



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Virumaa kolledž

**VEOALAJAAMALE SOBILIKE
ENERGIASALVESTUSTEHNOLLOOGIATE KAARDISTAMINE
JA SOBILIKKUS AS EESTI RAUDTEE TARBEKS**

**THE MAPPING AND SUITABILITY OF ENERGY STORAGE SYSTEMS
FOR TRACTION SUBSTATIONS FOR ESTONIAN RAILWAY LTD**

MASINAEHITUS- JA ENERGIATEHNOLLOOGIA PROTSESSIDE JUHTIMISE
ÕPPEKAVA LÕPUTÖÖ

Üliõpilane: Eyleen Roov

Üliõpilaskood: 207582EDJR

Juhendaja: Veronika Shirokova,
Vanemlektor

Kohtla-Järve, 2024

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS JA REPRODUTSEERIMISEKS¹

Mina Eyleen Roov (sünnikuupäev: 20.05.1995)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Veojaama võimsuskõver: energia salvestamise tehnilise lahenduse koostamine ning tasuvuse hindamine, mille juhendaja on Veroonika Shirokova,
 - 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja elektroonilise avaldamise eesmärgil, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta kolmandate isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ja teistest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautori(d) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2., siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

SISUKORD

SISUKORD.....	4
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU.....	6
SISSEJUHATUS	7
1. ENERGIASALVESTUSTEHNOLOOGIAD	9
1.1 Mehaanilise energia salvestid.....	10
1.1.1 Pumphüdroelektrijaamad	10
1.1.2 Gravitatsioonienenergia salvestid	10
1.1.3 Suruõhuakumulatsioonijaamad.....	11
1.1.4 Hoorattaga salvestustehnoloogia	11
1.2 Elektrokeemilised salvestid	11
1.3 Soojusenergiasalvestid.....	11
1.4 Elektrisalvestid.....	12
1.5 Vesiniksalvestid.....	12
1.6 Salvestussüsteemide võrdlus	12
2. RAUDTEE ENERGIATARBE ERIPÄRAD	15
3. ENERGIASALVESTUSSÜSTEEMID RAUDTEESEKTORIS	17
3.1 Poola – Garbce vealajaama ESS	18
3.1.1 Energiasalvestussüsteemi ülesehitus ja saadud tulemused	19
3.2 Ida-Jaapani Raudtee – Tokyo piirkond, Haijima AJ ESS	19
3.3 Inglismaa - Merseyrail Liverpool	20
3.3.1 Energiasalvestussüsteemi ülesehitus	21
3.3.2 Tulemused	22
3.4 Hiina.....	22
3.4.1 Energiasalvestussüsteemi ülesehitus ja tulemused	23
3.5 Eri süsteemide ja meetodikate võrdlus	23
4. ELEKTRIRAUDTEE EESTIS.....	25
4.1 Kontaktvõrk.....	25
4.2 AS Eesti Raudteele kuuluvad vealajaamad	26
4.2.1 Järve vealajaama kirjeldus	26
4.2.2 Keila vealajaam kirjeldus	29
4.2.3 Riisipere vealajaam kirjeldus	30
4.2.4 Raasiku vealajaama kirjeldus.....	31
5. VEOALAJAAMADE KOORMUSGRAAFIKUD	33

5.1	Järve vealajaama koormusgraafiku analüüs	33
5.2	Keila vealajaama koormusgraafiku analüüs	35
5.3	Riisipere vealajaama koormusgraafiku analüüs	36
5.4	Kokkuvõtte saadud andmetest	37
KOKKUVÕTE		39
SUMMARY		40
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU		42
LISA 1	JÄRVE VA LIHTSUSTATUD SKEEM	45
LISA 2	KEILA VA LIHTSUSTATUD SKEEM	46
LISA 3	RIISIPERE VA LIHTSUSTATUD SKEEM	47
LISA 4	RAASIKU VA LIHTSUSTATUD SKEEM	48

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

AC	vahelduvvool (<i>alternating current</i>)
AJ	alajaam
DC	alalisvool (<i>direct current</i>)
ESS	energiasalvestussüsteem
IGBT	isoleeritud paisuga bipolaartransistor (<i>insulated-gate bipolar transistor</i>)
JS	jaotusseade
SCADA	dispetšerjuhtimissüsteem (<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>)
VA	veoalajaam
VL	võimsuslüliti

SISSEJUHATUS

Praegusel ajal seisame silmitsi üha suureneva vajadusega muuta energia tootmine ja tarbimine jätkusuutlikumaks ning keskkonnasõbralikumaks. Selle tulemusel on roheliste energiatehnoloogiate ja energiatõhususe tähtsus kasvanud ning seda ka transpordisektoris. Elektritransport, sealhulgas rongid, trammid, trollid ja metrood on muutunud laialdaselt kasutatavaks, kuna need pakuvad keskkonnasõbralikumat alternatiivi traditsioonilistele transpordivahenditele

Käesoleva töö on aktuaalne, kuna käsitleb endas energiasäästu ning energiasalvestite teemat. Raudteesektoris pööratakse üha enam tähelepanu energiasäästule ja elektrisüsteemide optimeerimisele, sealhulgas elektrirongide varustamisele rohelise energiaga. Veolajaamad, mis varustavad elektrironge sobiva pingega, puutuvad kokku ebäühtlase koormusega, mis suurendab hooldus- ja töökulusid. Probleemi lahendamiseks integreeritakse veolajaamadesse energiasalvestussüsteemid, mis aitavad ühtlustada koormusgraafikut ja vähendada võrgust tarbitavat võimsust. Hetkel ei kasuta AS Eesti Raudtee veolajaamades energiasalvestussüsteeme.

Käesoleva diplomitöö esimeseks eesmärgiks oli uurida erinevate salvestussüsteemide tüüpe ning rakendamise eesmärgid raudteetranspordi sektoris. Töö esimeses osas tegeles autor sellele uurimisküsimusele vastuste leidmisega ning uuris erinevaid salvestussüsteemide tüüpe ja tutvus nende rakendamise eesmärkidega veolajaamades. Lisaks võrdles autor erinevaid salvestussüsteeme tuues välja nende eelised ja puudused. Antud teema on tugevalt seotud raudtee energiatarbega ning töö teises osas on välja toodud raudtee energiatarbe eripärad.

Antud töö teiseks eesmärgiks oli uurida millised energiasalvestussüsteemid on raudtee veolajaamades kasutusel mujal maailmas. Töö kolmandas osas tutvustab autor mujal maailmas alalisvoolul töötaval elektriraudteel kasutuses olevaid energiasalvestussüsteeme ning toob välja nende rakendamise eesmärgid. Kolmanda osa lõpus võrdleb töö autor omavahel eri süsteeme ja meetodikaid.

Kolmandaks eesmärgiks oli tutvuda AS Eesti Raudtee veolajaamadega ning uurida veolajaamade koormusgraafikuid ja seejärel hinnata veolajaamade koormatust. Selle eesmärgi saavutamiseks külastas autor AS Eesti Raudtee Järve, Keila, Riisipere ja Raasiku veolajaamasid, kus tutvus veolajaamade ehituse ning neis kasutatavate seadmetega. Lisaks uuris autor veolajaamade skeeme ning lõi nendest lihtsustatud versioonid kasutades programmi AutoCAD. Veolajaamade koormusandmed saadi läbi SCADA süsteemi ning graafikud loodi programmis MS Excel.

Neljandaks eesmärgiks oli teoreetiliselt ja praktiliselt kogutud andmete omavaheline sidumine ning AS Eesti Raudteele sobiliku salvestussüsteemi välja pakkumine. Töö

käigus selgus, et lahenduse välja töötamine oleks oodatust palju keerukam ning ajamahukam ning ületaks diplomitöö mahtu ning taset. Eelnevalt kirjeldatu tõttu tõi autor välja olulised sammud, mida oleks vaja järgida, et soovi korral jätkata energiasalvestussüsteemi kasutuselevõtu teemaga.

Võtmesõnad: veolajaamad, energiasalvestussüsteem, võimsusgraafikud, bakalaureusetöö.

1. ENERGIASALVESTUSTEHNoloogIAD

Suund süsinikuvabale energiatootmisele on energiasalvestamise teema teinud väga aktuaalseks. Tuule ja päikeseenergia ei ole oma olemuselt juhitavad võimsused ning energiat saab toota ainult tuule ja päikese olemasolul. Salvestite abil on võimalik sellisel viisil toodetud energiat salvestada hilisemaks kasutamiseks. Lisaks pakuvad energiasalvestussüsteemid elektrivõrgule täiendavat tuge ning neid on võimalik rakendada järgnevas: [1, 2]

- Tasakaalustamine ja stabiilsus - energiasalvestussüsteemid võimaldavad elektrienergia tootmise ja tarbimise tasakaalu hoidmist. Need aitavad kompenseerida elektrisüsteemi koormuste muutusi, mis võivad tuleneda näiteks ilmastikutingimuste, päikesepaneelide või tuulegeneraatorite tootmise kõikumisest. [1]
- Energiavaru - salvestussüsteemid võimaldavad hoida energiat reservis, et see oleks saadaval hädaolukordadeks või tiputundide katmiseks. [1]
- Taastuenergia integreerimine - taastuenergiaallikad, nagu päikese- ja tuuleenergia, on muutlikud ja sõltuvad ilmastikutingimustest. Energiasalvestussüsteemid võimaldavad talletada päikesepaneelide või tuulegeneraatorite poolt toodetud üle jäävat energiat ning seda kasutada siis, kui päike ei paista või tuul ei puhu. [1]
- Tõhususe suurendamine - salvestussüsteemid võivad aidata suurendada elektrienergia tootmise ja tarbimise tõhusust. Näiteks võimaldavad nad tõhusamalt kasutada odavamatel tundidel toodetud energiat, mis võib vähendada kulusid energiale. [1]

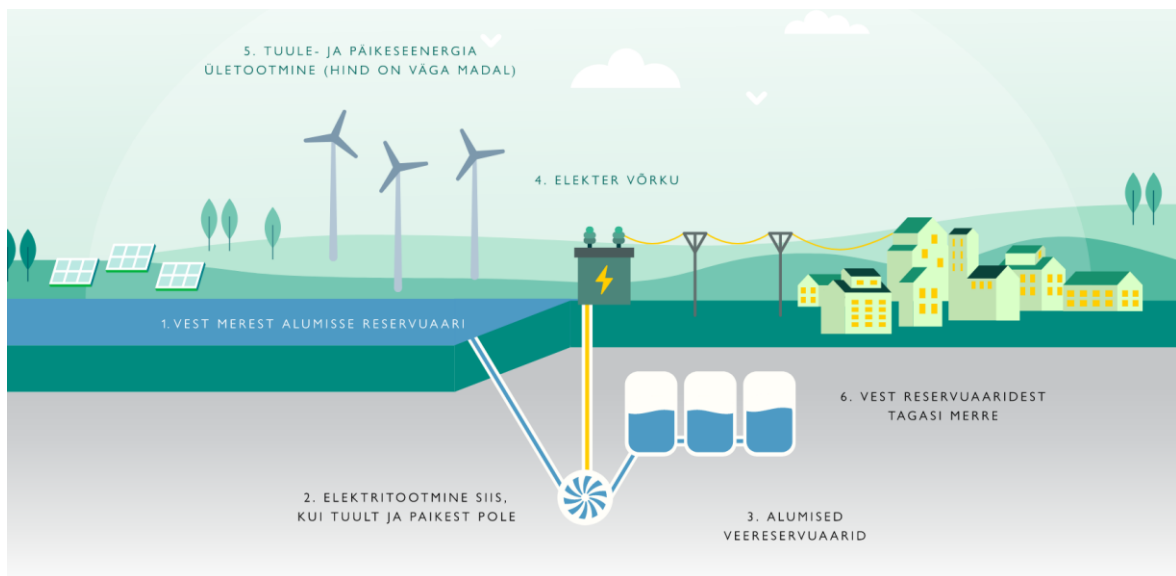
Energiasalvestustehnoloogiad jagunevad peamiselt viide suuremasse rühma: mehaanilised, elektrokeemilised, soojuslikud, elektrilised ja vesiniksalvestustehnoloogiad. Tänapäevased lahendused suudavad energiat edastada väga kiirelt ning tagada toite alates minutitest kuni mitmete tundideni. Salvestite parameetrid valitakse vastavalt sellele, mille jaoks on antud süsteemi vaja rakendada. [2]

1.1 Mehaanilise energia salvestid

Mehaanilise energia salvestid salvestavad kineetilist energiat, gravitatsiooni potentsiaalset energiat või potentsiaalset surve energiat. Eelnevalt mainitud kategooriasse kuuluvad pumphüdroelektrijaamad, gravitatsioonienergia salvestid, suruõhuakumulatsioonijaamad ja hoorattaga energiasalvestid. [3]

1.1.1 Pumphüdroelektrijaamad

Pumphüdroelektrijaamades on energia salvestunud vee potentsiaalne energia kujul. Vett hoitakse reservuaaris, mis asub pumpadest ja turbiinidest kõrgemal, enamasti mäe või kõrgendiku otsas. Lisaenergia vajaduse korral avatakse lüüsid, ning vesi voolab reservuaarist alla mahutitesse läbi hüdroturbiini, mis genereerib veevoolu energiast elektrienergia. Sellel hetkel kui elekter on odav, pumbatakse vesi mahutitest tagasi üles reservuaari ja protsess saab korduda. Pumphüdroelektrijaamasid kasutatakse pikaaegseks energiasalvestuseks (8-24 tundi). Pumphüdroelektrijaama põhimõtteline skeem on välja toodud Joonisel 1.1. [3]



Joonis 1.1 Pumphüdroelektrijaama põhimõtteline skeem [4]

1.1.2 Gravitatsioonienergia salvestid

Gravitatsioonienergia salvestite tööpõhimõte on sarnane pumphüdroelektrijaamadega, kuid vee asemel kasutatakse liikuvat massina betooni, telliseid või muid kive. Peamine eelis võrreldes eelmise süsteemiga seisneb selles, et süsteemi mõõtmed on väiksemad. [3]

