



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

AKUPANK EESTI JAOTUSVÕRGUS. KELLE VÕIT: TARBIJA JA/VÕI JAOTUSVÕRGU OMA?

BATTERY STORAGES IN ESTONIAN DISTRIBUTION NETWORK. WHO WILL
BENEFIT THE MOST: CUSTOMER AND/OR DISTRIBUTION NETWORK COMPANY?

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Marii Uduvee

Üliõpilaskood: 153786AAVM

Juhendaja: Elina Rebecka Rikkas (Juhan Valtin)

Tallinn, 2018.a.

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

Antud lõputöö on osa doktorant Elina Rebecka Rikkase doktoritööst.

“.....” 201.....

Autor: Marii Uduvee

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja: Elina Rebecka Rikkas

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Marii Uduvee	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Akupank Eesti jaotusvõrgus. Kelle võit: tarbija ja/või jaotusvõrgu oma?	
<i>Kuupäev:</i> 05.01.2018	74 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja(d):</i> doktorant Elina Rebecka Rikkas	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i> -	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Käesoleva lõputöö eesmärk on uurida eraldiseisvate akupankade kasutamise võimalusi Eesti jaotusvõrgus ja kas nende integreerimine võrku on Eestis mõistlik alternatiiv traditsioonilisele investeringule. Lisaks uuritakse, kellele on selline lahendus kasulik ja mida teha, et kasu saaksid rohkem osapooli.</p> <p>Töös on antud ülevaade akupankade võrku integreerimise võimalikest põhjustest ja maailmas enimlevinud akupankade tehnoloogiatest. Seejärel uuritakse akupankade valiku aluseid, sobivust Eesti tingimustesse ja võimalikke tehnoloogilisi nõudeid liitumisel jaotusvõrku. Lisaks, tuuakse välja akupankade integreerimisest huvitatud osapooled ja analüüsitakse akupankade mõju erinevatele osapooltele: jaotusvõrgule, elektritootjatele, lõpp-tarbijatele ja teistele osapooltele. Tasuvuse uurimiseks teostatakse finantsanalüüs.</p> <p>Töö tulemusel selgus, et akupankade võrku integreerimine ei ole tänaste (2017.a.) kehtivate hindade juures mõistlik alternatiiv, kuid hindade langedes saaksid nende võrku integreerimisest kasu rohkem osapooli kui ainult jaotusvõrk ja tarbijaid.</p>	
<i>Märksõnad:</i> akupank, Eesti jaotusvõrk, elektritarbijad, elektritootjad, elektrienergia salvestamine, mõju elektrivõrgule.	

Summary of the Diploma Work

<i>Author:</i> Marii Uduvee	<i>Type of the work:</i> Masters Thesis
<i>Title:</i> Battery storages in Estonian distribution network. Who will benefit the most: Customer and/or distribution network company?	
<i>Date:</i> 05.01.2018	<i>74 pages</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Doctoral Candidate Elina Rebecka Rikkas	
<i>Consultant(s):</i> -	
<i>Abstract:</i> The purpose of this thesis is to investigate the possibilities of using independent battery storages in the Estonian distribution network and whether their integration into the network is a sensible alternative in Estonia to the traditional network investments. In addition, in the thesis will be explored who will benefit from this solution and what can be done for more parties to benefit most. This work gives an overview of the possible reasons for integrating battery storages to the distribution network and the most widely used battery storage technologies in the world. Then, the basics of selection of battery storages, the suitability of Estonian conditions and possible technological requirements for joining the distribution grid are examined. In addition, the work will describe who are the stakeholders interested in the integration of the battery storages and what kind of impact do they have on the various parties involved: distribution network, renewable energy producers, end-users and other parties. The financial analysis is carried out to investigate the profitability. As the result of the work, it is clear that the integration of battery banks at current prices (2017) is not a reasonable alternative. But, as prices decrease, more than just the distribution network and consumers will benefit from the integration of the battery storages in the distribution grid.	
<i>Keywords:</i> battery storages, distribution network, energy production, power saving, impact on the grid.	

Sisukord

Lõputöö ülesanne.....	7
Teema põhjendus	7
Töö eesmärk.....	7
Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu.....	7
Lähteandmed.....	8
Lõputöö konsultandid (vajadusel).....	8
Essõna	9
Sissejuhatus.....	10
1. Akupankade teoreetiline integreerimine Eesti jaotusvõrku Elektrilevi näitel	13
2. Enimlevinud akupankade tehnoloogiad mujal maailmas	18
2.1. Plii-happe akud (lead-acid batteries).....	18
2.2. Liitium-ioonakud (lithium-ion batteries)	19
2.3. Naatrium-väävelakud (sodium-sulfur batteries)	21
2.4. Redoks-läbivooluakud (redox flow batteries).....	22
2.5. Kirjeldatud akupankade võrdlused.....	23
3. Akupankade valiku alused ja sobivus Eesti tingimustesse	25
3.1. Temperatuur.....	26
3.2. Akupanga tühjaklaadimise piirmäär	27
3.3. Akude täis- ja tühjaklaadimise vool	28
3.4. Pinge ja sageduse piirväärtused	28
3.5. Järeldused.....	29
4. Akupankade võimalikud tehnilised nõuded liitumisel jaotusvõrku	32
5. Akupankade integreerimisest võimalikud huvitatud osapooled.....	37
5.1. Võrguettevõtted.....	38
5.2. Tarbijad ja tootjad	38
5.3. Pangad ja investorid.....	39
5.4. Ministeeriumid ja ametkonnad.....	39
5.5. Tehnoloogia tootjad ja müüjad	40
5.6. Teised huvitatud osapooled.....	41
6. Akupankade mõju jaotusvõrgule.....	42
6.1. Elektrivõrgu kadude ja reserveeriva võimsuse vähenemine	42
6.2. Sageduse ja pinge reguleerimine.....	43
6.3. Koormuse reguleerimine.....	44
6.4. Iseseisva (<i>Off-Grid</i>) võrgu rajamise võimalus	46
6.5. Mõju jaotusvõrgu kulutustele.....	46
7. Akupankade mõju tootjatele ja lõpp-tarbijatele (ja teistele osapooltele)	47
7.1. Mõju lõpp-tarbijatele	47
7.2. Mõju elektritootjatele.....	48
7.3. Mõju ettevõtlusele.....	50
7.4. Mõju üldsusele	51
7.5. Mõju valituse poolt seatud eesmärkidele	51
8. Finantsanalüüs.....	52

8.1.	Finantsanalüüs perioodile oktoober – veebruar	53
8.2.	Finantsanalüüs perioodile märts – september	55
8.3.	Võrdlused.....	56
9.	Järeldused	59
	Lõputöö kokkuvõte	62
	Kasutatud kirjandus	66
	Lisad	71
L.1.	Originaaltabelid ja -joonised.....	72

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema: **Akupank Eesti jaotusvõrgus.
Kelle võit: tarbija ja/või
jaotusvõrgu oma?**

Üliõpilane: **Marii Uduvee, 153786AAVM**

Eriala: **Elektroenergeetika**

Lõputöö liik: **Magistritöö**

Lõputöö juhendaja: **Elina Rebecka Rikkas**

Lõputöö ülesande kehtivusaeg:

Lõputöö esitamise tähtaeg: **05.01.2018**

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Instituudi direktor (allkiri)

Teema põhjendus

Akupankade integreerimine Eesti jaotusvõrku avaldab mõju nii jaotusvõrgule endale kui ka tarbijatele. Need mõjud on seotud elektrienergia tootmise ja edastamisega, elektrivõrgu efektiivsuse suurenemisega, aga ka kulude vähenemisega. Seetõttu antud teema on täna aktuaalne ning töö autor püüab anda vastuseid, kelle jaoks on akupankade integreerimine jaotusvõrku kasulik – kas tarbijatele, jaotusvõrgule või mõlemale osapooltele.

Töö eesmärk

Antud töö eesmärgiks on uurida, kas eraldiseisvate akupankade integreerimine on Eestis mõistlik ning kellele on selline lahendus kasulik. Samuti uurida, kas osapoolteks on ainult tarbija ja jaotusvõrk või on neid rohkem, ning mida teha, et kasu saaksid kõik osapooled.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu

- Kelle jaoks on eraldiseisvate akupankade integreerimine kasulik? Kas jaotusvõrgule või tarbijale? Või mõlemale? Või on osapooli rohkem?
- Miks tuleks kasutada akupankasid jaotusvõrgus?
- Millised akupankade tehnoloogiad sobivad Eesti kliimasse?

- Milline on akupunkade mõju jaotusvõrgule? Milline tarbijale? Milline teistele osapooltele?

Lähteandmed

Tööks vajalikud lähteandmed saadakse peamiselt informatsiooni otsingutega Internetist, kirjandusest (sh teadusartiklitest) ja suhtlusel teiste seotud osapooltega (sh juhendaja).

Lõputöö konsultandid (vajadusel)

Konsultant nimi (allkiri, kuupäev)

Konsultant nimi (allkiri, kuupäev)

Eessõna

Käesoleva magistr töö teema on välja pakkunud doktorant Elina Rebecka Rikkas Tallinna Tehnikaülikooli Inseneriteaduskonnast. Lõputöö teema on ajendatud elektritootjate võrguga ühendamise märgatavast kasvust ja asjaolust, et aina enam on hakatud ülemaailmselt integreerima akupankasid elektrivõrku eraldiseivalt.

Töö käigus uuriti akupankade vajadust Eesti jaotusvõrgus, maailmas enimkasutatud akupankade tehnoloogiaid, nende valiku aluseid, akudest huvitatud osapooli, akupankade mõju erinevatele osapooltele ja tehnilisi nõudeid. Põhilised andmed saadi teemaga seotud teaduslikest artiklitest. Konsultatsioonidega abistas juhendaja Elina Rebecka Rikkas.

Autor tänab kõiki lõputöö koostamisel abistanud ja toetanud isikuid.

Marii Uduvee

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Tallinna Tehnikaülikool

Sissejuhatus

Ülemaailmselt integreeritakse elektrivõrku aina enam taastuvatel energiaallikatel põhinevaid elektrijaamasid. Suurenenud päikeseelektrijaamade rajamine on põhjustanud akupankade tehnoloogiate suurema kasutuselevõtu ja arengu. Sellest tulenevalt on jõutud järeldusele, et akupangad ei ole ainult energiasalvestussüsteemid, vaid midagi enamat. Tulevikus nähakse energiasalvestussüsteemide suurt potentsiaali võrgus eraldiseisvalt.

Lõputöö eesmärgiks on uurida akupankade teoreetilist integreerimist Eesti jaotusvõrku, andes ülevaate võimalikest tehnoloogiatest, valiku alustest, tehnilistest nõuetest¹ ja mõjust. Akupankade maksumuse vähenedes muutub nende võrku integreerimine aina tasuvamaks. Tulevikus võib nende paigaldamine omada nii võrgule kui ka tarbijatele väga mitmekülgset mõju. Oluline on neid mõjusid hinnata, et olla kursis tehnoloogiate arenguga ja anda hinnang, kas ja millal sellise alternatiivi rakendamine on kasulik.

Lisaks, tuleviku vaates on Euroopa Liidus ja Eestis vastu võetud mitmeid energiapoliitilisi otsuseid ja töötatud välja arengukavasid, mille täitmiseks on vaja uurida ja kasutusele võtta uudseid lahendusi. Akupankade integreerimine jaotusvõrku võib olla üheks võimalikuks lahenduseks nende eesmärkide saavutamiseks.

Euroopa liidu riigid on välja töötanud ning vastu võtnud energiakavad aastani 2030, eesmärgiks saavutada konkurentsivõimeline, turvaline ja jätkusuutlik energiasüsteem. Pikaajalise eesmärgina oluliselt vähendada kasvuhoonegaaside teket aastaks 2050.

Euroopa Liidu energiastrateegia näeb ette aastaks 2030 summaarsed eesmärgid: [1]

- 40% vähem kasvuhoonegaaside heitkoguseid võrreldes aastaga 1990.
- Taastuvenergia osakaalu suurenemine vähemalt 27%-ni energia lõpptarbimisest.
- Energiatõhususe suurenemine 27% võrra.

Vastavalt Euroopa Liidu energiastrateegiale on Eestis välja töötatud ning Vabariigi Valitsuse poolt kinnitatud Energiamaajanduse arengukava aastani 2030 (ENMAK). ENMAK 2030 on kirjeldatud Eesti energiapoliitika eesmärgid aastani 2030, energiamaajanduse visioon aastani 2050, ENMAK 2030 üld- ja alaeesmärgid ning meetmed nende saavutamiseks. [2]

¹ Tehnilistest nõuetest annab põhjalikuma ülevaate teine magistritöö (kevad 2018).

ENMAK 2030 kinnitamisega võeti Eestis vastu järgmised energiapoliitika eesmärgid aastaks 2030:

- Kasvuhoonegaaside heitkoguste vähenemine energiasektoris moodustab vähemalt 70% võrreldes aastaga 1990, ning aastaks 2050 on reaalne saavutada kasvuhoonegaaside heitkoguste vähenemine >80%.
- Taastuvenergia osakaal energia lõpptarbimisest moodustab 50% sisemisest elektri lõpptarbimisest.
- Kütusevabade energiaallikate osakaal lõpptarbimisest moodustab aastal 2030 vähemalt 10%.
- Uued hooned vastavad liginullenergiahoone energiatõhususarvu väärtusele.

Seatud eesmärkide saavutamiseks peab taastuvate energiaallikate kasutuselevõtt märgatavalt suurenema. Ülemaailmselt kasvas aastal 2016 taastuvatest energiaallikatest (va. hüdroenergia) toodetud energia ligi 14,1%. Poole sellest kasvust moodustasid tuuleelektrijaamad ja kolmandiku päikeseelektrijaamad. [3] Tuule- ja päikeseelektrijaamade poolt toodetava energia prognoosimine on aga keeruline ning nende poolt toodetav elektrienergia ebastabiilne. Seetõttu on taastuvatel energiaallikatel põhinevate elektrijaamade mõju võrgule märgatavalt suur. Lisaks, aastal 2019 toimub avalikus sektoris üleminek liginullenergiahoonete ehitamisele ja aastal 2021 peavad kõik ehitatavad hooned olema liginullenergiahooned [4]. Sellega kasvab veelgi surve võrgu paremaks juhtimiseks.

Üheks võimalikuks lahenduseks on akupankade integreerimine jaotusvõrku, mille positiivseid külgi antud lõputöös uuritakse. Analüüsitakse, kes ja millist kasu saavad, kui paigaldada akupangad elektritootja või tarbija lähedusse. Kokkuvõttes jõutakse järeldusele, kas akupankade integreerimine on üldse mõistlik alternatiiv ja kes võivad nende integreerimisest kõige enam.

Esimeses peatükis antakse ülevaade põhjustest, miks oleks vaja akupankasid Eesti jaotusvõrguga liita.

Teises peatükis kirjeldatakse hetkel maailmas enimlevinud akupankade tehnoloogiaid: liioonakud, naatrium-väävelakud, redoks-läbivooluakud, plii-happeakud. Tuuakse välja nende peamised tugevad ja nõrgad küljed, võimalikud kasutusvaldkonnad, tuleviku arengusuunad, maksumused ja teostatakse omavaheline võrdlus.

Kolmandas peatükis selgitatakse akupankade valiku aluseid ja sobivust Eesti tingimustesse. Akupankade valikul tuleb lähtuda võimalikult paljudest muutujatest, mis kõik omavad mõju tehnoloogia efektiivsusele ja elueale. Arvestada tuleb akupankadele omaseid näitajaid, kuid oluline roll on asukohal ja akupanga integreerimise eesmärgil.

Neljandas peatükis tuuakse akupankade võimalikud tehnoloogilised nõuded liitumisel jaotusvõrku ja võimalikud muudatused seaduses. Hetke seisuga ei ole akupangad seadustes ega määrustes defineeritud, neile ei ole konkreetseid nõudeid seadustega või määrustega paika pandud. Sellest tulenevalt pakutakse välja võimalikke tehnoloogilisi nõudeid, millele akupangad peaksid vastama. Lahenduste pakkumisel toetutakse peamiselt olemasolevatele seadustele, määrustele ja eksperthinnangutele.

Viiendas peatükis uuritakse, kes on akude võrku integreerimisest huvitatud osapooled ja millest tulenevad nende peamised huvid.

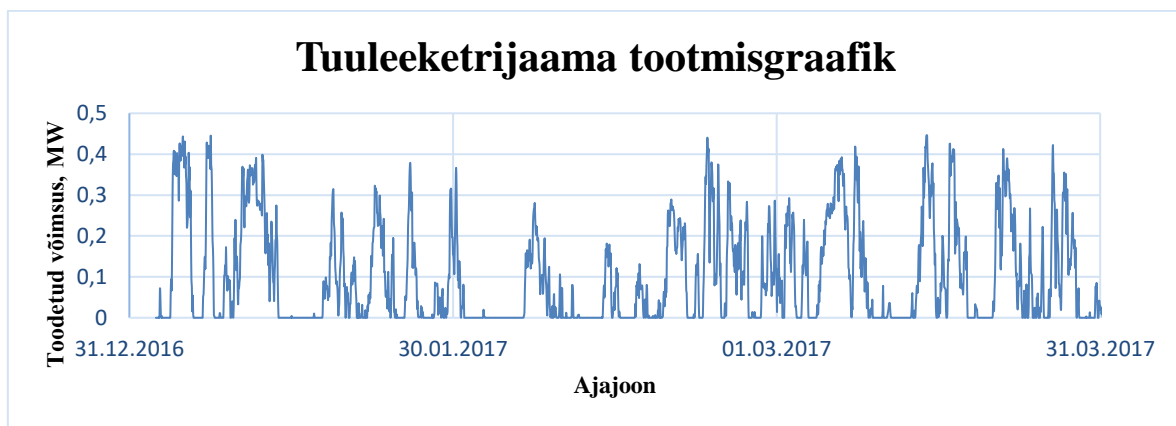
Kuuendas ja seitsmendas peatükis antakse ülevaade akupankade mõjust jaotusvõrgule, tootjatele, lõpp-tarbijatele ning teistele osapooltele. Täpseid mõjusid on väga palju erinevaid, aidates parandada elektrikvaliteeti, võrgu töökindlust, vähendada kadusid, samuti aidates saada suuremat majanduslikku kasu, arendada ettevõtlust, jmt.

Kaheksandas peatükis teostatakse finantsanalüüs, mille käigus selgub, kas akupankade paigaldamine on majanduslikult kasulik või ei, ja millal ja millistes tingimustes oleks võimalik hakata suuremat kasu saama.

Lõputöö viimaste osadena on tehtud järeldus ja töö kokkuvõte. Järelduses tuuakse põhjalik ülevaade, kelle jaoks on akupankade jaotusvõrku integreerimine kõige kasulik ja millistel põhjustel on see kasulik või kahjulik. Kokkuvõttes on lühiülevaade kogu lõputööle.

1. Akupankade teoreetiline integreerimine Eesti jaotusvõrku Elektrilevi näitel

Vastavalt Euroopa Liidus kehtestatud energiapoliitilistele eesmärkidele ja Euroopa Liidu riikides vastu võetud arengukavadele toimub järgneval mitmekümnel aastal areng kasvahoonegaaside vähenemise suunal. Ettevõtetud eesmärkide saavutamiseks integreeritakse võrku aina enam elektrijaamasid, mis toodavad energiat taastuvatest energiaallikatest (Eestis peamiselt tuuleenergia ja päikeseenergia). Energiasüsteemi kõige tähtsamaks reegliks on, et ideaalolukorras peab tarbimine ja tootmine olema igal ajahetkel tasakaalus. Kui baaskoormust katvad koostootmisjaamad ja soojuselektrijaamad ning tipukoormuseid katvad gaasiturbiinjaamad suudavad elektrit toota stabiilselt, siis taastuvatest energiaallikatest (päikeseenergia ja tuuleenergia) elektri tootmine on ebastabiilne ja ettearvamatu. Joonisel 1.1 on toodud tuuleelektrijaama tootmisgraafik, mis iseloomustab tuuleelektrijaama toodangu kõikumist erinevatel ajahetkedel, tõendamaks, kui ebastabiilne võib olla ühe tuuleelektrijaama tootmine. Mõnel päeval elektrijaam ei tooda üldse ja mõnel päeval toodetakse täisvõimsusel, kuid stabiilset elektritootmist ei ole.



Joonis 1.1 Tuuleelektrijaama tootmisgraafik (reaalaja mõõtmiste põhjal programmist Vtrin)

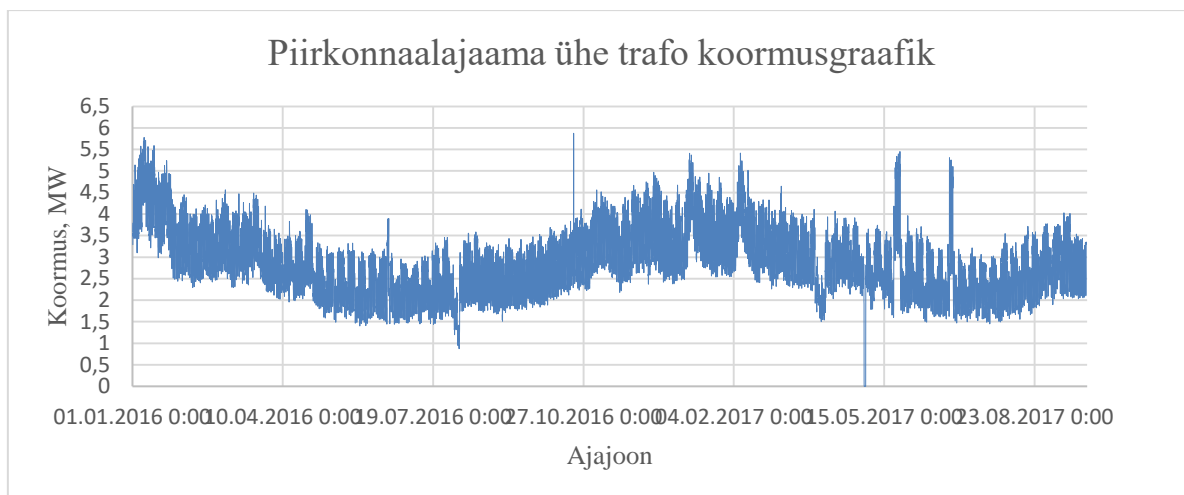
Taastuvate energiaallikate kaootilisusest tulenevalt võivad tekkida elektrivõrgus probleemid näiteks, pinge ja sagedusega. Sellest lähtuvalt on võimalikuks lahenduseks välja pakkuda akupankade integreerimise tootjate lähedusse (vahetusse lähedusse või lähimasse alajaama). Akupangad võimaldavad reguleerida jaotusvõrgus nii pingekõikumisi kui ka sagedust.

