keerukuse tõttu jaotatud kolmeks etapiks, kusjuures esimeses osas analüüsitakse ja hinnatakse peamiste suuremahuliste elektertranspordiliikide põhimõtteid, kasutatavaid lahendusi ning võimalike mõjude ulatust elektrisüsteemi talitlusele. Samuti määratakse uuritavate elektertranspordiliikide arengustsenaariumid. Projekti teises etapis koostatakse elektertranspordi iseloomustavad arvutusmudelid. Antud mudeleid kasutatakse väljatöötatud erinevate arengustsenaariumite hindamisel ja analüüsimisel. Projekti kolmandasse aastasse on planeeritud teostada mõõtmised tulevastes liitumispunktides. Saadud andmete põhjal oleks võimalik varasemalt koostatud mudeleid täiustada ja verifitseerida. Projekti viimases, kolmandas etapis, oleks võimalik hinnata elektertranspordi mõju Eesti energiamajandusele üldisemalt ja võimalikke investeeringute mahtusid, mis võivad kaasneda elektertranspordi suuremahulise kasutusele võtmisega. Kogu projekti väljundiks on kohalikke olusid arvestav suuremahuline teadustöö, mille raames peaks valmima ka erinevatel tasemetel lõputöid bakalaureuseõppest doktoriõppeni.

# 1. Elektertransport Euroopas

## 1.1 Elektriautod

Kuigi Euroopa elektriautode turg kasvas 2012. aasta jaanuarist oktoobrini võrreldes varasema aasta sama perioodiga 130 protsenti, on tänapäeva elektriautod tervest autoturust endiselt väga väike osa. Näiteks Saksamaal on ainult üks tuhandest müüdud autost elektriauto. Austrias on see näitaja kolm ning Prantsusmaal viis. Hollandis on igast tuhandest müüdud autost aga elektriautod koguni kaheksa ja enim Euroopas müüdud elektriautosid Norras, kus vastav näitaja on 30 [1]. Kokku müüdi Euroopa Liidus 2012. aastal aga vähem kui 20 000 elektriautot [2]. Samas 2012. aastal müüdi ülemaailmselt rekordiline arv sõidukeid – 8,1 miljonit [3].

Kõigist registreeritud uutest mootorsõidukitest on Eesti 2012. aasta lõpu seisuga elektriautode arvestuses Norra järel maailmas teisel kohal. Kui Eestis on registreeritud 1 elektriauto iga tuhande sõiduauto kohta, siis Norras on vastav näitaja 4. Eestile järgneb Holland, kus iga tuhande sõiduauto kohta on registreeritud 0,6 elektriautot [4]. Eestis on kokku registreeritud 601000 sõiduautot (M1), seal hulgas 573 (0,09%) elektriautot [5].

Kiirlaadijate võrku arvestades, on kiirlaadimisstandardit toetava organisatsiooni CHAdeMO andmete kohaselt jaanuari seisuga maailmas paigaldatud üle 1900 kiirlaadija, neist 521 väljaspool Jaapanit. See teeb 163 kiirlaadijaga Eesti täna suurimaks töötavaks kiirlaadimisvõrguga riigiks Euroopas. CHAdeMO kiirlaadimisstandardit kasutab täna üle 70 000 elektriauto ning lähiaastatel kasvab CHAdeMO kiirlaadijate arv Euroopas märkimisväärselt. 2014. aastaks peaks suurima kiirlaadijate võrguga riik Euroopas olema Suurbritannia 278 laadijaga, talle järgnevad Prantsusmaa 181 laadijaga ning Norra 148 laadijaga. Eesti naabritest on Soomel plaanis paigaldada sellel aastal 22 kiirlaadijat, Rootsil 35 kiirlaadijat ning Venemaal 10. Läti ja Leedu ei ole kiirlaadijate võrgu rajamise osas põhimõttelisi otsuseid veel langetanud. [6]

## Prognoos

Enamik autotööstuseid julgevad ennustada elektriautode reaalselt osakaalu tõusu 3%-lt 10%-ni tervest autoturust, ajavahemikus 2020 kuni 2025 (tabel 1) [7]. Nad on oma tulevikuprognosimisel kasutanud kolme erinevat stsenaariumit:

- Stsenaarium 1 põhineb järgnevatel eeldustel: kliimapoliitika puudumine; nafta hindade mõõdukas kasv; kütusena kasutatakse ka gaasi; teise põlvkonna biokütused jäävad kalliks; autod on endiselt põhiliseks individuaalse liikumise viisiks; autode ühiskasutus linnades kasvab.
- Stsenaarium 2 põhineb järgnevatel eeldustel: ulatuslike kokkulepete saavutamine kliimapoliitikas; investeeritakse tuuma- ja taastuvenergiasse; nafta hindade pidev kasv; energeetikataristu mitmekesistamine; autod on endiselt põhiliseks individuaalse liikumise viisiks; linnades hakatakse kasutama elektrijalgrattaid.
- Stsenaarium 3 põhineb järgnevatel eeldustel: kehtestatakse nõue kasvuhoonegaaside vähendamiseks 50% aastaks 2030; nafta hind kerkib 200\$-ni barrelist; energiaettevõtted investeerivad laadimis- ja vesinikujaamade ehitusse; autokasutust vähendatakse; aktsepteeritakse autode ühiskasutamist; enamik linnasid lubab ainult emissioonivabu transpordiviise.

Sõltumatu konsultatsiooni- ja uurimiskeskus IDTechEx ennustab elektrisõidukite ning nende komponentide müügiarvu kasvu. Nad on jälginud elektriautode ja nende turule toomise arengut viimase 11 aasta jooksul ning on prognoosis puudutanud järgmisi punkte [8]:

- Kümnendi lõpuks müüvad kõige „agressiivsemad“ tootjad pistikust laetavaid hübriide rohkem kui traditsioonilisi sõidukeid;
- Aastaks 2025 on 25% müüdavatest autodest hübriidautod ning 10% puhtalt elektriautod;
- 32% tarnitavatest elektrimootoritest tuleb Hiinast ning 28% USA-st;
- Elektrisõidukid ei piirdu üksnes autodega. Kiiresti kasvavad jahtide, hübriid-elektrirongide, sõjatööstuses kasutatavate masinate elektrifitseerimine. Muude elektrisõidukite äri kasvab üle 50% võrreldes 2012. aastaga.



Tabel 1 Elektriautode kasvustsenaariumid aastaks 2030 [7]

Protsent autode kogumast (%)	2010	I stsenaarium		II stsenaarium		III stsenaarium	
		2020	2030	2020	2030	2020	2030
Sisepõlemismootoriga autod	95,0	79,0	65,0	77,0	59,0	67,0	20,0
Hübriidautod	5,0	15,0	20,0	15,0	13,0	20,0	28,0
Pistikust laetavad hübriidautod	0,0	4,0	10,0	5,0	20,0	8,0	40,0
Akudega elektriautod /kütuseelemendiga autod	0,0	2,0	5,0	3,0	8,0	5,0	12,0
<b>Autode turumaht tk (miljonit autot)</b>	<b>52,0</b>	<b>69,8</b>	<b>85,1</b>	<b>66,5</b>	<b>77,2</b>	<b>63,5</b>	<b>69,9</b>

Massachusettsi uurimiskeskus IDC Energy Insights eeldab, et pistikust laetavate elektriautode ja elektriautode müügi kasv on sarnane siiani müüdud hübriidelektrisõidukite müügiga. Seega võiksid pistikust laetavad elektriautod kümme aastat pärast müügile ilmumist omada 5% turust. [9]

TTÜ elektroenergeetika instituudi bakalaureusetöona [5] uuriti elektriautode levikut ja tehti arvutusi vastava taristu tasuvusele ning võimalikule autode levikule Eestis. Tema prognoos 2012. aastal oli, et 2017. a võiks meil olla teedel ligi 2000 elektriautot.

Tänu elektriautode levikule ja teadusraha olemasolule on elektriautode alaseid projekte väga palju. Valik Euroopa Liidus elektriautodega seonduvaid projekte on toodud käesoleva aruande lisas (lisa 1). Lisaks on võimalik näha elektriautodega seonduvaid projekte aadressilt EL projektide kaardilt (<http://goo.gl/ma8Wd>) [10].

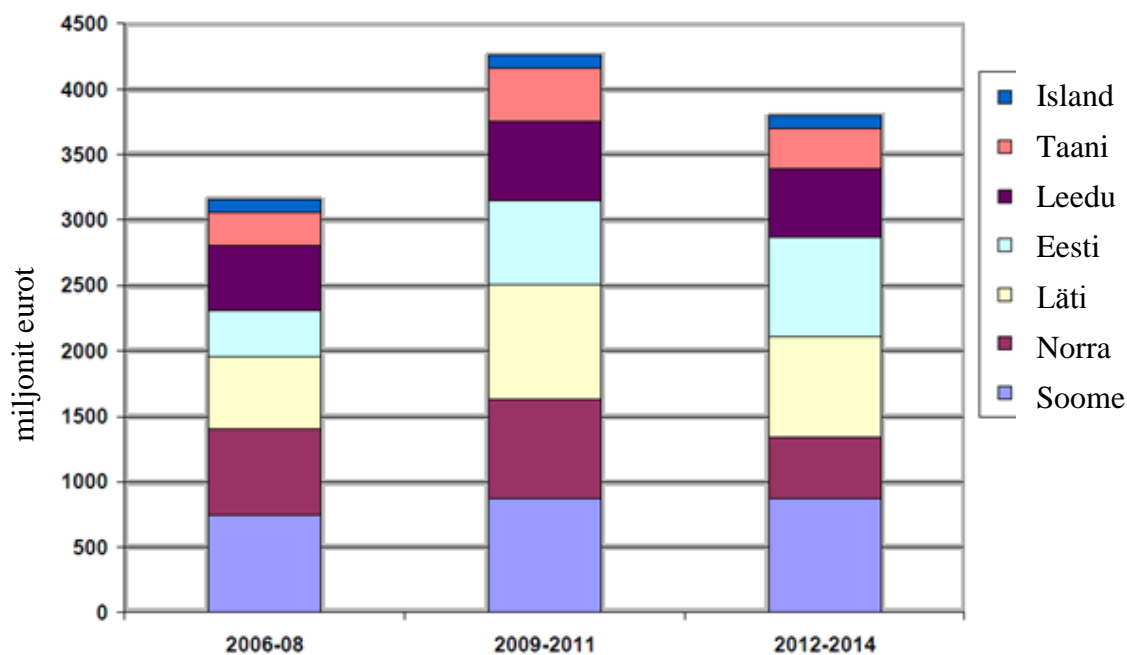
## 1.2 Elektrirongid

Seni tehtud riiklikud investeeringud Läänemere piirkonna transpordisektorisse ajavahemikus 2007-2013, on ligikaudu 95,5 miljardit eurot, millest enamus (80%) on tehtud Poolas, Rootsis ja Saksamaal. Mainitud summast hinnanguliselt 57% on läinud maanteede ehituseks ja 28% raudtee taristutesse. Valitud riikide kaupa on toodud andmed allolevas tabelis 2 ning graafiliselt joonisel 1. Raha on investeeritud seni tõusvas joones, 2003 kuni 2005 vähem kui 15 miljardit, 2006 kuni 2008 ligikaudu 25,3 miljardit ning 2009 kuni 2011 umbes 34,5 miljardit eurot [11].

Tabel 2 Investeeringud transpordi sektorisse aastatel 2007 kuni 2013 [11]

Riik	Raudtee	Maanteed	Sadamad	Lennujaamad	Kokku
Poola	6	23	1	1	<b>31,00</b>
Rootsi	12	16,40	-	0,40	<b>28,80</b>
Saksamaa	5,50	4,37	6,20	0	<b>16,07</b>
Venemaa	1,20	4,50	2	0,40	<b>8,10</b>
Soome	0,50	1,30	0,35	0,35	<b>2,50</b>
Norra	0,20	1,46	0,07	0,14	<b>1,88</b>
Läti	0,55	0,80	0,32	0,53	<b>2,20</b>
Eesti	0,39	1,12	0,16	0,08	<b>1,75</b>
Leedu	0,70	0,69	0,12	0,05	<b>1,57</b>
Taani	-	1,02	-	-	<b>1,02</b>
Island	-	-	-	-	<b>0,30</b>
<b>Kokku</b>	<b>27</b>	<b>55</b>	<b>10</b>	<b>3</b>	<b>95,18</b>
<b>Osakaal %</b>	<b>28</b>	<b>57</b>	<b>11</b>	<b>3</b>	<b>100</b>

Euroopa Liidu 27 liikmesmaad omavad kokku viis miljonit kilomeetrit kattega maanteed ning 213 tuhat kilomeetrit raudteid, millest 110 tuhat kilomeetrit on elektrifitseeritud [12]. Üleeuroopaline transpordi võrgustik (TEN-T ehk *Trans-European Transport Network*) hõlmab endas 95 700 km maanteed, 106 000 km raudtee ühendusi, millest 32 000 km kiirraudteed, 13 000 km siseveoteid, 411 lennujaama ja 404 sadamat. Enamik nendest on juba olemas, kuid peaaegu 20 000 km maanteed ja üle 20 000 km raudteid tuleb veel ehitada või oluliselt uuendada. Selle hinnanguline maksumus on 500 miljardit eurot, millest ainuüksi prioriteetsete projektide (sh Rail Baltica) maksumus on 250 miljardit eurot [13].



Joonis 1 Investeeringud transporti sektorisse aastatel 2007 kuni 2011 [11]

TEN-T mõtte on luua võrgustik, mis kätkeb endas teid, sõidukeid ja innovaatilisi süsteeme turvaliseks ja efektiivseks transpordiks. See idee on püstitatud kahetasandiliselt. Suurlinnu ja riike ühendav alusvõrgustik peab saama valmis 2030. aastaks ning seda täiendavad riigisisese võrgustikud aastaks 2050. Kogu võrgustik peab tagama kõikide Euroopa Liidu regioonide omavahelise ühenduse, kusjuures ükskõik kustkohast transpordivõrgustikuni jõudmine ei tohiks võtta rohkem kui 30 minutit [12]. Alusvõrgustiku loomine põhineb koridoride ideel. Koridorid on juba kaardistatud ning on esitatud joonisel 2 [12].

Liikmesmaad on kinnitanud võrgustiku edasiseks arenguks esialgu 30 prioriteetset projekti, mis on kõige tasuvamad ning tagavad säästvat transpordi arengut. Nendest 18 on seotud raudteede ehitamisega ja kolm nii raudteede kui maanteed rajamisega. Kõik projektid peaksid valmima aastaks 2020. Senini tehtud ning plaanitavate teede graafiline ülevaade on toodud alloleval kaardil (joonis 3), kus rohelisega on märgitud olemasolevad ja mustaga plaanitud ühendused.

Meile lähemate prioriteetsete projektide loetelu on toodud alljärgnevalt [12]:

- PP12 Nordic Triangle railway/road axis
- PP27 "Rail Baltica" axis: Warszawa-Kaunas-Riga-Tallinn-Helsinki

Silmas pidades Rail Baltica projekti, läheb praegune raudtee Tallinnast Lätti läbi Tapa, Tartu ja Valga ning trassi kogupikkus on 275 km. Enamuses on tegemist üherealise teega, ainult

77 km Tallinnast Tapale on kaks rida liipreid. Sellest esimesed 57 km Aegviiduni on elektrifitseeritud. Raudteed ennast on viimasel ajal mõnevõrra parendatud Tapa ja Tartu ning Tartu ja Valga vahelisel alal [14].

