



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

SKELGRID ENERGIASALVESTUSE SÜSTEEMI INTEGREERIMINE ALMA-TOMINGASE BÜROOHOONE KLIINIKU UPS-GA

**Integration of SkelGrid Energy Saving System to the
clinics UPS in Alma-Tomingas office building**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Martin Otto Parve

Üliõpilaskood: 185523EAAB

Juhendaja: Paul Taklaja, vanemlektor

Tallinn 2023

(Tiitellehe pöördel)

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.

“SkelGrid integreerimine Alma-Tomingase ärihoonega” 18.05.2023

Autor: Martin Otto Parve

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

“SkelGrid integreerimine Alma-Tomingase ärihoonega” 18.05.2023

Juhendaja: Paul Taklaja

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”20..... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Martin Otto Parve

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose "SkelGrid energiasalvestuse süsteemi integreerimine Alma-Tomingase ärihoone kliiniku UPS-ga",

mille juhendaja on Paul Taklaja.

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.

_____ (kuupäev)

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: Martin Otto Parve

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: skelgrid energiasalvestuse süsteemi integreerimine alma-tomingase ärihoone kliiniku ups-ga

Kuupäev:
18.05.2023

43 lk (*lõputöö lehekülgede arv koos lisadega*)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): vanemlektor Paul Taklaja

Töö konsultant (konsultandid): Tanel Kivipõld, Tanel Sinijärv

Antud lõputöös käsitletakse, kas superkondensaatoritel põhinev energiasalvestuse süsteem on võimeline toetama kliinikut juhul, kui tavatoide kliinikus kaob ning on vaja katkematut toite allikat. Esiolguks käsitletakse superkondensaatorite liigitust, nende eripärasid ning eelistatavamaid variante. Seejärel selgitatakse, milline on Alma-Tomingase ärihoone elektriühenduse skeem kliiniku seisukohalt ning millist rolli mängivad selles tavatoite võrk, garanteeritud toide ning katkematu toite allikas. Järgnevalt tutvustatakse majja planeeritava *Skeleton Technologies* superkondensaatori süsteemi SkelGrid – millest see koosneb, millised on komponendid ning nende parameetrid. Sellele osale seotakse ka uue planeeritava katkematu toite allika ehk UPS valik ning selgitatakse, miks selline uuendus vajalik on. Lõpetusena simuleeritakse SkelGrid toimimist kliiniku katkematu toite allikana ning uuritakse kokkuvõtvalt, kas see on pädev lahendus asendamaks hetkel majja paigaldatud akudega katkematu toite allikat.

Märksõnad: superkondensaatorid, SkelGrid, kliiniku elektriühendus, katkematu toite allikas

ABSTRACT

Author: Martin Otto Parve

Type of the work: Bachelor thesis

Title: integration of skelgrid energy saving system to the clinics ups in alma-tomingas office building

Date: 18.05.2023

43 pages (the number of thesis pages including appendices)

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: senior lecturer Paul Taklaja

Consultant(s): Tanel Kivipõld, Tanel Sinijärv

This thesis deals with whether the energy storage system based on supercapacitors is able to support the clinic in the event that the normal power supply in the clinic disappears and an uninterrupted power source is needed. Initially, the classification of supercapacitors, their special features and the most preferable variants are discussed. It is then explained what the electrical connection scheme of the Alma-Tomingas commercial building is from the clinic's point of view, and what role the regular grid power, guaranteed power supply and uninterruptible power source play in it. Next, the SkelGrid supercapacitor system is introduced that is planned in the house by Skeleton Technologies - what it consists of, what are the components and their parameters. The choice of a new planned uninterruptible power supply, or UPS, and it is explained why such an innovation is necessary. Finally, the operation of SkelGrid as an uninterruptible power source for the clinic is simulated and it is investigated in summary whether it is a competent solution to replace the uninterruptible power source with batteries that are currently installed in the clinic.

Keywords: supercapacitors, SkelGrid, clinics electrical wiring, uninterruptible power source

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	SkelGrid energiasalvestuse süsteemi integreerimine Alma-Tomingase ärihoone kliiniku UPS-ga.
Lõputöö teema inglise keeles:	Integration of SkelGrid energysaving system to the clinics UPS in Alma-Tomingas office building.
Üliõpilane:	Martin Otto Parve
Eriala:	Mehhatroonika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Paul Taklaja, vanemlektor
Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõtte, amet ja kontakt)	kehtivusaja annab juhendaja
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	2022/2023 2022/2023 Sügis
Lõputöö esitamise tähtaeg:	18.05.2023

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Superkondensaatorid ning nende moodulid on energiasalvestuse mõistes päevakajaline teema, sest puhtalt patareide tootmiseks vajaminevate toorainete kogus on hääbumas ning maailm liigub efektiivsemate lahenduste poole. Teema uurib, kuidas keskkonda säästvat lahendust paremini siduda integreeritavasse süsteemi. Uurimistöö tulemus annab ülevaate hoone omanikule, kas ning millisel määral on mõistlik ehitavasse hoonesse SkelGrid süsteem siduda.

2. Töö eesmärk

Uurida, kuidas ning millises mastaabis saab integreerida SkelGrid seadet hoone kliiniku katkematu toite allika seadmega.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Kui kaua suudab SkelGrid tagada Alma-Tomingase majas kliiniku pingestamist?

Milline SkelGrid süsteem on pädevaim energiasalvestus tehnoloogia UPS-le ehk katkematu toite allikale?

Kas SkelGrid superkondensaatorite süsteem on maksumuslikult ning kestuse mõttes tasuvam kui akude baasil lahendus?

4. Lähteandmed

Eesmärkide saavutamiseks kasutatakse Nordecon AS projektipanga dokumentatsiooni Alma-Tomingase maja kohta, interneti materjale ning Skeleton Technologies seadmete andmelehti kui ka inseneridelt saadud infot.

5. Uurimismeetodid

Tulemusteni kavatsen jõuda hoone elektripaigaldise skeemi lahendusega, mis hõlmab SkelGrid süsteemi integreerimist. Selleks tuleb läbi viia hoone elektrisüsteemi vaatlus, analüüsida kirjandust ning modelleerida/projekteerida koondsüsteem.

6. Graafiline osa

Graafilises osas lisatakse Alma-Tomingase majaga seotud elektriskeemid, joonised superkondensaatori mooduli Skelgrid kohta ning tabelid parameetrite kohta. Graafiline osa lisatakse peamiselt töö põhiosasse.

7. Töö struktuur

1. Superkondensaatorid
 - a. Ajalugu
 - b. Liigitus, kasutusala, potentsiaal
2. Alma-Tomingase maja elektriühendus
 - a. Kasutatud seadmed
 - b. Lokaalsed ühendused, kuidas toimib maja ja elektrivõrgu seisukohalt
3. SkelGrid süsteem
 - a. Tutvustus, analüüs
 - b. Mooduli integreerimise põhimõte
4. Alma-Tomingase ja SkelGrid süsteemi ühildamine
 - a. Elektrilise poole eeldused

- b. Graafikud
 - i. Arvutused SkelGrid toimivuse kohta
 - ii. Simulatsioonide analüüs erinevate moodulite korral.
- c. Majaomaniku seisukoht
 - i. Kulude optimeerimise analüüs
 - 1. Millisest hetkest see mõttekas oleks – eluea võrdlused akul ja superkondensaatoril. Millal võiks tasuv olla.

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Töös kasutatakse nii raamatuid kui ka teadusartikleid superkondensaatorite ning päikseparkide kirjelduse, ehituse ning integreerimise kohta. Samuti on plaanis kasutada intervjuu materjali Skeleton Technologies tehnikuga

9. Lõputöö konsultandid

Tanel Sinijärv, Skeleton Technologies insener ning Tanel Kivipõld, Nordecon AS hoonete ehituse eritööde divisjoni juht.

10. Töö etapid ja ajakava

1. Kirjanduse läbitöötamine, lähteandmete kogumine – 31.03.2023
2. Teoreetilise osa kirjutamine ning arvutuste/modelleerimise teostamine – 20.04.2023
3. Uuringu tulemuste kirjeldamine ning kokkuvõtte koostamine – 20.04.2023
4. Töö esimene versioon valmis ning juhendajale läbilugemiseks saatmine – 24.04.2023
5. Paranduste sisseviimine, juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine – 10.05.2023
6. Töö lõplik versioon valmis – 18.05.2023

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	9
Lühendite ja tähiste loetelu	10
SISSEJUHATUS	11
1 Superkondensaatorid	12
1.1 Tutvustus	12
1.2 Ehituslikud eripärad	13
1.2.1 Kaksikiht superkondensaatorid	14
1.2.2 Pseudokondensaator	15
1.2.3 Skeletoni superkondensaator	16
2 Alma-Tomingase maja elektriühendus	18
2.1 Maja üldine ühendus	18
2.1.1 Tavatoite liin alajaamast	18
2.1.2 Generaatori toiteliin	19
2.1.3 Katkematu toite allika toiteliin	19
2.1.4 RLA ümberlülitussüsteem	20
2.1.5 Pinge tolerants	22
3 SkelGrid ja selle komponentide kirjeldus	23
4 SkelGrid integreerimine Alma-Tomingase büroohoonesse	27
4.1 Schneider Galaxy VS UPS seadme parameetrid	27
4.2 SkelGrid parameetrite teoreetilised arvutused	29
4.2.1 Arvutused SkelMod 102V 88F moodulitega	29
4.2.2 Arvutused SkelMod 162V 92F moodulitega	31
4.3 Simulatsiooni keskkonna LTSpice analüüs	33
4.3.1 Simulatsioon SkelMod 102V 88F moodulitega 6s8p konfiguratsiooni korral	34
4.3.2 Simulatsioon SkelMod 162V 92F moodulitega 4s6p konfiguratsiooni korral	37
4.4 Süsteemi tasuvus	39
KOKKUVÕTE	41
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	42

EESSÕNA

Lõputöö on koostatud õppejõu Paul Taklaja õpetussõnade inspiratsioonil, kui ta soovitas teha uurimistöö, mis seondub minu karjääriga ehitusel elektritööde juhtimise vallas. Elektritööde objektiinsenerina puutun igapäevaselt kokku hoonestuse elektrisüsteemidega ning seetõttu nii ka otsustasin teha töö hoonestuse kohta.

Väga palju on mind hilistel õhtutundidel aidanud minu otsene ülemus Tanel Kivipõld, kes jagas elektrivaldkonnaga seonduvaid teadmisi ning andis üldist mõtteainet, kuidas ning mis suunas tööga edasi liikuda. Lõputöö andmed koguti nii abistajatelt kui ka internetist.

Suurima tänu uurimistöö valmimisel võlgnen Skeleton Technologies elektrivaldkonna spetsialistile Tanel Sinijärvele, kes oskas mind arvutuste, skeemide, simulatsiooni, andmete ning töö üldise ülesehitusega äärmiselt palju aidata. Väga professionaalne lähenemine ning äärmiselt edukas koostöö oli Tanelitega. Suurimad tänud veelkord.

Kui telefoni laadisin ja lõputööd kirjutasin,
ei osanud arvata, et süttivad ained mind mõjutasid
Akud on ohtlikud ja pigem valin SkelGridi,
sest superkondensaatorid meid tulevikku viivadki
Ei sobi üks moodul, võib olla siis teine,
päeva lõpuks valid ise, mis on sinu jaoks parim – see on reegel.
Ära muretse, kõik on läbi arvutatud,
tasub sul vaid teha otsus, mis on kaalutud.

Lühendite ja tähiste loetelu

EDLC – Electric Double-Layer Capacitor – kakskiht kondensaator

Redoks - Oksüdatsiooni-redutseerimise reaktsioon

KTA – Uninterruptible power source – katkematu toite allikas

OPJK1 – operatsioonisaal 1 jaotuskilp

OPJK2 – operatsioonisaal 2 jaotuskilp

OPJK3 – operatsioonisaal 3 jaotuskilp

RLA – Reservülitusahel

KLPK – Kliiniku peajaotuskilp

GTPJK – Garanteeritud toite peajaotuskilp

IT – Insulated Terra – isoleeritud ühendus maaga

STS – Static transfer switch – staatiline ümberlüüti

BoL – Beginning of Life – eluea algus

EoL – End of Life – eluea lõpp

SISSEJUHATUS

Superkondensaatorid ning nende moodulid on olnud energiasalvestuse mõistes päevakajaline teema juba mitmeid aastaid, sest patareide tootmiseks vajaminevate toorainete kogus on hääbumas ning akudes kasutatavad materjalid ei ole keskkonnasõbralikud. Seega liigub maailm alternatiivsete ja efektiivsemate lahenduste poole. Superkondensaatoritel on erinevaid väljundeid ning siin töös käsitletakse, milline peaks olema Skeleton Technologies poolt loodud superkondensaatorite energiasalvestuse panga lahendus, et asendada katkematu toite allika (edaspidi KTA) energiasalvestina kasutatavaid akusid.