Kuid akupankade vajadus Eesti jaotusvõrgus ei ole ainult pinge ning sageduse reguleerimiseks. Akupankade integreerimisega võidakse tagada rahaline kokkuhoid. Järgmiseks analüüsitakse elektrijaama liitmist Eesti jaotusvõrku. Üle 200 kW elektrijaamade liitumisel jaotusvõrguga on

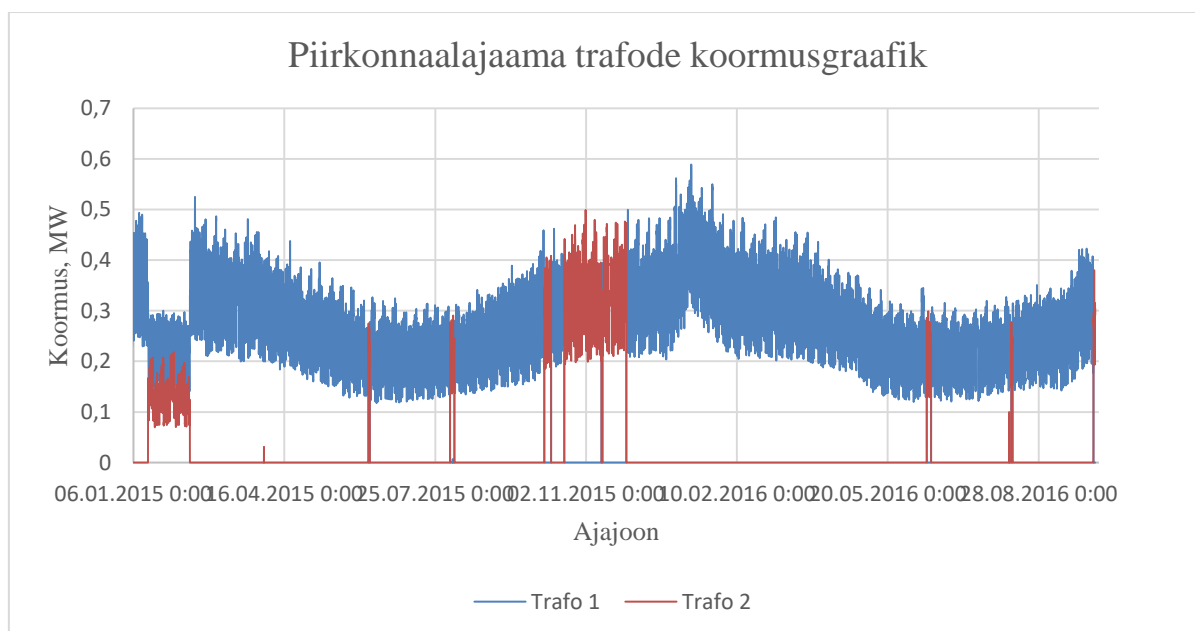
tihtipeale vaja teostada võrgutugevdusi, vastavalt liitumispingele, kas keskpinge- või madalpingevõrgus. Põhjuseks on peamiselt pingete väljumine lubatud piiridest, mis on +-8% nimipingest. Antud juhtudel võib olla vajalik paigaldada mitmete kilomeetrite pikkuses maakaablit või välja vahetada õhuliini. Ebamõistlikult suures koguses võrgu tugevdamisele lisaks võib osutada vajalikuks ka üks kuni kaks järku suurema trafo paigaldamine keskpinge-madalpinge alajaama. Kui tootjaid on aga palju, tuleb samuti piirkonnaalajaamas näha ette trafode vahetus. Nende trafode maksumus on tunduvalt kõrgem ja võib ulatuda mitmete sadade tuhandete eurodeni. Sellistel juhtudel oleks põhjendatud akupankade integreerimine jaotusvõrku.

Samuti on aktuaalne, et toodetav elektrienergia tarbitakse jaotusvõrgus, ilma, et see liiguks põhivõrgu suunal. 2017 aasta seisuga kehtestatud Elering AS liitumistingimused näevad ette, et tootmistingimuste muutmine olemasoleval pingestmel tingib liitumispunktide ülemineku 110 kV pingele. Kuna tootjate liitumised on kulupõhised, siis läheb trafode ost ja kommertsmõõtepunktide rajamise kulu liituja kalkulatsiooni. Trafode ostu kulu võib olla vahemikus 40 000 – 500 000 €, kommertsmõõtepunktide rajamine suurusjärgus 140 000 €, lisaks tuleb veel menetlustasu ja liitumistasu kokku 12 200 €². Kuigi võrguettevõtjate areng ja tegutsemine toimub selles suunas, et tootmis- ja tarbimistingimusi oleks võimalik muuta ka olemasoleval pingestmel, ei kehti see olukordades, kus tekib vajadus põhivõrgu trafode vahetuseks või põhivõrgu tugevdusteks. Paremaks ülevaateks on järgnevatel joonistel nr 1.2 ning 1.3 toodud kahe piirkonnaalajaama koormused.

² Andmed seisuga 2017.a.



Joonis 1.2 Ühe vabalt valitud piirkonnaalajaama ühe trafo koormusgraafik (SCADA reaalajamõõtmiseid edastavast programmist Vtrin)



Joonis 1.3 Ühe vabalt valitud piirkonnaalajaama ühe trafo koormusgraafik (SCADA reaalajamõõtmiseid edastavast programmist Vtrin)

Joonisel 1.2 on näidatud piirkonnaalajaam, mille koormusmiinimum on ligi 1,5 MW. Joonisel 1.3 on toodud välja piirkonnaalajaam, mille koormusmiinimum on ligi 0,13 MW. Kui elektrivõrguga soovib liituda näiteks 300 kW elektrijaam, siis esimese piirkonnaalajaama koormusgraafiku põhjal tarbitaks elektrijaama poolt toodetud võimsus ära jaotusvõrgus. Teise piirkonnaalajaama puhul hakkaks toodetav võimsus liikuma põhivõrgu suunal, mis võib endaga kaasa tuua eelpool nimetatud suured lisakulutused. Sellises olukorras võib näha vajadust paigaldada võrku akupank, mis hoiaks ära võimalikud kulud seoses elektrienergia

põhivõrgusuunalise liikumisega. Antud kulud on ka põhjuseks, miks mitmed üle 200 kW elektrijaamad jäävad rajamata.

Järgmise põhjusena, miks nähakse vajadust integreerida akupankasid Eesti jaotusvõrku on *off-grid*³ süsteemid. Vaidluse võib tekitada arusaam, kas see on või ei ole jaotusvõrgu osa, kuid sellised süsteemid võivad osutada vajalikuks saarte peal, kuhu on väga kallis mandrilt elektrit transportida. Teisest küljest, esineb olukordi, kus mõni tarbimiskoht asub olemasolevast võrgust nii kaugel, et akupankade, päikesepaneelide ja diisलगeneraatori kombinatsioon on mõistlik lahendus nii tehnilises, kui finantsilises vaates.

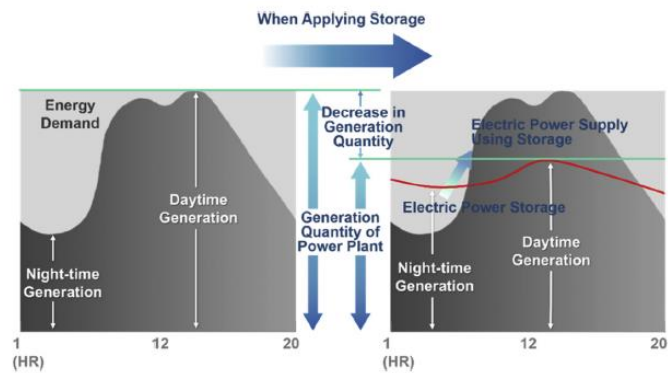
Kuid akupankade paigaldamine jaotusvõrku ei ole tingimata vajalik ainult tulenevalt taastuvatel energiaallikatel põnevate elektritootjate poolt tekitavatest võrguprobleemidest. Pinge ja sageduse reguleerimine on küll võrgu seisukohalt väga vajalik, kuid akupangad aitavad tagada ka energiajulgeolekut ja varustuskindlust. Varustuskindlus võib olla eriti oluline just suurtarbijatele, kellele on oluline võimalikult vähene katkestuste arv.

Energiasalvestussüsteemid on lisaks eelpool mainitule olulised ka tipukoormuste katmiseks ja seda nii jaotusvõrgu kui ka suurtarbijate seisukohalt. Integreerides akupankasid suurtarbijate lähedusse, on võimalik energiat salvestada kui energia börsihind on madal, ning müüa seda võrku, kui hind on kõrge. Tipukoormuste ajal on elektri hind ka tunduvalt kõrgem. Jaotusvõrgus kasutatakse tipukoormuste katmiseks peamiselt gaasiturbiine, mida saaks asendada akupankadega [5]. Tipukoormuste katmist akupankade poolt toodetava energiaga loetakse erinevate allikate sõnul kõige praktilisemaks akude kasutamise võimaluseks.

Joonise 1.4 [6] vasakpoolsel pildil on toodud üks tavapärase koormusgraafik, kus öösel tuleb vähem toota energiat ning päeval ajal, kui koormus on suurem, peab ka elektritootmine vastama sellele. Parempoolne graafik annab ülevaate olukorrast, mis juhtub, kui võrku integreerida akupankasid. On näha, et baaskoormust katvate elektrijaamade võimsus päeva lõikes ühtlustub. Öösel tuleb toota rohkem energiat, et akupankadesse salvestada ja päeval ajal tuleb akupankadest saadava energia arvelt vähem elektrit toota. Akupankade kasutamine tipukoormuse katmiseks suurendab jaotusvõrgu stabiilsust läbi paindliku tootmise, annab

³ *Off-Grid* süsteem on elektrivõrgust eraldatud elektrisüsteem, mis toimib iseseisvalt ja kus toodetakse vajalik elektrienergia kohapeal (tavaliselt päikesepaneelide, akupankade ja diisलगeneraatori ühendussüsteem). *On-Grid* süsteemil on aga seevastu olemas ühendus elektrivõrguga. [41]

võimaluse energiatootmise ja salvestamisega kiirelt reageerida, seeläbi suurendades võrgu pingekvaliteeti ning julgeolekut.



Joonis 1.4 Tipukoormuste katmine akupankadega [6]

Kokkuvõttes on vajalik uurida akupankade integreerimist Eesti jaotusvõrku, sest nende mõju on väga mitmekülgne. Järgmises peatükis tutvustatakse lähemalt maailmas enamlevinud akupankade tehnoloogiaid.

2. Enimlevinud akupankade tehnoloogiad mujal maailmas

Selles peatükis antakse lühike ülevaade maailmas enim kasutusel olevatest akupankade tehnoloogiatest ja tulevikupotentsiaalidest. Peatüki viimases lõikes tuuakse välja erinevate tehnoloogiate võrdlus, mille põhjal tehakse kindlaks kõige arenenumad ja tasuvamad akupankade tehnoloogiad.

2.1. Plii-happe akud (lead-acid batteries)

Gaston Plante leiutas aastal 1859 esimese pliiaku, mida on arendatud kasutamaks mitmetel erinevatel eesmärkidel alates autoakudest kuni lõpetades energiasalvestussüsteemidega. Pliiakude kasutamine on ülemaailmselt väga levinud tänu nende tootmise lihtsusele. Antud akud on mahtuvusega mõnest kW kuni mõnekümne MW-ni, keskmise efektiivsusega (>70%) ja elueaga vahemikus 3-15 aastat, lisaks on nende maksumus üldjuhul madalam kui teistel akupankadel. Samuti on aku komponendid (eriti plii) taaskasutatavad või ümber töödeldavad, infoallikates on viidatud, et isegi 97% kasutatud akudest saab taaskasutada või ümber töödelda. Kuid nõrkuseks peetakse pliiakude piiratud eluiga. Suure tühjaklaadimise korral tekib negatiivse elektroodi pinnale plii-sulfaadi kiht, mis ei kao enam täielikult laadimistsükli käigus. Tekkiv kiht vähendab elektroodide pinda, kus toimuvad elektrokeemilised reaktsioonid, seeläbi vähendades tsüklite eluiga/kestvust. Teisalt, aku laadimine suurte vooludel suurendab vesiniku teket, mis omakorda vähendab laadimis/tühjaklaadimise tsüklite efektiivsust ja seetõttu tekib plahvatusoht. [6]

Pliiakude täiustamiseks testitakse süsiniku kasutamist, mis pikendaks pliiakude eluiga. Süsinikku on testitud negatiivsetes elektroodides, sest väike kogus süsinikku negatiivses elektroodis vähendab plii-sulfaadi ($PbSO_4$) akumulatsiooni elektroodi pinnal. Katsetatakse ka negatiivse elektroodi täielikku asendamist suure pinnaga süsinikuga (antud tehnoloogiat kutsutakse kui plii-süsiniku asümmeetriliseks süsteemiks), mis vähendab $PbSO_4$ lisandumist, sest enam ei toimu keemilist reaktsiooni negatiivsel elektroodil, seeläbi pikendades akupanga eluiga. [6]

Ultra-akud on edasiarendus pliiakude asümmeetrilisest süsteemist. Sellises süsteemis on negatiivseks elektroodiks plii-elektrood koos paralleelselt ühendatud modifitseeritud süsiniku elektroodiga ja pliioksiid (PbO_2) kui positiivne elektrood. Selline konfiguratsioon tagab

suurema mahtuvuse ja tunduvalt pikema aku eluea, võrreldes traditsioonilise plii-akuga. Ultra-aku tühjaks- ja täislaadimise efektiivsus kasvab kuni 50-60% ja tsüklite arv on ligi 17 000 korda. [6]

Kuigi pliiakude areng on olnud märgatav, on murekohaks siiski akude kõrge maksumus ja tühjakslaadimise kiirus. Allikate andmetel on ultra-akude süsteemi maksumuseks ligi 450 €/kWh, mis on tunduvalt kõrgem kui traditsioonilise plii-akude süsteemi maksumus, mis on ligi 200 €/kWh. Maksumust oleks võimalik vähendada akude tootmise suurendamisega. Kui pliiakude ultra-akude hind langeb ja leitakse lahendus tühjakslaadimise kestvuse probleemidele, siis võivad need akud olla paljulubavad just suuremates mahtudes võrku ühendamiseks. [6]

Tabelis 2.1 on toodud ülevaatlük kokkuvõte plii-akude väljundvõimsusest, elueast, maksumusest, eelistest ja puudustest.

Tabel 2.1 Kokkuvõtlik ülevaade plii-akudest [7]

Spetsifikatsioonid ja töökarakteristikud					Eelised	Puudused
Suurus / struktuur	Väljundvõimsus	Efektiivsus (%)	Eluiga (a)	Maksumus		
1-1000 A h, energiatihedus: 30-50 W h/kg	Mõni kW kuni 10-ned MW	70-90	3-15	170-350 €/kWh, ultra- akude süsteem 450 €/kWh	<ul style="list-style-type: none"> * Modifitseeritud süsiniku kasutamine negatiivse elektrodina suurendab kuni 50-60% aku tsüklite eluiga (kuni 17 000 tsüklit). * Tootmise suurenedes väheneb süsteemi maksumus. * Akudel põhinevad suuremahulised energiasalvestus-tehnoloogiad näitavad kõrgemat aastast energiatõhusust: pliiakudesse taastuvenergia salvestamise ulatus kuni 85%. * Arenenud tehnoloogia. 	<ul style="list-style-type: none"> * Sobilik pigem rakendusteks, mis nõuavad lühikeseajalist tühjenemist. * Plii mürgisus. * Väävelhape (H₂SO₄) vähendab elektrokeemiliste protsesside efektiivsust. * Elektrolüüdi säilimiseks on vajalik vee lisamine. * Plahvatusohtlikkus seoses vesiniku tekkega. * Suure maksumuse tõttu on raske kasutada suuremahuliseks energiasalvestamiseks.

2.2. Liitium-ioonakud (lithium-ion batteries)

Li-ioonakud on ühed enimkasutatavad akud maailmas. Ka nendes akudes nähakse potentsiaali suuremahuliseks energiasalvestamiseks. Võrreldes teiste levinud akupankade tehnoloogiatega

on just li-ioonakude näitajad ühed parimad – kõrge energiatihedus, energiaefektiivsus ja stabiilsus. [6]

Tänu kõrgele energiatihedusele on li-ioonakud kergemad ja väiksemad, mis võimaldavad neid kasutada ka piiratud tingimustes (nt piiratud vaba ruum või kaalust tulenevad piirangud). Lisaks, on nendel akudel väga madal iseenesliku tühjakslaadimise näitaja – alla 8% kuus. Li-ioonakude tsüklite eluiga on üle 1000 tsükli ja nende töötemperatuur on väga laiaulatuslik (- 20 kuni 60°C laadimisel ning - 40°C kuni 65°C tühjakslaadimisel). [6]

Nagu kõik teised akupankade tehnoloogiad on ka li-ioonakude ehitamine väga kulukas. Erinevate allikate väitel on kitsaskohtadeks piiratud termiline taluvus ja asjaolu, et antud tehnoloogia vajab kaitset ülelaadimise ja alalaadimise eest. Li-ioonakud töötavad ohutult ainult mingis kindlas pingevahemikus. Pinge tõustes muutub aku ebastabiilseks, mis võib lõppeda plahvatusena ja põlenguga. [8] [6]

Li-ioonakude kasutamine suuremahuliseks energiasalvestamiseks ja elektrivõrguga liitmiseks omab mitmeid väljakutseid. Senimaani on üheks takistuseks endiselt olnud nende maksumus (kuni 450 €/kWh). Samuti nõuab suuremat tähelepanu temperatuurijuhtimine, mis on vajalik, et neid akusid MW tasemetel võrku liita – sellest otseselt sõltub akupanga tsüklite eluiga. Li-ioonakudes kasutatav elektrolüüt on plahvatusohtlik ja seetõttu tuleb tagada akupanga temperatuuri stabiilsus. [6]

Tabelis 2.3 on toodud kokkuvõtlik ülevaade li-ioonakude spetsifikatsioonidest.

Tabel 2.2 Kokkuvõtlik ülevaade li-ioonakudest [7]

Spetsifikatsioonid ja tööarakteristikud					Eelised	Puudused
Suurus / struktuur	Väljundvõimsus	Efektiivsus (%)	Eluiga (a)	Maksumus		
Energiaühedus: 75-200 W h/kg	Mõni kW kuni mõni MW	85-98	5-15	250-450 €/kWh	<ul style="list-style-type: none"> * Sobilik suuremahuliseks energiasalvestamiseks tänu kõrgele energiatihedusele, tsükli stabiilsusele ja energia-efektiivsusele. * Väike iseeneslik tühjakslaadimine (<8% kuus). * Pikk tsükli eluiga (>1000 tsükli). * Lai töötemperatuuri vahemik (-20 kuni 60°C laadimisel ning -40 kuni 65°C tühjenemisel). 	<ul style="list-style-type: none"> * Kõrge maksumus. * Kaitstesüsteemide vajalikkus. * Piiratud soojataluvus.

2.3. Naatrium-väävelakud (sodium-sulfur batteries)

Naatrium-väävelakusid (Na-S) on toodetud enam kui 40 aastat ja neis nähakse samuti väga suurt tuleviku potentsiaali elektrienergia salvestamiseks. Kogu süsteem peab töötama kõrgetel temperatuuridel (300-350°C), et naatrium ja väävel oleksid sulatatud olekus, ja et oleks tagatud efektiivne naatriumi ionide liikumine läbi tahke elektrolüüdi. Elektrolüüdi juhitavuse ja vääveli ning naatriumi vedela oleku tagab isoleeritud kest. Laadimise ja tühjenemise tsüklite efektiivsus ulatub kuni 90%-ni. [6]

Na-S akude pingeste ja energiaefektiivsus on sarnane plii-akudele, kuid Na-S akude tsüklite eluiga on tunduvalt pikem, mis tagab kuni 5 korda suurema energiatiheduse, kui plii-happeakudel. [6]

Kokkuvõttes, on just tahke elektrolüüt see, mis määrab antud akupanga tehnoloogia puhul aku jõudluse ja hinna. Kuna mõlemad elektroodid on vedelas olekus ja otseses kokkupuutes kõrge temperatuuriga on märkimisväärse tähtsusega elektrolüüdi tihendamiseks kasutatav materjal, vältimaks ohtlikke tulekajusid ja plahvatusi. Na-S akude nõrkuseks on, et kuum naatriumsulfit (Na_2SO_3) on väga korrodeeriv terase ja teiste sulamite suhtes ning elektrolüüt on pragunemisohtlik [9]. Peamiseks väljakutseks on töötemperatuuri vähendamine, mis võimaldaks kasutada akude ehitamisel tunduvalt kulutõhusamaid ja vastupidavamaid materjale. Na-S akude puhul arendatakse elektroodide kaitsekihtide ja elektroodide endi ehitust, et tagada madalama töötemperatuuriga Na-S akupangad. [6] Tabelis 2.3 on kokku võetud Na-S akude spetsifikatsioonid.

Tabel 2.3 Kokkuvõtlik ülevaade Na-S akudest [7]

Spetsifikatsioonid ja töökarakteristikud					Eelised	Puudused
Suurus / struktuur	Väljundvõimsus	Efektiivsus (%)	Eluiga (a)	Maksumus		
Energiatihedus: 150-240 W h/kg	0,05 MW - 8 MW	75-90	5-15	250-450 €/kWh	<ul style="list-style-type: none"> * Sobilik kasutamiseks koormuse ühtlustamiseks ja tipukoormuste katmiseks erineva suurusega energiasalvestussüsteemides. * Kõrge energiatihedus. * Arenenud tehnoloogia. * Kõrge efektiivsus ja pikk tsüklite eluiga. 	<ul style="list-style-type: none"> * Sulanud olekus katoodid on kõrgelt korrodeeruvad. * Vajadus kasutada täiendavaid ohutusabinõusid. * Kõrge töötemperatuur 300-350°C. * Kõrge maksumus. * Ohutus seoses kõrge töötemperatuuriga.

2.4. Redoks-läbivooluakud (redox flow batteries)

Suuremahuliseks energiasalvestamiseks arendatakse redoks-läbivooluakusid (Redox flow battery – RFB) või teiste allikate väitel vanaadium-redoksakusid (VR), mille mahtuvus on 10 kW kuni 15 MW. Nende akude sobilikkus suuremahuliseks energiasalvestamiseks seisneb madalamas maksumuses, mobiilsuses (sobilik ka mitte statsionaarseteks lahendusteks), reageerimiskiiruses ja ohutuses. Antud süsteemil on kõrge energiatõhusus (iseegi kuni 85%) ja kasutamise temperatuuriks loetakse 10°C kuni 40°C. Kuna sellel tehnoloogial puuduvad rikastumisega seotud probleemid, on tulemuseks pikk tsükli eluiga ja süsteemi kulude vähenemine. [6] Lisaks on akud madalate hoolduskuludega ja emissioonivabad. [9]

Kuigi antud akusid on täna oma suurepärasele elektrokeemilisele pöörduvusele laialdaselt rakendatud koormuse ühtlustamiseks ja uuritud katkematu toiteallikana (UPS)⁴, on suuremahuliseks energiasalvestamiseks oluline vähendada kulusid. Vanaadium on jätkuvalt kallis ja redoks-läbivooluakude membraan on selle süsteemi kõige kallim komponent, mistõttu sellele otsitakse odavamalt alternatiivi. Teiseks, on leitud, et oluline on arendada süsinikepõhiseid elektroode. Lisaks eelpool mainitule, on vajalik täiustada terve süsteemi ülesehitust, et tagada elektrokeemiliste protsesside kõrge efektiivsus ja süsteemi ehitamise kulutõhusus. [6] Tabelis 2.4 on toodud välja VR-akude spetsifikatsioonid.