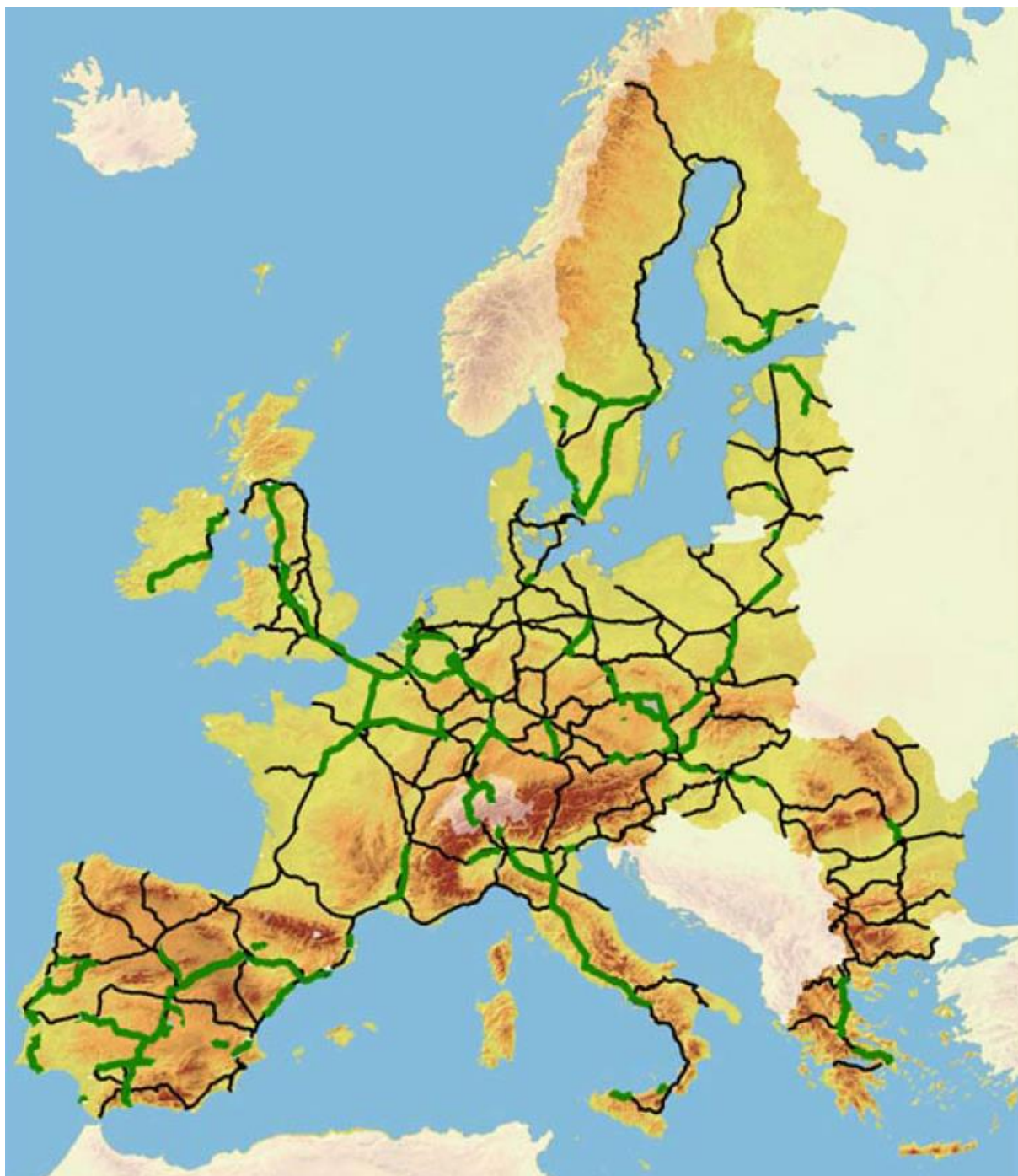


Joonis 2 TEN-T koridoride alusplaan [12]

Lätis on Eesti piirilt Leeduni raudtee kogupikkus 243 km ning see läheb läbi Valka, Valmiera, Riia, Jelgava ja Eleja. Sellest ainult 91 km on kaherealine (Sigulda ja Jelgava vahel) ja elektrifitseeritud vaid 43 km Riiaast Jelgavani [14].

Leedus on raudtee pikkus 333 km, millest 195 km üherealine. Põhimõtteliselt on kogu trass elektrifitseerimata, erandina vaid 10 km Kaunase lähedal [14].

Leedu piirilt Varssavani on raudtee pikkus 340 km, millest 171 km enne Varssavit on kahe-  
realine. Sellest 41 km on elektrifitseeritud [14].



*Joonis 3 TEN-T planeeritud ühendused 2030. a. [12]*

Suure tõenäosusega hakkab aga Rail Baltica kulgema mööda rannikut ehk läbi Pärnu, nagu praegused tööplaanid ette näevad [12]. See trass on seni uuritud variantidest kõige optimaalsem [15].

Eestis nähakse peale Rail Baltica ette ka raudtee arendamise kava Tallinnast läbi Tartu Venemaale. Lätis on eesmärk luua head ühendused Ventspilsist Venemaale ja Valgevenesse. Leedus peaksid ühendused olema Kaunase ja Vilniuse ning Vilniuse ja Valgevene vahel [12].

Rail Balticat nähakse kui osa Läänemere ja Aadria mere piirkondade ühendusest. Peale selle, et Tallinnast oleks rongiga võimalik läbi Varssavi rongiga Berliini sõita, oleks võimalik läbi Varssavi sõita ka Itaaliasse. Ehk toimima peaks hakkama vastavad ühendused:

- Helsinki – Tallinn – Riga – Kaunas – Warszawa – Katowice
- Gdynia – Katowice
- Katowice – Ostrava – Brno – Wien
- Katowice – Žilina – Bratislava – Wien
- Wien – Graz – Klagenfurt – Villach – Udine – Venezia – Bologna – Ravenna

Peale Rail Baltica on selle koridori loomiseks plaanitud ka täiesti uus 130 km pikkune ühendus Austrias Grazi ja Klagenfurti vahele. Selle maksumus on hinnatud umbes 5 miljardile eurole [16].

Alljärgnevas tabelis (tabel 3) on kokkuvõtlikult esitatud elektriraudtee pikkused meie lähirkondades ja seal kasutatavad pinged.

*Tabel 3 Raudteede kogupikkus ja kontaktliinis kasutatav sagedus ning pinge [17]*

Riik	2001, km	2005, km	2010, km	kasutatav pinge ja sagedus
Saksamaa	19 118,699	19 857	20 497	16 2/3 Hz ja 15000 V AC
<b>Eesti</b>	<b>131</b>	<b>130</b>	<b>132</b>	<b>3000 V DC</b>
Läti	257	257	257	3000 V DC
Leedu	122	122	122	50 Hz ja 25000 V AC
Poola	11 965	11 884	11 916	3000 V DC
Soome	2 400	2 617	3 073	50 Hz 25000 V AC

## 2 Elektertranspordi areng Eestis

### 2.1 Elektriautode areng ja levik Eestis

Esimesed elektriautod tulid kasutusse juba 1838. aastal, mis on 52 aastat varem esimeste sise-põlemismootoriga autode turule tulekust. 1913. aastal hakkas elektriautode tootmine kahane-ma ja tänu masstootmisele algas sise-põlemistehnoloogia võidukäik teetranspordis.

Elektromobiilsus sai uue hingamise üheksakümnendate keskel, kui Euroopas ja USAs taas-käivitati elektriautode arendustegevus. Lootes kehtestatud poliitikale<sup>1</sup> arendasid USA suure-mad ettevõtted välja kokku kaheksa erinevat elektriautot. Samal perioodil arendasid erinevad ettevõtted Euroopas 80 kuni 100 kilomeetrise sõiduulatuses ja 100 km/h-se maksimaalse kiirusega elektriautosid, mis olid mõeldud pigem linnaautodeks [18].

Pistikus laetavaid hübriidautosid on testitud alates kaheksakümnendatest. Esimene massiline kommertstoode oli Renault Kangoo Elect'road, mis on tootmises alates aastast 2003. Kõigest hoolimata ei ole senini arendatud elektriautod müüginumbrites väga edukad olnud ning see-tõttu on neid toodetud ainult väikestes mahtudes [18].

Tänapäeval on paljudes riikides käivitatud erinevad elektromobiilsuse programmid. Ühe näi-tena võib tuua Saksamaa, mis on seadnud riiklikus elektromobiilsuse arendamise plaanis am-bitsioonika eesmärgi, mille kohaselt peaks aastaks 2020 olema Saksamaal kasutusel miljon elektrisõidukit. Nimetatud plaani raames investeeritakse ligikaudu üks miljard eurot elektri-sõidukite ja energiasalvestustehnoloogiate arendustöösse ning infrastruktuuri rajamisse. Li-saks riiklikele plaanidele on levinud ka piirkondlikud programmid. Amsterdams näeb elekt-romobiilsuse propageerimise ja elektrisõidukite kasutuselevõtu soodustamise programm ette, et 2015. aastal kasutatakse Amsterdams ligikaudu 10 000 elektrisõidukit ning aastaks 2040 on kõigi Amsterdams läbitud kilomeetrite korral kasutatud elektrilist sõidukit. Selle eesmärgi täitmiseks on rajatud tervet linna kattev laadimisjaamade võrgustik, kus on võimalik oma sõi-dukite tasuta laadida. Lisaks stimuleerib kohalik omavalitsus ettevõtteid looma täiendavaid laadimiskohti, mille tulemusel avati 28. juunil 2011 Amsterdams esimene eraettevõtte poolt rajatud kiir-laadimisjaam [18].

---

<sup>1</sup>Septembris 1990 toimunud California ZEV (zero-emissions vehicle) mandaat nägi ette, et aastaks 2003 peavad vähemalt 10% uutest müüdavatest autodest olema heitgaasivabad autod. 1996 lükati seda tähtaega edasi ja 2002 tühistati sootuks.

ELMO (Eesti elektromobiilsuse programm) projekti raames kaeti 2012. aasta lõpuks Eesti kiirlaadimise punktidega ning kokku toetatakse 1000 elektriauto soetamist. Vabariigi Valitsus sõlmis Mitsubishi Corporationiga lepingu 10 miljoni AAU (lubatud heitkoguse ühik *ingl. Assigned Amount Unit – AAU*) ulatuses saastekvoodi müügiks, et alata Eesti elektromobiilsuse programm. Programm koosneb kolmest osast: Sotsiaalministeeriumi poolt võeti näidiskasutusse 500 Mitsubishi iMiev elektriautot, Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi poolt töötati välja toetusskeem eraisikutele elektriautode ostu toetamiseks ning rajati elektriautode laadimistaristu. Ostutoetuse jagamist ning kiirlaadimisvõrgu rajamist korraldab ja haldab SA KredEx. Alates 2012. aasta novembrist toetatakse ka pistikust laetavate pistikhübriidide ostmist. Programmi eesmärk on ühest küljest kiirendada elektriautode kasutuselevõtmist Eestis, teisalt täita riigi poolt võetud eesmärk suurendada taastuvenergia kasutust transpordis aastaks 2020 [19].

## **2.2 Elektrirongide areng ning uued FLIRT-tüüpi elektrirongid**

19. sajandi lõpus toimus Euroopas intensiivne raudteede areng ning kuna laiarööpmeliste raudteede ehitus ja eksploatatsioon oli võrdlemisi kallis, kerkis päevakorda küsimus odavamate juurdeveoraudteede ehitamisest. See oli vajalik, et lahendada väiksemate piirkondade kaugpade ja reisijate liikumise vajadus. Esimeseks pioneeriks juurdeveoraudteede ehitamise alal oli 1892. aastal Peterburis asutatud Esimene Juurdeveoraudteede Selts Venemaal. Nad võtsid rööpmelaiuse standardiks 750 mm, mida kasutati ka hiljem kõikide teiste poliitiliste režiimide ajal Venemaal ning sellega liidetud aladel. [20]

Elanikkond ja asutused võtsid raudtee kiiresti omaks, millest tulenevalt kujunes aastate jooksul juurdeveoraudteest välja rahvusliku omapära kandev infrastruktuur, mida pidas oluliseks ka iseseisev Eesti. Teisiti suhtus asjasse Nõukogude võim, mistõttu aastakümnetega väljajunud transpordisüsteem hävitati võrdlemisi lühikese ajaga [20] ja asemele ilmusid Eestis praegugi kasutusel olevad rongid. Võttes arvesse rongide planeeritud eluiga (28-35 aastat) ning selle eluea pikendamisvõimalusi (üks kord ja maksimaalselt 15 aastat), võib väita, et tänased rongid (vanimad on aastast 1968) on amortiseerunud [21].

Seni veab raudteel reisijaid Riia tehases toodetud ER2, mis oli Rīgas Vagonbūves Rūpnīca (RVP) tootmises aastatel 1962-1984. Vaguni pikkus on 19,6 meetrit ja laius 3,5 m. Rongi kiirendus on  $0,6 \text{ m/s}^2$  ning suurim kiirus 100 km/h [21].



Nõukogudeaegsed rongid on plaanis välja vahetada Flirt tüüpi kiirrongidega. Esialgsete plaanide järgi hakkab kiirrong sõitma liinil Tallinn-Keila ning esimene sõit koos reisijatega peaks toimuma 28. juunil 2013 [21].

FLIRT (Fast Light Innovative Regional Train) rongitüüp loodi 2000. aastal Šveitsi koduseid vajadusi silmas pidades. Tänapäevaks on rongitüüp kasutusel Saksamaal, Itaalias, Ungaris, Poolas, Norras ja Soomes. Rongid koosnevad kahest kuni kuuest vagunist ning neid võib saada kahe sisenemisala põrandakõrgusega, mis on 57 (kasutusel Eestis) ja 78 cm – vastavalt kasutusraja levinud perroomikõrgusele. Eestile analoogselt kasutavad Euroopa standardist veidi laiemat rööpavahet ka Soome ja Valgevene, mistõttu ei ole kasutatava rööpavahe erinevus standardist probleemiks. Rongitüübi omapäraks on trammidelt tuntud vagunite ühendus, kus terve rong on nagu üks pikk vagun ning ette või taha liikudes ei tule enam läbida tambureid. Automaatsed ühendussõlmed vedurite esiootsas võimaldavad kuni neli rongi üheks veeremiks ühendada [22].

FLIRT-rongide maksimumkiirus on olenevalt valikust 120 kuni 200 km/h. Tänu õhkvedrustusele on FLIRT-rongid suhteliselt vibratsioonivabad ning vaiksemad meie raudteel praegu sõitvatest rongidest [22].

Eesti ostab sõlmitud lepingu kohaselt kokku 38 reisirongi, neist 18 elektri- ja 20 diislrongi. Eesti FLIRT-tüüpi rongidel saab olema mitmeid tehnilisi uuendusi. Näiteks salvestatakse neljavagunilise diislrongi pidurdamisel vabanev energia ning kasutatakse varuenergiana kiirendamisel. See hoiab energiakulu oluliselt madalamal kui praegustel rongidel. Selleks on rongidel dubleeritud superkondensaatorite-elektrimootorite süsteem, mis kogub pidurdusenergiat ja lisab selle kiirendusel mootoritele. Pidurdusenergiat ei lase kaotsi ka elektrirongid ehk pidurdamisel toimivad elektrimootorid generaatoritena ja rong annab niimoodi tekkiva energia süsteemi tagasi. Veomootorite nimivõimsus on elektrirongidel 500 kW ja diislrongidel 350 kW [22].

## 3 Elektertranspordi ühendusviisid ja kasutatavad parameetrid

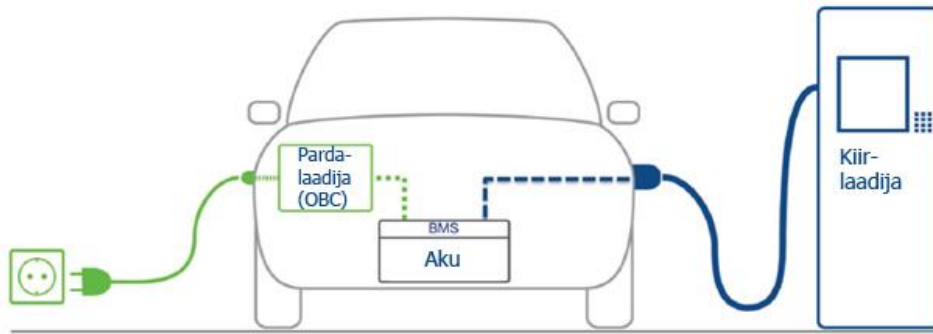
### 3.1 Elektriauto ühendusviisid ja laadimise moodused

Elektriautode laadimise moodused ning elektripistikute tüübid ja neile esitatavad nõuded on määratud IEC 62196 standardiga. Nimetatud standard põhineb IEC 61851 standardil, milles on kirjeldatud mehhanismid, mis ei lase elektriseadet pingestada ilma, et temaga oleks ühendatud elektrisõiduk. Samuti on IEC 61851 standardis välja toodud kohustus tagada, et laadimisseadmega ühendatud sõiduk ei oleks võimeline liikuma [23].

IEC 62196 nõuetele vastavate laadimisseadmete puhul ei suleta vooluringi, kui seade ei tuvasta IEC 61851 nõuetele vastavat signaali elektrisõiduki ühendatuse kohta. Üldjuhul piiratakse laadimisvool automaatselt 16 amprini, välja arvatud juhul, kui tuvastatakse laadimismooduse signaal, mis lubab kasutada suuremat voolu. Elektrisõiduki laadimismoodused jaotatakse neljaks [23]:

- 1) aeglane laadimine kodumajapidamistüüpi pistikupesast;
- 2) aeglane laadimine kodumajapidamistüüpi pistikupesast koos kaablisese kaitseadmega;
- 3) aeglane või poolkiire laadimine, mille korral kasutatakse spetsiifilist elektrisõiduki pistikupesa, millele on lisatud kontroll- ja kaitseaparatuur;
- 4) kiire laadimine, mille korral kasutatakse elektriauto välist laadijat.

