EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja inseneeria instituut

**Mikk Kliimson**

# ELEKTRIENERGIA SALVESTAMINE JA OSTU-MÜÜGI VÕIMALUSTE ANALÜÜS HOONETES

ELECTRICAL ENERGY STORAGE AND ANALYSIS OF BUYING AND SELLING OPPORTUNITIES IN BUILDINGS

Magistritöö

Energiakasutuse õppekava

Juhendaja: professor Andres Annuk, *PhD*

Tartu 2024

www.emu.ee

Eesti Maaülikool

Estonian University of Life Sciences

| | | | |
|---|---|---|---|
| Eesti Maaülikool<br>F. R. Kreutzwaldi 1, Tartu 51006 | | Magistritöö lühikokkuvõte | |
| Autor: Mikk Kliimson | | Õppekava: Energiakasutus | |
| Pealkiri; Elektrienergia salvestamine ja ostu-müügi võimaluste analüüs hoonetes | | | |
| Lehekülgi: 62 | Jooniseid: 35 | Tabeleid: 4 | Lisasid: 0 |

Osakond / Õppetool: Energiakasutuse õppetool

ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika

4.17. Energeetikaalased uuringud

T140 Energeetika

Juhendaja: PhD Andres Annuk

Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2024

Elektrienergia salvestamine pakub täiendavat lahendust väga muutlikele taastuvenergiaallikate tootmisprofiilidele. Sedalaadi lahenduste puhul on oluline, et tasakaalustamine energia salvestamisel toimuks tõhusalt. Elektrienergia pakkumine peab eelkõige vastama nõudlusele ning taastuvate energiaallikate laialdane integreerimine elektrivõrku toob kaasa mitmesuguseid uusi väljakutseid elektrisüsteemide haldajatele.

Käesolevas magistritöös on antud ülevaade erinevatest elektrienergia salvestamise võimalustest, rakendustest ja siinsel turul elektrihinna kujunemisest. Analüüsitud on näidisakude integreerimise võimalusi päikeseelektrijaama aastasesse töötsüklisse koos võrgust salvestamisega arvestades hinnakõikumisi ja kaasates ühe varasema aasta ilmastikuandmed. Töö eesmärk on anda ülevaade võimalustest, antud juhul päikeseelektrijaama võimsuse ja peakaitsmest tingitud piirangu osas, ning leida seejuures elektrienergia salvestamisega ostu-müügi võimalusi näidisaasta kalendrikuu ööpäeva keskmistest elektrihindadest lähtuvalt. Lahendusena on esitatud kaks süsteemi konfiguratsiooni, mis pakuvad võrdlusvõimalusi.

Taastuvenergia tootmisele elektrienergia salvesti lisamine võimaldab elektriturule täiendavaid pakkumismahte, mis on nihkunud enam nõudluse suunas. See aga vajab tootmis- ja salvestussüsteemide ülesehituse hindamiseks meetodeid, mida on ka ülevaatlikult esitatud.

Märksõnad: optimeerimine, taastuv energiaallikas, aku.

www.emu.ee

Eesti Maaülikool

Estonian University of Life Sciences

| | |
|---|---|
| Estonian University of Life Sciences<br>F. R. Kreutzwaldi 1, Tartu 51006 | Abstract of Master's Thesis |
| Author: Mikk Kliimson | Curriculum: Energy Application Engineering |

Title: Electrical energy storage and analysis of buying and selling opportunities in buildings

| | | | |
|---|---|---|---|
| Pages: 62 | Figures: 35 | Tables: 4 | Appendixes: 0 |

Department / Chair: Chair of Energy Application Engineering

Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering

4.17. Energetic Research

T140 Energy research

Supervisor: PhD Andres Annuk

Place and date: Tartu 2024

Electricity storage offers an additional solution to the highly variable production profiles of renewable energy sources. For these kinds of solutions, it is important that the balancing of energy storage takes place efficiently. First, the supply of electricity must meet the demand. But the widespread integration of renewable energy sources into the grid brings a variety of new challenges to power system managers.

This master's thesis provides an overview of various electrical energy storage possibilities, applications, and the development of electricity prices in the local market. The possibilities of integrating sample batteries into the annual operating cycle of the solar power plant with storage from the grid have been analyzed, considering price fluctuations and including the weather data of one previous year. The purpose of this work is to generate an overview of the possibilities, regarding the limitations of the solar power plant and the main fuse. Also to find the purchase and sale possibilities with the storage of electricity based on the daily average electricity prices of the month. As a solution, two system configurations are presented to provide comparison opportunities. Adding electricity storage to the production of renewable energy could create additional supply volumes to the electricity market. However, it needs methods for evaluating the design of production and storage systems, which are presented.

Keywords: optimization, renewable energy source, battery.

# SISUKORD

TÄHISED JA LÜHENDID ..... 6
SISSEJUHATUS ..... 8
1. ENERGIA SALVESTUSTEHNOLOOGITE RAKENDUSI ..... 10
2. ENERGIA SALVESTUSTEHNOLOOGIA ÜLEVAADE ..... 14
3. ERINEVAD TEHNOLOOGIAD ..... 18
3.1 Mehaaniline salvestus ..... 18
3.1.1. Pumphüdroakumulatsioonijaamad ..... 18
3.1.2. Suruõhksalvestid ..... 19
3.1.3. Hooratasenergiasalvesti ..... 21
3.2. Elektriline salvestus ..... 22
3.2.1. Ülijuhtenergiasalvesti ..... 22
3.2.2. Ülikondensaator ..... 23
3.3. Elektrokeemiline salvestus ..... 23
3.3.1. Liitumioonaku ..... 25
3.3.2. Pliiakud ..... 27
3.3.3. Läbivooluakud ..... 28
3.4. Keemiline salvestus ..... 29
3.5. Hübriidne sulasoolasalvestus ..... 30
3.6 Võrdlus ..... 31
4. ELEKTRIHINNA KUJUNEMINE ..... 33
4.1. Üldist ..... 33
4.2 Järgmise päeva turg ..... 37
4.3 Päevasisene turg ..... 39
4.4 Elektri hind ja mõjurid komponentidena ..... 39
4.5. Bilansiplaan ..... 40
5. ELEKTRIENERGIA OST-MÜÜK ..... 41
5.1. Võimalused hindade volatiilsuse korral ..... 41
5.2. Tarkvara System Advisor Model ..... 42
5.3 Järeldused ..... 49

KOKKUVÕTE ..... 51
KASUTATUD KIRJANDUS ..... 53

# TÄHISED JA LÜHENDID

| | |
|---|---|
| AGM | - absorbed glass mat; |
| csv | - .csv faililaiendiga käivitatav fail; |
| ENTSO-E | - European Network of Transmission System Operators; |
| ESS | - energia salvestussüsteem; |
| GEL | - gelled electrolyte; |
| HES | - hooratasenergiasalvestid; |
| KESS | - keemilised energiasalvestussüsteemid; |
| LCO | - Lithium Cobalt Oxide; |
| LFP | - Lithium iron phosphate; |
| Li-ion | - liitiumioon; |
| LMO | - Lithium ion manganese oxide; |
| LTO | - Lithium Titanate Oxide; |
| LVA | - läbivooluaku; |
| NCA | - nickel cobalt aluminium; |
| NMC | - Nickel Manganese Cobalt; |
| NSRDB | - National Solar Radioation Database; |
| PHAJ | - pumphüdroakumulatsioonijaamad; |
| $P_{kadu}$ | - energiakadu; |
| *PR(t)* | - elektritootmise profiil; |
| SAM | - System Advisor Model |
| SCES | - super capacitor energy storage |
| SLA | - sealed lead acid batteries; |
| SÕS | - suruõhkenergiasalvestid; |
| SSS | - sulasoolasalvestus; |
| *ST(t)* | - salvestusvõimsus ajafunktsioonina; |
| *SU(t)* | - toiteprofiil võimsuse ajafunktsioonina; |

| | |
|---|---|
| ÜES | - ülijuhtenergiasalvesti; |
| VLA | - vented lead acid; |
| VRLA | - valve regulated lead acid; |
| XBID | - cross border intraday; |
| xlsx | - .xlsx faililaiendiga käivitatav fail; |
| $\alpha$ | - etteantud energia salvestamise hajumise suurus; |
| $\eta_{kogu}$ | - keskmine kasutegur; |

# SISSEJUHATUS

Elektrienergiat ei saa otseselt ladustada, vaid seda on võimalik konverteerida salvestatavatesse vormidesse. Päevakorras olevate süsinikneutraalsete eesmärkide raames on oluline leida fossiilkütustele toimivaid alternatiive. Päikese- ja tuuleparkide, teisisõnu taastuvate energiaallikate vahelduv iseloom ja võimsuse tihe kõikumine vastavalt ilmastikuoludele on väljakutseks elektrivõrgu planeerimisel ja juhtimisel. Rakendades elektrienergia salvestustehnoloogiaid on võimalik taastuvate energiaallikate muutlik tootmisprofiil viia kooskõlla soovitud nõudlusprofiiliga. Energia salvestustehnoloogia võimaldab selle integreerimisel taastuvenergiaallikatega ühte võrku absorbeerida energiat ajal, kui tootmine ületab tarbimist ja tarnida energiat võrku tippkoormuste ajal. Tänase kehtiva tunnipõhise hinnatariifi keskkonnas, kus pakkumine ja nõudlus on elektrihinna kujundajateks, on oluline leida majanduslikke eesmärke ja põhjendatust elektrienergia salvestustehnoloogiasse investeeringute tegemiseks. Taastuvenergiaallikate laialdasem turule tulek, tunnipõhised elektrihinnad ja ka elektrienergia salvestustehnoloogiad võivad olla potentsiaalseteks võimalusteks elektrienergia ostu-müügi rakendustes.

Erinevat tüüpi salvestussüsteemidel on erinevad kulud, potentsiaalsed kasutusvõimalused ja tööomadused. Olenemata sellest, kas elektrisüsteemide kavandamine on lühiajalisele mastaabile või pikaajalise tootmise planeerimine, on suure taastuvate energiaressursside kasutuselevõtu taustal oluline energia salvestussüsteemide iseärasustega arvestamine.

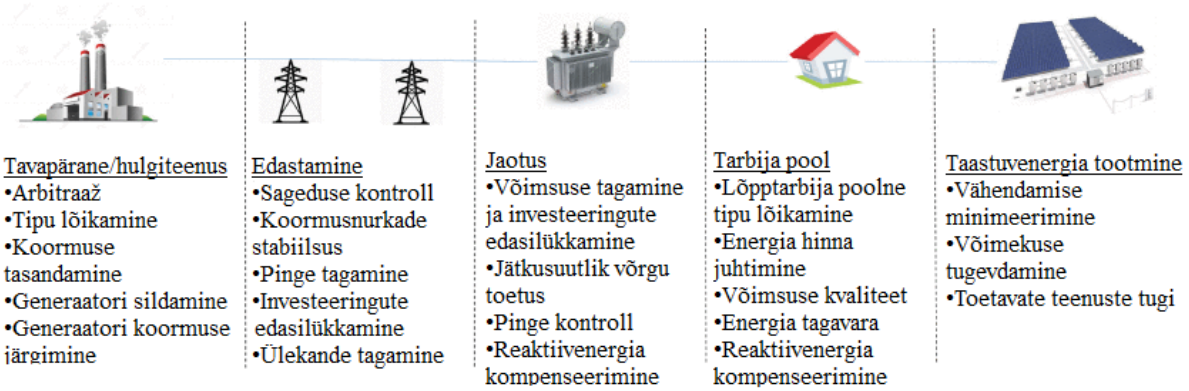
Käesolevas magistritöös on antud ülevaade erinevatest elektrienergia salvestamise võimalustest. Töö koosneb viiest peajaotisest. Esimeses osas antakse ülevaade salvestustehnoloogiate rakendustest elektrivõrgu erinevates segmentides. Teises osas tutvustatakse salvestustehnoloogia iseärasusi ja taastuvenergia tootmist ajaskaalal koos samaaegse mastaapse keskmise tarbimisega võrgus. Kolmandas osas vaadeldakse põhjalikumalt erinevaid salvestustehnoloogiaid koos näidetega tuues iga alajaotise all esile põhilisemad konkreetsed tehnilised lahendused. Neljas osa on elektrihinna kujunemisest siinses piirkonnas, millega tuuakse välja elektrituru üldised põhimõtted, järgmise päeva turu mõiste ja selle sisu.

Käsitletakse ka päevasisese turu võimalusi. Põgusalt on kaetud elektrihinna mõjurid komponentidena ja bilansiplaaniga seotud kohustused.

Antud töö viies peajaotis vaatleb esmalt vaid ühe ja seejärel kahe kWh-ga kauplemisel tekkivaid võimalusi näidisaasta hindasid arvestades ja püüdes seejuures elektriturult kõige odavamaid ja kõige kallimaid hindasid. Eesmärk on hinnata volatiilsuse olemasolust tingitud võimalusi. Edasine osa tööst analüüsib näidisakude integreerimise võimalusi päikeseelektrijaama aastasesse töötsüklisse koos võrgust salvestamisega arvestades hinnakõikumisi ja kaasates ühe varasema aasta ilmastikuandmed ja elektrienergia tunnihinnad. Ilmastikuandmed on vajalikud sisendina töös kasutatud tarkvaras, mis simuleerib valitud fotoelektriliste paneelide toodangu vastavalt seadistatud parameetritele. Näidisaasta hinnad on grupeeritud kuude kaupa ja leitud igale kalendrikuule seitse kõige soodsamat ja seitse kõige madalamat tunnihinda, et rakendada neid kasutatud tarkvaras akude töörežiimide määramiseks. Edasine andmetöötlus hõlmab tarkvaraga saadud tulemuste sidumist elektrienergia tunnihindadega. Esmase resultaadi täiendamiseks on leitud süsteemile parendav lahendus, mis hinnastatistikat arvestades ostu-müügi tulemusi saaks parandada. Töö eesmärk on anda ülevaade tasakaalupunktidest, antud juhul päikeseelektrijaama võimsuse ja peakaitsmest tingitud piirangu osas, ning leida seejuures elektrienergia salvestamisega ostu-müügi võimalusi.

# 1. ENERGIA SALVESTUSTEHNOLOOGITE RAKENDUSI

Energia salvestussüsteemid (ESS) on lisandväärtuseks elektrivõrgule, lisades paindlikkust, olles võimelised funktsioneerima tarbimise, tootmise ning reaktiivvõimsuse kompenseerimise vahendina [1].




**Joonis 1.1.** Energia salvestussüsteemide rakendusi [1]

ESS-id võimaldavad joonisel 1.1 välja toodud teenuseid, mis on abiks tavapärase sünkroonse elektrienergia genereerimise optimeerimisel paindlikkuse, tõhususe ning majandusliku tasuvuse võtmes. Põhilised ESS-ide teenused, mis on seotud tavapärase tootmisega on järgmised: [1]

- Generaatori koormuse järgimine: tavapäraselt pakuvad ESS-id koormuse muutustele kiiremat reageerimisaega kui generaatorsüsteemid. See teenus kasutab ESS-e pakkumaks tuge koormuse muutuste jälgimisel ja kiirete koormuse muutuste ülevõtmiseks. See võimaldab generaatoritel oma võimsust vastavalt tehnilistele soovitustele suurendada või vähendada. Aitab parandada generaatorite elutsüklit ja voolu kvaliteeti. [2; 3]
- Võrgu taastamine: on tavapärane kasutada ESS-e taastamaks osa elektrivõrgust pärast katkestust. Viidates eraldatud võrkudele on praktika, et võrk pingestatakse, selleks, et tagada vajalik võimsus ja pinge, enne kui generaatorid kasutusse tulevad. [4; 5; 6]
- Generaatorite sildamine: ESS-e kasutatakse koormuse katmiseks generaatorite ümberlülitusel [7; 8; 9].

- Energiaarbitraaž: praktika, mille korral kasutatakse ESS-e energia salvestamiseks aegadel, kui selle hind on madal, ja müümiseks tippkoormusega tundidel, kui hind on kõrge. See parandab majanduslikku optimeeritust tootmisvahendite kasutamisel [10; 11; 12].
- Tipu lõikamine: ESS-de kasutamine energia salvestamiseks, kui nõudlus on väike. Tühjendatakse selleks, et likvideerida koormuse tipud. See on sarnane energiaarbitraažile, kuid ei järgi majandusliku optimeerituse eesmärki. [13; 14]
- Koormuse tasandamine: koormuse tasandamine kasutab ESS-e energia salvestamiseks, kui nõudlus on väike ja tarnib selle võrku tagasi, kui elektrikoormus on suur. Peamine erinevus koormuse tasandamise ja tipu lõikamise vahel seisneb selles, et tipu lõikamine keskendub vaid tipukoormuse eemaldamisele, mitte koormuse tasandamisele. [15; 16]

Taastuvenergiaallikad on loomupäraselt muutliku iseloomuga ja ESS-id tagavad sellega toimetulekuks vajaliku paindlikkuse. Need aitavad tasakaalustada pidevalt muutuvat tootmist koormusega. Peamised ESS-ide teenused, mis on seotud taastuvenergiasüsteemidega, on järgmised: [1]

- Võimekuse tugevdamine: kasutatakse nii lühiajaliste sisendenergia voogude kõikumiste silumiseks kui ka energia salvestamiseks tipptootmise tundidel olenemata koormusest, edastades energia võrku tootmismahu vähenemisel [17; 18].
- Vähendamise minimeerimine: taastuvenergia ületootmise tõttu esineb perioodilist toodetud energia kasutamata võtmist. Selle tarbeks on võimalik kasutada ESS-e, et absorbeerida energiat aegadel, kui tootmine ületab tarbimist [19; 20].
- Toetavate teenuste tugi: täiendava energiareservi hoidmine. Võimalikud lisateenused on inertsi hoidmine, kiire sageduse hoidmine, esmane sageduse juhtimine. [21; 22; 23]

Elektriedastuse poolel on ESS-id võimelised funktsioneerima ka ülekandevaradena. Põhilised teenused ülekandesüsteemile on: [1]

- Sageduse kontroll: tasakaalu hoidmine nõudluse ja tootmise vahel sünkroonpiirkonnas pärast häiringut, aktiivvõimsuse genereerimise reguleerimine nimisageduse taastamiseks häiringu järel ja primaarse ja sekundaarse sagedusjuhtimise reservide taastamine [24; 25; 26].

- Pinge tagamine: ESS-id on kasutatavad pingetasemete reguleerimisel ülekande- ja jaotusvõrkude sõlmedes [26; 27].
- Investeeringute edasilükkamine: ESS-ide kasutamine ülekandevõrgu ülekoormusega seotud probleemide lahendamiseks. See annab võimaluse ülekandesüsteemi investeeringutega oodata. [28; 29]
- Koormusnurkade stabiilsus: sellega on eesmärgiks vähendada häirele järgnevate koormusnurkade kõikumisi lülitudes lühikese ajaperioodiga kõrgele võimsustasemele [26; 27].
- Ülekande tagamine: viitab võimekusele parandada ülekandesüsteemi tööd häirete ajal (pingelangused ja pinge ebastabiilsus) [30; 31].

Jaotusvõrkude tarbeks on olulisemad teenused:

- Võimsuse tagamine ja investeeringute edasilükkamine: tõstab infrastruktuuri kasutegurit, kui ESS-e kasutatakse koormuse nihutamiseks tipp-perioodilt baasperioodile, mille abil väheneb ka jaotusvõrgu ülekoormus. Seega annab võimaluse investeeringutega oodata [28; 29].
- Jätkusuutlik võrgu toetus: osaline elektrienergia genereerimise ülevõtmine, jaotades seega ümber energiavoogusid pärast võrgu põhikomponendi kadumist [32; 33].
- Pinge kontroll: varustuskvaliteedi parandamine kasutades ESS-e pingeprofiili reguleerimiseks lubatud piirides jaotusvõrgu kaudu [34; 35].
- Reaktiivenergia kompenseerimine: võrgu reaktiivenergia tasakaalu parandamiseks ESS-ide kasutamine [36].