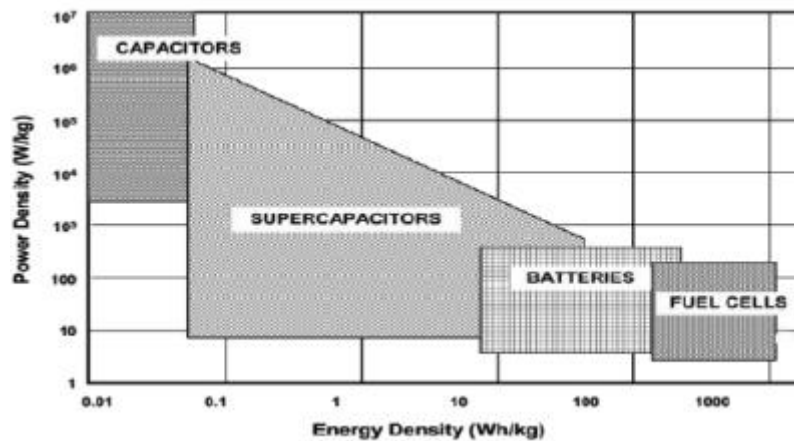
Täpsemini käsitletakse siin töös Alma-Tomingase ärihoone kliiniku näitel superkondensaatoritega energiasalvesti lahendust, sest kliiniku seadmed vajavad väga stabiilset, kiiresti reageerivat katkematu toite allika süsteemi toidet. Tahtsin seda teemat uurida, sest vastutatsin Alma-Tomingase ärihoone elektritööde teostamise eest ning Skeleton Technologies korruseid ehitades tulin mõttele siduda superkondensaatorid ning ehitatava ärimaja kliiniku energiasalvestuse süsteemi.

Antud töö lõpus tuuakse välja kliinikusse planeeritava SkelGrid lahenduse maksumus ning analüüsitakse, kas selline lahendus on üldiselt tasuv ning hea investering.

1 Superkondensaatorid

1.1 Tutvustus

Tööstuslikes lahendustes on suur roll superkondensaatoritel, mis suudavad suures mahus energiat salvestada või seda edasi kanda [1]. Energiasalvestuse lahenduste valimisel vaadatakse nende energiatihedust, võimsust, vastupidavust, töökindlust ning ohutust [2]. Kuigi liitium-ioon aku on senini olnud kasutatavaim tehnoloogia tänu selle kõrgele energiatihedusele ning suhteliselt pikale elueale [2], siis nendes kasutatavad kergesti süttivad orgaanilised ained seavad küsimärgi alla liitium-ioon akude keskkonnasõbralikkuse ning turvalisuse [3]. Alternatiivina uuritakse jätkuvalt superkondensaatoreid, nende ehituslikku disaini täiendatakse pidevalt, et tuua turule suurema energiamahutavusega ja keskkonda veelgi säästvamad ning efektiivsemad lahendused [2].



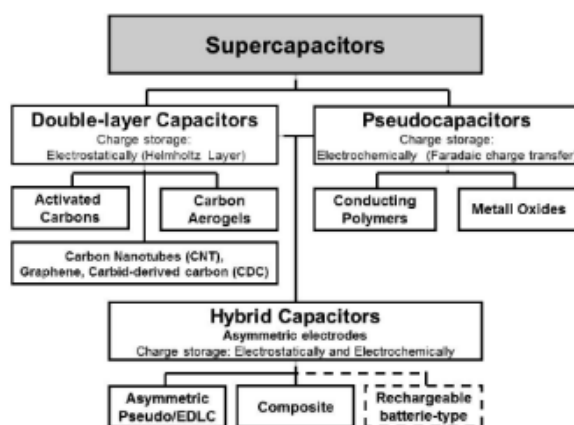
Joonis 1.1. Energiasalvestustehnoloogiate taksonoomia vastavalt energia- ning võimsustihedusele [4].

Üldised erinevused akude ning superkondensaatorite vahel on see, et akus kasutavad keemilisi reaktsioone energia salvestamiseks, superkondensaatorites aga salvestatakse energia elektriväljas ja/või elektrokeemiliselt [3]. Superkondensaatorite eelisteks on, et nendes toimub energia salvestamine kiiremini, neil on kõrge võimsustihedus (suudavad väga kõrget voolu tagada lühikese aja jooksul), töösükli arv on ligi 1 miljon, on madala sisetakistusega, kergema kaaluga ning ei koosne toksilistest keemilistest ainetest [3]. EESS (*Electrical Equipment Safety Scheme*) andmetel leitakse akudele siiski palju kasutust superkondensaatorite kõrval – akusid kasutatakse argielulistes kohtades, kus on tähtis odavam hind, kestvus ning suur energiatihedus, kuid

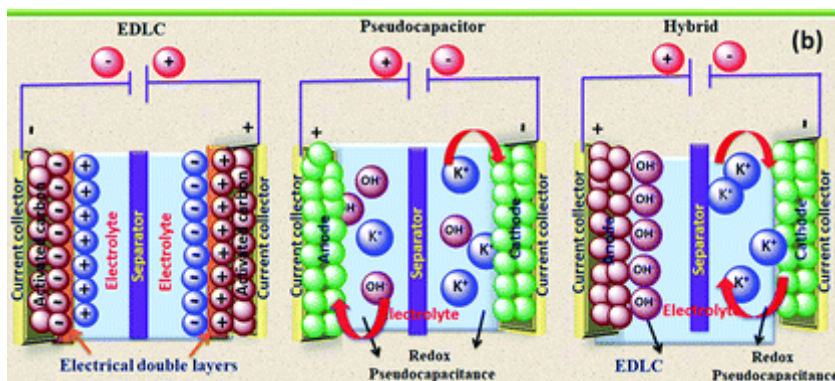
superkondensaatoreid kasutatakse peamiselt seadmetes, mis nõuavad suurt laadimis-tühjakslaadimise tsüklite arvu, suurt energiatihedust ja võimsust [3].

1.2 Ehituslikud eripärad

Superkondensaatorid on kontseptsiooni mõttes kombinatsioon akude ning tavapäraste kondensaatorite omadustest [4]. EDLC (eng. Electric double layer capacitor, edaspidi kakskiht kondensaator) ning pseudokondensaator on kaks põhilist superkondensaatorite tüüpi, mis jagunevad omakorda ehituslike omaduste järgi [5].

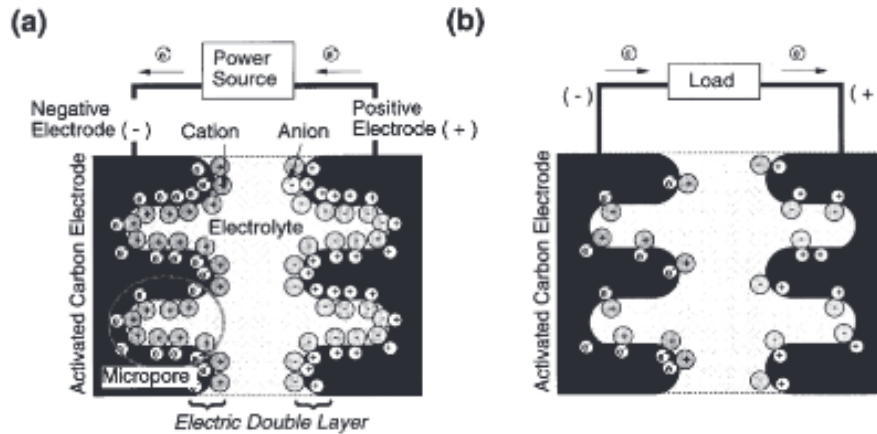


Joonis 1.2. Superkondensaatorite taksonoomia [4].



Joonis 1.3. Siseehituse järgi liigitatud superkondensaatorid [6].

Teadupärast on kondensaator jõuelektronika seade, mis koosneb kahest klemmist, millede vahel on dielektrik, näiteks mingi plastik või lihtsalt õhk [4]. Superkondensaatorites ehitus on üldiselt samasugune, erinevus on kasutatavates komponentides [4]. Nendes on samuti kaks süsiniku baasil poorset elektroodi, seejärel elektrit juhtiv elektrolüüt, mille keskel on omakorda poorne membraan, mis tagab ionide vahetuse kahe elektroodi vahel [1].



Joonis 1.4. Skeem kirjeldamaks kakskiht (EDLC) kondensaatori (a) laadimistsükli ning (b) tühjakslaadimis tsükli [6].

1.2.1 Kakskiht superkondensaatorid

Kakskiht superkondensaatoris, tänapäeval kõige kasutatavamas superkondensaatoris, toimub energiasalvestus elektrostaatilise jõu abil ning pinge all olevad elektrodid tõmbavad elektrolüüdi sees olevaid laenguid enda pinnale [7]. See tähendab, et elektrod, mis on miinus laenguga, tõmbab enda suunas pluss laenguid ning vastupidi, ja tänu sellele tekib elektrodide elektrolüüdi poolsele küljele täpselt ühe iooni paksune kiht, millest tulenevalt on ka nimi *electric double layer capacitor* ehk kakskiht kondensaator [7]. Senini kõige uuritavama superkondensaatori kakskiht tehnoloogia korral eelistatakse elektroodi materjaliks väga suure pindalaga süsiniku allotroope (grafiit, süsi, teemant), sest need on väga head elektrijuhid [6]. Võimalikult kõrge energia ning võimsuse tiheduse, keskkonnasõbralikkuse ning pika eluea saavutamiseks on oluline valida superkondensaatorisse parim elektrolüüt, mille määravad parameetrid on peamiselt iooni võimekus läbida elektrolüüti, termiline vastupidavus, elektrokeemiline vastupidavus ning elektrijuhtivus [6]. Kuigi kakskiht kondensaatoreid kasutatakse hübriid-elektriautodes energiasalvestitena tänu nende kõrgele võimsusele (patareidel on energiatihedus palju parem) ehk kiirele täis- ning tühjakslaadimise tsüklile, jäävad kondensaatorid siiski alla akude suuremale energiatihedusele, mistõttu arendati välja muud alternatiivid [7].

Energiatihedust kahekihilistes superkondensaatorites saab arvutada valemiga:

$$E = \frac{CV^2}{2} \quad (1.1)$$

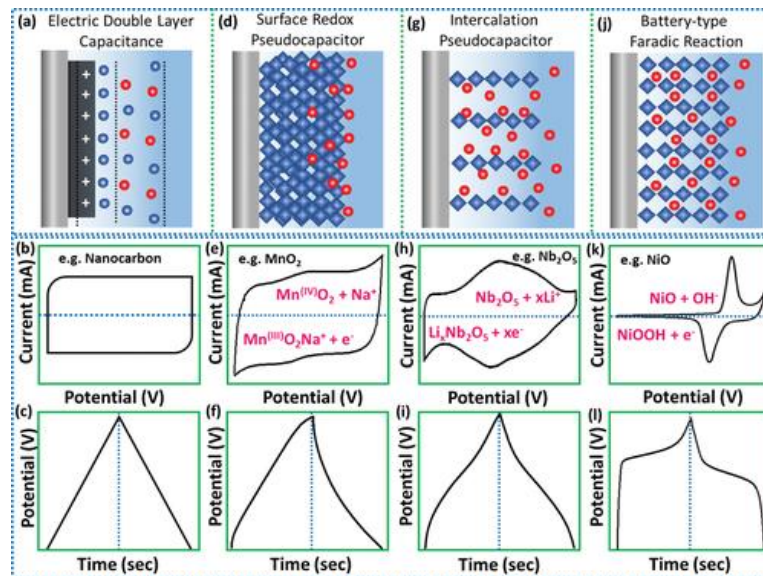
, kus E on kondensaatoris salvestatud elektrienergia hulk (J), C on mahtuvus (F) ning V on kondensaatorile suunatud pinge [7].

Kakskiht kondensaatoritel on palju madalam energiatihedus kui akudel (paar Wh kg⁻¹) [6], seega tuleb uurida superkondensaatorite elektrootide pindala, pinna energiatihedust, elektri juhtivust, elektrootide materjalide ja dielektriku materjali kohta, et nende jõudlust ning töövõimekust märkimisväärselt tõsta [7].

1.2.2 Pseudokondensaator

Pseudokondensaatorites toimub energia salvestamine oksüdatsiooni-redutseerimise (edaspidi redoks) elektrokeemilise reaktsiooni alusel, kus süsiniku baasil elektrootid tõmbab enda pinnale ioone Faraday elektrolüüsi teel [6]. Pseudokondensaatorid ei salvesta energiat ainult kakskiht tehnoloogial, kus tekitatakse elektrooti pinnale iooni kiht, vaid ka pinna Faraday meetodil. Pinna redoksi jaoks kasutatavad materjalid on väga sarnased kakskiht superkondensaatorites kasutatavatele süsiniku baasil elektrootidele [6]. Aastal 1971 uurisid Trasatti ning Buzzanca esmaselt RuO₂ metallioksiidide kasutamist superkondensaatorites, mille käigus avastati, et just see oksiid on väga heade väliskihi valentsi parameetritega, et tagada kiire prootonite ning elektronide juhtivus [5]. Just sellepärast on kakskiht kondensaatorid paremad pseudokondensaatoritest, sest edasi uuritud metallioksiid nagu MnO₂ tagab suurema energiatiheduse ning äärmiselt kiire laadimis-tühjaks laadimis protsessi, kuid siiski ei kasutata pseudokondensaatoreid nii laialdaselt, kuna nende eluiga jääb märkimisväärselt alla kakskiht kondensaatoritele [5].

Elektrolüütilised kondensaatorid on suurema mahutavusega, sest elektrolüüdi kasutamine dielektriku asemel tõstab vabade elektronide hulka kondensaatoris, seetõttu toimub elektrolüüdi materjalide arendamine suunas, kus see on suurema läbilaskvusega ja tõstab veelgi enam kondensaatori energiatihedust [8]. Tänapäevaks pole leitud perfektsete parameetritega elektrolüüti, mis tagaks kõrge efektiivsuse ning samas ka turvalisuse. Kõrged juhtivuse ning mahutavuse näitajad on vee baasil elektrolüüdil, kuid samas on sellel madal energiatihedus [8].