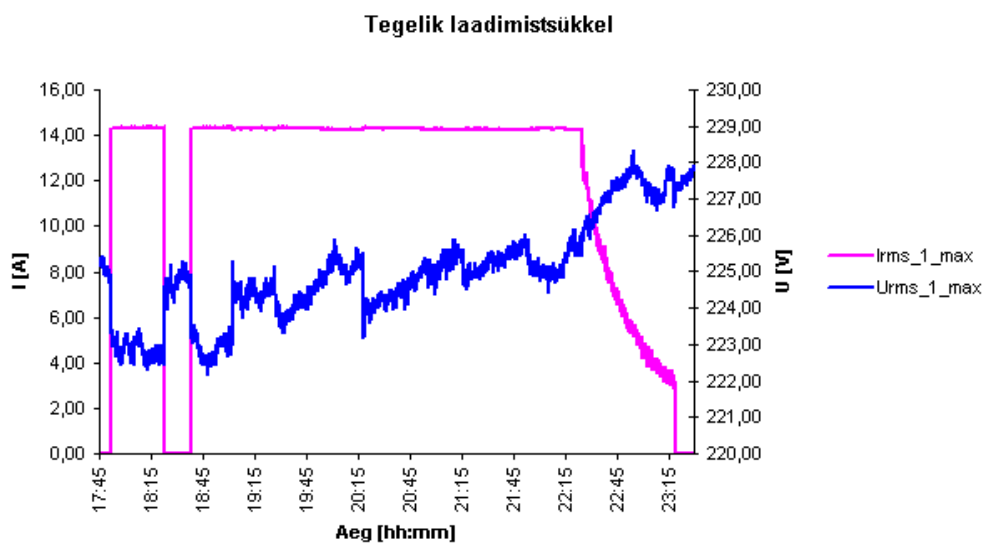
Esimese kolme laadimismooduse korral toidetakse elektriautot ühefaasilise vahelduvvooluga, mis muudetakse akude laadimiseks alalisvooluks elektrisõiduki siseselt, kasutades selleks elektriauto pardalaadijat (OBC – *On Board Charger*). Loetelus toodud viimase laadimismooduse korral toidetakse elektrisõiduki akusid kolmefaasilise alalisvooluga, kasutades pardavälilist laadimisseadet (nn kiirlaadija). Mõlema laadimismooduse võimaldamiseks peab elektrisõidukil olema eraldi nii vahelduvvooluga kui ka alalisvooluga laadimise pistikupesad. Laadimisprotsessi iseloomu määrab akude juhtimissüsteem ehk BMS (*Battery Management System*). Joonisel 4 on kujutatud elektriauto laadimine tava- ja kiirlaadijaga.



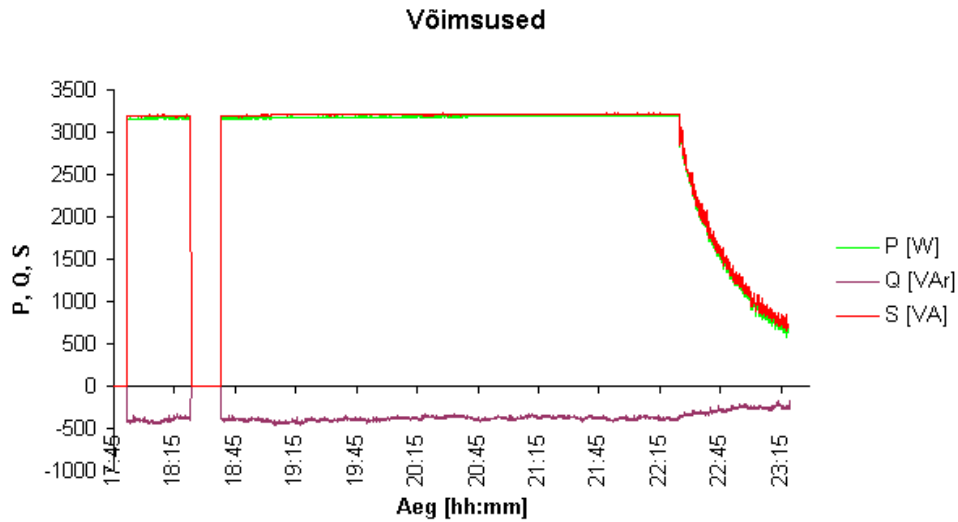
Joonis 4 Laadimiseks kasutatavate seadmete ja ühenduste põhimõtteskeem [23]

Seega võib öelda, et tavaladijaga laadides on elektriauto puhul tegemist ühefaasilise tavatarbijaga ja kiirladijaga laadides kolmefaasilise tavatarbijaga.

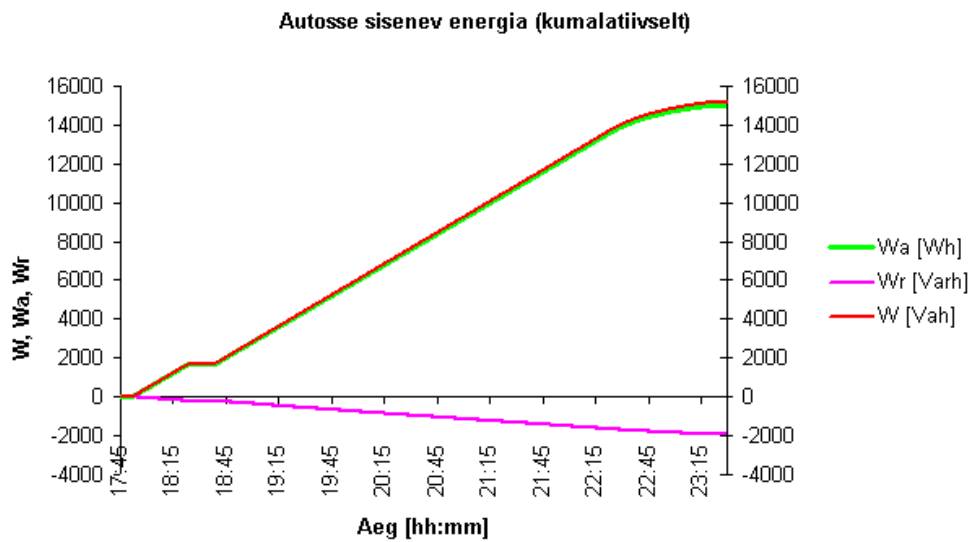
Elektrienergia tarbimise iseloomustamiseks võib tuua väljavõtte TTÜ elektroenergeetika instituudi magistritööst [18], mille raames võeti TTÜ laboris üles elektriauto laadimiskõver. Joonisel 5 on toodud elektriauto laadimisvool ja pinge ning joonisel 6 vastavad laadimisvõimsused. Joonistelt selgub, et laadimisvool on ületanud napilt 14 amprit, mis teeb laadimisvõimsuseks pisut üle 3 kW ja kokku kulub laadimiseks pea 16 kWh elektrienergiat (joonis 7) [18].



Joonis 5 Pinge ja vool elektriauto laadimisperioodil [18]



Joonis 6 Võimsused ( $P$ ,  $Q$ ,  $S$ ) elektriauto laadimisperioodil [18]



Joonis 7 Elektriauto laadimisel kulunud energia (autosse sisenev energia) [18]

Järgmises peatükis kirjeldatakse pikemalt elektriraudtee kontaktvõrku ning selle ühendusviise. Kahjuks elektriautode kohta toodud lihtsustused ei ole nii kergelt elektriraudteele ning rongidele ülekantavad ning viimased nõuavad oluliselt rohkem üksikasju, millega arvestada.

### **3.2 Elektriraudteesüsteemide areng**

Euroopas laialdaselt kasutatavad elektriraudteesüsteemid jagunevad põhiliselt kolmeks:

- Alalisvoolu (DC) süsteemid
- 15 kV AC 16 2/3 Hz süsteem
- 25 kV AC 50 Hz süsteem

Maailmas esimesena kasutusele võetud elektrifitseeritud elektertranspordisüsteem põhines alalisvoolul, mis tulenes asjaolust, et alalisvoolusüsteemid olid laiemalt levinud. Alalisvoolu elektertranspordisüsteemid hakkasid arenema peamiselt tänu linnasisese rööbastranspordi ja metroo arengule. Linnasisese rööbastranspordisüsteemidega koos tekkis võimalus varustada elektriga ka kontaktliini vahetus läheduses olevaid maju ning tänavavalgustust.

Vahelduvvoolusüsteemide laialdase kasutuselevõtuga rekonstrueeriti enamus algselt alalisvoolul töötanud süsteemidest. See ei olnud aga elektriraudteesüsteemide korral tehniliselt otsustarbekas, kuna alalisvoolul töötavad vedurid olid lihtsustatud ehitusega ning veduri kiirust oli väga lihtne reguleerida reostaat-pingejaguritega [24]. Küll võimaldasid vahelduvvoolusüsteemid alalisvoolu elektriraudteesüsteeme laiendada, kasutades algselt mootoritel põhinevaid mootor-generaator konverterjaamasid. Peale teist maailmasõda, elavhõbealaldite kasutuselevõtul, sai võimalikuks ehitada suuri alalisvoolu kontaktvõrgu süsteeme.

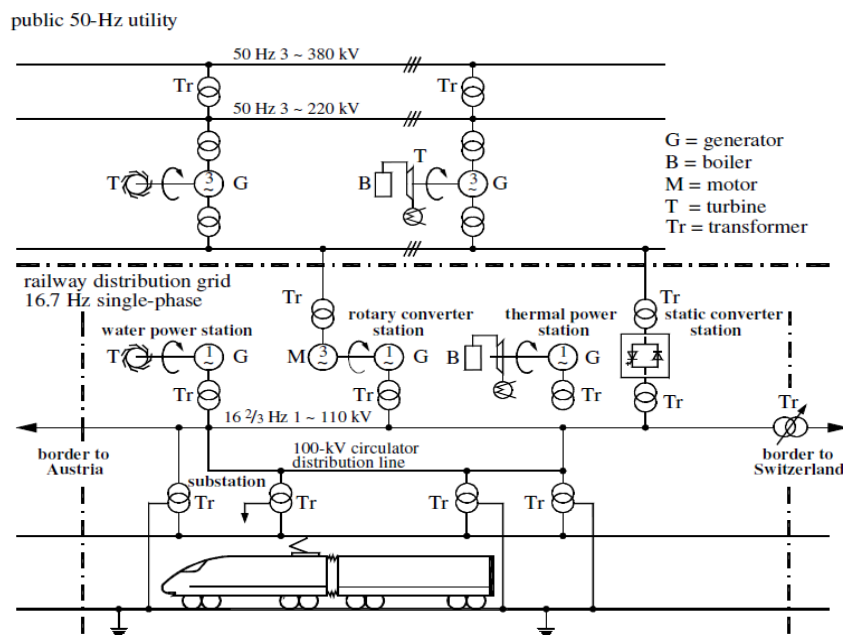
### **3.3 15 kV vahelduvvoolu 16 2/3 Hz elektriraudteesüsteem**

Vahelduvvoolu kasutusele võtmine elektriraudteel oli tingitud alalisvoolu kontaktvõrgus esinevatest pingelangudest, mis olid eriti tuntavad pikkade raudteeliinide korral. Tihedama toitepunktide paigutuse korral oleks tekkivad pingelangud kompenseeritud. Kuna 20. sajandi alguses puudus Euroopas tihe elektriülekanadesüsteem, siis polnud ka võimalik kontaktliini toitepunkte tihedamalt ehitada. Katsetusi alustati vahelduvvoolusüsteemidega, et oleks lihtsamalt võimalik pinge transformeerimise ja pikkade ülekandeliinidega uut elektrisüsteemi toita ning seeläbi välja arendada riiklik elektrisüsteem koos raudteesüsteemiga [25].

Esmalt katsetati asünkroonmootoritega kolmefaasilist kontaktvõrgu süsteemi Põhja-Itaalias, mis küll töötas, kuid tehnilised probleemid kontaktvõrkude ehituses näitasid, et sellist süsteemi on keerukas raudteesüsteemis kasutada. Tulenevalt energiasüsteemi võrgusageduse piirangutest, puudus võimalus efektiivselt ning sujuvalt vedurite kiirust muuta. Kiirust oli võimalik reguleerida vaid astmeti, muutes mootorites töösolevaid pooluspaare või kasutades käigukaste [25].

Samal ajal kui viidi läbi katsetusi kolmefaasilise elektriraudtee kontaktvõrgu süsteemiga, arendati 1903. aastal E. Behn-Eschenburg juhtimisel ühefaasilise kommutatsioon- jadamähis- tega elektrimootorit, mis võimaldas kasutusele võtta ühefaasilise elektriraudteesüsteemi. Kommutatsioon- elektrimootorid ei olnud võimelised töötama võrgusageduslikul (50 Hz) pin- gel, millepuhul tekkis kommutaatoris harjaste vahele kustumatu kaarleek. Seetõttu vähendati sagedus  $16 \frac{2}{3}$  Hz peale (edaspidi 16,7 Hz, mis on kirjanduses laialdaselt üldistatud kirjaviis), see on  $\frac{1}{3}$  50 Hz võrgusagedusest ning sellega välditi kustumatu kaarleegi probleemi. 20. sajandi alguse isolatsiooni koordineerimisprobleemide ning madala sageduse tõttu, millest tulenesid trafode ning mootorite suured mõõtmed, piirdus kasutatav pinge 15 kV-ga. Tulene- valt antud süsteemi võimekusest ning transformeeritavusest, kinnitati 1912. aastal Saksamaa liidumaade raudteede poolt kehtivaks ühtne kokkuleppeline 15 kV 16,7 Hz elektriraudteesüs- teem, mis hiljem võeti kasutusele ka teistes Euroopa riikides, näiteks Austrias, Šveitsis, Root- sis ning Norras [25, 26].

Antud toitesüsteem oli üldisest energiasüsteemi sagedusest madalama sagedusega, millest tingituna tekkis 15 kV 16,7 Hz elektriraudteesüsteemile paralleelse elektrisüsteemi loomise vajadus. Selliste toitesüsteemide rakendamisel kasutatavad tehnilised lahendused olid riigiti erinevad ja sõltusid sellest, millised tehnoloogiad olid rakendamise hetkel kättesaadavad ning kuidas hindasid riigid elektriraudtee planeeritavaid mahtusid. Riiklikust elektrisüsteemist eraldiseisev elektriraudtee rajati Austrias, Saksamaal ja Šveitsis. Kahte eraldi rajatud süsteemi kirjeldab joonis 8.



Joonis 8 Saksamaa 15 kV AC 16,7 Hz elektriraudteesüsteemi energiasüsteemi skeem [25]

Joonisel 8 on kujutatud Saksamaa 15 kV AC 16,7 Hz elektriraudtee energiasüsteemi, kus kompaktselt on esitatud kogu energiasüsteemi topoloogia. Ülevalt alla liikudes on kõige ülemises osas kujutatud kolmefaasilist ülekandevõrku ning seda toitvaid elektrijaamu. Joonise keskmises osas on kujutatud energiasüsteemi, elektriraudtee ülekandevõrku koos ühendustega naaberriikide Austria ja Šveitsiga ning sidestust läbi konverterjaamade üleriikliku ülekandevõrguga. Joonise kõige alumises osas on kujutatud elektriraudteesüsteemi kontaktvõrgu osa ning antud süsteemi sidestust energiasüsteemiga.

Austria ja Šveitsi puhul tulenes eraldiseiva energiasüsteemi rajamine Saksamaal väljatöötatud lahenduste rakendamisest ning samuti energiasüsteemi paralleelsest arenemisest. Eraldiseisev 15 kV 16,7 Hz elektriraudtee energiasüsteem koosneb soojuselektrijaamadest, hüdroelektrijaamadest ning üldise elektrisüsteemiga ühendatud elektrimootoril ja generaatoril põhinevast konverterjaamast. Tänapäeval viiakse antud energiasüsteem järkjärgult üle jõuelektroonikal põhinevatele konverterjaamadele. Elektriraudtee tarbeks rajati kahefaasiline 110 kV ülekandevõrk, millest toidetakse 15 kV kontaktvõrku läbi toitealajaamade. 110 kV ülekandevõrgu liinide kogupikkus Saksamaal on 1990. aasta andmetel 7650 km [25].

Erinevalt Austria, Saksamaa ja Šveitsi elektriraudtee energiasüsteemist, ei ehitatud Norra ja Rootsi elektriraudtee oma energiasüsteemi elektrijaamasid, vaid see põhineb konverterjaamadel. Nende kasutamine võimaldas elektriraudteed toita otse elektrisüsteemist ning aitas vältida paralleelset süsteemi. Algselt kasutati mootoritel põhinevaid konverterjaamu, mis tänapäeval asendatakse järkjärgult enamasti modernsel jõuelektroonikal põhinevate konverterjaamade vastu. See võimaldab vähendada energiakadusid ning lihtsustada elektriraudtee energiasüsteemi juhtimist [25, 26].

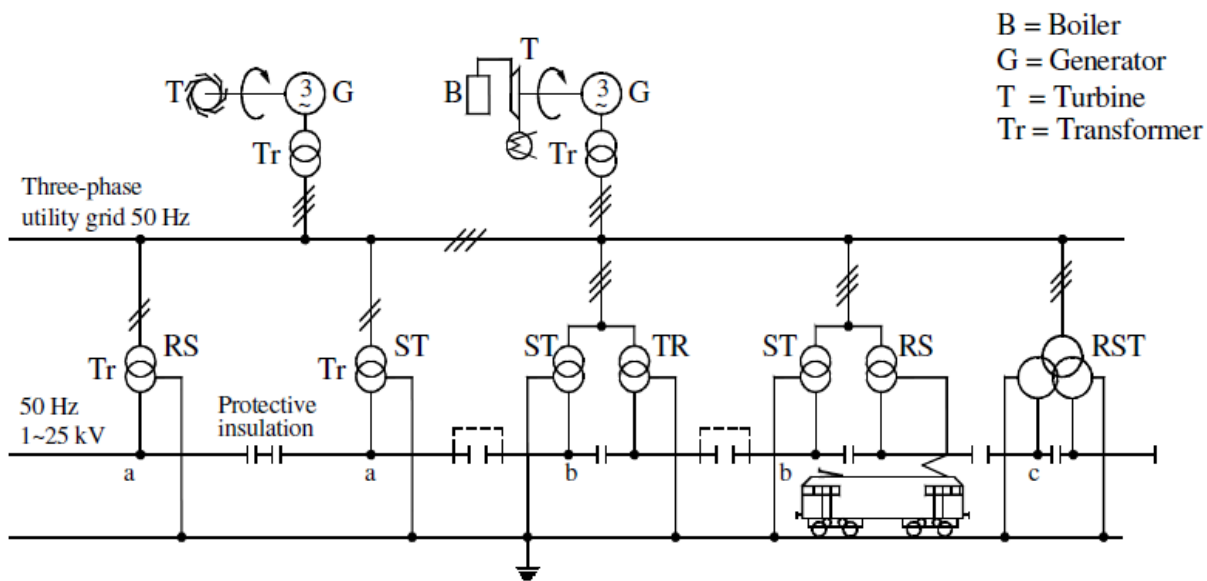
Pideva moderniseerimise käigus üritatakse pikas perspektiivis 15 kV AC 16,7 Hz süsteemi toidet täielikult üle viia jõuelektroonikal põhinevatele konverterjaamadele. Seda põhjusel, et paralleelse elektrisüsteemi ülalpidamine muutub tulenevalt seadusandlusest järjest kallimaks ning lisaks vähendab kahe paralleelse energiasüsteemi kasutamine riiklikku energiaefektiivsust [25].

