

**TAL
TECH**

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**SALVESTUSTEHNOLLOOGIATE MÕJU
ELEKTRISÜSTEEMI TERVIKULE**

**THE IMPACT OF ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES ON
ELECTRICAL SYSTEM
BAKALAUREUSETÖÖ**

Üliõpilane: Markus Merilai

Üliõpilaskood 179240EAAB

Juhendaja: Marko Tealane, doktorant-
nooremteadur

Tallinn 2021

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.

"18" mai 2021

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 202.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Markus Merilai

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose SALVESTUSTEHNOLOGIATE MÕJU ELEKTRISÜSTEEMI TERVIKULE,

mille juhendaja on MARKO TEALANE,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

18.05.2021

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

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Markus Merilai

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Salvestustehnoloogiate mõju elektrisüsteemi tervikule

Kuupäev:
18.05.2021

47 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): doktorant-nooremteadur Marko Tealane

Töö konsultant (konsultandid):

Sisu kirjeldus:

Töös uuriti kolme näite põhjal elektrienergia salvestamise tehnoloogiate mõju elektrisüsteemile. Töö eesmärkideks olid elektrisüsteemi erinevatesse sõlmedesse ühendatud salvestite ajalise mõju uurimine võrreldes süsteemiga ilma salvestiteta ning erinevate salvestustehnoloogiate sobivuse hindamine konkreetsete olukordade puhul.

Tulemuste saamiseks modelleeriti võrguarvutustarkvaras PowerWorld Simulator demo 13-sõlmeline ajaliselt muutuvate koormustega keskpingsesüsteem. Selleks jagati vaadeldavad ajaühikud alajaotusteks. Igale alajaotusele vastavate suuruste arvutamiseks sooritati modelleerimisel üks arvutustsükkel.

Saadud andmed koondati MS Excel'i tabelitesse, kus saadud andmetel koostati näitlikud graafikud, mis illustreerivad rakendatud salvestustehnoloogiate mõju elektrisüsteemi tervikule või selle osadele.

Märksõnad: Keskpingsesüsteem, modelleerimine, liitiumioonakud, suruõhk-energiasalvestid, hooratas-energiasalvestid

ABSTRACT

<i>Author:</i> Markus Merilai	<i>Type of the work:</i> Bachelor
<i>Title:</i> The impact of energy storage technologies on electrical system	
<i>Date:</i> 18.05.2021	<i>47 pages (the number of thesis pages including appendices)</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Doctorate student Marko Tealane	
<i>Consultant(s):</i>	
<i>Abstract:</i>	
<p>In the bachelor thesis, on the basis of 3 examples, the impact of the energy storage technologies on electrical system was analyzed. The goals were to investigate the temporal impact of energy storage units installed on different buses of the system in comparison with the system without any storage and evaluating the suitability of different energy storage technologies in particular situations.</p> <p>The results were obtained by modelling a 13-bus temporally loaded medium voltage system in PowerWorld Simulator demo software. For that, the observed time units were split to minor units. For any such minor unit, one calculation cycle was carried out within the software.</p> <p>The obtained data was gathered in MS Excel sheets, where further analyzing was done to obtain information about the impact of storage technologies on electrical system or its parts.</p>	
<i>Keywords:</i> Medium-voltage system, modelling, lithium-ion-batteries, compressed-air-energy-storage, flywheel-energy-storage	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **Salvestustehnoloogiate mõju elektrisüsteemi tervikule**

Lõputöö teema inglise keeles: **The impact of energy storage technologies on electrical system**

Üliõpilane: **Markus Merilai, 179240EAAB**

Eriala: **Elektroenergeetika ja mehhatroonika**

Lõputöö liik: **bakalaureusetöö**

Lõputöö juhendaja: **doktorant-nooremteadur Marko Tealane**

Lõputöö kaasjuhendaja: **professor Marius Klytta, THM,**
(ettevõtte, amet ja kontakt) **marius.klytta@ei.thm.de**

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: **31.01.2022**

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2021**

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Tänapäevases elektroenergeetikas on energiasalvestustehnoloogiad üheks tähtsaimaks tehnoloogiliseks väljakutseks, mis on vajalik selleks, et klassikalise, pöörlevatel turbiinidel põhinev energiatootmise asemel saaks jätkusuutlikumaid taastuvaid energiaallikaid laialdasemalt kasutusele võtta. Eesti elektrisüsteemis pole ikka veel mitte ühtegi energiasalvestit töös. Ometi eksisteerib globaalne surve tuule- ja päikeseenergia kasutuselevõtuks, mille integreerimine olemasolevatesse süsteemidesse vajab just salvestustehnoloogiaid. Arendustöö viib eeldatavasti salvestuse hinna allapoole ning see võib muuta võimalikuks ka elektrienergia salvestite kasutamise muudes süsteemi osades – näiteks kogukoormuse silumiseks või tarbimistippude kärpimiseks. Seepärast on oluline antud valdkonda uurida, et leida Eesti elektriturule sobivaid võimalikult efektiivseid salvestuslahendusi.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on analüüsida ja võrrelda erinevaid energiasalvestuse tehnoloogiaid erinevates süsteemi osades ja nende mõju kogusüsteemile näitliku keskpingsesüsteemi põhjal kasutades võrgumodelleerimistarkvara.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- 1) Milline salvestustehnoloogia oleks kõige efektiivsem antud keskpingsesüsteemis?
- 2) Millises punktis oleks iga tehnoloogia kõige efektiivsem?
- 3) Millised oleks suurimad ohud salvestustehnoloogiate kasutamisel?

4. Lähteandmed

Uurimiseks kasutatakse PowerWorld Simulator demo tarkvara, mille abil luuakse näitlik 13-sõlmeline keskpingsesüsteem, mida aluseks võttes analüüsitakse süsteemi lisatud salvestite mõju. Saadud andmeid töödeldakse MS Excel'i abil, et vaadelda seaduspärasid süsteemi parameetrite muutumises salvestite lisamise tõttu.

5. Uurimismeetodid

Salvestite ajalist mõju analüüsitakse minuti-, tunni-, ja ööpäevapõhiselt. Iga vaadeldav ajaühik jaotatakse alajaotusteks, igale alajaotusele sooritatakse vastav arvutustsükkel modelleerimistarkvara abil, mille käigus salvestatakse süsteemi talitusparameetrite info – võimsusvood, ülekandekaod, sõlmepinged ja pingenburgad.

6. Graafiline osa

Analüüsi käigus koostatakse mitmeid graafikuid, mille abil illustreeritakse tehtud järeldusi salvestustehnoloogiate mõju kohta.

7. Töö struktuur

1. Sissejuhatus
2. Uurimise meetodika
3. Modelleerimistulemused
4. Kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Töös kasutatakse erialaseid raamatuid ning erinevate seadmete nimiandmeid tootjapoolsetest allikatest.

9. Lõputöö konsultandid

Lõputöö konsultante ei ole

10. Töö etapid ja ajakava

- Allikate otsimine ja analüüs (november – detsember 2020)
- Teoreetilise osa kirjutamine (detsember 2020 – 25.01.2021)
- Katsemudeli arendamine ja katseolukordade määramine (25.01.2021 – 15.02.2021)
- Olukordade läbikatsetamine (15.02.2021 – 15.03.2021)
- Katsetulemuste analüüs (15.03.2021 – 12.04.2021)
- Järelduste kirjutamine (12.04.2021 – 19.04.2021)
- Lõputöö kokkuvõtmine (19.04.2021 – 26.04.2021)
- Mustandi esitamine juhendajale (26.04.21)
- Teise mustandi esitamine juhendajale (13.05.2021)
- Lõputöö puhtandi esitamine (18.05.2021)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	11
Lühendite ja tähiste loetelu.....	12
SISSEJUHATUS	13
1. UURIMISE METOODIKA.....	14
1.1 Lähteandmed	14
1.1.1 Koormused.....	14
1.1.2 Liinid	15
1.2 Algse süsteemimudeli koostamine.....	16
1.3 Tunnikoormuste arvutamine.....	18
1.4 Salvestite modelleerimise põhimõtted.....	19
1.4.1 Akud.....	20
1.4.2 Suruõhksalvestid.....	22
1.4.1 Hooratas-energiasalvestid	23
2. MODELLEERIMISE ALGMUDEL	24
3. MODELLEERIMISE TULEMUSED SALVESTITEGA	27
3.1 Baassõlme lisatud salvestiga süsteem.....	27
3.1.1 1600 kWh Liitiumioonakupank (1:1) baassõlmes, minutipõhine arvestus.....	27
3.1.2 600 kWh Liitiumioonakupank (1:3) baassõlmes, minutipõhine arvestus.....	29
3.1.3 600 kWh SÕES baassõlmes, minutipõhine arvestus	31
3.1.4 1000 kWh Li-ioonakupank (1:1) baassõlmes, tunnipõhine arvestus ööpäeva kohta, täiustatud algoritm.....	33
3.1.5 600 1000 kWh Li-ioonakupank (1:1) baassõlmes, tunnipõhine lihtsustatud arvestus nädala kohta, täiustatud algoritm.....	36
3.2 Radiaalharu keskele ühendatud salvestiga süsteem.....	39
3.3 Radiaalharu lõppu ühendatud salvestiga süsteem.....	42
KOKKUVÕTE	45
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	47

EESSÕNA

Lõputöö teemavaldkonnaks valis autor elektrienergia salvestustehnoloogiad, sest need on küll tänapäevastes elektrisüsteemides küll vähe levinud, ent on piisavalt alust arvata, et tulevikusüsteemides leidub neid järjest enam. Lõputöö teema sõnastati lõputöö juhendaja – TTÜ Inseneriteaduskonna doktorant-nooremteadur Marko Tealane soovitusel. Vaadeldavad olukorrad valis juhendaja nõuannete põhjal lõputöö autor.

Analüüsi alguseks võetud elektrisüsteemi koostas autor. Aluseks ei võetud ühtegi reaalselt süsteemi, vaid selle topoloogia ning põhilised parameetrid said vabalt valitud. Süsteemis paiknevate seadmete ning liinijuhtmete parameetrite valikul võeti võimalusel eeskujult reaalselt seadmete või juhtmete nimiaandmetest. Puuduvate andmete korral võeti arvutuse aluseks umbkaudsed lähendid. Ajalise analüüsimise aluseks olevad tüüpkoormusgraafikud saadi lõputöö juhendajalt. Nende alusel viidi läbi mitmeid ajalise mõju uurimisi.

Lühendite ja tähiste loetelu

C – salvesti kogumaht

C_{eff} – salvesti kasulik maht

C_o – salvesti algjääk

C_l – salvesti lõppjääk

C_n – salvesti jääk vastaval tsükli

Excel – Tabelarvutusprogramm Microsoft Exel 2016

PWS – Võrgumodelleerimistarkvara Power World Simulator demo

SÕES – suruõhk-energiasalvesti

HES – hooratas-energiasalvesti

SISSEJUHATUS

Elektrienergia salvestamise tehnoloogiad on veel tänapäevalgi elektrisüsteemides üsna vähe levinud. Neid kasutatakse kõige enam suuremates süsteemides, kus on õigustatud neile kuluvad suured kapitalimahutused. Vähesel määral on salvestustehnoloogiad kasutusel ka erineval pingeastmetel lõpptarbijate juures. Viimasel juhul on nende majanduslik tasuvus küll pigem küsitav. Veel vähem on salvestustehnoloogiaid kasutusel jaotusvõrkudes – keskpingel ja madalpingel.

Püüdlused süsinikuneutraalse primaarenergia osatähtsuse drastilise tõstmise poole on elektrisüsteemid üle maailma seadnud ennenägematusse olukorda. Nimelt tuleb lähimate aastakümnete jooksul ümber teha nii võrgu topoloogiaid, kui ka võimsusvoogude kaarte ning integreerida süsteemi uut liiki energiaallikaid. Paljudel nendel energiaallikatel on üks sama ebasoodne omadus – nende väljundvõimsust on võimatu täpselt ennustada. Selles tehnoloogilises „kahvlis“ on viimastel aastakümnetel põhilise pääseteena nähtud elektrisalvestite väljaarendamist laialdasemaks kasutuselevõtuks. Arendustöö tulemusena on salvestustehnoloogiate hinnad mõnevõrra langenud ning eeldatavasti langevad lähimatel aastakümnetel veelgi.

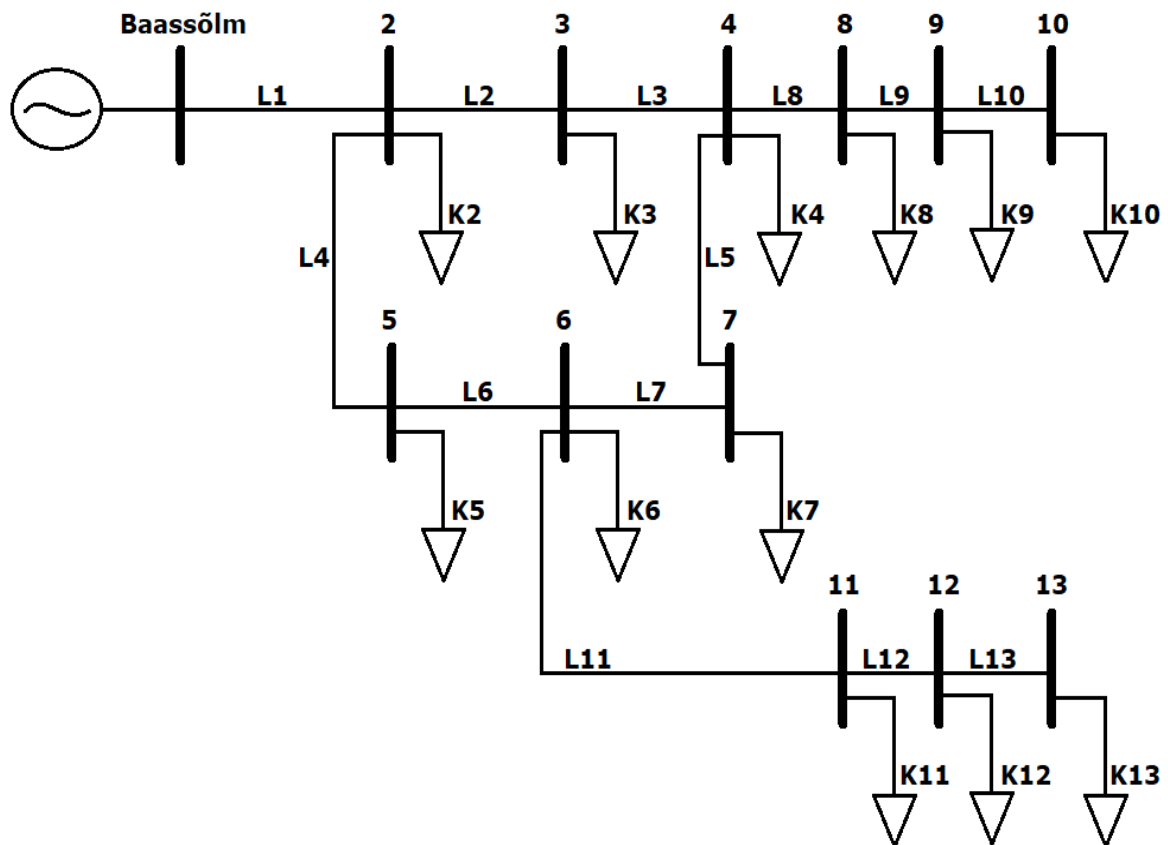
Käesolevas lõputöös on uuritud erinevate salvestustehnoloogiate mõju tavapärasele koormatud keskpingevõrgule. Eesmärkideks on uurida erinevate salvestustehnoloogiate mõju erinevates olukordades ning seeläbi teha järeldust konkreetsete tehnoloogiate sobivust konkreetsete eesmärkide saavutamiseks. Töös ei käsitleta salvestustehnoloogiate mõju taastuvenergeetika seisukohast lähtudes. Kui on eeldada nende tehnoloogiate hinnalangust, võib sellest järeldada, et neid samu tehnoloogiaid saab tulevikus aina enam kasutada ka muudes elektrisüsteemi osades.

Töös kirjeldatud stsenaariumid põhinevad suures osas vabalt valitud algandmetel ning on mõeldud esmase lähendusena. Võimalusel on süsteemi erinevaid osi kirjeldatud reaalsete seadmete ja toodete tegelike nimiaandmete järgi.