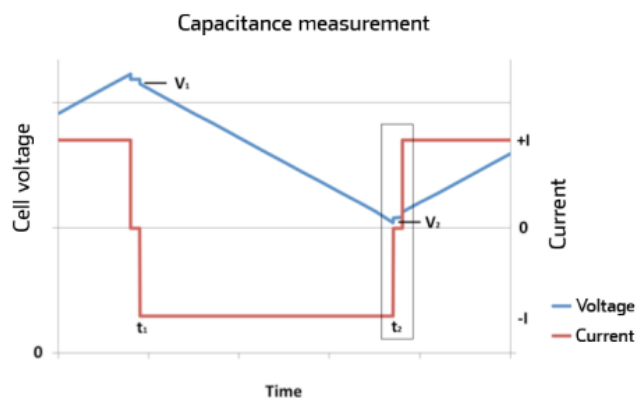


Joonis 1.5. Energiasalvestuse meetodid erinevates superkondensaatorites [9].

Pinge ning voolu telgedega joonised (vt Joonis 1.5 rida b-k) näitavad redoks reaktsiooni molekulaarset protsessi ehk ionide liikumise ning sellega kaasnevate keemiliste reaktsioonide toimumist [9]. See näitab, kuidas muutub vool, kui süsteemi rakendatakse pinge [9]. Potentsiaali ning aja telgedega joonistel (vt Joonis 1.5, rida c-l) on näha, kuidas süsteemi rakendati konstantse väärtusega vool ning kuidas energia hulk superkondensaatoris ajaga muutub [5]. Nagu on näha joonisel (vt joonis 1.5, veerg a-c), siis kakskiht kondensaatorite graafikud on väga sarnased pinna redoks reaktsiooniga pseudokondensaatorite graafikutega (vt joonis 1.5 veerg d-f) [9]. Erinevus kakskiht kondensaatorite ning pseudokondensaatori graafikutel tulenebki sellest, millist elektrolüüti ning elektroodi materjali on kasutatud [5].

1.2.3 Skeletoni superkondensaator

Skeletoni väljatöötatud superkondensaatorid on loodud kakskiht tehnoloogial [10]. SkelCap ultrakondensaatori/superkondensaatori elektrolüüdis on toote andmelehe järgi kasutatud atsetonitriili lahustit [10], mis tõstab märgatavalt elektrijuhtivust, töötemperatuuri vahemikku [11] ning suurendab laengu- ehk energiatihedust [12]. Skeletoni *SkelCap* ultrakondensaator on maailmas senini kõige efektiivseim tänu sellele, et elektroodis kasutatakse aktiveeritud süsiniku allotroopi "must süsinik" [10], mis on katseandmete järgi senini parima energiatiheduse tulemusi andnud [13].



Joonis 1.6. Täis- ja tühjakslaadimise tsükkel [14].

Uurimistöös uuritakse, kuidas Skeletoni moodul SkelGrid toimib Alma-Tomingase maja kliiniku KTA süsteemi energiasalvestina. KTA süsteemi ning SkelGrid mooduli integreerimist uuritakse LTSpice simulatsioonikeskkonnas, lisatakse SkelGridiga ühilduva KTA süsteemi parameetrid ning arvutatakse SkelGrid moodulite toimivuste erinevusi.

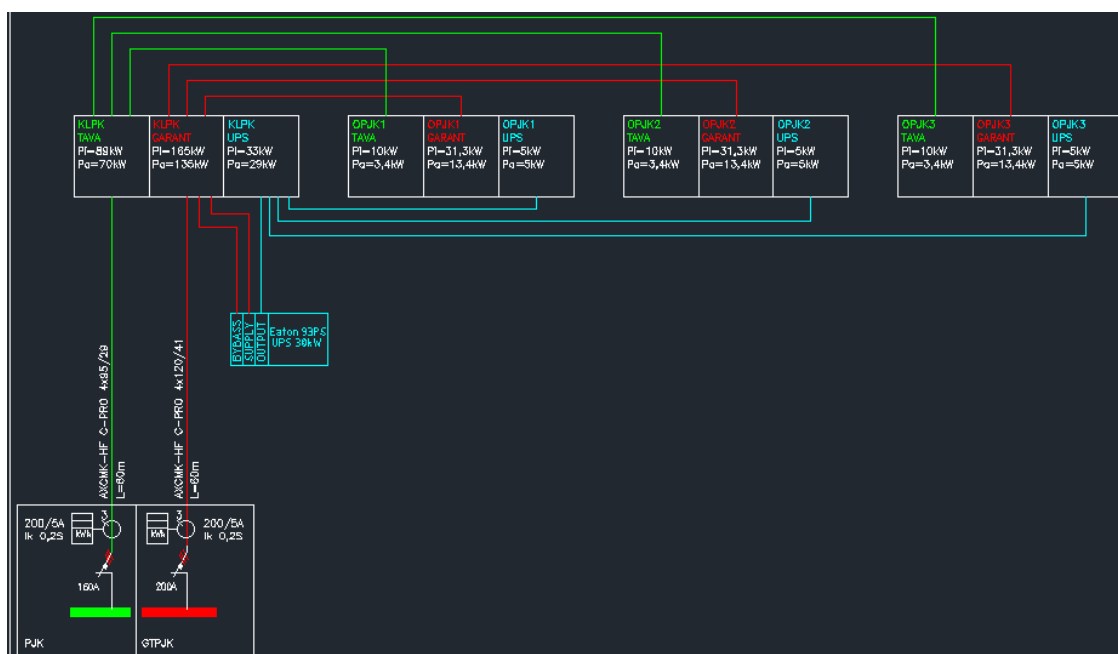
2 Alma-Tomingase maja elektriühendus

Antud peatükis kirjeldatakse Alma-Tomingase ärihoone elektriühendust, selle põhimõtet ning toimivust. Peatüki põhirõhk on kliiniku seadmete ning põhimõtteskeemi kirjeldus, mis annab aluse SkelGrid süsteemi integreerimisele. SkelGrid süsteemi integreerimise eesmärk on näha, kuidas asendada hetkel majja paigaldatud akude asemel Skeletoni superkondensaatori energiasalvestuspangaga koos KTA seadmega. SkelGrid peab tagama majas toite kadumisel hea energia- ja kõrge võimsustihedusega ning stabiilse pinge kliiniku operatsioonisaalide ning ärkamistoa süsteemidele.

2.1 Maja üldine ühendus

2.1.1 Tavatoite liin alajaamast

Maja saab toite alajaama 0,4kV jaotlast, kus kaablid ühendatakse peajaotuskilpi (edaspidi PJK) sektsioonidesse PJK S1 ja PJK S2. PJK-s on võrguanalüsaatorid ning MBUS kahesuunalised arvestid, mis mõõdavad maja energia tarbimist. Maja toiteliinid jagunevad kaheks selle pärast, et majas on kaks kilbišahti ehk maja on pooleks jaotatud kahe toiteliini vahel. S1 ning S2 liinid toidavad lisaks lattiliinidele veel erinevaid süsteeme, kuid antud uurimistöös keskendutakse S1 liinile, sest sellelt tuleb tavatoide kilbile kliiniku peakilpi (edaspidi KLPK). Kliinikusse mineva liini S1 nimivool on 200A ning nimipinge on 400V.



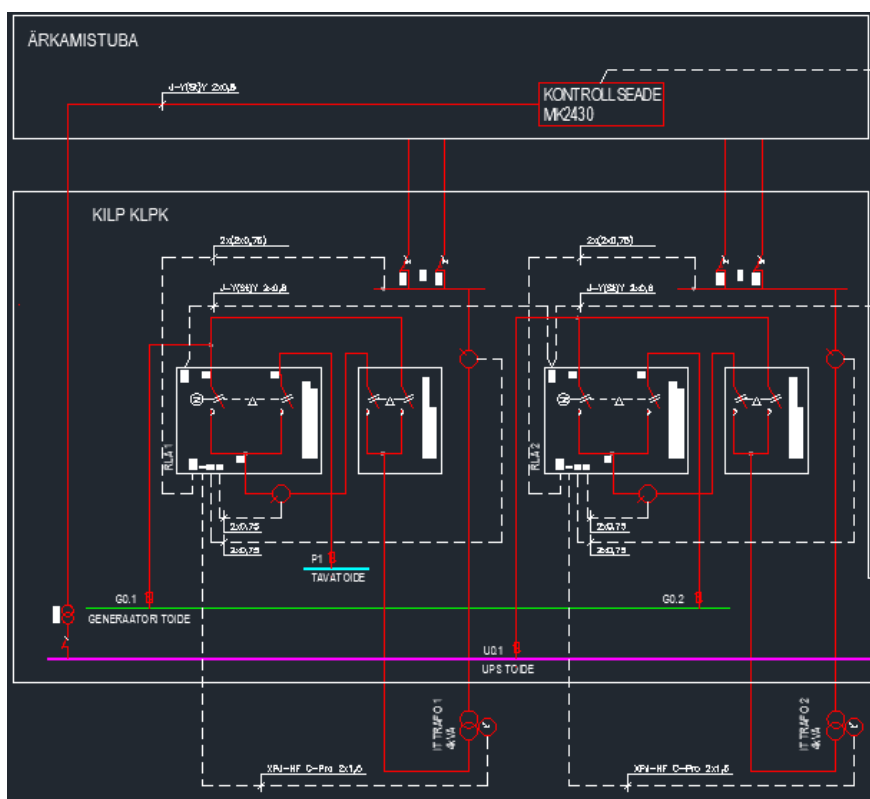
Joonis 2.1. PJK S1 toiteliini jaotumine kliiniku kilpi KLPK [15].

Alaldi laeb tavavõrgu toitega KTA seadmele integreeritud SkelGrid superkondensaatorite panka.

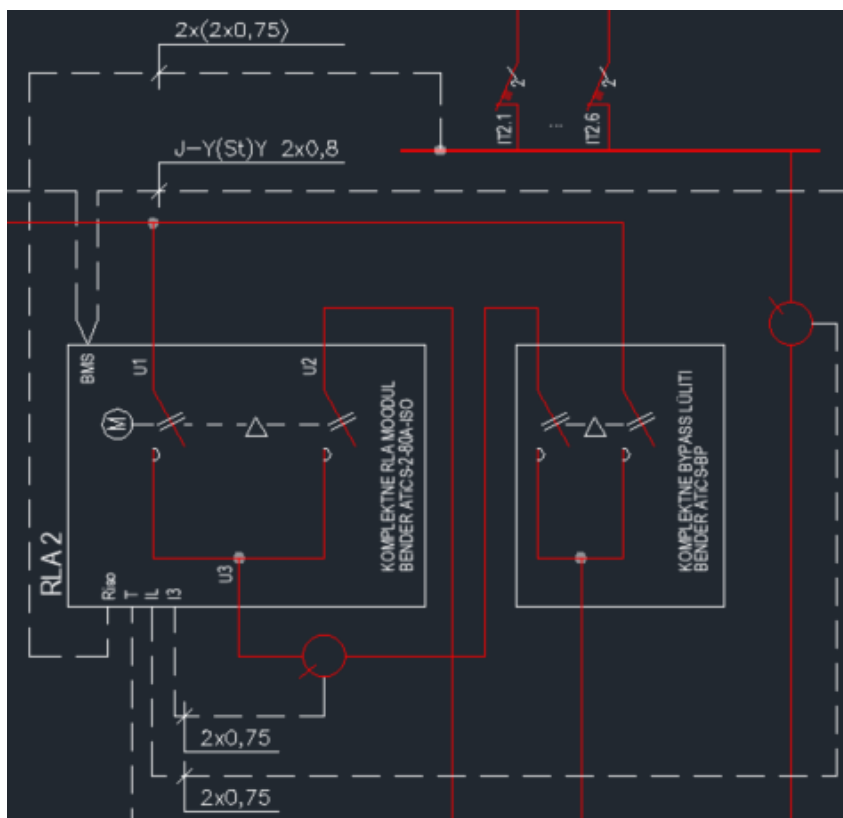
Jooniselt 2.1 tuleneb ka kliiniku kogu tarbimine, mille saab kokku arvutada sinise joonega tähistatud kastidest. Operatsioonisaalide 1, 2 ning 3 jaotuskilpide (edaspidi OPJK1, OPJK2 ning OPJK3) ning KLPK sinistes kastides P_i tähistus näitab paigaldatud võimsust, mis on 48kW. Sinna juurde on arvestatud ka kaod, selle pärast on kliinikusse ka paigaldatud 60kW KTA seade. See kliiniku tarbimine on aluseks KTA seadme valikul ning SkelGrid superkondensaatori panga kavandamisel.

2.1.4 RLA ümberlülitussüsteem

Tavapäraselt generaatori lisamisel hoonestusse seadistatakse ka RLA ümberlülitussüsteem, mis automaatika sisenditega annab signaali kontaktoritele, et tõsta toiteliinid kindlatel juhtudel ümber. Alma-Tomingase hoones on tavatoide alajaamast ning see jaguneb kaheks sektsiooniks PJK S2 ning PJK S1, viimane varustab kliinikut. Kui tekib olukord, kus S1 liin ei taga toidet, siis automaatika annab käsu generaatorile käivituda ning senikauaks peab KTA konkreetsetele seadmetele toite tagama.



Joonis 2.2. Toiteliinide ning allikate jaotumise skeem kliinikus [15].



Joonis 2.3. Bender seadme RLA süsteem [15].

Joonisel 2.3 on näidatud kliiniku toiteliinide lülitussüsteemi konkreetselt ühe ruumi näitel, milleks on ärkamistuba. Sellele lisaks on vaadeldavad kohad Operatsioonisaal 1, Operatsioonisaal 2 ning Operatsioonisaal 3. Joonis 2.3 on kirjeldamaks põhimõtteskeemi, mis on sarnane eelnevalt nimetatud operatsioonisaalides. Erinevus tuleb selles, millisest IT trafost (eng *Insulated Terra*, isoleeritud ühendus maaga, edaspidi IT) toide läbi läheb. IT trafo süsteem tagab elektrivõrgust toite nii, et ükski juht pole ühendatud maaga. Seda süsteemi kasutataksegi peamiselt haiglates, kus ühe tööjuhi isolatsiooni rike ei tohi kaasa tuua kogu toitesüsteemi väljalülitamist ehk teisisõnu tagab katkestusteta toitepinge meditsiiniseadmetele.