### **3.4 25 kV vahelduvvoolu 50 Hz süsteem**

Tulenevalt 15 kV AC 16,7 Hz süsteemi keerukusest ning suurtest jooksvatest kuludest, mis on tingitud paralleelsest energiasüsteemist, üritati välja töötada efektiivsemat elektriraudteesüs-

teemi. Elavhõbealaldite kasutuskõlblike mudelite väljatöötamine enne teist maailmasõda ning nende laialdasem kasutuselevõtmine peale sõda võimaldas kergelt tarbijalähedal muundada vahelduvvool alalisvooluks. See andis aluse võimsate alalisvoolu vedurite loomisele ning pani aluse energiasüsteemi sagedusel töötava ühefaasilise elektriraudteesüsteemi loomisele.

Enne teist maailmasõda testisid Saksamaa elektriseadmete tootjad Höllentali elektriraudteel, elavhõbealalditel kasutatavaid 20 kV prototüüp vedureid. Peale teist maailmasõda jäi katse elektriraudtee liin koos prototüüp veduritega Prantsusmaale, kus peale antud katsesüsteemi analüüsimist ning täiustamist elektrifitseeriti Prantsusmaal Lorraine- Nord France kivisöe veoks mõeldud raudtee 25 kV AC 50 Hz süsteemiga [25]. Väljatöötatud süsteem osutus efektiivseks ning kergesti kasutusele võetavaks kuna kontaktvõrk oli analoogne 15 kV AC 16,7 Hz ja 3 kV DC süsteemiga. Tulenevalt lihtsast kasutuselevõtust ning võimalusest kasutada kontaktvõrgu toitesüsteemi ehitamiseks elektrisüsteemis laialdaselt kasutatavaid komponente, muutus 25 kV AC 50 Hz süsteem maailmas peamiseks elektriraudtee toitesüsteemiks. Lihtsustatud 25 kV AC 50 Hz ülekandevõrgu ühenduskeem on toodud joonisel 9.



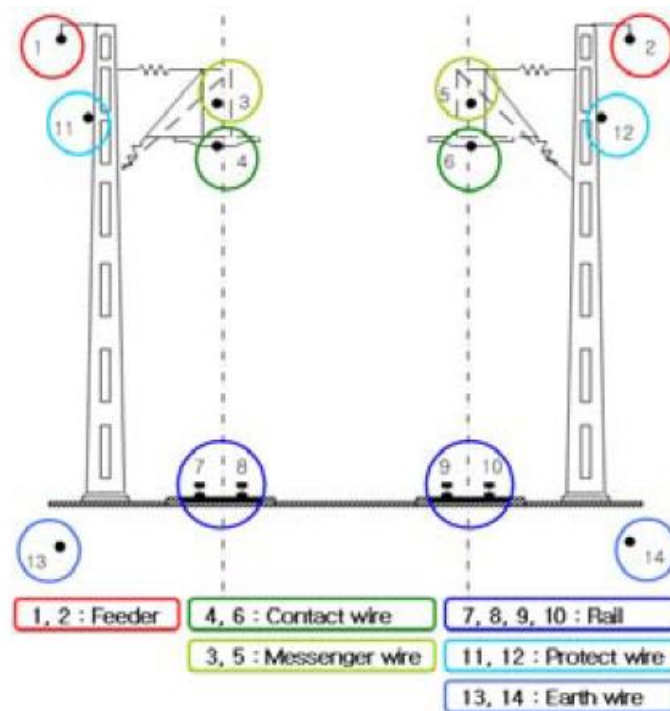
Joonis 9 Lihtsustatud 25 kV AC 50 Hz energiasüsteemi skeem [25]

### 3.5 Kontaktvõrkude põhimõtted

Elektertranspordisüsteemidest enamuse moodustab kontaktvõrgu süsteem, millega tagatakse energia ülekande veduritele. Tulenevalt kasutatavast elektertranspordi pingesüsteemist ning sõltuvalt pingest, saab eristada alalisvoolu- ning vahelduvvoolusüsteemides kasutatavaid kontaktvõrke.



Elektriraudtee kontaktvõrgud on oluliselt keerulisemad süsteemid kui klassikalised ülekandeliinid. Vahelduvvoolusüsteemi ühefaasilisest ühendusest ning alalisvoolusüsteemi kõrgepingest tingituna tekivad nendes kontaktvõrkudes elektrisüsteemi õhuliinidele mitte omased probleemid. Vaadeldes näiteks (joonis 10) kahe rööppaariga elektriraudtee kontaktvõrgu trassi ristlõiget, on selgelt näha, et pikki trassi esineb kontaktvõrgus palju paralleelseid juhte, mis võivad omada erinevaid ristlõikeid ja potentsiaalitasemeid või olla üldse pingestamata. Lisaks maandatud raudtee relssidele on trassil paralleelselt ka maandusjuhid.



Joonis 10 Kahe rööppaariga kontaktvõrgu trassi ristlõige [27]

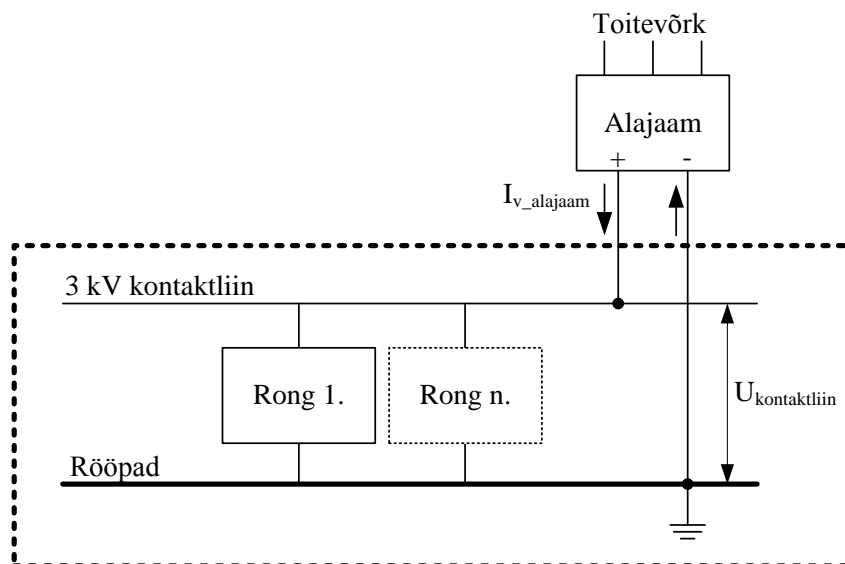
Tulenevalt paljudest paralleelsetest elektrijuhtidest piki trassi, osutub kontaktvõrkude matemaatiline modelleerimine keerukaks protsessiks, mida täpsemalt iseloomustavad artiklid [27, 28]. Peamiseks probleemiks on kontaktvõrgu täpse ekvivalentse induktiivtakistuste ning mahtuvusjuhtivuse leidmine. Kuna kontaktvõrgus esineb palju erinevate vahekauguste ja potentsiaalidega elektrijuhte siis tekivad juhtide vahel vastastikused induktiivsused ning mahtuvusjuhtivused. Viimased mõjutavad oluliselt kontaktvõrkude käitumist normaaltalitluses ja häiringute korral. Kuna kontaktvõrk on ühefaasiline süsteem, siis puuduvad tekkivatel vastastikel induktiivsustel ning mahtuvustel sümmeetrilised, üksteist kompenseerivad komponendid. Seetõttu ei saa kasutada elektrivõrkude ülekandeliinide üldistusi ning lihtsustusi, mistõttu on kontaktvõrkude ning nendes esinevate häiringute modelleerimine töömahukas ettevõtmine. Modelleerimisel tuleb silmas pidada, et erinevate häiringute tõttu tuleb kontaktvõrgu para-

meetreid erinevalt arvestada ning on vaja luua mitmetasemelisi kontaktvõrgu mudeleid. Näiteks kui vaadelda artikleid [27, 28], kus käsitletakse ühes ja samas elektriraudtee kontaktvõrgus asetleidvaid erinevaid häiringuid, on kontaktvõrgu modelleerimisel vaja kasutada erineva täpsusega modelleeritud kontaktvõrku.

### 3.6 Eesti 3 kV alalisvoolu kontaktvõrk

Elektriraudtee elektritaristu koosneb suures osas üldistatuna elektrienergia muundamise ja ülekandmise seadmetest ning elektritarbijatest, millest suurimateks tarbijateks on elektrirongid. Kontaktliin koos raudteerööbastega on ühendusviisiks elektrit tarbiva elektrirongi ning elektrienergia edasikandva elektrivõrgu ja muundusseadmete vahel (trafod, alaldid) (joonis 11). Eestis kasutatakse elektriraudtee kontaktliinis alalispinget 3 kV. Elektriraudtee elektrivarustussüsteemi modelleerimise lihtsustamiseks võib ühel kontaktliini lõigul sõitvad üksikud rongid koos oma veo- ja abitoitemuundurite ning ajamitega taandada üheks suureks tarbijaks. Sellise tarbija korral peab arvestama järgnevate parameetritega:

- kontaktliini pinget;
- kontaktliini vool;
- kontaktliini ja muu elektritaristu omavaheline mõju (elektromagnetilised häiringud).



Joonis 11 Kontaktliini liinilõigu lihtsustatud plokk skeem

Elektriraudtee kontaktliini puhul on standarditega ära määratletud nii kontaktliini antava elektrienergia pinget ja selle kvaliteeti (EN 50163) kui ka kontaktliini poolne mõju elektrivõr-

gule (EN 50121, EN 55011). Samas on reglementeeritud ka kontaktliinist energia tarbimine elektrirongide veomuundurite ning abitoitemuundurite poolt (EN 50155, EN 61287).

Eestis senilevinud ER2 elektrirongi mootorvaguni veomootorite võimsus on 800 kW ning maksimaalne mootorvaguni poolt tarbitav vool on 292 A. Samas võib tarbitav vool muutuda suures ulatuses, sõltudes rongi kiirusest, kiirendusest, täituvusest ning aastaajast (mootorvaguni kütteseadmete võimsus on kokku 12,8 kW; abiahelate võimsustarve võib ulatuda kuni 30 kW). Ühe alajaama poolt toidetaval kontaktliinil võib samaaegselt liigelda mitu rongi. Rongi liikumisel piki kontaktliini põhjustab rongi vooluvõtturi ning alajaama vahelise takistuse muutumine ka kontaktliini pinge ja voolu muutumist. Seetõttu on täpsemaks elektriraudtee energiavarustusüsteemi modelleerimiseks vajalikud elektriraudtee kontaktliini energiaga varustavate alajaamade väljundvoolude mõõtmised.

Vahelduvvoolusüsteemide kontaktvõrgud jagunevad üldistatult kolme põhirühma:

- otsetoitega kontaktvõrk;
- võimendustrafodega (ing. *booster transformer based contact line*) kontaktvõrk;
- autotrafodega kontaktvõrk.

Vahelduvvoolu kontaktvõrke käsitletakse täpsemalt projekti järgmistes etappides koos võrgu modelleerimisega.

## 4 Elektertranspordi mõju elektrisüsteemi talitlusele

Elektertranspordi ühendamise elektrisüsteemi esitab elektrisüsteemi operaatoritele uusi väljakutseid ning eeldab uusi teadmisi nii ülekandevõrkude kui ka jaotusvõrkude tasandil. Kui klassikalised elektritarbijad on koht-kindlad ning nendega kaasnevad mõjud on seotud konkreetse piirkonna liitumispunktiga, siis elektertranspordi elektrisüsteemides on elektrienergia tarbimisemahu ja asukoha muutumine pidev. Just tarbimispunktide pidevas liikumises elektrisüsteemis seisneb elektertranspordi peamine väljakutse, mis võib tekitada elektrisüsteemi operaatoritele raskusi elektrisüsteemi vahetuks jälgimiseks. Seega tekib vajadus arendada uusi monitooringusüsteeme, mis võimaldavad täpsemalt probleeme hallata ning tasakaalustada energiasüsteemi arengut, et ei tekiks probleemseid sõlmi. Traditsioonilise tarbija ühenduse asukohta saab süsteemioperaator mõjutada, kuid muutuva ühenduskohaga tarbija võib olla ebasoovitav.

Elektri- ja elektertranspordisüsteemid mõjutavad teineteist - probleemid ühes tekitavad probleeme teises. Tarbimise pidev muutumine ja vajalikkus tagada kvaliteetne elektrienergia igas punktis nõuab elektrisüsteemi täiendavat renoveerimist, investeerimist elektrisüsteemi läbilaskevõimesse ja töökindlusesse. Elektertranspordisüsteemid, eriti kui nende kasutamine omab suurt osakaalu kogu transpordimahust, eeldab elektrisüsteemilt erilist tähelepanu töökindlusele ning suurendab elektrisüsteemi operaatorite vastutust. Iga suuremahuline häiring sidestatud süsteemi elektrivarustuses mõjutab suurt hulka tarbijaid ning seeläbi tarbijate usaldust, mis on oluline elektriraudtee projekti majanduslikuks edukuseks.

Eelnevates peatükkides kirjeldatud elektriraudteesüsteemide ülevaates on üldiselt käsitletud probleeme, mis kaasnevad elektriraudtee ühendamise elektrisüsteemi. Käesolevas punktis käsitletakse elektriraudtee mõjusid elektrisüsteemile täpsemalt eelmistes peatükkides kirjeldatud alalisvoolu ning 25 kV 50 Hz vahelduvvooluga elektrifitseeritud elektriraudteesüsteemide puhul. Eelnevalt kirjeldatud 15 kV 16,7 Hz AC süsteemi käesolevas peatükis ei käsitleta, kuna antud süsteemi toidetakse eraldiseisvast ja paralleelsest ühefaasilisest energiasüsteemist ning see mõjutab riiklikke 50 Hz elektrisüsteeme sarnaselt traditsiooniliste koormustega.

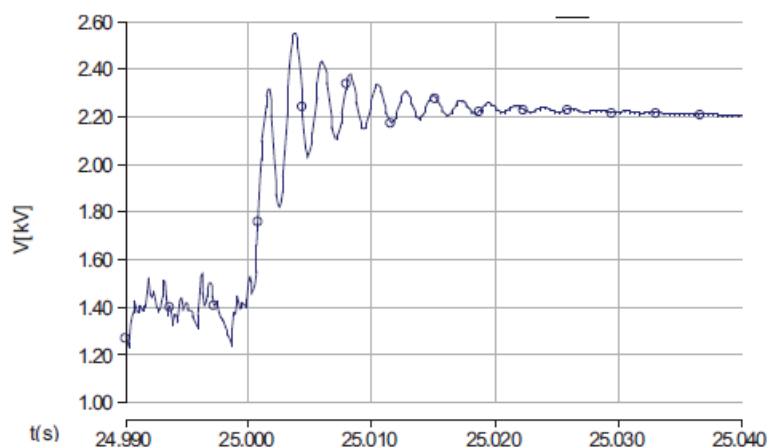
### 4.1 DC elektertranspordisüsteemid

Alalisvoolu elektertranspordisüsteemid saavad elektritoite tavaliselt jaotusvõrgust. See tuleb nende väiksemast ühikvõimsusest ning kontaktvõrgu tihedast toitepunktide paigutusest.

Seega puudub otsene mõju ülekandevõrkudele [24, 29]. 3 kV alalisvoolusüsteemide puhul võivad erilahendustest tingituna teatud kontaktvõrgu lõigud saada elektritoite ülekandevõrgu sõlmalaamadest. Sellist lahendust kasutatakse süsteemi lõikudes, kus vajatakse suure ühikvõimsusega vedureid [24]. Alalisvoolu elektertranspordi mõju elektrisüsteemi talitlusele piirneb peamiselt püsitalitus probleemidega ning elektrivarustuskindluse tagamisega elektertranspordisüsteemile [24, 29].

Alalisvoolu transpordisüsteemid on elektrisüsteemile kolmefaasilised sümmeetrilised tarbijad, seetõttu ei tekita alalisvoolusüsteem normaaltalitluses pingesümmeetria probleeme. Pingesümmeetriat võib esineda kui üks või enam toitepunkti alalditest on rikke tõttu väljalülitatud. Tulenevalt sümmeetrilisest elektrienergia tarbimisest ja normaaltalitluses pingesümmeetria probleemide puudumisest, on võimalik ühendada alalisvoolu transpordisüsteeme elektriliselt nõrkadesse elektrivõrkudesse [29].