Tabel 2.4 Kokkuvõtlik ülevaade redoks-läbivooluakudest [7]

Spetsifikatsioonid ja tööarakteristikud					Eelised	Puudused
Suurus / struktuur	Väljundvõimsus	Efektiivsus (%)	Eluiga (a)	Maksumus		
Energiatihedus: 10-50 W h/kg	0,01 - 15 MW	75-85	5-15	130 - 900 €/kWh	<ul style="list-style-type: none"> * Madal töötemperatuur. * Väga hea elektrokleemiline jõudlus. * Süsteemi madalam maksumus. * Kõrge tühjaklaadimise piirmäär ning reageerimiskiirus. * Kõrgem ohutuse tase. * Sobivad hästi koormuse tasandamiseks ja statsionaarseteks rakendusteks. * Lihtsalt uuendatav. 	<ul style="list-style-type: none"> * Madal energiatihedus. * Elektrilised lekkevoolud. * Korrosioon. * Peamiseks väljakutseks on üldine süsteemi ülesehitus: vanaadiumi kontsentratsioon elektrolüüdis ja selle mõju elektrokeemilisele jõudlusele, laengu- ja energiatihedus, kulutõhusus.

⁴ UPS – ehk katkematu toiteallikas, mille eesmärk on kaitsta elektritarbijaid erinevate elektrivõrgus esinevate probleemide eest.

2.5. Kirjeldatud akupankade võrdlused

Järgnevalt on toodud maailmas enimlevinud akupankade tehnoloogiate võrdlus. Kõikidel akupankadel on spetsiifilised tugevused ja nõrkused ning arengupotentsiaalid. Tabelis 2.5 on enimlevinud akupankade funktsionaalsused [10]. Tabelist järeldub, et kõik vaadeldavad akupankade tehnoloogiad on väga universaalsed ja suudavad täita mitmeid ülesandeid. Samas, igal akul leidub ka nõrgem külg (akupankade vähem sobilikud küljed on tabelis märgitud kollasega). Kokkuvõttes on iga funktsionaalsuse täitmiseks rohkem ja vähem sobilikke akude tehnoloogiaid.

Tabel 2.5 Maailmas enimlevinud akupankade funktsionaalsused [10], (ingliseelne originaaltabel lisas nr 1)

Funktsionaalsus	Plii-happe akud (Pb)	Liitium-ioonakud (Li-Ion)	Naatrium-väävelakud (Na-S)	Redoks-läbivooluakud (RFB)
Koormuse juhtimine	●	●	●	●
Taastuvate energiaallikate võrku integreerimine	●	●	●	●
Võrguinvesteeringute edasilükkamine	●	●	●	●
Primaarreguleerimine	●	●	●	●
Sekundaarreguleerimine	●	●	●	●
Elektrisüsteemi käivitamine	●	●	●	●
Pinge reguleerimine	●	●	●	●
Võimsuse kvaliteet	●	●	●	●

Sobilik ● Vähem sobilik ●

Kõikide akupankade tehnoloogiatel on erinevad omadused, tugevused ja nõrkused. Üheks oluliseks erinevuseks on energiatihedus, näiteks redoks-läbivooluakudel ja plii-akudel on suhteliselt madal energiatihedus. Li-ioonakud ja Na-S akud on seevastu aga väga kõrge energiatihedusega.

Akude väljundvõimsus võib olla mõnest kW-st kuni kümnete MW-ni. Energiaefektiivsuse poolest on esimeste seas Li-ioonakud, erinevate allikatel põhinedes isegi kuni 98%. Kõikide vaadeldud akude energiaefektiivsus ületab 70%.

Akupankade ülevaatlikes tabelites on toodud kõikide akupankade elueaks kuni 15 aastat. Mitmete allikate põhjal võib akupankade eluiga ulatuda kuni 20 aastani. Eestis planeeritakse võrku ette kuni 40-ks aastaks. Mistõttu investeeringute planeerimisel tuleb arvestada kahekordse investeeringuga. Akupankade võrku integreerimise kogemus on maailmas väike ja on keeruline hinnata, millised investeeringud on akupankade elueal ja eluea möödudes

vajalikud. Sellest tulenevalt on järgmiseks 40-ks aastaks akupankade võrku integreerimise planeerimine ja seotud kulude kalkuleerimine raskendatud.

Kokkuvõttes, on akupankade kõige suuremaks puuduseks täna kõrge maksumus. Maksumuse kõikumine oleneb akupanga tehnoloogiast. Igal akupangal on edasiarendusi energiaefektiivsuse tõstmiseks, kuid paremate näitajatega arenenud tehnoloogia hind on ka kõrgem. Üldjuhul on plii-akud kõige odavamad, seejärel liitium-ioonakud ja naatrium-väävelakud. Kõige kallim tehnoloogia on läbivooluakudel.

Järgnevalt on toodud täpsustav tabel (vt tabel 2.6) 2014 aastal maailmas kehtinud hindadest ning 2030 aastaks prognoositud hinnalangusest: [11]

Tabel 2.6 2014 aastal teostatud optimistlik akupankade hinna ennustus aastaks 2030 [11], (inglisekeelne originaaltabel lisas nr 1)

Akupanga tehnoloogia	Aasta	Efektiivsus, %	Salvestussüsteemi maksumus, EUR/kWh	Tegevuskulud, EUR/kW	Tsükli eluiga, Tuhad	Akupanga eluiga, a
Li-ioon	2014	85%	375	10	3	12,5
	2030	88%	200	10	6,5	12,5
Na-S	2014	78%	500	35	7,5	12,5
	2030	85%	80	35	7,5	12,5
Läbivooluaku	2014	68%	300	25	10	20
	2030	73%	70	15	15	20
Plii-aku	2014	78%	100	6	1	10
	2030	81%	70	6	3	10

Tabelis 2.6 on näidatud tulemused 2014 aastal läbi viidud uuringust, kus analüüsiti energiasalvestustehnoloogiate võimalikke hinnamuutuseid aastatel 2014-2030. Tabelist väljendub selgelt, et aastaks 2030 väheneb akude maksumus märgatavalt. Uued ja täiustatud tehnoloogiad parandavad kindlasti ka akude efektiivsust ja tsükli eluiga. Tehnoloogiate hinnad langevad akude kasutatavuse suurenedes. Näiteks li-ioonakudel on väga lai kasutamiskond, millest tulenevalt loetakse nende tuleviku potentsaali kõige suuremaks. Akupankade hinnalangus on ka mõningaselt sõltuvuses päikesepaneelide hinnaga, mida rohkem langeb päikesepaneelide hind, seda rohkem paigaldatakse „päikesepaneel + akupank“ süsteeme, mis samuti avaldab positiivset mõju energiasalvestustehnoloogiate hinnale.

Kokkuvõttes, teoreetiliselt kõiki mainitud akupankade tehnoloogiaid on võimalik eraldiseisvalt võrku integreerida. Hetkel on kõige suuremaks puuduseks akupankade hind, mis iga-aastaselt langeb.

Järgmises peatükis keskendutakse akupankade valiku alustele ja sobivusele Eesti tingimustesse.

3. Akupankade valiku alused ja sobivus Eesti tingimustesse

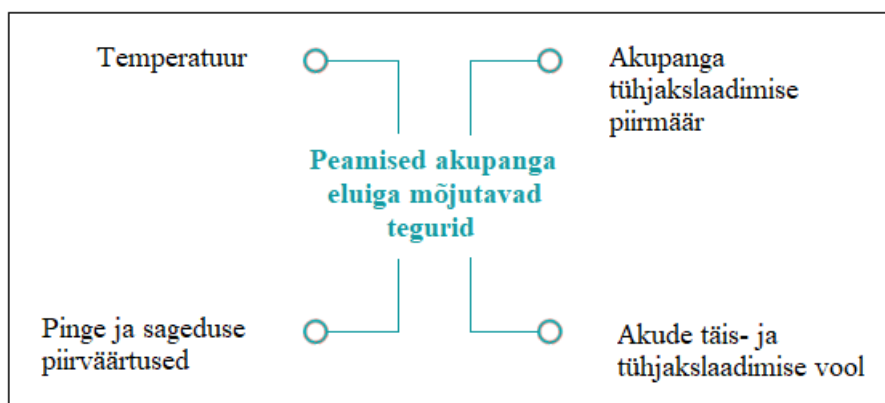
Eelmises peatükis toodi välja, millised on maailmas enimkasutatavad akupankade tehnoloogiad, koos nende tugevuste, nõrkustega ja arengupotentsiaalidega. Nüüd, kui on teada, millised omadused on erinevatel akupankade tehnoloogiatel, saab analüüsida, millised neist sobiksid kasutamiseks Eesti tingimustega. Valiku tegemiseks tuleb täpsustada kriteeriumeid, mille põhjal otsustatakse, millised on kõige tähtsamad tegurid ja millega arvestada. Järgnevalt uuritakse akupanga efektiivsust ja eluiga mõjutavaid asjaolusid. Kõige optimaalsema valiku tegemiseks tuleb järgida mitmeid erinevaid karakteristikuid, mis on kirjeldatud järgmistes alapeatükkides.

Esimesena on tähtis välja selgitada, kui suure mahuga akupanka vaja läheb. Teiseks tuleb arvesse võtta akupanga võrku integreerimise eesmärki, on see taastuenergia põhineva elektriijaama väljundvõimsuse ühtlustamise, mõne suurtarbija tipukoormuse katmiseks, vms. Oluline on ka akupankade paigaldamise asukoht. Antud töös uuritakse akupankade paigaldamist suurte tarbijate/tootjate lähedusse, kui mitte vahetusse lähedusse, siis lähimasse alajaama (vahetu läheduse all mõeldakse näiteks samale kinnistule, kuid võrku ühendatud eraldiseisvalt).

Kõige olulisemad aspektid akupankade valikul on akupankade eluiga ja seda mõjutavaid tegurid (vt joonis 3.1): temperatuur, akusse siseneva ja väljuva voolu suurus, pinge ja sageduse piirväärtused ja akude tühjakslaadimise piirmäär (*ingl.kl. depth of discharge, DOD*). Kui eelpool nimetatud faktoreid akupankade suuruse ja valiku juures arvesse ei võeta, võib see lõppeda väga suurte iga-aastaste kuludega (näiteks akude vahetamisest tulevad kulud).

Järgmistes alalõikudes analüüsitakse kõige tähtsamaid tegureid, millega tuleb arvestada akupankade valikul. [12]

Oluline on eelnevalt defineerida, mida tähendab aku tsükli eluiga: aku tsükli eluiga näitab laadimis- ja tühjenemistsüklite arvu, mille aku suudab täielikult teha enne kui hakkab märkimisväärselt jõudlust kaotama. Selle määratleb mingi kindel tühjakslaadimise sügavus ja temperatuur. Vajaminev akude suutlikkus sõltub nii rakendusala kui ka suurusest. Akud, mis täielikult laetuna suudavad anda oma esialgselt võimsusest ainult 60-80% võidakse lugeda juba eluea lõpus olevateks. [13]



Joonis 3.1 Peamised akupanga eluiga mõjutavad tegurid [12], (ingliseelne originaaltabel lisas nr 1)

3.1. Temperatuur

Üheks akupankade tööd mõjutavaks teguriks on töötemperatuur ja akupanka ümbritsev temperatuur – nii kõrgetel kui ka madalatel temperatuuridel töötamine mõjutab akupanga jõudlust. Kõrgetel temperatuuridel kiireneb akupanga sees toimuv keemiline protsess ja suureneb korrosiooni tekkevõimalus. Lisaks, võib suureneda gaaside eraldumine, mille tarbeks on vaja paigaldada ventilatsioon.

Valem 3.1 näitab seost temperatuuri tõusu ja keemilise reaktsiooni kiiruskonstandi vahel (võrrandit nimetatakse Arrheniuse valemiks), ehk reaktsiooni kiiruse sõltuvus temperatuurist. Reegli kohaselt iga 10°C suurune temperatuuri tõus kahekordistab reaktsiooni kiiruskonstanti. [14]

$$\xi_R^{(b)} = \lambda^{(b)} \cdot \exp\left(\frac{-E_a^{(b)}}{R \cdot T}\right) \quad (3.1)$$

- Kus, ξ – reaktsiooni kiiruskonstant,
 λ – eksponendieelne tegur,
 E_a – aktivatsiooni energia,
 R – universaalne gaasikonstant,
 T – absoluutne temperatuur.

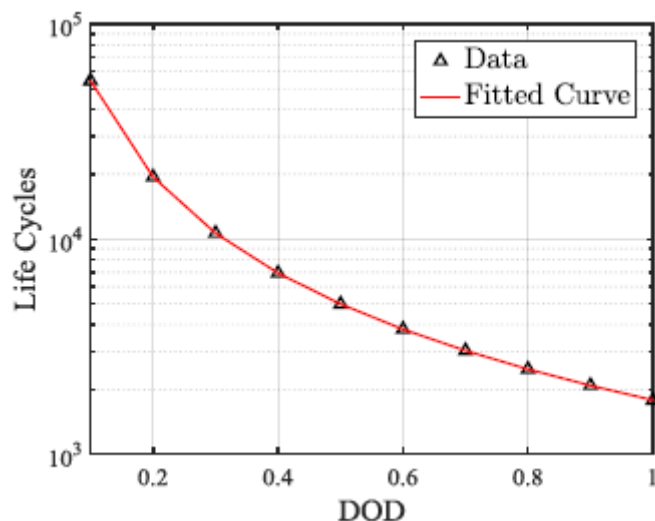
Külmadel temperatuuridel ei hakka akupangas toimuvad keemilised protsessid nii kiiresti tööle ja akupank ei rakendu täielikult, tekib oht ka elektrolüüdi läbikülmumiseks. Mõned akupankade tüübid (näiteks liitium-ioon ja väävelakud) võivad vajada kõikuvates temperatuurides töötamiseks integreeritud temperatuuriandureid ja soojustatud keskkonda, et tagada optimaalne töö ja ohutus. Liitium-ioonakud on temperatuuritundlikumad kui väävelakud. [13]

Kokkuvõttes, vähendab sellistel ekstreemsetel temperatuuridel töötamine aku eluiga. Ajapikku toimub akudes nähtus nagu „võimsuse vähenemine“, mida ekstreemsemates oludes akupankasid kasutatakse, seda kiiremini lüheneb akude kasutuse iga. Võimsuse vähenemine on erinevate akude puhul erineva kiirusega nähtus. [15] [12]

Erinevalt autode akudest, kus temperatuurimuutuste mõju vähendamine akudele on väga keeruline ülesanne autode pideva liikumise tõttu, ei ole akupankade puhul temperatuurimõju vähendamine keeruline. Suurte tootjate või tarbijate juurde paigaldatavad akupangad on enamasti statsionaarsed (ehk kindlale kohale paigaldatud, paikne) ja jahutussüsteemide või soojendussüsteemide rajamine nende tarbeks on pigem lihtne. [12]

3.2. Akupanga tühjakslaadimise piirmäär

Akupankade eluiga sõltub paljuski tühjakslaadimise piirmäärast. Antud piirmäär viitab kasutatava võimsuse suurusle, mida väljendatakse protsendina aku täisvõimsusest. Erinevad uurimustööde tulemused on näidanud, et mida sügavam on aku tühjenemine, seda lühem on aku eeldatav eluiga. [13] Teisest küljest, kui laadida akusid tühjaks ainult osaliselt mingi kindla piirmäärani, võib see tõsta akude eluiga [16]. Näiteks, kui aku tühjeneb ühe tühjenemistsükli käigus ainult 10% täisvõimsusest, jääb 90% tema täisvõimsusest kasutamata. Iga akupanga tehnoloogia puhul on mingi kindel optimaalne tühjakslaadimise piirmäär, mille juures aku eluiga on kõige pikem. Üldjuhul kehtib reegel, et mida tühjemaks laaditakse akut, seda vähem laadimistsükleid suudab antud aku teostada. Kui jälgida seda piirmäära, siis suudab aku lõpetada rohkem laadimistsükleid. Iga aku tüüp ja selles toimiv keemiline protsess on erinevad, samuti on oluline roll ümbritseval temperatuuril. Tühjakslaadimise piirmäär mõjutab erinevaid akude tehnoloogiaid erinevalt – mõju läbivooluakudele on väiksem kui rakupõhistele akudele. [13] Joonisel 3.2 on toodud laadimistsükli kordade arvu sõltuvus akupanga tühjakslaadimise piirmäärast *Li-Ion* (liitium-ioon) akude korral, kus x-teljel on toodud tühjakslaadimise piirmäär ja y-teljel on toodud laadimistsükli arv. [12]



Joonis 3.2 Liitium-ioonakude laadimistsüklite arvu (Life Cycles) sõltuvus akupanga tühjakslaadimise piirmäärast (DOD) [12]

Jooniselt 3.2 võib välja lugeda, et kui akupankasid laetakse ainult osaliselt tühjemaks, siis suureneb ka akude täis- ja tühjakslaadimise tsüklite kordade arv. [12]

Üldiselt arvestatakse akupanga tühjenemiseks 10-40% akupanga mahtuvusest. Kõige efektiivsem oleks (arvesse võttes tsüklite arvu ja maksumust) lasta akul igapäevaselt tühjeneda ainult 10%. Kusjuures, üle 50% tühjakslaadimise määra loetakse juba ebaefektiivseks – väheneb aku kasutegur ja eluiga. [17]

3.3. Akude täis- ja tühjakslaadimise vool

Akude valikul tuleks vaadelda laadimisvoolude ja tühjenemisvoolude suuruseid. Uuringud näitavad, et suured laadimis- ja tühjenemisvoolud vähendavad akude mahtuvust ja eluiga. Suured voolud suurendavad akude sisemist takistust, mis omakorda hakkab vähendama akupanga jõudlust. Nende voolude suurus sõltub aga jaotusvõrku ühendatud koormustest ja võrguparameetritest. [12] [18]

3.4. Pinge ja sageduse piirväärtused

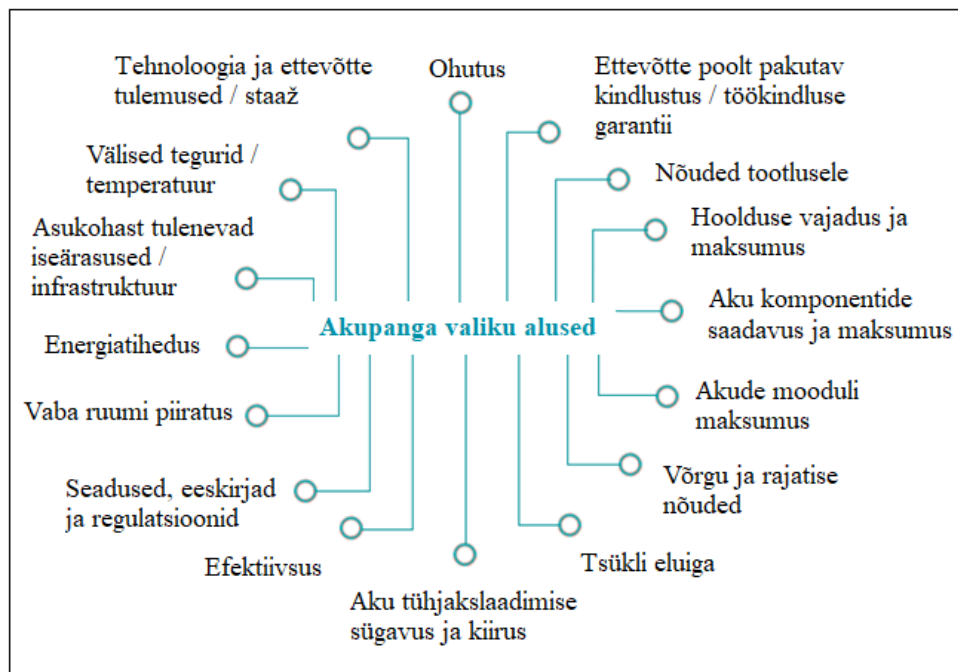
Neljandaks akude eluiga mõjutavateks näitajateks on pinge ja sagedus, kuid nende mõju saab lihtsalt kontrolli all hoida tänu jõuelektroonikaseadmetele. [14]

Kui energiasüsteemis toodetakse liiga palju elektrienergiat, toimub samal ajal akude laadimine. Kui energiasüsteemis toimub pinge langemine elektrienergia suure nõudluse tõttu, toimub akude tühjakslaadimine andes energiat elektrivõrku, toetades sellega elektrisüsteemi. Pinge

reguleerimiseks tuleb välja arvutada akude laadimiseks ja tühjenemiseks vajalik võimsus. Samalaadselt toimuks ka sageduse reguleerimine. [14]

3.5. Järeldused

Eelnevates alapeatükkides on toodud kõige tähtsamad kriteeriumid akupankade valikul, kuid lõpliku valiku tegemiseks, millist akupanka valida, tuleb arvestada tunduvalt rohkemate tingimuste ja nõuetega. Nagu on toodud joonisel 3.3, ei piisa ainult akupankade tehnoloogilistest näitajatest, vaid tuleb arvestada rohkemate asjaoludega. [13]



Joonis 3.3 Akupankade valikut mõjutavad tegurid [13], (inglisekeelne originaaltabel lisas nr 1)

Joonisel 3.3 on toodud välja näitajaid, millega akupankade valikul arvestada (lisaks eelpool mainitud põhinäitajatele). Akude paigaldamise asukoht on oluline – vaba ruumi olemasolu, kohapeal olemasolev infrastruktuur või muud asukoha eripärasused. Mõned näitajad on majanduslikud – akupankade mooduli maksumus, akupankade kokkupanemiseks vajalik elementide saadavus ning maksumus, hooldustega seonduvad kulud. Otsust mõjutavateks teguriteks võivad veel omakorda olla akupankade tootjaga seotud riskid või edasimüüjaga seotud probleemid. Olemasoleva tehnoloogia ja seda tehnoloogiat tootvate firmade läbipaistvus või maine võivad olla olulised mõjurid. Nagu ka tootja poolt pakutavad hüved, näiteks, garantii, mis tagab toote kvaliteedi ja ettenähtud nõuetele vastavuse, ja annab tagatise juhul, kui toode peaks olema defektiga. Väga tähtsaks nõudeks peetakse ka turvalisust. Kõigele lisaks tuleb veel arvestada kohalikke nõudeid, regulatsioone ja seaduseid. [13]

4. Akupankade võimalikud tehnilised nõuded liitumisel jaotusvõrku

Akupankade võrku integreerimine kogub maailmas aina enam populaarsust. Paljudes riikides on rajatud väga suuri energiasalvestusüksuseid akupankade näol, mida uuritakse teaduslikel eesmärkidel. Tehnoloogiate arenedes ja akupankade maksumuse vähenedes tasub nende paigaldamine aina rohkem ära ja, seetõttu, nähakse tulevikus massilist akupankade võrku paigaldamist. Selleks, et akupankasid saaks suurte üksustena võrku integreerida, peavad olema olema nõuded, standardid, seadused ja regulatsioonid, mis toetaksid nende võrku integreerimist. Akupank ei ole võrdne ei tarbimise ega tootmisega, see ei ole üks või teine. Järelikult, peaks akupankade integreerimise aluseks olema neile sobilik reguleeritud keskkond.