Kliinikus kasutatakse Bender ATICS-2-80A-ISO RLA süsteemi, mis on mõeldud automaakseks toiteliinide ümbertõstmiseks maandamata toiteseadmetele [16]. Lisaks on KLPK kilbis olemas ka manuaalne ümberlülit [17], mis toimib samamoodi toiteliinide ümbertõstmisena. Bender seade rakendub automaatselt 50 millisekundiga pinge tolerantsist väljumisel, tavatoite liini täielikul kadumisel, kui generaator on valmis KTA tööd üle võtma või kui võrgu toitepinge on majas tagasi [19], [20].

2.1.5 Pinge tolerants

RLA ümberlülitussüsteemi alapeatükis seletati, kuidas toiteliinid tõstetakse ümber, kui tavatoite võrgupinge kaob täielikult süsteemist, kuid on ka erijuht. Kui PJK-st peab KLPK kilpi jõudma nimipinge 400V ning arvesti mõõdab $\pm 10\%$ kõrvalekallet toitepingest (ehk tolerants on 10%), siis RLA automaatika rakendub [17], [20]. Automaatika signaal suunab käsu generaatorile käivitumiseks ning KTA süsteemile käsu tagada toitepinge vajalikele kliiniku seadmete niikauaks, kuniks generaator on 100% töövalmis KTA-d üle võtma. Tolerantsi mõte on see, et igasugune ülepinge või madal pinge rikub seadmeid, kuna need ei saa talitlemiseks tarvilikku pinget. Lisaks loeb KLPK kilbi garanteeritud toite sektsioon generaatori poolt tulevat pinget pingekontrollireleega, tuvastamaks toite vastavust seadmete tehnilistele nõuetele, et need saaksid ettenähtult talitleda. Kliinikus mõõdab lisaks veel Bender RLA seade kliinikusse tuleva toitepinge väärtust.

3 SkelGrid ja selle komponentide kirjeldus

Selles peatükis käsitletakse SkelGrid seadme tööparameetreid ning talitlemist. Samuti tuuakse välja, millised peaksud olema rakendatava süsteemi eeldused mainitud parameetritele, et SkelGrid seadet ning superkondensaatoreid saaks kasutada KTA seadme energiasalvestina. Tuuakse välja kahe mooduli parameetrid, mida SkelGridis kasutatakse. Olulised parameetrid ultrakondensaatoreite integreerimisel on: süsteemi (UPS) tööpinge vahemik ja amplituud ning keskmine võimsus või vool, voolutarbe kasutusaeg, kondensaatori töökeskkonna temperatuur ning energiasalvestuspanga eluiga [21].

Uurimistöös käsitletakse kahte võimalikku moodulit, mida SkelGrid seadmesse integreerida: SkelMod 102V 88F moodul, mis koosneb SkelCap sarja SCA3200 kondensaatoreitest ning SkelMod 162V 92F moodul, mis koosneb SCX5000 kondensaatoreitest, millede parameetrid on toodud järgnevates tabelites:

Tabel 3.1. SkelMod 102V 88F põhiliste parameetrite tabel [22].

Parameeter	Väärtus	Ühik
$U_{skelmod_nimi}$	102	V
$U_{skelmod_amplituud}$	108	V
$C_{skelmod}$	88	F
$R_{skelmod_sisetakistus}$	7,6	m Ω
I_{nimi}	250	A
Energiatihedus	4,3	Wh/kg
Võimsustihedus	14,2	kW/kg
Töökeskkonna temperatuur min	-20	°C
Töökeskkonna temperatuur max	60	°C
Kondensaatoreite hulk	36	tk

Tabel 3.2. SkelCap SCA 3200 põhiliste parameetrite tabel [21].

Parameeter	Väärtus	Ühik
V_r (kondensaatori pinge)	2,85	V
V_s (liigpinge piir)	3	V
Mahtuvus	3200	F
Energiatihedus	9,3	Wh/L
Võimsustihedus	29	kW/L
Sisetakistus	0,16	m Ω
Töökeskkonna temperatuur min	-40	°C
Töökeskkonna temperatuur max	65	°C
Eluiga tsüklites	1000000	tsüklit
Eluiga tühjaks laetuna	10	aastat

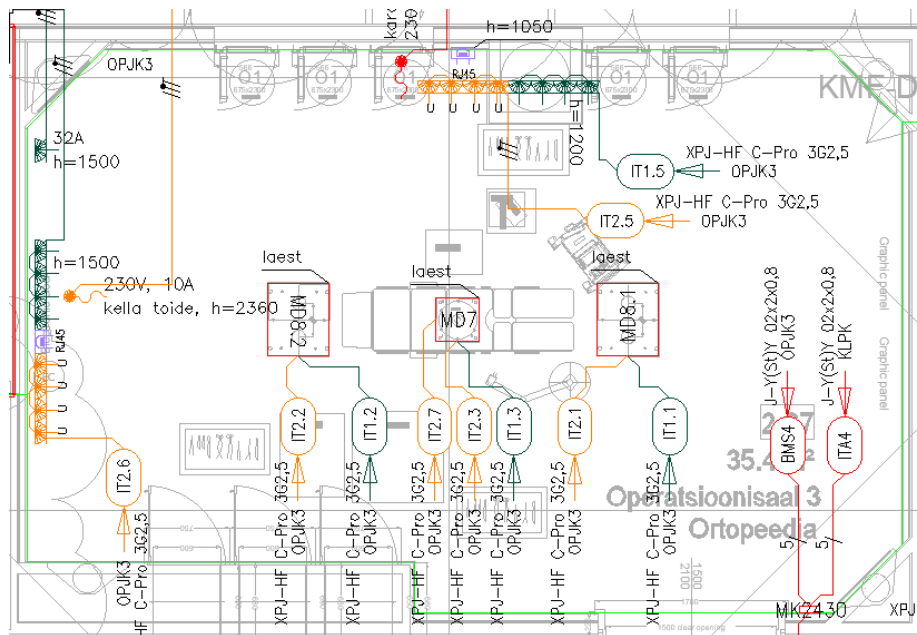
Tabel 3.3. SkelMod 162V 92F põhiliste parameetrite tabel [23].

Parameeter	Väärtus	Ühik
$U_{skelmod_nimi}$	162	V
$C_{skelmod}$	92	F
$R_{skelmod_sisetakistus}$	12,2	m Ω
Salvestatava energia hulk	335,3	Wh
Võimsus	538	kW
Töökeskkonna temperatuur min	-40	°C
Töökeskkonna temperatuur max	65	°C
Kondensaatorite hulk	54	tk

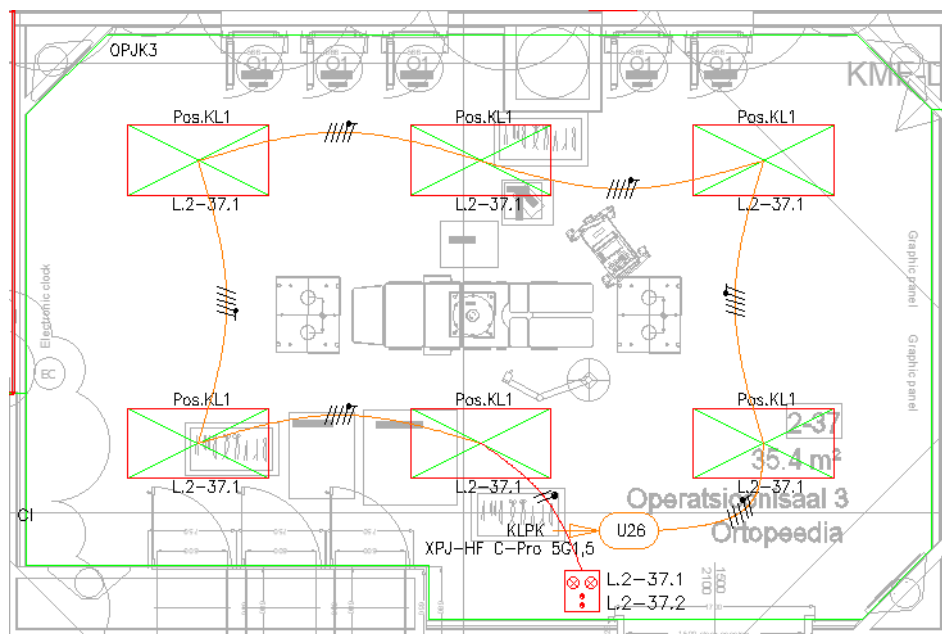
Tabel 3.4. SkelCap SCX5000 põhiliste parameetrite tabel [21].

Parameeter	Väärtus	Ühik
V_r (kondensaatori pinge)	3	V
Mahtuvus	5000	F
Energiatihedus	16	Wh/L
Võimsustihedus	28,9	kW/L
Sisetakistus	0,2	m Ω
Töökeskkonna temperatuur min	-40	°C
Töökeskkonna temperatuur max	65	°C
Eluiga tsüklites	1000000	tsüklit
Eluiga tühjaks laetuna	10	aastat

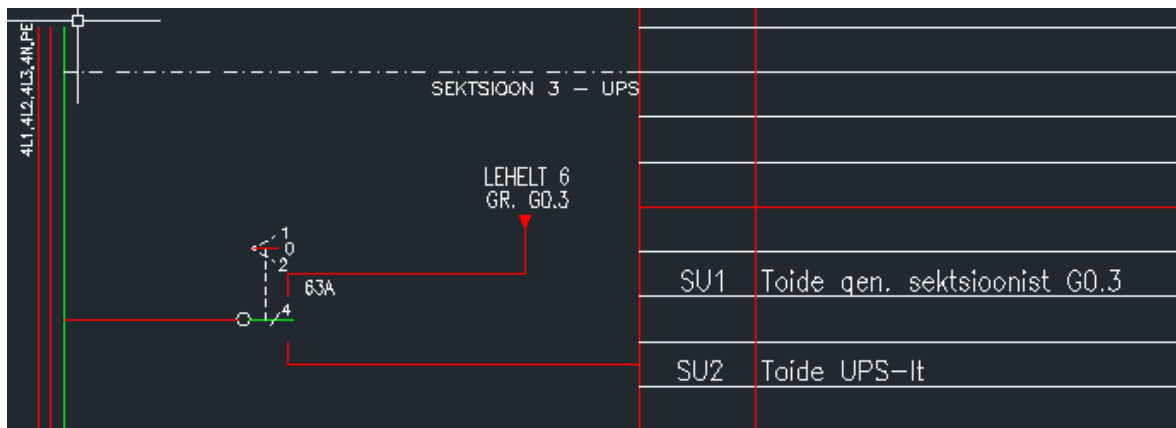
Lisaks on SkeiMod moodulis temperatuuriandurid, pingekontrollireleed ning andmeside vahetus toimub lahendusena, kus mikrokontrollerid superkondensaatorite moodulites saavad omavahel suhelda ilma pea arvutita RS232 protokolliga.



Joonis 3.1. Operatsioonisaal 3 jõupaigaldiste elektriskeem [15].



Joonis 3.2. Operatsioonisaal 3 valgustite elektriskeem [15].



Joonis 3.3. KLPK kilbi toite jaotumine KTA sektsioonist [15].

SkelGrid on ühendatud RLA süsteemiga, mis tõstab võrgupinge, garanteeritud toite või KTA toite liine ümber vastavalt olukorrale. Joonisel 3.3. on näidatud elektriskeemil, kuidas KTA ning garanteeritud toite vahel on kontaktor, mis generaatori täisvõimekuse tagamise korral lülitub garanteeritud toite peale. Generaator ning KTA toidavad operatsioonisaalides nii kriitilise tähtsusega valgusteid, turvalgusteid, seadmeid kui ka pistikupesasid. Grupid tähtsusega IT läbivad IT trafosid, mis tagavad maandamata toite ettenähtud meditsiiniseadmetele ning pistikupesadele, millesse on ühendatud kriitilised seadmed. Need IT trafo toited tulevad kilpidest tähtsusega OPJK. Seadmed ning valgustid, mis ei vaja maandamata toidet, on tähtsusega Ux.x.

4 SkelGrid integreerimine Alma-Tomingase büroohoonesse

Siin peatükis analüüsitakse simulatsioonikeskkonnas LTSpice, kuidas muutuvad 60kVA tarbijaga superkondensaatori parameetrid, tehakse arvutused vastupidavuse ning kestuse osas, tuuakse välja maksumused.