Valdavalt kasutatakse alalisvoolu linnasiseses ühistranspordis, mistõttu on kontaktvõrgus töösolevate seadmete maht suur ja oluliseks küsimuseks on regeneratiivse pidurdussüsteemi kasutamine ning seeläbi saavutatav elektrienergia kokkuhoid [29]. Regeneratiivse pidurdussüsteemide puhul ei saa kasutada klassikalist dioodalaldit, kuna antud lahendus ei võimalda võimsusvoogude suundumist kontaktvõrgust elektrivõrku ning pidurdamisega genereeritud energia tuleb kontaktvõrgu siseselt teiste masinate poolt ära tarbida. Kui sama toitepunkti piirkonnas puudub tarbimine, võivad tekkida ohtlikud liigpinged kontaktvõrgus [30, 29]. Kontaktvõrgus regeneratiivsel pidurdamisel tekkivat liigpinget on kujutatud joonisel 12.



Joonis 12 1,5 kV alalisvoolu kergraudtee kontaktvõrgus regeneratiivsel pidurdamisel tekkiv liigpinge, kui puudub samas piirkonnas teine vedur [30]

Jooniselt on selgelt näha, et pidurdamine algab 25. sekundil. Generaatoritalitluse tõttu kasvab kontaktvõrgupinge 1 kV võrra, mistõttu lülitatakse sisse pidurdustakistus, mille abil vähendatakse pinget täiendavat kasvu ja mis summutab generaatoritalitlusega tekkiva siirdeprotsessi.

Tulenevalt regeneratiivse pidurdussüsteemiga kaasnevatest liigpingetest, on otstarbekas kasutada alalisvoolu kontaktvõrku ühendatud masinatele energiasalvestuslahendusi [29].

Võimaldamaks regeneratiivses pidurdussüsteemis genereeritud võimsust elektrivõrku tagastada, peab kasutama toitepunktides dioodalaldite asemel AC-DC konvertereid, mis võimaldavad võimsusvoogude mõlema suunalist liikumist [29]. Pidurdamisel eralduva võimsuse tagasi juhtimisel elektrisüsteemi võib järsk võimsusvoo suuna muutus tekitada pingekvaliteedi probleeme, mis nõrga elektrivõrgu korral võib tarbijatele olla märgatav näiteks valgustite värelusena [31].

Tulenevalt kuuefaasilise dioodalaldite kasutamisest, vähendatakse elektrivõrgus alalisvoolu elektertranspordisüsteemi poolt tekitatud harmoonikute mahtu. Tavaliselt jäävad harmoonikutest põhjustatud pingekõverate moonutused alla 3% [31].

## **4.2 25 kV 50 Hz vahelduvvoolu elektriraudteesüsteem**

Nagu 25 kV 50 Hz vahelduvvoolu elektrisüsteemi ühendusviiside kirjeldusest selgub, on süsteemi väljatöötamisega kaasnenud palju võimalike kontaktvõrgustiku ülesehituse topoloogiaid ning erinevaid primaarseadmete kombinatsioone. Käesolevas töös kasutatud kirjanduse alusel kujunesid välja peamised elektrisüsteemitalituse mõjude klassid:

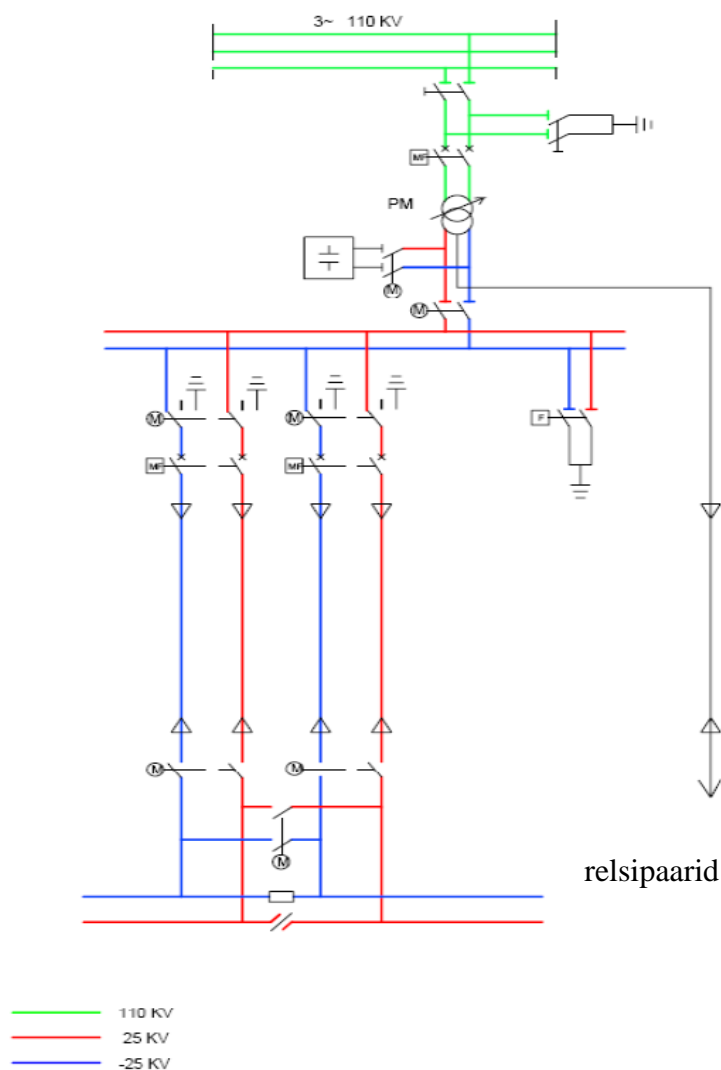
- ebasümmeetrilisest koormusest tingitud püsitalitus probleemid;
- pinget asümmeetria;
- elektrivõrgu kõrgemad harmoonikud ning kaasnevad pinget- ja voolukõverate moonutused;
- elektriraudtee regeneratiivse pidurdussüsteemi siirdeprotsessid;
- ebahütlane kontakt pantograafi ja kontaktliini vahel.

Teiste riikide kogemused 25 kV 50 Hz vahelduvvoolu elektriraudteesüsteemi liitmisel elektrisüsteemiga näitavad, et tulenevalt elektriraudteesüsteemi suurtest ühikkoormustest, on mõjud elektrivõrgule märgatavad ning otseselt sõltuvad elektrivõrgu konfiguratsioonist ja elektrisüsteemi tugevustest. Seda ilmestab hästi Soomes läbiviidud uuring, milles on analüüsitud kahe erineva konfiguratsiooni ja elektrilise tugevusega elektrivõrgu fragmenti [32]. Üheks olulise-

maks väljakutseks, eriti 25 kV vahelduvvoolu elektriraudteesüsteemide puhul, on püsitalitlusega kaasnevad probleemid.

### 4.3 Ebasümmeetrilisest koormusest tingitud püsitalitluse probleemid

Ajalooliselt on välja kujunenud, et 25 kV 50 Hz vahelduvvoolu elektriraudteesüsteem ühendatakse kõige kõrgemale pingestmele, mis asub optimaalse liitumispunkti läheduses. Sedasi tagatakse piisav elektrivarustus elektriraudteesüsteemile ning vähendatakse elektriraudtee talitlusest tekkivaid negatiivseid mõjusid [24]. Elektriraudteesüsteem on tüüpiliselt ühendatud kahe liinijuhi vahele, mida on kujutatud joonisel 13. Antud joonisel on kujutatud elektriraudteesüsteemi ühendamist liitumispunkti lihtsustatud kujul, kus takistus kujutab kogu elektriraudtee ekvivalentset koormust liitumispunkti lattidel.



Joonis 13 25 kV 50 Hz vahelduvvoolu elektriraudtee lihtsustatud ühendusskeem [32]

Elektrisüsteemi koormusvoolude vähendamiseks võeti kasutusele faas-faas ühendusviis. Nimmelt jagunevad koormusvoolud kahe liinijuhtme vahel ning kõrgema liinipinge tõttu vähenevad elektrienergiakaod ja pingelang elektriraudteesüsteemi toitvas elektrivõrgus võrreldes faas-maa ühenduse korral. Viimasel juhul on madalama pinge tõttu tekkivad koormusvoolud suuremad ning nende langemine vaid ühele faasijuhtmele põhjustab oluliselt suuremaid energiakadusid ja pingelange. Täiendavalt võimaldab faas-faas ühendus koordineerida ebasümmeetrilisest tarbimisest tingitud vastujärgnevusvoolukomponenti ning sundida seda sumbuma faasijuhtides. Ühendades elektriraudtee tugeva elektrisüsteemiga, kus on mõne tuhande MVA suurused lühisvõimsused, ei tekita vastujärgnevusvoolukomponentide osakaal koormusvoolu probleeme. Faas-maa ühenduse korral tekib raskesti koordineeritav nulljärgnevusvoolu vastujärgnevusvoolu komponent. Antud kahe probleemi tõttu osutub otstarbekaks faas-faas ühendus [29, 33].

Tulenevalt elektriraudtee ühendusviisist ja kaasnevast ebasümmeetrilisest koormusest (koormused jagunevad ebaühtlaselt), tekivad elektrisüsteemis püsitalitlusprobleemid. Peamiseks probleemiks elektrivõrgu talitluses on elektrivõrgu ülekandevõime vähenemine ülejäänud kolmefaasilistele tarbijatele tulenevalt asjaolust, et kaks faasi kolmefaasilisest süsteemist on koormatud elektriraudtee koormusega ja puudub võimalus koormata samaväärses ulatuses kolmandat vaba faasi. Ülekandevõrgu enda seadmete kaitseks tuleb hakata piirama koormusvoolusid elektrivõrgus vastavalt elektriraudtee koormuse poolt kõige enam koormatud faasi järgi. Nii tuleb ülekandevõrgu operaatoril välja töötada elektriraudteed toitvas elektrivõrgu osas tarbija eripärasid arvestavad releekaitse põhimõtted. Tulenevalt elektrivõrgu kolmefaasiliste koormuste karakteristikutest ja pinge tundlikkusest, võib pinge ebasümmeetria elektrisüsteemis võimendada. Nõrga elektrivõrgu tingimustes võib see mõjutada elektrivõrgu normaalset talitlust, koormusvoolude jagunemist sõlmalajaamades, ja seeläbi sõlmalajaamadest elektrotoidet saavaid tarbijaid.

Lisaks elektrivõrgu talitlusprobleemidele, kaasnevad ebasümmeetriliste koormustega elektriraudteesüsteemi toitvas elektrivõrgus täiendavad käiduprobleemid. Tuleb silmas pidada, et elektriraudtee kontaktvõrgud on oluliselt rikkealtimad kui elektriülekandevõrgud. Järelikult peab arvestama, et häiringud elektriraudteesüsteemis võivad põhjustada elektrivõrgu seadmete sagedasemat hävinemist või suurendada seadmete hooldusvajadust [26].

Eriti probleemseks häiringuks elektriraudtee kontaktvõrkudes on lühised maaga, mille täpset asukohta on keeruline avastada. See tuleneb kontaktvõrgu toitepunktide ja sektioneerimis-



kappide suurtest vahekaugustest ning võimalikult täpse lühise asukoha määramiseks teostatakse tihti mitu taaslülitustsükli. Lühisvoolude avastamist ning likvideerimist käsitletakse täpsemalt artiklites [26, 27]. Lühiste pikast kestvusest ja mitmest taaslülitustsüklist tingitud siirdeprotsessidest on oluliselt mõjutatud elektriraudtee liitumispunkte toitvate elektrivõrkude pingekvaliteedi näitajad. Peamiselt põhjustavad pingekvaliteedi langust lühisest tingitud pingelohud ning taaslülituse kommutatsioonidest tingitud transientliigpinged. Häiringu allika leidmine ja konkreetse häiringust mõjutatud kontaktvõrgu sektsiooni väljalülitamine võib kesta kokku kuni üks minut [26] ning selle käigus võib releekaitse teostada mitu taaslülitust. Kõik mainitu avaldab olulist mõju teistele elektritarbijatele, kes saavad toite samast elektrivõrgu osast kust elektriraudteesüsteem. Eespool toodud probleemidega võivad kaasned olulised majanduslikud kahjud tarbijatele.

Näiteks võivad pingelohud tekitada automatiseeritud tootmisliinidel protsesse peatavaid häiringuid. Taaskäivitamisega kaasnevad kulud nii saamata jäänud toodangu kui ka uuesti seadistamise osas. Transientliigpingete tõttu võivad elektriliselt lähedal asuvatel tarbijatel elektriseadmete isolatsioon puruneda, millega kaasnevad seadmete väljavahetamisest tulenevad kahjud ning võib tekkida oht inimestele.

Klassikalises elektrisüsteemis arvestatakse lühiste kiiret väljalülitamist, mille alusel on elektrisüsteemi termiline vastupidavus dimensioneeritud. Pika kestvusega lühised elektriraudteesüsteemis eeldavad elektrivõrgult suurt lühisetaluvust, mistõttu muutub oluliseks elektrivõrgu operaatorile elektrisüsteemi valmisoleku ja elektriraudtee kontaktvõrgule piirangute määramine.

#### **4.4 Pinge asümmeetria**

Pinge asümmeetria oma üldises tähenduses on mitmefaasilise elektrisüsteemi talitusrežiim, kus faasi või ka liinipingete väärtused ning ka faasipingete nihkenurgad ei ole võrdsed ega sümmeetrilised. Pinge asümmeetria on oluline elektrikvaliteedi näitaja, mille suuremahuline esinemine jäik-maandatud elektrisüsteemides põhjustab pöörlevatele seadmetele (mootor ja generaator) kahjustusi. Pinge ja voolu vastujärgnevuskomponendid põhjustavad pinge asümmeetriat, mille tõttu kuumenevad elektrimootorite mähised (halbade jahutustingimuste korral) ning tagajärjeks on mootorite eluea vähenemine [34]. Sarnaselt elektrimootoritele kuumenevad generaatorite mähised. Suurte vastujärgnevus voolukomponentide sisalduse korral toimub

generaatori väljundvõimsuse vähenemine või kütusekulu kasv olenevalt juhtimissüsteemi seadistusest [32, 33].

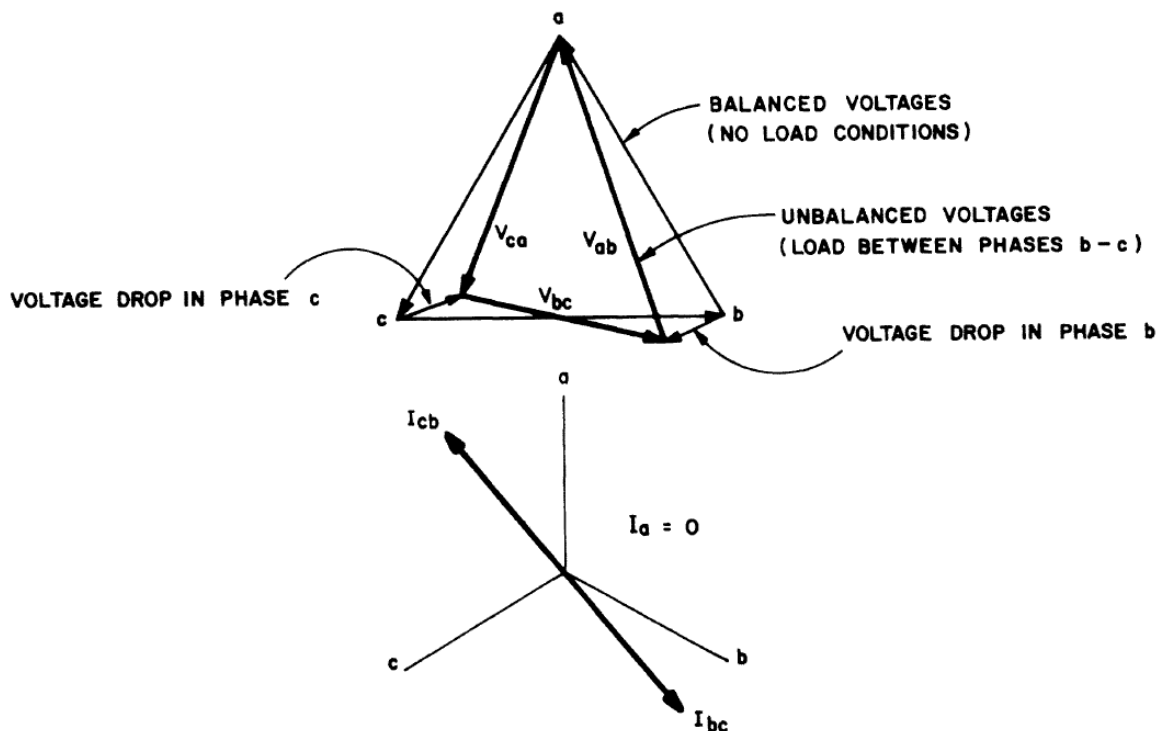
Madalpingevõrkudes on oluliseks probleemiks neutraal- kui ka kaitsejuhis tekkivad voolud. Täiendavate rikete olemasolul võivad voolud põhjustada pinge asümmeetria väärtuste kasvu, tekitades ohtu tarbijate elektripaigaldistele ning seadmetele. Eestis on probleemiks vanad madalpinge tarbijate elektripaigaldised, mis on ehitatud GOST standardite järgi TN-C pingesüsteemiga ning kus kasutatakse väikese ristlõikepindalaga alumiiniumist elektrijuhtmeid. Sellised süsteemid ei ole võimelised taluma suurt pinge asümmeetriat, mis teeb nad rikkealtiks.