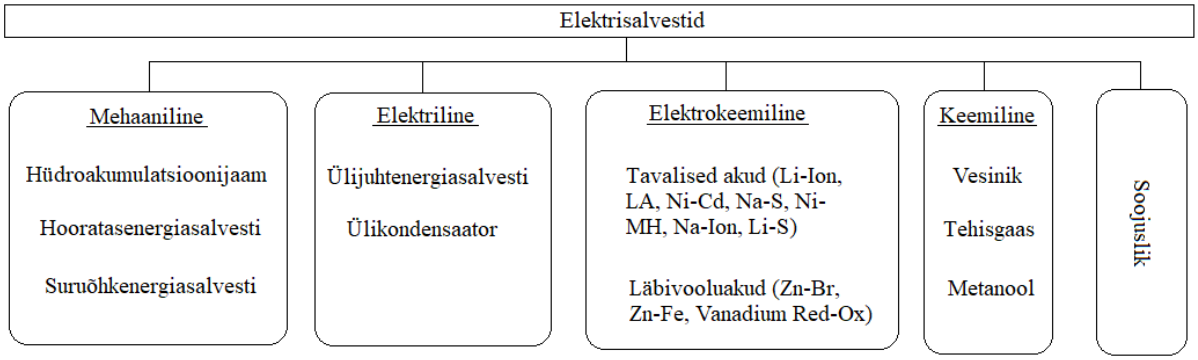
Põhilised tarbijapoolsed teenused on:

- Lõpptarbija poolne tipu lõikamine: kliendi ESS-ide kasutamine omatarbe tippnõudluse tasandamiseks, et piirata kulusid, mis vastavad suurimale energiavajadusele võrgus [37].
- Energia hinna juhtimine: madala elektritariifiga salvestamine ja tipptundidel tühjendamine [38].

- Võimsuse kvaliteet: taastuvenergia allikatest toodetud elektrienergia võimsuste kõikumiste põhjustatud elektrikvaliteedi probleemide (pinge kõikumine ja harmoonikud) summutamine ESS-ide abil [39].
- Energia tagavara: elektrivõrgu katkestuse korral kriitilise koormuse mõjutamata jätmine [40; 41].
- Reaktiivenergia kompenseerimine: jõuelektroonika vahendusel ESS-ide abil reaktiivvõimsuse pakkumine selleks, et kompenseerida klientide koormusi, seeläbi reguleerides pingetaset [42].

# 2. ENERGIA SALVESTUSTEHNOLOOGIA ÜLEVAADE

Elektrienergia salvestamine on elektrienergia muundamine keemilisse, mehaanilisse, elektrilisse, soojuslikku või elektrokeemilisse vormi (Joonis 2.1) [43].




**Joonis 2.1.** Energiasalvestustehnoloogiate kategooriad [1]

ESS-i omadused on mõjutatud energiatootmise tüübist, salvestamise kestusest ja rakendamisest vastavalt teoreetilise raamistiku valemile [44]:

$$SU(t) = ST(t) + PR(t) \tag{2.1}$$

,kus $SU(t)$ on toiteprofiil võimsuse ajafunktsioonina, mis näitab tootmise ja ESS-i energia võrku tarnimist, W;

$ST(t)$ on ESS-i salvestusvõimsus ajafunktsioonina, milles tühjenemisel loetakse seda positiivseks ja laadimisel negatiivseks, W;

$PR(t)$ on elektritootmise profiil tuuleturbiini või päikesepaneeli toodetud võimsusena, mis tarnitakse ESS-i või võrku, W.

Valemis 2.1 esitatud toiteprofiil $SU(t)$ kujutab endast konkreetset stsenaariumi, mille järgi tootja kavatseb tarbijale elektrienergiat tarnida. Tootmise ja salvestussüsteemiga teenitav tulu on tihedas seoses elektrihinna kõikumistega ajaskaalal. Kadude puudumisel saab optimaalse võimsusvoo, sest võrku edastav toiteprofiil võrdub salvestusprofiili ja tootmisprofiili summaga. Kaod aga puuduvad üksnes ideaaljuhul. Tegelikkuses tekivad ESS-ile kaod, mis hõlmavad

salvestustehnoloogiat ennast, keskkonna temperatuuri ja muundamise efektiivsust. Tarnitud võimsuse sidumisel kordajaga α saab tegeliku tarnitud võimsuse: [44]

$$\alpha \cdot SU(t) = ST(t) + PR(t) \tag{2.2}$$

,kus

$\alpha$ on etteantud energia salvestamise hajumise skalaarne suurus.

Kordaja $\alpha$ arvutamine ei ole ebaoluline, vaid nõuab arusaamist süsteemide kadude määrast ajafunktsioonina [32]. Eeldusel, et ajaaknas Δt salvestab süsteem ebaolulisel määral energiat, on võimsuskadu arvutatav toodetud ja tarnitud energia integraalide vahena järgmise valemiga alusel: [44]

$$P_{kadu} = \int_{t1}^{t2} PR(t)dt - \alpha \int_{t1}^{t2} SU(t)dt \tag{2.3}$$

,kus

$P_{kadu}$ on energiakadu, W.

Keskmine salvestussüsteemi efektiivsus määratud ajaperioodile Δt on arvutatav valemiga [44]:

$$\eta_{kogu} = \frac{\alpha \int_{t_1}^{t_2} SU(t)dt}{\int_{t1}^{t2} PR(t)dt} \tag{2.4},$$

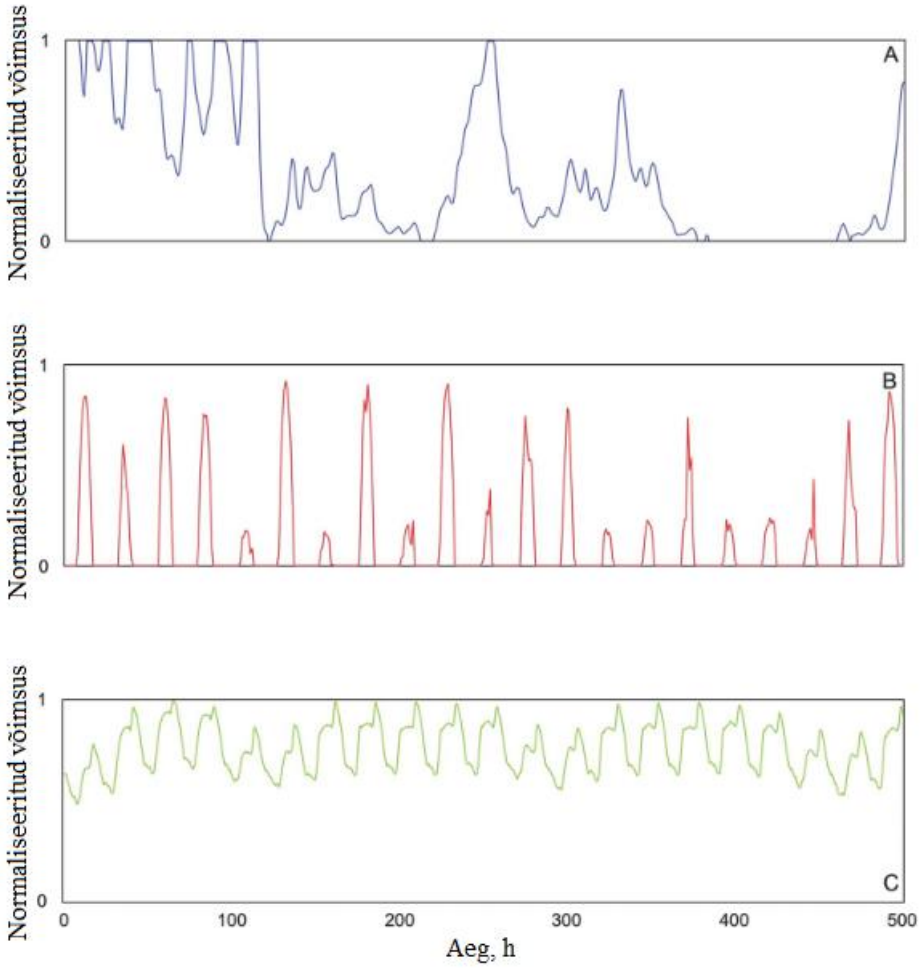
,kus

$\eta_{kogu}$ on vaadeldava aja keskmine kasutegur.

Igal ESS-il on eristatavad omadused oma elutsüklile, tühjenemiskadudele, tühjenemisajale, võimsusele, energiatihedusele ja mitmetele teistele karakteristikutele [45]. Joonisel 1.1 näidatud teenuste tarbeks mängivad need omadused olulist rolli sobiva tehnoloogia valimisel [46].

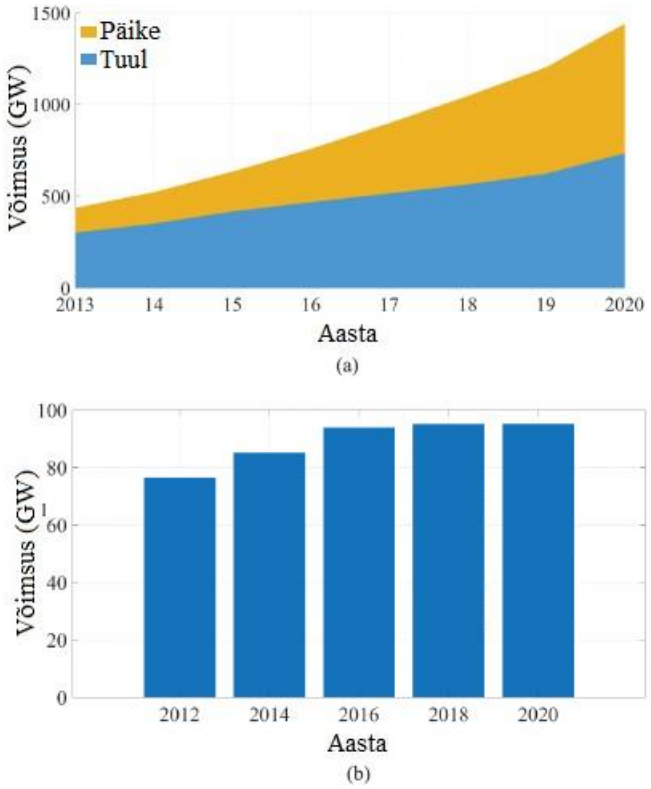
Tulevikus toodetakse väga suur osa elektrienergia tarbimist katvast energiast taastuvatest allikatest [1]. Käesolevaks ajaks on tehnoloogilise küpsuse saavutanud peamiselt tuule-, päikese- ja hüdroenergia [1]. Oletatakse, et need on lähitulevikus elektrienergia tootmise selgroog [47].

Elektrivõrgud toimivad tasakaalus tootmise ja tarbimise vahel. Tootmine on reeglina paindlik, et järgida koormusnõudlust. ESS-ide integreerimisvajadus taastuvenergiaga seotud võrkudesse lähtub taastuvenergia tootmise katkendlikust ja kontrollimatust olemusest. [1]




**Joonis 2.2.** (A) Illustreerib tuuleenergia normaliseeritud võimsuskõverat Hollandis Wilhelminadorpis 1,5 MW turbiinile [48; 49; 50]. (B) Jaanuari normaliseeritud võimsuskõver fotoelektrilisele päikesepaneelile Bostonis, MA, USA [51]. (C) Normaliseeritud elektrienergia nõudluskõver Suurbritannias [52]. Andmed on väljavõte suuremast normaliseeritud ajaseeriast [52].

Tasakaalustamisvõimsuse vajadust taastuvenergiaallikate ja nõudluse omavahelise nihke katmiseks illustreerib joonis 2.2 [52].




**Joonis 2.3.** (a) Päikese- ja tuuleenergia tootmisvõimsused [54]. (b) ESS-ide kumulatiivne võimsus [55].

Joonisel 2.3 on esitatud aastate jooksul aastani 2020 lisandunud taastuvenergia võimsused tuule- ja päikeseenergeetikast ning ESS-ide võimsusmahtude samaaegne areng.

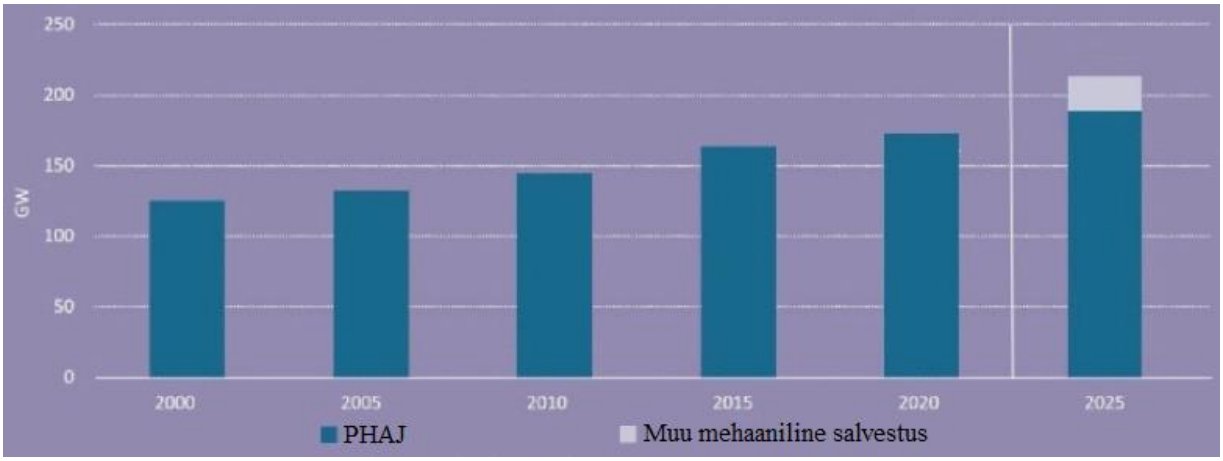
# 3. ERINEVAD TEHNOLOOGIAD

## 3.1 Mehaaniline salvestus

Mehaanilise ESS toimib energia muundamise kaudu mehaanilise ja elektrilise energiavormi vahel [46]. Koormuse tipptundide välisel ajal muundatakse olemasolev elektrienergia mehaaniliseks salvestatud energiaks, kasutades selleks tööpõhimõttena potentsiaalse energia, kineetilise energia, surugaasi ja pingutatud vedru tööpõhimõtet, ning vajaduse ilmnemisel muundatakse see endisesse, elektrienergia vormi, mis võrku tagastatakse [46]. Mehaaniline salvestus on üks enamlevinud viise üle maailma, sest see pakub paindlikkust salvestatud energia muundamiseks ja kasutamiseks, kui seda vajatakse [57]. Kõige prevalentsemad mehaanilised ESS-id on pumphüdroakumulatsioonijaamad (PHAJ), suruõhkenergiasalvestid (SÕS) ja hooratasenergiasalvestid (HES) [46].

### 3.1.1. Pumphüdroakumulatsioonijaamad

Pumphüdroakumulatsioonijaamad on üks populaarsemaid, vanemaid ja arenenumaid energia salvestamise vorme, mis pärineb 1920. aastatest ja moodustab tänapäeval üle 90% võrgu energiasalvestusvõimsusest [58]. Sedalaadi veehoidlad on reeglina rajatud jõgedele ja integreeritud hüdroelektrijaamade tammidega, kus vesi pumbatakse tagasi kõrgemal asuvasse veehoiu tammi. Pumphüdroakumulatsioonijaama lahenduseks on võimalik rakendada ka suuri maa-aluseid koopaid [59]. Geoloogilised koopad või vanad kaevandused sobivad kasutamiseks ka suruõhuenergia salvestamisel [60].



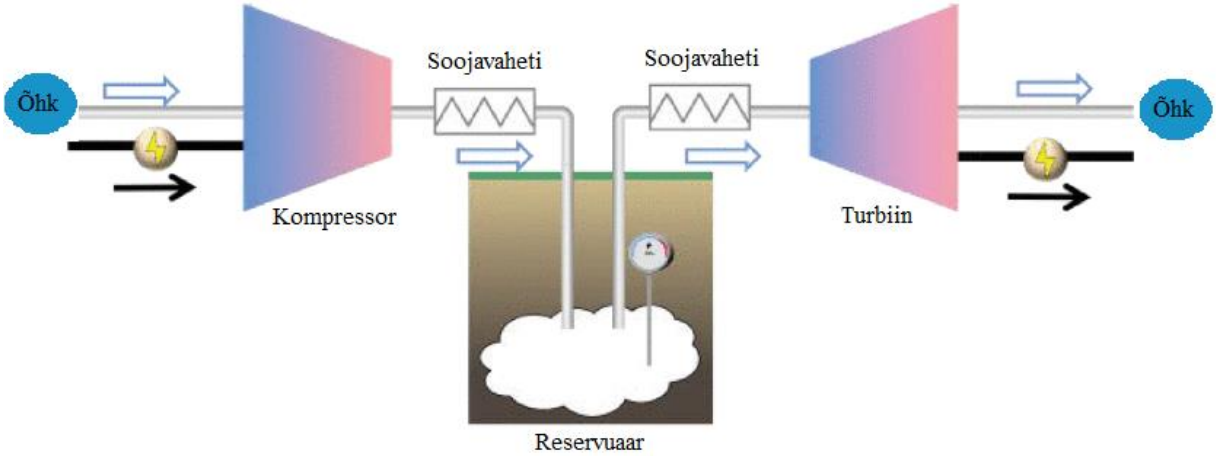

**Joonis 3.1.** Pumphüdroakumulatsioonijaamade ja muu mehaanilise salvestuse lisandumine ülemaailmselt [61]

Joonisel 3.1 on PHAJ-de installeeritud ja tulevikus lisanduvad võimsused ajaskaalal.

Selliste süsteemide võimsused on vahemikus 1 MW kuni 3000 MW ja töötavad kasuteguriga 76-85%, on väga pika elueaga, 50 aastat ja isegi enam, ning pakuvad selles ulatuses piiramatul arvul töötsükleid [62]. Seda peetakse küpseks tehnoloogiaks, kuid sisaldab siiski asukoha spetsiifilisi ja sotsiaalseid piiranguid, elupaigaliikide kaitset, projekti pikka ehitusperioodi, suuri kapitaliinvesteeringuid ning reaktsiooniaeg on süsteemil 10 kuni 15 minutit [63]. Tammi minimaalne kõrgus alumisest veereservuaarist peaks olema 150 meetrit [64]. Negatiivsed keskkonnamõjud ja geoloogilised võimalused muudavad PHAJ edasised arengud piiratuks [65].

### 3.1.2. Suruõhksalvestid

Suruõhksalvesti (SÕS) süsteemide puhul kasutatakse elektrienergiat madalama hinna aegadel hoidla suruõhuga täitmiseks. Kui energiahinnad on kõrged, siis mahutit tühjendatakse ja genereeritakse elektrienergiat õhu paisumisega ja seeläbi elektrit tootva generaatoriga ning turbiiniga. Süsteem salvestab energiat molekulide vahelise gaasirõhu kujul [46]. SÕS süsteeme saab pidada alternatiiviks PHAJ süsteemidele, sest sisaldavad suurt võimsust, keskmist geograafilist sõltuvust, madalat energiahinda ja pikemat eluiga [67].




**Joonis 3.2.** Suruõhksalvesti struktuurskeem [67]

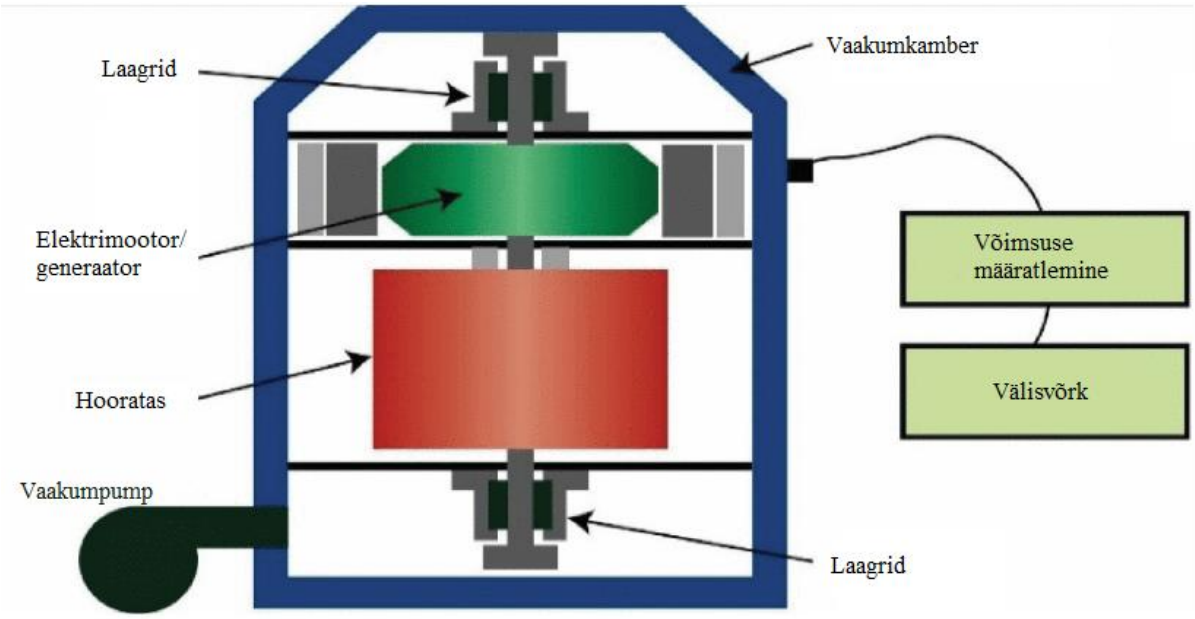
SÕS jaamade ülesehitusi liigitatakse õhu kokkusurumisest ja paisumisest tekkiva soojuse juhtimise meetodi alusel: diabaatiline, adiabaatiline ja isotermiline. Diabaatilise SÕS korral, mida nimetatakse tavapäraseks või ka esimese põlvkonna SÕS süsteemiks, eemaldatakse kokkusurumisel tekkiv soojus, mis hajutatakse, ja paisumisel soojendatakse õhk uuesti üles [68]. Teise põlvkonna süsteem sarnaneb esimesega, välja arvatud disaini muudatused, mille tulemusena on saavutatud paremad kokkusurumis- ja paisutamisetapid, kasutades efektiivsuse kasvatamiseks õhu sissepritsetehnikaid [69].