Alustuseks, enne kui pakkuda välja võimalikke tehnoloogilisi nõudeid, tuleb välja selgitada, kuidas on akupangad Eesti jaotusvõrgus ja õigussüsteemis defineeritud. Selgus, et Eesti õigussüsteemis ei ole defineeritud akupankasid ega nende olemust. Õiglase kohtlemise tagamiseks on vaja kindlat definitsiooni. Mis on akupank? Kas akupank on tarbija, tootja või neist eraldiseisev üksus? Ilma konkreetse definitsioonita ei ole võimalik tagada akupankade õiglast kohtlemist Eesti elektriturul. Energiasalvestustehnoloogiad võivad oma iseloomult olla nii tarbija, kui ka generaator, aga lisaks olla elektrivõrku toetavateks süsteemideks. Tulenevalt mitmekülgisusest, on nende omandisuhe nii poliitiline kui ka majanduslik kitsaskoht. Kes saab akupankade integreerimisest peamist kasu? Kellele kuuluvad akupangad ja milleks neid kasutada võib?

Elektriturul on teenuseid defineeritud võimsuse edastushulgaga elektrivõrgus. Selline käsitlemine oleks akupankade vaates ebaõiglane, kuna nende mahtuvus on piiratud. Lahendusena on selles töös pakutud välja erinevate teenuste defineerimist ja, lisaks, nende teenuste kasutamispikkuse määratlemist. Arvestada tuleb kõikide akupankade poolt võimaldatavate tugiteenustega. Energiasalvestussüsteemide tasuvus on tugevas sõltuvuses võrgutasudega. Akupankade poolt pakutavad teenused peavad olema kulutõhusad, lähtudes nende poolt võimaldatud kulude vähenemistest võrgus. Akupankade paigaldajate ja elektrivõrgu vahel peaksid olema kahepoolsed kokkulepped erinevate teenuste jaoks. Kokkuvõttes, võidakse tulevikus nõuda taastuvenergiat arendavatelt ettevõtetelt ka akupankade paigaldamist oma tootmisüksuste juurde, et neutraliseerida nende endi poolt põhjustatavaid võrguprobleeme. [19]

Tehnilisest vaatenurgast puuduvad konkreetset standardid, mistõttu on keeruline leida energiasalvestustehnoloogiate rajamisele piisaval hulgal investoreid. Selleks tuleb välja töötada kindlad tehnoloogilised nõuded, koostöös põhivõrgu ja jaotusvõrguga. Kui tehnoloogia vastaks standarditele, väljatöötatud mudelitele või, kui riskide lahendamine oleks tagatud akupankade tootjate poolt, võimaldaks see leida rohkem investoreid. Energiasalvestustehnoloogia müük peaks sisaldama kogu teenust, mitte ainult akupanka ennast, vaid pakkuma ka hooldus- ja parandusteenuseid. [19]

Tehnoloogilised nõuded peavad soodustama akupankade paigaldamist Eesti jaotusvõrku, kuid ei tohi ohustada võrgu normaalset toimimist. Näiteks, lühise tekkel, ei tohi akupank jääda lühist toitma, sellest lähtuvalt peavad olema akupangal suunatud kaitsesüsteemid. Lisaks, peab olema tagatud ohutus. Näiteks, mitmel pool maailmas on toimunud suurtes energiasalvestuskeskustes põlengud. Selliste katastrooflike sündmuste ennetamiseks tuleb rajada vajalikud kaitsesüsteemid. Ühe lahendusena on lisanõuded akupankasid sisaldavatele hoonetele, olenevalt akupankade tehnoloogiast, näiteks, tulekindlus või gaasiandurid.

Järgmisena on toodud võimalikud tehnilised nõuded tulenevalt Eestis kehtestatud Võrgueeskirjast [20]:

Võrgueeskirja reguleerimisala ütleb täpselt:

„Määrus reguleerib elektrisüsteemi varustuskindluse suhtes kohaldatavaid nõudeid ja varustuskindlusest tulenevaid tehnilisi nõudeid, mida kohaldatakse elektripaigaldiste suhtes. Määrus näeb ette nõuded elektripaigaldiste ühendamiseks elektrivõrguga ning bilansivastutusega seotud turuosaliste õigused ja kohustused.“

Kuigi määruses ei ole defineeritud energiasalvestussüsteeme, on toodud tehnilised nõuded elektripaigaldistele, milleks on ka akupangad. Seega on võimalik tuletada akupankadele võimalikke kehtestatavaid nõudeid.

Võrgueeskirjas on toodud tootmisseedmetele kohaldatavad tehnilised nõuded. Akupank võib mingitel ajahetkedel talitleda kui tootmisseedet. Seetõttu peaksid akupankad vastama ka tootmisseedmete nõuetele.

Vastavalt Võrgueeskirja §14 toodud üldnõuetele tuleb üle 1 MW nimiaktiivvõimsusega elektrijaama süsteemiga ühendamine kooskõlastada süsteemihalduriga. Ka energiasalvestussüsteemide ühendamine elektrivõrguga tuleb kooskõlastada süsteemihalduriga. Teiseks, elektrienergia kommerts-mõõtmisteks paigaldatakse kahesuunaline

aktiiv- ja reaktiivenergia arvesti – antud arvesti paigaldamine on samuti vajalik akupankade võrguga ühendamisel. §14 lg 6 toob välja, et elektriijaama toodetava ja tarbitava elektrienergia mõõtmiseks reaalajas paigaldab tootja kahesuunalise aktiiv- ja reaktiivvõimsuse mõõtmisseadme koos koormusgraafiku salvestiga ja kauglugemisseadmega. Seega on vaja reaalaja mõõtmised paigaldada ka akupankadele.

Võrgueeskirja §15 on toodud kuni 1MW nimiaktiivvõimsusega elektriijaama tootmiseseadmete suhtes kohaldatavad nõuded. Nimetatud §-s on nõudeid, millele peavad akupangad vastama. Lg 1 kohustab võrguga ühendatava üle 15 kW nimivõimsusega elektriijaama elektriosa projekti kooskõlastama võrguettevõtjaga, samuti tuleb kooskõlastada ka akupankade elektriosa projekt. Lg 2 näeb ette elektriijaama generaatoritele paigaldatava järgmise releekaitse:

- ülekoormuskaitse;
- liigvoolukaitse;
- üle- ja alapingekaitse;
- sageduskaitse;
- pingesümmeetriakaitse.

Lg 3 kohustab releekaitsetsätete kooskõlastamise võrguettevõtjaga, kelle võrku elektriijaam ühendatakse. Releekaitseenõudeid peab jälgima ka akupankade ühendamisel võrguga.

Võrgueeskirja §18 lg 9 toob välja elektrituuliku, tuulepargi või päikeseelektriijaama reaktiivvõimsuse reguleerimise suhtes kohaldatavad nõuded, milleks on: 1) elektrituuliku, tuulepargi või päikeseelektriijaama talitlemiseks vajalik reaktiivvõimsus toodetakse kohapeal. Võrku antav või võrgust võetav reaktiivvõimsus peab olema minimaalne. Reaktiivvõimsuse lubatud kõikumine on $\pm 10\%$ elektrituuliku, tuulepargi või päikeseelektriijaama nimiaktiivvõimsusest; 2) võrguhäire korral peab elektrivõrgu dispetšeril olema võimalik reguleerida üle 200 kW nimiaktiivvõimsusega elektrituuliku, tuulepargi või päikeseelektriijaama väljastatavat reaktiivvõimsust kogu tehniliselt võimaliku reaktiivvõimsuse reservi ulatuses; 6) kui reaktiivvõimsust reguleerib võrguettevõtja, maksab ta tootjale võrku antud või võrgust võetud reaktiivenergia eest kehtiva hinnakirja kohaselt. Kuna akupankade üheks võimalikuks paigaldamise põhjuseks võib olla reaktiivvõimsuse reguleerimine, siis antud olukorras võiks mõelda reaktiivvõimsuse reguleerimisel osalemises eraldi hinnakirja kehtestamisele.

Kui eelnevalt analüüsi nõudeid toomisseadmete võrku ühendamiseks, siis järgnevalt analüüsitakse tootmiseseadmete suhtes kohaldatavaid nõudeid (Võrgueeskirja 2. jagu).

Võrgueeskirja §22 ja §23 toob tootmiseadmete suhtes pinge ja sageduse muutumise korral kohaldatavad nõuded. Järelikult peavad akupangad olema võimelised töötama §22 ja §23 toodud sagedus- ja pingevahemikes.

Võrgueeskirja §25 toob välja nõuded tootmiseadmete nõuetekohasuse kontrollimiseks. Antud juhul tuuakse välja, et tootmiseadmete vastavust määrustele tuleb korrapäraselt kontrollida. Selleks tuleb eelnevalt ka akupankade jaoks täpselt sõnastada vajalikud nõuded. Lisaks tuuakse välja, et tootmiseadmete kasutusele võtmiseks ja nõuetekohasuse kontrollimiseks korraldatakse katsetusi. Katsetuste ja mõõtmiste eesmärk on näiteks kontrollida generaatori talitlust lühisest põhjustatud mööduva pingelohu korral §-s 23 nimetatud olukordades. Ka akupankade integreerimisel võrku tuleks läbi viia katsetused, et kontrollida vajaminevaid parameetreid ja kuidas akupangad toimivad võrgu avarii- ja häiringuolukorras.

Võrgueeskirja §26, 27 ja 28 näevad ette nõuded võimuse reguleerimiseks. Akupankade üheks võimalikuks kasutusala on samuti võimsuse reguleerimine, kuid neile kohaldatavad nõuded võimsuse reguleerimiseks tuleb üle vaadata. Akupankade puhul võib jaotusvõrgu võimsuse reguleerimine olla kui pakutav teenus, järelikult, ei saa neile kohaldada samu tehnilisi nõudeid kui teistele elektriijaamadele.

Lisaks, Võrgueeskirja kuuendas peatükis on toodud nõuded mõõtmistele, millele peavad vastama ka energiasalvestussüsteemid. §41-s on tootja mõõteseadmete suhtes kohaldatavad nõuded. Lg 1 näeb ette, et võrguettevõtja paigaldab üle 100 kW netovõimsusega tootjale mõõtesüsteemi, mis võimaldab kauglugemisega mõõta:

- 1) kahesuunaliselt aktiivenergiat (kWh);
- 2) kahesuunaliselt reaktiivenergiat (kvarh);
- 3) võimsust (kW);
- 4) kahesuunaliselt reaktiivvõimsust (kvar).

Selline mõõtesüsteem on vajalik ka akupankade süsteemile.

Lisaks eelpool mainitule on võimalik, et tehnilised nõuded tuleb eraldi lahti kirjutada akupankade võrguühendusele. Kui akupangad on seotud tuule- või päikeseelektriijaamadega, siis tuleb samuti luua nõuded nendevahelistele ühendustele. Nõuded peavad hõlmama akupankade omavahelisi ühendusi, kuidas nad on omavahel paigutatud.

Iga erinev akupanga tehnoloogia peab vastama mingitele kindlatele regulatsioonidele või standarditele, sest igal akupangal on erinevat nõrkused ja tugevused. Näiteks vajavad osad

akupangad tugevdatud kaitsemehhanisme, et tagada ohutus. Plii-akudes tekki vesinik on plahvatusohtlik, seega tuleks vesiniku teket kontrollida. Naatrium-väävelakud töötavad aga väga kõrgetel temperatuuridel, järelkult on vajalik kaitsesüsteemide olemasolu, mis kaitseks ülekuumenemise eest.

Tehnilise nõudena võib akude integreerimisel vajalik olla ka minimaalne akupanga eluiga või tsüklite arv.

Kokkuvõttes võib akupank olla erinevatel ajahetkedel nii tarbija kui ka tootja, ning seetõttu on oluline täiendada Eestis kehtivaid seaduseid, regulatsioone ja eeskirju, et akupangad oleksid kehtivates õigusaktides eraldiseisvalt käsitletud. Tähelepanu tuleb pöörata ka asjaolule, et tulevikus võivad akupangad elektrivõrgus pakkuda mitmeid erinevaid teenuseid (koormuse juhtimine, võimsuse ja sageduse reguleerimine, jms.). Seda silmas pidades tuleb luua ka turul sobilik keskkond selliste teenuste pakkumiseks.

Akupankade võrku integreerimisel peab kindlasti jälgima ohutusnõudeid ja, võimalik, et akupankade integreerimiseks tuleb neid ohutusnõudeid täiendada. Järelkult, tuleb täiendada nõudeid akupankade tarbeks rajatavatele hoonetele või aladele, akude omavahelistele ühendustele ja ühendustele võrguga.

Tehniliste nõuete täiendamine on oluline, sest tulevikus nähakse akupankade võrku integreerimisel väga olulist rolli, tagades võrgu stabiilse toimimise, paindliku juhtimise, energiajulgeoleku, jmt. Kuigi akupankade tasuvus on praeguste hindade juures küsitav, siis nende võrku ühendamise atraktiivsuse tõstmiseks ja investoritele huvi tekitamiseks on vajalik, et oleks olemas õiglane õigusruum ja regulatsioonid ning sobilik keskkond akupankadega seotud teenuste tekkimiseks. Kui kõik välised asjaolud soosivad akupankade võrku integreerimist, siis tõuseb ka nende kasumlikkus, ja seejärel ka erinevate osapoolte huvi.

Järgmises peatükis kirjeldatakse, millised on akupankade integreerimisest huvitatud osapooled ja mis on nende huvi põhjusteks.

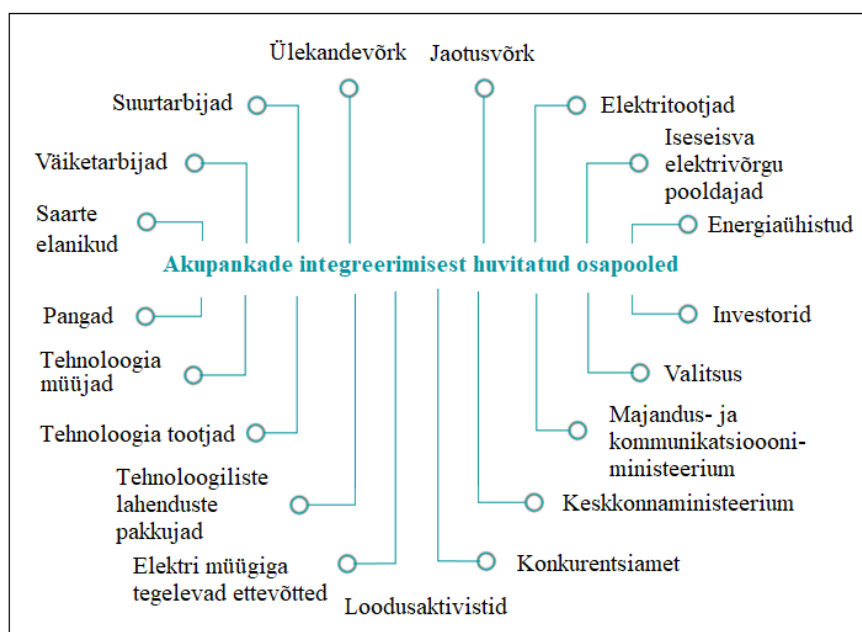
5. Akupankade integreerimisest võimalikud huvitatud osapooled

Eelmistes peatükkides on antud ülevaade olemasolevatest akupankade tehnoloogiatest, nende valikul lähtuvatest andmetest ja võimalikest tehnoloogilistest nõuetest integreerimisel Eesti jaotusvõrku. Selles peatükis vaadeldakse, kellele võiks üldse huvi pakkuda akupankade integreerimine võrku. Kes on need osapooled, keda akupangad enim mõjutavad ning kes on need osapooled, kes otseselt akupankadega kokku ei puutu, kuid omavad põhjendatud huvi.

Mida tähendab ja millest tuleneb huvi? Huvi võib olla põhjendatud eri osapoolte vahel erinevalt. Huvi võib olla:

- Teenida kasumit.
- Saada teadmiseid.
- Parandada võrguteenuse kvaliteeti.
- Saavutada eesmärke (näiteks ENMAK-is seatud eesmärke).
- Muud põhjused, nt kaitsta keskkonda, suurendada energiapuudust või juhtida tähelepanu erinevatele kitsaskohtadele, jne.

Nagu eelpool mainitud, huvid võivad olla väga erinevaid. Järgnevalt on toodud kokkuvõtlik joonis 5.1 akupankade integreerimisest huvitatud osapooltest.



Joonis 5.1 Akupankade integreerimisest huvitatud osapooled

Joonisel 5.1 on toodud akupankadest huvitatud osapooled. Tegelikult, tänapäeval (2017 a.) on keeruline hinnata, millised erinevad osapooled võiksid huvi veel tunda. Kui analüüsida, millised osapooled on akupankade integreerimisest tulevikus huvitatud, on seda veel keerulisem hinnata⁵.

Järgnevalt analüüsitakse, millised on akupankadest huvitatud erinevad osapooled ja millest võiks olla nende huvi põhjustatud.

5.1. Võrguettevõtted

Kuigi antud lõputöö raames keskendutakse Eesti jaotuvõrgule, tuleb ära märkida, et nii nagu akupankade integreerimise huvi on jaotusvõrgus (erinevates jaotusvõrguettevõtetes), võib see huvi olla ka Eesti põhivõrgus. Huvi põhjusteks on akupankade mõju võrgule: mõju töökindlusele, paindlikkusele, energiapuudusele, juhtimisele, reguleerimisele ja arengule. Täpsemalt on akupankade mõju uuritud peatükis 6, millest tulevad välja ka mainitud huvi põhjused.

5.2. Tarbijad ja tootjad

Elektritarbijad võivad olla nii suurtarbijad, kui ka väiketarbijad. Suurtarbijate all on mõeldud peamiselt suuremaid tehaseid, suurettevõtteid, kaubanduskeskuseid. Ka korterelamud on pigem suurtarbijad. Väiketarbijate all mõeldakse kodumajapidamisi, väikeettevõtteid, jne. Kõikidele neile tarbijatele võivad akupangad pakkuda lisandväärtust. Akupankade mõju tarbijatele uuritakse lähemalt selle töö järgnevatel peatükkides, millest tuleb välja ka põhjused, mis on seotud nii majanduslike hüvedega kui ka energiastabiilsuse ja -kindlusega.

Väga suurt ja olulist huvi akupankade vastu tunnevad elektritootjad. Kui vaadelda kodumajapidamisi, kuhu integreeritakse mõned päikesepaneelid, siis on suuremal osal tegemist „päikesepaneelid + akupank“ süsteemidega. Järelikult, väiketootjatel on huvi saada võimalikult efektiivseid akupankasid, suurema majandusliku kasu eesmärgil. Lisaks, suured päikese- ja tuuleelektrijaamad võivad olla kohustatud tulevikus paigaldama akupankasid oma tootmiseladmetele juurde. Või, kui liitumise maksumus ületab mõistliku piiri, siis alternatiivina võiks neile huvi pakkuda akupankade integreerimine. Akupankade mõju elektritootjatele on samuti täpsemalt uuritud antud töö järgmistes peatükkides. Kokkuvõttes, võib tulevikus

⁵ Näiteks, kes oleks osanud arvata, et „Youtube-r“ on tänapäeval reaalne töö. Mistõttu on keeruline prognoosida, millised ametipostid on tulevikus energiaturul.

akupankade hinna langus pakkuda elektritootjatele võimalust suuremaks paindlikkuseks. Lisaks tekivad uued võimalused tegeleda ettevõtlusega.

Järgmisena, akupankadest võivad huvi tunda inimesed, kes elavad eraldatud piirkondades, näiteks väikesaartel või elektrivõrgust väga kaugel, kelle elektrikvaliteet võib olla halb, palju rikkeid ja katkestusi. Neil võib olla huvi kaaluda iseseisva elektrivõrgu (*Off-grid*) lahendusi. Selle kategooria alla saab tuua ka energiaühistud. Energiaühistu definitsiooniks on: „Energiaühistu on kas asukoha põhiselt või muude ühiste huvidega seotud isikute koostegutsemise vorm, mille peamine eesmärk on toota ja jaotada oma seadmete kaudu elektrienergiat ja soojust ühistu liikmetele omatarbe katmiseks, kulude vähendamiseks ja parema elukeskkonna loomiseks“ [21]. Akupankade integreerimine võib nende eesmärkide täitmisele kaasa aidata – võimaldada optimeerida kulusid, tõsta varustuskindlust ja julgeolekut ning piirkonna konkurentsivõimet.

5.3. Pangad ja investorid

Ka pangad ja investorid on huvitatud akupankade arengut jälgima. Akupangad ja nende paigaldamine on väga kulukas. Suurtesse akupanga süsteemidesse investeerimine käib enamusel üle jõu, järelikult tekib vajadus võtta laenu või otsida investoreid. Pankade puhul võib neil olla huvi töötada välja just energiasalvestussüsteemide paigaldamiseks mõeldud laenupaketid (näiteks äri-laenu kujul). Samuti pakub huvi tulu toovate tehnoloogiate paigaldamine investoritele. Kitsaskohaks on endiselt hetkel akupankade kõrge hind ja Eesti puudulikud regulatsioonid, seadused.

5.4. Ministeeriumid ja ametkonnad

Samuti pakub akupankade suurenev kasutuselevõtt huvi valitsusele. Nagu on välja toodud antud lõputöö sissejuhatuses, kinnitas valitsus Eesti energiamajanduse arengukava (ENMAK) aastani 2030, milles on ette võetud ambitsioonikad eesmärgid. Välja toodud eesmärkide saavutamise üheks võimaluseks võib olla akude laialdasem kasutamine just Eesti jaotusvõrgus. Järelikult tuleb valitsusel soodustada nende integreerimist võrku. Kuna valitsusel võib olla huvi akude vastu, kandub see edasi erinevatele ministeeriumitele ja ametitele. Näiteks majandus- ja kommunikatsiooniministeerium (MKM), Keskkonnaministeerium ja Konkurentsiamet. Jaotusvõrgus tehakse igapäevaselt koostööd nende ministeeriumide ning ametkondadega.

MKM-i eesmärk on sõnastatud järgmiselt: „Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi eesmärk on riigi majanduspoliitika väljatöötamise, elluviimise ja tulemuste hindamise kaudu

luua tingimused Eesti majanduse konkurentsivõime kasvuks ning tasakaalustatud ja jätkusuutlikuks arenguks.“ [22]. MKM-i valitsemisalas töötatakse välja ja viiakse ellu riigi majanduspoliitikat ja majanduse arengukavasid erinevates valdkondades, millest üheks on ka Energeetika valdkond. Näiteks on eesmärgiks 2014-2017 aastatel vähima keskkonnakoormusega ja põhjendatud hinnaga pidev energiavarustus. Tulenevalt MKM-i tegevusvaldkondadest võiks neil olla põhjendatud huvi uurida akupankade tehnoloogiaid ja luua, täiendada nendega seonduvat õigusruumi. Vastavasisuliste muudatuste tegemisse tuleb kaasata loomulikult ka teisi ministereid ja ameteid. Keskkonnaministeeriumi huviorbiidis võiks olla akupankadega seonduvad keskkonnamõjud, on need siis tulenevalt akupankade paigaldamisest jaotusvõrku või akupankade endi ehitamisest tulenevate keskkonnamõjudega. Ka võib üheks küsimuseks osutada, mis saab akupankadest pärast nende eluiga ja millised keskkonnamõjud siis tekivad.