Pinge asümmeetria väärtused Eesti kõrgepingevõrkudes on defineeritud Elering AS dokumendis VJ18 [35], kus pinge asümmeetriategur on 110 kV mõõtepunktis piiratud 2% 10-minutilise mõõteperioodi keskväärtusest iganädalasel mõõtmisel 95% juhtudest.

Pinge asümmeetria mõju vähendamiseks liidetakse elektriraudteesüsteem võimalikult tugevasse elektrivõrku, millega üritatakse vähendada häiringu osakaalu sellisel määral, et ei tekiks elektrivõrgus positiivse tagasisidega nähtuseid, mis võiksid vähendada elektrivõrgu stabiilsust ning põhjustada häiringuid teistele tarbijatele.

Parimaks näiteks antud olukorra ilmestamiseks on Soomes läbiviidud uuring, kus võrreldakse nõrgas (Kainuu) ja tugevas (Helsingi) elektrivõrgus tekkivat pinge asümmeetriat läbi elektrisüsteemi modelleerimise ja reaalsete elektrikvaliteedi mõõtmiste. Uurimuse tulemused kinnitavad, et nõrgas elektrisüsteemis tekkiv pinge asümmeetriatase on kõrgem ning tekitab probleeme piirkonna elektritarbijatele ja võrku ühendatud väikestele koostootmisjaamade generaatoritele. Samas Helsingi tugevas elektrisüsteemis oli pinge asümmeetria osakaal oluliselt väiksem ning sellega ei kaasnud otsesest probleemi teistele elektritarbijatele [32].

Elektriraudteesüsteemi 25 kV AC 50 Hz liinide vaheline ühendus tekitab elektrivõrgus uue püsitalitlusrežiimi, mille tõttu muutuvad oluliselt faasipingete ning liinipingete väärtused, kui ka faasinihke nurgad. Artiklis [33] kirjeldatud vektordiagrammid on toodud joonisel 14. Joonisel 14 esitatud vektordiagrammidel on kujutatud sümmeetrilise talitluse vektoreid peene joonega ning ebasümmeetrilise talitluse vektoreid jämeda joonega. Koormusvoolude vektordiagrammil on kujutatud faaside b ja c vahele ühendatud elektriraudtee poolt tekitatud voolukomponendid  $I_{BC}$  ja  $I_{CB}$ , mille nihkenurgad erinevad oluliselt sümmeetrilistest koormusvoolude a, b ja c omadest.



Joonis 14 Pinge ja voolu vektordiagrammid liitumispunktis sümmeetrilise ning elektriraudtee poolt põhjustatud asümmeetrilise koormuse järgselt [33]

Vektordiagrammide võrdlus näitab, et pingevektor  $V_{BC}$  orienteerub koormusvoolude järgi, kuna nende tõttu esinevad pingelangud faasides b ja c. Faasipingete muutumise tõttu vähenevad liinipingete  $V_{BC}$  ja  $V_{CA}$  amplituudväärtused ning nihkenurgad, kuid samas jääb muutumatuks  $V_{AB}$ . Võrreldes sümmeetrilise talitlusega tekib elektriraudtee koormuse lisandumisega oluline pinge parameetrite moonutus [33].

Joonisel 14 kujutatud muutuste tõttu tekkinud pinge asümmeetriat on keeruline kompenseerida klassikaliste meetoditega, kuna tarvis on korruga kompenseerida kolme erinevat parameetrit. Seetõttu puudusid ka 25 kV AC 50 Hz elektriraudteesüsteemi käikuvõtmisel lahendused pinge asümmeetria probleemi lahendamiseks ning selle osatähtsus püüti lihtsalt minimaalse tasemeni viia.

Kirjanduses on kasutatud laialdaselt pinge asümmeetria teguri määratlemiseks järgmist avaldist (1) [24, 25, 32, 33, 35, 36].

$$k_a = \frac{S_L}{S_{CC}} \cdot 100\% \quad (1)$$

kus,  $k_a$  – on pinge asümmeetria tegur,  
 $S_L$  – elektriraudtee koormus liitumispunktis (MVA),  
 $S_{CC}$  – on liitumispunkti lühisvõimsus (MVA).

Tuleb tähele panna, et antud avaldis kehtib ainult pinge asümmeetria määramiseks liitumispunktis ning see ei kirjelda pinge asümmeetria levimist elektrivõrgu teistesse punktidesse, mida iseloomustavad tulemused kirjanduses [32, 37]. Laiaulatusliku leviku määramine nõuab põhjalikku elektrisüsteemi dünaamika analüüsimist.

Pinge asümmeetria leviku uuring elektrivõrgus annab olulist informatsiooni ka teiste häiringute leviku ulatuse kohta ning aitab määratleda mõjusid teistele tarbijatele.

#### **4.5 Pinge- ja voolukõverate moonutused**

Elektriraudteesüsteemi 25 kV AC 50 Hz poolt põhjustatud kõrgemad harmoonikud elektrivõrgus on peamiselt sõltuvad vedurite tehnilistest lahendustest. Peamiseks häiringute allikaks on vedurite ajamites kasutatavad pooljuhtmuundurid, mistõttu on harmoonikute tekkimine otseselt seotud ajami tüübist ning selle filtrite häälestusest. Tulenevalt elektril töötavate vedurite suurest ühikvõimsusest, mis tavaliselt jääb vahemikku 2,5...10 MW, võib elektrivõrgu siinuspinge olla tugevalt moonutatud [24, 38].

Elektrivõrgu kõrgemad harmoonikud põhjustavad elektrivõrgus isolatsioonmaterjalide kiiremat vananemist ning mõjutavad elektrivõrgust toite saavaid elektriseadmeid, tuues pikemas perspektiivis kaasa suuri majanduslikke kahjusid. Kuna häiring pärineb kõrgemalt pingest, on harmoonikutest oluliselt mõjutatud just jaotusvõrgu kaabelliinid ja trafod.

Maailmas läbiviidud uuringud näitavad, et harmoonikute leviku puhul on oluliseks osaks ka elektriraudtee kontaktvõrgu tehnilised lahendused, millest osa võivad tekkivaid pinge harmoonikuid võimendada või vähendada [28, 39]. Kahe relsipaariga raudtee korral esineb kontaktvõrgus tugevaid vastastikuseid induktiiv- ja mahtuvuslikke sidestusi. Võrgusagedusest kõrgemate sagedustega harmoonikute korral võivad teatud tingimustel tekkida resonantsallikad, mis võivad võimendada harmoonikuid elektrivõrgus. [28]

Tulenevalt elektriraudtee harmoonikute negatiivsest mõjust tarbijate elektripaigaldistele, on ülekandevõrgu operaatori kohustuseks minimeerida võimalike häiringute edastamine teistele tarbijatele.

Elektrivõrgu operaatoril on oluline luua endale juriidilised võimalused kohustamiseks elektriraudtee operaatorit elektriraudteesüsteemi ühendatavate vedurite matemaatiliste mudelite ülevõtmiseks sarnaselt täna liituvate elektrijaamadega. Mudelite alusel tekiks võimalus testida elektriraudteevõrku ühendatavate veduriklasside sobivust elektrivõrguga ning seeläbi mini-

meerida võimalike kahjude tekkimist teistele tarbijatele. Täiendavalt on elektrisüsteemi operaatoril võimalik saadud mudelite alusel planeerida elektrivõrgu talitlust ning hinnata elektrisüsteemi stabiilust täiendavate generaatorite või tarbijate lisamisel. Kui antud võimalusi enne elektriraudteesüsteemi kasutusele võtmist ei rakendata, muutub elektrivõrgu operaatorile elektrivõrgu talitluse modelleerimine oluliselt keerulisemaks.

#### **4.6 Elektriraudtee regeneratiivse pidurdussüsteemi siirdeprotsessid**

Elektriraudteesüsteemide puhul on oluliseks arutelu küsimuseks regeneratiivse pidurdussüsteemi kasutamine, mis võimaldab oluliselt vähendada keskmist elektrirongide poolt tarbitud elektrienergiat [26]. Seejuures peab arvestama, et regeneratiivse pidurdamise korral on tegemist keeruka dünaamilise protsessiga, mille puhul muutub väga lühikese perioodiga elektrienergiavoo suund ning pinge väärtus. See tekitab elektrivõrkudes pinge efektiivväärtuste järseke muutuseid ja keerukaid võnkeprotsesse ning võib mõjutada oluliselt elektrivõrgu stabiilust, eriti mitme rongi samaaegsel pidurdamisel ühe toitealajaama piirkonnas [24, 35].

Regeneratiivse pidurdussüsteemi kasutuselevõtt nõuab põhjalikku elektrisüsteemi analüüsi otsustamiseks, kas antud süsteemi on üldse Eesti elektrisüsteemis võimalik rakendada. Antud talitusrežiimi rakendamisel tuleb määrata konkreetsed kasutustingimused. Näiteks Inglismaa elektriraudteesüsteemis on keelatud regeneratiivse pidurdussüsteemi kasutamisel elektrienergiat elektrivõrku tagastada, mille tõttu kasutatakse vedurites regeneratiivset pidurdamist läbi koormustakistuste. Prantsusmaal on regeneratiivne pidurdamine üldtingimustel lubatud. Konkreetse rongi regeneratiivse talitluse üle otsustab elektriraudtee releesüsteem, kas pidurdamisel antakse energiat elektrivõrku või muundatakse pidurdustakistustel soojuseks [26].

Tulenevalt regeneratiivse talitluse negatiivsetest mõjudest elektrisüsteemidele, uuritakse maailmas erinevaid energia salvestamise võimalusi veduritel ning salvestatud energia kasutamist, kas siis rongide abiahelate toiteks või kiirendamisel kontaktvõrgu koormuse vähendamiseks. [31].

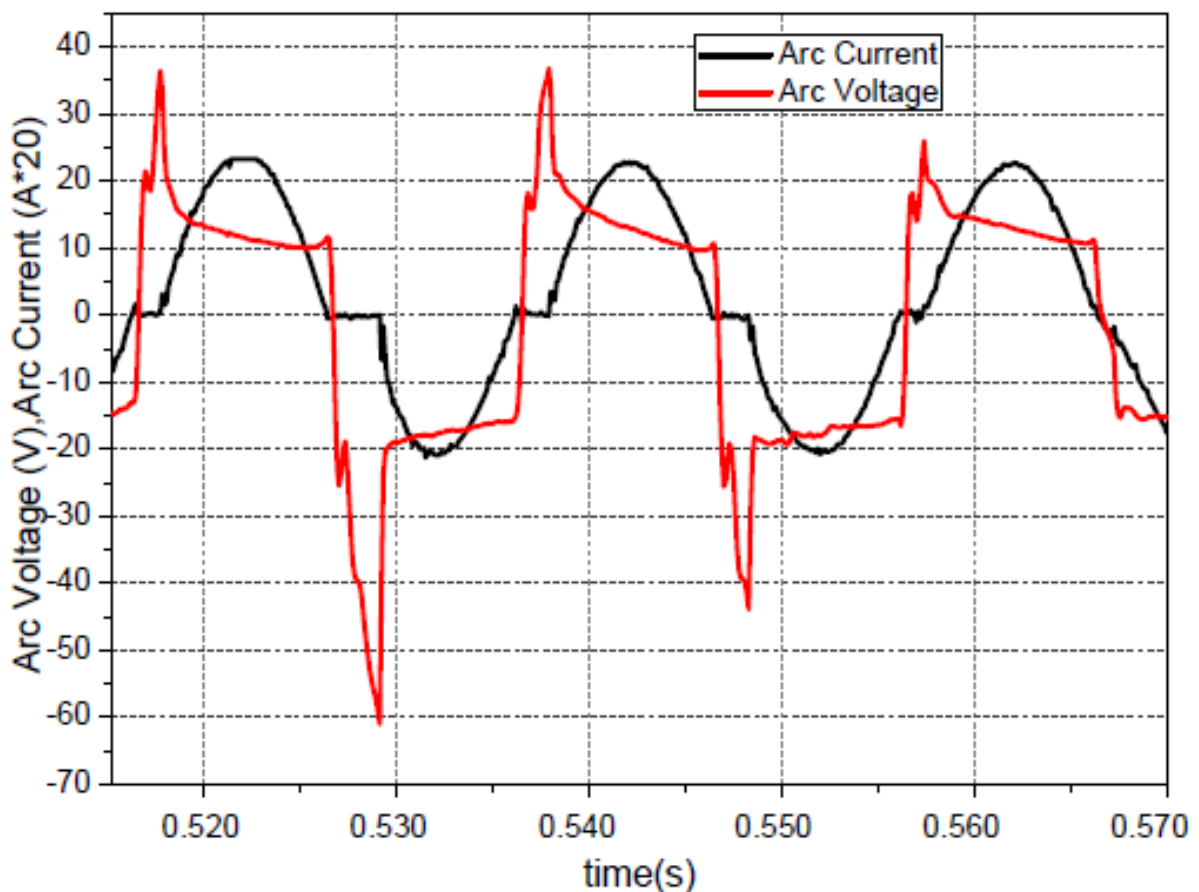
#### **4.7 Ebaühtlane kontakt pantograafi ja kontaktliini vahel**

Selleks, et saavutada hea kontakt veduri pantograafi ja kontaktliini vahel, kasutatakse elektriraudtee kontaktvõrgus laialdaselt mehaanilisi automaatpinguteid, mis tagavad tugijuhtme konstantse mehaanilise pinge ning kontaktjuhme rippe puudumise. Kaarleegi vältimiseks ka-

sutatakse tänapäeval ka pantograafide aktiivjuhtimist elektrimootoriga, tagamaks pantograafi pidevat, konstantset survet vastu kontaktliini [26, 40].

Iga väiksempi kontakti kadumine põhjustab pantograafi ja kontaktvõrgu vahelist kaarleeki, mis kahjustab mõlemat kontaktpina. Täiendavad kahjustused suurendavad kaarleegi tekkimisvõimalust [40].

Tulenevalt vedurite suurest ühikvõimsusest, põhjustab veduri pantograafi ja kontaktvõrgu vahelise ühenduse katkemine lühiajalise koormuskatkestuse ning kaarleegi tekkimisel ebaliineaarse koormusvoolu. Ebaliineaarne koormusvool põhjustab täiendavate harmoonikute tekkimist elektrivõrgus ja olulisi pingekvaliteedi probleeme. Peamiselt tajutakse kaarleegist tingitud koormusekõikumist ning kaarleegi aegset ebaliineaarsest koormusvoolust tingitud pingekõikumist värelusena (lampide vilkumisena).



Joonis 15 Pinge ja koormusvoolu kujud kaarleegi poolt tekitatud häiringu korral [40]

Joonisel 15 on kujutatud kaarleegi mõju kontaktvõrgu pingele ja veduri koormusvoolule. Jooniselt on näha, et kaarleek moonutab pinget kuju, mis on tingitud kaarleegi ebalineaarsest takistusest [40].

Kontaktliini ja pantograafi halva ühenduse korral (kui puudub täielik kontakt või pantograaf ei avalda kontaktliinile piisavat vastusurvet) tekib ühenduskohas sädelus, mis põhjustab olulisi elektromagnetühilduvuse probleeme. See võib põhjustada häiringuid elektriraudtee läheduses asuvates sidevõrkudes (mis ei kasuta fiiberoptilisi liine) ning teatud tingimustel võivad sädelusest tingitud häiringud levida ka raadioside sagedusalasse. Täpsemalt on elektromagnetilise ühilduvuse probleeme, mis on põhjustatud halvast kontaktist pantograafi ja kontaktliini vahel, kirjeldatud artiklis [41].

#### **4.8 Elektromagnetiline ühilduvus**

Standard EN 50121 määratleb ära elektromagnetilise ühilduvuse järgmised aspektid:

- raudteeseadmete mõju väljaspool süsteemi paiknevatele seadmetele;
- raudteeseadmete mõju raudteel kasutatavatele signaal- ning kommunikatsiooni-seadmetele.

Kontaktliin võib olla vahendajaks häiringutele, mis pärinevad elektrirongi veo- või abitoite-muundurist ning häiringutele, mille põhjustajaks on kontaktliini toitvas alajaamas paiknevad alaldusseadmed. Häiringud võivad olla nii juhtivuslikud kui ka elektromagnetväljana kiirguvad.