1. UURIMISE METOODIKA

Käesolevas bakalaureusetöös on uuritud kolme salvestustehnoloogia – liitiumioonakude, suruõhksalvestuse ning hooratas-energiasalvestuse mõju muutuvalt koormatud keskpingsesüsteemi erinevatele harudele ja sõlmedele ning nende kaudu ka elektrisüsteemi tervikule. Töö käigus pole sooritatud praktilisi katseid, kõik uurimise aluseks olevad katseandmed on saadud modellerimistarkvara Power World Simulator Demo 20 (edaspidi: PWS) ning tabelarvutustarkvara Microsoft Excel 2016 abil.

Modelleeritav elektrisüsteem on oma olemuselt asulaid ühendav koormatud keskpingevõrk, mille põhiosa moodustab ringvõrguosa, mille kahte sõlme on ühendatud asulast väljuv radiaalharu. Vastavalt selle on valitud liinide pikkused. Kogu süsteem toimib ühel nimipingel – 20kV. Süsteemis ei ole trafosid, reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadmeid ega tootmisvõimsusi, kogu toide toimib ühe sõlme kaudu, mis on võetud arutamisel süsteemi baassõlmeks. Igasse sõlme, v.a. baassõlm, on ühendatud erisuguste nimiaandmetega statsionaarne koormus, mis tarbib pidevalt ilma pausideta nii aktiiv-, kui reaktiivvõimsust. Kogu süsteemi toide tuleb baassõlme kaudu. Skeemil tähistab seda ekvivalentse generaatori kujutis. Süsteemi skeem on nähtav joonisel 1.1.



Joonis 1.1. Vaadeldava elektrisüsteemi skeem

1.1 Lähteandmed

Käesolevas alapeatükis tuuakse välja lõputöös kasutatud süsteemimudeli koormuste ning liinide algandmete valiku põhimõtted. On kasutatud reaalse materjalide nimiaandmeid, aga ka vabalt valitud lähteandmeid, mille puhul on lähtutud erialasest loogikast ning sarnaste materjalide teadaolevatest andmetest.

1.1.1 Koormused

Kõigis süsteemi sõlmedes peale baassõlme asuvad koormused, milleks on madalamate pingestmete alajaamad ning nende külge ühendatud erinevad tarbijaid – kodumajapidamised, põllumajandusüksused, väiketööstusettevõtted, riigiasutused jm. Koormuste sekundaarpingepooltel pole salvesteid, mida käesolevas töös käsitleda, seepärast käsitletakse kõiki koormusi kui võimsuse tarbijaid ning igale koormusele on antud oma nimivõimsus ning koormustegur $\cos(\varphi)$, mis jääb kogu analüüsi käigus muutumatuks. Kokku on süsteemis 12 sellist koormust ning nende võimsusandmed on koondatud tabelisse 1.1. Aktiivvõimsused P ning võimsustegurid $\cos(\varphi)$ on vabalt valitud, näivvõimsused on arvutatud valemiga 1.1. [2].

$$P = S * \cos(\varphi) \Rightarrow S = \frac{P}{\cos(\varphi)} \quad (1.1)$$

Tabel 1.1. Modelleritava süsteemi koormuste võimsusandmed.

Koormus	P , kW	$\cos(\varphi)$	S , kVA
K2	450	0.9	500
K3	390	0.95	410.526
K4	520	0.89	584.27
K5	410	0.87	471.264
K6	320	0.92	347.826
K7	720	0.86	837.209
K8	430	0.88	488.636
K9	580	0.95	610.526
K10	220	0.94	234.043
K11	360	0.92	391.304
K12	560	0.91	615.385
K13	180	0.9	200
Σ	5140		5690.99

1.1.2 Liinid

Modelleeritavas süsteemis on kokku 13 liini, millest kõik on õhuliinid. Liinijuhtmete valikul on arvestatud liini pikkust, selle tähtsust võrgutopoloogias ning edastatava võimsuse hulka. Kokku on süsteemis kolm vajadusepõhist liinikategooriat ning igale kategooriale on valitud välja vastav liinijuhe.

Peamise ühendliini L1 kaudu edastatakse kõik tarbitav võimsus süsteemi edasi. Samas on see kõikidest liinidest kõige lühem. Kuna see ainsana ei läbi asustatud piirkondi, puudub otsene vajadus isoleeritud juhtme järele. Seepärast on ka õigustatud suhteliselt väikese aktiivtakistusega terassüdamikuga paljasjuhtme ACSR kasutamine.

Lühikesed ja keskmise pikkusega õhukaabelliinid L2, L3, L4, L5, L6 ja L7 moodustavad süsteemi ringvõrguosa, mis ühendab hajutatult asuvaid külasid ja alevikke. Kõik need liinid läbivad asustatud piirkondi, karjamaid ning eravalduseid, seega on ohutuse ja rikkekindluse huvides mõistlik kasutada isoleeritud juhtmeid. Remonttööde lihtsuse huvides eelistatakse õhukaableid. Arvestades, et ringvõrguosa liinide kaudu edastatakse võimsust radiaalharudele kahepoolse toitena ning liinid ise on pigem suhteliselt lühikesed, ei ole vajadust kasutada kallimat, s.t suurema läbimõõduga juhet, vaid võib piirduda väiksema läbimõõduga juhtmetega.

Radiaalharude esimesed liinid L8 ning L11 on võrreldes radiaalharude teiste liinide ning ringvõrguosa liinidega suhteliselt pikad. Ka need läbivad asustatud piirkondi, karjamaid ning eravalduseid. Kuna radiaalharude kogukoormused on oluliselt suuremad kui ringvõrguosa sõlmede koormused, on oluline tagada võimsuse ülekanne radiaalharudele sõlmedest S4 ja S6 selliselt, et tagada sõlmede S8, S9, S10, S11, S12 ja S13 pingete püsimine võimalikult lähedal baassõlme pingele. Selle saavutamiseks on kasulik valida liinidele L8 ja L11 teistest väiksema aktiivtakistusega e. suurema läbimõõduga õhukaabel, et vältida liigseid võimsuskadusid neil pikkadel liinidel.

Liinide parameetrid on koondatud tabelisse 1.2. Kasutatud on ainult Draka kaableid. Juhtme läbimõõdu ja jooksvate aktiivtakistuste r_L väärtused on võetud tootjapoolsetest kataloogidest [3] [4]. Jooksvate reaktiivtakistuse x_L väärtused on käesolevas esimese lähenduses valitud vabalt, sest neid pole tootjapoolsetes kataloogides välja toodud. Süsteemi paiknemise illustreerimiseks välja toodud asukohaplaan ei põhine ühelgi reaalsel asukohal, seetõttu on ka liinide pikkused l_L vabalt valitud. Liinide kogutakistused R_L ja X_L on liinipikkuste ning takistuste jooksvate väärtuste alusel arvutatud valemiga 1.2.

$$R_L = r_L * l_L$$

$$X_L = x_L * l_L$$
(1.2)

Tabel 1.2 Süsteemi liinide parameetrid

Liin	l_L km	Juhtme liik	d , mm	r , Ω	x , Ω	R , Ω	X , Ω
L1	0.5	ACSR 85/14	12.8	0.337	0.41	0.1685	0.205
L2	3.5	CCST-62W	10.1	0.536	0.4	1.876	1.4
L3	4.2	CCST-62W	10.1	0.536	0.4	2.2512	1.68
L4	5.1	CCST-62W	10.1	0.536	0.4	2.7336	2.04
L5	4.8	CCST-62W	10.1	0.536	0.4	2.5728	1.92
L6	3	CCST-62W	10.1	0.536	0.4	1.608	1.2
L7	5	CCST-62W	10.1	0.536	0.4	2.68	2
L8	10	CCST-159W	16.3	0.193	0.2	1.93	2
L9	3.3	CCST-62W	10.1	0.536	0.4	1.7688	1.32
L10	5.5	CCST-62W	10.1	0.536	0.4	2.948	2.2
L11	8.9	CCST-159W	16.3	0.193	0.2	1.7177	1.78
L12	6.7	CCST-62W	10.1	0.536	0.4	3.5912	2.68
L13	2.2	CCST-62W	10.1	0.536	0.4	1.1792	0.88

1.2 Alge süsteemimudeli koostamine

Alapeatükis 1.1 väljatoodud andmete alusel koostati PWS'is süsteemi mudel. Et veenduda modelleritud süsteemi toimimises, viidi läbi esimene talitusparameetrite arvutus. Selles ning ka edaspidistes etappides kasutati võrguarvutuse sisendandmetena igale koormusele K vastavat nimiaktiiv- ja reaktiivvõimsust. Nende põhjal sooritas PWS Newton-Rhapon'i meetodil iteratiivse arvutustsükli. Et väistada märkimisväärsete ebatäpsuste tekkimine ümardatud suuruste kasutamisel, seati iteratsioonide arvu ülempiiriks 100 ning näivvõimsuse lähenduse täpsuseks 0.001 MVA. Leiti, et süsteem toimib laitmatult – sõlmede pinged jäid suure varuga 90% piiresse baasõlme pingest ning süsteemi summaarne aktiivvõimsuse ülekandekadu jäi 4% piiresse koguaktiivvõimsusest.

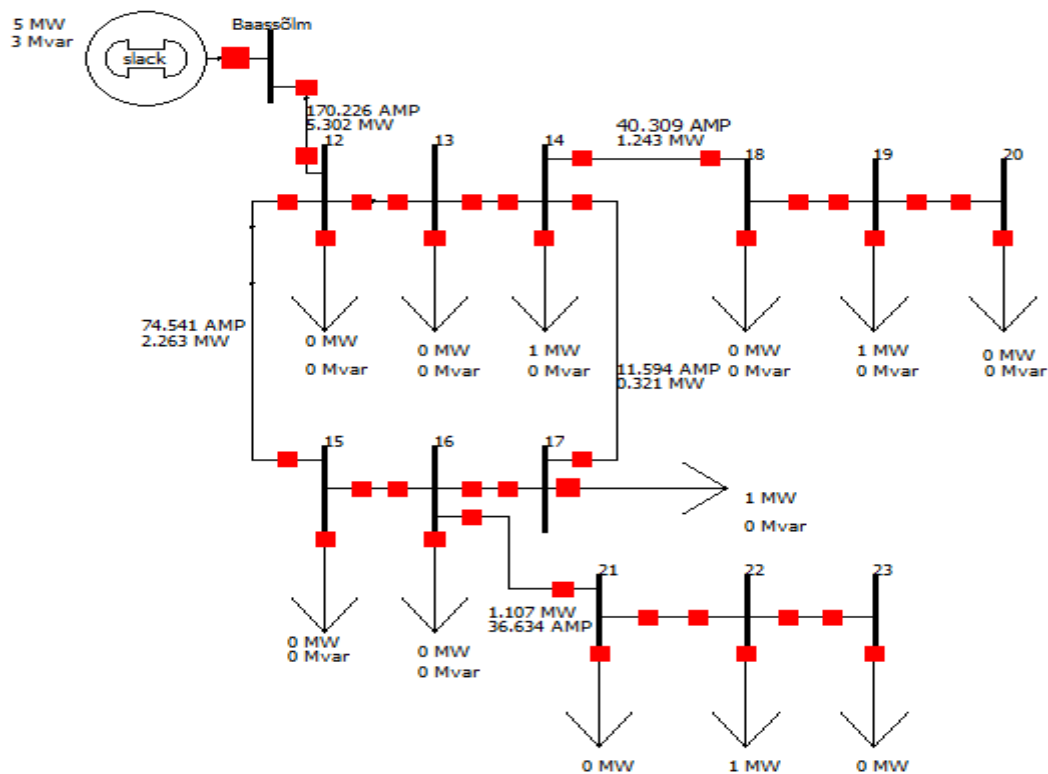
Kuna PWS'i demoversioon ei võimalda ühikute kW ja kvar'i kasutamist arvutamisel [1], sisestati kõik võimsused ühikutes MW ja Mvar. Parema ülevaatlikkuse huvides, lähtudes konkreetse süsteemi koormuste vahemikest, on nüüd ja edaspidi kõik väljundvõimsuse

andmed käesolevas töös välja toodud ühikutes kW ja kvar. Tähtsaimad esimese arvutuse tulemused on koondatud tabelisse 1.3.

Tabel 1.3 Esimese kontrollarvutuse tulemused

Sõlmepinge, kV		Aktiivvõimsuskadu, kW	
U ₂	19.93	ΔP_{L1}	14.65
U ₃	19.608	ΔP_{L2}	37.12
U ₄	19.277	ΔP_{L3}	32.35
U ₅	19.497	ΔP_{L4}	45.57
U ₆	19.291	ΔP_{L5}	1.04
U ₇	19.213	ΔP_{L6}	17.73
U ₈	19.099	ΔP_{L7}	1.49
U ₉	19.006	ΔP_{L8}	9.41
U ₁₀	18.963	ΔP_{L9}	3.5
U ₁₁	19.145	ΔP_{L10}	0.45
U ₁₂	18.956	ΔP_{L11}	6.92
U ₁₃	18.941	ΔP_{L12}	6.65
		ΔP_{L13}	0.13
		ΔP_{Σ}	177.01
Q _Σ , kvar	2549.9	P _Σ , kW	5316.9

Arvutusest selgus, et kõige suuremad ülekandekaad on ringvõrguosas nagu ka eeldada võis. Kuigi selles osas olid ülekandekaad kohati mitukümmend korda suuremad kui mujal, otsustati jätta liinijuhtmed ümber valimata, sest summaarne ülekandekadu oli piisavalt väike, et käesolevas esimeses lähenduses pädevaid järeldusi teha saaks. Nii liinide parameetrid kui ka mudeli topoloogia jäid muutmata kõigi edasiste arvutustsüklite jooksul, s.t ühtegi sõlme ega liini ümber ei tõstetud ega ära ei kaotatud. Salvestid lisati hiljem juba olemas-olevate sõlmede külge. Esialgse süsteemi PWS'i mudeli pilt on nähtaval joonisel 1.2. Sõlmede numbrid on pildil kõik 10 võrra suuremad kui süsteemi skeemil, et neid oleks PWS'i arvutustabelites võimalik kasvavas järjekorras järjestada.



Joonis 1.2 Esialgse süsteemimudeli pilt PWS'is.

1.3 Tunnikoormuste arvutamine

Võrguarvutusteks vajalike tunnikoormuste leidmiseks võeti Eesti Konkurentsiameti koduleheküljelt Elektrilevi OÜ tüüpkoormusgraafikute kooskõlastus aastaks 2020 [5]. Tunnikoormuste arvutamiseks kasutati valemit 1.3.

$$C_{Tund} = T_h * C_{kuu} \tag{1.3}$$

Kus: T_h – konkreetse päeva konkreetne tunnitegur

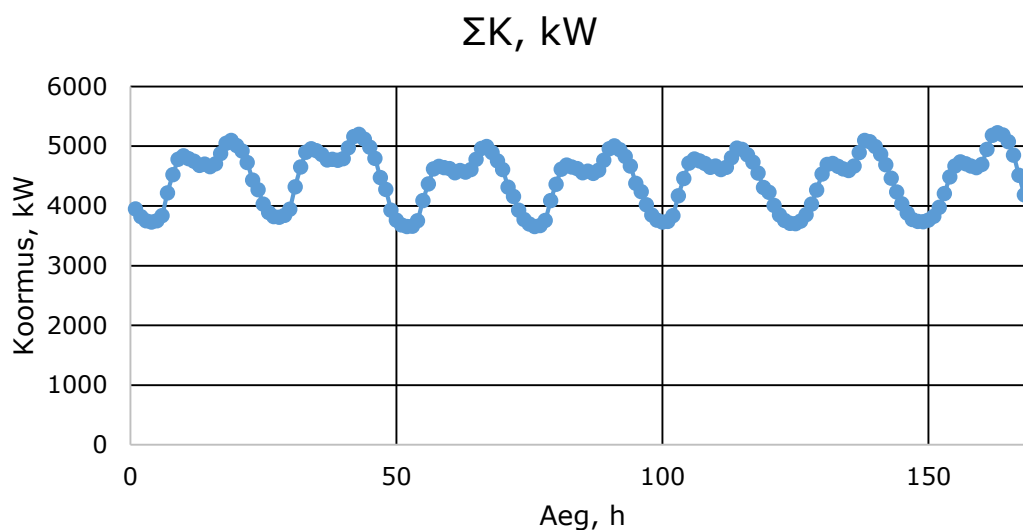
C_{kuu} – konkreetsetes kuus tarbijale müüdüd elektrienergia kogus

Kuna C_{kuu} väärtuseid kõigile koormustele K ei olnud teada, koostati arvutamiseks Excel'i tabel, kus seati C_{kuu} väärtusteks vabalt valitud arvud, mida muudeti kuni saadi sobiv tulemus. Eesmärk oli saada maksimaalse koormuse väärtused võimalikult lähedale valitud nimikoormustele, pigem pisut üle selle kui alla selle. Saadud väärtused on nähtavad tabelis 1.3.