Keskkonnaministeeriumi kodulehel on välja toodud 2015 aasta septembris ÜRO Peaassambleel vastu võetud ülemaailmne säästva arengu tegevuskava aastani 2030 – „Muudame maailma“ [23]. Antud tegevuskavas seondub energiaga eesmärk number 7: Tagada taskukohane, usaldusväärne, säästev ja kaasaegne energia kõigile. Lisaks on eesmärgidena välja toodud taastuvenergia osakaalu suurendamine, energiatõhususe määra kahekordistamine ja näiteks toetada investeeringuid energiataristusse ja puhta energia tehnoloogiasse [24]. Järelikult võiks Keskkonnaministeeriumil olla huvi akupankade integreerimise vastu.

Akupankadele õiglase õigussüsteemi loomisel peab osaliseks olema ka konkurentsiamet, kelle põhiülesanded on konkurentsivolukorra analüüsimine, ettepanekute ja soovitude tegemine konkurentsivolukorra parandamiseks, konkurentsialase riikliku järelevalve teostamine jne [25]. Praeguses (2017.a.) õigussüsteemis ei ole defineeritud akupankasid, seega nende integreerimine Eesti jaotusvõrku ei ole üheselt reguleeritud. Järelikult, peab Konkurentsiamet huvi tundma akupankasid puudutavate seaduste/regulatsioonide loomisel, et need oleksid õiglased nii akupankade paigaldajate, kui ka teiste turuosaliste suhtes.

5.5. Tehnoloogia tootjad ja müüjad

Akupankadest huvi tundvad osapooled on kindlasti tehnoloogia tootjaid, tehnoloogia müüjaid ja tehnoloogiliste lahenduste pakkujaid. Siin on peamisteks põhjusteks ärilised eesmärgid. Mida rohkem on võimalik tooteid müüa, seda suuremat kasumit ettevõtted teenivad. Akupankade suurenev kasutuselevõtt suurendab turule tulevate erinevate tehnoloogiate tootjate hulka ja tõstab konkurentsi. Tehnoloogia tootjatel tekib surve oma tehnoloogiaid arendada ja uuendada.

Samuti muutub soodsamaks erinevate tehnoloogiliste lahenduste pakkumine (akupankade ja päikesepaneelide või tuulikute ühendsüsteemid, akupangad suurtarbijatele või võrgu reguleerimiseks, jms). Just nimelt tehnoloogia tootjad, müüjad ja lahenduste pakkujad on need osapooled, kellele pakub kõige rohkem huvi akupankade integreerimine Eesti jaotusvõrku, sest sellel on konkreetselt otsene mõju nende finantstulemustele.

5.6. Teised huvitatud osapooled

Akupankade massilisest Eesti jaotusvõrku integreerimisest võib olla huvitatud inimesi igast eluvaldkonnast. Seetõttu, lisaks eelpool nimetatule, leidub väga palju teisi huvitatud osapooli, kes pole küll otseselt seotud akupankadega, kuid võivad seda olla kaudselt.

Üheks näiteks saab tuua loodusaktiviste, kes juhivad tähelepanu akupankade integreerimisega seotud kitsaskohtadele. Tõepoolest, ei ole tegelikult põhjalikult uuritud, kuidas mõjutab akupankade tootmine keskkonda. Akupankade suurenev kasutamine on otseselt seotud laieneva taastuvenergeetika sektoriga. Järelikult, on põhjendatud ka küsimused, kuidas mõjutavad taastuvenergiaallikatel töötavate elektrijaamade seadmete tootmine keskkonda (näiteks päikesepaneelide või tuulikute toomine).

Teisest küljest, mis saab pärast akupankade või päikesepaneelide eluea lõppu? Kuidas toimub nende hävitamine või utiliseerimine? Ka nende küsimuste vastused on tänapäeval (2017 a.) veel lahtised, sest akupankade eluiga 20 aastat ei ole veel täis, ning kogemused pärast eluea lõppu on pigem puudulikud.

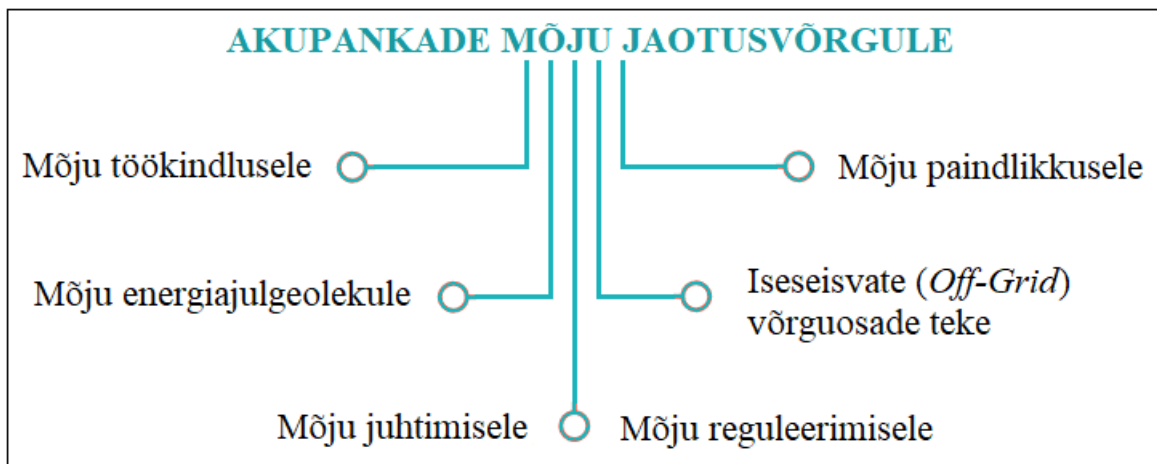
Veel üheks huvitatud osapooliks võiksid olla õppe- ja teadusasutused. Näiteks Tallinna Tehnikaülikool või Tartu Maaülikool. Võimalik, et neile pakub huvi, mis hakkab jaotusvõrgus toimuma, kui integreerida suurtes mahtudes energiasalvestustehnoloogiaid. Samuti võimalused, kuidas optimeerida akupankade integreerimist, et kasu oleks võimalik saada rohkematel osapooltel ja rohkemates eri vormides.

Kokkuvõttes, akupankade integreerimisest on huvitatud väga palju erinevaid osapooli. Ennustada ette, millised osapooled hakkavad tulevikus huvi tundma on keeruline, sest tehnoloogiad on pidevas muutumises ja muutuvad ka ametinimetused.

Järgmistes peatükkides antakse ülevaade akupankade mõjust jaotusvõrgule, tootjatele, tarbijatele ja teistele osapooltele.

6. Akupankade mõju jaotusvõrgule

Eelmises peatükis anti ülevaade akupankade integreerimisest huvitatud osapooltest, kelleks olid jaotusvõrk, elektritarbijad, -tootjad ja teised osapooled. Selles peatükis kirjeldatakse, milline on akupankade mõju jaotusvõrgule. Joonisel 6.1 on toodud peamised akupankade mõjud jaotusvõrgule.



Joonis 6.1 Akupankade mõju jaotusvõrgule

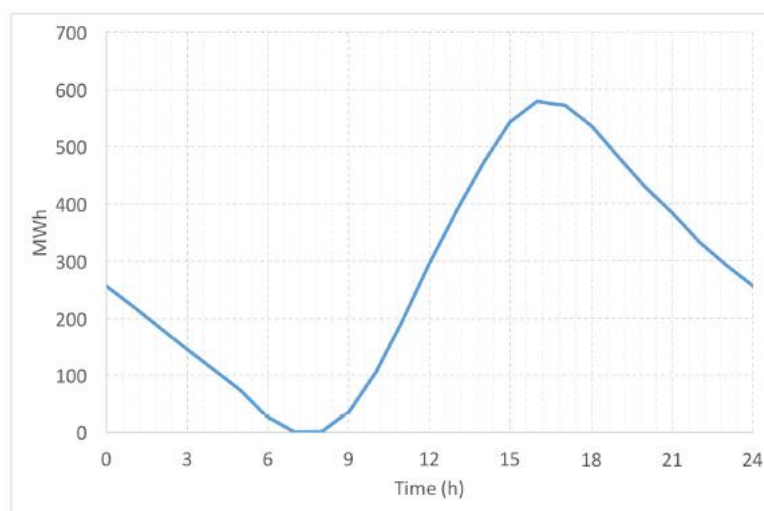
Kõige enam räägitakse akupankadest ja nende mõjudest seoses taastuvatel energiaallikatel põhinevate elektrijaamade rajamisega. Päikese- ja tuuleelektrijaamade poolt võrku antav võimsus on ebastabiilne ja raskesti prognoositav. Järelikult, omavad need elektrijaamad mitmekülgset mõju elektrivõrgu stabiilsusele, kuid akupankade integreerimisel on võimalik mitmeid neid mõjusid vähendada või likvideerida. Mida enam võetakse kasutusele taastavaid energiaallikaid, seda enam tekib vajadus elektrivõrgu stabiliseerimiseks ja optimaalsemaks juhtimiseks.

Järgmised alapeatükid annavad täpsema ülevaate akupankade võimalikest mõjudest jaotusvõrgus.

6.1. Elektrivõrgu kadude ja reserveeriva võimsuse vähenemine

Allikas nr [26] on läbi viidud simulatsioon programmis MATLAB eesmärgiga analüüsida akupankade optimaalset juhtimist, mille tulemusena vähenevad võrgus kaod ja suureneb elektrienergia tarbimine. Simulatsioon teostati vastavalt Herbon'i nimelise linna ühe võrguosa suviste näitajatele, kus toodeti palju elektrienergiat päikesepaneelidega. Salvustustehnoloogiatena kasutati li-ioonakusid, mis ühendati 10/0,4 kV alajaama

madalpingepoolele. Alajaamas oli trafo võimsusega 630 kVA ja akupanga suuruseks 0,64 MWh. Joonisel 6.2 on näidatud illustreeriv graafik, mis väljendab akupanga laetuse määra. Kui päikeseelektrijaamade poolt toodetav elektrienergia ületas koormust, toimus akude laadimine. Tühjakslaadimine leidis aset öhtuti ja öistel aegadel, kui päikeseelektrijaamad ei tootnud elektrienergiat või tootsid vähem, kui oli hetke tarbimine. Selle testi tulemus rõhutab selgelt, et energiakao vähenemine on sõltuv elektrienergia enese tarbimise suurenemisega keskpinge-madalpinge alajaamades, vähendades seeläbi võimsuse liikumist eri pingeastmete vahel. Antud katsetuste käigus toimus oluline võrgukadude vähenemine 0,218 MWh-lt 0,06 MWh-ni, sest elektrienergia tootmine ja tarbimine toimus ühes ja samas piirkonnas.



Joonis 6.2 Akupanga suurusega 0,64 MWh laetuse määr [26]

Läbiviidud katsetusest järeldus, et akupankade kasutamine keskpinge-madalpinge alajaamades võimaldab, lisaks võrgukadude vähendamisele, säilitada tarbijate elektrivarustus alajaama rikke korral. Akupankasid on võimalik kasutada tagavara elektrienergiaallikatena. Akupankade kasutamiseks avariiolekordades on mitmeid põhjuseid, näiteks eelpool mainitud alajaama rike või tormidest tulenevad kahjustused. Sellistel juhtudel suureneks jaotusvõrgu energiajulgeolek, töökindlus ja stabiilsus. Samuti, tänu energiasalvestustehnoloogiatele on võimalik vähendada reguleeriva võimsuse reservi.

6.2. Sageduse ja pingereguleerimine

Ühes teostatud teadustöös (allikas nr [27]) uuriti akupankade mõju sageduse ja pingereguleerimisel. Uuring teostati MATLAB Simulink-is, kuhu loodi nõrk radiaalvõrk. Nõrga võrgu definitsioone on mitmeid, näiteks, nõrgaks võrguks saab lugeda nõrkade, halbade, ebakvaliteetsete ühendustega võrku (näiteks arengumaades). Teisest küljest, nõrk elektrivõrk

on ka selline võrk, kus elektritootjad ja -tarbijad omavad suurt mõju võrgu toimimisele (põhjustavad suuri sageduse ja pingekõikumisi). Antud uurimustöös oli võrgu ebastabiilsuse põhjuseks suur päikeseelektrienergia osakaal ja eri võrguosade erinev koormus. Põhiliselt keskenduti uuringus pinge ja sageduse kõikumistele väljaspool nõuetega kehtestatud piiri (pingekõikumised üle $\pm 10\%$, sageduse kõikumised üle $\pm 0,1$ Hz) ning akupankade mõjule sageduse ja pinge reguleerimiseks. Nõrga elektrivõrgu pinge ja sageduse muutused olid tugevalt üle lubatud piiride ja, sellest tulenevalt, otsustati akupankade integreerimise kasuks. Lisaks uuriti kahte võimalikku akupanga integreerimise asukohta. Esimeseks võimalikult halb asukoht, mitte, kus oleks olnud võrgus kõige halvem olukord, vaid konkreetselt kõige halvem võimalik akupankade asukoht. Teiseks analüüsiti ja paigaldati akupangad kohta, mis oleks nende jaoks kõige optimaalsem. Tulemusena järelitati, et isegi kui paigaldada akud võimalikult halba asukohta, parandab see ikkagi oluliselt võrgu pingekvaliteeti. Teise katse tulemusena suudeti leida võrgus selline asukoht, et kõik eelnevalt toimunud pinge ja sageduse lubamatud kõikumised jäid ära. Lisaks toodi välja, et sageduse kõikumise muutused olid väiksemad kui muutused pingekõikumistele, seega mõjutas asukoha valik rohkem pinge reguleerimist.

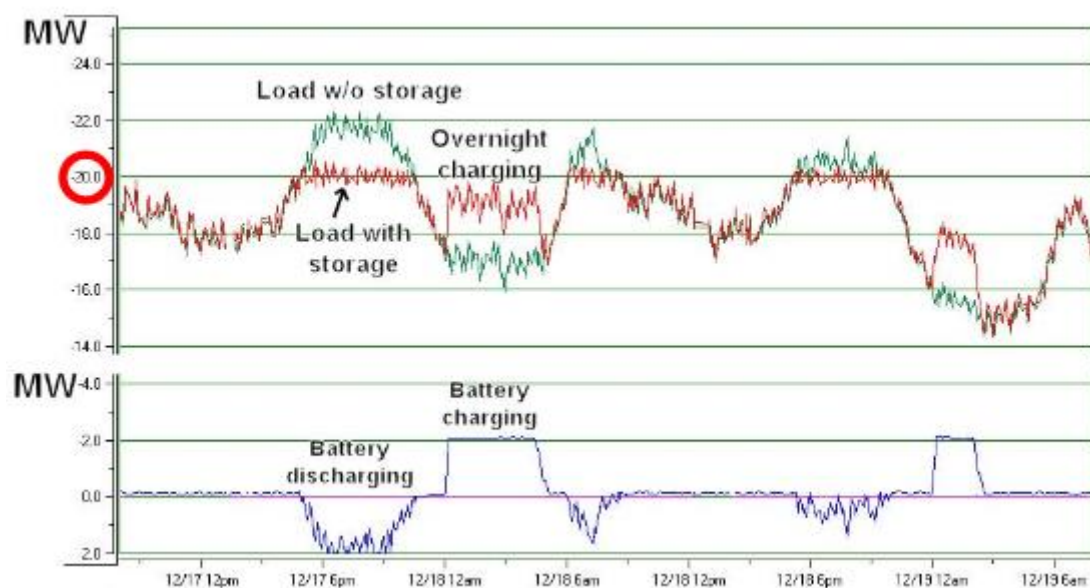
Järelikult on ka Eesti jaotusvõrgus võimalik kasutada akupankasid pinge ja sageduse reguleerimiseks nõrkades võrguosades. Oluline on eelnevalt teostada võrgu koormuse analüüs, et leida akupankade integreerimiseks kõige sobivam koht. Pinge reguleerimisel on asukoha valik rohkem tähtis kui sageduse reguleerimisel, kuid asukoha valimisel tuleb kindlasti võrku täpsemalt analüüsida, et akupankade mõju ulatuks võimalikult suurele võrgu osale.

6.3. Koormuse reguleerimine

Akupankade integreerimisega jaotusvõrku on võimalik ka elektrivõrgu koormust juhtida ja reguleerida. Käesoleva lõputöö peatükis 6.1 (6.1 Elektrivõrgu kadude ja reserveeriva võimsuse vähenemine) on samuti kirjeldatud koormuse reguleerimist, kus päikesepaneelide suure tootmise korral võimsus salvestati akupanka ning seda kasutati näiteks öise koormuse katmiseks, mille tulemusel vähenesid elektrivõrgu kaod ja reserveeriva võimsuse vajadus. Kirjeldatud olukorras on akupankadel jaotusvõrgule ka teine mõju. Nimelt oli keskpinge-madalpinge alajaamas trafo võimsusega 630 kVA, mis suudab vastu võtta teatud suurusega tarbimise või tootmise. Kui akupangad paigaldatakse alajaama madalpinge poolele võimaldab see antud alajaama toitele panna rohkem tarbimist, kui trafo võimaldaks. Samuti on võimalik tänu akupankadele toota antud alajaama suunal rohkem energiat, salvestades trafo võimekust ületava osa akupankadesse. Kuigi tootjate liitumine on vastavalt tegelikele kuludele ja trafo

vahetamise kulu on kliendi kanda, siis tarbijate puhul on liitumine alajaamade läheduses ampri hinnaga ning sellest tulenevalt trafo vahetamise kulu võrguettevõtja kanda. Järelikult, võib akupanga paigaldamine olla alternatiiv trafo vahetusele. Sellest tulenevalt on jaotusvõrgus võimalik selliseid investeeringuid edasi lükata.

Akupankade mõju koormuse juhtimisele illustreerib joonis nr 6.3. Akupankasid on võimalik kasutada tipukoormuste katmiseks. Allikas nr [28] uuriti 2 MW suuruse naatrium-väävelakude süsteemi kasutamist tipukoormuste katmiseks. Õhtuse tipukoormuse ajal vahemikus kell 17-20 ja hommikul kella 6-8 ajal toimus akupanga tühjakslaadimine, akupanga laadimine toimus öösel. Joonisel on näha koormuse ühtlustumine.



Joonis 6.3 Koormuse reguleerimine 2 MW Na-S akupangaga [28]

Koormuse juhtimine stabiliseerib elektrivõrgu toimimist ja suurendab paindlikkust. Samuti, akupangad pakuvad alternatiivi võrgutugevdustele, trafode vahetamisele. Lisaks väheneb koormuse langemisega katkestuste võimalus.

Oluline on, et tipukoormuste katmiseks kasutatakse tavaliselt, näiteks, kiiresti käivitatavoid gaasielektrijaamasid, mille heitkogused on palju suuremad võrreldes taastuvatel energiaallikatel põhinevate elektrijaamadega. Akupankade kasutamine vähendaks seeläbi ka CO₂ koguse paiskamist atmosfääri. Kokkuvõttes väheneb koormuse langedes ka surve võrgus kasutatavatele seadmetele, mille läbi rikked vähenevad.

Koormuse reguleerimine võib tulevikus osutada ka majanduslikult kasulikuks. Energiat salvestatakse öösiti, kui elektri hinnad on madalad ja energiat antakse võrku tippkoormuse ajal, kui elektri hinnad on kõrged.

6.4. Iseseisva (*Off-Grid*) võrgu rajamise võimalus

Akupankade integreerimine jaotusvõrku võimaldab iseseisvate võrguosade, ehk *Off-Grid* võrgu teket. Energiasalvestustehnoloogiad võimaldavad kasutada jaotusvõrgus elektri tagamiseks alternatiivseid võimalusi, tänu millele võib rajamata jääda suures osas alakasutatavat võrku või hoida kokku kulusid. Näiteks, kui tootja või tarbija soovib võrguühendust olemasolevast võrgus väga kaugel, võib osutada mõistlikuks ja odavamaks rajada *Off-Grid* süsteem, mille lahutamatuks osaks on tavaliselt ka akupangad. Sama põhimõte võib osutada mõistlikuks väiksematel saartel liituda soovivate tarbijatele ja tootjatele. Sellised hübriidsüsteemid on kombineeritud tootmisest ja salvestamisest, näiteks päikesepaneelid ja/või tuulikud ja akupangad, lisaks võib vajalik olla ka diiseldiiseliinide paigaldamine.

6.5. Mõju jaotusvõrgu kulutustele

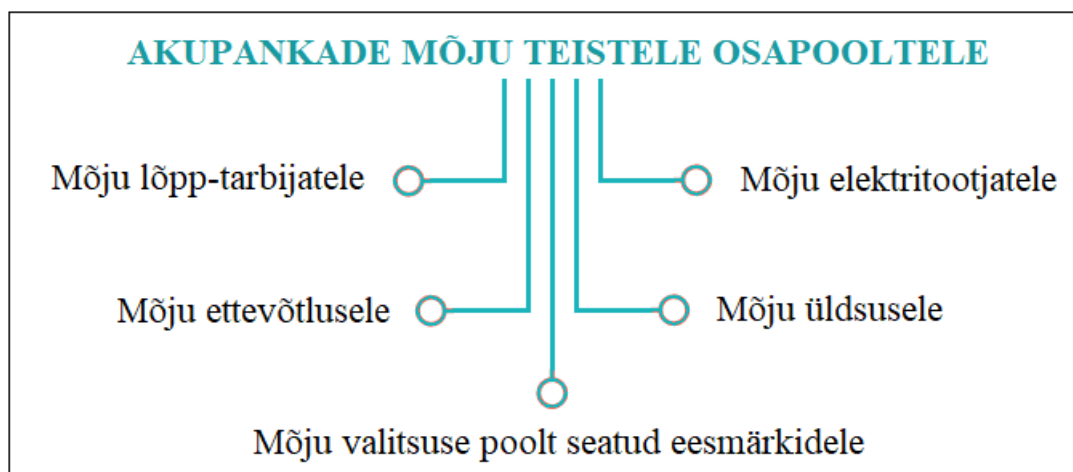
Oletame, et jaotusvõrku hakatakse massiliselt akupankasid integreerima. Eesmärgiks kõik eelpool mainitud hüved ning investeerijaks jaotusvõrk ise. Siis tuleb arvestada, et jaotusvõrku planeeritakse järgnevatel neljakümneks aastaks. Akupankade eluiga on kõigest 10-20 aastat. Järelikult on vaja akupankade eluea pikendamiseks mitmeid kordi uuesti nendesse investeerida. Arvestades hetke akupankade hindasid, siis ei ole võimalik kulutõhusust sellise maksumuse ja eluea juures saavutada. Kõigele lisandub veel hoolduskohustus, mis nõuab lisa raha- ning inimressurssi. Järelikult, hetkel omab akupankade võrku integreerimine mõju ainult teadmiste ja kogemuste suurenemisele, kuid mitte kulude ja hüvede optimaalsele jagunemisele.