*Tabel 4 Raudteeseadmete elektromagnetilise ühilduvuse normid*

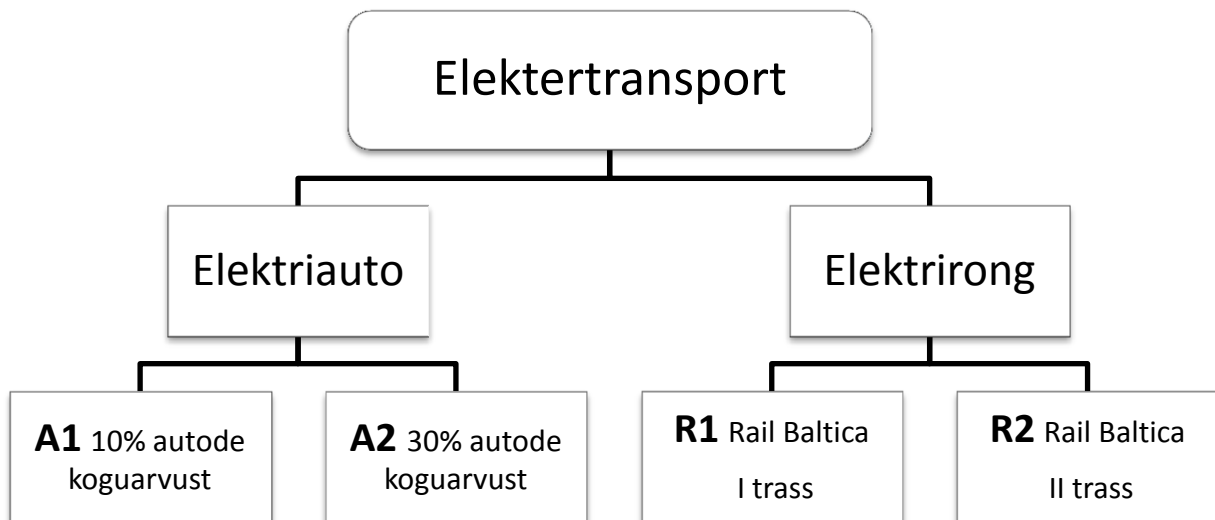
<b>Baasstandard</b>	<b>Häiringu sagedus</b>	<b>Piirangud</b>
EN 50121	9 kHz kuni 150 kHz	Piiramata
	150 kHz kuni 500 kHz	99 dB $\mu$ V
	500 kHz kuni 30 MHz	93 dB $\mu$ V
EN 55011	30 MHz kuni 230 MHz	40 dB $\mu$ V (mõõdetud 10m kauguselt)
	230 MHz kuni 1 GHz	47 dB $\mu$ V (mõõdetud 10m kauguselt)

9 kuni 150 kHz sagedusega häiringute osas piiranguid ei ole. Seega ei tohiks nii elektrirongidel paiknev aparaat kui ka alajaamades paiknev seadmestik antud sagedusega häiringute korral probleeme põhjustada. Limiteeritud on 150 kHz ülespoole jäävad häiringud (tabel 4). 30 MHz kuni 1 GHz häiringuid mõõdetakse spetsiaalse mõõteseadmega häiringutekitajast 10 m kaugusel. Tabelis 4 märgitud piirmääradest allapoole jäävate häiringuväärtuste korral ei tohi esineda elektromagnetilisest ühilduvusest põhjustatud tõrkeid raudteel kasutatavatel signaal- ning kommunikatsiooniseadmetel. Kõrgsageduslikke häiringuid võivad põhjustada nii mehaaniliste kui ka jõupooljuhtlülitite sisse- ja väljalülitamisel tekkivad lühiajalised kõrgsageduslikud pinge- ja vooluvõnkumised (jäävad tüüpiliselt vahemikku 500 kHz kuni 30 MHz). DC/AC tüüpi sagedusmuundurite ja asünkroonmootorite kasutamine uutel elektrirongidel seniste alalisvooluajamite asemel võib lisada kontaktliini uusi häiringuid.



## 5 Elektertranspordi uurimistöö edasiste stsenaariumite määratlemine

Käesolevas peatükis kirjeldatakse uurimistöö järgmises etapis käsitletavaid stsenaariumeid, mis kokkuvõtvalt esitatud järgmisel joonisel (joonis 16).



Joonis 16 Elektertranspordi uurimissuunad ja stsenaariumid

Edasistes etappides keskendutakse elektriautode puhul nende häiringukindluse uuringutel ning vaadatakse nende mõju tarbimismahtude muutusel. Elektriraudteesüsteemide puhul fookuseeritakse Rail Baltica projektile ning sellega ettenähtud raudteesüsteemi rajamisel kaasnevate elektrisüsteemi talitluse mõjudele. Praegusel hetkel pole otseselt selge, kuidas ning millisel määral antud elektriraudtee liitumine süsteemiga mõjutab Eesti elektrisüsteemi talitust.

### 5.1 Elektriautode stsenaariumid

Elektriautode puhul on määravaks elektriliseks kriteeriumiks nende levik. Seega tuleb käsitleda järgnevaids kitsaskohti:

- Elektriautode laiema leviku korral muutub määravaks laadimissüsteemi häiringukindlus ülekandevõrgus esinevate häiringute korral. Tuleb analüüsida, mis juhtub lühise korral või pikaajalise toitekatkestuse tingimustes või pinge erineb ajutiselt kehtestatud normidest (230 V asemel 200 V)?

- Elektriautode suurema osakaalu puhul muutub oluliseks neile vajaliku elektrienergia ja võrguühenduse tagamine. Uurida võimalust elektriautosid kaasata energiasüsteemi avariireservi tagamisse ja selgitada, mis tingimustel oleks see võimalik ning kuidas see mõjub erinevatele osapooltele (energiasüsteemi kasu või kahju, akude eluiga, arveldus jms)?

Uurimistöö raames oleme võtnud elektriautode leviku hindamiseks kaks võimaliku osakaalu:

- Elektriautode osakaal on autode koguarvust kuni 10% (näiteks aastal 2020)
- Elektriautode osakaal on autode koguarvust kuni 30% (näiteks aastal 2030)

Antud osakaalude juures elektriautode mõju uurimine annab hinnangu, kas elektriautod on elektrivõrgule märgatavad ja kuidas mõjutab olukorda nende erinev levik.

## **5.2 Elektrirongide stsenaariumid**

Rail Baltica projekti jaoks on tehtud kaks peamist teostatavuse uuringut, millest esimene on COWI poolt läbiviidud „Feasibility study on Rail Baltica railways“ [42] ning ACOM-i poolt koostatud „Rail Baltica Final Report [43]“. Antud teostatavuse uuringutes on käsitletud peamisi Rail Baltica projekti realiseerumise stsenaariumeid ning nende realiseerumist lähtudes majanduslikest seisukohtadest.

Peamiselt ideoloogilisel tasandil nähakse ette kahte põhilist stsenaariumit:

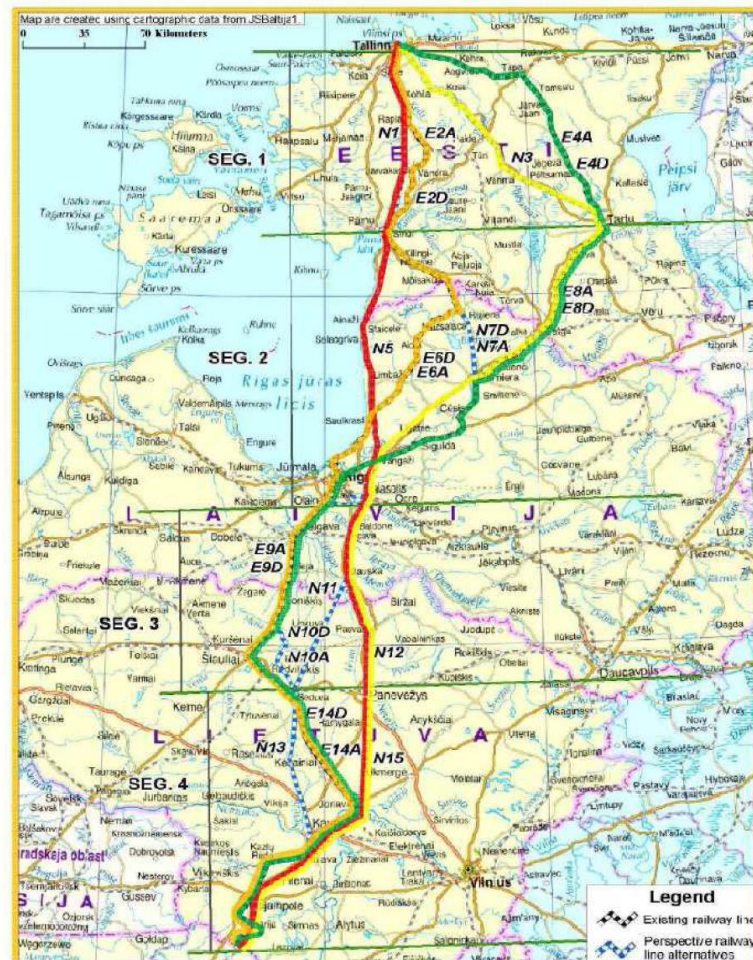
- võimalust jätta Rail Baltica raudtee elektrifitseerimata ning veduritena kasutatakse vaid diiselmootoritega vedureid;
- elektrifitseeritakse planeeritav uus raudteesüsteem.

Esimest stsenaariumit uurimistöös ei käsitleta, kuna puudub otsene mõju elektrisüsteemi talitlusele. Mõjud piirduvad vaid energiamajandusega, energiakandjate bilansiga ja keskkonnanäitajate küsimustega.

Teise stsenaariumi puhul on otsene mõju elektrisüsteemile olemas, mistõttu lähtutakse uurimistöös, et Rail Baltica elektrifitseeritakse. COWI kui ka ACOM-i teostatavuse uuringutes käsitletakse Rail Baltica projektis mitmeid võimalikke raudteetrasse, peamiselt majanduslikest aspektidest. Seejuures tuleb tähele panna, et projekti maksumuses ei ole täielikult arvestatud elektrifitseerimisega kaasnevat kulusid, kuna antud hetkel pole üheselt selge, kui palju on vaja elektrisüsteemidesse investeerida. Kaasnevate investeeringute vajadus võib oluliselt mõ-

jutada projektiga kaasnevaid kulusid ning osutada määravaks trasside valikul või välistada elektrifitseerimise stsenaariumit.

Rail Baltica projekt raames kaalutud võimalikud trassid on kujutatud joonisel 17. Trasside pikkused ning rongide keskmised kiirused on toodud joonisel 18.



Joonis 17 Rail Baltica projekti võimalikud raudteetrassid [43]

Teostusaruannetes käsitletakse kahte põhilist trassivalikut [42, 43]:

1. Tallinn – Pärnu – Rii trass (I trass)
2. Tallinn – Tartu – Rii trass (II trass)

Nimetatud aruannetes ei välistata kummagi trassi valiku realiseerumist, kuigi praegusel hetkel on enim uuritud Tallinn – Pärnu – Rii trassi. Püstitatud kahe trassi valiku ning sellest tulenevate stsenaariumite eesmärgiks on määratleda mõlemal juhul elektrifitseerimise võimalikkus. Samuti tuleb uurida elektrivõrgu talitluse mõju ja selle leviku ulatust olemasoleva ülekandevõrgu konfiguratsiooni korral.



Joonis 18 Rail Baltica projekti trasside pikkused ning võimalikud keskmised kiirused [43]

Trasside ja ülekandevõrkude erineva paiknemise tõttu tuleb arvestada erinevaid tehnilisi lahendusi ja mõjude ulatust. Elektriraudtee mõjude hindamiseks lisanduvad peamistele stsenaariumitele alamstsenaariumid, mis käsitlevad elektriraudtee kontaktvõrgu võimalikke tehnilisi lahendusi, mis on:

- 1x25 kV AC süsteemi kontaktvõrgu lahendused;
- 2x25 kV AC süsteemi kontaktvõrgu lahendused.

Tulenevalt kontaktvõrgu lahendusest, vajatakse elektrivõrgult mõlemal juhul erinevat unikaalset elektrivõrgu konfiguratsiooni, mistõttu omavad nad erinevat mõju elektrivõrgu talitlusele. Sõltumata trassi valikust tuleb arvesse võtta ka võimalik liiklusmaht ja selle võimalik suurenemine. Rail Baltica algusfaasis on see kindlasti väiksem kui näiteks pärast kümneaastast käigusolekut. Ka seda tuleb võimaliku alamstsenaariumina käsitleda ning valikud võiks siin olla mõlema trassi puhul järgmised:

- Hinnanguline liiklusmaht Rail Baltica algusaastatel (2020+);
- Hinnanguline liiklusmaht Rail Baltica kümnendal aastal (2030+).

Stsenaariumite modelleerimine ja analüüsimine loob ühtse seisukoha elektriraudtee liitmisest elektrivõrguga. See võimaldab määrata üldisemad tehnilised tingimused ja võimalikud liitumispunktid, olenemata sellest, millist lahendust elektriraudtee projektis lõplikult kasutama hakatakse.

Kindlasti on huvipakkuv aga käesoleva uurimistöö raamidest väljuv arvutuskäik, kus kõik või osa olemasolevad diiselronge viidaks üle elektritoitele. Samas aitavad käesoleva uurimustöö raames tehtavad arvutused ja koostatavad meetodid kaasa selle töö võimalikuks tegemiseks tulevikus.

## 6 Kokkuvõte

Traditsiooniliste mootorkütuste kallinemine ja nõuded heitmete vähendamisele annavad tõuke seni fossiilkütuseid kasutanud elektertranspordi üleviimisele elektrienergiale. Sõltuvalt energiasüsteemi eripärast on tehtavad muudatused vähem või rohkem kulukad ning mõjutavad igat energiasüsteemi omamoodi. Eesti on saanud üheks elektriautode valdkonna eestvedajaks. Maailmas vaadatakse suure huviga, kuidas meie üleriigiline kiirlaadijate võrk käitub ning kuidas autod meie tingimustes vastu peavad. Samuti peavad õppima ja omad järeldused tegema võrguettevõtted, et ka nemad saaksid ennatlikult vajalike muudatusi teha ja oma kogemuste põhjal teisi õpetada.

Elektriraudtee tulevikku mõjutab oluliselt plaanitav Rail Baltica ühendus. Lisaks reisijate veole hakkab toimuma ka mahukas elektrienergia transport, mida senini ei ole Eesti elektrisüsteemis kohatud. Uued väljakutsed on siin nii süsteemioperaatorile kui ka uurimisasutustele, kelle abiga tuleks välja töötada kõige sobivamad lahendused.

Elektriautod ja Rail Baltica projekt on kindlasti lähituleviku ühed suuremad, kõiki Eesti elanike puudutavad energeetikaalased lahendused. Kui elektriautosid ning nende tava- ja kiirlaadijaid võib võtta vastavalt ühe- või kolmefaasilise tavatarbijana, siis kiirraudtee projekt Rail Baltica on tunduvalt suurema mõjuga, tulenevalt oma suurematest ühikvõimsusest. Siinkohal tasub veelkord mainida, et elektriautode kasutuselevõtu mõju elektrivõrgule on pikaajaline protsess samas kui kiirraudtee mõjud võivad ilmned a koheselt.

Käesoleva aruande peamine eesmärk oli anda hinnang ning analüüsida, kuidas võivad plaanitavad suuremahulised elektertranspordi liigid mõjutada Eesti elektrisüsteemi. Aruande esimeses peatükis anti ülevaade elektertranspordi olukorrast Euroopas. Teises peatükis keskenduti Eesti elektritranspordi oludele. Kolmandas on analüüsitud elektritranspordi ühendusviise ning aruande kõige tähtsamaks osaks võib pidada neljandat osa, kus on käsitletud elektritranspordi mõju elektrisüsteemile. Sillaks edasistele uuringutele on peatükk elektritranspordi arengustsenaariumitest, kus rõhutatakse edasise uurimise põhisuundi ja tegevusi.

Sellise kahe, kohati vastandliku projekti uurimine, kus ühel juhul mõjutab võrk tarbijaid ning teisel juhul tarbijad võrku, on suur väljakutse. Siinkohal püüamegi kokku võtta ja ümber sõnastada analüüsi käigus ilmnenu d murekohad ja väljakutsed.

#### Elektriautod:

- Kriitilise elektriautode arvu määramine. Oluline on määrata elektriautode maht, millest alates on elektrisüsteem tugevalt mõjutatud uutest tarbijatest.
- Elektriautodele vajaliku infrastruktuuri tagamine. Elektriautode laialdasel kasutuse võtmisel võib koormus kontsentreeruda ning põhjustada sõlmajamade lühiajalist tugevat ülekoormust. Samas ei pruugi selline lühiajaline ülekoormatus õigustada täiendavaid investeeringuid elektrisüsteemi. Seega tuleks välja töötada lahendused, millega vähendada võimalikke üle investeeringuid.
- Ülekandevõrgus toimuvate häiringute mõju elektriautodele ning laadimisvõrgule. Oluline on määrata elektrisüsteemist tingitud häiringute levikut elektrivõrgu madalamatele astmetele ning hinnata nende võimalikku mõju laadimisseadmele (nii auto sisesele kui ka kiirlaadijale).

#### Elektriraudtee:

- Mudelid elektriraudtee mõjude täpseks hindamiseks. Vajalik koostada vähemalt kolm komplektset mudelit:
  - ülekandevõrgu mudel;
  - kontaktvõrgu mudel;
  - elektriraudtee vedurite mudelid.
- Potentsiaalsete liitumispunktide hinnang. Elektriraudtee mudelite koostamiseks on oluline analüüsida võimaliku raudteetrassi läheduses asuvate alajaamade sobilikust elektriraudteesüsteemi liitumiseks elektrivõrguga. Vastava analüüsi läbiviimisel kujuneb välja elektrivõrgu modelleerimise maht ning sisendid elektriraudtee kontaktvõrgu konfiguratsiooni määramiseks.
- Kontaktvõrgu teoreetilise konfiguratsiooni määramine. Vahelduvvoolu elektriraudtee süsteemide arenguga on väljatöötatud erinevaid elektriraudtee kontaktvõrgu süsteemide konfiguratsioone. Läbiviidud uurimistöödest ei kujune välja üheselt parimat kontaktvõrgu lahendust. Teoreetiliselt optimaalse kontaktvõrgu lahenduse määramiseks tuleb koostada erinevate kontaktvõrkude tüüpide matemaatilised mudelid ning hinnata nende sobivust ülekandevõrguga. Kontaktvõrgu lahendus on sisendiks toitetrafo tüübi määramiseks.
- Toitetrafo tüübi määramine. Kirjandusest järeldub, et kontaktvõrku toitva trafo tüübist sõltub elektriraudtee mõju elektrisüsteemile.