Adiabaatilise SÕS (peetakse kolmanda põlvkonna tehnoloogiaks) korral salvestatakse kokkusurumise soojus tahkes või vedelas olekus aines ja õhu paisumisel tagastatakse see soojus [70]. Seetõttu pole vaja kasutada näiteks maagaasi suruõhu soojendamiseks [69]. Adiabaatilise süsteemi puhul on eeliseks suurem efektiivsus ja väiksem süsinikdioksiidi heitkogus [69].

Isotermilise SÕS korral viiakse õhu kokkusurumine ja paisumine läbi piisavalt aeglaselt, et tagada õhu püsimine ligikaudu konstantsel temperatuuril soojusvahetuse kaudu keskkonnaga [70]. Teoreetiline efektiivsus läheneb sel juhul 100%-le, kuid praktikas pole võimalik täiuslikke termodünaamilisi protsesse saavutada, kuna tekib teatav soojuskadu [69]. Tegemist on veel uurimis- ja arendusjärgus oleva tehnoloogiaga [69].

### 3.1.3. Hooratasenergiasalvesti

Hooratassalvesti süsteemis kasutatakse hooratta massi nurkmomenti võimsuse salvestamiseks kineetilise energia kujul. Reeglina kasutatakse neid lühiajaliselt kiire tühjendamisajaga [46]. HES süsteemidel on suur võimsus ja energiatihedus ning lõpmatu arv laadimis- ja tühjenemistsükleid [71] Kasutatakse eelkõige pinge ja sageduse stabiliseerimiseks [71].




**Joonis 3.3.** Hoorattasüsteemi struktuur ja komponendid [46]

Kaasaegsetel suure kiirusega hoorattasüsteemidel on viis põhikomponenti: elektrimootor/generaator, hooratas, laagrite komplekt, jõuelektroonikaseade ja süsteem, mis tagab kõrgvaakumkeskkonna (Joonis 3.3) [72]. Süsteemi efektiivsus on vahemikus 85% kuni 90% magnetlaagrite abil ja mehaanilise hõõrdumise minimeerimise ning madala aerodünaamilise takistuse tekitamisega vaakumkeskkonna abil [72; 73].

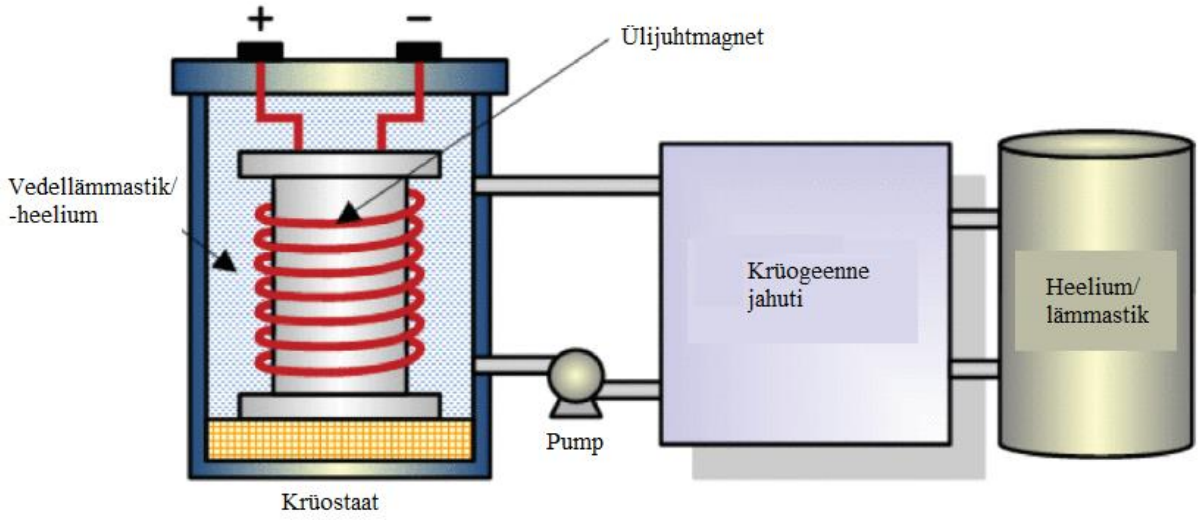
HES süsteemid pole seni veel välja arendatud selliselt, et neid pidada küpseks tehnoloogiaks. Nende pöörlevad osad nõuavad erinevates valdkondades täiendavat uurimis- ja arendustegevust [61; 74].

## 3.2. Elektriline salvestus

Elektrostaatiliste ja magnetiliste energiasalvestussüsteemide abil on võimalik elektri salvestamine otse laengu kujul, millega on võimalik vajaduse korral tagastada energiat [62]. Energia salvestamiseks elektrostaatilisel ja magnetväljade kujul kasutatakse ülijuhtivaid magneteid ja superkondensaatoreid [46]. Need on keskmise energiatiheduse ja suure võimsusega salvestusseadmed, mis on kasuks energia tipptarbimises, ühtlustades väljundvõimsust ja energia taastusvõimet transpordisüsteemides [75].

### 3.2.1. Ülijuhtenergiasalvesti

Ülijuhtenergiasalvesti (ÜES) koosneb suurest ülijuhtivast mähisest, mis on madalatemperatuurilises keskkonnas [76]. Tegemist on alalisvoolu seadmega, mis salvestab energiat magnetvälja [76]. Takistuslik kadu on sel seadmel praktiliselt null, sest ülijuhtmähise takistus on pea olematu [77]. Tühjenemisrežiimis on ÜES võimekus mõne millisekundiga anda võrku mitme MW jagu võimsust [46].




**Joonis 3.4.** Ülijuhtenergiasalvesti süsteemi ülesehitus [46]

### 3.2.2. Ülikondensaator

Ülikondensaator on suure võimsustihedusega energiasalvestusseade, mille laadimis- ja tühjenemistsüklite arv ulatub miljonitesse. Superkondensaatoril põhinevat ESS-i on laialdaselt kasutatud alalisvoolu liinide toitekvaliteedi parandamiseks [78; 79; 80]. Kuna pinge on neil madal, siis ühendatakse neid tavaliselt kesk- ja kõrgepinge rakenduste tarbeks järjestikku [81]. Pärast pikaajalist kasutamist ja ka tootmistolerantsidest tulenevalt võib laetuse tase elementidel omavahel hakata erinema, mille tulemusel võib juhtuda ülelaadimisi ja liigseid tühjenemisi [81]. See lühendab salvestusseadme kasutusiga ja rikub ESS-i töökindlust [82; 83].

**Joonis 3.5.** Ülikondensaatori moodul ja mooduli element, näide [81]

Praktilistes rakendustes ühendatakse superkondensaatoritel elemendid esmalt jadamisi, siis rööbiti, et moodustuks moodul ja seejärel ühendatakse moodulid järjestikku ja omakorda rööbiti, selleks, et neid ESS-is kasutada. Tüüpilist superkondensaatorit illustreerib joonis 3.5 [84].

## 3.3. Elektrokeemiline salvestus

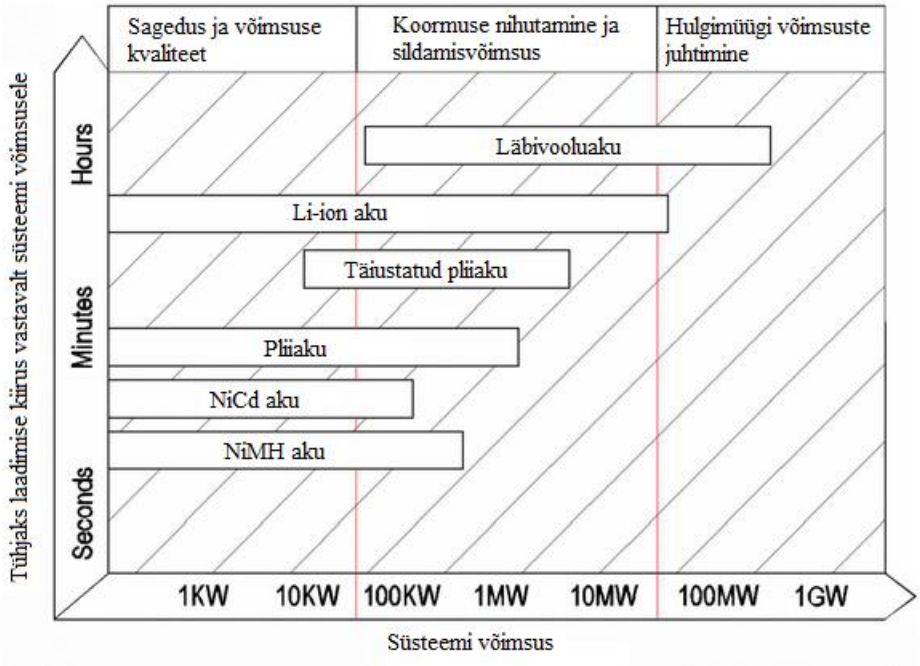
Akutehnoloogia on üks kõige mitmekesisem ja kiiresti kasvav energiasalvestustehnoloogia vorme [1]. Nende tähtsus ei ole oluline vaid võrguga ühendatult vaid ka autotööstuse rakendustes [85]. Elektrokeemilised salvestussüsteemid kasutavad elektrokeemilises elemendis ümberpöörduvat keemilist reaktsiooni [86]. Need koosnevad elektroodide paarist, katoodist ja anoodist, mis asetsevad suletud kestaga elektrolüüdis [86]. Laadimise käigus muundatakse alalisvoolu energia keemiliseks energiaks ja tühjenemise vältel toimub vastupidine keemiline protsess. Akusüsteemid on kasutatavad lühi- ja pikaajalisteks rakendusteks [86].

**Tabel 3.1.** Erinevate elektrokeemiliste salvestite omadused [46]

| ESS-i tüüp | Energiatihedus, Wh/kg | Tühjaks laadimise aeg, h | Reageerimis-aeg | Tsükli tõhusus | Eluiga tsüklites |
|---|---|---|---|---|---|
| Pliiaku | 25-50 | 1-2 | ms | 75% | 800 |
| Na-S | 150-120 | 2-6 | ms | 89% | 4500 |
| Na-Ni-Cl | 95-120 | 0,5-2 | ms | 90% | 4500 |
| *Li-ion* | 200-300 | 1 | ms | 87% | 4000 |
| Läbivooluaku | 25-30 | >10 | ms | 75% | 20000 |

Mõningate enamlevinud elektrokeemiliste salvestite võrdlus on esitatud eelnevas tabelis 3.1.

Akutehnoloogiate tehnilised omadused ja jõudlus on varieeruvad erinevate tootjate ja tehnoloogiate lõikes [86]. Tühjenemisaeg võib varieeruda sekunditest kuni mitme tunnini ja võimsus ulatuda ühest kW-st kuni mitmesaja MW-ni [86]. Elektrokeemiline salvestustehnoloogia on suurim saadavalolev elektrienergia salvestussüsteemide rühm, mille energiatihedus on vahemikus 10 Wh/kg kuni 10 kW/kg ning efektiivsus on erinevate meetodite puhul 70% kuni 80% [87; 88]. Mahuühikute suhtes on võimsustihedus ning energiatihedus vastavalt 90 kW/m$^3$ kuni 10 MW/ m$^3$ ja 75 kWh/ m$^3$ kuni 800 kWh/ m$^3$ [89]. Akusid kasutatakse ka voolu/pinge kõikumiste stabiliseerimiseks ja sageduse reguleerimiseks võrgu- ja elektrienergia juhtimissüsteemides [90].



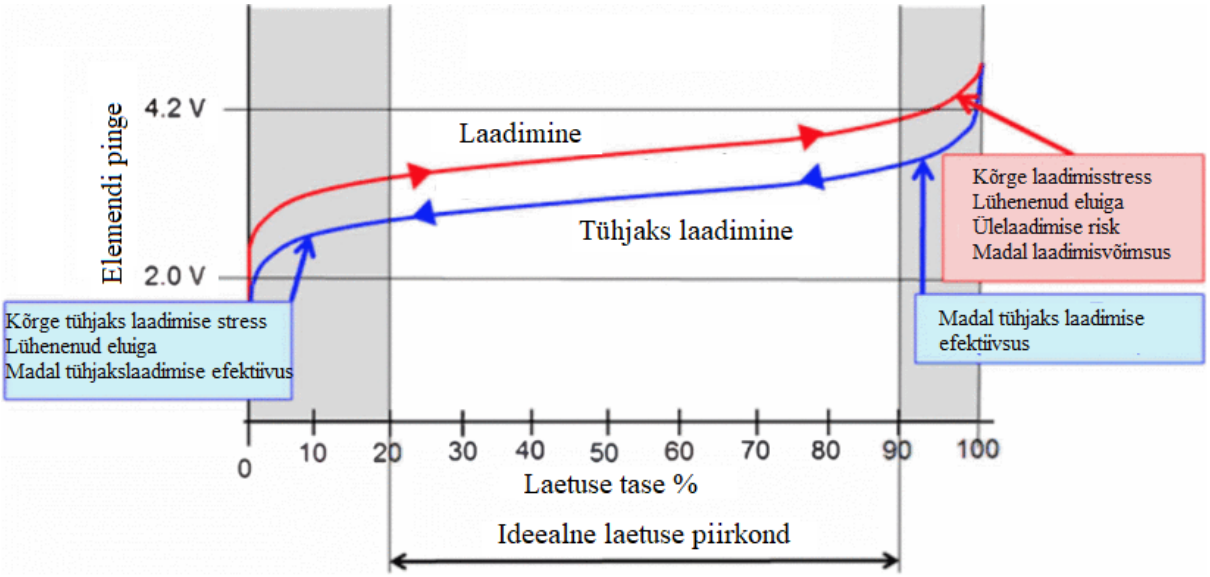

**Joonis 3.6.** Akutehnoloogiad tühjaks laadimise ja võimsuse skaalal [91]

Akusüsteemid on laias laastus jagatavad kahte rühma: tavalised integreeritud salvestussüsteemid (naatrium-, liitium-ioon-, plii-, nikkelakud) ja välised salvestussüsteemid ehk teisisõnu läbivooluakud [46]. Kuna ükski akutehnoloogia pole kõigi erineva iseloomuga koormuste puhul nõutavate parameetrite osas esikohal, siis pole võimalik ühemõtteliselt väita, et üks konkreetne akusalvesti on teisest parem [46]. Sõltuvalt rakenduse võimsusest, kaalust, reaktsiooniajast, tühjenemissügavusest, ümbritsevast temperatuurist ja töötemperatuurist hinnatakse iga lahenduse puhul sobivaimat tehnoloogiat [89]. Joonis 3.6 kuvab tehnoloogiate sobivusi tühjenemise kiiruse ja süsteemi võimsuse kontekstis.

### 3.3.1. Liitumioonaku

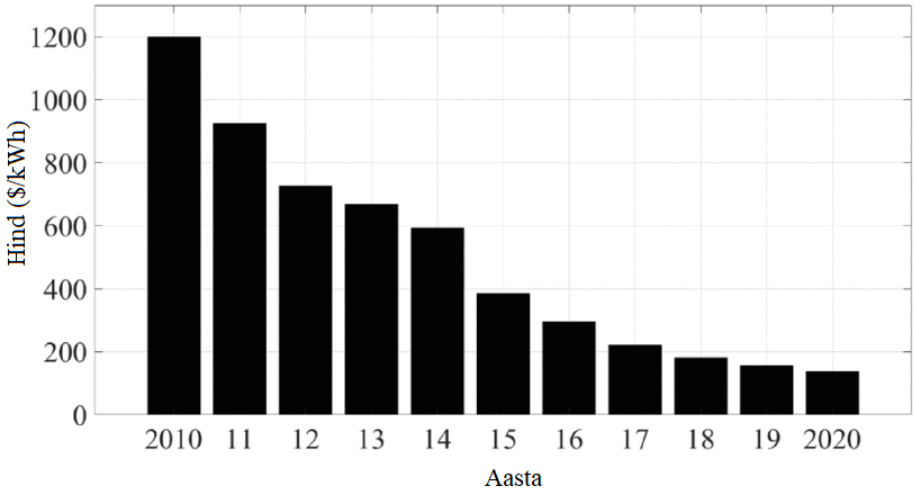
Liitiumioonaku (Li-ion), on tavapärane energiasalvesti portatiivsetes seadmetes [91]. Akuelement pingega 3,6 V on enamasti piisav, et toita rakendust vähemate elementide abil võrreldes plii- või niklipõhiste akudega [91]. Lähtutakse eelkõige vajadusest suure energiatiheduse ja kerge kaalu järele [40]. Puuduseks võib pidada kõrget hinda ja vajadust piirata pinget ja voolu [92]. Liitiumioonakudel on kuus kategooriat, mis lähtub

katoodmaterjalist: $LiCoO_2$, $LiMn_2O_2$, $LiFePO_4$, $LiNiMnCoO_2$, $Li_4Ti_5O_{12}$ [46]. Fosfaadipõhised lahendused on Li-ion tehnoloogiate seas kõige turvalisemad [91].




**Joonis 3.6.** Näide Li-ion aku tüüpilisest laadimisest ja tühjakslaadimisest [93]

Li-ion akude puhul on kasutegur umbes 80% [94]. Aku efektiivsust väljendatakse tavaliselt tühjenemise ajal saadavaloleva energia ja laadimiseks kulunud energia suhtena. Kuna iga laadimis- ja tühjenemistsükli ajal toimub kuloniline efektiivsuse kadu, siis on aku kasutegur väiksem kui 100% [91].



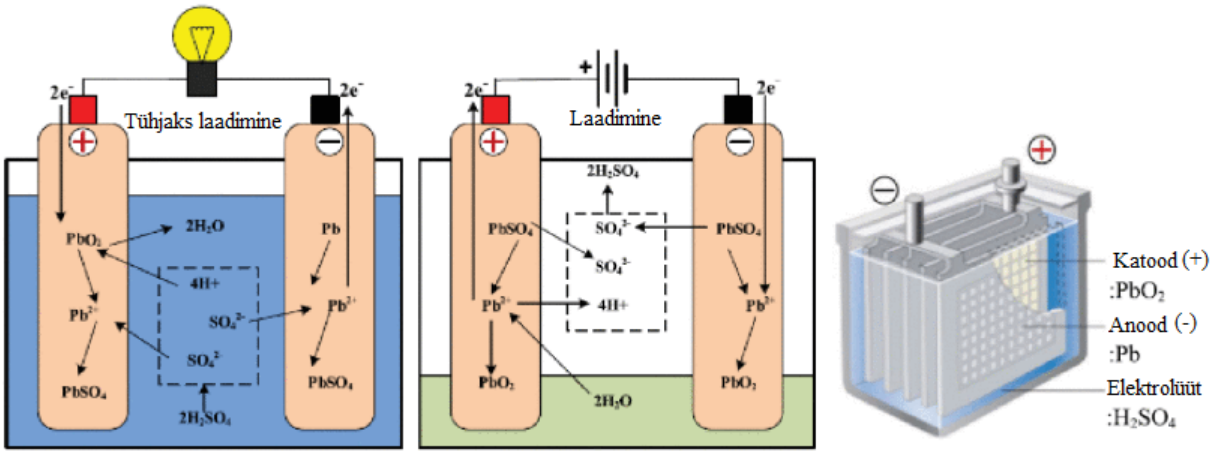

**Joonis 3.7.** Liitiumioonakude hinna langemine aastate skaalal [96]

Liitiumioonakud on tundlikud ülelaadimisele, ajafaktorile ja temperatuuridele üle 45 °C, samuti on need akud laetud olekus ülitundlikud kõrgete temperatuuride suhtes, mille tõttu tõuseb elementides siserõhk [46].