1.1.3 Suruõhuakumulatsioonijaamad

Antud süsteemi tööpõhimõte seisneb selles, et hetkel kui turul on elektrienergiat rohkem kui seda tarbitakse, siis kompressori abil surutakse õhk kokku ja seda hoitakse maa alustes koobastes või maapealsetes mahutites kõrge rõhu all. Kui turul on elektrienergiat puudu, siis kokku surutud õhk suunatakse modifitseeritud gaasiturbiinile, mis toodab sellest elektrienergiat. [3]

1.1.4 Hoorattaga salvestustehnoloogia

Hoorattaga salvestustehnoloogia seisneb selles, et energiat salvestatakse pöörlemisenergiana. Süsteem koosneb pöörlevast silindrist, mis asub staatoril. Salvestatud energia hulk suureneb kiiruse ruuduga. Pöörlev element peab olema valmistatud sellisest materjalist, mis peab vastu suurtele kiirustele ja tsentrifugaaljõule. Hoorattaga salvestussüsteemist on võimalik energiat väga kiiresti vabastada ja ka salvestada. [5]

1.2 Elektrokeemilised salvestid

Elektrokeemilisteks salvestiteks on erinevad akud, mis kasutavad erinevaid tehnoloogiad energia salvestamiseks. Sellesse kategooriasse kuuluvad pliiakud, liitiumioonakud, naatriumväävelakud, vooluakud ja tsink-õhk akud. Akud sobivad nii pikaks kui ka lühiajaliseks salvestamiseks. Paiksete salvestusrakenduste puhul on kaks peamist parameetrit ning nendeks on tsükli eluiga ja akude täis ning tühjaks laadimise energiatõhusus. Akude õige kasutusega on võimalik nende eluiga pikendada. [3]

1.3 Soojusenergiasalvestid

Soojusenergiasalvestite energiasalvestuse põhimõte erineb mehaanilisest ja elektrokeemilisest energiasalvestusest. Siin kasutatakse odavat üle jäävat energiat kuumutamiseks või jahutamiseks ning energia saamiseks kasutatakse vastupidist protsessi. Meediumiteks kasutatakse jääd, vett, sulasoola või kive. Sulasoola puhul tõstetakse või langetatakse selle temperatuuri ja enamasti on selline tehnoloogia integreeritud tornpäikesejaamadega, kus genereeritud soojust kasutatakse soola soojendamiseks. Vee puhul saab kasutada sarnast tehnoloogiat. Jää puhul läbib meedium faasimuutuse ehk vesi muutub jääks ja vastupidi. Kui energiatarbimine on madal ja elekter odav, toodetakse jääd ning kui tarve on suur, kasutatakse jää sulamisenergiat jahutuseks. [3]

1.4 Elektrisalvestid

Elektrisalvestite alla kuuluvad superkondensaatorid. Need süsteemid sobivad lühiajaliseks ja kiiresti vabaneva energia salvestamiseks. Superkondensaatorid jäävad energia-võimsuse spektril akude ja dielektriliste kondensaatorite vahele. Akudest on superkondensaatorid suurema võimsustihedusega ja dielektrilistest kondensaatoritest suurema energiatihedusega. Võrreldes akudega on superkondensaatoritel väiksem energiatihedus, kuid neil on teisi omadusi, mis puuduvad akudel. Näiteks on superkondensaatorite eluiga praktiliselt igavene ja neid on võimalik väga kiirelt laadida, veel on neil suurem temperatuurivarieeruvus, keskkonnasõbralikus, töökindlus, turvalisus ja hooldusvaba töö. Superkondensaatorid on kasutusel transpordisektoris, nii iseseisva kui ka täiendava energiaallikana, lisaks suudavad need koguda regeneratiivse pidurduse energiat. [3, 6]

1.5 Vesiniksalvestid

Vesiniksalvestite põhimõte seisneb selles, et energiat salvestatakse ja edastatakse vesiniku kujul. Vesinikku toodetakse peamiselt teistest kütustest, näiteks naftast, maagaasist ja söest. Sellisel kujul on vesiniku tootmine väga kallis ja ebatõhus, lisaks CO₂ jalajäljega. Tõhusamaks viisiks oleks vee elektrolüüs. Elektrolüüsil vabanev vesinik püütakse kinni ja salvestatakse kõrge rõhu all mahutites ning seda saab kasutada otsepõletuseks või elektritootmiseks kütuseelementide abil. Vesiniktehnoloogia on praegu veel arengujärgus, kuna vesiniku tootmine on väga energiamahukas protsess ja vesiniku saamiseks kulutatud energia ületab sealt saadava energia mahtu. [3, 7]

1.6 Salvestussüsteemide võrdlus

Selles alapeatükis võrdleb töö autor erinevate salvestustehnoloogiate eeliseid ja puuduseid. Erinevate salvestustehnoloogiate eelised ja puudused on eri tehnoloogiate kaupa välja toodud allolevas tabelis 1.1.

Nagu tabelist selgub on enamike mehaaniliste salvestite eeliseks nende suur tõhusus, pikk eluiga ja kiire käitamisevõime ja madal keskkonnamõju. Puuduseks nende suurus ja ehitamise kallidus ning nõuded asukohale, ainsana saab väiksele pinnale paigaldada hoorattaga salvestusseadme, lisaks on see teistega võrreldes odavam. Transpordisektoris kasutamiseks sobiks sellest kategooriast hoorattaga salvesti, kuna reeglina on salvesti paigaldamiseks piiratud ruum ning hooratas võtab kõige vähem ruumi.

Tabel 1.1 Salvestussüsteemide võrdlus

Salvestustehnoloogia	Eelised	Puudused
Mehaanilised salvestid	<ul style="list-style-type: none"> • Suur tõhusus • kiire käitamine • pikk eluiga • madal keskkonnamõju 	<ul style="list-style-type: none"> • ruumivajadus (va hooratas) • geograafilised piirangud • energiakadu • madal energiatihedus • kõrge ehitushind
Elektrokeemilised salvestid	<ul style="list-style-type: none"> • kõrge energiatihedus • väike ruumivajadus • kiire reageerimisaeg • madal energiakadu • erinevad keemiatehnoloogiad 	<ul style="list-style-type: none"> • limiteeritud tsükli eluiga • oht tulenevalt kemikaalidest • kõrge hind • suurem keskkonnamõju • töö halvenemine
Soojusenergiasalvestid	<ul style="list-style-type: none"> • paindlikkus • töökindlus • kuluefektiivsus • madal keskkonnamõju 	<ul style="list-style-type: none"> • madal energiatihedus • soojuskadu • ruumivajadus • limiteeritud töötemperatuur • materjalide sobivus
Elektrisalvestid	<ul style="list-style-type: none"> • suur tõhusus • kiire reageerimisaeg • kõrge eluiga • kompaktsus • madalad ülalpidamiskulud 	<ul style="list-style-type: none"> • hind • suur energiakadu pikema aja jooksul • limiteeritud salvestusmaht
Vesiniksalvestid	<ul style="list-style-type: none"> • kõrge energiatihedus • mitmekülgus 	<ul style="list-style-type: none"> • nõuded infrastruktuurile • ladustamine/transport • ohutus • efektiivsuskaod • hind

Elektrokeemiliste salvestite eeliseks on nende kõrge energiatihedus ehk nad on võimelised salvestama suurt kogust energiat, lisaks on nende kaod väiksed. Antud salvestid on võimalik ehitada üsna väikeste mõõtmetega ning neil on kiire reageerimisaeg ehk nendest on võimalik energiat eraldada kiirelt. Erinevad keemiatehnoloogiad pakuvad lisaks varieeruvust vastavalt sellele, kus ja milleks on vaja salvestit rakendada. Elektrokeemiliste salvestite miinuseks on nende limiteeritud eluiga, kemikaalidest tulenev oht ja mõju keskkonnale. Lisaks võib salvesti mahtuvus ja töökindlus halveneda, kui seadet ei laeta ega tühjendata vastavalt etteantud nõuetele. Taolised salvestid sobivad transpordisektoris kasutamiseks.

Soojusenergiasalvestite eeliseks on nende madal keskkonnamõju, kuluefektiivsus ja töökindlus, kuid puuduseks on suur ruumivajadus, väike energiatihedus, limiteeritud töötemperatuur ja sobilike materjalide olemasolu. Transpordisektoris taoline lahendus ei sobi, kuna vajab palju ruumi ning selle integreerimine süsteemi oleks keerukas.

Elektrisalvestite eeliseks on nende suur energiatihedus ja kiire reageerimisaeg. Lisaks on need kõrge elueaga, kompaktsed ja nende ülalpidamiskulud on madalad. Puudusteks võib nimetada kõrgemat hinda, pikaajasel energia hoiul salvestis on kaod suured ning

salvestusmaht on limiteeritud. Elektrisalvestit sobivad kasutuseks transpordisektoris. Tänu kompaktsusele on neid võimalik paigaldada taristule ja ka elektrisõidukitesse.

Vesiniksalvestite eeliseks on nende kõrge energiasisaldus ja mitmekülgsus. Puudusteks on nõuded infrastruktuurile, nõuded ladustamisele ja transpordile, ohutus, efektiivsuskaod ja hind. Praegusel ajal ei ole vesiniksalvestite kasutamine transpordisektoris mõistlik, kuna antud tehnoloogia suund on alles arenemas ning lisaks on see väga kallis.

Kokkuvõtteks järeltab autor, et transpordisektoris on kõike sobivamateks energiasalvestustehnoloogiateks elektrokeemilised salvestid, elektrisalvestid ja hoorattaga salvestid. Need sobivad transpordisektorisse nii oma mõõtmetelt kui ka omaduselt energiat kiiresti salvestada ja vabastada.

2. RAUDTEE ENERGIATARBE ERIPÄRAD

Raudteesektoris kasutatakse raudteel elektrienergiat taristul vajalike seadmete toiteks ja elektrirongide toiteks. Elektriraudtee elektrisüsteemi osadeks on elektrienergia muundamise ja ülekandeseadmed ning elektritarbijad. Elektriraudtee energiatarve erineb oluliselt klassikalistest tarbijatest ning põhilisena võib välja tuua järgneva:

- tarbimiskoha ja koormuse liikuvus;
- koormuse suured hüpped ja langused tarbimispunktis;
- kahe faasi koormatus kolmefaasilises süsteemis;
- pingeasümmeetria.

Klassikalised tarbijad on statsionaarselt paigal ning tarbivad elektrienergiat kindlas asukohas, raudtee elektritaristul on üks suurtest tarbijatest, ehk elektrirong, pidevas liikumises. Sellisel tarbimisviisil on konkreetsel liinilõigul, kus rong sõidab, veolajaamades koormuse tõusud ja langused üsna järsud. Veel erineb elektriraudteel kasutatav pinge tavalisest võrgupingest. [8]

AS Eesti Raudtee elektrifitseeritud raudteeliinidel on ära määratud minimaalne elektrirongide ajavahemik ühes suunas, mis tähendab seda, et kahe rongi liiklemise vahele peab jääma paus, mis omakorda tingib ka võimsuse tõusu ja seejärel languse veolajaamas. Veel on ära määratud rongide arv, mis tohivad samal liinilõigul korruga kiirendada. Regeneratiivpidurduse teel vabanenud energiat on võimalik kasutada samas piirkonnas asuva teise rongi toiteks, kuid puudub võimalus saadud energiat tagasi suunata primaartoitevõrku. [9]

Vahelduvvooluahelas on aktiivvõimsus P leitav pinge U , voolu I ja võimsusteguri $\cos \varphi$ korrutusena, mida väljendab valem 2.1. Aktiivvõimsuse ühikuks on vatt (W). [25]

$$P = UI \cos \varphi, \quad (2.1)$$

kus

U – pinge [V]

I – voolutugevus [A]

$\cos \varphi$ – võimsustegur

Reaktiivvõimsus Q leitav pinge U , voolu I ja pinge ning voolu vahelise faasinihke φ siinuse korrutisega (valem 2.2). Reaktiivvõimsuse ühikuks on varr (VAr).

$$Q = UI \sin \varphi, \quad (2.2)$$

kus

U – pinge [V]

I – voolutugevus [A]

$\sin \varphi$ – pinge ja voolu vaheline faasinihe

Näivvõimsuseks S nimetatakse pinge U ja voolu I korrutist. Näivvõimsuse ühikuks on voltamper (VA). Alajaama näivvõimsuse maksimaalse väärtuse põhjal valitakse trafo võimsus. Näivvõimsust väljendab valem 2.3.

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2} , \quad (2.3)$$

kus

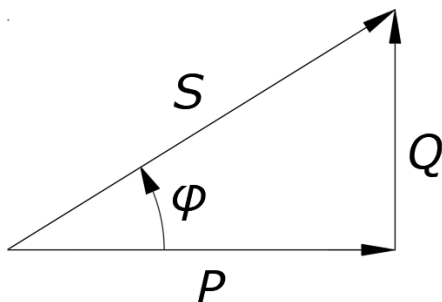
U – pinge [V]

I – voolutugevus [A]

P – aktiivvõimsus [W]

Q – reaktiivvõimsus [VAr]

Võimsuste kolmnurk, mis väljendab võimsuste omavahelist suhet on esitatud joonisel 2.1.