Kokkuvõttes omab akude integreerimine jaotusvõrgule olulist mõju, suurendades töökindlust, paindlikkust, energiajulgeolekut, samuti omades mõju ka elektrivõrgu juhtimisele ja reguleerimisele. Lisaks, akupangad on *Off-Grid*'i lahutamatuks osaks. Kuid akupankade kõik mõjud ei pruugi olla ainult positiivsed, hetkel on akupankade hind liiga kõrge, et neid oleks majanduslikult mõistlik elektrivõrku liita.

Akupankade kulude analüüsi tehakse täpsemalt peatükis 8. Järgmises peatükis kirjeldatakse akupankade mõju tootjatele, lõpp-tarbijatele ja teistele osapooltele.

7. Akupankade mõju tootjatele ja lõpp-tarbijatele (ja teistele osapooltele)

Akupankade integreerimine jaotusvõrku avaldab mõju lisaks jaotusvõrgule ka teistele osapooltele. Peamised osapooled on toodud joonisel 7.1. Järgnevas alapeatükis on toodud põhjendused, kuidas akupangad joonisel toodud osapooli täpselt mõjutavad.



Joonis 7.1 Akupankade poolt mõjutatavad teised osapooled

7.1. Mõju lõpp-tarbijatele

Akupankade mõju lõpptarbijatele saab jaotada kaheks alakategooriaks: [29]

1. Elektrienergia tarbimisega seotud kulude juhtimine.
2. Ebakvaliteetse võrguteenuse ja katkestustega seotud kulude vähendamine või vältimine.

Mõlema puhul on tegemist kulude optimeerimisega. Esimesel juhul on võimalik lõpptarbijatel mõjutada oma elektriarve suurust. Teisel juhul on lõpp-tarbijatel võimalik vähendada kulusid, mis tulevad varustuskindlusest või pinge kõikumistest. Kuigi hetkel ei ole akupankadesse salvestatud energia kasutamine elektriturul eraldi reguleeritud, siis tulevikus võib see olukord muutuda. Sellest tulenevalt tekib akupankasid omavatel lõpptarbijatel võimalus samuti osaleda elektriturul. Tulevikus nähakse võimalust sõlmida lepinguid elektri müümiseks, salvestamiseks ja elektrivõrgus reguleerimisülesannete täitmiseks. Lisavõimalusena saaks tulevikus lõpptarbijate poolt omatud salvestussüsteeme välja rentida kolmandatele osapooltele või kaupmeestele, kes koondavad kokku võimsuse ja pakuvad seda erinevatel eesmärkidel. [30]

Lõpp-tarbijatel on võimalus valida aega, millal nad tarbivad energiat võrgust ja millal akupangast, seeläbi suurendades energiasäästlikkust ja vähendades kulusid. Laadides akupankasid tippkoormuse välisel ajal, kui elektri hind on madal ja kasutada akupankadesse salvestunud elektrienergiat, kui elektrivõrgus on hinnad kõrged, ehk tipukoormuste ajal. Sellisel juhul kasutab tarbija akusid enda jaoks, et tarbida tipukoormuste ajal odavamalt elektrienergiat. [30]

Akupangad on kasulikud lõpp-tarbijatele elektrivarustuse säilitamiseks juhul kui võrgus on katkestus või rike. Tarbijad, kes sõltuvad pidevast elektrivarustusest saavad vältida katkestustest tekkivaid kahjusid, sest akupangad suudaksid tagada elektrivarustuse piisavalt pikaks ajaperioodiks (suurem osa katkestusi likvideeritakse mõne tunni jooksul). [30]

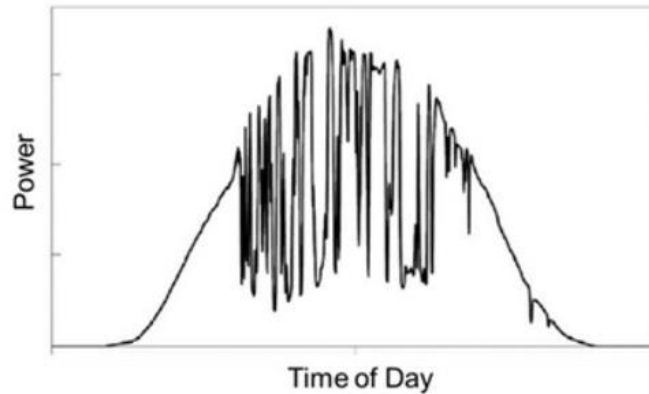
Lisaks võib akude integreerimine osutada tarbija jaoks võimalikuks alternatiiviks, kui tarbijaliitumist soovitakse asukohas, kus puudub vajalik võimsus või peab liitumise teostamiseks ehitama või tugevdama olulisel määral jaotusvõrku.

7.2. Mõju elektritootjatele

Taastuvatest energiaallikatest elektri tootmine maailmas aina kasvab. Nende elektrijaamade poolt toodetaval energial võivad olla väga unikaalsed omadused. Peamiseks väljakutseks on elektritoodangu ebastabiilsus. Akupankadel on selle asjaolu leevendamiseks aga märkimisväärne roll. Seoses taastuvate energiaallikate integreerimisega võrku on võimalik rõhutada nelja peamist väljakutset, mida akupangad suudavad lahendada: [31]

1. Elektriijaama väljundvõimsuse muutlikkus.
2. Tootmise ja tarbimise ajaline mittevastavus.
3. Ilma prognoosimise ebatäpsusest tulenev tootmise ebatäpne hindamine.
4. Taastuvate energiaallikate poolt tekitatav negatiivne mõju võrgule.

Akupankadel nähakse olulist rolli taastuvate energiaallikate edukal elektrivõrku integreerimisel. Kõige olulisemat rolli nähakse nende taastuvate energiaallikate võrku integreerimise juures, mille väljundvõimsus on ebastabiilne ja mõningal määral ka prognoosimatu. Peamisteks sellisteks energiaallikateks on tuule- ja päikeseenergia. Tuuleelektriijaama väljundvõimsuse varieeruvust võib näha peatükis üks toodud joonisel nr 1.1. Päikeseelektriijaama väljundvõimsuse varieeruvuse illustreerimiseks on toodud joonis 7.2. [31]

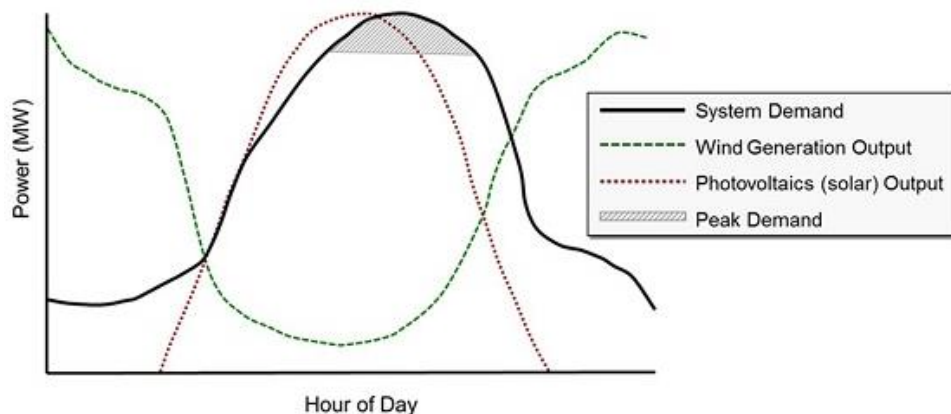


Joonis 7.2 Päikeselektrijaama väljundvõimsus ühe päeva lõikes [31]

Taastuvate energiaallikate väljundvõimsuse kõikumine võib olla nii lühiajaline kui ka pikemaajaline. Lühiajaline kõikumine võib olla põhjustatud tuule muutlikkusest või päikese kadumisest pilve taha ja kestvusega sekunditest kuni mitme minutini. Pikaajaline kõikumine toimub aastast-aastasse, hooajati, päevast-päeva ja päeva lõikes. Kõiki neid kõikumisi saab akupankadega ühtlustada. [31]

Lühiajaliste kõikumiste puhul toimuks akupankade kasutamine väljundvõimsuse ühtlustamiseks koheselt.

Pikaajalisi kõikumisi iseloomustab joonis nr 7.3. Joonisel on näha, et suur osa tuulelektrienergiast toodetakse öösel, kui koormus on madal ja vajalik energia toodetakse baaskoormust tagavatest elektrijaamadest, mille reguleerimine on keerulisem. Seega peavad süsteemihaldurid tuulelektrijaamade poolt toodetavat võimsust vähendama või tekib olukord, kus elektri hind muutub justkui negatiivseks. [31]



Joonis 7.3 Tuulelektrijaama väljundvõimsuse kõikumine ööpäeva lõikes [31]

Selliseid olukordi on tihedalt ette tulnud näiteks Saksamaal, kus elektri hind aeg-ajalt langebki alla nulli, kui tuuleenergiat toodetakse liiga palju. Tootjatel on sel juhul kaks peamist võimalust, kas seisata osad generaatorid või maksta tarbijatele elektri tarbimise eest. Antud juhul on tootjatel pigem kasulik toota maksimaalvõimsusel ja müüa miinushinnaga, ja tavaliselt riik kompenseerib kahjumi. [32]

Üleliigse elektrienergia salvestamisel akupankadesse on võimalik vältida negatiivseid elektrienergia. Salvestatud energiat saab müüa tipukoormuste ajal, mis teeb akupankade omamise tulusamaks.

Akupankade integreerimine omab mõju ka taastuvatel energiaallikatel põhinevate elektrijaamade suurusele. Kuna tootjate liitumine on kulupõhine, võivad olla liitumiskulud mingist hetkest ebamõistlikult suured. Põhjuseks trafode vahetus, liinide tugevdamine vms. Akupankadega saaks väljundvõimsust ühtlustada ja seeläbi ka vältida võrgu ehitusest tulenevaid kulusid.

Akupankade integreerimine elektritootjate juurde võimaldab suurendada elektritootmise prognoosi täpsust, sest üle prognoosimise korral saab kasutada akupankadesse salvestatud elektrienergia ja alaprognoosimise korral saab akupankadesse salvestada üleliigse elektrienergia.

7.3. Mõju ettevõtlusele

Akupankade integreerimine elektrivõrku võib elavdada ettevõtlust. Esiteks võib see olla oluline investeringu alternatiiv. Teiseks tekib energiasalvestussüsteemi omanikul mitmeid akupankadega seotud valikuvõimalusi: [33]

1. Osta elektrienergia odavalt, müüa kallilt.
2. Pakkuda jaotusvõrgule erinevaid reguleerimisteenuseid.
3. Rentida akupankasid.

Mitmed akupankade tehnoloogiad vajavad hooldust, seega peavad tekkima ettevõtted, kes pakuvad hooldust. Kui akupankad lakkavad töötamast, tuleb need utiliseerida, mis on samuti üks võimalik ettevõtluse suund.

Enne aga, kui akupangad hakkavad omama mõju ettevõtlusele, tuleb välja töötada nende õigusruum ja regulatsioonid.

7.4. Mõju üldsusele

Taastuvate energiaallikate kasutuselevõtt on ühiskonnas palju kõneainet pakkuv teema. Akupankade integreerimisega jaotusvõrku on taastuvate energiaallikate kasutuselevõttu aina enam võimalik suurendada. Sellest tulenevalt väheneb kasvuhoonegaaside paiskamine atmosfääri, kuna baaskoormusena on võimalik kasutada rohkem taastuvatel energiaallikatel põhinevaid elektrijaamasid. Lisaks võimaldavad akupangad hakata kasutama taastuvatest energiaallikatest toodetavat energiat ka tipukoormuste katmiseks. Kuid akupankadel on ka negatiivne mõju üldsusele, sest tänapäeva ei ole teada, mis saab akupankadest pärast nende eluiga. Kuidas toimub akude taaskasutamine? Kas see on üldse võimalik ja millises mahus? Lisaks on toimunud ülemaailmselt mitmeid suuremate akupankadest koosnevate süsteemide rikkeid, mis võivad põhjustada ohtu inimestele ja keskkonnale.

7.5. Mõju valituse poolt seatud eesmärkidele

Eesti energiamajanduse arengukavas aastani 2030 on võetud mitmeid keskkonnaga seotud eesmärgi, mida on antud töö raames ka juba mainitud:

- Kasvuhoonegaaside heitkoguste vähenemine energiasektoris.
- Taastuvenergia osakaalu suurendamine energia lõpptarbimisest.
- Kütusevabade energiaallikate osakaal suurendamine lõpptarbimisest.

Akupankade suuremahuline kasutamine energiasüsteemis võimaldab oluliselt vähendada fossiilsete kütuste kasutamist ja kasvuhoonegaaside paiskamist atmosfääri. Esile on võimalik tuua neli peamist fakti, kuidas akupankade võrku integreerimine mõjutab ettevõetud eesmärkide saavutamist: [33]

1. Energia, mida kasutatakse akude laadimiseks on peamiselt, kas baaskoormust katvatest energiatõhusamatest elektrijaamadest (nt soojuselektrijaamad) ja/või taastuvatel energiaallikatel põhinevatest elektrijaamadest. Seeläbi väheneb vajadus kasutada tipukoormuseid katvaid vähem efektiivseid elektrijaamasid (gaasigeneraatorjaamasid).
2. Võrgu efektiivsem toimimine, reguleerimine ja juhtimine tänu akupankadele võib vähendada kütuste kasutamist ja kahjulikke emissioone.
3. Akupankade kasutamisest tulenev võrgukadude vähenemine.
4. Akupankade kasutamine võimaldab võrku integreerida rohkem taastuvenergiaallikatel põhinevaid elektrijaamasid.

8. Finantsanalüüs

Eelnevates peatükkides on tutvustatud akupankade mõju nii jaotusvõrgule, tarbijatele, tootjatele ja teistele osapooltele. Arvestades mainitud mõjusid, finantsanalüüsi on võimalik teostada mitmel erineval viisil (tarbija lähedal, tootja lähedal, jmt), ja mille tulemusena tasuvusaeg on erineva pikkusega. Antud lõputöös finantsanalüüs on teostatud jaotusvõrgu vaatest, täpsemini teoreetilise olukorras, kus akupank paigaldatakse tarbijate lähedale eraldiseisvalt.

Akupankasid on võimalik kasutada võrguinvesteeringute edasilükkamiseks (näiteks piirkonnaalajaama rekonstrueerimine), tootja- või tarbijaliitumisest tuleneva võrgutugevduse alternatiivina, reserveerivaks võimsuseks, elektrikvaliteedi parandamiseks, tipukoormuste katmiseks, jne.

Enne finantsanalüüsi teostamist tuli valida akupankade paigaldamise asukoht. Antud lõputöö raames on vaatluse all pigem tarbija või tootja lähedale paigaldatud akupank. „Lähedal“ on suhteline mõiste. Lähedal võib olla elektritootjate, -tarbijate vahetuses läheduses, näiteks samal kinnistul, kuid lähedal võiks olla ka lähimas alajaamas. Optimaalseks lahenduseks tuli analüüsida akupanka erinevates asukohtades, kuid antud juhul vaadeldi akude paigaldamist maksimaalselt 3km raadiusesse tarbijatest.

Järgnevalt, valiti kaks võimalikku Eesti kliimasse sobivat akupanga tehnoloogiat, mis sobivad välisesse tingimustesse, ehk on vastupidavad temperatuuri kõikumistele. Eestis on ebastabiilsed talved, temperatuurid võivad olla plusskraadides, tavaliselt esineb vähemalt paarinädalane periood, kus on tugevad miinuskraadid ja/või külm tuul. Sellise lühema, väga külma perioodiga tuleb akupankade valikul kindlasti arvestada.

Üheks sobivaks akupanga tehnoloogiaks on liitium-ioonakud. Valituks osutus liitium nikkell mangan koobaltoksiid (LiNiMnCoO_2) akutüüp, mida peetakse üheks arenenumaks ja efektiivsemaks li-ioonakude seas. [34]

Teiseks sobivaks akupangaks Eesti välisesse kliimasse osutus nikkell-kaadmium (NiCd) akupank, mida antud lõputöö raames varem mainitud ei ole. Finantsanalüüsi käigus selgus, et maailmas enimlevinud akupankadest, mida on mainitud peatükkides 2 ja 3, ei sobigi kõik Eesti külmadesse tingimustesse. Akupankade paigaldamine on rohkem levinud soojema kliimaga riikides, kus ei ole ekstreemseid temperatuuri kõikumisi. Kuigi NiCd akud ei ole nii levinud, kui peatükis kaks nimetatud tehnoloogiad, on nad siiski maailmas laialt levinud. Valiku põhjuseks just suur külmataluvus (-20 kuni $+50$ °C) [35].

8.1. Finantsanalüüs perioodile oktoober – veebruar

Antud lõikes on teostatud investeeringu kalkulatsioon külmale perioodile oktoobrist veebruarini. Esimesena on teostatud finantsanalüüs liitium-ioonakule, mille vajalikud algandmed on võetud vastavalt magistritöö tabelile 2.6 ja on toodud kokkuvõtvalt järgmises tabelis:

Tabel 8.1 Li-ioon akupanga andmed vastavalt magistritöös toodud tabelile 2.6.

Efektiivsus, %	0,85	Efektiivsus tulevikus, %	0,88
Laadimistsüklite arv	3000	Laadimistsüklite arv tulevikus	6500
Akupanga eluiga, a	12,5	Akupanga eluiga tulevikus, a	12,5
Akupanga maksumus, EUR/kWh	375	Akupanga maksumus tulevikus, EUR/kWh	200

Vastavalt tabelile 8.1 on tulevikus akupanga maksumuse oodatav odavnemine 53%.

Selles arvutuses on oletatud, et akupank paigaldatakse piirkonda, kus asub 200 kW elektritootja ja 3km raadiuses asub 15 tarbijat igapäevase tarbimisvõimsusega 1800 Wh. Tarbijate jaoks sobiva akupanga mahtuvuse arvutamisel arvestati inverteri kasuteguriks 0,9 (akupanga mahtuvus arvutati vastavalt Taastuenergia OÜ koduleheküljel toodud arvutustele [36]).

$$1800 \cdot 0,9 \cdot 15 = 24300 \text{ Wh} \quad (8.1)$$

Akupanga autonoomsuseks arvestati 3 päeva, seega akupanga mahtuvuseks kokku:

$$24300 \cdot 3 = 72900 \text{ Wh} \quad (8.2)$$

Akupanga soovituslik tühjakslaadimise piirmäär on 40%:

$$72900 \div 0,4 = 182250 \text{ Wh} \quad (8.3)$$

Kui keskmine välistemperatuur oli valitud perioodil -7 kraadi (näitaja on 1,59): [36]

$$182250 \cdot 1,59 = 289778 \text{ Wh} \quad (8.4)$$

15 tarbija ööpäevaseks tarbimiseks saadi ca. 290 kWh.

Tesla Powerwall (edaspidi Tesla) ühe 13,5 kWh akupanga maksumus on 6500 €, millele lisandub paigalduse hind ca 590 €. Järgmisena leiti, mitu Tesla akupanka läheb vaja, et tagada 15 kliendi energiatarve 290 kWh.

$$290 \div 13,5 = 21 \text{ tk} \quad (8.5)$$

Tabel 8.2 Kaod akupangas

Kaod akupanga laadimisel, %	0,07	Kaod akupanga tühjenemisel, %	0,07
Kaod akupangas, %	0,05	Akupanga iseeneslik tühjenemine päevas, %	0,15

Arvestades kadusid (Tabel 8.2.), eelnevalt mainitud kliima ebastabiilsust, on mõistlik lisada üks lisaaku, ehk paigaldada kokku 22 akupanka. Lisaks on arvestatud, et akupankadel on garantii 10 aastat.

Esimese kümne aasta investeeringu kogukulu arvutati järgnevalt:

$$(6500 + 590) \cdot 22 = 159277 \text{ €} \quad (8.6)$$

Arvestatud on asjaoluga, et 10 aasta pärast tuleb hinnalangus ja tuleb akupanku välja vahetada:

$$159277 \cdot 53 \div 100 = 84948 \text{ €} \quad (8.7)$$

Järelikult, akupankade võimalik kulu 20 aasta peale on $159277+84948=244225$ €, mis ei sisalda hoolduskulu.

Järgmisena teostati arvutused NiCd akupanga maksumuse leidmiseks. NiCd akupank valiti suure külmataluvuse tõttu (-20 kuni +50°C) [10]. Allolevas tabelis on toodud arvutusteks vajaminevad andmed NiCd akupangale: [10]

Tabel 8.3 NiCd akupanga andmed [10]

Efektiivsus, %	0,80	Efektiivsus tulevikus, %	0,85
Laadimistsüklite arv	3500	Laadimistsüklite arv tulevikus	7000
Akupanga eluiga, a	12,5	Akupanga eluiga tulevikus, a	12,5
Akupanga maksumus, EUR/kWh	500	Akupanga maksumus tulevikus, EUR/kWh	250-1000

Eelnevalt teostatud arvutused (8.1-8.4) näitasid uuritava piirkonna tarbimiseks 290 kWh.

Esimese kümne aasta investeeringu kogukuluks leiti:

$$500 \cdot 290 = 145000 \text{ €} \quad (8.8)$$

Arvestatud on asjaoluga, et 10 aasta pärast tuleb hinnalangus ja tuleb akupanku välja vahetada:

$$145000 \cdot 50 \div 100 = 72500 \text{ €} \quad (8.9)$$

Järelikult, akupankade võimalik kulu on 20 aasta peale $145000+72500=217500$ €, mis ei sisalda hoolduskulu.

Tabelis 8.4 on toodud akupankade investeeringu maksumuste kokkuvõtte perioodil oktoober-veebruar.

Tabel 8.4 Kokkuvõtlik tabel akupankade investeeringu maksumustest perioodil oktoober-veebruar

	Akupanga tehnoloogia			
	Li-ioonaku		NiCd aku	
Investeeringu periood	20 a.	40 a.	20 a.	40 a.
Investeeringu maksumus, €	244225	414121	217500	362500

8.2. Finantsanalüüs perioodile märts – september

Järgmisena teostati sama arvutuskäik läbi soojemale perioodile (märts kuni september), arvutuste 8.1, 8.2 ja 8.3 tulemused jäid samaks. Keskmise välistemperatuur uuritava perioodil on ca. 11 kraadi, mille vastav näitaja Taastuvenergia OÜ kodulehe andemetel on 1,19 [36], millega arvestati akupanga mahtuvuse arvutamisel:

$$182250 \cdot 1,19 = 216878 \text{ Wh} \quad (8.10)$$

15 tarbija ööpäevaseks tarbimiseks leiti ca. 217 kWh.

Tesla ühe 13,5 kWh akupanga maksumus on 6500 €, millele lisandub paigalduse hind ca 590 €.

Tesla akupankade arv, et tagada 15 kliendi energiatarve 217 kWh:

$$217 \div 13,5 = 16 \text{ tk} \quad (8.11)$$

Arvestades kadusid, kliima ebastabiilsust, on mõistlik lisada üks lisaaku, ehk paigaldada kokku 17 akupanka. Ka selles analüüsis arvestati, et akupankadel on garantii 10 aastat.