4.1 Schneider Galaxy VS UPS seadme parameetrid

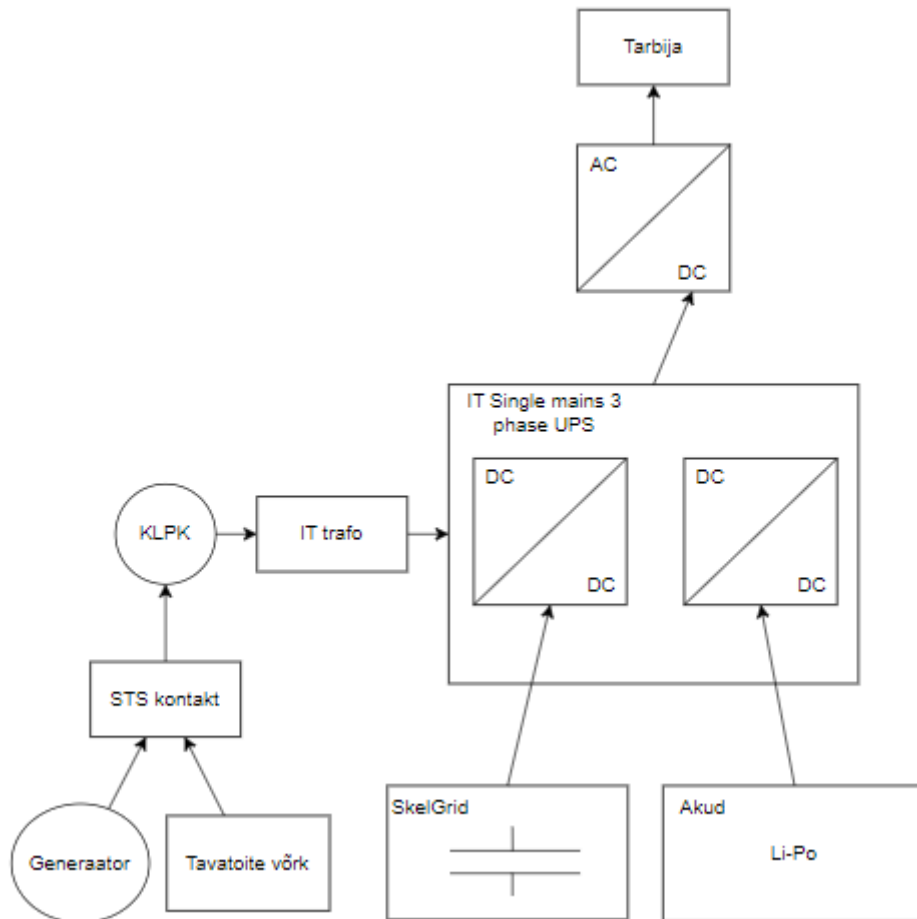
1. Kuna hetkel majas olev KTA ei suuda vastu võtta superkondensaatori paketti kui energiasalvestit, siis leiti uurimistöö jaoks sobilik asendus, milleks on Schneider Galaxy VS 480V 5/8 External Battery. Valiti just 480V KTA seade, sest mida kõrgem on KTA seadme nimipinge, seda paremini on vastavuses superkondensaatorite tööpinge vahemik on ning KTA seadme kriteerium energiasalvesti tööpinge vahemiku osas.

Tabel 4.1. Schneider Galaxy VS parameetrid [24].

Parameeter	Väärtus	Ühik
U_{nimi}	480	V
P_{KTA_nimi}	60	kW
U_{bypass_max}	528	V
U_{bypass_min}	432	V
I_{KTA_nimi}	74	A
$I_{bypassmax}$	91	A
$F_{in\ max}$	70	Hz
$F_{in\ min}$	40	Hz
$U_{in\ min}$	408	V
$U_{in\ max}$	552	V
P_{out}	60	kW
Töökeskkonna temperatuur min	0	°C
Töökeskkonna temperatuur max	40	°C
$U_{battery\ min}$	384	V
$U_{battery\ max}$	576	V

SkelMod mooduli valimisel on üks tähtsaim parameeter KTA tööpinge vahemik, milleks on KTA andmelehe järgi energiasalvesti pingevahemik 384V kuni 576V. Teine oluline parameeter on voolutarbe kasutusaeg. See arv saadakse generaatori andmelehe järgi,

milleks on umbes 3 minutit, kuniks generaator on 100% valmis KTA-d üle võtma ning pingestama kliiniku seadmeid. Schneider Galaxy VS KTA seade valiti lõputöösse sama nimipinge järgi, mis on hetkel Alma-Tomingase maja kliinikusse paigaldatud KTA seadmel.



Joonis 4.1. KTA ning SkelGrid põhimõtteskeem.

Joonisel (vt Joonis 4.1) kujutatud staatiline ümberlüüti (edaspidi STS) on PJK kilbis olev lüüti, mis toimib põhimõtteliselt nagu RLA. Akud on projekteeritud mõttega, et neid on võimalik siduda superkondensaatorite pangaga. Kriitilise tähtsusega süsteemi toetamisel oleks see potentsiaalne lahendus täiendamaks salvestatava energia hulka, kuna superkondensaatorid on väga hea võimsustihedusega ning akud kõrge energiatihedusega. Superkondensaatorite ning akude sidumisel tõuseks ka oluliselt lahenduse maksumus, kuid tõuseb kogu energiasalvestuse lahenduse eluiga.

4.2 SkelGrid parameetrite teoreetilised arvutused

SkelGrid koosneb mitmetest SkelMod moodulitest, millede vajalik arv on võimalik välja arvutada olenevalt sellest, mis parameetritega on kliinik kui tarbija ning kui kaua peavad superkondensaatorid tagama kliiniku pingestatuse. SkelMod moodulitest on võimalik koostada erinevaid konfiguratsioone, näiteks 6s, kus "s" tähendab, et kuus SkelGrid moodulit on ühendatud jadaühendusse. Kuid näiteks 6s2p konfiguratsioon tähendab seda, et on lisaks üks paralleelharu, mis kumbki koosneb kuuest SkelMod moodulist. Paralleelharude lisamine on vajalik siis, kui on tarvis süsteemi mahtuvust ehk maksimaalse salvestatava energia hulka tõsta. Järgnevad valemid on saadud Skeleton Technologies arvutuslikest aruannetest [14], [21]–[23], [25].

4.2.1 Arvutused SkelMod 102V 88F moodulitega

1. KTA seadme võimsuse, keskmise voolutarbe, tööpinge vahemiku ning vajaliku toite tagamise aja (ehk vajamineva aja, kuniks generaator on 100% talitluse saavutanud ning on valmis üle võtma kliiniku pingestamise) järgi saab välja arvutada SkelGrid süsteemi vajaliku mahtuvuse Selleks esmalt vaja leida eeldatav energia hulk, mida 60kW KTA tarbib $\Delta t_{kestvus}=180$ sekundi jooksul:

$$P_{UPS_{nimi}} = \frac{\Delta E_{SkelGrid_eeldatav}}{\Delta t_{kestvus}} \rightarrow \Delta E_{SkelGrid_eeldatav} = P_{KTA_nimi} \cdot \Delta t_{kestvus} = 60000W \cdot 180s = 10800000J \quad (4.1)$$

- a. Järgmisena leitakse eeldatav SkelGrid süsteemi mahtuvus:

$$\Delta E_{SkelGrid_eeldatav} = \frac{C_{SkelGrid_eeldatav}}{2} \cdot (U_{KTA_energiasalvesti_max}^2 - U_{KTA_energiasalvesti_min}^2) \rightarrow$$

$$C_{SkelGrid_eeldatav} = \frac{\Delta E_{SkelGrid_eeldatav} \cdot 2}{(U_{KTA_energiasalvesti_max}^2 - U_{KTA_energiasalvesti_min}^2)} = \frac{10800000J \cdot 2}{(576V^2 - 384V^2)} \approx 117,19F \quad (4.2)$$

2. Kasutades SkelMod 102V 88F moodulite parameetrite väärtusi leitakse, milline peaks olema minimaalne moodulite hulk tagamaks kliiniku pingestamise, kuniks millest generaator on 100% talitluse saavutanud ning on valmis üle võtma superkondensaatoritelt kliiniku pingestamise).

- a. Siin punktis leitakse, millise SkelMod moodulite konfiguratsiooni korral on SkelGrid mahtuvus vähemalt 117,19F. Moodulite maatriksühenduse korral saab mahtuvuse järgi rööpharude arvu ning jadas olevate moodulite arvu leida järgmiste valemitega:

$$n_{moodulid_jadas} = \frac{U_{KTA_energiasalvesti_max}}{U_{SkelMod_nimi}} = \frac{576V}{102V} \approx 5,64 \quad (4.5)$$

$$C_{SkelGrid_eeldatav} = \frac{C_{moodul} \cdot n_{rööpharude_arv}}{n_{moodulid_jadas}} \rightarrow = \frac{88F \cdot n_{rööpharude_arv}}{6} \rightarrow n_{rööpharude_arv} = \frac{C_{SkelGrid_eeldatav} \cdot n_{moodulid_jadas}}{C_{moodul}} = \frac{117,19F \cdot 6}{88F} \approx 7,99 \quad (4.6)$$

3. Realistlikuma 60kW KTA tarbija numbrite jaoks peab lisaks arvesse võtma muundurite kaod jõuelektroonikas (kuskil 0,05%) ning voolu tarbimise sisekaod. Neid arvestades saab arvutada keskmise kao:

$$P_{KTA_nimi} = I_{kaod_KTA_max} \cdot U_{KTA_energiasalvesti_max} \rightarrow I_{kaod_KTA_max} = \frac{P_{nimi_KTA}}{U_{KTA_energiasalvesti_max}} = \frac{60000W}{576V} \approx 104,17A \quad (4.7)$$

$$P_{KTA_nimi} = I_{kaod_KTA_min} \cdot U_{KTA_energiasalvesti_min} \rightarrow I_{kaod_KTA_min} = \frac{P_{nimi_KTA}}{U_{KTA_energiasalvesti_min}} = \frac{60000W}{384V} \approx 156,25A \quad (4.8)$$

4. Siin punktis võetakse arvesse 48 SkelMod mooduli sisetakistus ning arvutatakse kokkuvõtvalt lisanduvad kaod. Siin tuleb arvestada kondensaatorite eluea sisetakistusega, mis on nende eluea alguses 7,6mΩ. SkelCap andmelehtedel on toodud, et kadude arvutuste aluseks on see, et eluea lõpus tõuseb sisetakistus 200% võrra, ehk sisetakistus superkondensaatoril on eluea lõpus 15,2mΩ. Kasutades SkelGrid süsteemis 6s8p konfiguratsiooni, tuleb kogu sisetakistuse ning kadude väärtused:

$$R_{sise_kogu} = \frac{R_{sise_jadaahel}}{R_{paralleelharude_arv}} = \frac{(15,2m\Omega \cdot 6)}{8} = 11,4m\Omega \quad (4.9)$$

$$P_{kaod_min_pingel} = I_{kaod_UPS_min}^2 \cdot R_{sise_kogu} = 156,25^2 A \cdot 0,0114\Omega \approx 278,32W \quad (4.10)$$

$$P_{kaod_max_pingel} = I_{kaod_UPS_max}^2 \cdot R_{sise_kogu} = 104,17^2 A \cdot 0,0114\Omega \approx 123,71W \quad (4.11)$$

- a. Arvutuste tulemusel selgub, et kaod maksimaalsel tööpingel on 123,71W ning minimaalsel pingel 278,32W, mille keskmiseks saab 201,02W. See tähendab, et superkondensaatorisse salvestatud energia kasutamise ajal ning KTA nominaalpinge töötamisel kaasneb kaovõimsus 0,3% ulatuses koguvõimsusest. Kuna kliinikus peab tagama 60kW väljundis ning tuleb katta kaod (maksimaalselt kuskil 201,02W), siis tuleb suurendada voolusid, mis toob omakorda kaasa jällegi suuremad kaod.

5. Viimasena arvutatakse kontrolliks välja, kui kaua suudab sellise konfiguratsiooniga superkondensaatorite energiasalvestuse pank SkelGrid eelduslikult toetada 60kW tarbijat keskmiste kadude 201,02W korral:

$$C_{SkelGrid_eeldatav} = \frac{C_{moodul} \cdot n_{rööpharude_arv}}{n_{moodulid_jadas}} = \frac{88F \cdot 8}{6} \approx 117,33F \quad (4.12)$$

$$E_{SkelGrid} = \frac{C_{SkelGrid} \cdot (U_{KTA_energiasalvesti_max}^2 - U_{KTA_energiasalvesti_min}^2)}{2} = \frac{117,33F \cdot (576^2 - 384^2)}{2} \approx 10813440J \quad (4.13)$$

$$T_{SkelGrid} = \frac{E_{SkelGrid}}{P_{KTA_nimi} + R_{kaod}} = \frac{10\,813\,440}{60000 + 201,02} \approx 179,62s \quad (4.14)$$

- a. Alapeatüki alguses leitud tulemus (vt alapeatükk 4.2.1 punkt 1) ei ole arvestatud kadudega. Viimases käsitletud punktis arvutuste tulemusel saadi, et arvestades keskmiste kadudega suudab SkelGrid süsteem, milles kasutati SkelMod mooduleid parameetritega 102V 88F pingestada KTA seadet 179,62 sekundit, mis on väga ligilähedane arv soovitud tulemusele. Tegelikult salvestatava energia hulk SkelGrid süsteemis arvestades kadudega peaks olema:

$$T_{SkelGrid} = \frac{E_{SkelGrid_tegelik}}{P_{KTA_nimi} + R_{kaod}} \rightarrow E_{SkelGrid_tegelik} = T_{SkelGrid} \cdot (P_{KTA_nimi} + R_{kaod}) = 180s \cdot (60000W + 201,02) \approx 10836183,6J \quad (4.15)$$

6. Kuna 500kVA generaator hakkab käivitumise hetkest tootma juba energiat, siis tulemuseks saadud 179,62 sekundit sobib ning generaator sellest ajahetkest suudab genereerida puuduoleva võimsuse.

4.2.2 Arvutused SkelMod 162V 92F moodulitega

Siin alapeatükis analüüsitakse SkelGrid süsteemi, kasutades SkelMod 162V 92F mooduleid. Eesmärk on võrrelda eelnevas alapeatükis saadud tulemustega ning välja selgitada, milline moodul on efektiivsem ning parem kliiniku pingestamiseks 180 sekundi jooksul.