Tabel 1.3 Leitud C_{kuu} väärtused ning saadud maksimumkoormuste võrdlus nimikoormustega

Koormus:	C_{kuu}	$P_{K_{max}}$	P_{K_n}
K2	290000	459.523	450
K3	250000	396.1405	390
K4	330000	522.9055	520
K5	260000	411.9861	410
K6	210000	332.758	320
K7	460000	728.8985	720
K8	280000	443.6774	430
K9	370000	586.2879	580
K10	140000	221.8387	220
K11	230000	364.4493	360
K12	360000	570.4423	560
K13	120000	190.1474	180

Leitud C_{kuu} väärtuste alusel koostati Excel'i tabelis terve jaanuarikuu 2020 esimese nädala tunnikoormuste tabel kõigile koormustele K. Nädala tunnipõhine koguaktiivkoormuse graafik on nähtav joonisel 1.3.



Joonis 1.3 Jaanuari 2020 esimese nädala tunnipõhine kogukoormusgraafik

1.4 Salvestite modelleerimise põhimõtted

Kuna PWS ei sisalda etteantud võimalusi erinevate energiasalvestite lisamiseks mudelisse, on salvesteid käsitletud koormustena, mis on laadimistsükli ajal positiivse väärtusega ning süsteemi võimsuse edastamise ajal negatiivse väärtusega. Et simuleerida salvestite ajalist mõju elektsisüsteemi osadele ja tervikule, on vaatlemisel võetud aluseks kolm erinevat ajaühikut – tund, kuupäev, nädal. Koormuste K ajalisel

jaotumisel on alati arvestatud üheaegsusteguriga, s.t. süsteemi kogukoormus jaotub koormuste K vahel alati samade kordajate alusel.

Iga vaadeldav ajaühik on jaotatud alajaotusteks, milleks on temast madalamad ühikud. Tund on jaotatud 60-ks minutiks, ööpäev 24- ks tunniks ning nädalapäev seitsmeks ööpäevaks. Igale sellisele alajaotuse kohta tehti PWS' i abil üks Newton-Rhapson' i arvutustsükkel. Arvutustsükli käivitamiseks kopeeriti Excel' i tabelist aktiiv- ja reaktiivkoormuste väärtused ning lisati need otse PWS'i aknasse „loads“. Kui parasjagu vaadeldi süsteemi koos lisatud salvestiga, kopeeriti niimoodi salvestile vastavad koormuste hetkeväärtused. Selliselt saadi hetkelised talitusparameetrid – aktiiv- ja reaktiiv-võimsuskao liinidel, sõlmepinged ning sõlmede pingenburgad, kogukoormuse aktiiv- ja reaktiivosad. Need salvestati excel'i tabelisse vaadeldava ajaühiku alajaotusele vastavasse tulpa.

Salvesti jäägi arvestamiseks jagati vaadeldav ajaühik seadesuuruse alusel tsükliteks. allapoole seadesuurust jäävad ajavahemikud moodustavad nn. plusstsüklid, sest siis toimub võimsuse tarbimine süsteemist salvestisse, s.t salvesti toimib positiivse koormusena. Ülespoole seadesuurust jäävad ajavahemikud moodustavad nn. miinustsüklid, sest siis toimub võimsuse edastamine salvestist süsteemi, s.t salvesti toimib negatiivse koormusena.

Nii koguti andmed kogu vaadeldava ajaühiku kohta ning hiljem analüüsiti nende alusel süsteemi talitlust võrdluses lisatud salvestiga ning ilma. Nende analüüside põhjal tehti järeltõlge konkreetsete ühendatud salvestite mõju kohta vaadeldava elektrisüsteemi tervikule , konkreetse salvesti asukohasõlmele, selle lähimatele sõlmedele ja liinidele, salvestustehnoloogiate ning nende süsteemi sobivuse kohta üldiselt.

1.4.1 Akud

Modelleeritud on ainult liitiumioonakudest koosnevaid akupankasid Tesla PowerPack. Need on nimimahutavusega kas 100 kWh või 200 kWh. Kasutatav maht on ühildatud tsükli kasuteguriga, milleks on 89,5% [8]. See tähendab, et igale 100 kWh 'le vastab 89,5 kWh kasutatavat mahtu. Kasuteguriga arvestamiseks on kasutatud kahte algoritmi – lihtne ja täiustatud.

Lihtsa algoritmi puhul ei ole peetud oluliseks, et akupanga jääk vaadeldava ajaühiku alguses ja lõpus sama tulemuse annaks. Mõnes analüüsis on saavutatud alg- ja lõppjäägi sarnasus koormuse seadesuuruse tõstmisega üle keskmise koormuse. Muidu

on lihtsa algoritmiga arvatud analüüsid kasuteguriga arvestamine nähtav ainult akujäägi muutuses, mitte sisend- ega väljundvõimsuses.

Täiustatud algoritmi puhul on koormuse mittelinearsele muutusele vastava sisend- ja võimsuse hindamiseks rakendatud empiirilist katsetust. Selle käigus on leitud akupanga algjääk ning sisendvõimsuse kordaja, mille puhul akupanga algne ja lõplik kasulik jääk on võrdsustatud ning akupanga jääk ei ületa kunagi kordagi maksimumi ega jää kordagi alla miinimumi. Akupankade ülesanneteks määrati kogukoormuse silumine ja radiaalliinil asuva üksiku koormuse silumine ning tema ühendussõlme pinge tõstmine. Väljundvõimsuseks on võetud 130 kW ühe 100 kWh või 200 kWh mooduli kohta [8], mida on korrutatud moodulite arvuga, eeldades et moodulid ühendatakse rööbiti. Ajaühiku osale vastavate sisend- ja väljundvõimsuste määramisel on seadesuurus võetud vastavalt sellele, kas soovitakse tipukoormust kärpida või lihtsalt koormust tasandada. Enamasti on selleks ajaühikule vastava koormuse tinglik keskmine, mis moodustub moodustub kahe väärtuse keskmisena. Nendeks väärtusteks on tegelik keskmine ning kasuteguriga jagatud keskmine. See on vajalik selleks, et leida optimaalne väärtus, millele vastavalt koormust tasandada selliselt, saavutada võimalikult sirge graafikujoon ning et akupanga alg- ja lõppjääk liiga erinevad ei saaks.

Mõlema algoritmi puhul toimub akupanga hetkelise võimsuse arvutamine sarnaselt – igale vaadeldava ajaühiku alajaotusele vastava hetkekoormuse kõrvalekaldele seadesuurusest on arvatud selle protsentuaalne osa kas üles- või allapoole seadesuurust jäävate hetkekoormuste summast ning saadud protsendi alusel on määratud ajaühiku igale alajaotusele vastav sisenev või väljuv võimsus ning energiahulk. Ühes analüüsis, kus on taotletud täielikult sirget graafikujoont osa ajaühiku vältel, on sellisel puhul hetkekoormuste summa baasil sisend- või väljundvõimsust arvestatud üksnes neil perioodidel, mil sirget joont ei olnud vaja saavutada. Muul ajal oli sisend- ja väljundvõimsus seatud absoluutväärtuse abil täpsesse vastavusse hetkekoormusega, nivelleerides niimoodi koormuste kõrvalekalded seadesuurusest.

Akupankade sisend- ja väljundvõimsuste määramisel on kasutatud kahte erinevat laadimisversiooni:

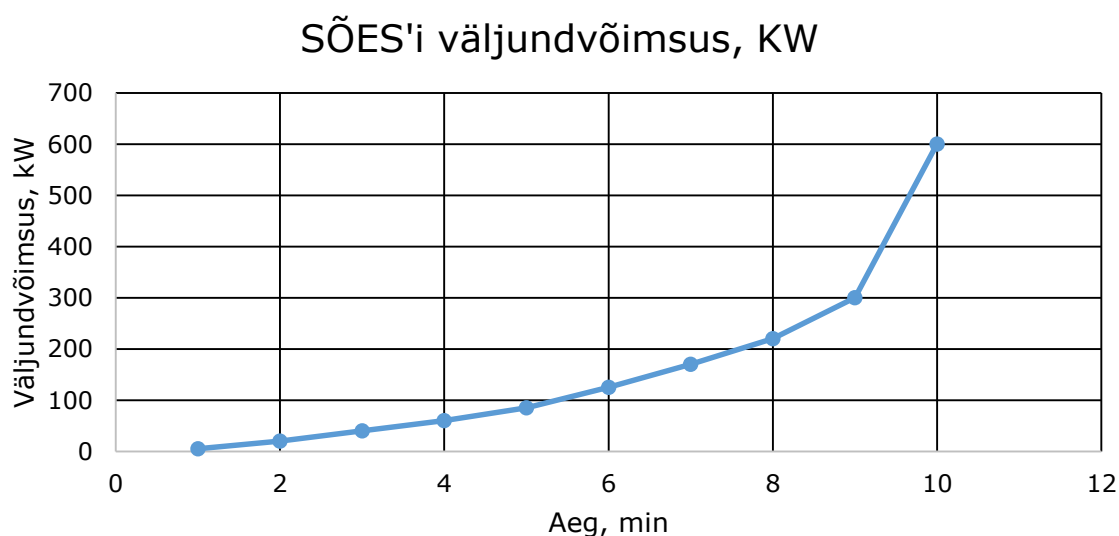
- nn. "Kiirem laadimine" – väljundvõimsus võrdub aku mahtuvusega, tähis: 1:1
- nn. "Säästlik laadimine" – sisendvõimsus on 30% kasuliku mahu väärtusest. Eesmärk on pikendada akupanga eluiga, tähis: 1:3. [11]

Kuna selliste akupankade reageerimisaeg on väga lühike – mõõdetav sadades millisekundites [10], pole modelleerimisel nende puhul ühelgi juhul ajalist viidet arvestatud.

1.4.2 Suruõhksalvestid

Kuna töötavaid suruõhksalvesteid on üsna vähe kasutusel ning konkreetsesse süsteemi sobivat kindlat seadet on äärmiselt keeruline leida, on käesolevas töös lähtutud hüpoteetilisest seadmest, mille aluseks on võetud kirjanduses kirjeldatud seadmetetüüp. Selle kasuteguriks võeti 60% [7], kuid seda ei arvestatud laadimistsükli energiakulu arvestuses, sest kirjanduslikus allikas [6] oli seda salvestitüüpi kirjeldatud kui seadet, mis tarbib välist energiat. Seejuures vaadeldi eeskujuna ka Huntdorff'i elektrijaama Saksamaal, mis toimib ühtlasi tavalise gaasielektrijaama ning suruõhksalvestina [11]. Sellest tulenevalt võeti eelduseks, et kuna antud salvesti tarbib vajalikku lisaenergiat väljaspoolt, on selle kasutegur käsitledavas süsteemis 100%.

Salvesti ülesandeks määrati kogukoormuse kõikumise vähendamine. Esmase lähendusena võeti nimivõimsus 600 kW ning mahtuvuseks 1000 kWh. Reageerimisaeg määrati järgnevalt: 0-60 kW väljundvõimsus saavutati 4 minutiga, 0-600 kW 10 minutiga, 300-600 kW saavutati 15 sekundiga [7]. Kuna vaadeldavas suurus oli äratuntav eksponentsiaalse tõusu seaduspära, paigutati umbkaudse võimsusgraafiku saamiseks vahepealsetele ajahetkedele vastavad väärtused sinna vahele sobitades järgides tõusujoone loogikat. Lõplik tõusujoon on näha joonisel 1.4.



Joonis 1.4. Suruõhksalvesti reageerimisaja kulg 0-600 kWh

1.4.3 Hooratas-energiasalvestid

Modelleerimise aluseks võeti statsionaarne hooratas-energiasalvesti Rosseta T-2, mille ülesandeks määrati koormuse K13 ($P_{n_{K13}} = 180 \text{ kW}$) minutipõhise kõikumise silumine. Järgnevad nimiaandmed võeti tootjapoolselt kodulehelt [9]:

- Nimivõimsus $P_{n_{HRE}} = 300 \text{ kW}$
- Nimimahutavus $C_{n_{HRE}} = 6 \text{ kWh}$

Kuna tootjapoolselt ei olnud salvesti kasutegurit antud, võeti modelleerimisel aluseks maksimaalne samalaadse seadme kasutegur $\eta_{max_{HRE}} = 95\%$ [12], mida mõnevõrra vähendades saadi $\eta_{HRE} = 92,5\%$.

Et salvestusmahtu jagada minutite vahel tunnis selliselt, et koormuse silumine oleks võimalikult sujuv, koostati lihtne nagu akude puhul (punkt 1.4.1) Ehk siis – laadimisel arvestati kasuteguriga läbi tingliku keskmise koormusega ning igale minutile vastav laadimisvõimsus seati protsendiarvutuse abil vastavusse minutile vastava hääbega koormuse K13 tinglikust keskmisest tunni jooksul.

1.5 Vaadeldud süsteemikonfiguratsioonid salvestiga

Töös vaadeldi kolme erinevat konfiguratsiooni, mil salvesti oli süsteemi ühendatud.

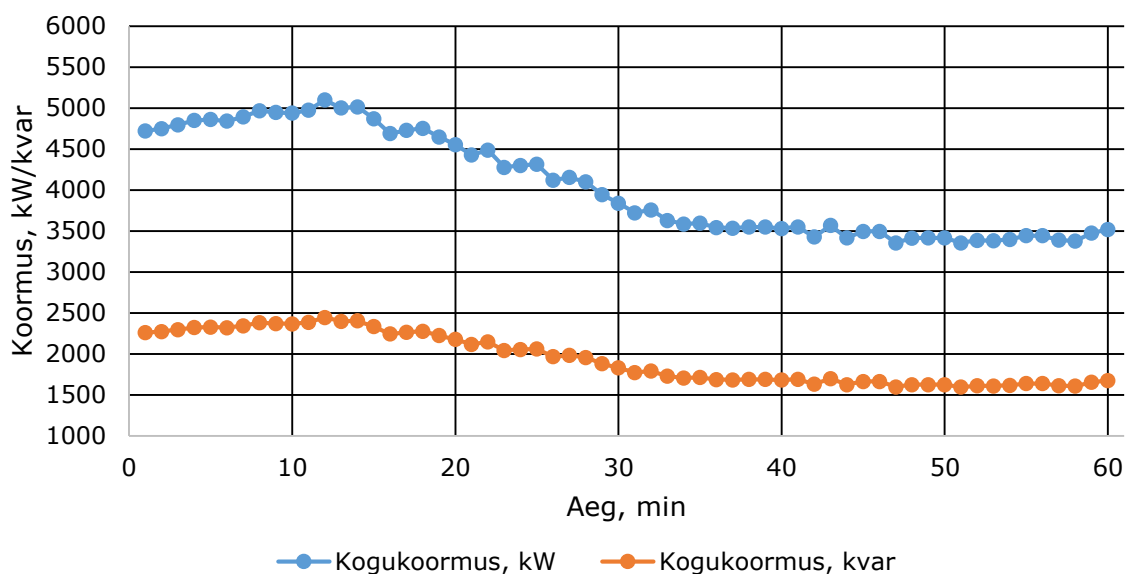
- 1) Süsteemi baassõlme ühendatud salvesti – sel konfiguratsioonil tehti kõige rohkem modelleerimisi – kokku üheksa. Baassõlme ühendati ühekaupa järgmised salvestid:
 - 1600 kWh liitiumioonakupank (1:1, minutipõhine arvestus)
 - 600 kWh liitiumioonakupank (1:3, minutipõhine arvestus)
 - 1000 kWh Suruõhk-energiasalvesti (minutipõhine arvestus)
 - 1000 kWh liitiumioonakupank (1:1, tunnipõhine arvestus)
- 2) Radiaalharu keskmisse sõlme (nr. 9) ühendatud salvesti
 - 300 kWh Liitiumioonakupank (1:1, tunnipõhine arvestus)
- 3) Radiaalharu viimasesse sõlme (nr. 10) ühendatud salvesti
 - 6 kWh Hooratas-energiasalvesti

2. MODELLEERIMISE ALGMUDEL

Selles peatükis on kirjeldatud algset süsteemimudelit, millesse hiljem ühekaupa salvesteid lisati. Algse mudeli analüüsimise etapis koguti andmeid süsteemi talitluse kohta ilma ühegi salvesti mõjuta. Saadud tulemused võeti referentsina aluseks edaspidiste modelleerimiste tulemuste põhjal järeltule tegemiseks salvestite mõju kohta. Käesolevas peatükis on näha koormuste minuti- ja tunnipõhine muutumine algses süsteemis erinevate graafikute kujul.