Joonis 2.1 Võimsuste kolmnurk

Aktiivvõimsus on reaalne kasutusel olev võimsuse hulk, näivvõimsus on elektrisüsteemi koguvõimsus ja reaktiivvõimsus on võimsus, mis ei tee tööd, kuid mis on elektrivõrgus olemas tänu elektriseadmete mahtuvuslikele ja induktiivsetele omadustele. [26]

3. ENERGIASALVESTUSSÜSTEEMID RAUDTEESEKTORIS

Järjest rohkem pööratakse tähelepanu energiasäästule ja olemasolevate elektrisüsteemide optimeerimisele ning antud teema ei jäta puutumata ka raudteesektorit ega transpordisektorit üldiselt. Fookuses on rohelisel energial töötavad transpordiliigid ning üheks selliseks on elektrirongid. Elektrirongidele toite tagamiseks on olulisel kohal veolajaamad, mis varustavad elektrironge toitvat kontaktvõrku rongidele sobiliku pingega. Antud süsteemide iseärasus seisneb selles, et veotrafod ei ole koormatud ühtlaselt ja VA-de koormus on ajas väga ebaühtlane ning eelmainitu tingib suuremad kulud süsteemi hoolduseks ja töös hoidmiseks. Eri paigus on sarnase probleemi lahenduseks välja pakutud variandina integreerida VA-desse energiasalvestussüsteemid (ESS), mis aitaksid vähendada VA poolt võrgust tarbitavat võimsust ning ühtlustada VA koormusgraafikut. Veel on ESS-id VA-des kasutusel järgnevalt: [10]

- Pingestabiilsuse tagamine. Tiputundidel suudavad need pakkuda lisavõimsust ning madala koormusega perioodidel salvestavad energiat; [10]
- Tippkoormuse katmine. Tipukoormuse ajal pakuvad energiasalvestussüsteemid veolajaamades lisavõimsust, mis ühtlustab võrgu koormust; [10]
- Pidurdusenergia salvestamine. Elektrirongi mootor võib pidurdamisel toimida nagu generaator ning genereerida elektrienergiat. Energiasalvestussüsteemides on võimalik seda energiat salvestada ning rongide toiteks kasutada; [10]
- Taastuenergialahenduste integreerimine süsteemi. Energiasalvestussüsteemi abil on võimalik integreerida näiteks päikesepark veojalaama osaliseks toiteks. ESS salvestab toodetud energia ning seda saab kasutada rongide toiteks. [10]
- Võrgustabiilsuse tagamine. [10]

Järgnevatel alapeatükkides toob käesoleva töö autor näiteid eri riikides kasutatavatest energiasalvestussüsteemidest raudteesektoris ning kirjeldab nende põhimõtteid ja eesmärke.

3.1 Poola – Garbce vealajaama ESS

Poolas on elektrirongide toiteks kasutusel 3 kV alalisvoolu kontakivõrk, mis saab toite vealajaamadest. Vealajaamade toide on läbi vahelduvvooluvõrgu pingel 15/20/110 kV AC. Poolas on ca 530 vealajaama, mida haldab PKP Energetyka S.A. Iga vealajaam toidab 15 kuni 25 kilomeetri pikkust liinilõiku. Rongi sõitmisel antud liinilõigul on liin koormatud 5-10 minutit ja seega on vealajaamad koormatud väga ebaühtlaselt. Kui rong siseneb liinilõigule, sõidab ning kiirendab selles lõigus, kasvab vealajaama koormus hüppeliselt. Kui rong antud liinilõigust väljub, langeb vealajaama koormus tunduvalt. Taoline koormuste kõikumine tõstab vealajaamade eksploatatsioonikulusid. [11]

Üks osa eksploatatsioonikuludest on tasu nõutava võimsuse eest, mille peab võrguettevõtja läbi jaotusvõrgu vealajaamale tagama. Nõutav võimsus on vealajaama 15 minuti keskmine võimsusväärtus, mida ei tohi ületada. Reaalsuses saavutatakse vealajaamas nõutav võimsus harva, kuna koormus on katkendlik. Energiasalvestussüsteemi abil on võimalik nõutava võimsuse suurust vähendada ilma reaalselt kasutatava võimsushulga vähendamiseta. See tingib omakorda eksploatatsioonikulude vähenemise. [11]

2018. aastal uuriti Poolas Zielno Góra ülikoolis koostöös ettevõttega PKP Energetyka S.A võimalusi energiasalvestussüsteemide kasutamiseks vealajaamades, et vähendada eksploatatsioonikulusid ja ühtlustada koormust. Vealajaama võimsusgraafiku ühtlustamiseks pakuti välja DROPT (*Traction Substation Dynamic Load Reduction System*) süsteem. Süsteemi teoreetiliseks väljatöötamiseks kasutati Garbce vealajaama DC poolelt ühe nädala jooksul kogutud võimsuse andmeid. DROPT süsteem koosneb energiasalvestussüsteemist ja kahe-suunalisest DC/DC jõuelektroonika muundurist. Võimsuskao ja pingelangu vähendamiseks trafodes ja alaldites on DROPT süsteem ühendatud vealajaama alaldi järel DC poolele. [11]

DROPT süsteemi jaoks loodi kontrollistrateegia, et süsteem täidaks järgnevad ülesanded: [11]

- hetkevõimsuse vähendamine alajaama AC poolel, et vähendada pingelangusid trafodes ja alaldites; [11]
- 15 minuti keskmine võimsuse vähendamine, et vähendada alajaamade eksploatatsioonikulusid; [11]
- energiasalvesti laetuse taseme kontroll, et vältida akude kahjustumist ja pikendada nende eluiga. [11]

Süsteemi kasumlikkuse hindamiseks analüüsiti tehnilist ja majanduslikku poolt. Selgus,

et teatud juhtudel on akudel põhineva tehnoloogia rakendamine tulusam kui superkondensaatorite rakendamine ning tasuvusaeg ei ületa 4,5 aastat. Kontrollistrateegia täitis simulatsioonis kõik etteantud nõuded, tipuvõimsust on võimalik vähendada ning akude eluiga pikendada. Uurimuse järgmiseks etapiks oli DROPT süsteemi rakendamine vealajaamas, mis viidi läbi aastatel 2019-2021. [11, 12]

3.1.1 Energiasalvestussüsteemi ülesehitus ja saadud tulemused

Energiasalvestussüsteem prototüüp integreeriti Garbce vealajaama. Energiasalvestussüsteem koosneb viiest konteinerist: üks inverteri konteiner ja neli akude konteinerit. Akusid laetakse siis, kui liinilõigul ei sõida rongid ning akud tühjenevad siis kui rong satub antud liinilõigule. Kahesuunaline DC/DC muundur võimsusega 7x 0,92 MW koosneb seitsmest moodulist, mis töötavad paralleelselt. Akude konteinerid koosnevad liitiumioonakudest, akuhaldussüsteemist ja tuletõrjesüsteemist. Akude konteineris on kokku 4240 kaasaegset liitiumioonakut. Akude kogumahtuvus on 1,2 MWh. Süsteemi juhitakse läbi SCADA. Prototüübi töö tulemusel selgus, et vealajaama tipuvõimsust oli võimalik vähendada 6,5 MW'lt 1 MW'le. Energiakaod kontaktvõrguliinis vähenesid umbes 60% ning kaod arvestatuna rongi kohta vähenesid umbes 78%. [11, 12, 13]

3.2 Ida-Jaapani Raudtee – Tokyo piirkond, Haijima AJ ESS

Jaapanis on elektriraudteel kasutuses kolm pingesüsteemi, 1,5 kV DC mida kasutatakse linnalähedaste liinide toiteks, 20 kV AC mida kasutatakse piirkondlike rongiliinide toiteks ja 25 kV AC mida kasutatakse kiirrongide toiteks. Ida-Jaapani Raudteele kuuluvate Tokyo piirkonna elektrirongide varustamine toimub läbi 1,5 kV DC kontaktvõrgu. [14]

Kasutatava energiahulga vähendamiseks on kasutusel mitmeid meetmeid ning üheks neist on energiasalvestussüsteemide integreerimine raudtee elektrivõrku, täpsemalt vealajaamadesse. Peamiselt integreeritakse energiasalvestussüsteeme raudtee elektrivõrku järgnevatel põhjustel:

- pingelangu kompenseerimine,
- pidurdusenergia salvestamine,
- pidurdusenergia kasutamine,
- tagavaratoide. [14]

Paljudes Ida-Jaapani Raudteele kuuluvates vealajaamades on kasutusel dioodalaldid ning seetõttu ei ole võimalik pidurdusenergia tagasi suunamine võrku. Pidurdusenergia tuleb ära kasutada samal ajal kui seda genereeritakse ehk ühel liinilõigul peavad samal

ajal olema nii pidurdav kui ka kiirendav rong, kes tarbiks pidurdava rongi poolt genereeritud energiat. Kui pidurdava rongi läheduses ei ole teist rongi, siis sumbub genereeritud energia pingelangu tõttu ning jääb kasutamata. Energia paremaks kasutamiseks pakuti välja pidurdusenergia salvestamine. [14]

Alates 2014. aastast on Tokyo piirkonnas paigaldatud energiasalvestussüsteemid kolme veolajaama, Haijima, Okegawa ja Kubi veolajaama, kus neid kasutatakse regeneratiivse energia utiliseerimiseks alalisvoolu veojõu süsteemides. Energiasalvestussüsteemide abiga vähendati veolajaamadest kasutatava energia hulka umbes 5% või 10%. [14]

Linnasisestel liinidel kasutatakse enamuse regenereritud energiast ära kiirendavate rongide poolt ja seega on ESS-id kasulikud linna keskmest väljas olevates veovõrkudes, kuna seal on rongiliikluse intensiivsus hõredam ning kasutamata jääva pidurdusenergia hulk on maksimaalne. ESS-i integreerimiseks süsteemi piisab rongide sõidutihedusest 5 kuni 12 rongi tunnis. Okegawas ja Haijimas kasutatakse Li-on akusid, Kukis Ni-MH akusid. [14]

Haijima veolajaama ESS on ühendatud VA DC poolele. ESS koosneb IGBT transistorist ja akude moodulist. Antud süsteemi nimivõimsuseks on 2000 kW, nimipingeks 1650 V ja nimivooluks 1200 A. Kasutatavad akud on liitiumioonakud ning nende nimimahtuvuseks on 76,12 kWh. Antud süsteemi aastane veojõu energiasääst oli 4%. [14]

3.3 Inglismaa - Merseyrail Liverpool

Antud näites töötatakse teoreetilisel tasemel välja kontrollistrateegia, mille eesmärk on vähendada võrgust võetava energia hulka ja suurendada raudteesüsteemi töökindlust. Kontrollistrateegia töötati välja süsteemile, mis koosneb energiasalvestussüsteemist ja taastuenergiaallikast ning olemasolevast veolajaamast. Esmalt loodi mudel, mis koosnes rongist, raudteesüsteemist ja energiasalvestussüsteemist. Teisena loodi kontrollistrateegia, mille ülesanne on vähendada veolajaama tipuvõimsust ja pingekõikumisi. Uurimus on koostatud Merseyrail-i Liverpooli liini põhjal. [15]

Linnalähedased elektrirongiliinid on soositud transpordiliik, kuna see aitab kaasa süsinikuheitmete vähendamisele, kuid see teeb sellest transpordiliigist ühtlasi ka väga suur elektrienergia tarbija. Rongide kiiruse ja hulga suurenemine toob omakorda kaasa elektrienergia tarbe suurenemise. Energiasalvestussüsteemi ja taastuenergiaallika abil on võimalik keskkonnasäästlikult vähendada energiatarvet ja stabiliseerida süsteemi tööd. Varasemalt on samale probleemile püütud lahendust leida läbi sõiduplaanide optimeerimise, mis tagab selle, et ühel liinilõigul on samal ajal kiirendav ja pidurdav rong. Kiirendav rong saab ära kasutada pidurdava rongi poolt genereeritud

elektrienergiat. Mõningal määral selline lähenemine töötab, kuid raudtee edasise arenguga on vaja täiendavaid meetmeid ning selleks on energiasalvestussüsteemi ja taastuenergiaallika integreerimine süsteemi. [15]

Energiasalvestussüsteemi abil on võimalik paremini ära kasutada regeneratiivsel pidurdamisel tekkivad energiad. Vabanenud energia salvestatakse salvestisse ning seejärel kasutatakse uuesti rongide toiteks. Energiasalvesti abil on võimalik vähendada tiputarbimise koormust. [15]

Antud uurimuse käigus pakuti esmalt välja veojõusüsteem, mis koosneb energiasalvestussüsteemist ja taastuenergiaallikast. Seejärel lisatakse raudtee mudel koos salvesti ja taastuenergiaallikaga, peale mida analüüsitakse süsteemi võimsuse liikumist. Kontrollistrateegia seisneb energiasalvestussüsteemi laadimise ja tühjenemise kontrollimises ja sidumises veojõu vajadusega. Uurimuses tuginetakse reaalsele andmetele, mis on päris Merseyrayl-i rongiliinilt. Uurimusel oli kaks põhilist eesmärki ning nendeks olid linnalähedase raudteesüsteemi ülesehitus energiasalvestussüsteemi ja taastuenergiaallikaga, ning kontrollistrateegia välja töötamine, et vähendada veoalajaama tipuvõimsust ja pingekõikumisi. [15]

3.3.1 Energiasalvestussüsteemi ülesehitus

Süsteem koosneb veojõuallikast, kontaktvõrgust, energiasalvestussüsteemist ja tarbijast ehk rongist. Taastuenergiaallikad ja salvesti moodustavad mikrovõrgu, mis on otse ühendatud kontaktliinile või kolmandale rööpale. Süsteem modelleeriti läbi erinevate arvutuste. Antud uurimuses täidab salvesti ülesannet superkondensaator. ESS-il on kolm režiimi: laadimine, tühjenemine ja ooterežiim. ESS-i töörežiim sõltub veoalajaama pingest ja laadimine ning tühjenemine on limiteeritud vastavalt kontaktvõrgupoolsele pingele. ESS-i kaitseks on paika pandud minimaalse ja maksimaalse laetuse tasemed (SOC – state of charge). [15]

Taastuenergiaallikaks on päikese- ja tuuleenergia. Süsteemi simulatsiooni jaoks kasutati varasemaid andmeid. Võimsuseks valiti 0,25 MW ja see muutub iga 50 s järel. Võimsusvoo jaoks analüüsiti iga veoalajaama võimsust. [15]

Kontrollistrateegia on üles ehitatud järgnevalt. Kontrollkeskus mõõdab veoalajaama pinget ja kontrollib taastuenergiaallika ja ESS-i tööolekut. Kui VA pinge on suurem kui avatud võrgu pinge VA-s, siis taastuenergiaallikas ei anna veovoogu ning ESS-is salvestub taastuenergiaallika poolt toodetud elektrienergia ja pidurdusel vabanev energia. Vastupidises olukorras, kus VA pinge on väiksem kui avatud võrgul, siis tuleb toide ka taastuenergiaallikalt ja ESS-i tühjenemine määratakse pingeläve kaudu. [15]

Uurimus viidi läbi raudteelõigul, mis jääb West Kirby ja Hamilton Square peatuste vahele. Lõigu pikkuseks on 14,06 km ning sellele jääb 11 peatust. Uuriti kolme eri

süsteemi: tavaline veosüsteem, veosüsteem koos ESS-iga, veosüsteem koos ESS-i ja taastuenergiaallikaga. [15]