Esimese kümne aasta investeeringu kogukulu on järgmine:

$$(6500 + 590) \cdot 17 = 120991 \text{ €} \quad (8.12)$$

Arvestati, et 10 aasta pärast tuleb hinnalangus ja tuleb akupanku välja vahetada:

$$120991 \cdot 53 \div 100 = 64528 \text{ €} \quad (8.13)$$

Järelikult, akupankade võimalik kulu 20 aasta peale on $120991 + 64528 = 185519$ €, mis ei sisalda hoolduskulu.

- NiCd akupanga maksumuse arvutus soojemal perioodil:

Eelnevalt teostatud arvutus (8.11) näitas uuritava piirkonna tarbimiseks 217 kWh.

Esimese kümne aasta investeeringu kogukuluks saadi:

$$500 \cdot 217 = 108500 \text{ €} \quad (8.14)$$

Arvestati, et 10 aasta pärast tuleb hinnalangus ja tuleb akupanku välja vahetada:

$$108500 \cdot 50 \div 100 = 54250 \text{ €} \quad (8.15)$$

Järelikult, akupankade võimalik kulu 20 aasta peale on $108500+54250=162750$ €, mis ei sisalda hoolduskulu. Võrku planeeritakse järgnevat 40-ks aastaks, akupankade paigaldamise kulu järgneva 40 aasta peale oleks li-ionakude puhul ca. 314575 € ja NiCd akude puhul ca. 271250 €.

Tabelis 8.5 on toodud akupankade investeeringu maksumuste kokkuvõtte perioodil märts-september.

Tabel 8.5 Kokkuvõtlik tabel akupankade investeeringu maksumustest perioodil märts-september

	Akupanga tehnoloogia			
	Li-ionaku		NiCd aku	
Investeeringu periood	20 a.	40 a.	20 a.	40 a.
Investeeringu maksumus, €	185519	314575	162750	271250

Kokkuvõtteks, antud analüüsis on toodud välja kaks erinevat perioodi eesmärgiga rõhutada vastuolu, kus soojematel perioodidel on madalam tarbimine kui külmemal perioodil, kuid samas on tootmine suurem, kui külmal perioodil. Seega, akupankade koguse valikul tuleb arvestada ühe perioodiga (mõlemad perioodid koos, ehk aastane tsüklil jaanuar-detsember). Selle analüüsi teiseks eesmärgiks oli tuua välja erinevus investeeringu suuruses, kus ebatäpsused arvutustes võivad viia ebevajalikke kuludeni.

8.3. Võrdlused

Külmas kliimas aku mahtuvus väheneb, see on põhjuseks, miks investeeringud akupankadesse kahel uuritava perioodil erinevad. Arvutused näitavad, et kui leida akupankade maksumus külmale perioodile, tuleb paigaldada rohkem akupankasid, kogumaksumusega li-ionakude puhul 244225 €, NiCd akudel 217500 € (investeeringu maksumus 20-ks aastaks). Kui teha arvutused, võttes arvesse ainult soojemaid ilmaolusid, tuleb paigaldada vähem akupankasid, kogumaksumuseks li-ionakudel 185519€ ja NiCd akudel 162750 € (investeering 20-ks aastaks). Maksumuste erinevus on li-ionakudel 11%, ehk 26725 € ja NiCd akudel 13%, ehk 22769 €. Antud juhul osutus NiCd akupankade maksumus odavamaks kui Tesla akude paigaldamine.

Akupankade aastaringisel töötamisel ei ole võimalik arvestada ainult keskmiste suviste temperatuuridega, vaid arvesse tuleb võtta külmakraadidest tingitud akude mahtuvuse vähenemine, mis tingib suurema süsteemi maksumuse.

Lisaks tuleb arvesse võtta asjaolu, et võrku planeeritakse järgnevat 40-ks aastaks, mis suurendab oluliselt investeeringut akupankadesse. Li-ioonakude puhul on investeeringu maksumuseks 40-ks aastaks ca. 414121 € (perioodil oktoober-veebruar) ja ca. 314575 € (perioodil märts-september), NiCd akude puhul on investeeringu maksumusteks vastavalt 362500 € (perioodil oktoober-veebruar) ja 271250 € (perioodil märts-september).

Järgnevalt võrreldakse akupankade paigaldamise maksumust võimalike võrguinvesteeringute maksumusega. Kui akupank ühendada tarbija vahetusse lähedusse, näiteks samale kinnistule, siis on võimalik vältida tarbijaliitumisest tulenevat madalpingevõrgu tugevdamist. Tarbijaliitumistel tihti esinevad probleemid tulenevad lühisvõimsusest või pingeprobleemidest, mille parandamiseks vahetatakse välja õhuliin (nt kaetud õhukaabli vastu) või paigaldatakse suurem trafo.

Võrgutugevduse hind sõltub õhuliini pikkusest ja vahetust vajavatest mastidest. Enamasti on hinnad järgmised (uute paigaldatavate õhuliinide, mastide ja trafode hinnad allika nr [37] andmetel):

- Õhuliini demontaaž ca. 2 €/m.
- Uus kaetud õhuliinijuhe 2-6 €/m.
- Puitmasti demontaaž ca. 50 €/tk.
- Betoonmasti demontaaž ca. 60 €/tk.
- Uued mastid 400-700 €. Lisaks vajadusel toed/tõmmitsad. (Mastide vahe 50-60m)

Antud juhul kui tarbija asub 3km pikkuse liini lõpus ja halvimal juhul vahetatakse terve õhuliin ilmastikukindla kaetud juhtmega õhuliini vastu ja samuti vahetatakse oma eluea lõpus olevad mastid, seega võib investeeringu maksumus olla ca. 60000 €.

Lisaks võib tarbijaliitumine põhjustada trafo vahetuse, näiteks vahetatakse 160 kVA trafo uue 250 kVA trafo vastu või 250 kVA trafo 400 kVA trafo vastu jne., trafo võimsusest sõltub ka investeeringu hind.

- Uus alajaam koos paigaldusega ca. 8000 € (250VM tüüpi) – 25 000 € (630VM).
- 250 kVA trafo hind ca. 6000 €.
- 400 kVA trafo hind ca. 8000 €.
- 630 kVA trafo hind ca. 10000 €.
- Lisaks olemasoleva alajaama ja trafo demontaaž ca. 1500 €.

Järelikult, võib investeeringu maksumus olla olenevalt trafo võimsusest ning paigaldatavast alajaamast ca. 16 000 – 37 000 € või rohkemgi, kui tekib vajadus paigaldada veel võimsam trafo ja suurem alajaama kest. Võrgutugevduste ja trafode ost kokku tähendab ca. $37000+60000=97000$ € investeeringut. Selline hind kehtiks siis, kui elektrivõrku liituks suurem hulk tarbimist, näiteks õhuliini lõppu, millest tulenevalt on vaja võrku tugevdama hakata.

Järgnevalt on toodud finantsanalüüsi tulemusi kokkuvõttev tabel (tabel 8.6):

Tabel 8.6 Finantsanalüüsi arvutuste kokkuvõtlik tabel

	Akupanga tehnoloogia				Investeering võrgu tugevdamiseks
	Li-ioonaku		NiCd aku		
Finantsanalüüsi periood	oktoober-veebruar	märts-september	oktoober-veebruar	märts-september	
Tarbijate kaugus akupangast	kuni 3 km.				Olemasoleva võrgu ja alajaama demontaaž, uute mastide ja uue ilmastikukindla õhukaabli paigaldamine, uue alajaama ja trafo paigaldamine.
Tarbijate arv	15				
Ööpäevane tarbimine, kWh	290	217	290	217	
Investeeringu maksumus 20-ks aastaks, €	244225	185519	217500	162750	
Investeeringu maksumus 40-ks aastaks, €	414121	314575	362500	271250	
Maksimaalne investeeringu maksumus, € (arvestatud ei ole hoolduskulusid)	414121		362500		

Üldjuhul tarbijaliitumistel nii suuri investeeringuid võrgu tugevdamiseks teha ei tule, kirjeldatud on halvimat võimalikku juhtumit.

Kokkuvõttes läheb akupankade paigaldamine järgnevaks 40-ks aastaks maksma olenevalt tehnoloogiast ca. 362000-414121 €, kõige halvemal juhul võib võrgu tugevdamine maksma minna ca. 97 000 €, sagedamini on vaja paigaldada ainult uus alajaam koos trafoga, mille maksumus on tunduvalt madalam.

Järelikult on akupankade paigaldamine vähemalt kolm korda kallim, kui võrgu tugevdamine. Kui liituja asub 400m ükskõik, millisest madalpinge alajaamast, siis tema liitumine on ampripõhine ja vajalikud võrgutugevduskulud kannab võrguettevõtja. Kui liituja asub lähimast madalpinge alajaamast kaugemal kui 400m, on liitumistasu kulupõhine ja vajalike ehitustööde maksumuse kannab liituja. Antud juhul ei ole akupankade paigaldamine mõistlik alternatiiv ei jaotusvõrguettevõttele ega tarbijale.

9. Järeldused

Eelmistes peatükkides anti ülevaade maailmas olemasolevatest enimlevinud akupankade tehnoloogiatest. Uuriti, millised on akupankade valiku alused ja võrku integreerimise tehnoloogilised nõuded. Tutvustati akudest huvitatud osapooli ja millist mõju energiasalvestussüsteemid omavad jaotusvõrgule, tootjatele, tarbijatele ja teistele osapooltele. Samuti teostati finantsanalüüs.

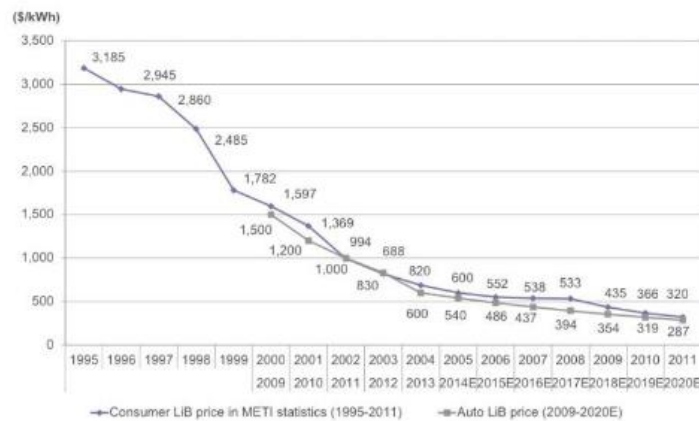
Lõputöö eesmärgiks oli jõuda järeldusele, kelle võit on akupankade jaotusvõrku integreerimine, kas tarbija ja/või jaotusvõrgu oma. Tegemist on teoreetilise lahendusega.

Vastavalt peatükis number kaheksa toodud finantsanalüüsile selgub, et iseseisvate akupankade võrku integreerimine ei ole hetkel majanduslikult kasulik ega tasuv. Akupankade hinnad (2017.a.) on liiga kõrged, et saavutada vajalikku tasuvust ja toota kasumit. Isegi kui akupankade poolt võimaldatavat kasu ei saaks rahasse ümber arvutada, on akupankade hinnad ikkagi liiga kõrged. Arvestades, et jaotusvõrku planeeritakse ette 40-ks aastaks ja akupankade eluiga on napilt üle 10 aasta, tähendab see, et akupankadesse peab jaotusvõrgu planeeritava eluea jooksul mitmeid kordi investeerima. Finantsanalüüsi käigus arvatud akupankade maksumuseks tuli ca. 160000 – 250000 € (olenevalt uuritud tehnoloogiast). Antud maksumus tuli 20 aasta pikkuse investeeringu peale. Eestis planeeritakse võrku järgneviks 40-ks aastaks, mis suurendaks oluliselt investeeringu maksumust. 40 aasta peale oleks li-ion akude maksumuseks ca. 315000-414 000 € (olenevalt, millisele perioodile arvutused teostati) ja NiCd akude maksumuseks vastavalt ca. 271000-362000 € (maksumuse arvutamisel arvestatud prognoositava hinnalangusega pärast 10 aastat). Võrgu investeeringu teoreetiliseks arvutuslikuks maksimaalseks maksumuseks arvutati ca 97 000 €, mis on 3-4 korda väiksem maksumus. See on märkimisväärne, et isegi arvestades võimalikult halvimat situatsiooni ei ole akupankade paigaldamine selliste hindade juures mõeldav alternatiiv.

Selleks, et iseseisvate akupankade jaotusvõrku integreerimine muutuks tasuvaks, peavad akupankade hinnad tunduvalt langema, nende energiatõhusus ja mahtuvus kasvama ning eluiga pikenema. Vastasel juhul on keeruline hinnata, kes on võitja, kui majanduslikult investeering ennast lühikese aja jooksul ära ei tasu.

2017 aastal toimunud taastuvenergia konverentsi juhiti tähelepanu allolevale graafikule (vt joonis 9.1), kus on näidatud akupankade maksumuse vähenemist viimasel kahekümnel aastal. Graafikut esitles konverentsil osalenud Päikeseelektri Assotsiatsioon. [38] Edaspidise

akupankade hinna languse korral jõutakse ükshetk punkti, kus akude paigaldamine suuremahuliseks energiasalvestuseks ära tasub. Alles sellest hetkest alates hakkavad erinevad osapooled kasu teenima ja siis saab vaadelda, kes võidab rohkem. Seni kuni hinnad on kõrged, on võitjaks ainult tehnoloogia tootjad, müüjad ja tehnoloogiliste lahenduste pakkujad. Nende puhul on oluline oma toodet müüa, pole oluline, kas toode ennast ära tasub või ei, tähtis on, et jaguks osapooli, kellele toodet pakkuda.



Joonis 9.1 Akusalvestuse hinna langus (li-ioonakud) [38]

Kui analüüsida olukorda, kus akupankade hinnad on märkimisväärselt langenud ja nende parameetrid paranenud, või jätta üldse tähelepanuta hetke kõrged akupankade hinnad, siis on võimalik analüüsida akupankadest kasu saavaid osapooli. Lõputöö üheks eesmärgiks oli välja selgitada, kas kasu saavad osapooled on tarbijad ja/või jaotusvõrk, või on osapooli rohkem. Osapoolte analüüsi käigus selgus, et kasu saavaid osapooli on tunduvalt rohkem: jaotusvõrk, tarbija, elektritootja, tehnoloogia tootjad, tehnoloogia müüjad, tehnoloogiliste lahenduste pakkujad, valitsus, võimalik, et ka investorid, õppe- või teadusasutused, jt.

Akupankade integreerimisel kõige suurem mõju avaldub jaotusvõrgule. Väheneksid elektrivõrgu kaod ja vajadus reserveeriva võimsuse järele. Akupangad võimaldaksid reguleerida sagedust, pinget ja juhtida koormust. Lisaks, tänu akupankadele on võimalik *Off-Grid* võrguosade loomine elektrivõrgust eraldatud piirkondades, näiteks, saartel. Akusid saab kasutada ka võrguinvesteeringute edasilükkamiseks. Kokkuvõttes, paraneb elektrivõrgu töökindlus, suureneb energiajulgeolek ja elektrivõrgu juhtimise paindlikkus. Akupankade mõjuga jaotusvõrgule saab lähemalt tutvuda peatükis 6.

Samuti, akupankade integreerimine omab suurt mõju elektri lõpp-tarbijatele ja elektritootjatele.

Lõpp-tarbijatel on võimalik oma elektrienergia tarbimisega seotud kulusid juhtida, salvestades odavat energiat, kui võrgus on madal koormus ning kasutades salvestatud energiat tipukoormuste ajal. Nii on võimalik vältida tipukoormuste ajal esinevat kõrget elektrihinda ja sellega kulusid kokku hoida. Teise olulise võiduna leiti, et lõpp-tarbijad saavad akude integreerimisega parandada ebakvaliteetset võrguteenust, ehk vähendada või vältida katkestustega seotud kulusid ja kulupõhistel liitumistel vältida võrgutugevdusi.

Elektritootjate saaksid tänu akupankadele ühtlustada oma väljundvõimsust, parandada tootmise ja tarbimise ajalist mittevastavust ning tootmise prognoosi täpsust. Akupankade võrku integreerimisel võivad jääda ära kulutused võrgu tugevdamiseks, trafode vahetamiseks, jms. Need kulutused võivad olla sadades tuhandetes eurodes, mis omavad olulist mõju elektritootjatele.

Lisaks, lõputöö raames selgus, et akupankade integreerimise mõju kandub edasi ettevõtluse arenemisele. Tekib võimalus uuteks ettevõtlusharudeks, näiteks, akupankade rent või jaotusvõrgule reguleerimisteenuste pakkumine.

Kindlasti oleks võitjaks osapooleks ka valitsus, sest ENMAK 2030 kinnitatud eesmärkide täitmisele aitaksid akupangad kaasa.

Järeldusest selgub, et kasu saajaid osapooli on tunduvalt rohkem, kui lihtsalt jaotusvõrk ja tarbija, kuid leiti, et kõige suuremat kasu saaks on ikkagi jaotusvõrk. Seega võitjaks osutub jaotusvõrk, kuid väikeseid võite pakuks akupankade integreerimine väga paljudele osapooltele.

Oluline on siiski tuua välja, et akupankadest võimalikult suure kasu saamine ei ole seotud ainult ühe kindla kasutusala. Akupankadele tuleb leida võimalikult palju erinevaid rakendusi, et tasuvus oleks tõenäolisem. Takistuseks on endiselt akupankade liiga kõrge maksumus ja lühike eluiga. Üheks takistavaks asjaoluks on kindla õigusruumi puudumine, nagu sai mainitud peatükis number neli, kus toodi välja akupankadele kohaldatavad võimalikud tehnilised nõuded.

Kokkuvõttes järeldub, et hetkel oleks akupankade integreerimine pigem „roheline mõtteviisi“ täitmine, mis ei ole majanduslikult kasumlik. Iseseisvate akupankade integreerimine tänaste akupankade hindade juures ei tasu ennast ära. Kindel võib olla selles, et akupankadel on suur tulevik, kui hinnad langevad, sest huvitatud osapooli ja akupankade erinevaid rakendusalasid on piisavalt palju.

Lõputöö kokkuvõte

Lõputöö eesmärgiks oli uurida, kas eraldiseisvate akupankade integreerimine Eesti jaotusvõrku võib olla mõistlik ja kellele selline lahendus on kasulikum. Samuti uurida, kas osapoolteks on ainult tarbija ja jaotusvõrk, või osapooli on rohkem.

Töö vajadus on tekkinud maailmas aina suurenevast taastuvatel energiaallikatel põhinevate elektrijaamade rajamisega ja akupankade tehnoloogiate täiustumisega. Lisaks, Euroopa Liidus on võetud ette väga ambitsioonikad eesmärgid, mille täitmisele võivad akupangad kaasa aidata.

Akupangad ei ole enam ainult päikeseelektrijaamadega koos paigaldatavad energiasalvestustehnoloogiad, vaid aina rohkem kaalutakse akupankade eraldiseisvat integreerimist võrku. Sellest tulenevalt on tekkinud vajadus uurida, kes saavad kõige rohkem kasu, millised on huvitatud osapooled, millised on üldse maailmas enimlevinud tehnoloogiad ja millised on nende valiku alused. Tekkis vajadus ka uurida, kuidas on reguleeritud akupankade integreerimine Eesti jaotusvõrku ja millised peaksid olema nende tehnilised nõuded.

Esimesena uuriti, milline on akupankade vajadus Eesti jaotusvõrgus. Leiti, et vajadus akupankade võrku integreerimiseks on realselt olemas väga mitmel põhjusel:

- energiapuuduse tagamine,
- elektrikvaliteedi parandamine,
- jaotusvõrgu ja elektritarbijate, -tootjate kulutuste vähendamine,
- koormuse juhtimine, sageduse ja pingereguleerimine, jt.

Edasi anti ülevaade, millised akupankade tehnoloogiad on hetkel maailmas enimlevinud ja arenenud. Nendeks tehnoloogiateks on plii-happeakud, li-ioonakud, naatrium-väävelakud, redoks-läbivooluakud. Omavahelise võrdluse tulemusel selgus, et kõikide tehnoloogiate maksumused, omadused, tsüklite eluiga on erinevad. Hetkel kõige arenenumad tehnoloogiad on plii-happeakud ja li-ioonakud, kuid maksumus on kõikide akude puhul üheks takistavaks asjaoluks.

Järgnevalt analüüsiti, millistel alustel valitakse akupankasid erinevates olukordades. Analüüsi käigus selgus, et on kümneid erinevaid faktoreid, mida akupanga valikul arvestada. Esile kerkisid neli kõige tähtsamat karakteristikut: töötemperatuur, akupanga tühjakslaasimise piirmäär, pinge ja sageduse piirväärtused ning akude täis- ja tühjakslaadimise vool. Neile

neljale akupanga valikut mõjutavale tegurile lisandus hulk teisi mõjusid. Tulemusena jõuti järeldusele, et akupankade valikul tuleb arvestada võimalikult palju näitajatega ja võimalusel kasutada erinevaid meetodeid õige valiku tegemiseks. Lisaks toodi välja, millised akupangad sobiksid Eesti tingimustesse. Tulemusena leiti, et kõiki akupankasid on võimalik jaotusvõrku integreerida, sest vajaminevaid tingimusi saab alati luua (näiteks, sobilikku töötemperatuuri saab tagada akupankade paigaldamisega sisetingimustesse). Kui aga arvestada akude paigaldamist välistesse tingimustesse, kus nad peavad tagama oma töö ka miinuskraadide juures, muutub sobivate akupankade valik väiksemaks. Kokkuvõttes leiti, et peamiselt sobivad Eesti sellised akupangad, mis suudavad töötada ekstreemsemates tingimustes, nt talvise külma ajal.

Pärast akupankade valiku aluste täpsustamist tekkis vajadus uurida olemasolevaid ja võimalikke tehnilisi nõudeid (mitte detailselt). Analüüsi teostamise käigus selgus, et Eestis puudub akupankasid käsitlev õigusruum ja tehnoloogilised nõuded. Näiteks, ei ole akupankasid seadustes üldse defineeritud. See on kindlasti üks problemaatilisemaid teemasid, mille arendamine on vajalik. Antud peatükis sai välja pakutud erinevaid tehnilisi nõudeid põhinedes olemasolevatele seadustele ja nõuetele.

Järgnevalt uuriti akupankade integreerimisest võimalikke huvitatud osapooli, teoreetiliselt järgneva viie aasta jooksul. Selgus, et otseselt ja kaudselt huvi tundvaid osapooli on väga palju ja igast eluvaldkonnast ning aja möödudes võivad need osapooled muutuda. Huvi põhjuseid on mitmeid erinevaid: teenida kasumit, saada teadmiseid, parandada võrguteenuse kvaliteeti, saavutada eesmärged vms. Huvitatud osapoolteks on:

- võrguettevõtted,
- elektritarbijad ja -tootjad,
- pangad ja investorid,
- energiaühised,
- tehnoloogia tootjad, müüjad ja tehnoloogia lahenduste pakkujad,
- valitsus, ministriumid ja ametid,
- loodusaktivistid, jt.