Minutipõhise analüüsi aluseks võeti näitlik kodumajapidamise minutipõhine tunnigraafik [12, 13]. Selle alusel määrati protsendiarvutuse teel vastavad graafikud käesoleva süsteemi koormustele esmaspäeva, 20. jaanuari esimese tunni (00.00 – 01.00) jooksul. See on nähtav joonisel 2.1, kus selgub, et suurem tarbimine jäi tunni esimesse veerandisse. Järgmise 20 minuti jooksul toimus enam-vähem ühtlane langus ning alates 35. minutist jäi tarbimine umbes samale tasemele (3400-3500 kW) kuni vaadeldava tunni lõpuni.

Esmaspäev 20.01 esimene tund

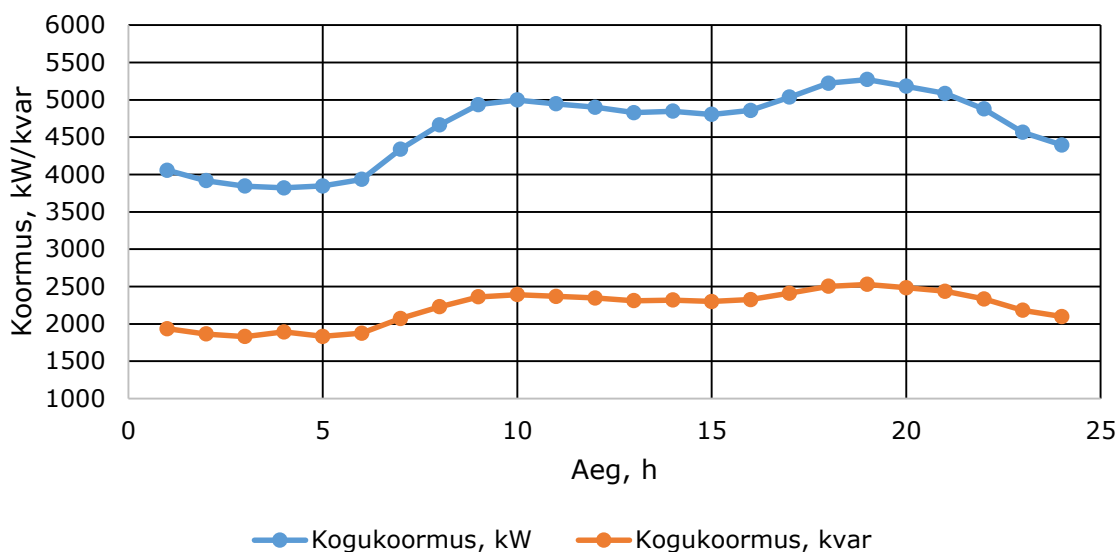


Joonis 2.1. Minutipõhine kogukoormus ilma salvestita süsteemis

Järgmiseks on joonisel 2.2 nähtav süsteemi kogukoormuse muutumine esmaspäeva, 20. jaanuari jooksul. Jooniselt on näha, et kuni ööpäeva kuuenda tunnini oli koormus madal. Pärast seda toimus koormuse tõus kuni 11. tunnini. Sellele järgnes mõningane langus kuni 15. tunnini. Pärast seda saabus õhtune tarbimistipp, mille käigus jõudis

koormus umbes 5272 kW'ni (19. tund) ning pärast seda langes ühtlaselt saavutades ööpäeva lõpuks umbes samasuguse väärtuse kui oli ööpäeva alguses.

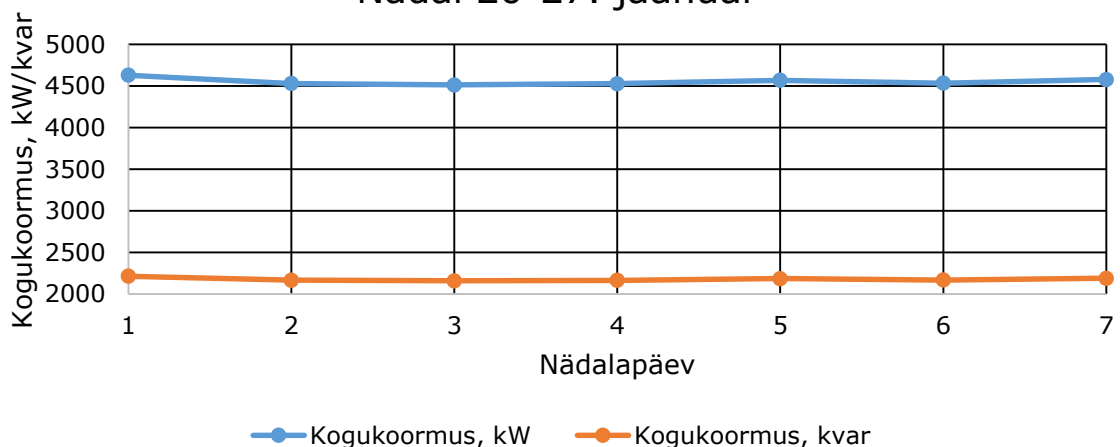
Esmaspäev 20.01



Joonis 2.2. Tunnipõhine kogukoormus ilma salvestita süsteemis

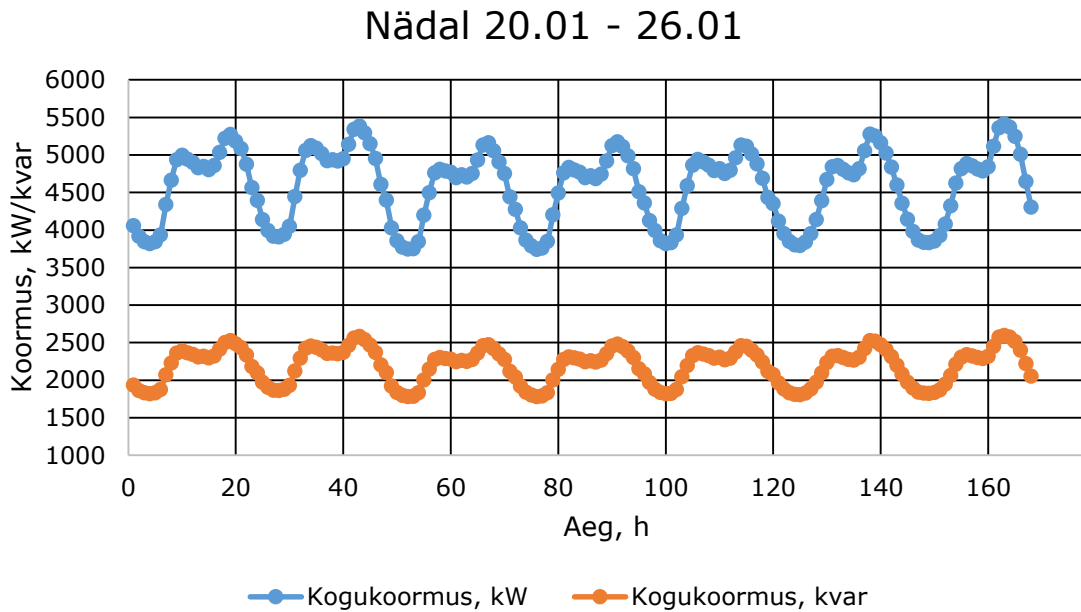
Seejärel on joonisel 2.3 näha Jaanuarikuu kolmanda nädala (20.01 - 26.01) ööpäevaste kogukoormuste muutumine ilma salvestiteta süsteemis. Graafikult selgub, et ööpäevakoormuste muutumine oli nädala lõikes üsna vähe märgatav, suurim tarbimine on esmaspäeval, väiksem kolmapäeval, neljapäeval ja laupäeval.

Nädal 20-27. jaanuar



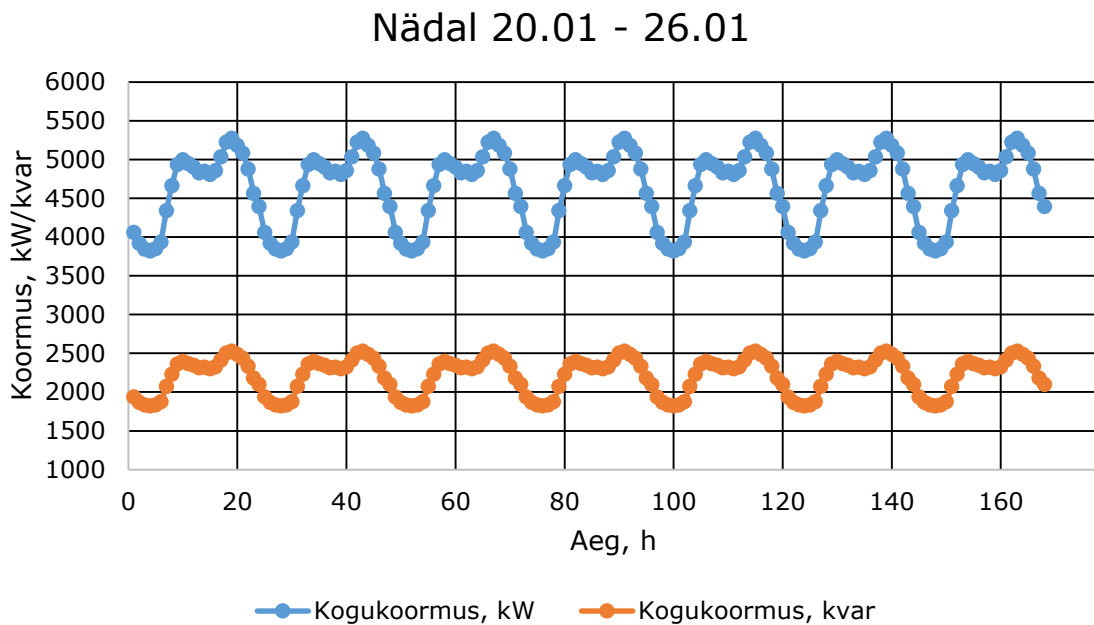
Joonis 2.3. Ööpäevapõhine nädalagraafik ilma salvestita süsteemis

Joonisel 2.4 on näha Jaanuarikuu kolmanda nädala (20.01 - 26.01) tunnipõhiste kogukoormuste muutumine ilma salvestiteta. Joonisel on näha ööpäevapõhise graafikuga sarnane tulemus – päevakoormuste erinevus on väike.



Joonis 2.4. Tunnipõhine nädalagraafik ilma salvestita süsteemis

Kuna punktis joonisel 2.4 väljatoodud graafikus on ööpäevade koormuste erinevus suhteliselt väike, koostati esmaspäeva, 20.jaanuari koormusgraafiku põhjal salvestite pikemaajalise mõju analüüsimiseks lihtsustatud tunnipõhine nädalagraafik. See on nähtav joonisel 2.5.



Joonis 2.5. Lihtsustatud tunnipõhine nädalagraafik ilma salvestiteta süsteemis

3. MODELLEERIMISE TULEMUSED SALVESTITEGA

Selles peatükis on välja toodud katsetulemused, mis on saadud erinevate süsteemi lisatud salvestiga olukordade modelleerimisel. Võrdluste aluseks on võetud referents peatükist 2. Selle põhjal on Excel'i tabelis salvestiga ja salvestita süsteemi väljundsuurusi võrreldud. Tähtsamad võrdlused on esitatud ka graafiliselt. Välja on toodud ka salvestite sisend- ja väljundvõimsuste muutumisgraafikud ning akujäägi muutumine. Pikaajalise analüüsi puhul on antud ka hinnang kasutatava akupanga elueale.

3.1 Baassõlme lisatud salvestiga süsteem

Selles alapeatükis on koondatud andmed kõigi analüüside kohta, mille puhul oli salvesti ühendatud süsteemi baassõlme, s.t edastas aktiivvõimsust tervesse süsteemi või tarbis seda sealt. Sellisel juhul toimus salvesti kogukoormuse ühtlustajana, tarbimistippude või päevakoormuste tasandajana.

3.1.1 1600 kWh Liitiumioonakupank (1:1) baassõlmes, minutipõhine arvestus

Baassõlme lisatud piisava sisend/väljundvõimsusega ($P_{in_out} = 8 \cdot 130 \text{ kW} = 1040 \text{ kW}$) akujaama ülesandeks seati minutipõhise aktiivkoormuse täielik tasandamine. Seadesuuruseks võeti 4224,1 kW (tunni minutikoormuste tinglik keskmine) vastavalt ühetasaseks. Saadi järgmised tsüklid:

- 1) Miinustsükkel (minutid 1-28)

Algjääk: $C_{-0eff} = 1432 \text{ kWh}$; $C_{-0} = 1600 \text{ kWh}$

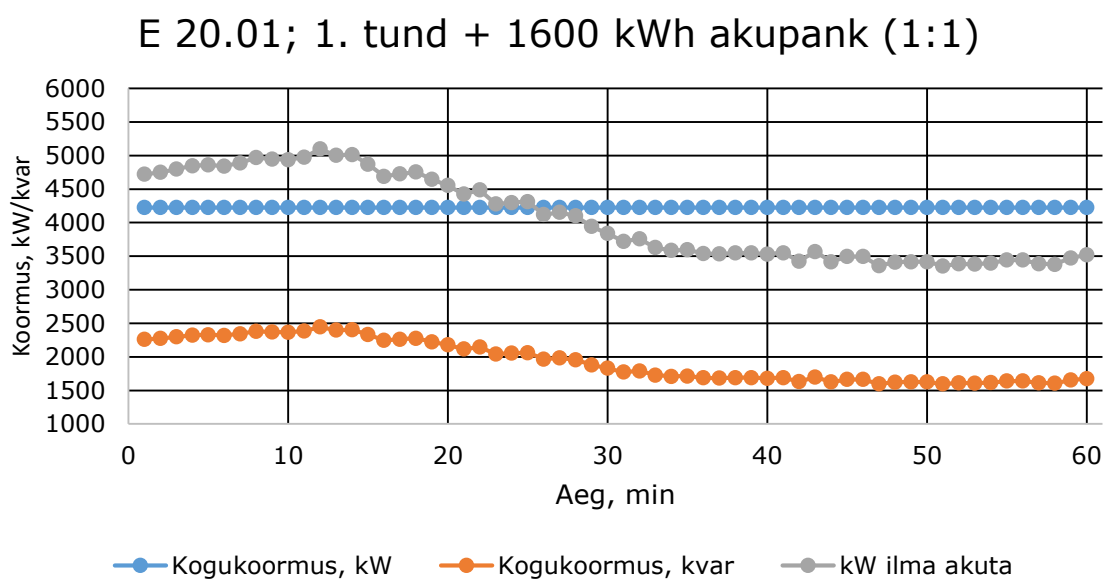
Lõppjääk: $C_{-1eff} = 1218 \text{ kWh}$ $C_{-1} = 1218 \text{ kWh}$

- 2) Plusstsükkel (minutid 29-60)

Algjääk: $C_{+0eff} = 1218 \text{ kWh}$; $C_{+0} = 1218 \text{ kWh}$

Lõppjääk: $C_{+1eff} = 1428,94 \text{ kWh}$ $C_{+1} = 1596,58 \text{ kWh}$

Tasandatud aktiivkoormus ning sellele vastav reaktiivkoormus on nähtavad joonisel 3.1.