### 3.3.2. Pliiakud

Pliiakut peetakse küpseks tehnoloogiaks. See pakub head energiasalvesti kulu- ja jõudlussuhet, madalat igapäevast isetühjenemist (<0,3%) ning kiiret reageerimisaega. Suurused on 1 Ah kuni ligikaudu 1000 Ah. [46]

Põhimõtteline pliiaku struktuur on esitatud joonisel 3.8.




**Joonis 3.8.** Pliiaku näide, laadimine ja tühjenemine [96]

Pliiaku on hea valik mitmetes rakendustes oma ohutu töörežiimi, vastupidavuse, madala hooldus- ja kapitalikulu ning väga hea laadimis- ja tühjenemistsükli efektiivsuse (63% kuni 90%) poolest [97]. Avariitoiteallikana, elektrivõrgu rakendustes, taastuvenergia väljundi tasandamises, andme- ja telekommunikatsiooni süsteemides kasutatakse pliiakusid kW vahemikes kuni kümnetes MW-des [97; 98].

Turul on tänapäeval saadaval kahte tüüpi pliiakusid: ventileeritud (VLA) ja klapiga reguleeritud (VRLA/SLA) pliiakud [46]. VLA akud vajavaid tööshoidmiseks vee lisamist ning on VRLA akudest suuremad, sest vajavad lisaks ventileeritust ja veevahetust [46]. VRLA akusid peetakse hooldusvabaks lahenduseks, sest vee lisamine pole tarvilik [46]. Neid kasutatakse paigaldistes,

kus ventilatsioon puudub [46]. Kõrgete temperatuuride suhtes on VRLA aku erivõimsus ja kiire laadimisomadus tundlikum VLA akuga võrreldes [74; 99]. VRLA akud on saadaval kahe eraldi mudelina: AGM ja GEL akud [46]. AGM tehnoloogias kasutatav klaaskiud vähendab suurel määral aurustumist ja paikneb väliselt suletud kestas [46]. GEL akudes kasutatakse lubatava töötemperatuuri ja vastupidavuse tõstmiseks silikageeli [100; 101].

### 3.3.3. Läbivooluakud

Läbivooluakude (LVA) puhul isetühjenemist ei toimu, sest energia on salvestatud kahes aktiivses elektrolüüdis, mis paiknevad eraldiseisvates reservuaarides [46]. Elektrokeemiline element pumpab elektrolüüte reaktorisse, kus keemiline energia muundatakse elektrienergiaks ja vastupidi [46]. LVA on sobilik energiamahukate rakenduste jaoks, mis vajavad suurt hulka süvalaadimise ja tühjenemise tsükleid (üle 10000 tsükli) [102]. LVA väljundvõimsus on sõltuv reaktori suurusest ja energia elektrolüüdist ning selle kontsentratsioonist ja nende mahutite suurusest [103; 104; 105; 106]. Sellest tulenevalt on see lahendus võimeline tootma mitmesugust võimsuse ja energia suhet ning ühtlasi pakub elektrolüütide paiknemine eraldi reservuaarides olemuselt ohutumat lahendust võrreldes tavaliste akudega [107]. Need omadused muudavad LVA lahenduse võrdlemisi sobivaks mastaapsete ESS-ide tarbeks, millel on suur arv süvatühjenemise tsükleid [91]. Võrreldes tavaliste akudega, on neil energiatihedus madalam (25 kuni 35 W/kg), keerulisem süsteemi ülesehitus ja mõõdukas võimsustihedus [91].

LVA-sid on kolme tüüpi [108]:

- Vanaadium Redoks;
- Polüsulfiidbromiid;
- Tsink-Broom.

LVA eelised on [108]:

- suurenenud töötemperatuuri ulatus;
- suurenenud voolutihedusega töötamine;
- vanaadium ioonide suurenenud kontsentratsiooni tõttu 70% suurem energiatihedus;

- võrdlemisi lihtsa ülesehituse juures megavattide ja megavatt-tundide võimsuse ja energia salvestamine;
- tühjendusvõimsus kuni 12h korraga;
- võimalus disainida võimsust ja energia mahutavust eraldi;
- kiire täisvõimsusele lülitumine;
- hea elektrokeemilise pööratavuse tõttu pikk eluiga;
- kõrge energia efektiivsus;
- salvestusvõimsust kaotamata on võimalik pikk seisaku periood;
- keskkonnale võrdlemisi ohutu;
- madal hoolduskulu.

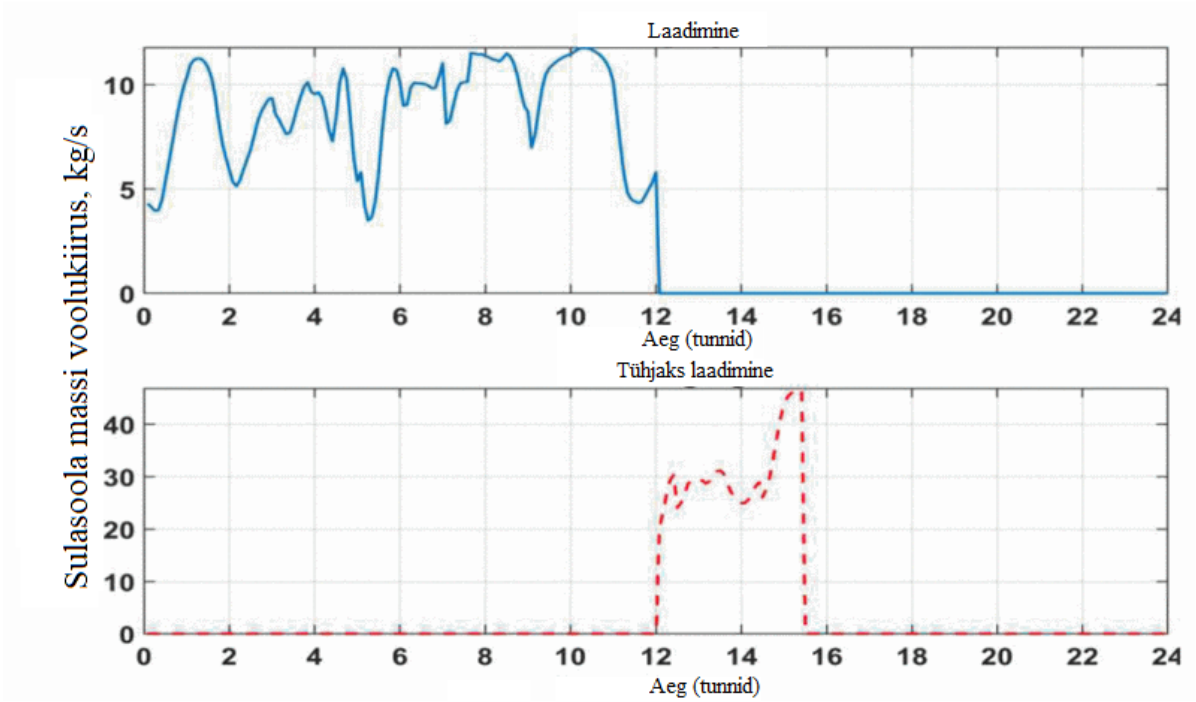
## 3.4. Keemiline salvestus

Keemilised energiasalvestussüsteemid (KESS) on molekulaarsete ühendite keemiliste sidemete kujul energiasalvestid [46]. Esmane aine, millest energiat ammutatakse, muundub uueks aineks või muuks energiavormiks [46]. KESS on saastevaba ja keskkonnasõbralik tehnoloogia, mille salvestusmaht võib olla üle 100 GWh [90]. Kütuseelement on see, milles keemilisest energiast elektrienergiat toodetakse [46]. Akusalvestussüsteemist erineb selle poolest, et elektrit genereeritakse seni, kuni on olemas väljapoolt tarnitav aktiivkütus ja oksüdeerija [109]. Kütuseelemendi anood koosneb vedelast või gaaskütusest ja katood võib olla hapnik, õhk või kloor [110].

Kütuseelemendis on võimalik salvestada märkimisväärne kogus energiat vesinikupaaki optimeerides sõltumata võimsusest. Vesinik-kütuseelementi on võimalik kasutada elektri tootmisel mikrovõrgus ja autotööstuses, eraldades keskkonda üksnes veeauru. Tühjenemise režiimis kasutab vesinik-kütuselement segu hapnikust ja vesinikust, et toota elektrit pikaajalise ja hooajalise rakenduste tarbeks. Laadimisrežiimis lagundatakse vee molekul $H_2O$ elektri abil vesiniku molekuliks $H_2$ ja hapnikuks $O_2$. Vesinikku hoitakse kõrgsurveanumates, mida vajadusel tühjenemise režiimi lülitades saab kütuseelemendi kambrisse juhtida. Vesinik-kütuseelemendi oluliseks osaks on vesiniku säilitamise lahendus, mis määrab suure osa kuludest ja ohutustasemest. [46]

## 3.5. Hübriidne sulasoolasalvestus

Sulasoolasalvestus (SSS) võimaldab taastuvenergiaallikate üleliigset elektrienergia salvestamist kõrge temperatuuriga soojusenergiana, millest saab selle muundada mis tahes energialiigiks [111]. Tegemist on võrdlemisi uue tehnoloogiaga. Eksperimendid on näidanud, et 26,1% efektiivsuse juures suudetakse pakkuda võimsust ligikaudu 140 MW 3,5 tunni vältel [111]. Seejuures sulasoola mass salvesti reservuaaris on 1257 kg [111]. Seda on viimastel aastatel kasutusele võetud päikesekollektoritest ja tuuleparkidest pärit üleliigse energia salvestamiseks [112].




**Joonis 3.9.** Näide sulasoola massi voolu kiirusest laadimisel ja tühjendamisel [111]

Saab kasutada mitut tüüpi vedelikke soojusülekande ülesande täitmiseks kui ka energiasalvestajatena [111]. SSS vedelike puhul on oluline arvestada temperatuurilävega, millest üks on alumine piir ehk sulamistemperatuur ja teine on ülemine piir ehk termiline stabiilsus [112]. Kõige sobivamana soovitatakse leelisnitraatsoolade segusid taastuvenergia rakenduste jaoks [113].

## 3.6 Võrdlus

Igal ESS-i tehnoloogial on sobiv rakendusvahemik sõltuvalt tehnoloogia peamistest tehnilistest parameetritest [46]. Erinevate tehnoloogiate tehnilised näitajad on esitatud tabelis 3.2.

**Tabel 3.2.** Erinevate tehnoloogiate energia salvestamise omadused [46]

| ESS tehnoloogia | Võimsus-vahemik (MW) | Energia-sisaldus (kWh) | Energia-tihedus (Wh/kg) | Võimsus-tihedus (W/kg) | Tühjaks-laadimise aeg (ms-h) | Reaktsiooni-aeg (ms-h) | Tsükli tõhusus (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Elektrokeemiline salvestus** | | | | | | | |
| Pliiaku | <20 | 18·10ˆ3-100·10ˆ3 | 30-50 | 200-400 | sek-5 h | ms | 70-90 |
| Ni-Cd | <40 | 6,75·10ˆ3 | 15-55 | 150-350 | 1-8 h | ms | 75 |
| Ni-MH | <0.03 | 0,01-500 | 60-80 | 150-460 | tundides | ms | 70-80 |
| Li-ion | 0,05-100 | 250-25·10ˆ3 | 120-230 | 150-2·10ˆ3 | min-1 h | ms | 85-95 |
| Na-S | 10-34 | 245·10ˆ3 | 150-240 | 150-230 | 6-7,2 h | ms | 75-90 |
| Na-MeCl2 | 0,005-1 | 120-5*10ˆ3 | 86-140 | 180-245 | sek-h | ms | 90 |
| Zn-õhk | 0,01-1 | 60-150 | 10ˆ3-1,3·10ˆ3 | 90-105 | 10-15 h | ms | 50-65 |
| Läbivooluaku | 0,01-10 | 4·10ˆ3-40·10ˆ3 | 25-35 | - | 5-10 h | ms | 60-75 |
| Hübriidne läbivooluaku | 2-10 | 50-500 | 65-75 | - | 8-10 h | ms | 60-80 |
| **Mehaaniline salvestus** | | | | | | | |
| PHAJ | 10-5000 | 2·10ˆ5-5·10ˆ5 | 0,5-1,5 | - | 1-24+ h | min. | 70-85 |
| HES | 0,01-0,25 | 25-5·10ˆ3 | 5-80 | 700-12·10ˆ3 | sek.-15 min. | sek. | 90-95 |
| SÕS (maa-alune) | 5-300 | 2·10ˆ5-10ˆ6 | 30-60 | - | 1-24+ h | min. | 41-75 |
| SÕS (maa-pealne) | 3-15 | 2-8,3 | 140-300bar | - | 2-4 h | sek. - min. | 70-90 |
| **Elektriline salvestus** | | | | | | | |
| SCES | 0,01-0,3 | 10ˆ-3-5 | 0,05-15 | 10-10ˆ6 | ms-min. | ms | 85-95 |
| ÜES | 0,01-10 | 15-100, 5·10ˆ6 | 0,5-5 | 500-2·10ˆ3 | ms-sek. | ms | 90-97 |

**Tabel 3.2 järg.** Erinevate tehnoloogiate energia salvestamise omadused [46]

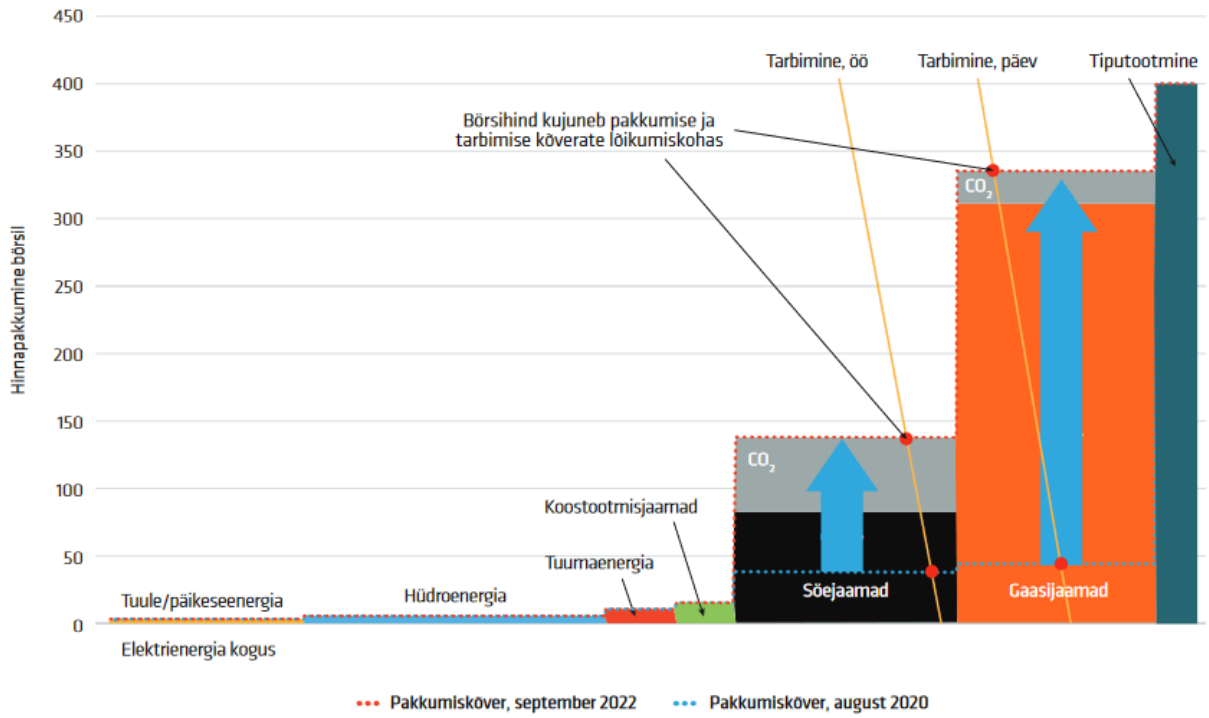
| ESS tehnoloogia | Võimsus-vahemik (MW) | Energia-sisaldus (kWh) | Energia-tihedus (Wh/kg) | Võimsus-tihedus (W/kg) | Tühjaks-laadimise aeg (ms-h) | Reaktsiooni-aeg (ms-h) | Tsükli tõhusus (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Keemiline salvestus** | | | | | | | |
| Kütuse-element (vesinik) | 0,3-50 | <200·10^3 | 600-1,2·10^3 | 5-800 | sek.-24 h | sek. | 30-50 |
| **Soojuslik salvestus** | | | | | | | |
| Madala-tempera-tuuriline | 0,01-300 | - | 100-200 | 10-30 | 1-8 h | aeglane | 30-50 |
| Kõrge-tempera-tuuriline | 1-60 | - | 80-250 | - | 1-24+ h | aeglane | 80 |

Tõhusa ESS-i kavandamiseks on tarvilik süsteemi põhjalik analüüs, mis hõlmab loodusvaradele avalduvat ökoloogilist mõju, füüsilisi piiranguid, ootuspäraseid tehnilisi omadusi [31]. Peamised kriteeriumid on: tehnoloogia küpsus, salvestuskaod, ohutusega seotud, energia- ja võimsustihedus, salvestuse kestvus, reaktsiooniaeg, muundamise efektiivsus, kasutusotstarve, automatiseerimise võimalused, keskkonnamõju ja kas on tegemist statsionaarse või liikuva lahendusega [114; 115].

# 4. ELEKTRIHINNA KUJUNEMINE

## 4.1. Üldist

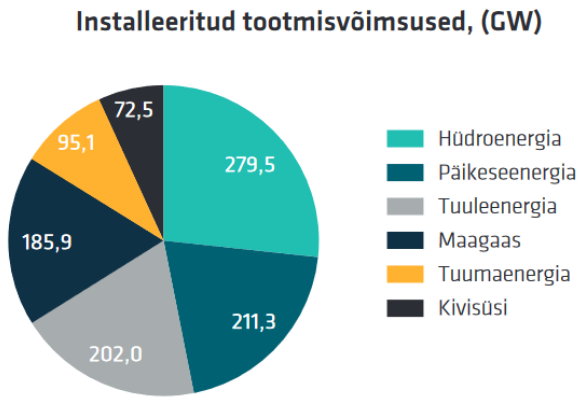
Elektriturul konkureerib tootmine muutuvkulude alusel, mis tähendab, et toodavad need, kelle tootmise muutuvkulu jääb alla elektribörsil tekkinud elektrihinnale. Joonis 4.1 illustreerib 2021. aasta näitel erinevate tehnoloogiate ligikaudseid marginaalkulusid ja elektrihinna kujunemist vastavalt tarbimisele ja jaamade tootmiskuludele. [116]




**Joonis 4.1.** Turuhinna päev ette kujunemine [2]

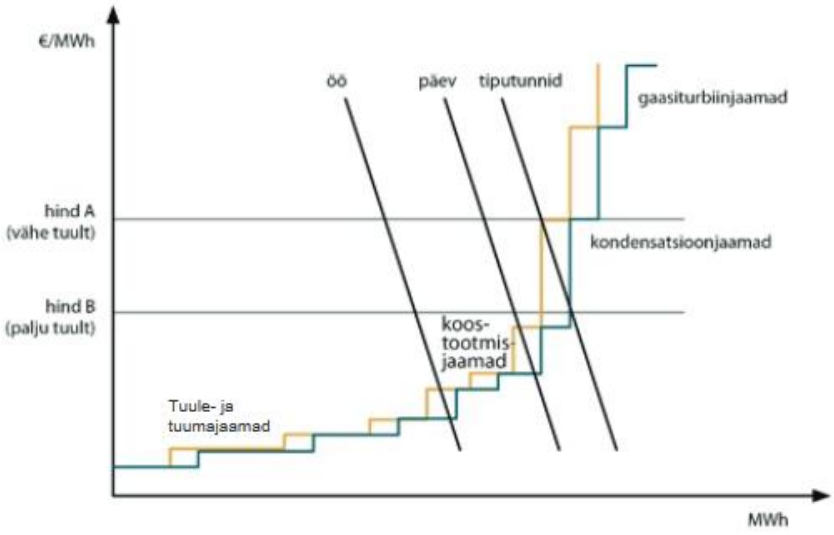
Kuigi paigaldatud tootmisvõimsuste suurus muutub aeglaselt, on iga päev turul osalevate võimsuste määr ja osakaal sõltuv ilmast, hooldustest, avariidest, kütuse kättesaadavusest ja mitmetest muudest teguritest [116].