Seejärel anti ülevaade, milline on akupankade mõju jaotusvõrgule, tootjatele, lõpp-tarbijatele ning teistele osapooltele. Mõju jaotusvõrgule on järgmine:

- mõju töökindlusele,

- mõju energiajulgeolekule,
- mõju paindlikkuse suurenemisele,
- mõju iseseisvate võrguosade (*off-grid*) tekkele,
- mõju juhtimisele ja reguleerimisele.

Tekkis võimalus vähendada elektrivõrgu kadusid ja reserveerivat võimsust, reguleerida sagedust, pinget ja juhtida koormust. Kuid negatiivse küljena ei leidnud akupankadesse investeerimine positiivset vastukaja võrgu planeerimise vaatest, sest võrku planeeritakse 40-ks aastaks, aga see on mitu akupankade eluiga.

Mõju lõpp-tarbijatele seisnes peamiselt tarbimisega seotud kulude juhtimises ning ebakvaliteetse võrguteenuse ja katkestustega seotud kulude vähendamises või vältimises.

Elektritootjate puhul olid akupangad kasulikud lahendamaks probleeme seoses väljundvõimsuse muutlikkusega, toomise ja tarbimise ajalise mittevastavusega, prognoosi täpsuse parandamisega. Lisaks, akupangad võivad aidata ära hoida liitumisega seotud suuri kulusid.

Akupankadel oli mõju ka ettevõtlusele, üldsusele ja valitsusele. Valituse puhul oli tegemist ettevõtetud eesmärkide saavutamise, millele võivad akupankade integreerimine kaasa aidata.

Viimase peatükina teostati finantsanalüüs, kus teostati teoreetiline olukorra analüüs, mille käigus valiti kaks akupankade tehnoloogiat, mis võiksid sobida Eesti tingimustega. Valituks osutusid liitium-ioonaku (li-ion) ja nikkel-kaadmium (NiCd) akupangad, põhjuseks nende suur külmataluvus ja sobivus võrku integreerimiseks eraldiseisvalt. Lisaks uuriti teoreetiliselt võimalikku võrguinvesteeringu maksumust, mida saaks akupankade paigaldamisega vältida.

Järeldustest selgus, et akupankade paigaldamine jaotusvõrku ei ole praegusel ajahetkel tasuv. Arvestades, et jaotusvõrku planeeritakse järgnevat 40-ks aastaks on selliseks ajaks akupankadesse tehtav investeering 370 000 – 420 000 € (vastavalt uuritud tehnoloogiatele). 40-ks aastaks tehtav võrgutugevduse investeering võiks jääda suurusjärku 100 000 €, mis on pea neli korda väiksem. Seetõttu ei võidaks eraldiseisvatest akupankade integreerimisest hetkel keegi muu, kui ainult akupankade tootjad, müüjad ja tehnoloogiliste lahenduste pakkujad (samuti need liitujad, kelle kulud kasvavad seoses trafode vahetamise/ostuga. Täpsem selgitus lõputöö esimeses peatükis). Akupankade tasuvaks muutmiseks on vaja eelkõige nende maksumuse vähenemist. Teisest küljest, tasuvust aitab parandada akupankade integreerimine mitmeks erinevaks otstarbeks (koormuse juhtimine, erinevad reguleerimisteenused, jms). Enne

tuleb välja töötada õigusruum ja luua sobilik keskkond iseseisvate akupankadega seotud teenuste tekkimiseks.

Jättes arvestamata akupankade hinna, on võimalik siiski suurimaid kasu saajaid analüüsida. Sellisel juhul tuleb võitjaks jaotusvõrk, sest just jaotusvõrgus oleks akupankadel kõige enam rakendusalasid. Väiksemaid võite saaksid ka kõik teised osapooled, kuid praeguseks (2017-2018) takistuseks jääb siiski tehnoloogia kõrge hind ja ebapiisavad seadused, regulatsioonid.

Antud lõputöö koostamisele eelnevalt oli autori enda arvamus, et akupangad on mingites olukordades võrku integreeritult tasuvad ja kasumlikud. Uurimustöö käigus selgus aga, et praegusel ajahetkel (2018.a. algus) ei ole nende võrku integreerimine majanduslikult kasulik ja sellest tulenevalt saaks ümber lükata küsimuse „kes on võtja?“. Kui tehnoloogia ennast ära ei tasu, siis ei olegi võitjaid, kuid tuleviku vaates võib näha akupankade olulisust.

Lõputöö kirjutamisel kerkis üles mitmeid kitsaskohti. Akupankasid ei ole Eestis piisavalt uuritud, puuduvad analüüsid, kogemused, prototüübid, või pilootprojektide käivitumisel ei väljastata andmeid, mis aitaksid teostada põhjalikumat analüüsi. Samuti, seadustes ei ole mainitud akupankasid. Akupankade jaoks tuleb luua õigusruum, et nende võrku integreerimine muutuks rohkem atraktiivseks. Ülemaailmselt on elektrivõrkudesse integreeritud juba väga suurel hulgal akupankasid, suurem osa neist ei ole veel jõudnud oma eluea lõppu. Seega, puuduvad kogemused, mis saab akupankadest pärast nende eluiga ja nende eluea ajal toimuvad uuringud on puudulikud või piiratud kättesaadavusega.

Kokkuvõttes, akupankade võrku integreerimine vajab põhjalikumat analüüsi nii seadusandlikust küljest kui ka tehnilisest vaatenurgast.

Kasutatud kirjandus

- [1] „2030 Energy Strategy,“ European Commission, [Võrgumaterjal]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/2030-energy-strategy>. [Kasutatud 20 oktoober 2017].
- [2] „Energiamajanduse arengukava aastani 2030,“ 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.tuuleenergia.ee/wp-content/uploads/ENMAK-2030.pdf>. [Kasutatud 1 november 2017].
- [3] B. Dudley, „BP Statistical Review of World Energy June 2017,“ *BP Statistical Review of World Energy*, p. 52, juuni 2017.
- [4] J. Kurnitski ja E. Pikas, „World Energy Council Estonia,“ november 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.wec-estonia.ee/publikatsioonid/liginullenergiahoonete-lokaalse-taastuvelektri-vajadus/>. [Kasutatud 20 september 2017].
- [5] A. Dekka, R. Ghaffari, B. Venkatesh, B. Wu, „A Survey on Energy Storage Technologies in Power Systems,“ *Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, 2015.
- [6] J. Cho, S. Jeong, Y. Kim, „Commercial and research battery technologies for electrical energy storage applications,“ *Progress in Energy and Combustion Science*, 2015.
- [7] G. L. Kyriakopoulos, G. Arabatzis, „Electrical energy storage systems in electricity generation: Energy policies, innovative technologies, and regulatory regimes,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016.
- [8] I. Poole, „Radio-Electronics,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.radio-electronics.com/info/power-management/battery-technology/lithium-ion-battery-advantages-disadvantages.php>. [Kasutatud 5 november 2017].
- [9] „Teadmus - Eestikeelne teadmusbass,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.teadmus.ee/andmed/1501171919592/materjalide-keemia-iii-kordamisk%C3%BCsimused-22>. [Kasutatud 5 november 2017].

- [10] European Association for Storage of Energy (EASE), European Energy Research Alliance (EERA), „European energy storage technology development roadmap towards 2030,“ 2013.
- [11] „Commercialisation of energy storage in Europe,“ European Commission, 2014.
- [12] K. K. Mehmood, S. U. Khan, Z. M. Haider, S. Lee, M. K. Rafique, C. Kim, „Optimal Planning of Battery Energy Storage Systems for Mitigating Voltage Fluctuations in Active Distribution Networks,“ *International Conference on Power System Transients*, 2017.
- [13] R. Kempener, E. Borden, „Battery storage for renewables: market status and technology outlook,“ 2015.
- [14] K. K. Mehmood, S. U. Khan, S. Lee, Z. M. Haider, M. K. Rafique, C. Kim, „Optimal sizing and allocation of battery energy storage systems with wind and solar power DGs in a distribution network for voltage regulation considering the lifespan of batteries,“ *IET Renewable Power Generation*, 2017.
- [15] T. M. Bandhauer, S. Garimella, T F. Fuller, „A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries,“ *Electrochemical Society*, 2011.
- [16] H. de Vries, T. T. Nguyen, B. O. het Veld, „Increasing the cycle life of lithium ion cells by partial state of charge cycling,“ *Microelectronics Reliability*, 2015.
- [17] „Otselink p ikeseenergiaga,“ Taastuenergia O , [V orgumaterjal]. Available: <http://www.taastuenergia.ee/suvatsukli-aku.html>. [Kasutatud 5 november 2017].
- [18] D. Anse n, M. Dubarry, A. Devie, B. Y. Liaw, V. M. Garc a, J. C. Viera, M. Gonz alez, „Fast charging technique for high power LiFePO₄ batteries: A mechanistic analysis of aging,“ *Journal of Power Sources*, 2016.
- [19] „STRATEGIC CONTRIBUTION OF ENERGY STORAGE TO ENERGY SECURITY AND INTERNAL ENERGY MARKET,“ 2017. [V orgumaterjal]. Available: <https://ec.europa.eu/energy/en/content/energy-storage-documents>. [Kasutatud 30 oktoober 2017].

- [20] „Riigi Teataja - Võrgueeskiri,“ Vabariigi Valitsus, 2016 veebruar 19. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/12831412?leiaKehtiv>. [Kasutatud 1 november 2017].
- [21] „Energiaühistu,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://energiayhistud.ee/>. [Kasutatud 30 november 2017].
- [22] „Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mkm.ee/et/ministeerium-kontaktid/ministeeriumi-tutvustus>. [Kasutatud 30 november 2017].
- [23] „Keskkonnaministeerium,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.envir.ee/et/eesmargid-tegevused/keskkonnakorraldus/saastev-areng>. [Kasutatud 30 november 2017].
- [24] „Muudame maailma: säästva arengu tegevuskava aastaks 2030 (2030 Agenda),“ ÜRO, 2015. [Võrgumaterjal]. Available: http://www.envir.ee/sites/default/files/7_energia_2030_tegevuskava.pdf. [Kasutatud 30 november 2017].
- [25] „Konkurentsiamet,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.konkurentsiamet.ee/index.php?id=14188>. [Kasutatud 30 november 2017].
- [26] P. Lazzeroni, S. Olivero, F. Stirano, M. Repetto, „Battery Energy Storage System usage in a distribution grid for PV exploitation: A Middle-East case study,“ *Industrial Electronics Society , IECON 2016*, 2016.
- [27] J. Lindstens, „Study of a battery energy storage system in a weak distribution grid,“ *Uppsala Universitet*, 2017.
- [28] B.P. Roberts, „Deploying battery energy storage in the utility distribution grid,“ *Power and Energy Society General Meeting*, 2010.
- [29] „Energy Storage Association,“ ESA, [Võrgumaterjal]. Available: <http://energystorage.org/energy-storage/energy-storage-benefits/benefit-categories>. [Kasutatud 15 november 2017].

- [30] „Energy Storage Association,“ ASE, [Võrgumaterjal]. Available: <http://energystorage.org/energy-storage/energy-storage-benefits/benefit-categories/customer-sited-benefits>. [Kasutatud 15 november 2017].
- [31] „Energy Storage Association,“ ESA, [Võrgumaterjal]. Available: <http://energystorage.org/energy-storage/energy-storage-benefits/benefit-categories/renewable-integration-benefits>. [Kasutatud 15 november 2017].
- [32] „Postimees,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://majandus24.postimees.ee/4291779/sakslastele-makstakse-sel-nadalavahetusel-elektritarbimise-ees-peale>. [Kasutatud 15 november 2017].
- [33] „Energy Storage Association,“ ESA, [Võrgumaterjal]. Available: <http://energystorage.org/energy-storage/energy-storage-benefits/benefit-categories/incidental-and-other-benefits>. [Kasutatud 15 november 2017].
- [34] „Battery University,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion. [Kasutatud 30 november 2017].
- [35] „SAFT,“ Saft Groupe S.A., [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.saftbatteries.com/products-solutions/products/tel-x-standby?text=&tech=&market=350&sort=newest&submit=Search>. [Kasutatud 20 detsember 2017].
- [36] „Taastuenergia,“ Taastuenergia OÜ, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.taastuenergia.ee/aku-mahtuvuse-arvutamine.html>. [Kasutatud 20 detsember 2017].
- [37] „SLO,“ SLO Eesti AS, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.slo.ee/>. [Kasutatud 20 detsember 2017].
- [38] A. Meesak, „Eesti Maaülikool TEUK konverentsid,“ Eesti Päikeseenergia Assotsiatsioon, 2017. [Võrgumaterjal]. Available: http://tek.emu.ee/userfiles/yksused/tek/taastuenergia_keskus/TEUK19/MEESAK%20TEUK%202017.pdf. [Kasutatud 30 november 2017].

- [39] Paper, DG ENER Working, „The future role and challenges of Energy Storage,“ European Commission, 2016.
- [40] „Battery University,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries. [Kasutatud 30 november 2017].
- [41] I. Woofenden, „Home power,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.homepower.com/articles/solar-electricity/design-installation/or-grid>. [Kasutatud 20 detsember 2017].

Lisad

L.1. Originaaltabelid ja -joonised

Tabel L.1.1 Comparison among different electrochemical storage systems for the key grid applications

Tabel L.1.2 Low (optimistic) range of cost estimates

Joonis L.1.1 Factors that affect the lifespan of a BESS-battery (BESS – battery energy storage systems)

Joonis L.1.2 Important considerations for battery selection

Joonis L.1.3 Important considerations for battery selection by application

Joonis L.1.4 Akupankade integreerimisest huvitatud osapooled

L.1. Originaaltabelid ja -joonised

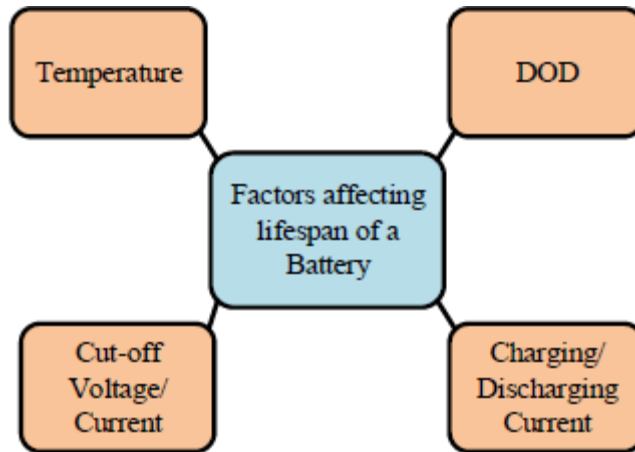
Tabel L.1.1 Comparison among different electrochemical storage systems for the key grid applications [10]

Application	Pb acid	Ni/MH	Na/S	Na/NiCl ₂	Redox Flow	Li/ion	Super capacitor
Time-shift	●	●	●	●	●	●	●
Renewable integration	●	●	●	●	●	●	●
Network investment deferral	●	●	●	●	●	●	●
Primary Regulation	●	●	●	●	●	●	●
Secondary Regulation	●	●	●	●	●	●	●
Tertiary Regulation	●	●	●	●	●	●	●
Power System start-up	●	●	●	●	●	●	●
Voltage support	●	●	●	●	●	●	●
Power quality	●	●	●	●	●	●	●

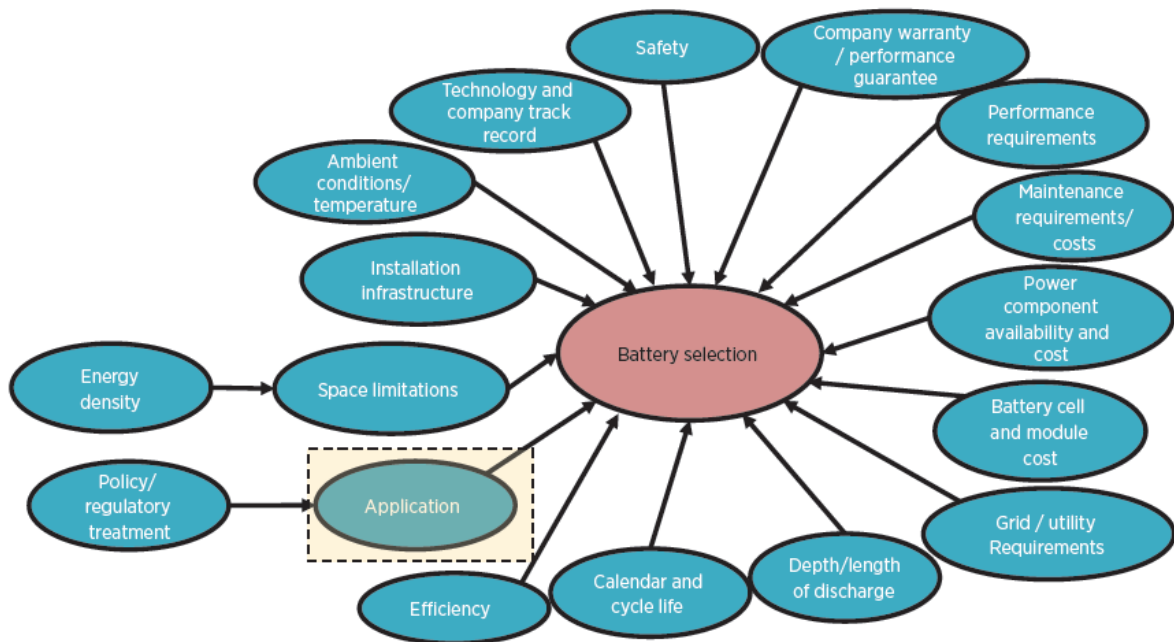
● Suitable ● Less suitable ● Unsuitable

Tabel L.1.2 Low (optimistic) range of cost estimates [11]

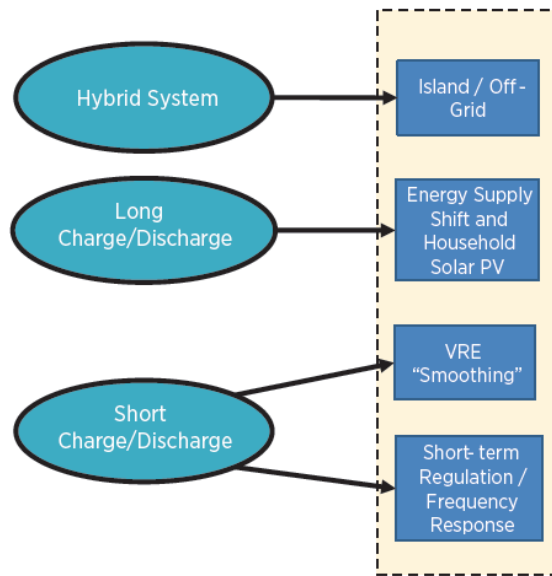
	Parameter	Storage round trip efficiency	Storage capex per kW	Storage capex per kWh	Storage opex fixed	Storage opex fixed	Storage opex variable	Cycle lifetime	Storage lifetime
		Unit	Percent	EUR/kW	EUR/kWh	EUR/kW	EUR/kWh	EUR/MWh	Thousand
Li-ion	2014	85%	0	375	10	0	2	3	12.5
	2030	88%	0	200	10	0	2	6.5	12.5
NaS	2014	78%	150	500	35	0	0	7.5	12.5
	2030	85%	35	80	35	0	0	7.5	12.5
Flow-V	2014	68%	1000	300	25	7.5	0	10	20
	2030	73%	600	70	15	2	0	15	20
PHES	2014	78%	500	5	4	0	8	>50	55
	2030	78%	500	5	4	0	8	>50	55
CAES-A	2014	65%	1,000	40	30	0	0	20	35
	2030	65%	700	40	21	0	0	20	35
CAES-D	2014	65%	500	50	15	0	~30	20	35
	2030	65%	400	40	12	0	~30	20	35
Lead-acid	2014	78%	150	100	6	0	0	1	10
	2030	81%	105	70	6	0	0	3	10
LAES-A	2014	57%	1,500	50	38	0	0	20	30
	2030	67%	1,200	40	30	0	0	20	30
Hydrogen P2P	2014	36%	1,850	0.2	37	0	10	10	15
	2030	40%	1,000	0.2	20	0	10	10	15



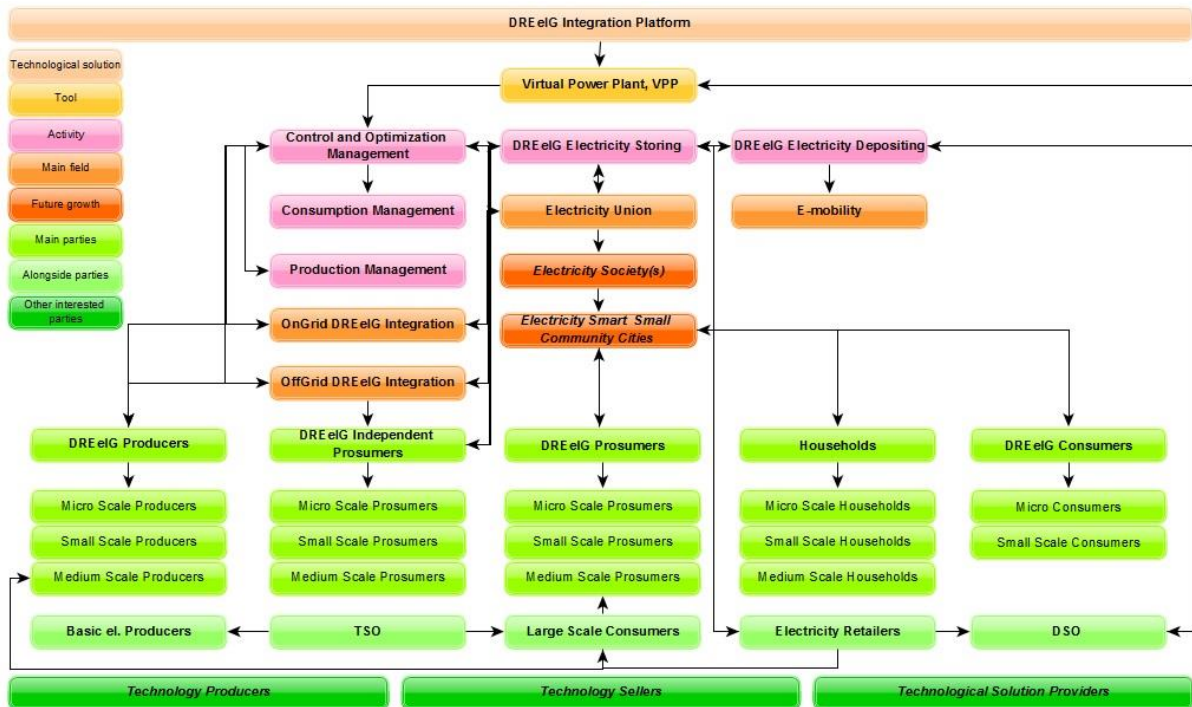
Joonis L.1.1 Factors that affect the lifespan of a BESS-battery (BESS – battery energy storage systems) [12]



Joonis L.1.2 Important considerations for battery selection [13]



Joonis L.1.3 Important considerations for battery selection by application [13]



Joonis L.1.4 Akupankkade integreerimisest huvitatud osapooled (lõputöö juhendaja Elina Rebecka Rikkase doktoritööst)