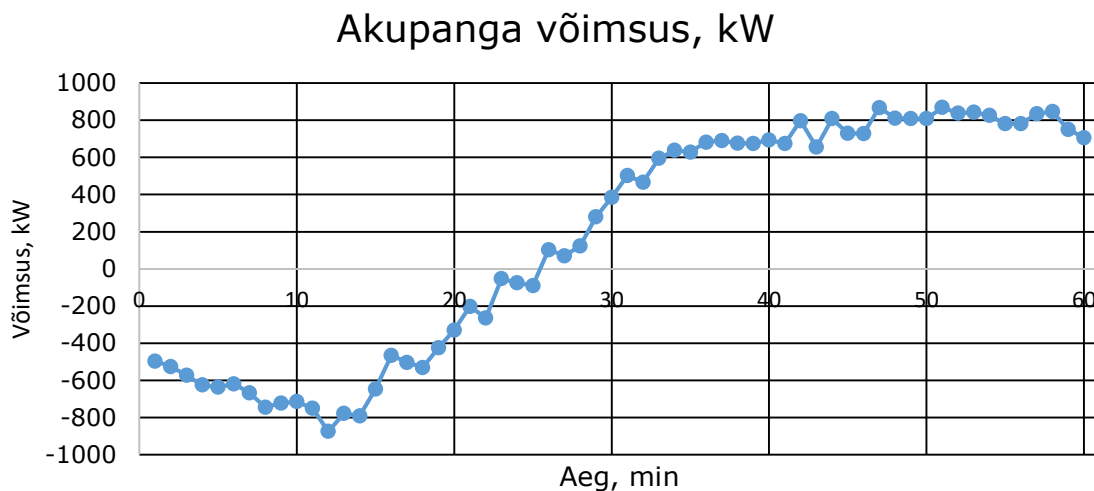
Joonis 3.1. 1600 kWh akujaama (1:1) mõju süsteemi koguminutikoormusele

Jooniselt selgub, et võrreldes ilma salvestita süsteemi aktiivkoormusega (hall tunnusjoon), on salvesti lisamisega selle kõikumine täiesti ära kaotatud – see on muutunud konstantseks (sinine tunnusjoon). Reaktiivvõimsuse väärtus (oranž tunnusjoon) salvesti selliselt lisamisega ei muutunud, sest lõputöös käsitletud baassõlme ühendatud salvestid ei tooda ega tarbi reaktiivvõimsust ning mõjuvad seepärast ainult lisaaktiivvõimsusena baassõlme ühendatud ekvivalentsele generaatorile ega mõjuta seega reaktiivkoormuse bilanssi. Seepärast on aktiivkoormuse tunnusjoon joonisel nüüd ja edaspidi selles alapeatükis üksnes illustratiivsel eesmärgil.

Võrreldes saadud ülekandekadude, sõlmepingete ja pingenukkade väärtuseid referentsväärtustega (peatükk 2) selgus, et kõik erinevused on vaevumärgatavalt väikesed jäädes allapoole 0,01%. See tuleneb tõenäoliselt PWS'i Newton-Rhapsoni iteratiivse arvutuse ebatäpsusest ning seega ei saa ka neid väikseid muutusi pidada sõlme ühendatud salvesti mõjuks. Sellest tulenevalt loobuti nimetatud suuruste võrdlemisest edasistes alapeatüki 3.1 punktides, kuna need kõik käsitlevad sarnast ainult aktiivvõimsust edastavat/tarbivat seadet süsteemi baassõlmes.

Akupanga algjääk oli 1432 kWh, mis vastab 1600 kWh mahutavusega akupanga maksimaalsele kasulikule mahule (vastavalt kasutegurile). Tühjenemisetsükli lõpuks oli akumaht 1213.64 kWh ning täislaadimisetsükli lõpuks oli akus kokku 1596,58 kWh energiat, millest 89,5%, s.t. 1428,93 kWh (,ehk umbkaudu sama palju kui algjääk tunni

alguses,) moodustab kasulik akumaht, mille saab edaspidi kasutusele võtta. Akupanga väljund- ja sisendvõimsuse varieerumine on nähtav joonisel 3.2.



Joonis 3.2. Akupanga võimsuse minutipõhine varieerumine

3.1.2 600 kWh Liitiumioonakupank (1:3) baassõlmes, minutipõhine arvestus

Süsteemi lisatud piisava mahtuvuse, kuid väiksema sisend/väljundvõimsusega ($P_{in} = 3 \cdot 130 \text{ kW} = 390 \text{ kW}$, $P_{out} = 180 \text{ kW}$) akupanga ülesanne oli koormuse ühtlustamine. Laadimisvõimsuse väärtuseks valiti akupanga eluea pikendamiseks 1/3 kasuliku mahu väärtusest. Seadesuuruseks määrati minutikoormuste tinglik keskmine 4224,1 kW, mille alusel moodustati järgmised tsüklid:

- 1) Miinustsükkel (minutid 1-22)

Algjääk: $C_{-0eff} = 537 \text{ kWh}$; $C_{-0} = 600 \text{ kWh}$

Lõppjääk: $C_{-1eff} = 404,563 \text{ kWh}$ $C_{-1} = 404,563 \text{ kWh}$

- 2) Plusstsükkel (minutid 23-60)

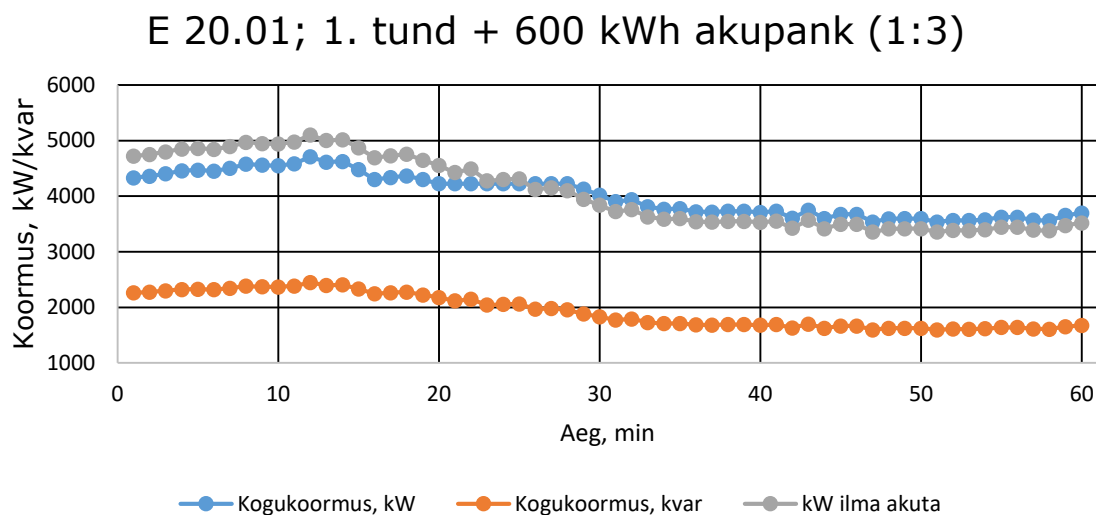
Algjääk: $C_{+0eff} = 404,563 \text{ kWh}$; $C_{+0} = 404,563 \text{ kWh}$

Lõppjääk: $C_{+1eff} = 498,06 \text{ kWh}$ $C_{+1} = 445,76 \text{ kWh}$

Sellise seadme lisamisel süsteemi jäi aktiivkoormuse graafiku kuju suures põhiosas sarnaseks, kuid selle amplituud vähenes oluliselt. Amplituudi vähenemine oli eriti märgata akupanga tühjakslaadimise tsükli ajal, sest tühjakslaadimise võimsus oli üle kahe korra suurem kui täislaadimise võimsus. Minutitel nr. 20-22 püsis süsteemi

koguaktiivkoormus stabiilselt 4224,1 kW juures, mis vastab etteantud seadesuurusele (minutikoormuste tinglik keskmine).

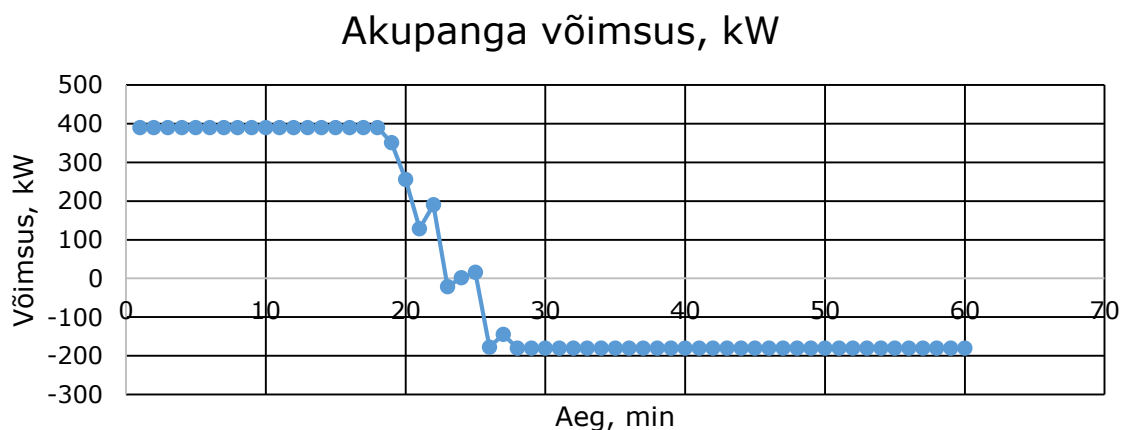
Akupanga poolt mõjutatud aktiivkoormus ning sellele vastav reaktiivkoormus on nähtavad joonisel 3.3.



Joonis 3.3. 1600 kWh akujaama (1:3) mõju süsteemi koguminutikoormusele

Jooniselt selgub, et võrreldes süsteemi koormusega ilma salvestita (hall tunnusjoon) on süsteemi koormus lisatud salvestiga (sinine tunnusjoon) samasuguse kuju, aga väiksema amplituudiga. See tuleneb sellest, et vastavalt kasutatud sisend- ja väljundvõimsuse algoritmile on pluss- ja miinustsüklite jooksul esinevate minutikoormuste kõrvalekalded seadesuurusest seatud vastavusse akumahu väärtustega.

Akupanga väljund- ja sisendvõimsuse varieerumine on nähtav graafikul (Joonis 3.4).



Joonis 3.4. Akupanga võimsuse minutipõhine varieerumine

3.1.3 600 kWh SÕES baassõlmes, minutipõhine arvestus

Baassõlme lisatud SÕES-i eesmärk oli süsteemi tipukoormuse ühtlustamine. Seadesuuruseks võeti minutikoormuste aritmeetiline keskmine 4059,55 kW. Kuna SÕES-i puhul ilmnes vastavalt algandmetele vajadus arvestada pikema reageerimisajaga, ei koostatud tsükleid tavapärasel määral, vaid lähtuti joonisel 1.4 väljatoodud võimsuse sõltuvusest reageerimisajast. Kuna algandmetest tulenevalt pole vaja kasuteguri põhjal erisusi teha, on selles analüüsis salvesi kasulik maht C_{eff} võrdne kogumahuga C . Saadud minutivõimsuste alusel saadi järgmised tsüklid:

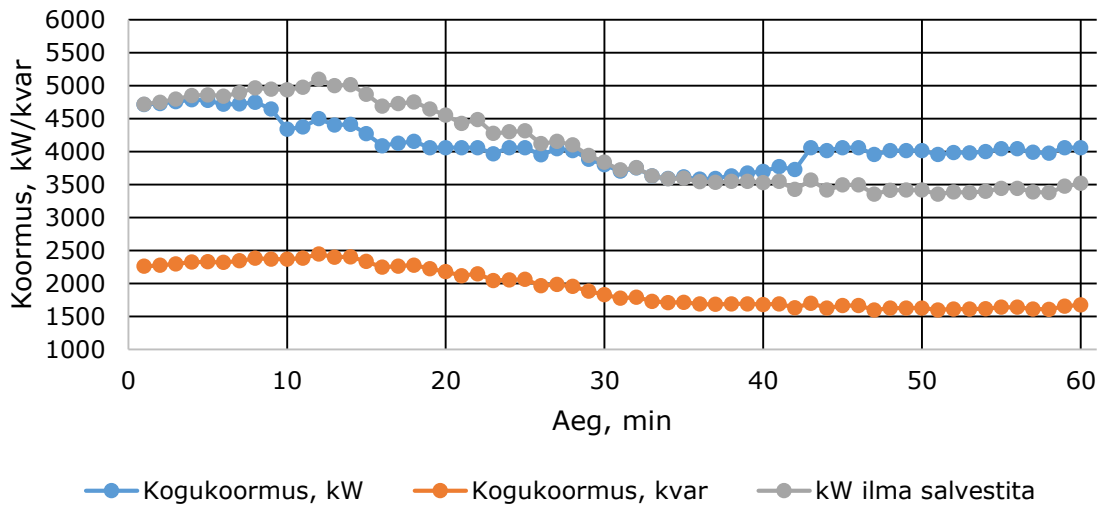
- 1) Miinustsükkel (minutid 1-35)
 - Algjääk: $C_0 = 600$ kWh
 - Lõppjääk: $C_{-1} = 493,29$ kWh

- 2) Plusstsükkel (minutid 35-60)
 - Algjääk: $C_0 = 493,29$ kWh
 - Lõppjääk: $C_{-1} = 560,41$ kWh

Sellise salvesti lisamine baassõlme muutis minutipõhist aktiivkoormust süsteemis ühtlasemaks. Täpsemalt öeldes elimineeris see suurima koormustipu ning vähendas võimsuse ülejääki tunni teises pooles. Tunni alguses hakkas salvesti reageerima kogukoormuse seadesuurusest (tunni minutikoomuste keskmisest) kõrgemale koormusele püüdes seda lähendada seadesuurusele. Suhteliselt pika reageerimisaja tõttu saavutas seade oma täisvõimsuse 10 minuti jooksul. Seepärast ei jõudnud see viia koguaktiivkoormust kohe seadesuuruse väärtuseni, kuid kuna sama 10 minuti jooksul oli ka koormuse tõus, suutis seade eksponentsiaalselt võimsust rakendades koormuse tõusu madalamaks kärpida ning pärast täisvõimsuse saavutamist viia see 600 kW võrra madalamale.

Koos koormuse langemisega jõudis seade tuua kogukoormuse 16. minutiks seadesuuruse lähedale, kus see püsis 28. minutini, langes seejärel koos koormuse langusega ning jõudis taas umbkaudse seadesuuruseni 43. minutiks, kuhu ta jäi vähese kõikumisega tunni lõpuni. See tähendab, et koormus oli seadesuuruse lähedal 30 minuti jooksul 60-st, ehk umbes poole ajast. Koguaktiivkoormuse varieerumine ning sellele vastava reaktiivkoormuse väärtused on nähtavad joonisel 3.5.

E 20.01; 1. tund + 600 kWh SÕES

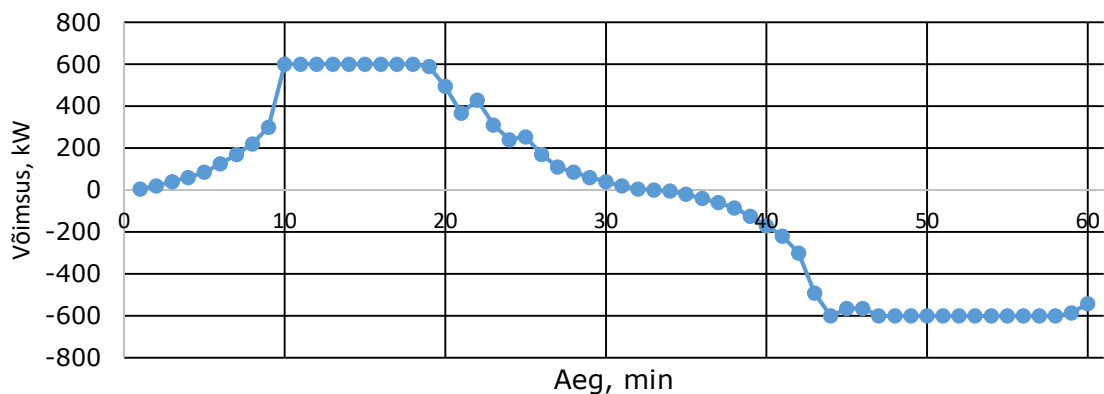


Joonis 3.5. 600 kWh suruõhksalvesti mõju süsteemi koguminutikoormusele

Jooniselt selgub, et võrreldes süsteemi koormusega ilma salvestita (hall tunnusjoon), on lisatud salvestiga süsteemi koormus (sinine tunnusjoon) muutunud kuju ja väiksema amplituudiga. Kuju muutus tuleneb otseselt salvesti aeglasest reageerimisajast, mis ei jõua minutipõhiselt koormuse muutumisele järele. On näha, et esimese 9 minuti jooksul see käib mõneti koormuse tõusuga kaasas, ent 10. minutil toimub järsk väljundvõimsuse rakendumine, mis langetab koormust hüppeliselt. Sarnane, ent teistpidine järsk muutus on näha 34. minutil. Ka see tuleneb samast põhjusest.

Salvesti sisend- ja väljundvõimsuse varieerumine on nähtav joonisel 3.6.