Kogu Euroopa tootmisvõimsused on esitatud joonisel 4.2.




**Joonis 4.2.** Installeeritud tootmisvõimsused Euroopas 2021 aasta seisuga [116]

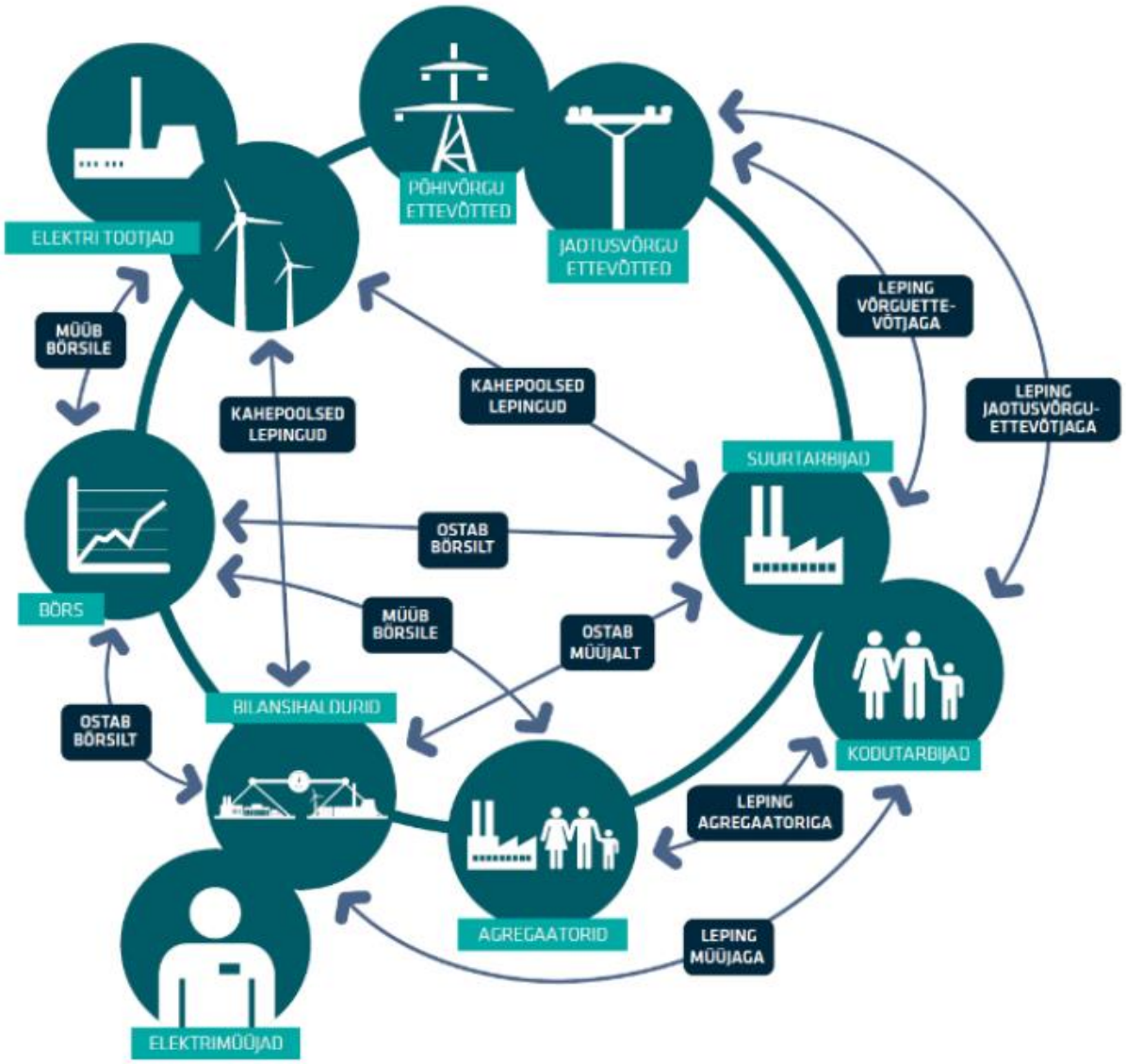
Eesti põhivõrguettevõte Elering, Euroopa põhivõrguettevõtjate võrgustik ENTSO-E ja osad naaberriikide ülekandevõrkude operaatorettevõtted kasutavad elektriturumudelit nimega Plexos. See võimaldab koostada kogu Euroopa elektrisüsteemi arvesse võtvaid turusimulatsioone ja detailseid regionaalseid mudeleid. Mudelit kasutatakse muuhulgas erinevate investeeringute sotsiaalmajanduslike näitajate hindamiseks. Koostöös võrgustikuga koostab Elering iga aasta elektrisüsteemi aastamudeli kuni kümme aastat ettevaatavalt. Mudelisse on kaasatud mitmeid taastuvenergia tehnoloogiaid, mille hulgas on tuule-, päikese- ja hüdroenergia koos või ilma ESS-ideta. Arvestatakse seejuures erinevate piirangutega, näiteks keskkonnamaksudest ja kvootidest tulenevaid piiranguid. Genereeritud mudel annab ligikaudse elektrihinna ja vajaduse korral võib anda ka soovitusi optimaalseimateks investeeringuteks uutesse tootmisüksustesse. [116]




**Joonis 4.3.** Hinna kujunemine elektriturul [116].

Hinna kujunemist tootmisseadmete marginaalkulude põhiselt illustreerib joonis 4.3.

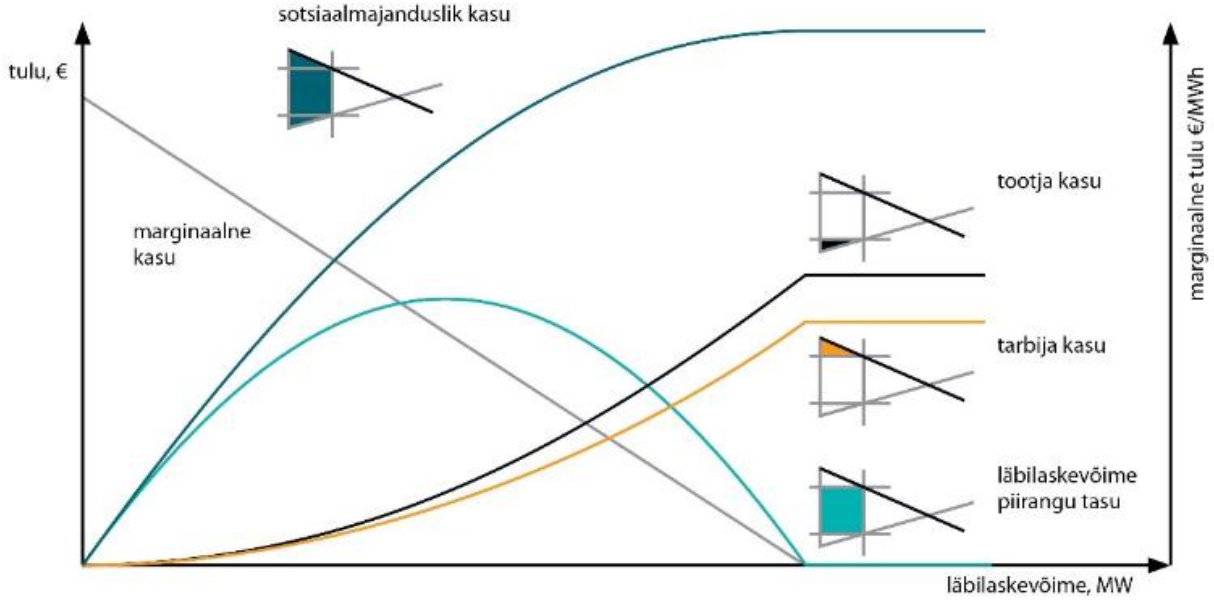
Mudeli ülesanne on kulude minimeerimine olukorras, kus tootmine rahuldab igal ajahetkel nõudluse. Põhieelduseks on see, et elektri päev-ette turg toimib efektiivselt. See viib omakorda süsteemi tõhususele, nii et tarbimisnõudlus kaetakse minimaalsete kuludega. [116]




**Joonis 4.4.** Avatud elektrituru kauplemine [116]

Vastavalt elektribörsi tulemustele liigub ühendatud turgude puhul elekter odava elektritootmise piirkonnast kallimasse piirkonda. Kui ülekande võimsust jääb väheks, siis tekivad naaberpiirkondade vahel hinnaerinevused. Selliste hinnaerinevuste korral makstakse ühenduste

omanikele ülekoormustasu. See omakorda investeeritakse pudelikaela vähendamisse ehk ühenduste läbilaskevõime parandamisesse ja võrgu arendamisesse, vähendamaks selliseid kitsaskohtasid või vähendatakse selle võrra tariifi. Reeglina elektri tootmise kogukulu väheneb ühendusvõimsuste lisamise korral. Investeeringu suuruse määrab marginaalse kasu võrdlemine marginaalse investeerimiskuluga. Ülekandeinvesteeringu soodsaim olukord asub võimsuse juures, kus marginaalne kasu on võrdne marginaalse investeeringukuluga. Joonis 4.5 kujutab sotsiaal-majanduslikku kasu, mis on üks kriteeriumitest, mida võrguinvesteeringu elluviimisel arvestatakse kõrvutades seda otsese kasuga elektrituru osalisetele (tootja, võrguettevõtja, liinivedaja, müüja/bilansihaldus, agregaator, tarbija ja elektribörsi korraldaja (joonis 4.4)).[116]




**Joonis 4.5.** Sotsiaal-majanduslik mõju uue ülekandevõimsuse lisandumisel [2]

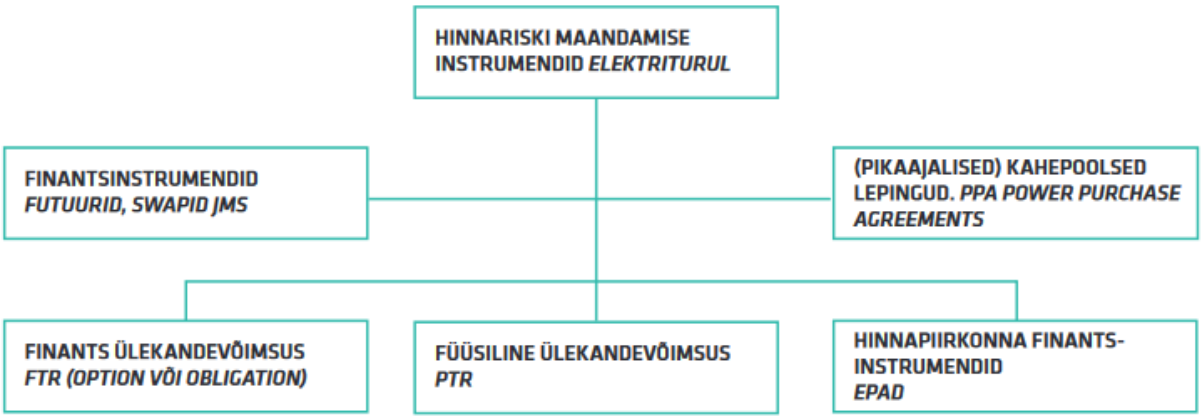
Elektrisüsteemi planeerimisel arvestatakse lisaks sotsiaal-majanduslikule kasule ka soodsamate võimaluste loomist taastuvenergiaallikate integreerimiseks ja suurema hinnastabiilsuse saavutamist investorite riski piiramiseks [116].

Avatud turul on osalistel võimalik elektrienergiaga kaubelda elektribörsil osaledes või otselepingute alusel. Otselepingud sõlmitakse reeglina tootja ja suurtarbija vahel ja seda vaid riigisiseselt. Otselepingu raames lepitakse kokku tingimused. Elektribörsil saavad kaubelda tootjad, võrguettevõtjad, maaklerid, müüjad, seega kõik kes sõlmivad lepingu börsikorraldajaga. Eestis on börsikorraldajaks NordPool. [116]

Euroopas on kasutusel tsoonipõhine hinnaarvutusmudel. Hind arvutatakse hinnatsooni järgi arvestades ka ülekandevõimsuseid. Tsoonide sees praktiliselt ülekandevõimsuste pudelikaelad puuduvad. [116]

Venemaal on kasutusel sõlmepõhine hinnamudel. Sellise lahenduse puhul on tsoonid väga väikesed (ühe alajaama suurused) ja hind on arvutatud igas sõlmes. See lahendus on optimaalne, kui pole võimalik defineerida mõistliku suurusega tsooni, kus ei oleks võrgupiiranguid ja esineb soov optimaalse tootmiskorra leidmiseks võtta arvesse võrgukadusid. [116]

Elektrikaubandusega käsikäes toimib ka finantstehingute turg. Maksimaalse likviidsuse saavutamiseks kaubeldakse Põhjamaades süsteemihinna futuuridega. Süsteemihinnaga seotud futuur on seotud riskidega, sest jääb hinnaerinevuse risk süsteemi hinna ja hinnapiirkonna hinna vahel. Joonis 4.6 kuvab süsteemihinna ja konkreetse hinnapiirkonna hinna erinevuste riski maandamiseks kasutatavaid instrumente. [116]

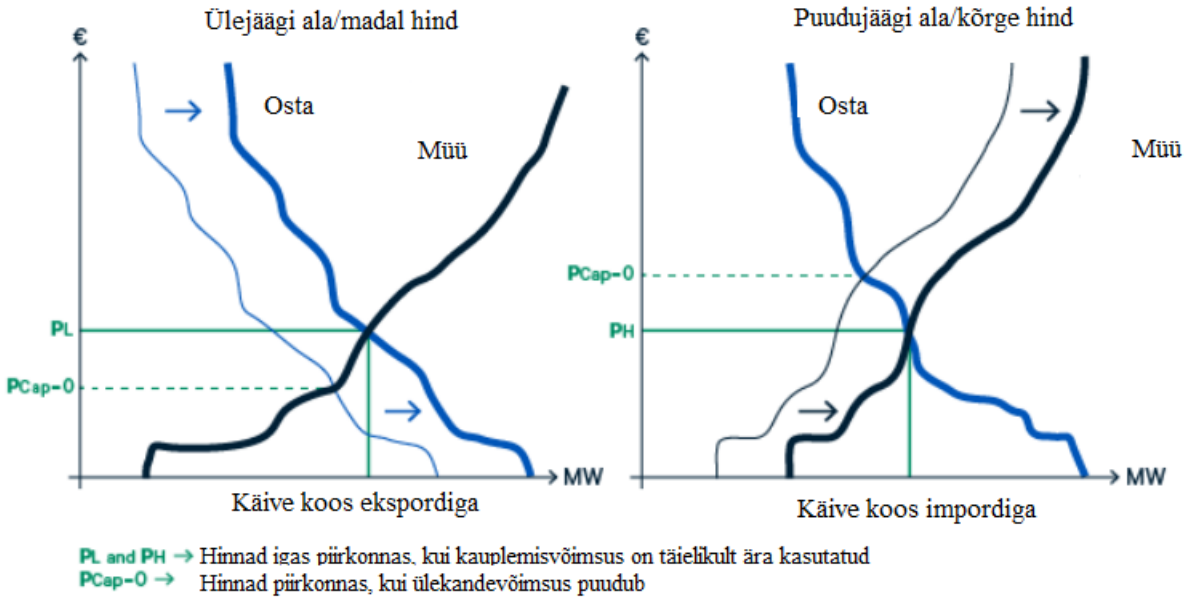



**Joonis 4.6.** Elektrituru hinnariski maandamise instrumendid [116]

## 4.2 Järgmise päeva turg

Niipea kui klientide tellimuste esitamise tähtaeg kätte jõuab kell 12:00 keskpäeval Kesk-Euroopa aja järgi, liidetakse kõik ostu- ja müügitellimused iga tarnetunni kohta kaheks kõveraks (joonis 4.7) [117].

Elektri börsihind arvutatakse Euroopas arvutiprogrammiga Euphemia igaks tunniks ja igale hinnapiirkonnale ühekorraga. Regulatsioonid ja turu vajadused muutuvad pidevalt. Seetõttu on vaja koguaeg edasi arenda Euphemia algoritmi ja seonduvaid protseduure. Uuendused hõlmavad näiteks voopõhise võimsusarvutuse tulemustega arvestamist, uute ülekandeliinide lisandumist, 15-minutilise turu ajaühiku rakendamist, börsikorraldajate sisenemist uutele turgudele jne. [116]




**Joonis 4.7.** Pakkumise ja nõudluse kõverad [117]

Iga tunni kohta luuakse üks koondpakkumise kõver ja üks koondnõudluse kõver [117]. Tulevikus on edasiarendusena plaan liikuda 15-minutilise turuperioodi peale [116]. Seejuures on pakkumise ala ja plokitellimused anonüümsed [117]. Piirkonnahinnad ja süsteemihind arvutatakse iga tarnetunni kohta [117]. Pakkumispiirkondades võib olla tasakaal, puudujääk või ülejääk [117]. Selles olukorras liigub madalama hinnaga piirkondadest elekter piirkondadesse, kus nõudlus suurem ja pakutav hind on kõrgem [117]. Ülekandevõimsuse poolt piirangute tekkimisel tekivad piirkondades erinevad hinnad [117]. Juhul kui seda ei juhtu, siis on hinnad pakkumispiirkondades identsed. [117]

Põhja- ja Baltikumi piirkonnad on süsteemihaldurite vahel ära jagatud, et toime tulla ülekoormusolukordadega. Kõik tootjad saavad samasuguse piirkonna hinna alusel tulu ja samamoodi maksavad kõik tarbijad sama hinda. [117]

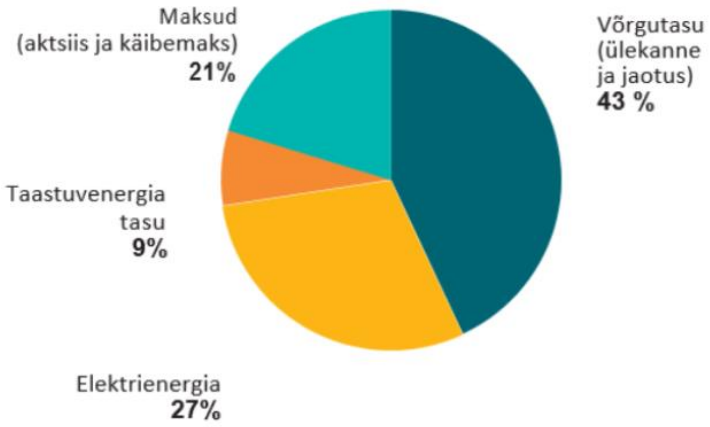
NordPooli ametlik kauplemisvaluuta on euro. Pakuvad ka valuutateenust, aga hindade arvutamiseks tuleb kõik tellimused konverteerida ametlikuks kauplemisvaluutaks. Hinna arvutamisele eelnevalt fikseeritakse valuutakursid Kesk-Euroopa keskpäevase kellaaja järgi ning kauplemisel lähtutakse sellest. Seejärel võtab NordPool ühendust kahe pangaga, et teha valuutade riskiturve ning määratakse ametlikud vahetuskursid. Valuutaturgude olulise volatiilsuse korral võib NordPool protsessi kohandada, klientide riskide vähendamiseks. Nädalavahetustel kasutatakse eelnevat valuutakurssi. Järgmise esmaspäeva hommikul toimub eelpool nimetatud riskiturve. [117]

## 4.3 Päevasisene turg

Järgmise päeva turu tehingute korrigeerimiseks on päevasisene turg. See on järgmine etapp, kus turuosalistel on võimalik täiendavalt kaubelda elektritarnetega, selleks et korrigeerida järgmise päeva turul loodud tehinguid. Vajadus selleks võib tekkida, kui pakkumus ei osutunud järgmise päeva turul edukaks. Ilmastikuolude muutumine võib muuhulgas olla põhjuseks, miks on tarvis teha täiendavaid ostu-müügitehinguid. Reeglina lähtutakse täpsustunud tootmis-/tarbimisprognoosidest. Piisava ülekandevõimsuse olemasolul on võimalik kuni tund enne tarnet elektrit osta/müüa Eestist kuhu tahes piirkonda, mis on päevasiseste turgude ühendamiseks loodud XBID projektiga liitunud. See võimaldab kogu ülekandevõimsuse ulatuses tehinguid teha kõigi projektis osalevate piirkondade vahel. [116]

## 4.4 Elektri hind ja mõjurid komponentidena

Elektri tarbimise kogumaksumus koosneb lisaks elektrienergia enda hinnale mitmest komponendist (joonis 4.8) [116].