3.3.2 Tulemused

ESS ja taastuenergiaallikaga juhul tipuvõimsus ja pingelang vähenesid märkimisväärselt kolmandas alajaamas ning tänu sellele vähenes ka alajaamades 2 ja 4 pingelang ja võimsus. ESS-i laadimisvõimsus on suurem ja see laadub kiiremini, kui süsteemi on integreeritud ka taastuenergiaallikaks. Kogu energiatarve vähenes 162,42 kWh-lt 135,20 kWh-ni ehk 16,76%, kui ESS ja taastuenergiaallikas asus veoalajaamas 3, kuna ESS salvestab regeneratiivse pidurduse energiat ja taastuenergiaallika poolt toodetud energiat. Alajaama 3 tipuvõimsus vähenes kõige rohkem. 0,61 MW-lt 0,1 MW-le ehk vähenes 83,61% kuna ESS tühjenemise lävend on valitud kõrgem, kui ainult ESS-iga süsteemi puhul. Küll aga vähenes regeneratiivse pidurduse poolt genereeritud energia kasutus, kuna ESS ei saa salvestada rohkem energiat kui kontrolltingimuste poolt ette on määratud. [15]

Uurimuse kokkuvõtteks saab öelda, et süsteem koos ESS-i ja taastuenergiaallikaga võib märkimisväärselt kaasa aidata energiakulu vähendamisele, tipuvõimsuse vähendamisele ja pingelangule veoalajaamas. Analüüsi tulemused näitavad, et antud liinilõigu jaoks välja pakutud süsteem võib vähendada VA tipuvõimsust 83,61% ja energiatarvet 16,67%. [15]

3.4 Hiina

Antud teadustöö käsitleb linnalähedasi metrooliine ja nende energiakasutust. Linnalähedastes liinides on peatuste vahed väikesed, pidurdamist on palju ja süsteemi genereeritakse palju pidurdusenergiat. Paremaks akudel põhineva energiasalvestussüsteemi konfigureerimiseks ja kasutamiseks on välja mõeldud kontrollistrateegia. Strateegia on välja töötatud kasutades päris andmeid, mis on saadud Beijing Batongi metroo veoalajaamast ning simuleeritud kasutades simuleerimistarkvara. Selle süsteemiga saab säästa energiat ja tagada pinge stabiilsust ning vähendada VA tipuvõimsusi, mis toob omakorda kaasa energiasäästu. [16]

Linnalähedastel liinidel on peatuste vahed lühikesed ja seega genereeritakse süsteemi palju pidurdusenergiat. Kaasaegsetes veoalajaamades kasutatakse dioodalaldit, kuid selle kaudu ei ole võimalik elektrienergia tagastus AC võrku ja seetõttu tõuseb DC võrgud pinge, mis omakorda pärsib regeneratiivset pidurdust. Antud probleemi lahenduseks võib olla energiasalvestussüsteem, mis salvestab endasse üle jääva energia ning see teadustöö keskendub selle uurimisele. [16]

Ka selles uurimuses on ESS-i eesmärgiks varustada ronge salvestisse salvestatud

energiaga ja seeläbi vähendada tipuvõimsusi ja pingelangu. Rongide poolt tekitatav koormus on tihedalt seotud rongide sõidugraafikuga. Tipuvälisel ajal on veoalajaama väljundvõimsus madal ja regeneratiivse pidurduse jääenergia hulk suur. Tipu ajal on olukord vastupidine. Veoalajaamade võimsused on valitud võimsuse maksimaalse väärtuste järgi, mis tähendab, et suures osas on veoalajaam alakoormatud. ESS-i abil saab tippude ajal ära kasutada sinna salvestunud jääenergiat, seega saab vähendada veoalajaamade ekspluatatsioonikulusid. [16]

Antud teadustöö eesmärk on välja töötada strateegia ESS-i jaoks, mis baseerub aku laetuse taseme jälgimisel erinevate väljumise intervallide puhul, et vähendada VA tipuvõimsust. Teise osana töötatakse välja elektrirongide toite simulatsioon ja kolmandas osas analüüsitakse ESS-i mõju VA väljundile. Neljandas osas töötatakse aku laetuse tasemega ja viiendas osas viiakse läbi eksperimentaalne simulatsioon. [16]

3.4.1 Energiasalvestussüsteemi ülesehitus ja tulemused

Teadustöö käigus loodi simulatsioonimudel, kuhu oli lisatud ESS ning ESS laadimissüsteem töötab järgnevalt: kui veoalajaama võimsus on suurem kui laadimislävend, siis algab ESS-i laadimine, kui veoalajaama võimsus on väiksem, kui tühjaks laadimise lävend, siis annab ESS salvestunud energia läbi süsteemi rongile. Kui VA pinge on laadimise ja tühjenemise lävendi keskel, siis on salvesti ooterežiimis. Kui VA pinge on madalam kui pinge alumine väärtus või kõrgem kui ülemine, siis on süsteem töö keelatud. ESS-il on pinget stabiliseeriv omadus. [16]

Selles teadustööd uuriti metroo liinilõiku Pekingi Metroos, kus sõidavad mitmed rongid ja millel asub 5 veoalajaama. Uuriti rongide väljumise intervalle peatustest ning selle põhjal valiti simulatsiooni jaoks tüüpiline väljumise intervalli väärtus. [16]

Simulatsiooniprogrammis tehtud katsetuste põhjal saab kinnitada kontrollistrateegiat. Antud uurimus puudutas ainult ühte ESS-i ning see paigaldati alajaama number 3. Peale teoreetilist uurimust ehitati katseline raudtee-elektrisüsteemi mudel, kus viidi läbi eksperimentaalne osa. Katse tulemused kinnitasid, et 2 MW suuruse ESS-i abil on võimalik vähendada tipuvõimsust 16,3%. [16]

3.5 Eri süsteemide ja metoodikate võrdlus

Käesoleva töö jaoks taustinfo kogumiseks tutvus autor erinevate teadustöödega, millest osad olid ainult teoreetilised, kuid osad ka praktilisel tasemel rakendatud. Teadustööde osas valis töö autor välja need, mille lahendus oli välja töötatud alalisvoolul töötava süsteemi jaoks. Praktiline lahendus võeti käiku Poolas, kus selle eesmärgiks oli tipuvõimsuse vähendamine, pingelangu vähendamine ja akusüsteemi töökindluse tagamine. Poola näite puhul tasub ära märkida, et elektri raudtee töötab seal sama

pingega nagu ka Eestis, milleks on 3 kV DC. Energiasalvestussüsteemid on aktiivselt töös ka Jaapanis. Võrdlus on välja toodud tabelis 3.1.

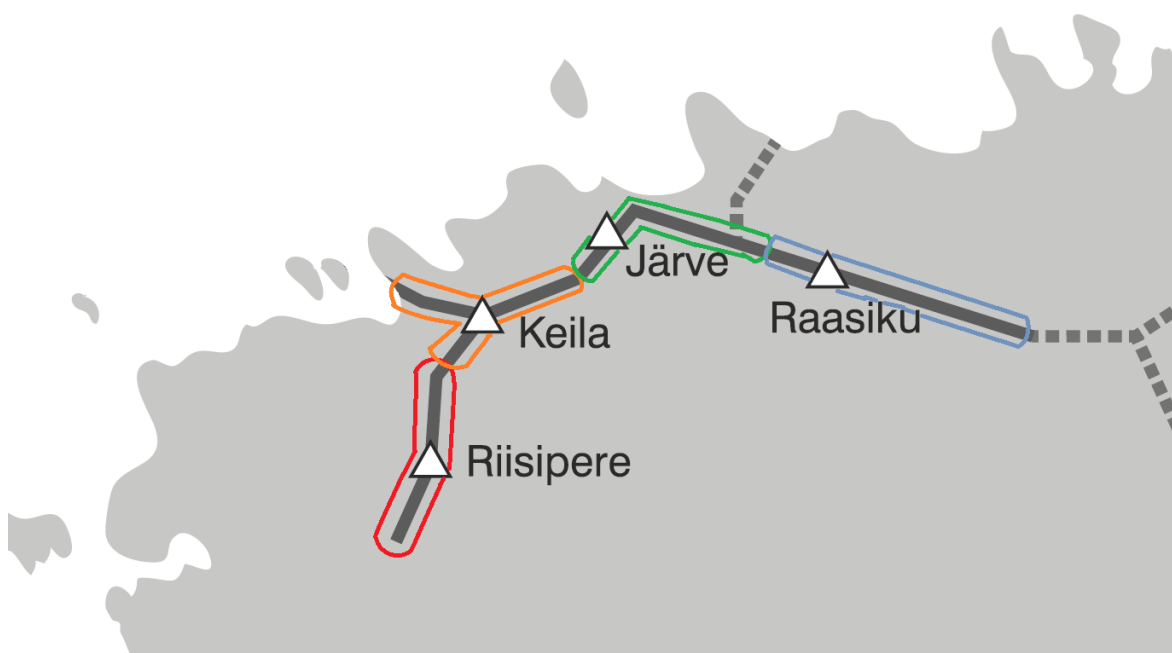
Tabel 3.1 Salvestussüsteemide võrdlus

Näide	Teoreetiline / praktiline	ESS ülesehitus	ESS paigaldamise eesmärk	Akude tüüp
Poola	Teoreetiline ja praktiline	Akud, muundur	tipuvõimsuse vähendamine; pingelangu vähendamine	Li-on
Jaapan	Teoreetiline ja praktiline	Akud, muundur	pidurdusenergia salvestamine	Li-on, Ni-MH
Hiina	Teoreetiline ja praktiline	Akud, muundur	pidurdusenergia salvestamine	Li-on
Suurbritannia	Teoreetiline	Superkonden- saator, taastuenergia allikas, muundur	tipuvõimsuse vähendamine; pingelangu vähendamine; pidurdusenergia salvestamine	-

4. ELEKTRIRAUDTEE EESTIS

AS Eesti Raudteele kuulub umbes 225 km elektrifitseeritud raudteeliine. Eestis töötab raudtee kontaktvõrk nimipingel 3 kV DC. Elektrifitseeritud raudteelõikudeks on: Tallinn – Aegviidu, Tallinn – Keila, Keila – Paldiski (sh Kloogaranna) ja Keila – Riisipere – Turba. AS Eesti Raudteele kuulub neli vealajaama, mis asuvad Järvel, Keilas, Riisiperes ja Raasikul. Iga VA toidab umbes 20 km pikkust liinilõiku. Ülevaate vealajaamade ja kontaktvõrgu paiknemisest annab Joonis 4.1. Seoses raudtee elektrifitseerimise projektiga on plaanitud elektrifitseerida ka lõigud Aegviidu – Tapa – Tartu ning Tapa – Narva. Lisaks sellele on kavas uuendada Lagedi – Aegviidu raudteelõigul olevat kontaktvõrku, kuna see on oma eluea minetanud. Tartu suunal on kontaktvõrk plaanis valmis ehitada 2024. aasta lõpuks. Kogu elektrifitseerimise projekti planeeritud lõpp on 2028. aasta lõpp ning uus süsteem alustab tööd pingel 25 kV AC. [17]

Elektrirongid on võrreldes diislrongidega keskkonnasõbralikumad, kuna need ei väljuta töötamise ajal keskkonda süsinikdioksiidi (CO₂). Kui elektrironge toitev elektrienergia on pärit taastuvatest allikatest, teeb see elektrirongid veel keskkonnasõbralikumaks. Transpordisektoris on juba osaliselt üle mindud rohelisematele energiaallikatele ja Eesti Raudtees kasutatav elektrienergia on 100% roheline. [18, 19]

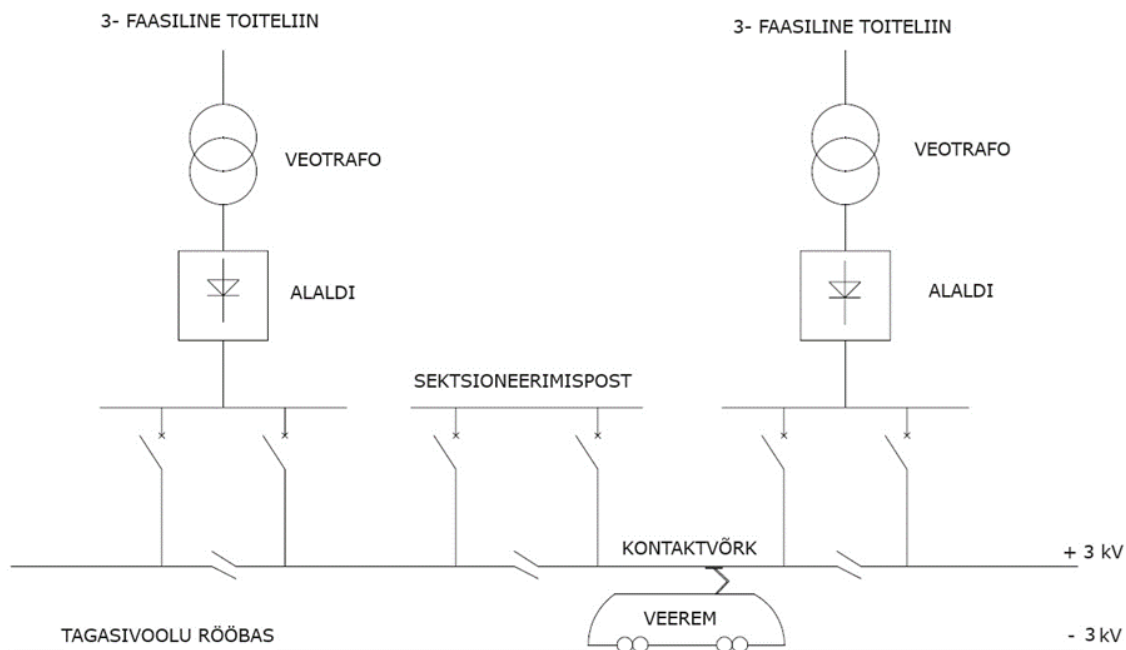


Joonis 4.1 AS Eesti Raudtee 3 kV kontaktvõrgu ja vealajaamade paiknemine ning iga VA toitepiirkond

4.1 Kontaktvõrk

Kontaktvõrk on elektrivõrk, mis toidab elektrisõidukeid elektrienergiaga. Kontaktvõrk koosneb kontaktliinist, kandejuhtmest, kandemastidest, vealajaamadest,