SÕES'i väljund/sisendvõimsus, kW



Joonis 3.6. Suruõhksalvesti väljund-sisendvõimsuse varieerumine tunni jooksul

3.1.4 1000 kWh Li-ioonakupank (1:1) baassõlmes, tunnipõhine arvestus ööpäeva kohta, täiustatud algoritm

Baassõlme lisati 1000 kWh mahutavusega akupank. Selle kasulik maht on vastavalt kasutegurile (89.5%) [8] 895 kWh. Kuna see etapp saab aluseks hilisemal lihtsustatud tunnipõhisel nädalavaatlusel, koostati akupanga tühjaks ja täis laadimiseks täiustatud algoritm, mille ülesanne oli akut laadida selliselt, et ööpäeva algne kasuliku mahu jääk oleks võrdne ööpäeva lõpliku jäägiga. Akupanga eesmärgiks seati kogukoormuse ühtlustamine. Selleks määrati koormuse seadesuuruseks kõigi tunnikogukoormuste aritmeetiline keskmine (4631,87 kW) ning sellest kõrvale kaldumiste väärtused võeti aluseks akupanga sisend- ja väljundvõimsuste arvutamiseks iga tunni kohta.

Kõrvalekallete alusel jagati ööpäev kolme tsüklisse. Vastavalt sellele, kas parasjagu oli vajalik võimsuse edastamine süsteemi või selle tarbimine sealt, liigitati tsüklid kaheks plusstsükliks (võimsuse tarbimine) ning üheks miinustsükliks (võimsuse edastamine).

Saadi järgnevad tsüklid:

- 1) Hommikune tsükkel: 00.00 – 07.00 (plusstsükkel)
- 2) Päevane tsükkel: 07.00 – 22.00 (miinustsükkel)
- 3) Õhtune tsükkel: 22.00 – 00.00 (plusstsükkel)

Et määrata igale tunnile vastav sisend- ja võimsuse väärtus, liideti eraldi kokku kõigi miinustsüklite ja plusstsüklite jooksul esinenud kõrvalekalded seadeväärtusest. Saadud väärtused tähistati Excel'i tabelis kui $\Delta P_{\Sigma+} = 4969,9$ ning $\Delta P_{\Sigma-} = -4969,9$ kW. Akupanga tunnivõimsus määrati protsendiarvutuse teel. Selleks võeti igale tunnile vastava seadeväärtusest kõrvalekalde protsentuaalne osa kas $\Delta P_{\Sigma-}$ või $\Delta P_{\Sigma+}$ väärtusest ning saadud protsendi alusel arvutati vastav osa akumahust (miinustsükli jooksul $C_{eff} = 895$ kWh ning plusstsüklite jooksul $C = 1000$ kWh). $\Delta P_{\Sigma+}$ ning $\Delta P_{\Sigma-}$ väärtused jäeti esialgu samaks, et teha esimene lähendus. Oli selge, et akupanka tunni jooksul sisenev energia peab olema suurem kui tunni jooksul väljuv energia. Kuna koormuse muutumine ei ole lineaarne, ei ole võimalik eesmärgile vastavaid täpseid tunnivõimsusi lihtsalt välja arvutada, seepärast korrigeeriti algoritmi hiljem käsitsi, et saavutada täpne soovitud tulemus.

Tunnipõhises vaatluses vastab akupanga hetkevõimsuse väärtus tunni jooksul toimunud akumahu muutumisele (kWh : kW). Plusstsüklite jooksul liideti igale tunnile vastava sisend- ja väljundvõimsuse väärtus eelmise tunni akumahu jäägile C_{hn-1} (esimese tunni

puhul eelnenud tsükli lõppjäägile C_{n-1}). Plusstsükli lõppjääk saadi niimoodi tsükli viimase tunni väärtusena, millest järgneva miinustsükli arvutamiseks võeti ka kasulik väärtus C_{n_eff} , s.t kogumahtu korrutati kasuteguriga ($\eta=0,895$). Arvestati, et ainult miinustsükli puhul on lõppjäägi C_{hn_eff} väärtus sama mis C_{hn} , plusstsükli lõppjäägi puhul arvestati vastavalt kasutegurile kahte eraldi suurust. Nii saadi igale tunnile vastav akumahu koguväärtused C_{hn} ning C_{hn_eff} .

Nii saadi tunni kohta järgnev kogutulemus:

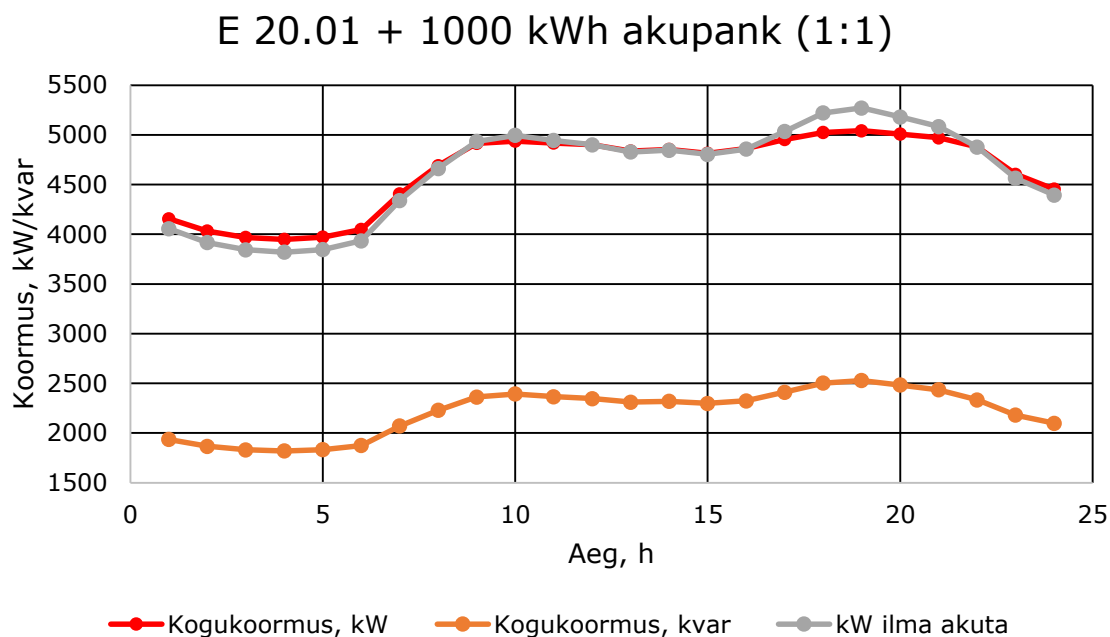
- Tunni algjääk $C_{h0} = 0$ kWh (vastav kogumaht: $C_{h0eff} = 0$ kWh)
- Tunni lõppjääk $C_{h1} = 6,5$ kWh (s.t kasulik: $C_{h1eff} = 5,78$ kWh)

Selgus, et akumaht ei tõusnud üle maksimaalse väärtuse, kuid õhtuse tsükli jooksul tuvastati akumahu langemine alla nulli. Ööpäeva lõpuks tõusis see siiski jälle üle nulli. Kuna akujaama mahtuvus ei saa alla nulli minna, ei saa seda tulemust pidada rahuldavaks. Sama tendents jätkus ka siis kui akumahtu tõsteti. Järelikult ilmnes ootuspärane vajadus algoritmi täiustada.

Et viia lõppjäägi väärtus vastavusse algjäägiga, korrutati $P_{\Sigma+}$ erinevate empiiriliste konstantidega c_+ vahemikus 0.9 kuni 0.95. Samuti muudeti akupanga algjääki C_{0_eff} vahemikus 40-50 kWh, et saavutada tulemust, mille puhul akupanga hetkeline kogumaht C_h ei ületaks 1000 kWh ning akupanga hetkeline kogu kasulik maht C_{heff} ei langeks alla nulli. Soovitatav tulemus saavutati konstandi väärtuse $c_+ = 0.94212$ ning algjäägi $C_{0eff} = 51.8$ kWh juures. Selliselt saadi järgnevad tsükliid:

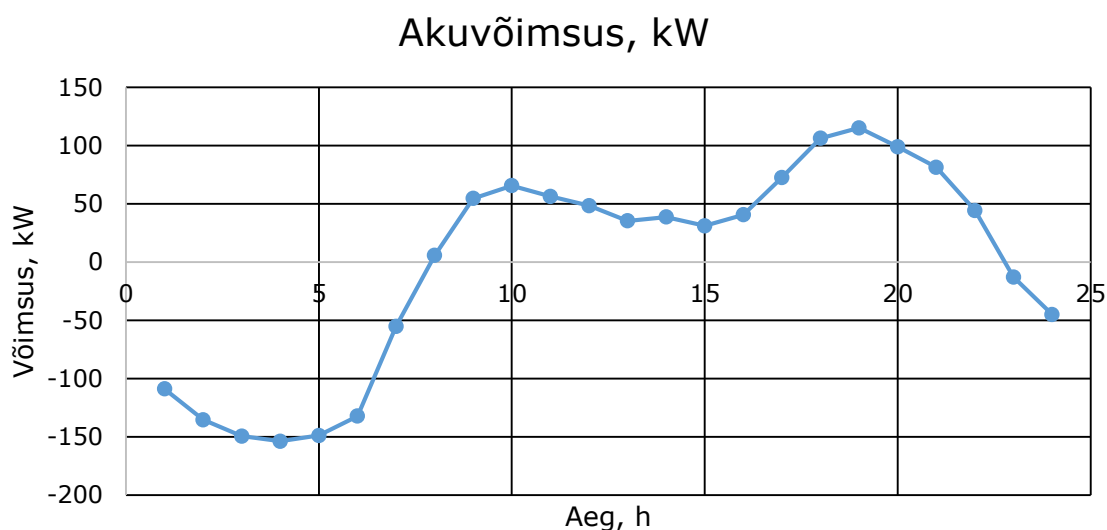
- 1) Hommikune tsükkel: 00.00 – 07.00 (plusstsükkel)
 - Algjääk: $C_{ho0eff} = 51,8$ kWh; $C_{ho0} = 57,88$ kWh
 - Lõppjääk: $C_{ho1eff} = 894,05$ kWh; $C_{ho1} = 1000$ kWh
- 2) Päevane tsükkel: 07.00 – 22.00 (miinustsükkel)
 - Algjääk: $C_{p0eff} = 894,05$ kWh; $C_{p0} = 1000$ kWh
 - Lõppjääk: $C_{p1eff} = 0$ kWh; $C_{p1} = 0$ kWh
- 3) Õhtune tsükkel: 22.00 – 24.00 (plusstsükkel)
 - Algjääk: $C_{\delta0eff} = 0$ kWh; $C_{\delta0} = 0$ kWh
 - Lõppjääk: $C_{\delta1eff} = 51,8$; $C_{\delta1} = 57,88$ kWh

Saadud algoritm vastab täpselt eesmärgile – ööpäeva alg- ja lõppjäädid on võrdsed. Sellisel moel toimub ööpäevas üks akutsükkel, mille käigus akupank laetakse täis ning seejärel jälle tühjaks. Saadud mõju süsteemi kogukoormusele on nähtav joonisel 3.7. Jooniselt selgub, et koormus on muutunud ühtlasemaks – hommikuse tsükli käigus tarbitav koormus salvestiga süsteemis (punane tunnusjoon) on võrreldes ilma salvestita süsteemi koormusega (hall tunnusjoon) tõusnud ööpäeva keskmisele lähemale, samuti on kahanenud öhtune tarbimistipp.



Joonis 3.7. 1000 kWh akupanga mõju süsteemi koguminutikoormusele (täiustatud algoritm)

Ööpäevale vastava akupanga sisend- ja väljundvõimsuse muutumine on nähtav joonisel 3.8.



Joonis 3.8 Akujaama sisend- ja väljundvõimsuse varieerumine ööpäeva jooksul.

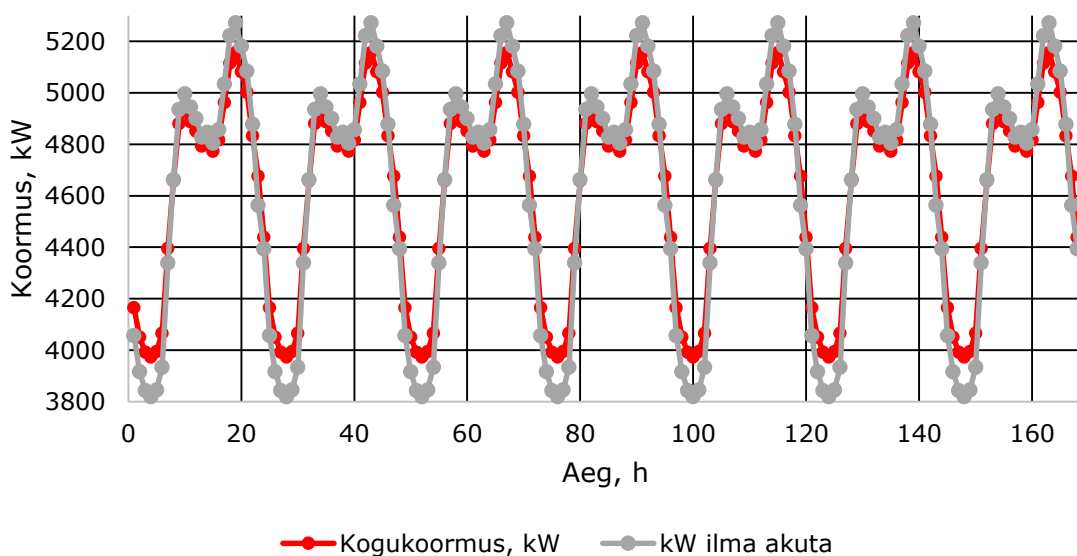
3.1.5 1000 kWh Li-ionakupank (1:1) baassõlmes, tunnipõhine lihtsustatud arvestus nädala kohta, täiustatud algoritm

Tunnipõhises nädalavaatluses analüüsiti kahte erinevat stsenaariumit:

- 1) Eesmärk on tunnipõhist nädalakoormust ühtlustada sarnaselt punktis 3.1.4 kirjeldatud juhtumiga. Vastavalt sellele valiti seadesuuruseks tunnikoormuste aritmeetiline keskmine (ning sama algoritm, mis oli punktis 3.1.4).
- 2) Eesmärk on tasandada keskpäevast koormuse kõikumist ning kärpida õhtuseid tarbimistippusid. Vastavalt sellele võeti seadesuuruseks esmaspäeva kella 10. tunnile vastav väärtus 4996 kW, mis tähistab hommikust tarbimistippu.

Esimese stsenaariumi puhul võeti aluseks punktis 3.1.4 saadud katsetulemused, mille alusel komplekteeriti lihtsustatud nädalagraafik, mis koosneb seitsmest samasugusest ööpäevast. Saadud koormuse ühtlustamise mõju on nähtav joonisel 3.9. Sealt selgub, et võrreldes süsteemi koormusega ilma salvestita süsteemis (hall tunnusjoon), on lisatud salvestiga süsteemis (punane tunnusjoon) koormuse tipud kahanenud ning madalseisu hetked muutunud kõrgemateks.

Lihtsustatud nädal + 1000 kWh akupank (1:1)



Joonis 3.9. Nädalase tunnipõhise koormuse muutumine esimese stsenaariumi korral

Teise stsenaariumi puhul võeti aluseks peatükis 2 kirjeldatud lihtsustatud tunnikoormustega nädalagraafik jooniselt 2.5. Sisend- ja väljundvõimsuse algoritm koostati sarnaselt punktis 3.1.4 kirjeldatud juhtumiga. Seda kohendati vastavalt uuele

seadesuurusele. See tähendab, et ööpäev jagati uuesti tsükliteks. Saadi järgmised tsüklid:

- 1) Hommikune tsükkel: 00.00 – 09.00 (plusstsükkel)
(10. Tunni nulltsükkel: 09.00 – 10.00 – akupanga võimsus on nullis)
- 2) Päevane tsükkel: 10.00 – 16.00 (plusstsükkel)
- 3) Õhtune tsükkel: 16.00 – 21.00 (miinustsükkel)
- 4) Hilisõhtune tsükkel: 21.00 – 00.00 (plusstsükkel)

Vastavalt eesmärgile oli vaja nivelleerida koormus päevase ja õhtuse tsükli jooksul 10. tunni koormusega tasaseks. Selleks võrdsustati nende tsüklite jooksul akupanga tunnivõimsused vastavate tundide kõrvalekalletega seadesuurusest. Hommikusele ja hilisõhtusele tsüklile vastavad akupanga tunnivõimsused leiti protsendiarvutusena vastavalt nende osale nimetatud tsüklite kõigi seadesuurusest kõrvalekallete summast ($\Delta P_{\Sigma+}$), mille kaudu arvutati protsentuaalselt sobiv osa väljaspool keskpäevast tsükli taidetud akumahu osast.