- Elektriraudtee vedurite teoreetiliste mudelite koostamine. Elektriraudtee süsteemi mõju on otseselt seotud süsteemis kasutatavate vedurite tehniliste lahendustega. Elektriraudtee vedurite veosüsteem on iga tootja ärisaladus, mistõttu tuleb kirjandusele tuginedes arendada välja sobivad teoreetilised elektriraudtee vedurite mudelid.
- Elektriraudtee mõju elektrivõrgu elektrikvaliteedile. Koostatud mudelite põhjal on võimalik hinnata elektriraudteest tingitud mõjusid elektrivõrgule ning elektrikvaliteedile. Töö käigus kujunesid välja peamised mõjude klassid, millede mahtu ja levikut elektrisüsteemis tuleks analüüsida eraldiseisvalt.
  - ebasümmeetrilisest koormusest tingitud püsitalitus probleemid;
  - pinge asümmeetria;
  - harmoonikud ning pinge- ja voolukõverate moonutused;
  - elektriraudtee regeneratiivse pidurdussüsteemi siirdeprotsessid;
  - ebahühtlane kontakt pantograafi ja kontaktliini vahel.
- Elektriraudteesüsteemi sobivus olemasoleva infrastruktuuriga. Elektriraudtee süsteemi komplektse mudeli põhjal on võimalik analüüsida elektriraudtee liitumise võimalikust olemasoleva elektrisüsteemiga.

Kokkuvõtvalt võib järeldada, et elektriautode ja kiirrongide ühendamise elektrivõrguga ei ole sama, mis tavatarbija liitmine elektrivõrku. Elektertranspordi puhul ei piirdu arvutused ainult läbilaskevõimsuse määramises ning vajalik on keerukam analüüs. Uut tüüpi tarbijad mõjutavad oma suureneva osakaalu tõttu ka teisi tarbijaid. Ei maksa unustada, et võrgus on uut tüüpu tarbijaid ees ootamas juba ka uut tüüpi elektri tootjad, kes samuti oma mõju avaldavad. Kuidas kõik elektrivõrgu osalised koos hakkama saavad, selgub tulevikus.



## 7 Kasutatud kirjandus

- [1] www.e24.ee, „Huvi elektriautode järgi on Euroopas oodatust väiksem,“ Postimees, detsember 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.e24.ee/1072462/huvi-elektriautode-jargi-on-euroopas-oodatust-vaiksem/>. [Kasutatud aprill 2013].
- [2] L. J. Masson, „EVs in Europe: 2012 Winners and 2013 Forecasts,“ Plugincars, jaanuar 2013. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.plugincars.com/evs-europe-2012-winners-and-2013-forecasts-126113.html>. [Kasutatud aprill 2013].
- [3] Autonet, „Renault-Nissani liit toob Renault'le kasu,“ www.autonet.ee, aprill 2013. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.autonet.ee/uudised/paevauudised/55405>. [Kasutatud aprill 2013].
- [4] KredEx, „www.kredex.ee,“ detsember 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <http://kredex.ee/kredexist/uudised/inimeste-usaldus-elektriautode-vastu-on-tousnud/>. [Kasutatud aprill 2013].
- [5] J. Tuisk, „Elektriautod tarkvõrgus - Võimalused ja väljakutsed,“ www.eas.ee, [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.eas.ee/media/com\\_events/attachments/628/Jarmo%20Tuisk%20-%20Tarkv%C3%B5rgu%20konverents%2018.12.12..pdf](http://www.eas.ee/media/com_events/attachments/628/Jarmo%20Tuisk%20-%20Tarkv%C3%B5rgu%20konverents%2018.12.12..pdf). [Kasutatud aprill 2013].
- [6] ELMO, „Ligi kümnendik kogu maailma elektriautode kiirlaadijatest asub Eestis,“ www.elmo.ee, [Võrgumaterjal]. Available: <http://elmo.ee/ligi-kumnendik-kogu-maailma-elektriautode-kiirlaadijatest-asub-eestis/>. [Kasutatud aprill 2013].
- [7] „Challenges for a European market for electric vehicles,“ Policy Department Economic and Scientific Policy, European Parliament, Brussels, 2010.
- [8] P. Covington, „Electric Vehicle Market Forecast – 10 Year Horizon Looks Strong,“ 01 02 2012. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.triplepundit.com/2012/02/electric-vehicle-market-forecast-10-year-horizon-looking-strong/>. [Kasutatud 17 12 2012].
- [9] ICT, „ICT for a Low Carbon Economy. Smart Electricity Distribution Networks,“

Brussels, 2009.

- [10] „EL elektriautode projektid,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.eurelectric.org/Maps/InteractiveMapEV/>. [Kasutatud Jaanuar 2013].
- [11] L. Ojala, „Transport Infrastructure Investments in the Baltic Sea Region 2007-2013,“ %1 *Regional Workshop on Public-Private Partnership (PPP) in Transport*, Riga, Latvia, 2007.
- [12] European Commission, December 2012. [Võrgumaterjal]. Available: [http://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/index_en.htm).
- [13] A. Kozlak, „Opportunities of Integration of South-East Baltic Sea Region in the Light of EU Transport Policy,“ %1 *Proceedings of the 6th International Scientific Conference TRANSBALTICA 2009*, 2009.
- [14] J. Saranen, O. P. Hilmola ja M. Laisi, „Public Sector Actors' Views on Rail Baltica,“ *Sustainable Spatial Development. Scientific Journal of Riga Technical University*, kd. 3, pp. 77-81, 2011.
- [15] A. Kakulis, „A Feasibility Study for a Standard Gauge Separate Railway Line in Estonia, Latvia and Lithuania,“ 2011.
- [16] H. Adelsberger ja H. Eicher, „The Koralm-Line as a Part of Wider European Railway Connections – Integrated in the Baltic-Adriatic-Axis,“ *You have full text access to this content*, kd. 1, nr 4, pp. 250-255, August 2008.
- [17] „Railway transport - Length of electrified lines, by type of current,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/>. [Kasutatud 12 2012].
- [18] M. Vee, *Elektriautod Eesti tingimustes*, Tallinn: TTÜ elektroenergeetika instituut, magitritöö, 2011.
- [19] „Eesti elektromobiilsuse programm - ELMO,“ [Võrgumaterjal]. Available: [www.elmo.ee](http://www.elmo.ee).

- [20] M. Helme, „Rong see sõitis...“, *Tehnikamaailm*, juuni 2009. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.tehnikamaailm.ee/est/tm/2009/06/?headerID=1608>. [Kasutatud 13 12 2012].
- [21] „FLIRT, superkiirendusega moodne rong, jõuab Eesti pinnale juba sel kuul,“ *Inseneeria*, pp. 10-11, November 2012.
- [22] V. Kala, „Šveitsi rongid tulevad!“, *Tehnikamaailm*, oktoober 2011. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.tehnikamaailm.ee/est/tm/2011/10/?headerID=2289>. [Kasutatud 13 12 2012].
- [23] M. Melder, „Üleriigilise elektrisõidukite kiirraadimistaristu kirjeldus ja kiirraadimise hinna arvutus,“ *TTÜ elektroenergeetika instituut*, 2011.
- [24] C.J.Goodman, „Overview of Electric Railway Systems and The Calculation of Train PERFORMANCE,“ *IET Professional development Course on Electric Traction System*, pp. 1-24, 2010.
- [25] A. Steimel, „Electronic Grid Supply of AC Railway Systems,“ %1 *13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, 2010.
- [26] B. A. Ross, „A Survey of Western European AC Electrified Railway Substation and Catenary System Techniques and Standards,“ *IEEE Transactions on industry and general applications*, oktoober 1971.
- [27] S. O. G. C. H. Lee, „A Study on the Equivalent Conductor Representation of AC Electric Railway System,“ %1 *ICIMT '09. International Conference on Information and Multimation technology*, 2009, 33-77 pp..
- [28] C. G. S. H.Lee, „Harmonic Analysis of the Korean High-Speed Railway Using the Eight-Port Representation Model,“ %1 *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, 979-986 pp..
- [29] A. Capasso, „The power quality concern in railway electrification studies,“ %1 *8th International Conference On Harmonics and Quality of Power Proceedings*, 1998, 647-652 pp..

- [30] J. W. G. I. C. M.A. Suárez, „Transient Overvoltages in a Railway System During Braking,“ %1 *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2010, 204-211 pp..
- [31] A. R. H. Ibaiondo, %1 *4th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2010, 94-97 pp..
- [32] M. H. J. N. A. O. H. T. M. L. P. Heine, „The Impact of 50 Hz Railroad Systems on Utility System Power Quality,“ %1 *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ)*, 2010, 61-66 pp..
- [33] T. Kneschke, „Control of Utility System Unbalance Caused by Single-Phase Electric Traction,“ *IEEE Transactions on Industry Applications*, kd. 21, nr 6, pp. 1559-1570, 1985.
- [34] P. Gnacinski, „Windings Temperature and Loss of Life of an Induction Machine Under Voltage Unbalance Combined With Over- or Undervoltages,“ *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, 363-371 99..
- [35] R. B. M. Tulbure, „Models for the AC Locomotives Regenerative Braking,“ *IEEE International Conference on Automation Quality and Testing Robotics (AQTR)*, 2012, 525-530 pp..
- [36] H.-Y. K. T.H. Chen, „Network modelling of traction substation transformers for studying unbalance effects,“ %1 *IEE Proceedings- Generation, Transmission and Distribution*, 1995, 103-108 pp..
- [37] G. C. L. M. R. D. Z. N. Golovanov, „Voltage Unbalance Vulnerability Areas in Power Systems Supplying High Speed Railway,“ *Power Engineering Society General Meeting*, IEEE, 2005, 2509-5214 pp..
- [38] A. Mariscotti, „Results on the Power Quality of French and Italian 2x25 kV 50 Hz railways,“ %1 *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2012, 1400-1405 pp..
- [39] W. G.-n. Z. X. F. C.-L. H. C.-h. Y. Q. D. Ming-li, „The simulation analysis of

- harmonics and Negative sequence with Scott wiring transformer," %1 *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, 2008, 513-516 pp..
- [40] G. W. G. G. L. Z. W. B. W. Y. C. Y. M. A. Dong, „Simulation System of Pantograph Arcing," %1 *1st International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology*, 2011, 637-641 pp..
- [41] S. F. C. Song, „Three Types of Electromagnetic Noise between Pantograph and Catenary," %1 *3rd IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, 2009, 40-43 pp..
- [42] COWI, „Feasibility study on Rail Baltica railways," [Võrgumaterjal]. Available: [http://ec.europa.eu/regional\\_policy/sources/docgener/evaluation/railbaltica/report.PDF](http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/evaluation/railbaltica/report.PDF). [Kasutatud Jaanuar 2013].
- [43] ACOM, „Rail Baltica Final Report," [Võrgumaterjal]. Available: [http://www.euregio-heltal.org/wp-content/uploads/2011/03/item\\_3195\\_Rail\\_Baltica\\_Final\\_Report\\_Executive\\_Summary\\_31\\_05\\_11\\_FINAL\\_v2.pdf](http://www.euregio-heltal.org/wp-content/uploads/2011/03/item_3195_Rail_Baltica_Final_Report_Executive_Summary_31_05_11_FINAL_v2.pdf).

## Lisa 1. Valik Euroopa Liidus elektriautodega seonduvaid projekte

Projekti nimi	Asutus	Lühitutvustus	Aeg	Country
eFlex	DONG Energy, (DSO), (DK)	The purpose of eFlex project is to gain experience with mobilization of private customers' flexible energy consumption, especially from electric cars, electric heating and heat pumps.	2010 - 2011	DK
Electricity for road transport, flexible power systems and wind power	Risø DTU, (DK)	The project aims to analyse the interaction between the electricity/ CHP industry and the transport industry in a situation of increased use of electric cars and plug-in hybrid cars. The project focuses on all the technical aspects in the chain: the status of the electric car, testing of hybrid cars in a local electricity grid, connection points as well as the load and capacity requirements of the electricity grid.	Jan 2008 - Jan 2011	DK
Large-scale demonstration of charging of electric vehicles, ForskEL	ChoosE V A/S, (DK)	Developing of ChoosCOM for intelligent charging and communication with electric cars and is test it by 2400 families in 300 EVs. Main investigation is whether it is possible to move the charge of EVs to a more production and environmental friendly time – and is the EV owner interested in it.	Jan 2011 - Dec 2013	DK
EVCOM	Energin et.dk, (TSO), (DK)	The primary purpose is to establish a concept for electric vehicles and their communication with the power system. The concept disseminated to the standardization work and to relevant stakeholders.	Jan 2008 - Dec 2010	DK
Charging	Gotebo	The project built and tested approximately 50 charging points, all of them equipped with	Jan	SE

Infrastructure for Electric Vehicles	rg Energy AB (SE)	smart meters enabling sub-metering at user specific level and remote on-off functionality. A one-stop-shop charging offer was tested on the market and further developed within the project. An internal development plan for charging of electrical vehicles was produced.	2008 - Dec 2010	
Plugged in Places	Various UK)	The Plugged-in Places will provide the charge points to support ‘Plug-in Cars’ - pure electric vehicle (EVs), plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and hydrogen cars. They are intended to demonstrate how electric vehicle charging works in practice in a range of different settings – urban, suburban and regional – as well as testing innovative technologies such as rapid charging, inductive charging and battery swap.	Apr 2010- Apr 2013	UK
Smart city Malaga	Endesa (ES)	The goals of SmartCity Málaga can be summarized into the following ones: - Test and deployment of the new energy management model; - Implementation and integration of Distributed Energy Resources, Energy Storage facilities, Electric Vehicles charging processes and intelligent Public Lighting devices into the new operation grid systems	Mar 2009 - Mar 2013	ES
E-mobility	Enel (IT) Daimler (DE)	E-mobility Italy enables the diffusion and the use of electric vehicles, with state of the art recharging technologies, thanks to ad-hoc development of recharging infrastructure, offering intelligent and secure services and respecting the environment. Smart® Electric vehicles will be provided to 100 customers and 400 recharging stations (300 public stations and 100 home stations) will be installed by Enel in Rome, Milan and Pisa. The new charging points will leverage Enel’s technology, including the Enel smart meter as a kernel for providing all certified metering functionalities and guaranteeing uniformity	Dec 2008 - Dec 2013	IT

		with regard to data acquisition and final customer billing management.		
Vehicle2Grid		Based on the experience gained from the ElectroDrive initiative launched in April 2009 to offer the public complete e-mobility packages, interfaces and concepts are being developed for interaction portals for electric mobility customers in the Salzburg model region. They focus on concepts for smart grid integration and new business models.		AU
Mobi-E		Project promoted by the Portuguese government for facilitating the introduction of electric vehicles. Twenty one Portuguese cities are involved in “Mobi-E” and the short-term goal is the installation of 320 recharging stations by end-2010 and to have active 1 300 recharging stations at the end of 2011. A consortium of Portuguese companies is organised under the “Mobi-E” initiative involving EDP, several industrial and consultant companies and research centres.	2010-2011	POR
emporA - E-Mobile Power Austria		<p>Project brings together Austria’s leading businesses from the automobile industry, infrastructure technology, energy supply and science sectors in order to integrate sub-systems, which are either new or currently in development, within innovative complete systems for electric mobility in a user-oriented and international coordinated way.</p> <p>Objectives of the project (in relation to Smart Grids):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Forecast and online estimation of distributed renewable generation and e-car demand</li> <li>• Control of generation / e-car charging to keep the power balance - VPP</li> <li>• Data concentration (per balance responsible party) at public / fleet car parks</li> <li>• Control of e-car charging to keep the network balance / voltage band</li> <li>• Develop for existing DMS system an advanced distribution voltage control application</li> </ul>	Apr 2011 – May 2014	AU



		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interface for DSO at public / fleet car parks network node level</li> <li>• Data concentration (per network node) at public / fleet car parks</li> <li>• Automation system concepts for concentrated e-cars</li> </ul>		
Project Better Place		<p><b>Project Better Place</b> is currently piloting plug-in vehicles, which draw electricity from the home or electric filling stations, to see whether there are negative impacts on grid stability – an initiative that relies on ICT to make it work.</p> <p>The Israeli Electric Company (Israel's national utility) commissioned a study to examine the impact of two million electric cars on the grid. They concluded that with our Managed Charging system, they would require no additional power plants.</p>		ISR AU DK NL
MERGE		<p>"Mobile Energy Resources for Grids of Electricity" is a major EU-financed project to prepare the European electricity grid for the spread of electric vehicles.</p> <p>The project mission is the evaluation of the impacts that EV will have on the EU electric power systems regarding planning, operation and market functioning.</p>		EU
V4G – Vehicle for Grid		Analysis of the impact and possibilities of a mass introduction of electric and plug-in hybrid vehicles on the electricity networks in Europe	2007 - 2013	EU