ühenduskaablitest ja tagasivoolusüsteemist. AS Eesti Raudtee kontaktvõrk on toitel 3 kV DC. Alalisvoolu kontaktvõrgu põhikomponentideks on veotrafo-alaldi grupp veoalajaamades, kontaktliin ja tagasivoolu süsteem. Kontaktvõrgu lihtsustatud skeem on kujutatud Joonisel 4.2. [20]



Joonis 4.2 Kontaktvõrgu põhimõtteline skeem

Kolmefaasilise toiteliini kaudu liigub vahelduvvoolu võrgust toide veotrafole, kus see muundatakse sobiva pingeni, seejärel liigub toide läbi alaldi, kus see muundatakse alalisvooluks. Edasi liigub toide kontaktvõrku, kus see annab toidet antud liinivahemikus olevale veeremile. Veeremilt liigub vool tagasi läbi tagasivoolurööpa. [20]

4.2 AS Eesti Raudteele kuuluvad veoalajaamad

AS Eesti Raudteele kuulub neli veoalajaama ning nendeks on Järve, Keila, Riisipere ja Raasiku veoalajaam. Veoalajaamade veotrafode võimsuseks on 6,3 MVA ja alaldi võimsuseks 9 MW. Veoalajaamad on üles ehitatud samal põhimõttel. Järgnevates peatükkides tutvustab töö autor lähemalt nelja AS Eesti Raudteele kuuluvat veoalajaama, mis on praegusel ajal ühtlasi ka ainsad olemasolevad veoalajaamad antud ettevõttes. [20]

4.2.1 Järve veoalajaama kirjeldus

Järve veoalajaam asub Tallinnas, Kristiine linnaosas kinnistul Tuisu tn 1 (Joonis 4.3). Järve VA valmis 2015. aastal ja see ehitati vana veoalajaama asemele. Järve VA varustab Lääne suunalist kontaktvõrku 3 kV pingega. Järve veoalajaam koosneb 35 kV,

10 kV, 6 kV ja 0,4 kV vahelduvvoolu sektsioonist ning 3 kV alalisvoolul sektsioonist. Järve veoalajaama põhimõtteline skeem on Joonisel 4.4. 35 kV sektsioon on seotud sisendiga, nimelt saab alajaam oma toite 35 kV sisendi kaudu alajaamast ja toide liigub läbi 35 kV jaotusseadme (Joonis 4.5) veotrafole (Joonis 4.6). 10 kV osa on seotud raudtee jaotusvõrguga ja toidab läbi 10 kV jaotusseadme reservliini (RL) ja kolmandat omatarbe trafot. 6 kV osa toidab läbi 6 kV jaotusseadme autoblokeeringu (AB) liini ja autoblokeeringu trafot. 0,4 kV sektsioon on seotud alajaama omatarbega ja 0,4 kV jaotusseade toidab alajaama tööks vajalikke seadmeid. 3 kV osa toidab kontaktvõrgu kaudu elektrironge ja on omakorda jagatud + ja - pooleks. +3 kV jaotusseade on rongidele toidet andev pool ning -3 kV jaotusseade on seotud tagasivoolurööpa kaudu rongidelt tagastuva vooluga. Järve VA põhimõtteline skeem on Joonisel 4.4. [21]



Joonis 4.3 Järve veoalajaama hoone



Joonis 4.4 Järve veoalajaama põhimõtteline skeem

Veoalajaamas on kokku 7 trafot: kaks 35/2x1 kV veotrafot, üks 0,4/6 kV trafo, kaks 35/0,4 kV omatarbe trafot, üks 35/10 kV trafo ja üks 10/0,4 kV trafo. Lisaks trafodele asuvad veoalajaamas ka alaldid, mis muudavad veotrafodelt tuleva vahelduvvoolu rongide toiteks sobilikuks alalisvooluks. Tavaolukorras on töös üks veotrafo ja sellega seotud alaldi. Teine trafo ja alaldi on reservis. Tavapäraselt töötab ühe nädala üks

veotrafo ja alaldi ning sellele järgneval nädalal teine veotrafo ja alaldi, nii kindlustatakse see, et mõlemad süsteemid on pidevalt töös ja kontrollitud. Järve VA lihtsustatud skeem on välja toodud Lisas 1. [21]



Joonis 4.5 Järve VA 35 kV JS



Joonis 4.6 35/2x1 kV veotrafo

4.2.2 Keila vealajaam kirjeldus

Keila VA asub Harjumaal, Keila linnas kinnistul Jõe tn 70c // Turu tn 1 // Keila raudteejaam ning see valmis 2014. aastal (Joonis 4.7). Keila vealajaam on ehituselt väga sarnane Järve vealajaamale ning koosneb samuti 35 kV, 10 kV, 6 kV ja 0,4 kV vahelduvvoolu sektsioonist ning 3 kV alalisvoolusektsioonist. Erinevus Järve vealajaamaga seisneb selles, et Järve vealajaamas kasutatakse 10 kV tekitamiseks 35/10 kV trafot, kuid Keila vealajaamas on eraldi olemas 10 kV sisend Elektrilevi OÜ alajaamast. 35 kV sisend on samuti Elektrilevi OÜ alajaamast ja 35 kV jaotusseadmelt saavad toite veotrafod ning lisaks ka omatarbe (OT) trafod. 10 kV jaotusseade toidab RL liine ja kolmandat omatarbetrafot. 6 kV JS toidab AB liini ja AB trafot. Sarnaselt Järve vealajaamaga on ka Keila vealajaamas 0,4 kV osa omatarbeks. 3 kV DC osa on elektrirongidele toite tagamiseks ja süsteem on Järve vealajaamale analoogse ehitusega. Keila VA põhimõtteline skeem on Joonisel 4.8. Keila VA lihtsustatud skeem on välja toodud Lisas 2. [22]



Joonis 4.7 Keila vealajaama hoone



Joonis 4.8 Keila vealajaama põhimõtteline skeem

Keila vealajaamas on kokku 6 trafot: kaks 35/2x1 kV (veotrafo), kaks 35/0,4 kV

(omatarve), 0,4/6 kV ja 10/0,4 kV (omatarve). Järve vealajaamale sarnaselt, on ka Keila vealajaamas kaks 12 pulsilist dioodalaldit. [22]

4.2.3 Riisipere vealajaam kirjeldus

Riisipere VA asub Riisipere alevikus, Harju maakonnas, kinnistul Jaama tee 8 // Veetorni tn 10 // Riisipere raudteejaam (Joonis 4.9). Riisipere vealajaam sarnaneb Järve ja Keila vealajaamaga. Riisipere vealajaam valmis 2019. aastal. Riisipere vealajaama eristab Järve ja Keila vealajaamast sisendpinge ning ehituslikult poolelt kõrgem kaabliruum, mis teeb VA teenindamise mugavamaks. Riisipere VA saab oma toite 20 kV sisendist, kust see liigub edasi 20/3 kV veotrafole. Riisipere VA-s on ainult üks veotrafo, seevastu Järve ning Keila VA-s on neid kaks. Veotrafolt liigub toide edasi alaldile (Joonis 4.11), kus vahelduvvool muudetakse alalisvooluks ning edasi liigub toide läbi 3 kV JS kontaktvõrku. Riisipere VA põhimõtteline skeem on kujutatud Joonisel 4.10. Riisipere VA lihtsustatud skeem on välja toodud Lisas 3. [23]



Joonis 4.9 Riisipere vealajaama hoone



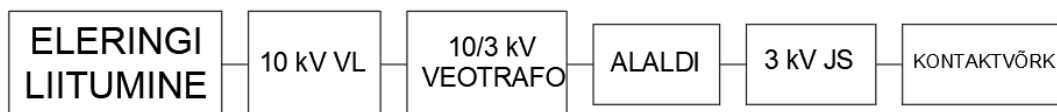
Joonis 4.10 Riisipere vealajaama põhimõtteline skeem



Joonis 4.11 Alaldikapp Riisipere vealajaamas

4.2.4 Raasiku vealajaama kirjeldus

Raasiku vealajaam on kolmest eelpool kirjeldatud vealajaamast vanem ning seetõttu ka erinev. Raasiku vealajaam asub Harjumaal Raasiku alevis aadressil Raasiku raudteejaam (Joonis 4.13). Raasiku VA on ehitatud 1973. aastal. Antud VA on teistest erinev ka seetõttu, et saab toite 110 kV liinilt. 110 kV sisendis vähendatakse trafol pinget 10 kV-ni ning edasi liigub toide 10/3 kV veotrafole (Joonis 4.14). Raasiku VA-s on sarnaselt Järve ja Keila VA-ga ainult kaks veotrafot, üks 10/2x1 kV ja teine 10/3 kV. Veotrafolt liigub toitepinge alaldile ning sealt edasi 3 kV jaotusseadmele ja kontaktvõrku. Raasiku VA põhimõtteline skeem on välja toodud Joonisel 4.12. Raasiku VA lihtsustatud skeem on välja toodud Lisas 4. [24]



Joonis 4.12 Raasiku VA põhimõtteline skeem



Joonis 4.13 Raasiku vealajaama hoone



Joonis 4.14 Raasiku vealajaama veotrafo T-AA 10/3 kV

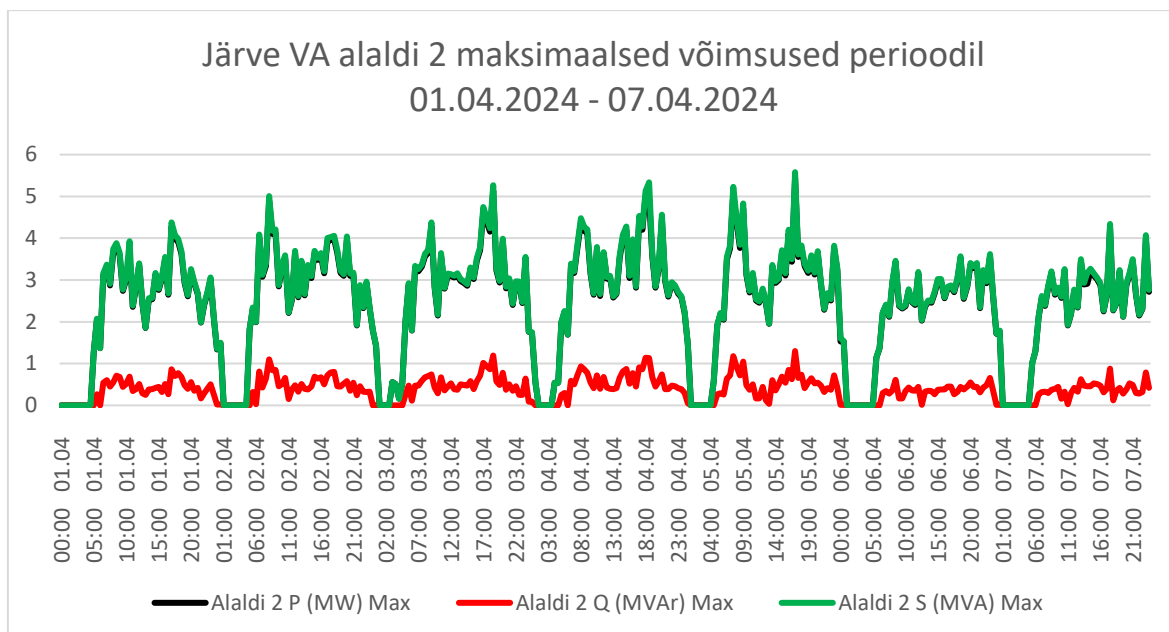
5. VEOALAJAAMADE KOORMUSGRAAFIKUD

Mõistmaks VA-de koormatust on vajalik uurida nende koormusgraafikuid. Sisendandmed graafikute loomiseks ja võimsuste analüüsimiseks sai töö autor programmist Martem SCADA. Martem SCADA programmist on võimalik saada ka koormusgraafikuid, kuid nende lugemine ei ole mugav ning seetõttu otsustas autor sisendandmetega luua uued graafikud. Martem SCADA abil on võimalik uurida erinevaid väärtusi vooluvõrgu erinevatel seadmetel. Antud töö raames uuriti veoalajaamades alalditel AA1 või AA2 (olenevalt sellest, milline alaldi oli uurimisperioodi hetkel töös) aktiivvõimsust P , reaktiivvõimsust Q ja näivvõimsust S . Graafikud on loodud programmis MS Excel. [25]

Töö autor valis uurimiseks Järve, Keila ja Riisipere veoalajaamade koormusgraafikud, kuna vastavalt AS Eesti Liinirongid sõidugraafikule on nende VA-de poolt teenindavatel lõikudel elektrirongiliiklus kõige tihedam. Uurimiseks valiti kaks ajaperioodi: 24 h vahemik ning 7 päeva ehk nädala vahemik, et mõista paremini VA koormatuse iseloomu. Nädala andmed on salvestatud perioodil 01.04.2024 – 07.04.2024 ning 24 h andmed kuupäeval 01.04.2024. Kasutatud tarkvara salvestab iga 30 minuti kohta minimaalse, maksimaalse ja keskmise võimsuse väärtuste info.