**Joonis 4.8.** Elektrienergia ja teiste komponentide hinna osakaal koguhinnas [116]

Eesti elektrihinna kujunemise kõige olulisemad tegurid on regiooni tootmisvõimsused, ülekandevõimsused teiste riikidega, $C0_2$ hind ja ilm [116].

## 4.5. Bilansiplaan

Hiljemalt kell 15:30 pärastlõunal edastavad bilansihaldurid süsteemihalduritele bilansiplaanid oma bilansipiirkonda kuuluvate turuosaliste planeeritud tunnipõhiste koondandmetega. See peab sisaldama järgmist [116]:

- 0,1 MWh täpsus;
- Suuremate kui 1 MW summaarse nimivõimsusega päikese- ja tuuleparkide toomisplaanid;
- Väiksemate kui 1 MW summaarse nimivõimsusega päikese- ja tuuleparkide tootmise koondplaan eraldi näidatuna;
- Detailne tootmise plaan. Maha on lahutatud elektrijaamade omatarve, sh tuleb eraldi näidata:
    - tootmisplaanid üle 10 MW nimivõimsusega elektrijaamadele ja 10 MW nimivõimsusega tootmisseadmetele;
    - tootmise koondplaan alla 10 MW nimivõimsusega elektrijaamade ja tootmisseadmete kohta.
- Bilansihalduri piirkonnas summaarne tarbimine;
- Koondandmed elektribörsi tarnete kohta, sh eraldi päevasisesed ja päev-ette tarned;
- Koondandmed tarnete kohta, mis on määratud teiste bilansihaldurite bilansipiirkondadesse.

# 5. ELEKTRIENERGIA OST-MÜÜK

## 5.1. Võimalused hindade volatiilsuse korral

Käesoleva töö raames laeti alla Eleringi andmebaasist [118] tunniajase intervalliga registreeritud elektrihinnad aastasele perioodile alates 1. maist 2023. Andmed on saadaval xlsx ja csv failiformaadis. Esmase andmetöötluse sooritamiseks Microsoft Excel programmiga valiti xlsx formaat. Saadud ajaseeria read sisaldasid iga kuupäeva kohta 24 elektrienergia päevasisest hinda käibemaksuga ja ilma. Edasiseks andmetöötluseks kasutati käibemaksuta hindasid, millele hiljem asjasse puutuvates arvutustes kõik kehtivad maksud juurde liideti.

Esimene eesmärk oli saavutada arvutuslik tulemus, kui kaubelda ühe kilovatt-tunniga, s.t osta ööpäeva kõige odavama hinnaga tunnil ja müüa järgneva ööpäeva kõige kallima hinnaga tunnil.

| G | H | I | J | K | L | M |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Kp | Min | Min maksudega | Max | Max-marginaal | Müügitulemus | Summaarne tulemus |
| 5/1/2023 | 3.5892 | 4.480816 | 16.7316 | 15.7316 | 11.250784 | 4646.4 |
| 5/2/2023 | 6.87 | 8.483392 | 20.0952 | 19.0952 | 10.611808 | |
| 5/3/2023 | 0.8976 | 1.197064 | 14.982 | 13.982 | 12.784936 | |
| 5/4/2023 | 7.0284 | 8.67664 | 13.7964 | 12.7964 | 4.11976 | |
| 5/5/2023 | 9.126 | 11.235712 | 10.8468 | 9.8468 | -1.388912 | |

**Joonis 5.1.** Kuvatõmmis tabelarvutusest ühe kilovatt-tunniga kauplemisel, hinnad eurosentides

Elektrimüüjatel on üldjuhul sama marginaal, milleks on 0,1 s/kWh, mis lahutatakse jooksvast tunnihinnast [119]. Sisseostetud kilovatt-tunni hinnale liideti käesoleval ajal keskmise eraisikust tarbija arvetel kajastuvad kehtivad lisatasud tarbitud elektrienergiale nagu elektri edastamine 0,0721 €/kWh, taastuvenergia tasu 0,0105 €/kWh ja elektriaktsiis 0,001 €/kWh.

Tulemuseks saadi üheaastasele perioodile ligikaudu 46 € vastavalt joonisel 5.1 näidatule, kui kulude hulka kuulus üksnes elektrienergia ostukulu. Kuna pole teada, kas energiasalvesti tühjakslaadimine järgneval päeval eelneb odavaima hinnaga tunnile, siis teostati sarnane arvutus odavuselt teisele ostuhinnale ja kalliduselt teisele müügihinnale. Kaubeldes ühe kilovatt-tunniga kõige odavamale ja kallimale hinnale vahetult järgnevate hindadega oli saadud tulemuseks 38 € vastavalt joonisele 5.2.

| P | Q | R | S | T | U | V |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Kp | Min2 | Min maksudega | Max2 | Max-marginaal | Müügitulemus | Summaarne tulemus |
| 5/1/2023 | 3.7788 | 4.712128 | 15.7164 | 14.7164 | 10.004272 | 3828.3 |
| 5/2/2023 | 6.9756 | 8.612224 | 16.4064 | 15.4064 | 6.794176 | |
| 5/3/2023 | 1.1988 | 1.564528 | 14.64 | 13.64 | 12.075472 | |
| 5/4/2023 | 7.4568 | 9.199288 | 12.2328 | 11.2328 | 2.033512 | |
| 5/5/2023 | 9.1584 | 11.27524 | 10.152 | 9.152 | -2.12324 | |

**Joonis 5.2.** Kuvatõmmis tabelarvutusest lisanduva kilovatt-tunniga kauplemisel, hinnad eurosentides

Seega salvestussüsteemi puhul, mis sisaldab kahte võimalikult suure efektiivsusega elektrokeemilist salvestit, milles mõlema salvestusmaht eraldi on ligikaudu 1 kWh, saab näidisperioodi peal saadud arvutuste tulemusel 1 kWh salvesti kohta keskmiselt (46€ + 38€) / 2 = 42 € ostu ja müügi hinnavahest. Salvestid on sellises ülesehituses mõeldud töötama vaheldumisi üle ööpäeva. Arvestades süsteemi teatavate kadudega on see summa mõnevõrra väiksem, kuid saadud tulemus viitas oletuslikult märkimisväärsetele elektrienergia hindade volatiilsusest tekkivatele võimalustele.

## 5.2. Tarkvara System Advisor Model

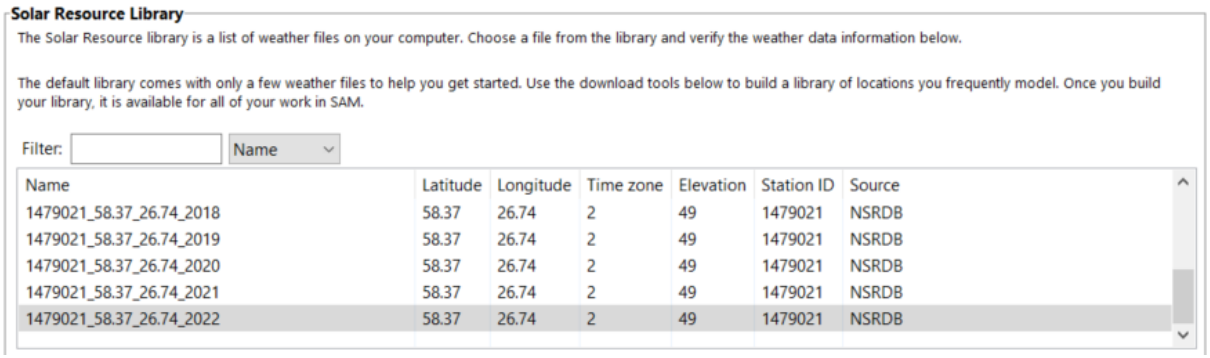
Edasiseks andmete analüüsiks suuremate energiamahtude tarbeks on käesolevas töös võetud kasutusele tarkvara nimega *System Advisori Model* (SAM). Tegemist on vabavaralise tarkvaraga energiatehnoloogiate tehnilis-majanduslikuks analüüsiks. Kodulehe andmetel kasutatakse seda erinevatel ühiskondlikel tasemetel uurimaks taastuvenergia projektide tehnilist ja majanduslikku teostatavust [120].

Programmil on võimekus modelleerida erinevat tüüpi taastuvenergia süsteeme [120]:

- akusalvestus liitiumioon-, plii- või läbivooluakudega;
- kõrge kontsentratsiooniga fotogalvaanilised elemendid;
- tuuleenergia üksikutest turbiinidest suurte tuuleparkideni;
- biomassi põletamine elektri tootmiseks;
- vee soojendamine päikesega jne.

### 5.2.1. Simulatsiooni loomine

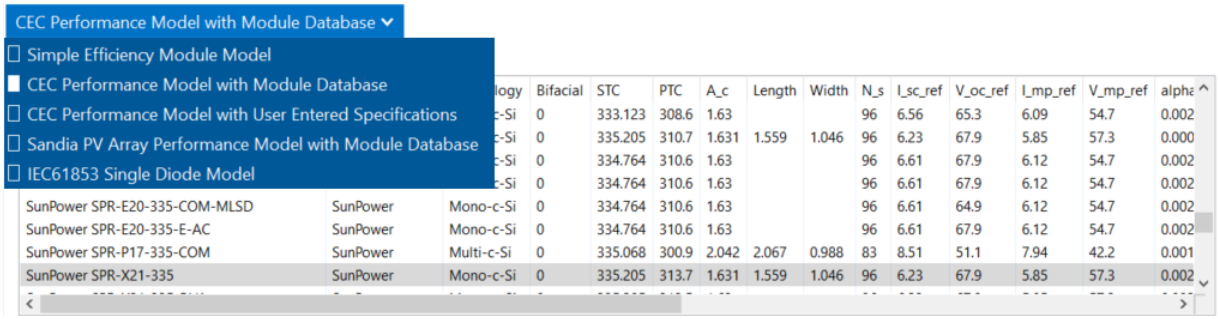
Simulatsiooni tegemiseks on kasutuses tarkvara versioon numbriga 2021.12.2, kuhu on integreeritud aasta-aastalt iga uue versiooniga lisafunktsioone ja taastuvenergia liike, millega on võimalik erinevate seadistuste juures projektidele hinnanguid anda. Antud ülesande raames on vaja sisendparameetrina esmalt ilmastikuandmeid, mis sisaldaks ka valitud piirkonna päikesekiirguse andmeid (joonis 5.3). *National Solar Radiation Database* (NSRDB) võimaldab Tartu linna ilmastikuandmed xlsx formaadis hankida programmile sobival kujul. Need on aluseks fotoelektriliste päikesepaneelide tunnipõhise arvestusega elektrienergia toodangu genereerimisel.




| Name | Latitude | Longitude | Time zone | Elevation | Station ID | Source |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1479021_58.37_26.74_2018 | 58.37 | 26.74 | 2 | 49 | 1479021 | NSRDB |
| 1479021_58.37_26.74_2019 | 58.37 | 26.74 | 2 | 49 | 1479021 | NSRDB |
| 1479021_58.37_26.74_2020 | 58.37 | 26.74 | 2 | 49 | 1479021 | NSRDB |
| 1479021_58.37_26.74_2021 | 58.37 | 26.74 | 2 | 49 | 1479021 | NSRDB |
| 1479021_58.37_26.74_2022 | 58.37 | 26.74 | 2 | 49 | 1479021 | NSRDB |

**Joonis 5.3.** Ilmastikuandmete importimine programmi *SAM*

Kõige värskemad saadavalolevad andmed nimetatud andmebaasis on 2022 aastast. Fotoelektriliseks paneeli mudeliks on jäetud vaikimisi programmi seadistatud *SunPower SPR-X21-335*. Programmil on sisseehitatud kataloogis ohtralt erinevate tehniliste näitajatega fotoelektrilisi paneele.

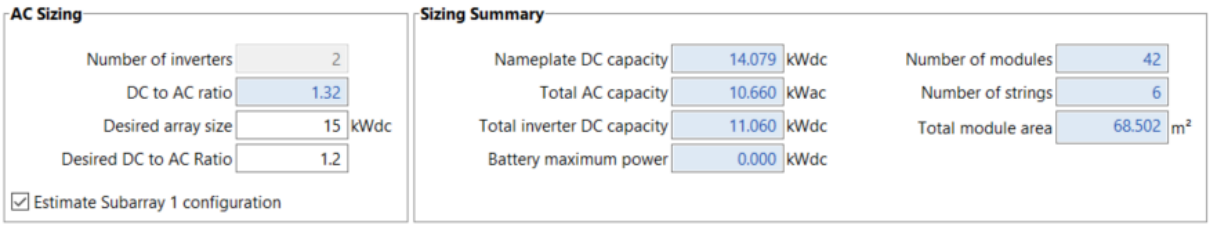



| | | | Bifacial | STC | PTC | A_c | Length | Width | N_s | I_sc_ref | V_oc_ref | I_mp_ref | V_mp_ref | alpha |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | c-Si | 0 | 333.123 | 308.6 | 1.63 | | | 96 | 6.56 | 65.3 | 6.09 | 54.7 | 0.002 |
| | | c-Si | 0 | 335.205 | 310.7 | 1.631 | 1.559 | 1.046 | 96 | 6.23 | 67.9 | 5.85 | 57.3 | 0.000 |
| | | c-Si | 0 | 334.764 | 310.6 | 1.63 | | | 96 | 6.61 | 67.9 | 6.12 | 54.7 | 0.002 |
| | | c-Si | 0 | 334.764 | 310.6 | 1.63 | | | 96 | 6.61 | 67.9 | 6.12 | 54.7 | 0.002 |
| SunPower SPR-E20-335-COM-MLSD | SunPower | Mono-c-Si | 0 | 334.764 | 310.6 | 1.63 | | | 96 | 6.61 | 64.9 | 6.12 | 54.7 | 0.002 |
| SunPower SPR-E20-335-E-AC | SunPower | Mono-c-Si | 0 | 334.764 | 310.6 | 1.63 | | | 96 | 6.61 | 67.9 | 6.12 | 54.7 | 0.002 |
| SunPower SPR-P17-335-COM | SunPower | Multi-c-Si | 0 | 335.068 | 300.9 | 2.042 | 2.067 | 0.988 | 83 | 8.51 | 51.1 | 7.94 | 42.2 | 0.001 |
| SunPower SPR-X21-335 | SunPower | Mono-c-Si | 0 | 335.205 | 313.7 | 1.631 | 1.559 | 1.046 | 96 | 6.23 | 67.9 | 5.85 | 57.3 | 0.002 |

**Joonis 5.4.** Erinevad SAM kataloogis olevad seadmed

Inverteri puhul on samamoodi jäetud paika vaikimisi programmi seadistatud seade *SolarEdge Technologies LTd*: *SE6000x (208V)*.

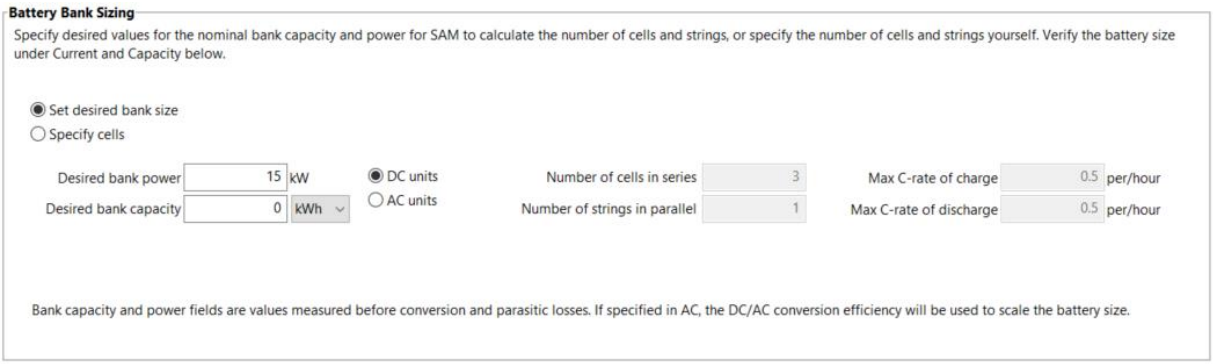
Töös on arvestatud peakaitsme suuruseks 25 amprit. Seega päikesepargi koguvõimsus ei tohi ületada 15 kW, mis on ka programmi sisestatud soovitud päikesepargi koguvõimsusena. Joonisel 5.5 on näidatud ka kaasnevad automaatsed lisaarvutused.




**Joonis 5.5.** Päikesepargi koguvõimsuse määramine

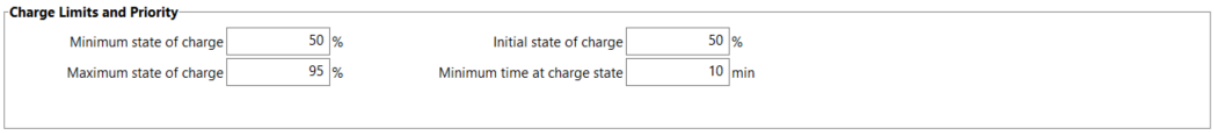
Paneelide kaldenurgaks on määratud 30° ja paneelid on suunaga lõunasse. Päikeseelektrijaama osas saab eraldi seadistusi teha nii kadudele kui ka varjutamistele, kuid seda käesoleva töö raames ei käsitleta.

Elektrokeemiliste salvestite valikus on programmis tavapärane pliiaku, VRLA GEL, AGM, LMO/grafiit, LFP/grafiit, LCO/grafiit, LMO/LTO, NMC/grafiit, NCA, läbivooluaku nii vanaadiumi kui ka rauapõhine. See annab kasutajale võimaluse hinnata erinevaid akutehnoloogiaid oma mudelis vastavalt vajadusele. Akude toimimist puudutavad näitajad laadimiste ja tühjaks laadimiste kontekstis on simulatsioonides akude iseärasusi arvestavad. Valitud on liitiumioonaku NMC/grafiit. Esimeses seadistuses on akude salvestus mahuks määratud 0 kWh ja teises seadistuses 100 kWh (joonis 5.6).



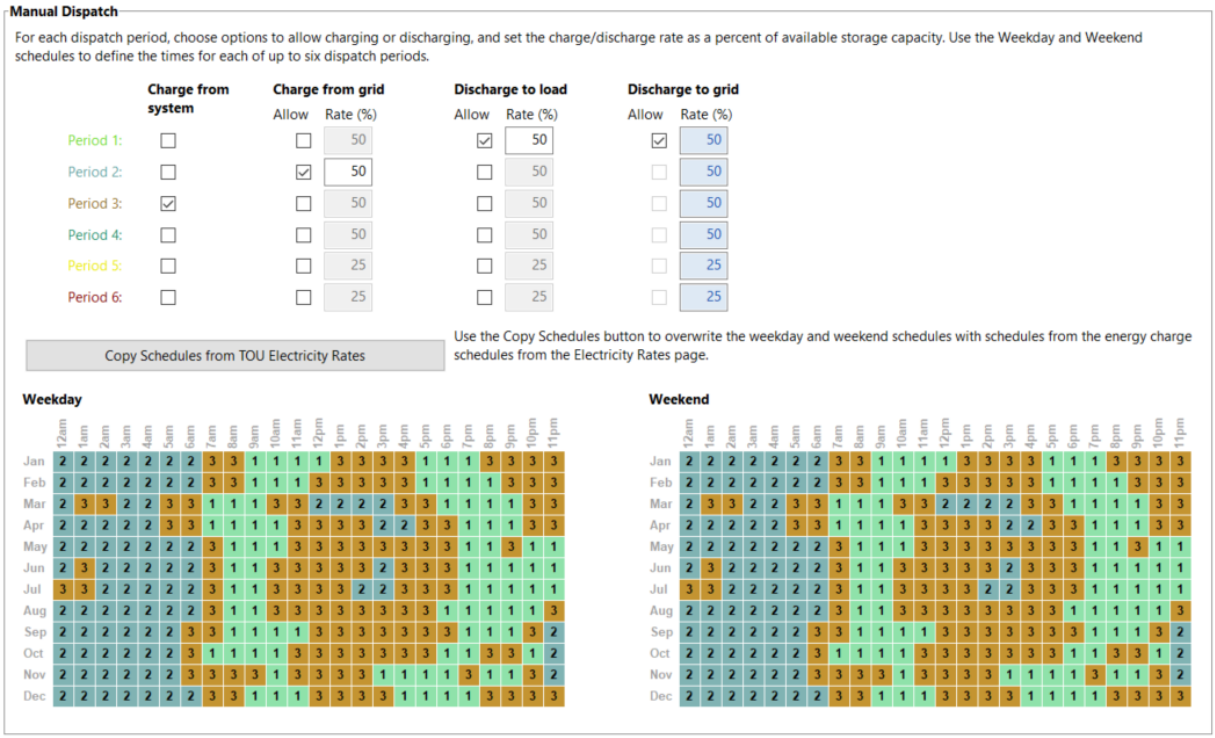

**Joonis 5.6.** Akusalvesti võimsuse ja salvestusmahu määramine

Akudele kahe erineva seadistuse määramise tingib hilisem võrdluse otstarbeks tehtav andmetöötlus, kus kasutatakse juba tunnipõhiseid elektrihindasid. Sellest tekib võrdlusmoment, selgitamaks välja kuivõrd palju kasu võib pakkuda akude integreerimine taastuvenergia tootmisesse määratud ajagraafikuga elektrienergiat võrgust salvestades, võrku müües ja taastuvenergiat salvestades. Laiahaardelisi tunnipõhiseid igat päeva eraldi vaatlevaid optimeerimisi laadimise ja tühjendamise aegade määramiseks käesolevas töös ei käsitleta.