Esialguses arvutuses saadi ühe ööpäeva kohta järgnevad tulemused:

- Ööpäeva algjäak: $C_{0eff} = 0$ kWh (vastav kogumaht:) $C_0 = 0$ kWh
- Ööpäeva lõppjäak $C_1 = 185,8$ kWh (s.t kasulik: $C_{1eff} = 166,29$ kWh)

Seekord püsisid tsüklite lõppjäägid akumahu piirides. Kuna ööpäeva lõppjäak oli 185,8 kWh, ei sobi saadud tulemus eesmärgiga, sest see ei vasta ööpäeva algjäagi väärtusele. Ilmnes vajadus laadimiskoormuste vähendamiseks plusstsüklite ajal. Algjäagiks valiti $C_{0_eff} = 100$ kWh ning summat $\Delta P_{\Sigma+}$ korrutati empiirilise konstandiga c_+ , mida muudeti vahemikus 0 kuni 0,2. Konstandi väärtuse $c_+ = 0.09895$ juures saavutati sobiv tulemus. Seega saadi järgmised tsüklid:

- 1) Hommikune tsükkel: 00.00 – 09.00 (plusstsükkel)
 - Algjäak: $C_{ho0eff} = 100$ kWh; $C_{ho0} = 111,73$ kWh
 - Lõppjäak: $C_{ho1eff} = 215,86$ kWh $C_{h1} = 241,18$ kWh
- 2) Päevane tsükkel: 10.00 – 16.00 (plusstsükkel)
 - Algjäak: $C_{p0eff} = 215,86$ kWh; $C_{p0} = 241,18$ kWh
 - Lõppjäak: $C_{p1eff} = 826,31$ kWh; $C_{p1} = 923,25$ kWh

3) Öhtune tsükkel: 16.00 – 21.00 (miinustsükkel)

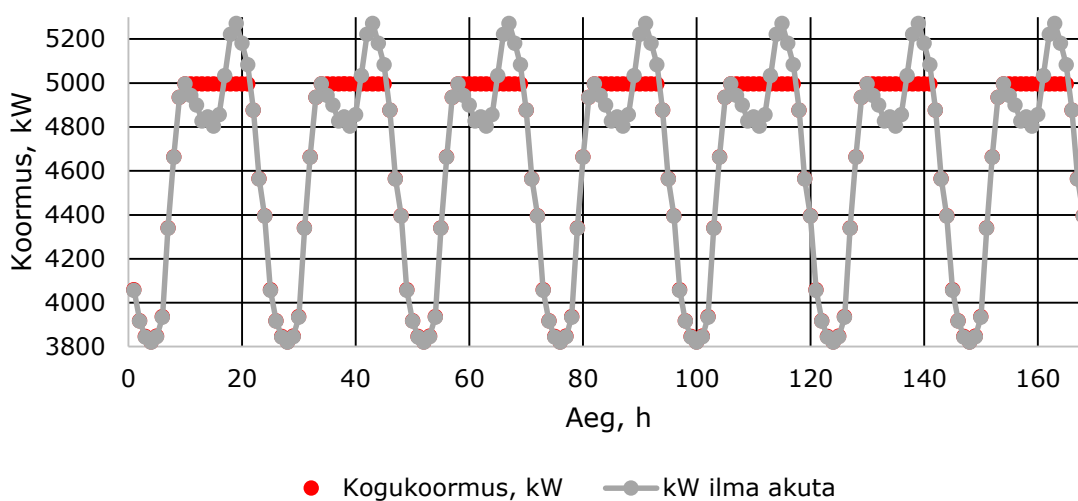
- Algjääk: $C_{\delta 1 eff} = 826,31$ kWh; $C_{\delta 0} = 923,25$ kWh
- Lõppjääk: $C_{\delta 1 eff} = 109,05$ kWh; $C_{\delta 1} = 109,05$ kWh

4) Hilisõhtune tsükkel: 21.00 – 00.00 (plusstsükkel)

- Algjääk: $C_{h\delta 0 eff} = 109,05$ kWh; $C_{h\delta 0} = 109,05$ kWh
- Lõppjääk: $C_{h\delta 1 eff} = 100$ kWh; $C_{h\delta 1} = 111,74$ kWh;

Tulemusena saadi tunnipõhine lihtsustatud nädalagraafik, mille päevased osad olid seadesuurusega võrdsustatud. Tulemus on näha joonisel 3.10.

Lihtsustatud nädal + 1000 kWh akupank (1:1)



Joonis 3.10. Tasandatud päevase koormusega lihtsustatud tunnipõhine nädalagraafik

Joonisel on näha, et võrreldes süsteemi koormusega ilma salvestita (hall tunnusjoon), on salvestiga süsteemi koormuse (punane tunnusjoon) tarbimistipud kärbitud. On näha ka vaevumärgatavat tõusu koormuse madalseisuhetkedel.

Modelleerimisel aluseks võetud Tesla PowerPack akumoodulite eluiga on 3000 kuni 4000 tsüklit [10]. Kui võtta aluseks maksimaalne väärtus (4000), selgub et selles peatükis vaadeldud juhul peab konkreetne akupank süsteemis vastu 4000 ööpäeva, ehk umbkaudu 11 aastat:

$$t_{\Sigma} = \frac{4000(\ddot{o}p)}{365,2(\ddot{o}p/a)} = 10,953a.$$

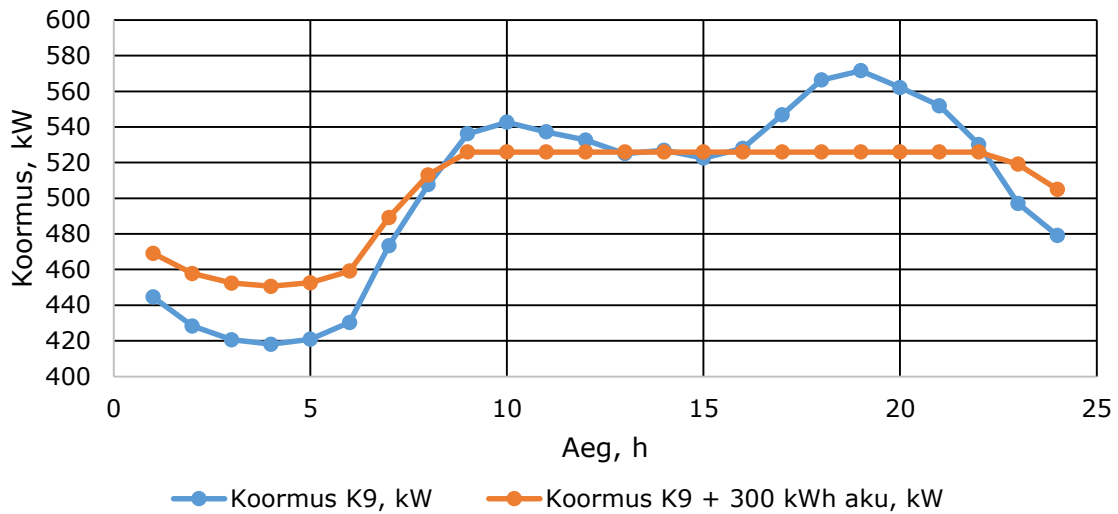
3.2 Radiaalharu keskele ühendatud salvestiga süsteem

Radiaalharu keskele ühendatud salvesti abil sooviti siluda konkreetse sõlme päevast koormust ning analüüsida selle mõju süsteemi liinidele ning teistele sõlmedele. Lisatud salvestiks oli Tesla PowerPack akupank nimimahtuvusega $C_n = 2 \cdot 200 \text{ kWh} + 1 \cdot 100 \text{ kWh} = 300 \text{ kWh}$. Analüüsiti ainult tunnipõhist mõju kuupäeva lõikes, seepärast kasutati lihtsat sisend- ja väljundvõimsuse algoritmi, mille puhul pole akupanga alg- ja lõppjäagi võrdsus oluline. Seadesuuruseks määrati koormuse K9 tunniväärtuste mediaanväärtus (525,97 kW), sest see oli aritmeetilisest keskmisest (504,18 kW) pisut kõrgem ning kattus seetõttu paremini graafiku keskosaga, mida sooviti sirgeks saada. Vastavalt seadesuurusele koostati järgmised tsükklid:

- 1) Hommikune tsükkel: 00.00 – 08.00 (Plusstsükkel)
 - Algjäak: $C_{ho0eff} = 50 \text{ kWh}$; $C_{ho0} = 55,87 \text{ kWh}$
 - Lõppjäak: $C_{ho1eff} = 260,48 \text{ kWh}$ $C_{ho1} = 291,03 \text{ kWh}$
- 2) Ennelõunane tsükkel: 08.00 – 12.00 (Miinustsükkel)
 - Algjäak: $C_{el0eff} = 260,48 \text{ kWh}$; $C_{el0} = 291,03 \text{ kWh}$
 - Lõppjäak: $C_{el1eff} = 215,6 \text{ kWh}$ $C_{el1} = 215,6 \text{ kWh}$
- 3) Keskpäevane tsükkel: 12.00 – 16.00 (Segatsükkel)
 - Algjäak: $C_{kp0eff} = 100 \text{ kWh}$; $C_{kp0} = 111,73 \text{ kWh}$
 - Lõppjäak: $C_{kp1eff} = 216,5 \text{ kWh}$ $C_{kp1} = 241,9 \text{ kWh}$
- 4) Õhtune tsükkel: 16.00 – 22.00 (Miinustsükkel)
 - Algjäak: $C_{\delta0eff} = 216,5 \text{ kWh}$; $C_{\delta0} = 241,9 \text{ kWh}$
 - Lõppjäak: $C_{\delta1eff} = 43,5 \text{ kWh}$ $C_{\delta1} = 43,5 \text{ kWh}$
- 5) Hilisõhtune tsükkel: 22.00 – 00.00 (Plusstsükkel)
 - Algjäak: $C_{h\delta0eff} = 43,5 \text{ kWh}$; $C_{h\delta0} = 43,5 \text{ kWh}$
 - Lõppjäak: $C_{h\delta1eff} = 66,3 \text{ kWh}$ $C_{h\delta1} = 74,1 \text{ kWh}$

Salvesti mõju koormusele K9 on nähtav joonisel 3.11. Sealt selgub, et võrreldes ilma akupangata (sinine tunnusjoon) oli sõlme koormus lisatud akupangaga (oranž tunnusjoon) tundidel nr. 9 kuni 22 ühtlase väärtusega. On märgata ka koormuse tõusu madalseisuperioodidel.

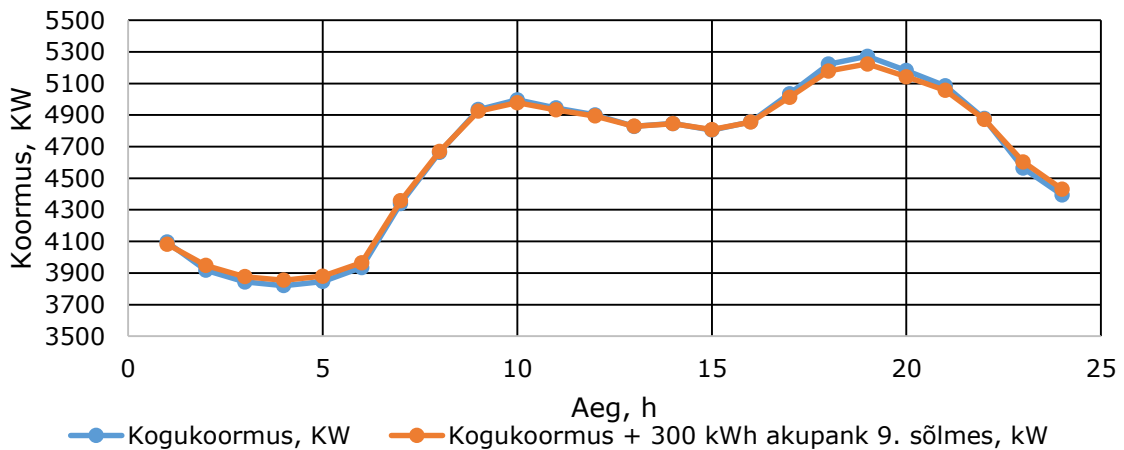
Koormus K9 + 300 kWh aku



Joonis 3.11. 300 kWh akupanga mõju koormusele K9

Analüüsi käigus ilmnes, et salvestil on ka vähemärgatav mõju süsteemi kogukoormusele. See on välja toodud joonisel 3.12. Ilma salvestita kogukoormus on märgitud sinise ning salvestiga kogukoormus oranži tunnusjoonega.

Kogukoormus + 300 kWh akupank 9. sõlmes



Joonis 3.12. Sõlme ühendatud 300 kWh akupanga mõju süsteemi kogukoormusele

Selgus ka, et sellisesse kohta ühendatud salvesti mõjutab ülekandekadusid liinidel. Kui vaadelda summaarset aktiivvõimsuse ülekandekadu, oli erinevus väike. Kui aga analüüsida aktiivkadusid üksikutel liinidel, selgus et just ringvõrguosas on liinide võimsusvoogudes tekkinud võrreldes ilma salvestita olukorraga vastupidise suunaga komponente, mis on mõjutanud ülekandekadusid mõne kW ulatuses. Ülevaade avastatud muutustest aktiivkadude osas on välja toodud tabelis (Tabel 3.1)

Tabel 3.1 Aktiivkadude võrdlus liinidel salvestiga ja ilma

	$\Delta P_{\text{salvestiga, KW}}$	$\Delta P_{\text{ilma salvestita, KW}}$	vahe, kW
ΔP_{L1}	11.210	11.223	0.013
ΔP_{L2}	28.299	28.343	0.044
ΔP_{L3}	24.649	28.057	3.408
ΔP_{L4}	34.895	31.555	-3.341
ΔP_{L5}	0.812	0.808	-0.004
ΔP_{L6}	13.641	11.529	-2.112
ΔP_{L7}	1.097	5.227	4.130
ΔP_{L8}	7.166	5.195	-1.971
ΔP_{L9}	2.615	3.522	0.907
ΔP_{L10}	0.337	1.090	0.753
ΔP_{L11}	5.344	3.698	-1.646
ΔP_{L12}	5.181	5.179	-0.003
ΔP_{L13}	0.108	0.108	0.000
Kokku:	135.354	135.533	0.179

Tabelist selgub, et kõige suurem oli muutus ringvõrguosa liinidel L3, L4, L6 ja L7. Samuti olid nähtavalt mõjutatud radiaalharude liinid L8 ja L11. L8 puhul on see seletatav asjaoluga, et suurel osal ööpäevast toimis ühendatud salvesti allikana, mis vähendas liini L8 koormust. Veel nähtavam oli muutus reaktiivvõimsuskadude osas – juba summaarsete reaktiivkadude võrdluses oli nähtav tõus umbes 1/3 ulatuses. Reaktiivkadude muutus on nähtav tabelis (Tabel 3.2).

Tabel 3.2. Reaktiivkadude muutus sõlme nr.9 lisatud salvesti mõjul

	Salvestiga	Ilma salvestita	vahe, kW
ΔP_{L1}	15.752	13.320	-2.433
ΔP_{L2}	27.080	21.152	-5.928
ΔP_{L3}	24.198	20.939	-3.259
ΔP_{L4}	33.107	23.548	-9.558
ΔP_{L5}	0.824	0.603	-0.221
ΔP_{L6}	13.998	9.290	-4.708
ΔP_{L7}	1.993	3.900	1.908
ΔP_{L8}	14.793	5.278	-9.515
ΔP_{L9}	4.958	3.137	-1.820
ΔP_{L10}	1.474	0.813	-0.661
ΔP_{L11}	10.810	3.801	-7.009
ΔP_{L12}	7.557	3.866	-3.691
ΔP_{L13}	0.367	0.080	-0.286
Kokku:	156.908	109.727	-47.181

Tabelist on näha, et arvutusandmetes oli ainult üks liin, mille reaktiivkadu salvesti lisamise tagajärjel langes – see oli ringvõrguosa liin L7. Suurimad tõusud reaktiivkadude osas olid liinidel L1, L2, L3, L4, L6, L8, L11 ja L12. See on seletatav sellega, et salvesti lisamisega sõlme nr. 9 tekitati kahepoolne toide, mille tagajärjel läks reaktiivvõimsuse bilanss nihkesse.

Sõlme pingetele salvesti olulist mõju ei avaldanud – kõik erinevused jäid 0,001 kV piiresse. Rohkemate kümnendkohtadega uurides oli küll märgata, et kõikide sõlmede pinged peale sõlme 11 olid väga vähesel määral tõusnud, aga neid tulemusi ei saa nende väiksuse tõttu oluliseks pidada. Pingenurkade muutused jäid 0,1 kraadi piiresse. Suurimad erinevused olid sõlmedes 3 (-0,014 °), 4 (0,015 °), 6 (-0,032 °), 7 (-0,028 °), 8 (0,06 °), 9 (-0,025 °), 10 (-0,015 °), 11 (0,041 °).