5.1 Järve veoalajaama koormusgraafiku analüüs

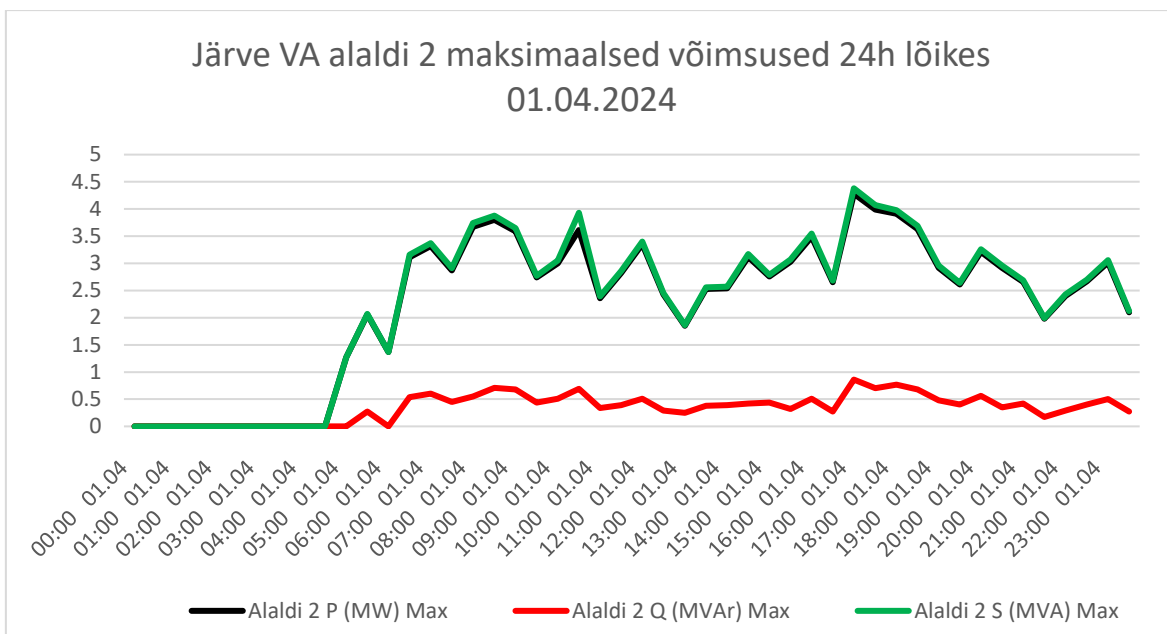
Järve veoalajaama piirkonda läbivad nii Paldiski kui ka Riisipere ja Turba suunalised rongid ning see teeb argipäevas 44 rongi mõlemas suunas ehk kokku 88 rongi. Nädalavahetustel on see arv 32 - 34 rongi mõlemal suunal ehk kokku 66 rongi. Rongid alustavad liini algjaamades sõitu hommikul kella 6 paiku, viimased sõidud toimuvad umbes kell 23 ajal öhtul ning väljumised toimuvad iga 20 – 30 minuti järel. Järve VA nädala võimusgraafikut (Joonis 5.1) analüüsid on selgelt näha päevade lõikes korduvat mustrit, päevade koormus on nähtav tihedate kokku koondunud tippudena, mis vahelduvad tühimikega. VA on lainetena koormatud alates ca 05:30 kuni 00:00-ni ehk umbes 17 - 18 h. Ülejäänud 5 - 6 h on VA koormatud minimaalselt. Esmaspäevast reedeni on graafikult selgelt näha, et graafikul on kaks kõrgemat piiki ehk päevas on kaks ajavahemikku, kus võimsus on ülejäänud ajast tunduvalt suurem. Esimene periood jääb hommikusse ning teine periood öhtusse. Nädalavahetusel sellist trendi ei ole.



Joonis 5.1 Järve VA alaldi 2 nädala maksimaalsed võimsused perioodil 01.04.2024 - 07.04.2024

Arvestades seda, et VA-de veotrafode võimsuseks on 6,3 MVA, siis maksimaalse võimsuse graafiku põhjal on VA enamus ajast koormatud umbes poole väiksema võimsusega. Kuna veotrafode võimsus valitakse maksimaalse koormatuse järgi, siis viib taoline koormuse jaotus ülalpidamiskulud kalliks kuna suure osa ajast ei ole VA maksimaalselt koormatud, kuid võrguoperaatorile tuleb reserveeritud võimsuse läbilaskevõime eest siiski tasuda.

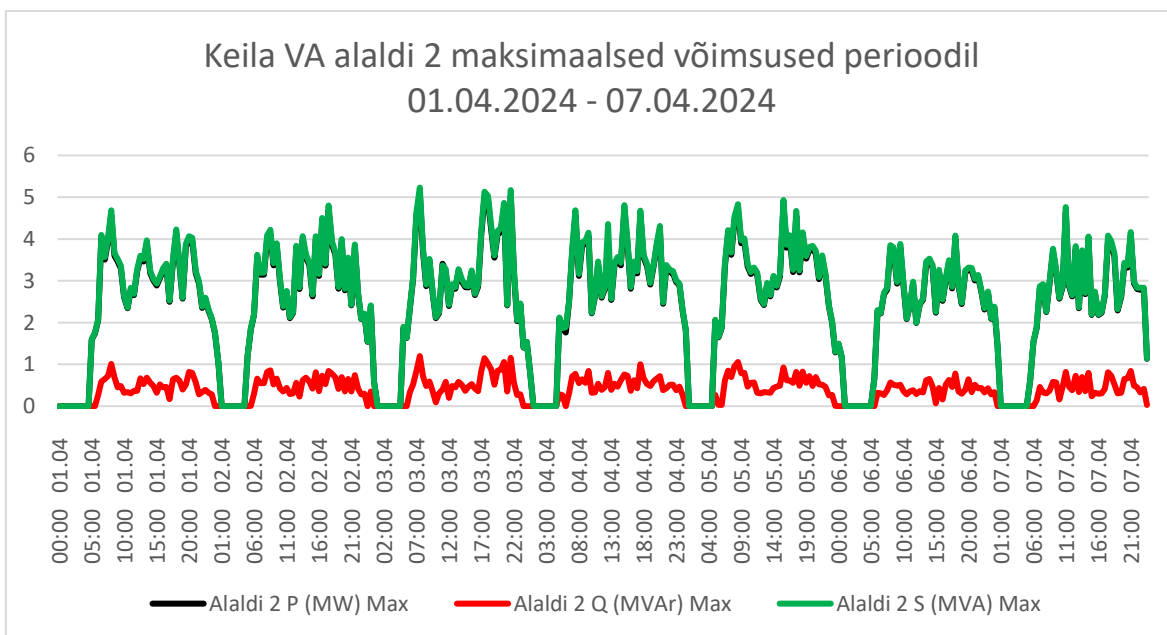
01.04.2024 24 h võimsusgraafikut (Joonis 5.2) uurides selgub, et maksimaalne koormatus on kell 17:00 – 17:30 ning veoalajaama aktiivvõimsus P on 4,28 MW ja näivvõimsus S on 4,38 MVA. Vahemikus 00:00 kuni 05:00 on VA minimaalselt koormatud. Üldjoontes ilmneb graafikut uurides, et koormatus on ebaühtlane ning tõuseb ja langeb pidevalt, mis teeb graafiku sakiliseks.



Joonis 5.2 Järve VA alaldi 2 maksimaalsed võimsused 24h lõikes 01.04.2024

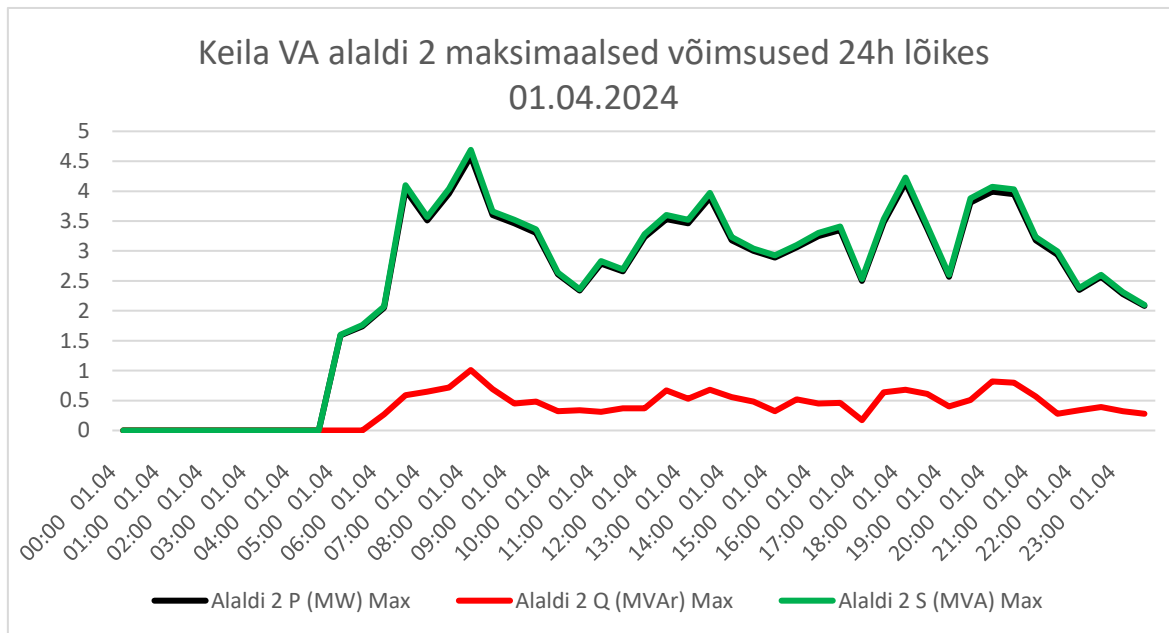
5.2 Keila vealajaama koormusgraafiku analüüs

Keila VA piirkonda läbib sama suur hulk ronge kui Järve VA piirkonda. Nädala maksimaalse võimsuse graafikut (Joonis 5.3) uurides selgub, et graafik on kujult sarnane Järve VA võimsusgraafikule. Iga päev moodustab ühe tihedalt kokku koondunud tippude hulga, millest joonistuvad välja kaks maksimaalse võimsuse tippu. Nädalavahetusel ei ole teistest niivõrd palju kõrgemaid ja silmatorkavamaid võimsuse tippe. Ka selle VA puhul kordub trend, kus VA on koormatud ebaühtlaselt ja tipuvõimsuse lähedane koormus saavutatakse lühiajaliselt.



Joonis 5.3 Keila VA alaldi 2 maksimaalsed võimsused perioodil 01.04.2024 - 07.04.2024

24 h graafikut (Joonis 5.4) uurides on näha, et rongiliiklusevabal perioodil on VA koormus madal. Koormus tekib kui elektrirongid alustavad liinidel sõitu. 01.04.2024 suurim võimsuse tipp on hommikul kell 8:00, aktiivvõimsus on 4,58 MW ning näivvõimsus 4,69 MVA. Suurema osa päevast on koormatus alla 4 MW.



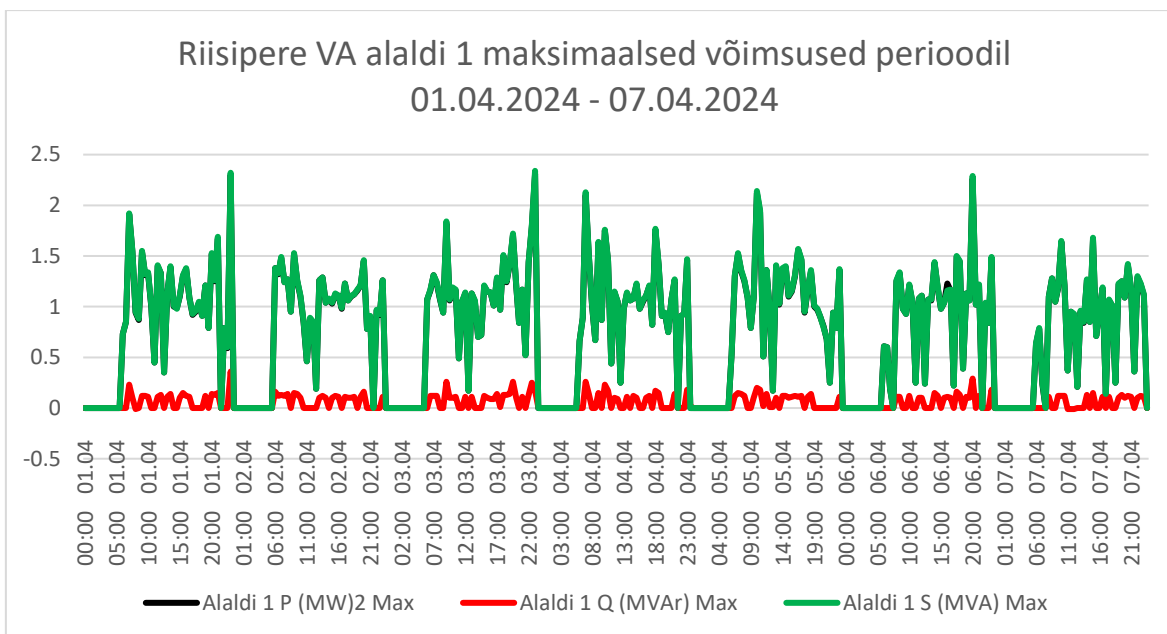
Joonis 5.4 Keila VA 24 h graafik 29.04.2024

Keila ja Järve VA-de koormusgraafikud on üsna sarnased ning järelikult on ka VA-de koormatus sarnasel tasemel. Rongide sõidugraafikut arvesse võttes on säärane sarnasus mõistetav. Mõlema VA puhul esineb olukordi, kus võimsus tõuseb 5 MW lähedale, kuid enamuse ajast jääb koormatus alla 4 MW.

5.3 Riisipere vealajaama koormusgraafiku analüüs

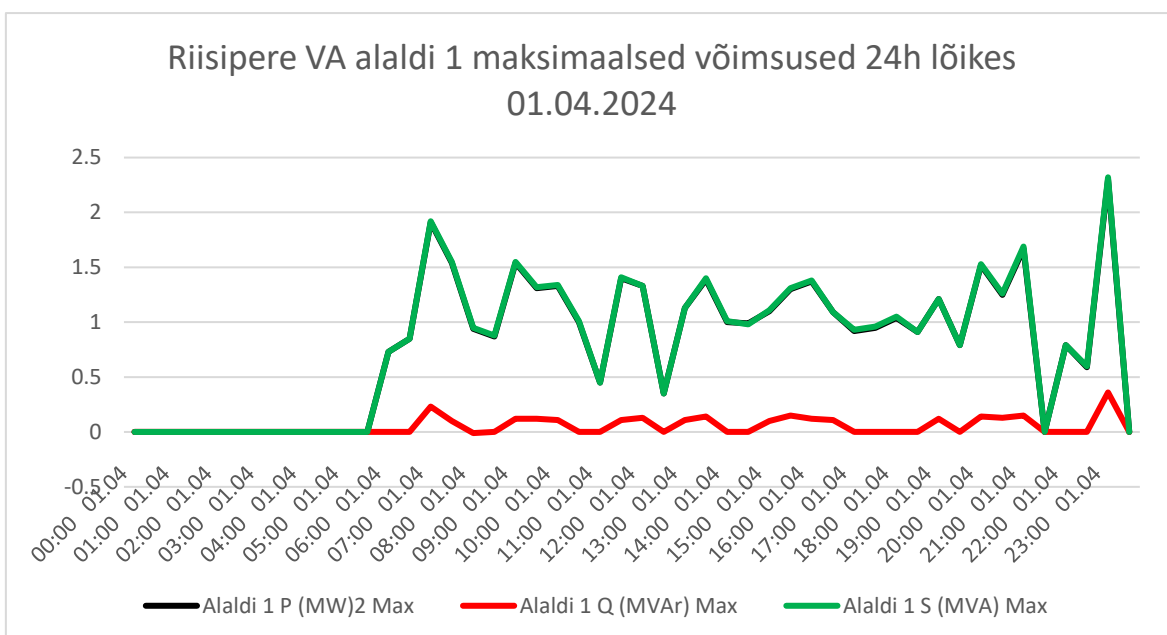
Riisipere VA piirkonda läbib argipäeval 15-16 rongi mõlemas suunas, mis teeb kokku 31 rongi. Nädalavahetustel 13-14 rongi mõlemas suunas, mis teeb kokku 27 rongi. Võrreldes Keila ja Järve VA-de toitepiirkondadega on Riisipere VA toitepiirkonnas liiklevate elektrirongide arv väiksem.