**Joonis 5.7.** Akude laetuse tasemed

Akude töörežiimide määramisel on seadistatud minimaalseks laetuse tasemeks 50% ja maksimaalseks 95% (joonis 5.7).

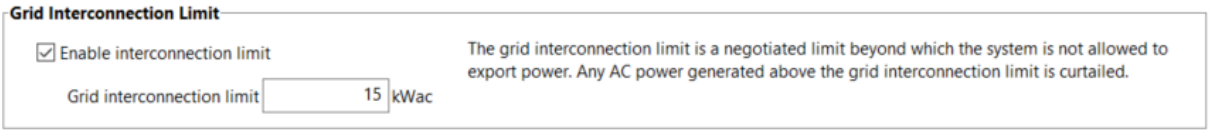



**Joonis 5.8.** Akude võrgust laadimiseks lubatud ajavahemikud

Joonisel 5.8 on näidatud akudele määratud töörežiimid tunniajase resolutsiooniga igale kalendrikuule sattuvale päevale. Leidmaks igale kalendrikuule keskmiselt soodsaimaid ja kalleimaid hindasid tühjendamise ja laadimise režiimide määramiseks on iga kuu elektrihindasid eraldi analüüsitud ja leitud kalendrikuu aritmeetilised keskmised hinnad kõigile

tundidele vaadeldavas perioodis. Kuna 100 kWh elektrienergiat mahutav aku tühjeneb 15 kW võrku edastamise piirangu korral ligikaudu seitse tundi arvestamata seejuures kadusid, siis on valitud seitse kõige odavamat ja seitse kõige kallimat hinda saadud tulemustest ja rakendatud neid režiimide määramiseks. Argipäevad ja nädalavahetused on seadistatud võrdselt, sest keskmised hinnad pole nädalavahetustele eraldi arvutatud. Periood 1 annab loa tühjendada akusid võrku, periood 2 annab loa võrgust laadida ning periood 3 on vaid päikesepargist salvestamise võimalusega.

Järgnev seadistus on elektrivõrguga liitumisest tulenevast peakaitsme suurusest lähtuv, mis seab võrku edastamise võimsuse piiriks 15 kW (joonis5.9).




**Joonis 5.9.** Võrku edastamise võimsuse piirang

Tarkvaraga on võimalik teha erinevaid majandusarvutusi, mis võtab arvesse mitmesuguseid sisendparameetreid. Programmi kuuluvad majandusarvutuste sisendparameetrid jäävad väärtustele, mis on programmis vaikimisi määratud ja käesolevas töös neid ei käsitleta.

Elektrihindade importimiseks on tarvilikud programmile sobivale kujule töödeldud hinnad. Sellisel kujul elektrihindade andmeid Eesti jaoks pole tarkvara andmebaasis saadaval ja Eleringi andmelaost csv formaadis hindade ajaseeriad ei ole programmile loetavad. Hinnavõrdluste arvutuste jaoks on kasutatud simulatsiooni andmete SAM tarkvarast eksportimise võimalust Microsoft Excelisse, et energiavoogude ja hindadega edasisi arvutusi teha.

Simulatsioonis on määratud omatarbimiseks 0 kWh (joonis 5.10), kuid võimalik on ajaseeriana sisestada ka oma tarbimine tunni keskmisena tervele aastale või anda ette tarbimisüksust puudutavad parameetrid, mille alusel omatarve simuleeritakse.

**Joonis 5.10.** Oma elektritarbimise määramine

Seejärel on simulaatorprogrammiga SAM arvutatud elektrienergia ostu- ja müügimahud olukorrale, kus on elektrokeemiline energiasalvesti ja vastupidisele olukorrale, kus on salvestita päikeseelektri müük võrku, et tulemused hindadega läbi korrutada.

Esimese simulatsiooni ja andemete läbitöötamisega saadud tulemus on esitatud tabelis 5.1.

**Tabel 5.1.** Tulemused elektrihindasid arvestades

| | |
|---|---|
| Ost | 3014,76 € |
| Müük | 6374,26 € |
| Müügi-ostu vahe | 3359,50 € |
| Müük ilma akudeta | 2537,56 € |

Saadud tulemus näitab salvesti osalusel märksa paremat rahalist tootlikkust võrreldes ilma akudeta võrku müümisega.

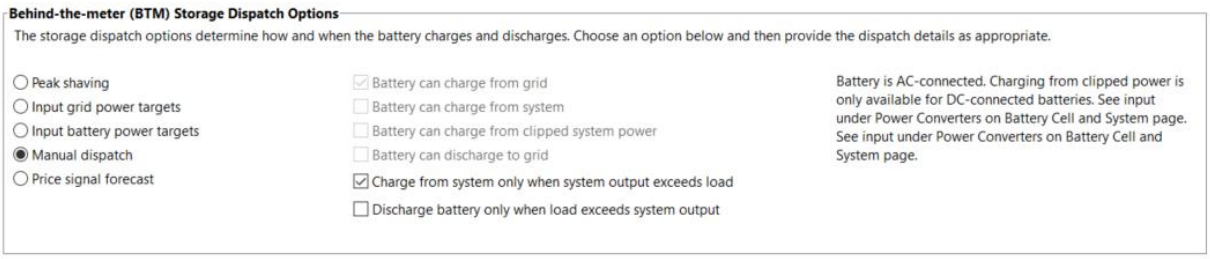
Järgmises simulatsiooni parendusetapis on simulatsioonis arvestatud kõiki ülejäänuid parameetreid paika jättes päikeseelektri tootmisjaama võimsuseks 25 kW. Võrku edastamise piir on endiselt 15 kW. Saadud tulemused on esitatud tabelis 5.2.

**Tabel 5.2.** Tulemused elektrihindasid arvestades 10 kW suurema päikesepargiga

| | |
|---|---|
| Ost | 2900,92 € |
| Müük | 7730,90 € |
| Müügi-ostu vahe | 4829,98 € |
| Müük ilma akudeta | 4332,93 € |

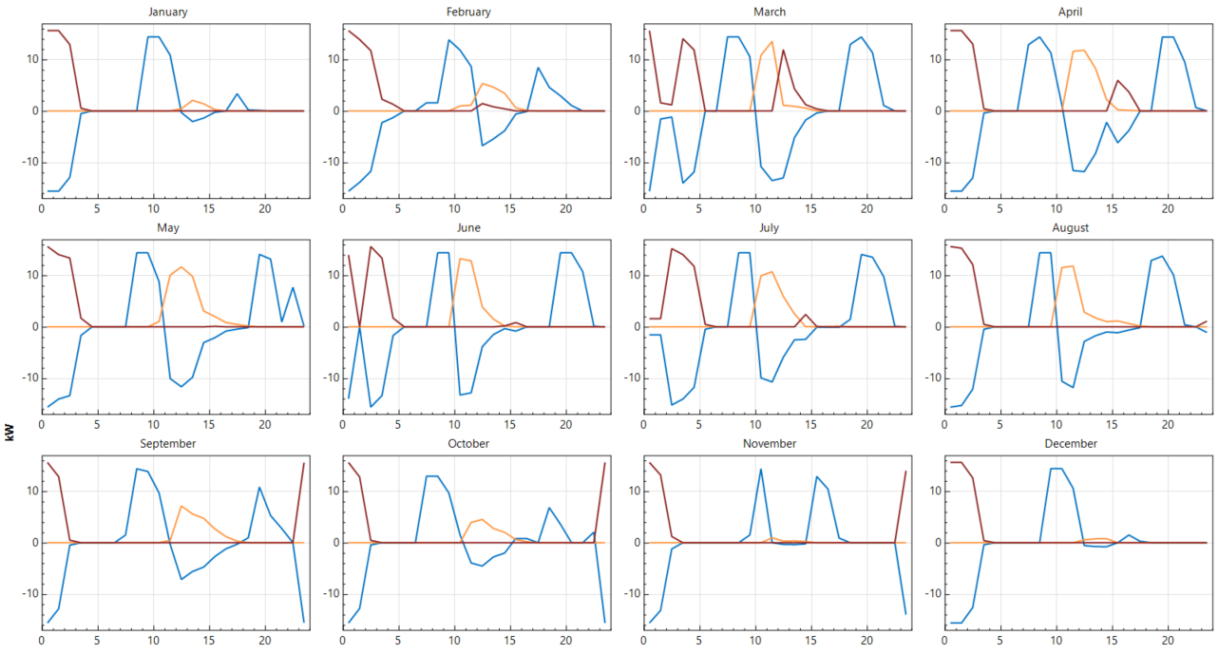
Ostumaht on rahas mõõdetuna mõnevõrra vähenenud ja müügitulu akudega süsteemil on teises etapis ligikaudu kahekordne võrreldes 15 kW päikeseelektrijaamaga, millel puudub salvestus. Kui esimeses seadistuses oli kahe süsteemi lõpptulemuse erinevus 821,94 €, siis teise seadistuse tulemusel ehk päikeseelektrijaama võimsuse suurendamisel langeb see 497,05 €-ni.

Oluline seadistus tarkvaras energiavoogude juhtimiseks simulatsioonis on esitatud joonisel 5.11. See on mõlema tulemuse arvutamiseks seadistatud võrdselt.



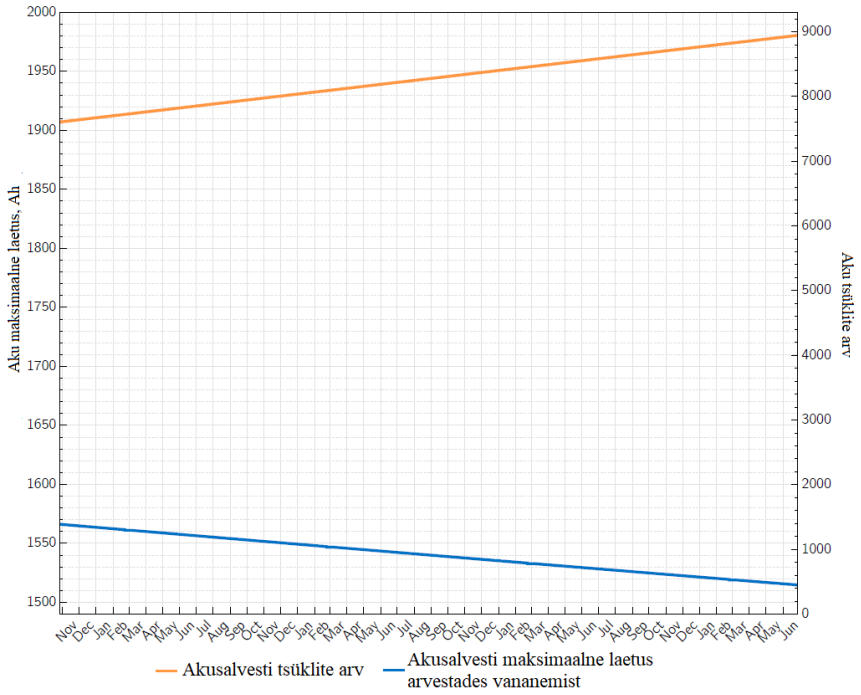

**Joonis 5.11.** Akude laadimise võimalus tootmisüksusest

Tarkvara SAM võimaldab tehtud simulatsioonist teha mitmesuguseid erinevaid statistilisi väljavõtteid ja graafikuid. Lisaks võimaldab kuvatud graafikute ja tabelite lähteandmeid eksportida xlsx ja csv formaati.




**Joonis 5.12.** Elektrienergia laadimis- ja tühjendustsüklid kuude kaupa

Joonisel 5.12 on esitatud kuvatõmmis akude laadimisest ja tühjendamisest kuude kaupa simulatsiooni seadistuste põhjal. Punaselt on markeeritud võrgust akusse salvestamist, kollasega päikeseelektrijaamast akusse salvestamist ning siniselt on markeeritud aku sisend-väljund võimsus.




**Joonis 5.13.** Aku maksimaalne laetus ja töötsüklite arv

Joonisel 5.13, mis on kuvatõmmis simulatsioonis kasutatud akude kohta, on näha aku omavaheline sõltuvus maksimaalse laetuse ja tühjendustsüklite vahel.

## 5.3 Järeldused

Ühe aasta elektrihindade ja ilmastikuandmete põhjal tehtud *System Advisor Model* tarkvara simulatsioon ja edasine andmetöötlus Microsoft Excel-iga tõestas, et elektrienergia ost ja müük vajab põhjalikku analüüsi võimalikult tulemusliku resultaadi saavutamiseks.

Kombineerides taastuvenergia tootmist käesoleval juhul elektrokeemilise Li-ion salvesti ja võrku müügi ning võrgust laadimisega, on oluline leida süsteemi konfiguratsioonis tasakaal pudelikaelaks oleva peakaitsme, päikeseelektrijaama võimsuse ja kasutatava elektrokeemilise salvesti energiamahutavuse vahel.

SAM tarkvara võimaldab mitte ühe päeva, vaid ühe kuu raames valida sobilikke võrgust laadimise ja võrku tühjendamise aegasid. Analüüsides ükshaaval kalendrikuude hinnakõikumisi oli võimalik saavutada elektrokeemilise salvestiga parem ostu-müügi tulemus võrreldes ilma akudeta lahendusega. 10 kW võimsuse lisamine päikeseelektrijaamale pakub antud juhul

võimalust suurema tootlikkusega päevadel salvestada see osa energiast, millele hoone peakaitse piiri ette seab. Salvestatut on võimalik hiljem elektrivõrgule pakkuda. Reaalsete füüsiliselt eksisteerivate süsteemide puhul avaldatakse elektrienergia hinnad kell 15:00 Eesti aja järgi järgmiseks päevaks, mille alusel süsteemi operaator või automatiseeritud lahendus saab teha vastavad otsused laadimiste ja tühjakslaadimiste kellaaegade kohta või elektrienergia salvestamisvõimaluse kasutamata jätmise osas.

# KOKKUVÕTE

Töös on välja toodud elektrienergia salvestamistehnoloogia rakendusi, tehnoloogia põhimõtteid ja erinevaid loodud lahendusi. Ühtlasi on käsitletud elektrihinna kujunemist siinses regioonis, millest tingituna on hinnad tunnipõhised ja põhjustavad hindade volatiilsust. Sellest tulenevalt on muutunud päevakohaseks elektrienergia ost-müük ning töö edasine praktiline osa uurib mõningaid võimalusi selles valdkonnas.

Käesoleva magistritöö käigus esitati kaks lahendust elektrienergia võrgust salvestamiseks koos taastuvenergiatootmisega ja võrku müügiga. Ühel juhul integreeriti päikeseelektri tootmisele elektrokeemilised elektrienergia salvestid ja optimeeriti võrgust ostu-müügi ajagraafikut vastavalt vaadeldud aasta keskmistele kalendrikuu hindadele ööpäeva raames. Kasutati seitset keskmiselt kõige soodsama ja keskmiselt kõige kallima hinnaga tunde vastavalt elektrienergia salvestamiseks ja müümiseks. Tundide arv on antud juhul seotud peakaitsmest tingitud võrku edastamise ja salvestamise piiranguga. Lisandus veel päikeseelektrijaama omatoodang. Teisel juhul otsiti parendusvõimalust loodud lahendusele. Selleks lisati päikeseelektrijaamale kaks kolmandiku võimsust ja ülejäänud süsteemi konfiguratsioon jäeti endisele kujule – kasutati samu ilmastikuandmeid, elektrihindasid ja võrku edastamise piirangut. Saadud tulemused pakuvad erinevaid võrdlusmomente ühel või teisel viisil. Eskaleeritud tootmisvõimsust sai kasutada võrgu edastamise piirangust tingitud ületootmise salvestamiseks ja seejärel võrku pakkumiseks. Seejuures oli vaadeldaval perioodil võrgust salvestamise ja võrku müügi ajagraafik kalendrikuu keskmistest hindadest tulenevalt ka ostu-müügi võimalust pakkuv. Seega akusid laeti kombineeritult nii võrgust kui ka omatoodangust.

Arvutustest on välja jäetud elektrienergia salvesti hinnad ja sellega seonduv tasuvusaeg, sest hinnad võivad olla ajas kiiresti muutuvad.

Töös kasutatud tarkvara funktsioonid ja simulatsiooni tulemused on mõneti universaalsed, et saavad olla modifitseerimisel rakendatavad erinevatele kombineeritud süsteemidele võimalikult

optimaalse konfiguratsiooni leidmiseks. Kalendrikuu keskmiste hindade asemel iga päeva sisendhindadega eraldi arvestamine saab pakkuda mõnevõrra teistsugust tulemust.

# KASUTATUD KIRJANDUS

1. “Grid-Connected Energy Storage Systems: State-of-the-Art and Emerging Technologies” Glen G. Farivar; William Manalastas; Hossein Dehghani Tafti; Salvador Ceballos; Alain Sanchez-Ruiz Emma C. Lovell; Georgios Konstantinou; Christopher D. Townsend; Madhavi Srinivasan; Josep Pou. 2022.

2. A. Kargarian, G. Hug and J. Mohammadi, "A multi-time scale co-optimization method for sizing of energy storage and fast-ramping generation", IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 7, no. 4, pp. 1351-1361, Oct. 2016.

3. N. S. Goteti, E. Hittinger, B. Sergi and I. L. Azevedo, "How does new energy storage affect the operation and revenue of existing generation?", Appl. Energy, vol. 285, Mar. 2021.

4. C. Li et al., "Method for the energy storage configuration of wind power plants with energy storage systems used for black-start", Energies, vol. 11, no. 12, pp. 3394, Dec. 2018.

5. J. Li, H. You, J. Qi, M. Kong, S. Zhang and H. Zhang, "Stratified optimization strategy used for restoration with photovoltaic-battery energy storage systems as black-start resources", IEEE Access, vol. 7, pp. 127339-127352, 2019.

6. W. Liu and Y. Liu, "Hierarchical model predictive control of wind farm with energy storage system for frequency regulation during black-start", Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 119, Jul. 2020.

7. European Association for Storage of Energy (EASE)—Activity Report 2014, 2014.

8. European Energy Storage Technology Development Roadmap-2017 Update, San Francisco, CA, USA:EASE, 2017.

9. P. Denholm, E. Ela, B. Kirby and M. Milligan, "Role of energy storage with renewable electricity generation", 2010.

10. K. Bradbury, L. Pratson and D. Patino-Echeverri, "Economic viability of energy storage systems based on price arbitrage potential in real-time U.S. Electricity markets", Appl. Energy, vol. 114, pp. 512-519, Feb. 2014.

11. M. Salles, J. Huang, M. Aziz and W. Hogan, "Potential arbitrage revenue of energy storage systems in PJM", Energies, vol. 10, no. 8, pp. 1100, Jul. 2017.

12. X. Wu, J. Zhao and A. Conejo, "Optimal battery sizing for frequency regulation and energy arbitrage", IEEE Trans. Power Del., vol. 37, no. 3, pp. 2016-2023, Jun. 2021.