3.3 Radiaalharu lõppu ühendatud salvestiga süsteem

Et analüüsida hooratas-energiasalvesti ajalist mõju kohaliku sõlme koormusele ning kogu süsteemile, paigutati see kõige väiksema koormuse $K13 = 180 \text{ kW}$ juurde. See valik tehti, kuna seda tüüpi salvestitel on suhteliselt väike energiatihedus ning sellest tulenevalt ka madal mahutavus C_n . Samas on valitud sõlm ka radiaalharus viimane ning salvesti paigaldamine sinna võiks aidata teha mingeid järeldusi selle mõju kohta ülejäänud süsteemile. Hooras-energiasalvesti ($P_n = 600 \text{ kW}$, $C_n = 6 \text{ kWh}$) mõju analüüsiti minutipõhiselt ööpäeva lõikes. Salvesti ülesandeks määrati koormuse K13 ühtlustamine.

Sisend- ja väljundvõimsuse arvutamiseks kasutati lihtsustatud algoritmi. Selliselt saadi kaks tsüklit:

1) Miinustsükkel (minutid 1-28)

Algjääk: $C_{-0eff} = 5,55 \text{ kWh}$; $C_{-0} = 6 \text{ kWh}$

Lõppjääk: $C_{-1eff} = 0 \text{ kWh}$ $C_{-n1} = 0 \text{ kWh}$

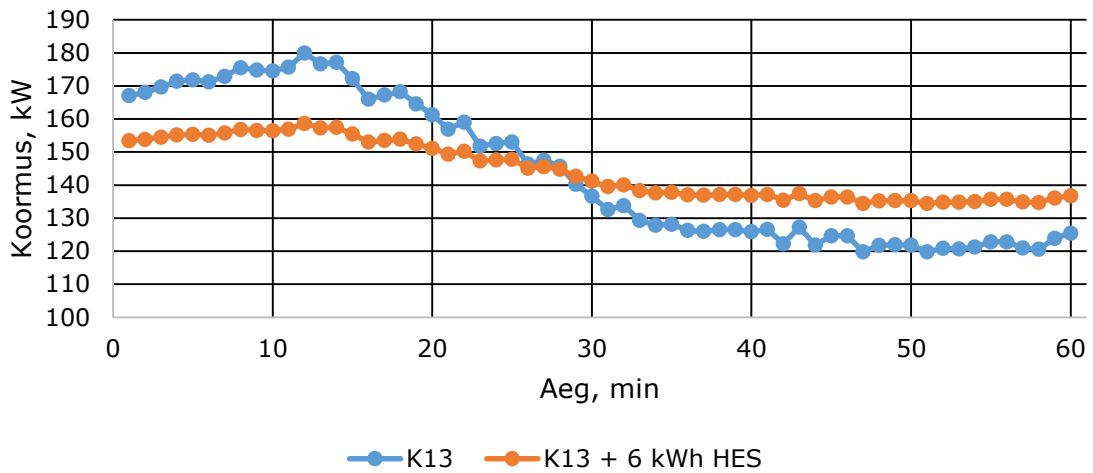
2) Plusstsükkel (minutid 29-60)

Algjääk: $C_{+0eff} = 0 \text{ kWh}$; $C_{+0} = 0 \text{ kWh}$

Lõppjääk: $C_{+1eff} = 5,13 \text{ kWh}$ $C_{+1} = 5,55 \text{ kWh}$

Ühtlustatud koormus on nähtav joonisel 3.13.

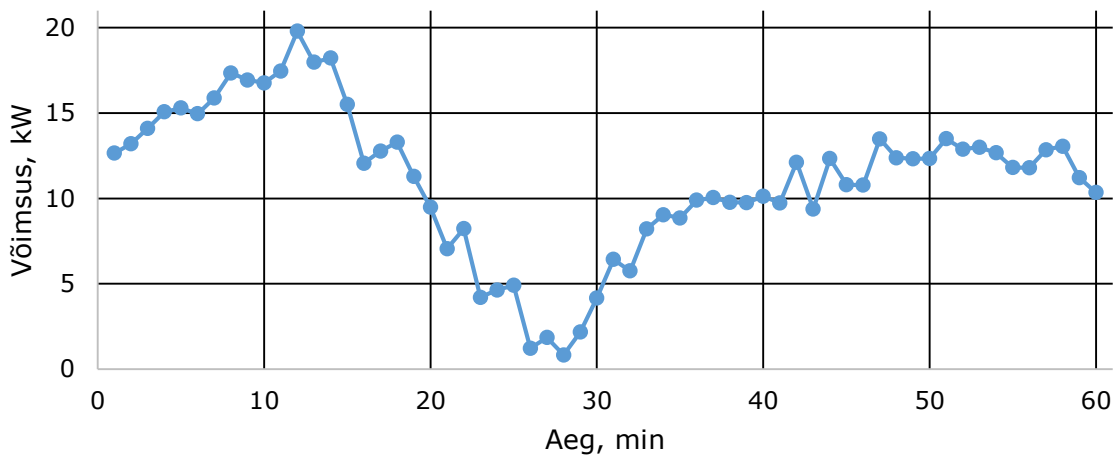
Koormus K13 + 6kWh HES



Joonis 3.13. 6kWh hooratas-energiasalvesti mõju koormusele K13

Jooniselt selgub, et 6 kWh hooratas-energiasalvesti lisamine süsteemi muutis sõlme nr. 13 minutipõhise koormuse ühtlasemaks. On näha, et võrreldes ilma salvestita koormusega K13 (sinine tunnusjoon) on lisatud salvestiga koormusel (oranž tunnusjoon) samasugune kuju, aga väiksem amplituud. Salvesti sisend- ja väljundvõimsuse muutumine on nähtav joonisel 3.14.

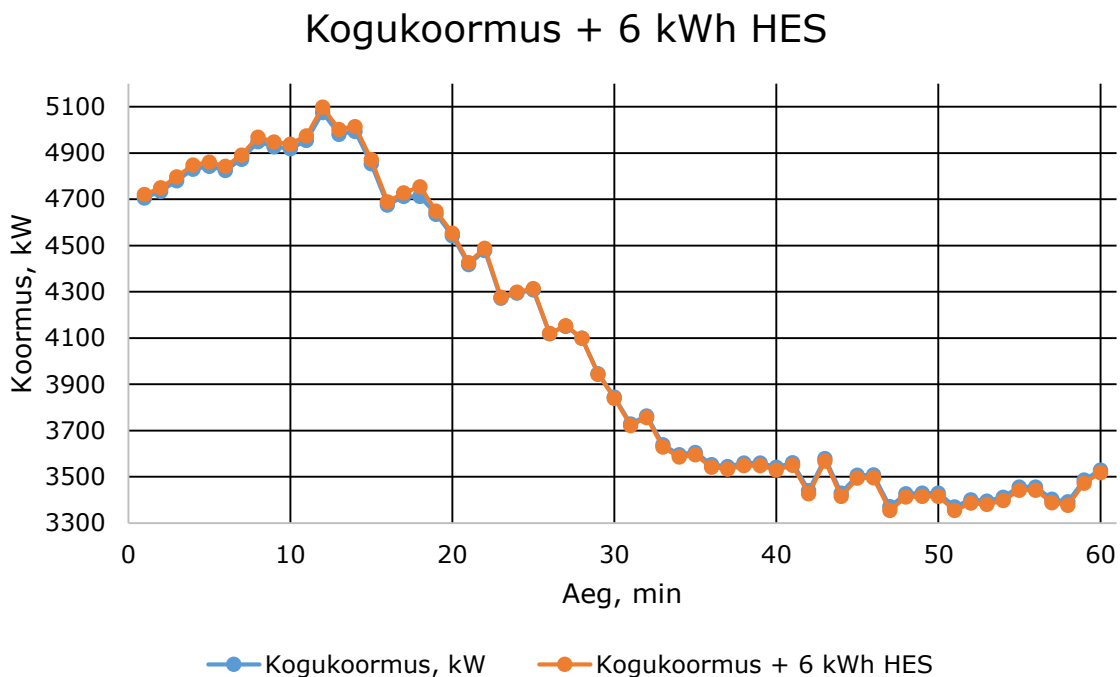
Hooratas-energiasalvesti võimsus, kW



Joonis 3.14 Hooratas-energiasalvesti sisend- ja väljundvõimsuse muutumine

Selgus ka, et selline salvesti sõlmes nr. 13 ei mõjuta olulisem määral ei ülekandekadusid, sõlmede pingeid ega nende nurkasid. Aktiivkadude erinevused jäid 0,04 kW piiresse, reaktiivkadude erinevused 0,02 kW piiresse, sõlmepingete erinevused 0,002 KV piiresse ning pingenurkade erinevused 0,05° piiresse. See on seletatav salvesti väikese energiatiheduse ning sellest tuleneva väikese mahuga, millest tulenevalt tema

sisend- ja väljundvõimsus ei suuda süsteemi väljaspool koormussõlme K13 olulisel määral mõjutada. Seda kinnitab ka väga vähe märgatav mõju süsteemi kogukoormusele, mis on kujutatud joonisel 3.15. On näha, et sinine tunnusjoon, mis tähistab koormust ilma salvestita süsteemis, kattub umbkaudu oranži tunnusjoonega, mis tähistab süsteemi koormust sõlme nr. 13 ühendatud 6 kWh hoortas-energiasalvestiga



Joonis 3.15. Süsteemi kogukoormuse võrdlus sõlme nr. 13 ühendatud HES' iga ning ilma.

KOKKUVÕTE

Modelleerimisandmeid analüüsid selgus, et antud keskpingsüsteemi kogukoormuse silumisel andis kõige paremaid tulemusi liitiumioonakude kasutamine. Nende suur energiatihedus, kõrge kasutegur ning kiire reageerimisaeg võimaldasid kiiresti katta energiapuudujääki süsteemis ning ülejäägi olukorras energiat salvestada. Minutipõhisel analüüsil selgus, et akupanga enda sisend- ja väljundvõimsused piiravad akupanga võimet minutipõhist koormust siluda ka juhul kui akumahu väärtus seda justkui võimaldaks. Kui ei peaks sisend- ja väljundvõimsustega arvestama, oleks piisanud ka kahest 200 kWh Tesla PowerPack akupangast. Kuna aga nende väljundvõimsus seab piiranguid, oleks minutikoormuse täielikuks silumiseks tarvis läinud kaheksat samasugust 200 kWh akupanka. Tunnipõhine analüüs näitas, et piisava mahutavusega (1000 kWh) akupanga kasutamine aitab väikesed koormuskõikumised täielikult siluda. Tunnikoormuse graafik tervikuna tuleb selliselt tunduvalt laugem, kuid säilitab põhiasas oma kuju. Kui kasutada väiksemat akut (600 kWh), on silumise efekt märgata, kuid on oluliselt väiksem.

Suruõhk-energiasalvesti õigustas ennast eelkõige tunni- ja kuupäevapõhises analüüsis. Selle suur energiatihedus teeb selle sobivaks just suurte koormuskõikumiste silumises. Minutipõhisel vaatlusel oli selle reageerimisaeg suhteliselt pikk ning sisend- ja väljundvõimsus sõltusid suuresti töötsükli hetkest – võimsuse tõus ja langus olid eksponentsiaalsed sõltuvalt ajast, mis oli möödunud töötsükli algusest. Ometigi andis see ka minutipõhiselt mõningase kasuliku tulemuse koormuse silumise osas – kui võimsus jõudis maksimumile lähemale, kadusid edasised tarbimistipud ning koormus muutus ühtlasemaks. Konkreetsete analüüsitud minutiandmete puhul tähendas see seda, et umbes pooltel minutitel tunni jooksul oli koormus umbkaudu ühe suurusega.

Hooratas-energiasalvesteid nende vähese energiatiheduse tõttu kogukoormuse silujatena ei vaadeldud.

Tunnipõhiselt vaadeldud kohaliku koormuse külge ühendatud liitiumioonakude mõju analüüsid selgus, et kolm 100 kWh Tesla PowerPack akupanka on piisavad, et graafikust ära kaotada koormustipud. Konkreetsetes analüüsitud tunniandmetes esinevat suurt langust ööpäeva alguses sellise akupangaga ära kaotada ei õnnestunud. Küll aga sai tarbimisgraafiku „sirgeks“ rohkem kui poole ööpäeva – 13 tunni ulatuses. Pingekõikumine vaadeldava koormuse sõlmes ega ka naabersõlmedes oluliselt ei vähenenud – seda oli mõneti märgata kui vaadelda 0,01 kV täpsusega. Süsteemi kogukoormuse graafikus oli märgata väikest muutust.

Minutipõhiselt sama koormuse külge ühendatud hooratas-energiasalvestit uurides selgus, et see võimaldab päris edukalt minutipõhist koormust ühtlasemaks saada. Kuigi selle sisend- ja väljundvõimsus on üsna suured, seadis selle vähene energiatihedus piirangud, mis ei võimaldanud minutikoormust täiesti ühtlaseks saada. Siiski vähenes kõikumise amplituud mitmekordselt ning seepärast võib seda pidada märkimisväärseks saavutuseks. Selline salvesti ühendatuna kohaliku, radiaalharu asuva koormuse külge elektrisüsteemi terviku talitlust märkimisväärselt ei mõjutanud.

Baasõlme ühendatud salvestid märkimisväärselt mõju aktiiv- ja reaktiivvõimsuskadudele süsteemis ei avaldanud. See tähendab, et vaadeldava ajaperioodi jooksul olid kadude keskmised väärtused umbkaudu samasugused, täpsemalt vaadates umbes paar kV või kvar suuremad. Kohaliku sõlme külge ühendatud akupank suurendas keskmist reaktiivvõimsuse kadu tunnipõhises vaatluses umbes 1/3 ulatuses. Aktiivvõimsuse kadu jäi umbkaudu samaks. Hooratas-energiasalvesti puhul minutipõhises ei olnud säärast erinevust märgata.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Power World, „Demo Software,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.powerworld.com/download-purchase/demo-software>. [Kasutatud: 02.03.2021]
- [2] E. Tiigimägi, Elektrivõrgud, Tallinn: TalTech Kirjastus, 1997.
- [3] Draka, „Paljasjuhtmed ACSR,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://media.drakakeila.ee/2018/04/ACSR_EST.pdf. [Kasutatud: 02.03.2021]
- [4] Draka, „Kaetud õhuliinijuhtmed CCST-W 20 kV,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://media.drakakeila.ee/2018/04/CCST-W-20-kV_Est.pdf. [Kasutatud: 02.03.2021]
- [5] Konkurentsiamet, „Elektrilevi OÜ tüüpkoormusgraafikud 2020,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.konkurentsiamet.ee/sites/default/files/elektrilevi_ou_tuupkoormusgraafikud_2020.pdf. [Kasutatud: 20.03.2021]
- [6] L. L. Grigsby, The Electric Power Engineering Handbook, Alabama: IEEE Press, 1998.
- [7] A. Rosin, S. Link, H. Hõimoja, I. Drovtar, Energiasalvestid ja –salvestustehnoloogiad, Tallinn: TTÜ elektrotehnika instituut, 2015.
- [8] Tesla, „Powerpack,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.tesla.com/powerpack?redirect=no>. [Kasutatud: 25.03.2021]
- [9] Rosseta, „Schwungradenergiespeicher,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.rosseta.de/srsy.htm>. [Kasutatud: 25.03.2021]
- [10] CleanTechnica, „Tesla Megapack, Powerpack & Powerwall Battery Storage Prices per kWh – Exclusive,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://cleantechnica.com/2020/10/05/tesla-megapack-powerpack-powerwall-battery-storage-prices/>. [Kasutatud: 02.05.2021]
- [11] MasterVolt, „Charging batteries,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.mastervolt.com/charging-batteries/?fbclid=IwAR3Yb8bijljZmYn1w9kf3CgNP5YouyFc88CWb7xlyfuUecZdMEM2N4Df2t4>. Kasutatud: [02.05.2021]
- [12] IEEEExplore, „Complexities associated with modeling of residential electricity consumption”, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8659812>. Kasutatud: [02.05.2021]
- [13] MDPI, „Travel Activity Based Stochastic Modelling of Load and Charging State of Electric Vehicles”, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/3/1550>. Kasutatud: [02.05.2021]