Riisipere VA ühe nädala (Joonis 5.5) võimsusgraafikut uurides on sarnaselt eelnevatega selgelt eristatavad erinevad päevad. Maksimaalse võimsuse tipud jäävad alla 2,5 MW.



Joonis 5.5 Riisipere VA alaldi 1 maksimaalsed võimsused perioodil 01.04.2024 - 07.04.2024

24 h graafikut (Joonis 5.6) uurides on samuti näha, et maksimaalne võimsus ei ületa 2,5 MW, mis tähendab, et VA on valdavalt koormatud alla veotrafo võimsuse.



Joonis 5.6 Riisipere VA alaldi 1 maksimaalsed võimsused 24h lõikes 01.04.2024

5.4 Kokkuvõtte saadud andmetest

Veolajaamade võimsusgraafikuid uurides leidis kinnitust eeldus, et veolajaamad on koormatud ebaühtlaselt ning enamasti alla veotrafo maksimaalse võimsuse. Keila ja Järve VA-de puhul leidis uurimisperioodil hetki, kus maksimaalne võimsus tõusis 5 MW lähedale. Riisipere VA puhul olid maksimaalsed võimsused tagasihoidlikumad jäädes 2,5 MW lähedale. Analüüsidest päevade lõikes maksimaalseid võimsuse väärtusi selgub,

et keskmine võimsus on Järve ja Keila VA puhul alla 5 MW ning Riisipere puhul veidi üle 2 MW (Tabel 5.1).

Tabel 5.1 Vealajaamade maksimaalsed väärtused

Kuupäev	Maksimaalse võimsuse väärtused		
	Järve VA AA2 P (MW)	Keila VA AA2 P (MW)	Riisipere VA AA1 P (MW)
01.04.2024	4.28	4.58	2.30
02.04.2024	4.89	4.69	1.52
03.04.2024	5.14	5.09	2.31
04.04.2024	5.01	4.69	2.10
05.04.2024	5.43	4.80	2.12
06.04.2024	3.56	4.00	2.26
07.04.2024	4.25	4.65	1.66
Nädala keskmine (MW)	4.65	4.64	2.04

Selleks, et välja pakkuda AS Eesti Raudtee-le sobilik energiasalvestussüsteem on eelnevalt vaja ära määratleda salvesti paigaldamise peamine eesmärk. Selleks võib olla tipukoormuse alandamine, pidurdamisel vabanenud energia parem kasutamine, pingestabiilsuse tagamine, taastuenergiaallika integreerimine süsteemi, eelnevalt nimetatud erinevad kombinatsioonid või mõni muu eesmärk. Seejärel tuleb teostada põhjalik elektrirongidele toidet andva süsteemi analüüs, mille käigus kaardistatakse ära parameetrid, mis on olulised välja valitud eesmärgi saavutamiseks. Alles peale eesmärgi seadmist ning süsteemi parameetrite uurimist saab asuda salvestustehnoloogiat valima ja süsteemi looma ning seda modelleerima. Sarnaselt erinevatele näidetele tuleb esmalt arvutuste teel tõestada loodud süsteemi kasumlikkus ning seejärel katsetega tulemusi kinnitada. Uurimisest järgmine samm oleks realselt teostatava süsteemi välja mõtlemine ning selle maksumuse hindamine.

Koormusgraafikute analüüsi põhjal saab üheks eesmärgiks olla tipukoormuse vähendamine. Poola ja Eesti elektriraudtee sarnasusi arvestades võiks kaaluda sarnase süsteemi rakendamist AS Eesti Raudtee vealajaamas. Mõlema riigi elektriraudtee toimib pingel 3 kV ning süsteemi ülesehitus on sarnane. Lisaks oli Poola näite vealajaama võimsusvahemik sarnane AS Eesti Raudtee võimsustega. Poola näite puhul oli maksimaalne võimsus 6,5 MW, AS Eesti Raudtee uuritavate vealajaamade trafod on võimsusega 6,3 MW. Poolas integreeriti süsteemi 5,5 MW suurune salvestussüsteem mille abil oli võimalik võrgust võetav võimsus piirata 1 MW peale. Sarnase süsteemi rakendamise võimalikkuse hindamiseks tuleks teha lisaanalüüse ja uurimisi.

KOKKUVÕTE

Käesoleva töö esimeseks eesmärgiks oli uurida erinevate salvestussüsteemide tüüpe ning rakendamise eesmärke raudteetranspordi sektoris. Selgus, et peamiselt jagunevad salvestussüsteemid viide kategooriasse: mehaanilised, elektrokeemilised, soojuslikud, elektrilised ja vesiniksalvestid. Elektriraudtee valdkonnas sobivad kasutuseks mehaanilised, elektrokeemilised ja elektrilised salvestid. Energiasalvestussüsteemid integreeritakse süsteemis selleks, et tagada pingestabiilsus, vähendada tipuvõimsuste ajal võrgust võetavat võimsust, vähendada pinget kõikumisi või kasutada paremini ära pidurdusenergiat.

Teiseks eesmärgiks oli uurida millised salvestussüsteemid on kasutusel veolajaamades mujal maailmas ning mis põhjusel need on süsteemi integreeritud. Selgus, et uuritud süsteemide puhul kasutati valdavalt akudel põhinevaid salvesteid ning salvestite kasutamise eesmärgiks oli tipuvõimsuse vähendamine, pidurdusenergia salvestamine ja taastuenergiaallika integreerimine süsteemi.

Kolmandaks eesmärgiks oli tutvuda veolajaamadega ning nende koormusgraafikutega. Koormusgraafikuid analüüsid selgus, et AS Eesti Raudtee veolajaamad on koormatud ebaühtlaselt. Sel perioodil, kui puudub aktiivne rongiliiklus on veolajaam praktiliselt koormuseta. Aktiivse rongiliikluse perioodil on veolajaamade koormus ebaühtlane ja kõikumine ning enamasti alla veotrafo võimsuse. Kõikumised esinesid nii ööpäeva kui ka nädala lõikes.

Neljandaks eesmärgiks oli välja pakkuda AS Eesti Raudtee veolajaamadele sobilik energiasalvestussüsteem, kuid see ületaks käesoleva töö mahtu ning taset. See eesmärk jäi seega täitmata, kuid selle asemel tõi autor välja sammud, mis on vajalikud, et antud ülesandega jätkata. Ühe sammuna tuleks välja selgitada mis on salvesti paigaldamise eesmärk ning selleks eesmärgiks võiks olla sarnaselt Poola näitele tipukoormuse vähendamine. Lisaks sellele tuleks sooritada pikaajalisem ja mahukam analüüs veolajaamade koormatuse teemal.

Käesoleva diplomitöö neljast eesmärgist kolm said täidetud. Uuriti välja energiasalvestussüsteemide tüübid ja kasutamise eesmärk raudteesektoris ning tutvuti AS Eesti Raudtee veolajaamadega ning analüüsi nende koormusgraafikuid. Antud teemat oleks võimalik edasi arendada magistritöö käigus või koostööna ülikooliga.

SUMMARY

The final thesis *The Mapping and Suitability of Energy Storage Systems for Traction Substations for Estonian Railway Ltd* is written by Eyleen Roov.

In contemporary times, we are increasingly faced with the need to make energy production and consumption more sustainable and environmentally friendly. This growing necessity has elevated the importance of green energy technologies and energy efficiency, notably within the transportation sector. Electric transport, which includes trains, trams, trolleys, and metros, has gained widespread usage as a more environmentally friendly alternative to traditional transportation methods. This study is particularly relevant as it delves into energy savings and storage systems within the railway sector, emphasizing the optimization of electric systems and the integration of green energy for powering electric trains.

Currently, traction substations supplying electric trains with the appropriate voltage face uneven loads, leading to increased maintenance and operational costs. To address this issue, energy storage systems are being integrated into traction substations to help balance load profiles and reduce power consumption from the grid. At present, Estonian Railway Ltd does not employ energy storage systems in its traction substations.

The primary objective of this thesis was to investigate various types of energy storage systems and their application in the railway transport sector. The research initially focused on identifying different storage systems, including mechanical, electrochemical, thermal, electrical, and hydrogen storage systems. It was found that mechanical, electrochemical, and electrical storage systems are most suitable for the electric railway sector. These systems are integrated to ensure voltage stability, reduce power draw during peak times, minimize voltage fluctuations, and make better use of braking energy.

The second objective was to examine the types of energy storage systems used in traction substations globally and understand the reasons behind their implementation. The study revealed that battery-based storage systems are predominantly used. The primary goals for integrating these systems are to reduce peak power demand, store braking energy, and incorporate renewable energy sources into the system.

The third objective focused on analyzing the load profiles of Estonian Railway Ltd's traction substations. The analysis involved visiting various substations (Järve, Keila, Riisipere, and Raasiku), studying their construction and equipment, and examining their schematics using AutoCAD. Load data was obtained through the SCADA system and visualized using MS Excel. The findings indicated that the load on these substations is uneven, with minimal load during periods of no active train traffic and fluctuating, often

suboptimal, loads during active periods. These fluctuations were observed both daily and weekly.

The final objective was to propose a suitable energy storage system for Estonian Railway Ltd's traction substations. However, it was concluded that developing a comprehensive solution would be significantly more complex and time-consuming than initially anticipated, exceeding the scope of this thesis. Consequently, the study outlined important steps necessary for future development. These steps include clearly defining the primary purpose of the storage system, which could be similar to the Polish example of peak load reduction, and conducting a more extensive and long-term analysis of the substation load profiles.

In conclusion, the thesis successfully met three of its four objectives. It provided a detailed examination of the types and purposes of energy storage systems in the railway sector, thoroughly analyzed the load profiles of Estonian Railway Ltd's traction substations, and identified key steps for future implementation of a suitable energy storage system. This topic holds significant potential for further exploration in a master's thesis or through collaborative efforts with the university, aiming to enhance the sustainability and efficiency of the railway sector.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

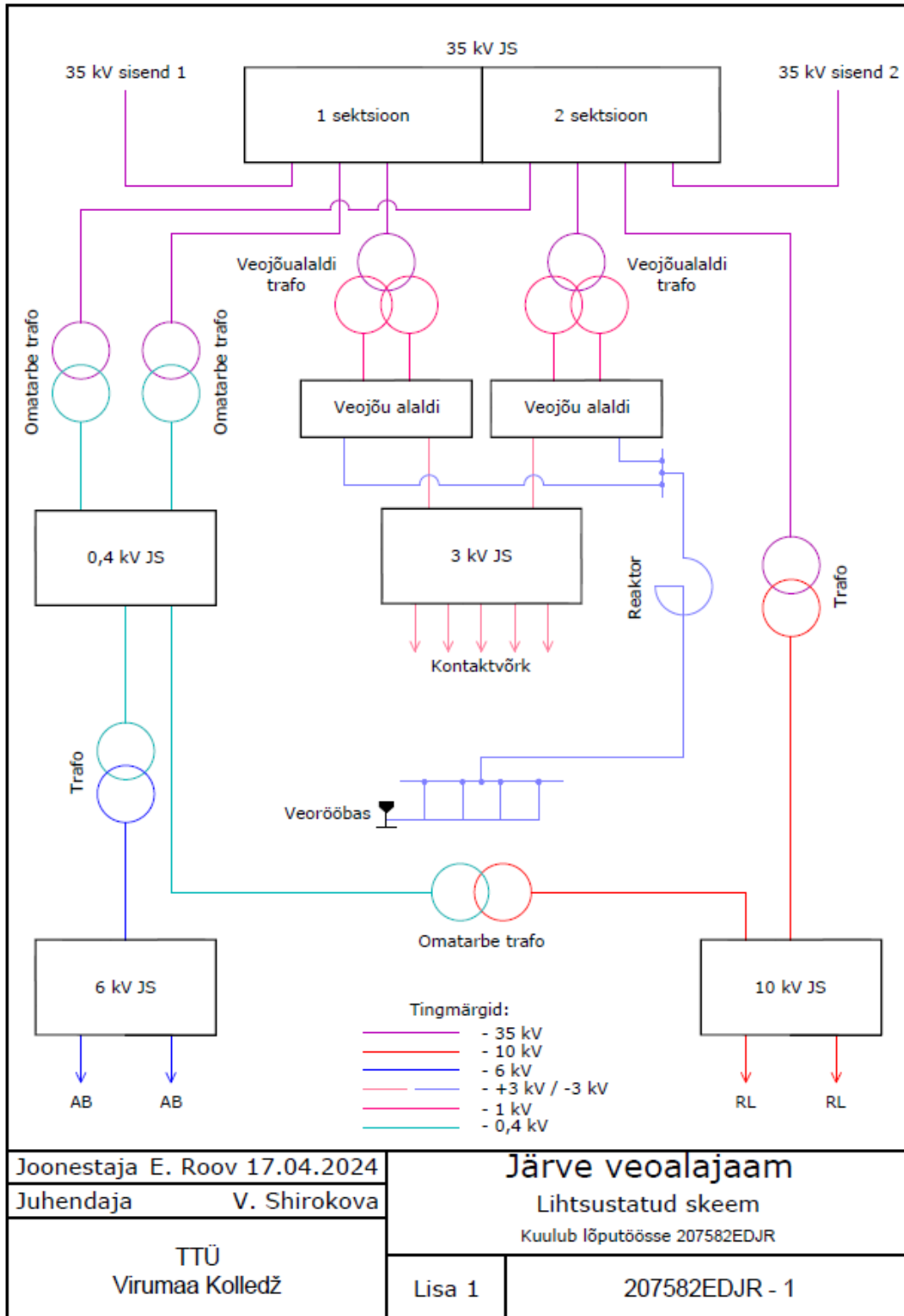
- [1] European Association for Storage of Energy, „Why Energy Storage?,” [Online] <https://ease-storage.eu/energy-storage/why-energy-storage/> (17.03.2024).
- [2] T. Melville, „Energy storage important to creating affordable, reliable, deeply decarbonized electricity systems,” 16.05.2022. [Online] <https://news.mit.edu/2022/energy-storage-important-creating-affordable-reliable-deeply-decarbonized-electricity-systems-0516> (17.03.2024).
- [3] IESA, „Classification of energy storage technologies: an overview,” 21.10.2020. [Online] <https://etn.news/energy-storage/classification-of-energy-storage-technologies-an-overview> (08.04.2023).
- [4] Energiasalv, [Online] <https://energiasalv.ee/zero-terrain/> (08.04.2024).
- [5] C. E. Okafor ja K. A. Folly, „Mechanical Energy Storage Systems and Their Applications in Power Systems,” 14.06.2023. [E-artikkel] <https://www.intechopen.com/chapters/86953> (12.04.2024).
- [6] E. Goikolea ja R. Mysyk, „Nanotechnology in Electrochemical Capacitors,” *Emerging Nanotechnologies in Rechargeable Energy Storage Systems*, 2017. [E-artikkel] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323429771000042> (12.04.2024).
- [7] Energiataglud, [Online] https://energiataglud.ee/Energia_salvestamise_tehnoloogiad (12.04.2024).
- [8] J. Kilter, T. Kangro, T. Sarnet ja I. Palu, *Elektriraudtee ja selle mõjud elektrisüsteemi talitlusele*, Tallinn: Eleringi toimetised, 2015. [E-toimetis] https://www.elering.ee/sites/default/files/attachments/Elektriraudtee_ja_selle_mojud_elektrisusteemi_talitlusele_1.pdf (12.04.2024).
- [9] AS Eesti Raudtee, „AS Eesti Raudtee võrgustiku teadaanne 2022-2023,” AS Eesti Raudtee, Tallinn, 2022.
- [10] S. Vazques, S. M. Lukic, E. R. Galvan, L. G. Franquelo ja J. M. Garrasco, „Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, kd. 57, nr 12, pp. 3881 - 3895, 2010. [Online] https://www.researchgate.net/publication/224176453_Energy_Storage_Systems_for_Transport_and_Grid_Applications (12.04.2024).
- [11] European Association for Storage of Energy, „Energy Storage and Transport: What’s the Connection?,” 02.06.2020. [Online]. <https://ease->