1. Siin saab kasutada punktis 4.2.1 leitud eeldatavat SkelGrid süsteemi mahtuvust, milleks saadi 117,14F. Selle alusel saab järgmisena leida eeldatava SkelGrid konfiguratsiooni paralleelharude ning jadas olevate moodulite arvu:

$$n_{moodulid_jadas} = \frac{U_{KTA_energiasalvesti_max}}{U_{SkelMod_nimi}} = \frac{576V}{162V} \approx 3,6 \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} C_{SkelGrid_eeldatav} &= \frac{C_{moodul} \cdot n_{rööpharude_arv}}{n_{moodulid_jadas}} \rightarrow n_{rööpharude_arv} = \\ &= \frac{C_{SkelGrid_eeldatav} \cdot n_{moodulid_jadas}}{C_{moodul}} = \frac{117,19F \cdot 4}{92F} \approx 5,09 \end{aligned} \quad (4.17)$$

- a. Paralleelharude arv tuli 2,4 võrra väiksem, kui 4.2.1 punktis käsitletud mooduli korral, seega antud moodul on mahtuvuslikult parem kui 102V 88F moodul. Siiski tuleb ümardada rööpharude arv täisarvuni, seega järgmistes arvutustes arvestatakse SkelGrid süsteemiga, millel on 6 haru kokku ning jadaahelas on 4 moodulit.
2. Järgmisena saab arvutada 162V 92F mooduli kasutamise korral süsteemis tekkivad kaod. Sisetakistuse väärtus saadakse käsitletava mooduli parameetrite tabelist (vt Tabel 3.3):

$$R_{sise_kogu} = \frac{R_{sise_jadaahel}}{R_{paralleelharude_arv}} = \frac{(12,2m\Omega \cdot 4)}{6} = 8,13m\Omega \quad (4.18)$$

$$P_{kaod_min_pingel} = I_{kaod_KTA_min}^2 \cdot R_{sise_kogu} = 156,25^2 A \cdot 0,00813\Omega \approx 198,57W \quad (4.19)$$

$$P_{kaod_max_pingel} = I_{kaod_KTA_max}^2 \cdot R_{sise_kogu} = 104,17^2 A \cdot 0,00813\Omega \approx 88,22W \quad (4.20)$$

- a. Siit järeldub, et maksimaalsel pingel on KTA seadme kaod ligi 88,22W ning minimaalsel pingel 198,57W. Keskmise kadu on umbes 143,4W, mis on ligi 60W võrra väiksem, kui 102V 88F moodulitega SkelGrid süsteemi korral.
3. Järgmisena leitakse SkelGrid süsteemi eeldatav kestus, kui süsteem koosneb 162V 92F moodulitest konfiguratsiooniga 4s6p ning kogu keskmine kadu on 143,4W:

$$C_{SkelGrid_eeldatav} = \frac{C_{moodul} \cdot n_{rööpharude_arv}}{n_{moodulid_jadas}} = \frac{92F \cdot 6}{4} \approx 138F \quad (4.21)$$

$$E_{SkelGrid} = \frac{C_{SkelGrid} \cdot (U_{KTA_energiasalvesti_max}^2 - U_{KTA_energiasalvesti_min}^2)}{2} = \frac{138F \cdot (576V^2 - 384V^2)}{2} \approx 12\,718\,080J \quad (4.22)$$

$$T_{SkelGrid} = \frac{E_{SkelGrid}}{P_{KTA_nimi} + R_{kaod}} = \frac{12\,718\,080J}{60000W + 143,4s} \approx 211,46s \quad (4.23)$$

4. Siin punktis arvutatakse realselt vajaminevat energia hulka, mida SkelGrid 162V 92F moodulitega peab salvestama, et pingestada kliinikut 180 sekundiks.

$$T_{SkelGrid} = \frac{E_{SkelGrid_tegelik}}{P_{KTA_nimi} + R_{kaod}} \rightarrow E_{SkelGrid_tegelik} = T_{SkelGrid} \cdot (P_{KTA_nimi} + R_{kaod}) = 180s \cdot (60000W + 143,4W) \approx 10825812J \quad (4.22)$$

5. Võrdluseks arvutatakse välja, milline oleks 6s2p ning 5s2p konfiguratsioonide mahtuvus, kasutades sama SkelMod moodulit:

$$C_{SkelGrid_{eeldatav}} = \frac{C_{moodul} \cdot n_{rööpharude_{arv}}}{n_{moodulid_{jadas}}} = \frac{92F \cdot 2}{6} \approx 30,66F \quad (4.23)$$

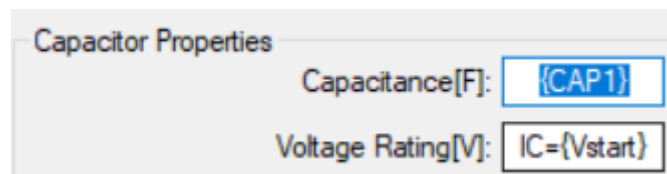
$$C_{SkelGrid_{eeldatav}} = \frac{C_{moodul} \cdot n_{rööpharude_{arv}}}{n_{moodulid_{jadas}}} = \frac{92F \cdot 2}{5} \approx 36,8F \quad (4.24)$$

Siit tulenevalt saab järeldada, et paralleelharude lisamine tõstab märgatavalt süsteemi mahtuvust ning ajalast vastupidavust. Seejuures iga jadaahelasse lisatud kondensaator, ilma paralleelharuta, vähendab mahtuvust, seega väheneb ka salvestatava energia hulk ning võimekus tagada kliiniku süsteemidele piisav toide. Seega vajaliku konfiguratsiooni leidmisel ühe konkreetse mooduli näitel on oluline arvestada süsteemi kriteeriumiks oleva energiasalvesti maksimaalse tööpinge ning vajaliku energia kogusega vastavalt energiasalvesti nõutud ajalise kestuse piirangule. Efektiivseim ning kriteeriumitele kõige paremini vastab arvutuste tulemusel SkelGrid 162V 92F moodulitega süsteem, mille kestus on umbes 211 sekundit.

4.3 Simulatsiooni keskkonna LTSpice analüüs

LTSpice keskkonnas uuriti, millised pingelangud tekivad ning millised on pinge ning voolu kõverad, kui elektriskeemis arvestatakse SkelGrid kogu eluea alguse ning eluea lõpu sisetakistustega, kui tarbijaks on 60kW KTA.

LTSpice süntaksis on mitmed käsud väärtuse välja kutsumiseks ning algseadistuste määramiseks. Antud simulatsioonis on kasutatud ".param", mis defineerib mingi parameetri väärtuse ning seda välja kutsudes mingis jõuelektroonika komponendis see rakendub. Väärtuste defineerimiseks kasutatakse sellist süntaksit: <käsk> <nimi> <väärtus>. .param korral ".param CAP 60m" tähendab, et parameetri nimi on CAP ning selle väärtus on 60mF.

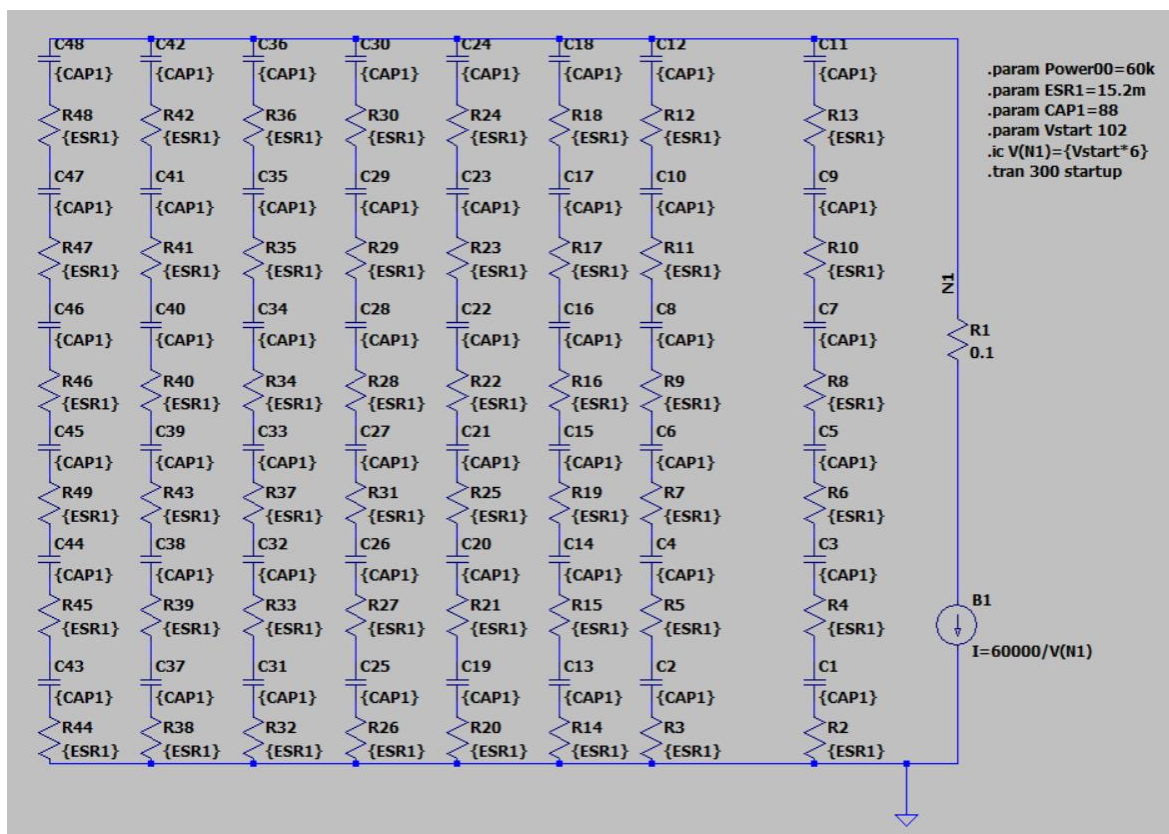


Joonis 4.1.1.3. LTSpice süntaksi näide.

Joonisel on näidatud, kuidas saab omistada mingile komponendile mingid väärtused. Selleks tuleb sisestada eelnevalt defineeritud parameetrite nimed loogeliste sulgude vahel elemendi väärtuste välja.

Lisaks on ".ic", ehk algseadistus, mis seadistab mingile elemendile simulatsiooni käivitumisel mingi algväärtuse. Põhimõtteliselt nime loomise asemel tuleb lisada elemendi nimi, millele soovitakse see väärtus omistada. .tran funktsioon defineerib, mis ajahetkeni ilmutatakse elektriskeemi väärtusi graafikule, mis on antud skeemil 300 sekundit.

4.3.1 Simulatsioon SkelMod 102V 88F moodulitega 6s8p konfiguratsiooni korral

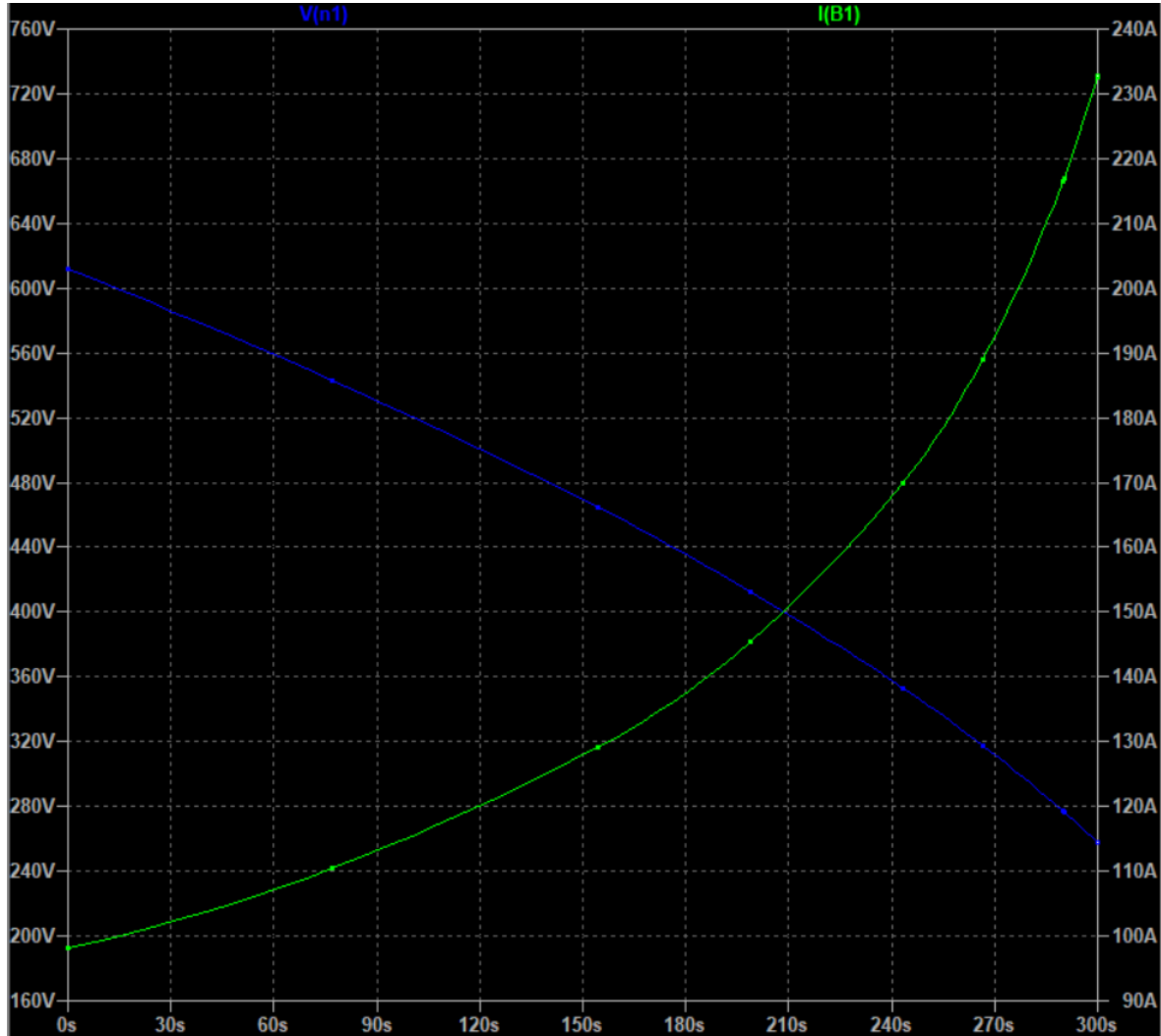


Joonis 4.2. LTSpice simulatsioon 6s8p konfiguratsiooniga.