13. Z. Wang and S. Wang, "Grid power peak shaving and valley filling using vehicle-to-grid systems", IEEE Trans. Power Del., vol. 28, no. 3, pp. 1822-1829, Jul. 2013.
14. Z. Hong, Z. Wei, J. Li and X. Han, "A novel capacity demand analysis method of energy storage system for peak shaving based on data-driven", J. Energy Storage, vol. 39, Jul. 2021.
15. H. Ibrahim, A. Ilinca and J. Perron, "Energy storage systems—Characteristics and comparisons", Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 12, no. 5, pp. 1221-1250, Jun. 2008.
16. P. Iliadis, S. Ntomalis, K. Atsonios, A. Nesiadis, N. Nikolopoulos and P. Grammelis, "Energy management and techno-economic assessment of a predictive battery storage system applying a load levelling operational strategy in island systems", Int. J. Energy Res., vol. 45, no. 2, pp. 2709-2727, Feb. 2021.
17. S. A. Abdelrazek and S. Kamalasadan, "Integrated PV capacity firming and energy time shift battery energy storage management using energy-oriented optimization", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 52, no. 3, pp. 2607-2617, May 2016.
18. H. Beltran, J. Cardo-Miota, J. Segarra-Tamarit and E. Pérez, "Battery size determination for photovoltaic capacity firming using deep learning irradiance forecasts", J. Energy Storage, vol. 33, Jan. 2021.
19. A. Castillo and D. F. Gayme, "Grid-scale energy storage applications in renewable energy integration: A survey", Energy Convers. Manage., vol. 87, pp. 885-894, Nov. 2014.
20. F. Mohamad, J. Teh and C.-M. Lai, "Optimum allocation of battery energy storage systems for power grid enhanced with solar energy", Energy, vol. 223, May 2021.
21. L. Meng et al., "Fast frequency response from energy storage systems—A review of grid standards projects and technical issues", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 11, no. 2, pp. 1566-1581, Mar. 2019.
22. M. Zubiaga, A. Sanchez-Ruiz, E. Olea, E. Unamuno, A. Bilbao and J. Arza, "Power capability boundaries for an inverter providing multiple grid support services", Energies, vol. 13, no. 17, pp. 4314, Aug. 2020.
23. A. Peña Asensio, F. Gonzalez-Longatt, S. Arnaltes and J. L. Rodríguez-Amenedo, "Analysis of the converter synchronizing method for the contribution of battery energy storage systems to inertia emulation", Energies, vol. 13, no. 6, pp. 1478, Mar. 2020.
24. A. Oudalov, D. Chartouni and C. Ohler, "Optimizing a battery energy storage system for primary frequency control", IEEE Trans. Power Syst., vol. 22, no. 3, pp. 1259-1266, Aug. 2007.
25. M. Yoon et al., "Utilization of energy storage system for frequency regulation in large-scale transmission system", Energies, vol. 12, no. 20, pp. 3898, Oct. 2019.
26. F. Calero, C. A. Canizares and K. Bhattacharya, "Dynamic modeling of battery energy storage and applications in transmission systems", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 12, no. 1, pp. 589-598, Jan. 2020.

27. FLEXITRANSTORE: European Union's Horizon 2020 Project, Jun. 2022, [veebileht] Available: http://www.flexitranstore.eu/.
28. J. M. Eyer, "Electric utility transmission and distribution upgrade deferral benefits from modular electricity storage: A study for the DOE energy storage systems program", 2009.
29. M. M. Rahman, A. O. Oni, E. Gemechu and A. Kumar, "The development of techno-economic models for the assessment of utility-scale electro-chemical battery storage systems", Appl. Energy, vol. 283, Feb. 2021.
30. M. I. Chehardeh, H. Lesani, M. K. Zadeh and E. M. Siavashi, "An optimal control strategy to alleviate sub-synchronous resonance in VSC-HVDC systems", Proc. 2nd Int. Conf. Power Electron. Intell. Transp. Syst. (PEITS), pp. 250-255, Dec. 2009.
31. B. Fang, Y. Jiao, L. Dong, W. Zhou and H. Nian, "Using virtual synchronous generator control based energy storage to enhance the stability of sending terminal in LCC-HVDC system", Proc. 4th Int. Conf. HVDC (HVDC), pp. 304-309, Nov. 2020.
32. B. P. Roberts and C. Sandberg, "The role of energy storage in development of smart grids", Proc. IEEE, vol. 99, no. 6, pp. 1139-1144, Jun. 2011
33. E. Galvan, P. Mandal and Y. Sang, "Networked microgrids with roof-top solar PV and battery energy storage to improve distribution grids resilience to natural disasters", Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 123, Dec. 2020.
34. Y. Wang, K. T. Tan, X. Y. Peng and P. L. So, "Coordinated control of distributed energy-storage systems for voltage regulation in distribution networks", IEEE Trans. Power Del., vol. 31, no. 3, pp. 1132-1141, Jun. 2015.
35. M. Stecca, L. R. Elizondo, T. B. Soeiro, P. Bauer and P. Palensky, "A comprehensive review of the integration of battery energy storage systems into distribution networks", IEEE Open J. Ind. Electron. Soc., vol. 1, pp. 46-65, 2020.
36. R. Tapia-Sánchez, A. Medina-Rios, N. M. Salgado-Herrera, D. Granados-Lieberman, J. R.Rodríguez-Rodríguez and J. L. Guillén-Aguirre, "Reactive power compensation in distribution systems through the DSTATCOM integration based on the bond graph domain", Arabian J. Sci. Eng., vol. 45, no. 3, pp. 1435-1446, Mar. 2020.
37. M. U. Hashmi, L. Pereira and A. Busic, "Energy storage in madeira portugal: Co-optimizing for arbitrage self-sufficiency peak shaving and energy backup", Proc. IEEE Milan PowerTech, pp. 1-6, Jun. 2019.
38. Y. Yoon and Y.-H. Kim, "Charge scheduling of an energy storage system under time-of-use pricing and a demand charge", Sci. World J., vol. 2014, Oct. 2014.

39. J. Mundackal, A. C. Varghese, P. Sreekala and V. Reshmi, "Grid power quality improvement and battery energy storage in wind energy systems", Proc. Annu. Int. Conf. Emerg. Res. Areas Int. Conf. Microelectron. Commun. Renew. Energy, pp. 1-6, Jun. 2013.
40. M. Nazemi, M. Moeini-Aghtaie, M. Fotuhi-Firuzabad and P. Dehghanian, "Energy storage planning for enhanced resilience of power distribution networks against earthquakes", IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 11, no. 2, pp. 795-806, Apr. 2019.
41. M. Ferraro, G. Brunaccini, F. Sergi, D. Aloisio, N. Randazzo and V. Antonucci, "From uninterruptible power supply to resilient smart micro grid: The case of a battery storage at telecommunication station", J. Energy Storage, vol. 28, Apr. 2020.
42. S. K. Chaudhary, A. F. Cupertino, R. Teodorescu and J. R. Svensson, "Benchmarking of modular multilevel converter topologies for ES-STATCOM realization", Energies, vol. 13, no. 13, pp. 3384, Jul. 2020.
43. H. Ibrahim, A. Ilinca and J. Perron, "Energy storage systems-Characteristics and comparisons", Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 12, no. 5, pp. 1221-1250, 2008.
44. “Electricity storage for intermittent renewable sources” Jason Rugolo and Michael J. Aziz, 2012.
45. W. Choi et al., "Reviews on grid-connected inverter utility-scaled battery energy storage system and vehicle-to-grid application—Challenges and opportunities", Proc. IEEE Transp. Electrific. Conf. Expo (ITEC), pp. 203-210, Jun. 2017.
46. “Comparative Review of Energy Storage Systems, Their Roles, and Impacts on Future Power Systems” Furquan Nadeem, S. M. Suhail Hussain, Prashant Kumar Tiwari, Arup Kumar Goswami, Taha Selim Ustun, 2018.
47. Renewable Power, Paris, France:IEA, 2020.
48. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut. KNMI HYDRA project website
49. J. W. Verkaik, Evaluation of Two Gustiness Models for Exposure Correction Calculations, J. Appl. Meteorol., 2000, 39, 1613–1626.
50. General Electric webpage containing turbine specifications.
51. NREL PVWatts solar data for Boston, Massachusetts, 2009.
52. The National Grid webpage where one may download grid consumption data.
53. “Electricity storage for intermittent renewable sources” Jason Rugolo and Michael J. Aziz, 2012
54. Statistical Review of World Energy, BP, London, U.K, 2021.
55. DOE Global Energy Storage Database, Feb. 2022, [veebileht] Available: https://sandia.gov/ess-ssl/gesdb/public/statistics.html.

56. C. Prantil and T. Decker, "The captains of energy: Systems dynamics from an energy perspective", Synth. Lectures Eng., vol. 9, no. 1, pp. 1-218, Feb. 2015, [veebileht] Available: https://www.morganclaypool.com/doi/abs/10.2200/S00610ED1V01Y201410ENG024.
57. V. A. Boicea, "Energy storage technologies: The past and the present", Proc. IEEE, vol. 102, no. 11, pp. 1777-1794, Nov. 2014.
58. World Nuclear Association, Feb. 2022, [veebileht] Available: https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/electricity-and-energy-storage.aspx.
59. W. F. Pickard, "The history present state and future prospects of underground pumped hydro for massive energy storage", Proc. IEEE, vol. 100, no. 2, pp. 473-483, Feb. 2012.
60. B. Cleary, A. Duffy, A. Oconnor, M. Conlon and V. Fthenakis, "Assessing the economic benefits of compressed air energy storage for mitigating wind curtailment", IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 6, no. 3, pp. 1021-1028, Jul. 2015.
61. Tracking Clean Energy Progress: 2017, Paris, France, pp. 1-82, 2017.
62. Energy Storage: Program Planning Document, Washington, DC, USA, 2011.
63. M. Aneke and M. Wang, "Energy storage technologies and real life applications—A state of the art review", Appl. Energy, vol. 179, pp. 350-377, Oct. 2016.
64. R. Lacal-Arantegui, N. Fitzgerald and P. Leahy, "Pumped-hydro energy storage: Potential for transformation from single dams", 2011, [veebileht] Available: https://setis.ec.europa.eu/sites/default/files/reports/Pumped-hydro-energy-storage-potential-for-transformation-from-single-dams.pdf.
65. G. Locatelli, D. C. Invernizzi and M. Mancini, "Investment and risk appraisal in energy storage systems: A real options approach", Energy, vol. 104, pp. 114-131, Jun. 2016.
66. M. G. Molina, "Energy storage and power electronics technologies: A strong combination to empower the transformation to the smart grid", Proc. IEEE, vol. 105, no. 11, pp. 2191-2219, Nov. 2017.
67. “Analysis of the Impact of Elastic Gas Storage Volume on the Distributed Compressed Air Energy Storage Systems“ Ma Wei; Xie Yuguang; Li Jinzhong; Chen Renfeng; Zhang Hong; Liu Manjun; Tan Wei, 2023.
68. APEX CAES, 2013.
69. “Assessing the Economic Benefits of Compressed Air Energy Storage for Mitigating Wind Curtailment” Brendan Cleary; Aidan Duffy; Alan OConnor; Michael Conlon; Vasilis Fthenakis, 2015.
70. J. Ilic et al., "Technical and economic analysis of various power generation resources coupled with CAES systems", 2011.
71. R. Peña-Alzola, R. Sebastián, J. Quesada and A. Colmenar, "Review of flywheel based energy storage systems", Proc. Int. Conf. Power Eng. Energy Electr. Drives, pp. 1-6, May 2011.

72. F. J. M. Thoolen, Development of an advanced high speed flywheel energy storage system, Eindhoven, The Netherlands, 1993, [veebileht] Available: https://pure.tue.nl/ws/files/3447642/406829.pdf.

73. A. Nourai, B. P. Martin and D. R. Fitchett, "Testing the limits [electricity storage technologies]", IEEE Power Energy Mag., vol. 3, no. 2, pp. 40-46, Mar./Apr. 2005.

74. H. Chen, T. Ngoc, W. Yang, C. Tan, Y. Li and Y. Ding, "Progress in electrical energy storage system: A critical review", Prog. Natural Sci., vol. 19, no. 3, pp. 291-312, 2009.

75. X. Zhou, X. C. Yuan and J. J. Xun, "Development of SMES technology and its applications in power grid", Proc. Int. Conf. Appl. Supercond. Electromagn. Devices (ASEMD), pp. 260-269, 2011.

76. "An Overview of SMES Applications in Power and Energy Systems" Mohd. Hasan Ali; Bin Wu; Roger A. Dougal, 2010.

77. X. D. Xue, K. W. E. Cheng and D. Sutanto, "Power system applications of superconducting magnetic energy storage systems", Proc. Ind. Appl. Conf., pp. 1524-1529, 2005.

78. D. Somayajula and M. L. Crow, "An ultracapacitor integrated power conditioner for insectionittency smoothing and improving power quality of distribution grid", IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 5, no. 4, pp. 1145-1155, 2014.

79. M. C. Joshi, S. Samanta and G. Srungavarapu, "Battery ultracapacitor based DC motor drive for electric vehicles", Proc. IEEE Region 10 Symp., pp. 1-5, 2017.

80. B. Kaitao, A. Quntao, D. Jiandong and S. Li, "Analysis and implementation of an enhanced modular multilevel DC/DC converter for super capacitor energy storage system", Proc. IEEE Transp. Electrific. Conf. Expo. Asia-Pac., pp. 1-6, 2017.

81. "Active SOC Balancing Control Strategy for Modular Multilevel Super Capacitor Energy Storage System" Kaitao Bi; Li Sun; Quntao An; Jiandong Duan, 2018.

82. M. Marracci, B. Tellini, M. Catelani and L. Ciani, "Ultracapacitor degradation state diagnosis via electrochemical impedance spectroscopy", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 64, no. 7, pp. 1916-1921, Jul. 2015.

83. P., Kreczanik et al., "Study of super capacitor ageing and lifetime estimation according to voltage temperature and RMS current", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 9, pp. 4895-4902, 2014.

84. [veebileht] Available: http://www.maxwell.com.

85. E. Chemali, M. Preindl, P. Malysz and A. Emadi, "Electrochemical and electrostatic energy storage and management systems for electric drive vehicles: State-of-the-art review and future trends", IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron., vol. 4, no. 3, pp. 1117-1134, Sep. 2016.

86. "Stationary battery systems in the main world markets: Part 1: Overview of the state-of-the-art" Enrico Telaretti; Luigi Dusonchet, 2017.

87. K. C. Divya and J. Østergaard, "Battery energy storage technology for power systems—An overview", Elect. Power Syst. Res., vol. 79, no. 4, pp. 511-520, 2009.
88. J. Cho, S. Jeong and Y. Kim, "Commercial and research battery technologies for electrical energy storage applications", Prog. Energy Combust. Sci., vol. 48, pp. 84-101, Jun. 2015.
89. A. Chatzivasileiadi, E. Ampatzi and I. Knight, "Characteristics of electrical energy storage technologies and their applications in buildings", Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 25, pp. 814-830, Sep. 2013.
90. L. Yao et al., "Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems", J. Mod. Power Syst. Clean Energy, vol. 4, no. 4, pp. 519-528, 2013.
91. “Advancement in battery technology: A state-of-the-art review” Aoxia Chen; Pankaj K. Sen, 2016.
92. B. Isidor, Batteries in a Portable World A Handbook on Rechargeable Batteries, Cadex Electronics Inc, 2011.
93. D. Dees, V. Battaglia and A. Belanger, "Electrochemical modelling of Lithium Polymer batteries", J. Power Sources, vol. 11, no. 2, pp. 310-320, 2002.
94. V. Viswanathan, M. Kintner Meyer, P. Balducci and C. Jin, "National assessment of energy storage for grid balancing and arbitrage", Pacific Northwest National Labortory Tech. Rep., 2013.
95. J. Frith, Bloomberg, Sep. 2021, [veebileht] Available: https://www.bloomberg.com/news/newsletters/2021-09-14/ev-battery-prices-risk-reversing-downward-trend-as-metals-surge
96. M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Mohamed and A. Ayob, "Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges", Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 69, pp. 771-789, Sep. 2017.
97. S. M. Lukic, J. Cao, R. C. Bansal, F. Rodriguez and A. Emadi, "Energy storage systems for automotive applications", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 6, pp. 2258-2267, Jun. 2008
98. D. Pavlov, Lead-Acid Batteries: Science and Technology/Chapter 1-Invention and Development of the Lead Acid Battery, New York, NY, USA:Elsevier, 2011, [veebileht] Available: https://www.elsevier.com/books/lead-acid-batteries-science-and-technology/pavlov/978-0-444-52882-7.
99. K. T. Chau, Y. S. Wong and C. C. Chan, "An overview of energy sources for electric vehicles", Energy Convers. Manag., vol. 40, no. 10, pp. 1021-1039, 1999.
100. X. Luo, J. Wang, M. Dooner and J. Clarke, "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation", Appl. Energy, vol. 137, pp. 511-536, Jan. 2015.

101. G. Bonduelle and X. Muneret, "VRLA batteries in telecom application: AGM or gel?", Proc. TELESCON 3rd Int. Telecommun. Energy Special Conf., pp. 75-79, 2000.
102. B. Isidor, Batteries in a Portable World A Handbook on Rechargeable Batteries, Cadex Electronics Inc, 2011.
103. A. Z. Weber, M. M. Mench, J. P. Meyers, P. N. Ross, J. T. Gostick and Q. Liu, "Redox flow batteries a review", Journal of Applied Electrochemistry, vol. 41, no. 10, pp. 1137-1164, 2011.
104. H. Zhou, H. Zhang, P. Zhao and B. Yi, "A comparative study of carbon felt and activated carbon based electrodes for sodium polysul-fide/bromine redox flow battery", Electrochimica Acta, vol. 51, no. 28, pp. 6304-6312, 2006.
105. R. Remick and P. Ang, "Electrically rechargeable anionically active reduction-oxidation electrical storage-supply system", Tech. Rep., 1984.
106. F. G. M. Skyllas-Kazacos, "Efficient vanadium redox flow cell", Journal of Electrochemistry Society, vol. 134, no. 12, pp. 2950-2953, 1987.
107. B. Chalamala, T. Soundappan, G. Fisher, M. Anstey, V. Viswanathan and M. Perry, "Redox flow batteries an engineering perspective", Proceedings of the IEEE, vol. 102, no. 6, pp. 976-999, June 2014.
108. “Overview of energy storage in renewable energy systems” Said Ould Amrouche; Djamila Rekioua; Toufik Rekioua, 2015.
109. M. N. Eisler, "The carbon-eating fuel cell [blueprints for a miracle]", IEEE Spectr., vol. 55, no. 6, pp. 22-76, Jun. 2018.
110. Q. Xun, Y. Liu and E. Holmberg, "A comparative study of fuel cell electric vehicles hybridization with battery or supercapacitor", Proc. Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives Autom. Motion, pp. 389-394, Jun. 2018.
111. “Energy Analysis of Molten-Salt Storage Integrated with Air-Based Brayton Cycle: Case Study of a Wind Farm in Denmark” Hamid Reza Rahbari; Matthias Mandø, 2023.
112. T. Bauer, C. Odenthal and A. B.-C. I. Technik, "Molten salt storage for power generation", Wiley Online Library, vol. 93, no. 4, pp. 534-546, Apr. 2021. V. Nunes, C. Queirós, M. Lourenço and F. S.-A. Energy, "Molten salts as engineering fluids-A review: Part I. Molten alkali nitrates", Elsevier, 2016
113. A. Bonk, S. Sau, N. Uranga, M. Hernaiz and T. Bauer, "Advanced heat transfer fluids for direct molten salt line-focusing CSP plants", Prog Energy Combust Sci, vol. 67, pp. 69-87, Jul. 2018.
114. D. Bhatnagar and V. Loose, Evaluating utility procured electric energy storage resources: A perspective for state electric utility regulators, Livermore, CA, USA, pp. 1-82, Nov. 2012, [veebileht] Available: https://www.sandia.gov/ess-ssl/publications/SAND2012-9422.pdf.

115. S. Ruester, X. He, J. Vasconcelos and J.-M. Glachant, Electricity storage: How to facilitate its deployment and operation in the EU, Rome, Italy, 2012, [veebileht] Available: https://www.eui.eu/Projects/THINK/Documents/Thinktopic/PB/Policy201205.pdf.

116. Elektrituru käsiraamat [veebileht] https://elering.ee/elektriturg#tab0

117. Nord Pool [veebileht] https://www.nordpoolgroup.com/en/trading/Day-ahead-trading/Price-calculation/

118.Elektrihinnad [veebileht] https://estfeed.elering.ee/exchange-prices

119. Elekrimüügi marginal [veebileht] https://sunly.ee/et/su-paikesejaam-on-valmis-mis-edasi/

120. System Advisor Model [veebileht] https://sam.nrel.gov/

**Lisa. Lihtlitsents magistritöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Mikk Kliimson, sünniaeg 22.04.1990,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud magistritöö

"Elektrienergia salvestamine ja ostu-müügi võimaluste analüüs hoonetes",

mille juhendaja on Andres Annuk, *PhD*,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Mikk Kliimson

_____ _____

(*allkirjastatud digitaalselt*) (*kuupäev*)

**Juhendaja kinnitus magistritöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban magistritöö kaitsmisele.

_____ _____

(*allkirjastatud digitaalselt*) (*kuupäev*)