storage.eu/news/energy-storage-and-transport-whats-the-connection/
(08.04.2024).

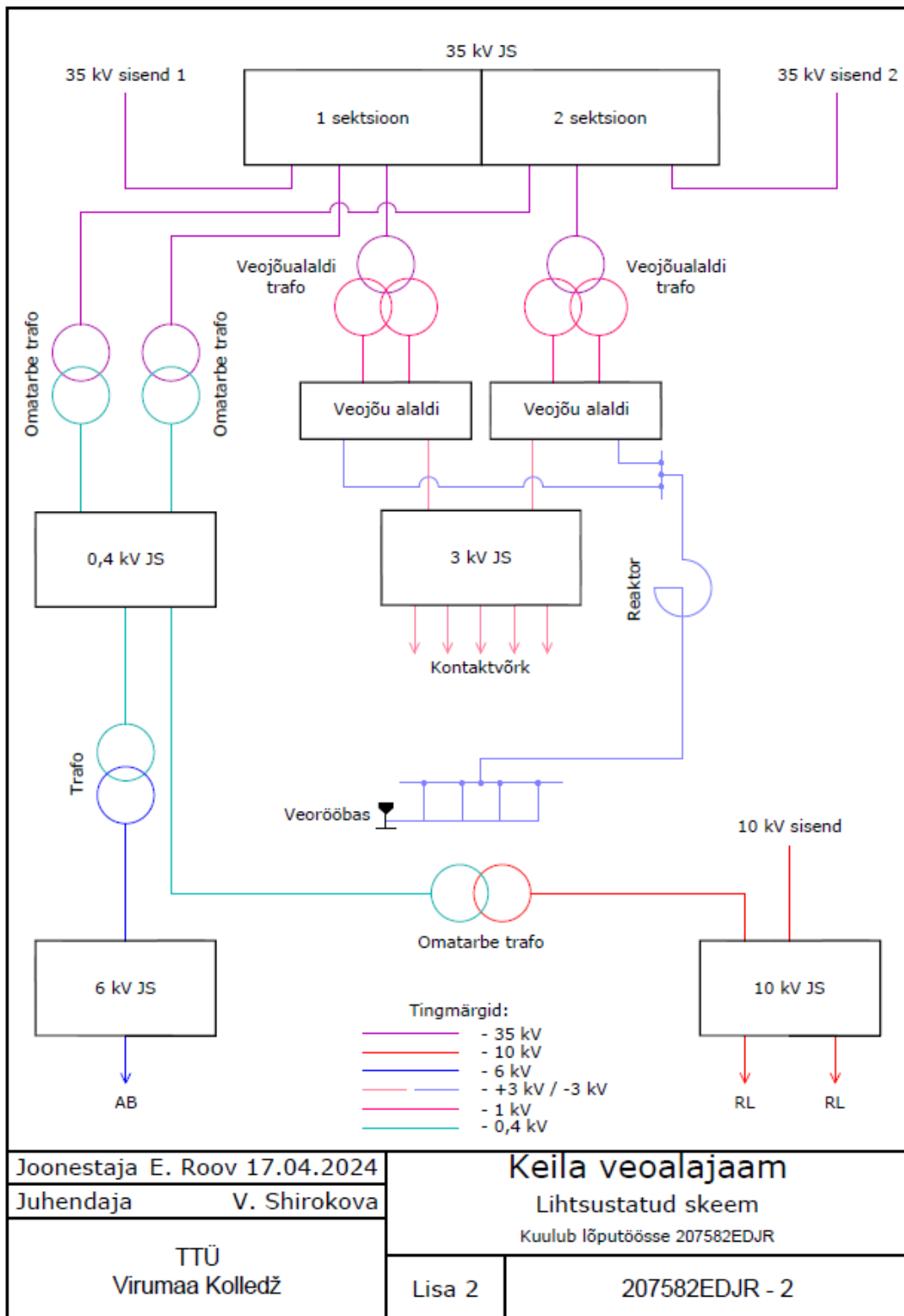
- [12] M. Jarnut, J. Kaniewski ja V. Protsiuk, „Energy storage system for peak-power reduction of traction substation,“ *Innovative Materials and Technologies in Electrical Engineering*, pp. 1-5, 2018. [Online] <https://ieeexplore.ieee.org/document/8370468> (08.03.2024).
- [13] D. Artyszak, „System of dynamic reduction of traction substation,“ 2022. [Online] <https://www.static.tu.berlin/fileadmin/www/10002264/ews/2022-bose/2022-05-16-folien.pdf> (08.03.2024).
- [14] PGE Energetyka Kolejowa S.A, "Energy storage," [Online] <https://pgeenergetykakolejowa.pl/en/projekt/energy-storage> (10.03.2024).
- [15] H. Hayashiya, Y. Nakao, Y. Aoki, S. Kobayashi ja M. Ogihara, „Comparison between energy storage system and regenerative inverter in D.C. traction power supply system for regenerative energy utilization,“ *2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)*, Warsaw, 2017.[Online] <https://ieeexplore.ieee.org/document/8098955> (10.03.2024).
- [16] H. Dong, Z. Tian, J. W. Spencer, D. Fletcher ja L. Fang, „Control Strategy and Analysis of Railway Traction System with Energy Storage System and Renewable Energy Source,“ *2022 3rd International Conference on Advanced Electrical and Energy Systems (AEES)*, Lanzhou, 2022. [Online] <https://ieeexplore.ieee.org/document/10079355> (10.03.2024).
- [17] Q. Qin, T. Guo, F. Lin ja Z. Yang, „Energy Transfer Strategy for Urban Rail Transit Battery Energy Storage System to Reduce Peak Power of Traction Substation,“ *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, kd. 68, nr 12, pp. 11714 - 11724, 2019. [Online] <https://ieeexplore.ieee.org/document/8878143> (10.03.2024).
- [18] Eesti Raudtee, *Electrification of Estonian Railways 2020-2028*, Tallinn.
- [19] S. Nakamura, T. Fukuda, Y. Kodama, Y. Hayashi ja H. Hayashiya, „Multipurpose Optimization Method for Energy Storage System Specification Using Measurement Data of DC Traction Substations,“ *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, kd. 19, nr 4, pp. 553-566, 2024. [Online] <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/tee.23998> (25.02.2024).
- [20] Euroopa Parlament, „Mis on süsinikuneutraalsus ja kuidas seda saavutada aastaks 2050?,“ 04.10.2019. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/topics/et/article/20190926STO62270/mis-on-susinekuneutraalsus-ja-kuidas-seda-saavutada-aastaks-2050> (25.02.2024).

- [21] AS Eesti Raudtee, *Järve Vealajaama skeem*, Tallinn, 2020.
- [22] AS Eesti Raudtee, *Keila Vealajaama skeem*, Tallinn, 2020.
- [23] AS Eesti Raudtee, *Riisipere vealajaama skeem*, Tallinn, 2020.
- [24] AS Eesti Raudtee, *Raasiku vealajaama skeem*, Tallinn, 2020.
- [25] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt ja J. Kilter, „Vahelduvvooluvõrgud,“ *Jaotusvõrgud*, Tallinn, TTÜ Kirjastus, 2007, pp. 100-101.
- [26] „Reactive power,“ [Online] <https://www.a-eberle.de/en/knowledge/reactive-power/> (03.05.2024).

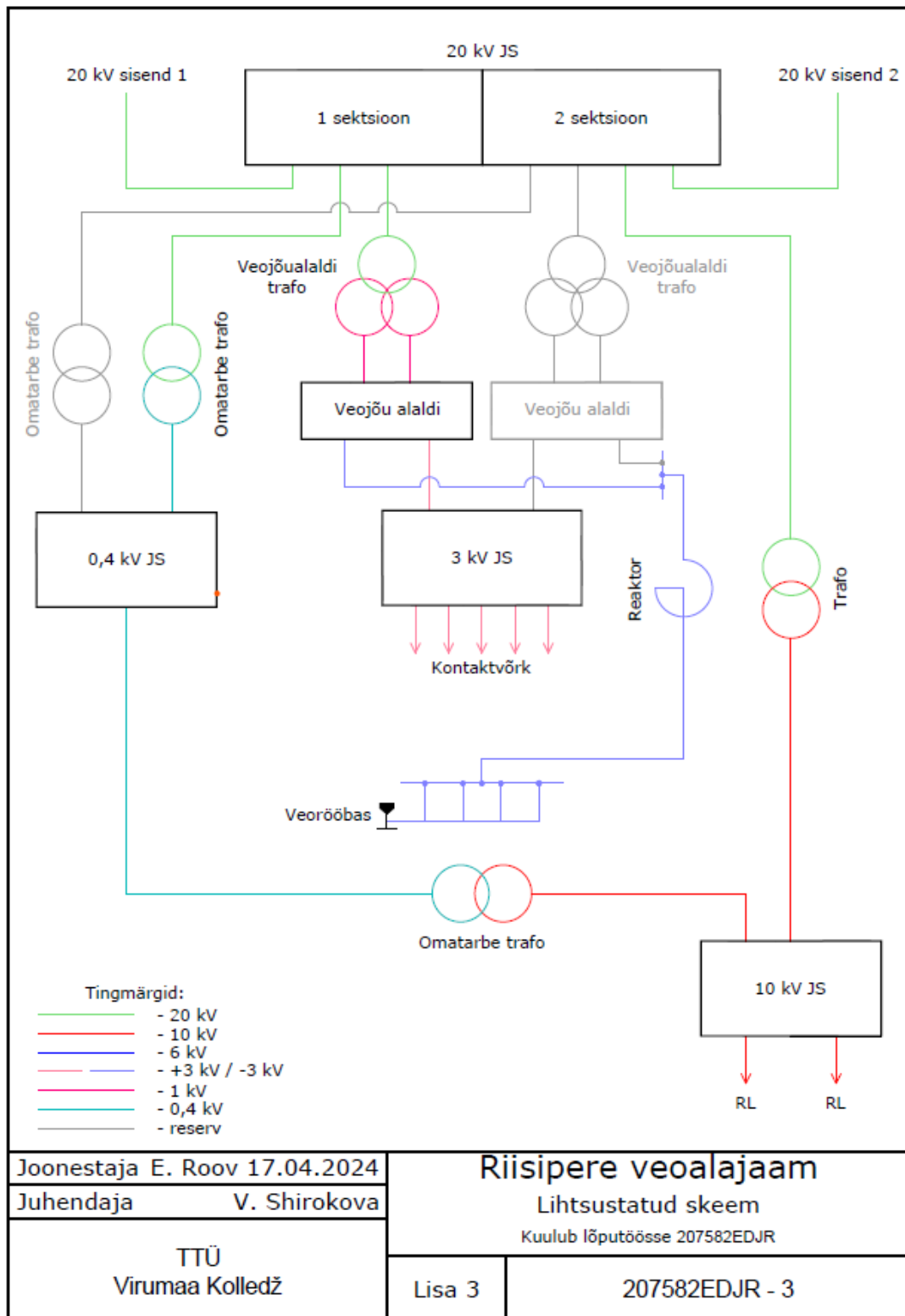
LISA 1 JÄRVE VA LIHTSUSTATUD SKEEM



LISA 2 KEILA VA LIHTSUSTATUD SKEEM



LISA 3 RIISIPERE VA LIHTSUSTATUD SKEEM



LISA 4 RAASIKU VA LIHTSUSTATUD SKEEM