Joonisel (vt Joonis 4.2) on näha superkondensaatorite moodulite SkelMod elektriskeem tühjakslaadimise protsessis. Ahelasse on lisatud 60kW tarbija, mis jäljendab reaalselt KTA süsteemi. Tähisega C1 on SkelMod moodulid ning tähisega Rx on kondensaatorite sisetakistused. B1 tähistab voluallikat, R on lisatud mõõtepunkti jaoks ning N1 tähistab ühendussõlme. Parameetritele ESR1 on antud väärtus 15,2mΩ, mahtuvusele C1 on antud 88F, Vstart kondensaatoritel on 102V ning sõlmepinge V(N1) sõlmel võrdub Vstart korrutatud kuuega. Lisaks on defineeritud parameeter *Power00*, mis annab simulatsioonile ette, et terve simulatsiooni vältel peab väljundvõimsus olema 60kW. Voluallika väljund on saadud valemiga:

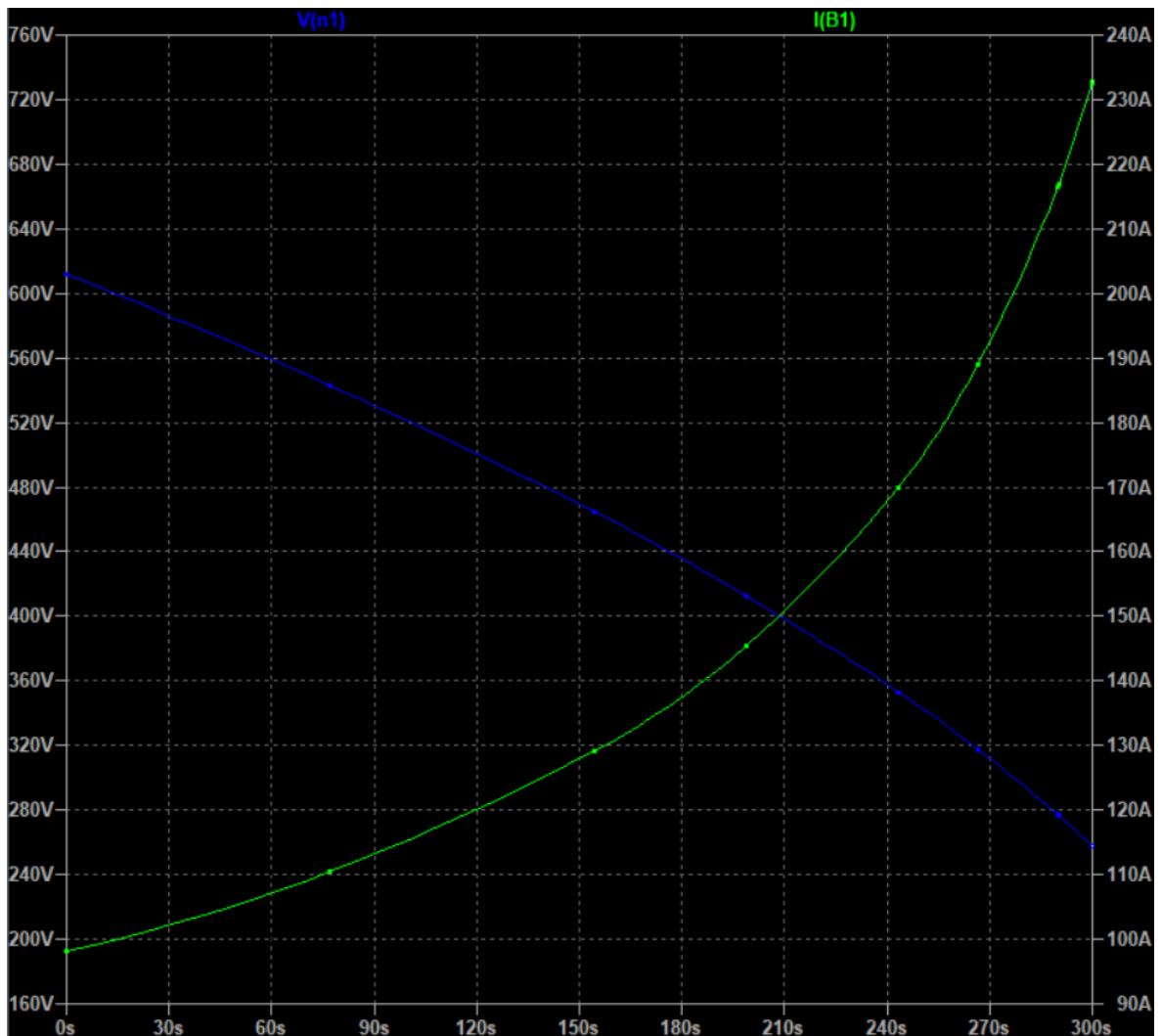
$$I = \frac{P_{UPS_nimi}}{V_{N1}} \quad (4.23)$$

Seega ajas pidevalt muutuva $V(N1)$ tõttu muutub ka vooluallika väljund, et katta 60kW tarbija kriteeriumid.



Joonis 4.3. Parameetrite kõverate graafik LTSpice simulatsioonikeskkonnas, kui sisetakistus $ESR1=7,6m\Omega$ ning kasutatakse 6s8p konfiguratsiooni.

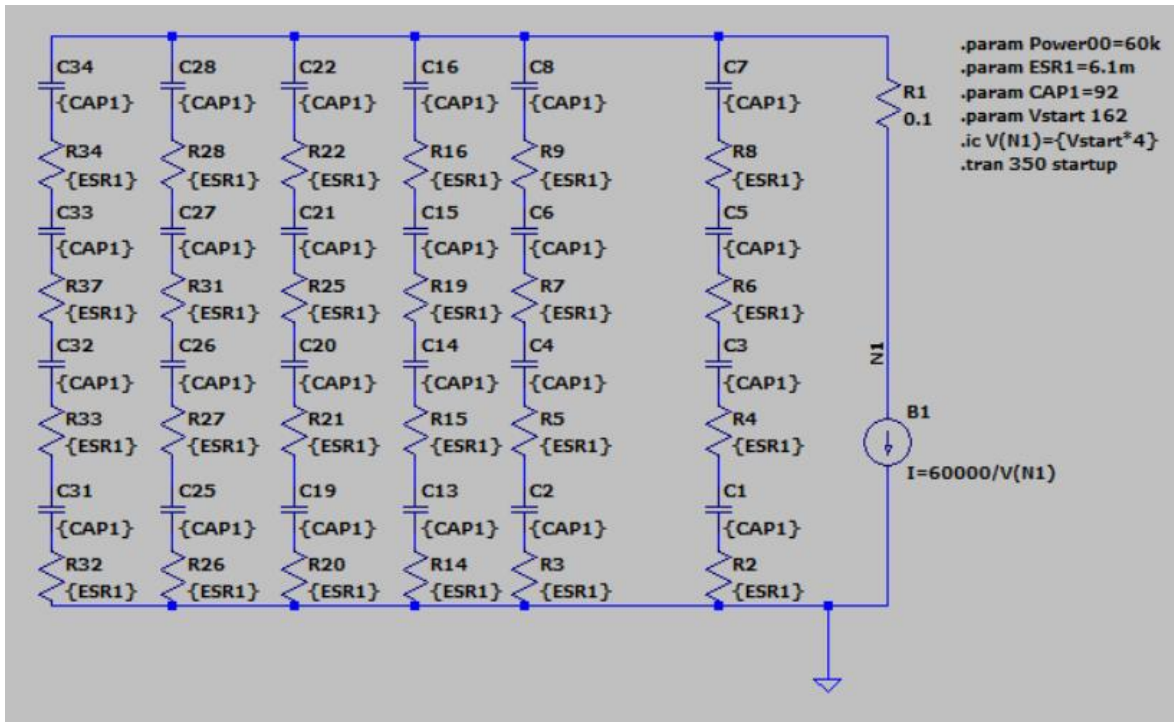
Joonisel on näidatud sõlme $V(N1)$ pinge ning vooluallika vool, $I(B1)$ näitab vooluallika väärtusi. KTA süsteemile vajaliku pinge kõver on sinine joon $V(n1)$. Kui arvestada, et pingevahemik, milles KTA töötab on 384-576V, siis suudab selle konfiguratsiooniga SkelGrid toimida ca 179,40 sekundit. See arv on suhteliselt samane arvutustes saadud tulemusega.



Joonis 4.4. Parameetrite kõverate graafik LTSpice simulatsioonikeskkonnas, kui sisetakistus $ESR1=15,2\text{m}\Omega$ ning kasutatakse 6s8p konfiguratsiooni.

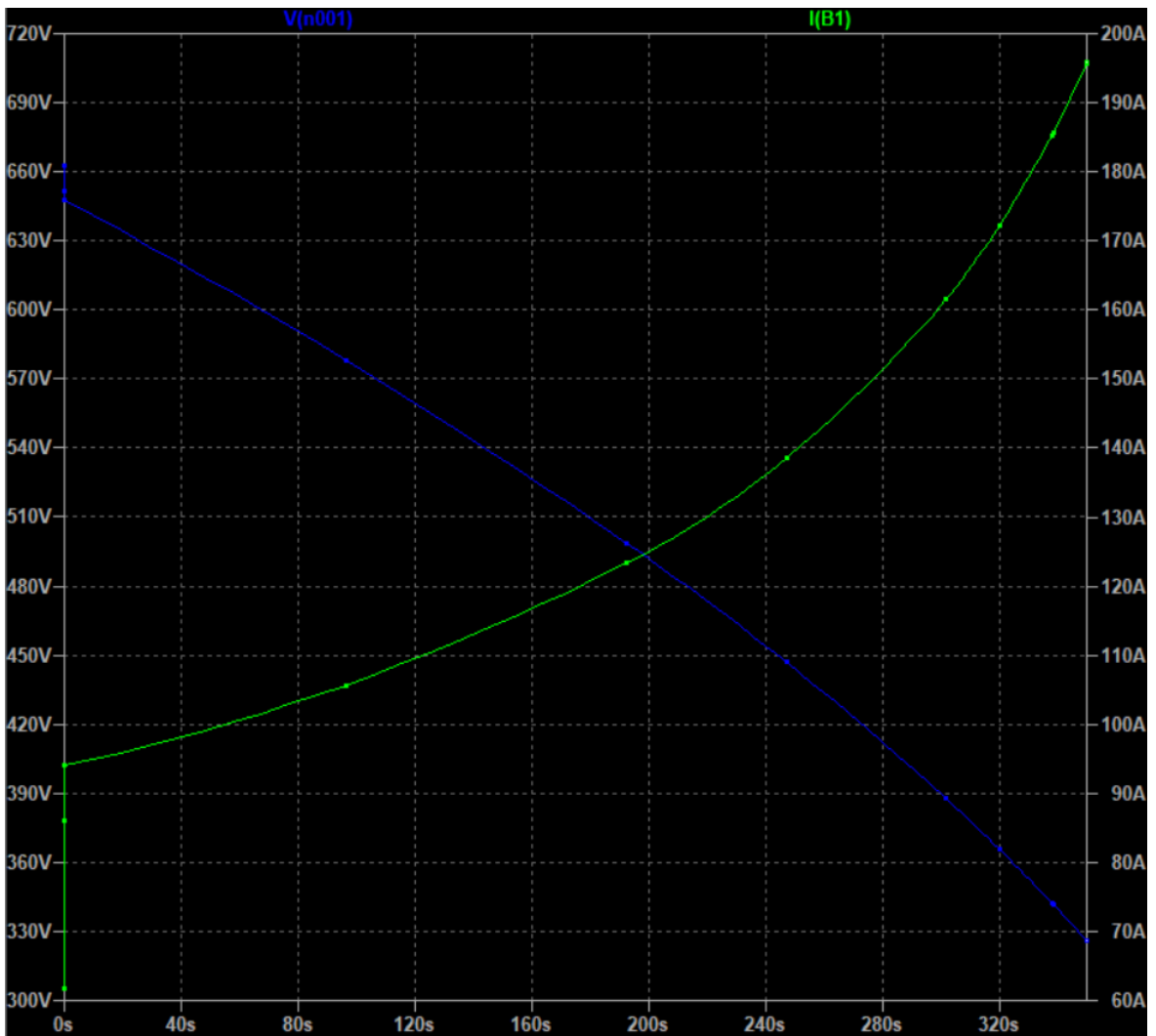
Graafikute võrdlusena (vt Joonis 4.3 ja Joonis 4.4) on näha, et kondensaatorite eluea alguse ning lõpu korral ei ole SkelGrid toimivus väga muutunud. Suurim saavutatav pinge on kuskil 618V, $ESR1=15,2\text{m}\Omega$ korral oli see 611V. Eluea alguse korral suudab SkelGrid toimida vajalikus vajalikus tööpinge vahemikus umbes 179,5 sekundit ning eluea lõpus 179,4 sekundit. Seega SkelGrid kondensaatorite kestus eluea lõpus põhimõtteliselt ei muutu võrreldes kondensaatorite kestusega eluea algusega. Järeldusena saab öelda, et simulatsiooni tulemused ühtivad teoreetilistes arvutustes saadud tulemustega.

4.3.2 Simulatsioon SkelMod 162V 92F moodulitega 4s6p konfiguratsiooni korral

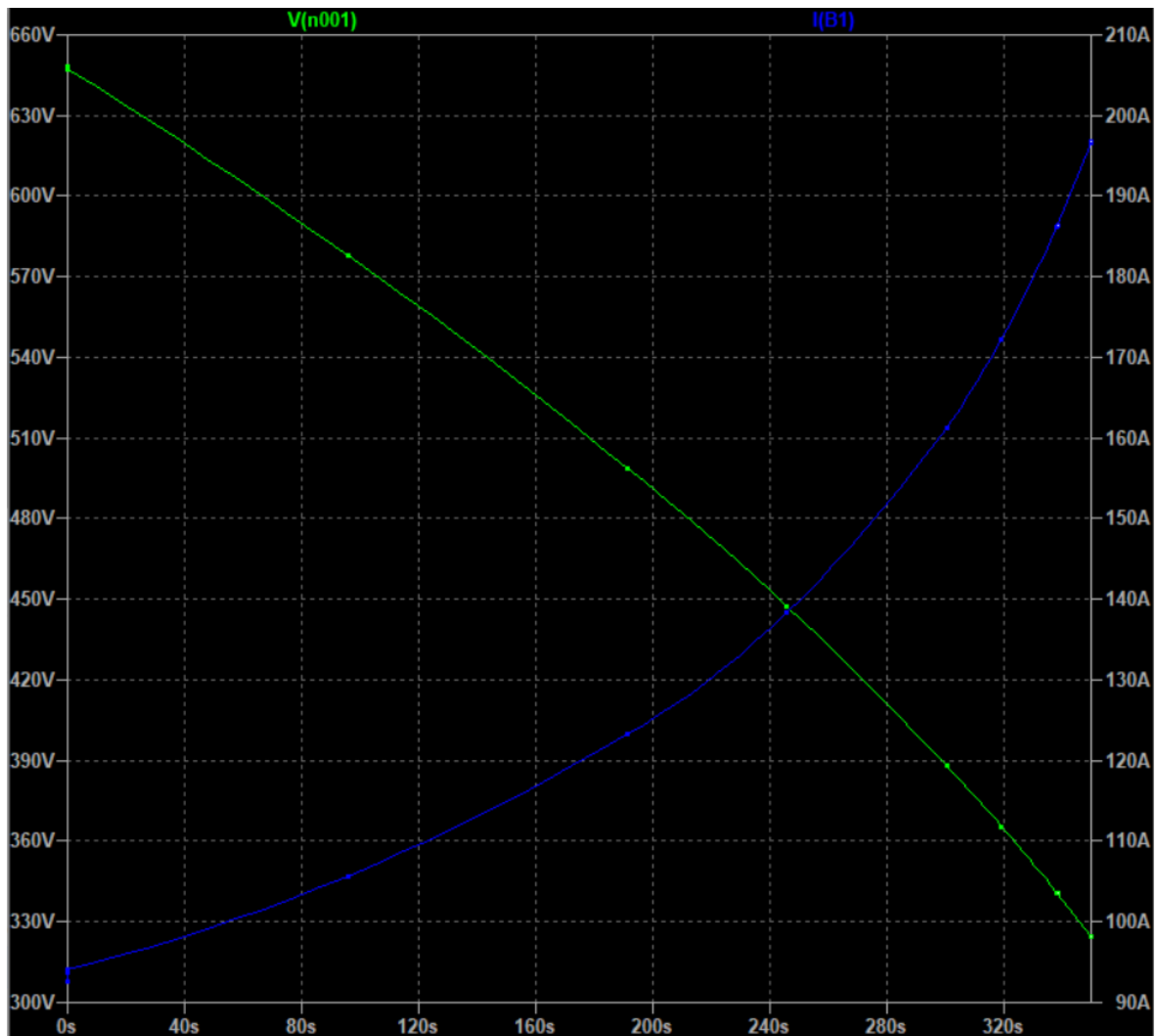


Joonis 4.5. LTSpice simulatsioon 4s6p konfiguratsiooniga

Nagu joonisel näha (vt Joonis 4.5), siis elektriskeem on üldiselt sama, kuid elektriskeemi komponentide ning funktsioonide väärtusi on muudetud. Nüüd on mahtuvuse väärtuseks 92F ning Vstart ehk mooduli pinge väärtuseks on 162V. Siin alapeatükis katsetatakse samamoodi nii eluea alguse ning eluea lõpu sisetakistuse väärtustega.



Joonis 4.6. Parameetrite kõverate graafik LTSpice simulatsioonikeskkonnas, kui sisetakistus $ESR1=6,1\text{m}\Omega$ ning kasutatakse 4s6p konfiguratsiooni.



Joonis 4.7. Parameetrite kõverate graafik LTSpice simulatsioonikeskkonnas, kui sisetakistus $ESR1=12,2\text{m}\Omega$ ning kasutatakse 4s6p konfiguratsiooni.

Graafikute võrdlusena (vt Joonis 4.6 ja Joonis 4.7) on näha, et kondensaatorite eluea alguse ning lõpu korral ei ole SkelGrid toimivus selle mooduli korral samuti väga muutunud. Suurim saavutatav pinge on kuskil 665V, $ESR1=12,2\text{m}\Omega$ korral oli see 650V. Eluea alguse korral suudab SkelGrid toimida vajalikus vajalikus tööpinge vahemikus umbes 207 sekundit ning eluea lõpus 206 sekundit. Seega SkelGrid kondensaatorite kestus eluea lõpus põhimõtteliselt ei muutu võrreldes kondensaatorite kestusega eluea algusega. Järeldusena saab öelda, et simulatsiooni tulemused on suhteliselt samased teoreetilistes arvutustes saadud tulemustega.

4.4 Süsteemi tasuvus

Kogu SkelGrid tasuvuse majaomaniku jaoks määrab ära SkelGrid süsteemi eluiga aastates ning mis on selle maksumus võrreldes akude lahendusega. Kuna arvutuste

ning simulatsiooni keskkonna tulemustel saadi, et kliiniku kriteeriumitele vastab kõige paremini SkelGrid 162V 92F moodulitega süsteem, siis maksumuse osas arvestatakse just selle mooduli maksumusega.

NPP HR12330W akude eluiga on ca 10-12 aastat seeria andmelehe järgi. SkelGrid moodulite SkelMod eluiga hakkab Skeletoni andmelehe järgi alates miljonist tsüklit halvenema, seetõttu tuli arvutustes arvestada eluea lõpu sisetakistuse väärtusega. Kui nüüd arvestada konkreetselt ainult andmelehtedes toodud arve, siis kokkuvõtvalt peaks SkelGrid süsteemi eluiga olema 10-15 aastat, mis on suhteliselt samane pliihappe baasil NPP akudega. Keskkonnasõbralikkuse, ohutuse ning energiatõhususe osas on superkondensaatorite baasil süsteem parem kui akudega energiasalvestuse süsteem.

Majja hetkel paigaldatud INVT KTA süsteem koos 40 NPP akuga ning muude komponentidega (sularid, pealüliti, kontaktor, eellaadimistööd, lahenduse projekteerimine, kasumimäär) maksis 34 275 eurot ilma käibemaksuta. Uue kavandatava Schneider Galaxy VS 480V KTA seadme ning SkelGrid süsteemi paigaldamine läheks kokku ilma käibemaksuta maksma 216 819 eurot ilma käibemaksuta. Siit järeldades saab öelda, et SkelGrid süsteemi integreerimine praegusel ajal ei tasuks ennast maksumuse mõiste ära, kuid kui kliendil on võimalik selline seade osta, siis seda on mõistlik keskkonnasõbralikkuse mõistes teha.

KOKKUVÕTE

Käesolevas uurimistöös uuriti, kuidas integreerida Skeleton Technologies seadet SkelGrid Alma-Tomingase ärihoone kliiniku KTA süsteemi ning milline peaks olema SkelGrid seade. Kliinikus on mitmed kriitilise tähtsusega seadmed, mis vajavad tavatoite kadumisel KTA süsteemi poolt toite tagamist generaatori täisvõimekuse jõudmiseni. Nendeks on näiteks operatsioonisaalide OPJK1, OPJK2, OPJK3 ning ärkamisruumi valgustid, seadmed, pistikupesad ning andmesidekapid. Alma-Tomingase majas teostatud katsete käigus selgus, et generaator jõuab oma täisvõimekuseni 180 sekundiga, seega see aeg võeti aluseks SkelGrid seadme projekteerimisel.

Töös käsitletud SkelGrid süsteem koosneb SkelMod seeria superkondensaatorite moodulitest ning antud lõputöös käsitleti 102V 88F moodulit ning 162V 92F moodulit. Teoreetilises osas projekteeriti Alma-Tomingase maja kliinikusse esmalt SkelMod 102V mooduleid 48 tükki ning moodulid olid 6s8p konfiguratsiooniga. Järgmisena projekteeriti SkelMod 162V mooduleid 24 tükki ning need moodulid olid 4s6p konfiguratsiooniga. Kuna majas hetkel olev UPS seade ei toeta superkondensaatorite kasutamist energiasalvestina, siis asendati see Schneider Galaxy VS sarja KTA seadmega. Põhimõtteline ühendus ning toite tagamine kliiniku seadmetele jäi samaks. Uue KTA seadme tööparameetrite ning kliiniku elektriliste kriteeriumite alusel teostati arvutused sobiliku SkelGrid seadme projekteerimiseks ning simuleeriti LTSpice keskkonnas vastavate moodulitega lahendused.

Teoreetiliste uuringute tulemustel leiti, et SkelGrid 102V moodulitega konfiguratsiooniga 6s8p on võimeline KTA energiasalvesti tööpinge vahemikus toimima ligi 179,4 sekundit. Selline aeg leiti arvestades jõuelektronika kadusid ning superkondensaatorite eluea lõpu sisetakistuse väärtusi. Saadud ajaline kestuse on suhteliselt samane kliiniku kriteeriumiks oleva kolme minutiga ning sobib kliiniku pingestamiseks. SkelMod 162V 92F moodul konfiguratsiooniga 4s6p on võimeline KTA energiasalvesti tööpinge vahemikus toimima ligi 210 sekundit, mis on väga palju parema tulemusega, kui eelnev SkelMod moodul. SkelMod 162V 92F on ka selle poolest parem, et tekkivad kaod on umbes 60W võrra väiksemad ning võtab ruumi vähem, kuna mooduleid on vähem.

Kuigi superkondensaatorid on keskkonnasõbralikumad ning ei koosne kergesti süttivatest ning eluohtlikest ainetest, siis ei ole nende baasil tehtud SkelGrid süsteemi maksumus kuigi odav. Akude baasil KTA seadme energiasalvesti on ligi 7 korda odavam, kui SkelGrid. Seega on lahendust otsival kliendil soodsam soetada akude baasil lahendus.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] F. Díaz-González, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, and R. Villafáfila-Robles, "A review of energy storage technologies for wind power applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 4, pp. 2154–2171, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.029>.
- [2] L. Zhang, X. Hu, Z. Wang, F. Sun, and D. G. Dorrell, "A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1868–1878, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.283>.
- [3] C. Zou, L. Zhang, X. Hu, Z. Wang, T. Wik, and M. Pecht, "A review of fractional-order techniques applied to lithium-ion batteries, lead-acid batteries, and supercapacitors," *J Power Sources*, vol. 390, pp. 286–296, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.04.033>.
- [4] G. Gautham Prasad, N. Shetty, S. Thakur, Rakshitha, and K. B. Bommegowda, "Supercapacitor technology and its applications: a review," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 561, no. 1, p. 012105, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/561/1/012105.
- [5] B. Akinwolemiwa, C. Peng, and G. Z. Chen, "Redox Electrolytes in Supercapacitors," *J Electrochem Soc*, vol. 162, no. 5, p. A5054, 2015, doi: 10.1149/2.0111505jes.
- [6] B. Pal, S. Yang, S. Ramesh, V. Thangadurai, and R. Jose, "Electrolyte selection for supercapacitive devices: a critical review," *Nanoscale Adv*, vol. 1, no. 10, pp. 3807–3835, 2019, doi: 10.1039/C9NA00374F.
- [7] S. Shiraishi, "Chapter 27 - Electric Double Layer Capacitors," in *Carbon Alloys*, E. YASUDA, M. INAGAKI, K. KANEKO, M. ENDO, A. OYA, and Y. TANABE, Eds., Oxford: Elsevier Science, 2003, pp. 447–457. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-008044163-4/50027-9>.
- [8] Jiale. Sun, B. Luo, and H. Li, "A Review on the Conventional Capacitors, Supercapacitors, and Emerging Hybrid Ion Capacitors: Past, Present, and Future," 2022. Ligipääs: Märts 22, 2023. [Online]. Saadaval: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/aesr.202100191>
- [9] N. Elgrishi, K. J. Rountree, B. D. McCarthy, E. S. Rountree, T. T. Eisenhart, and J. L. Dempsey, "A Practical Beginner's Guide to Cyclic Voltammetry," *J Chem Educ*, vol. 95, no. 2, pp. 197–206, Feb. 2018, doi: 10.1021/acs.jchemed.7b00361.
- [10] Skeleton Technologies, "SAFETY DATA SHEET - SkelCap," 2018 Ligipääs: Märts 22, 2023. [Online]. Saadaval: https://1188159.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/1188159/01-DS-SkelCap_SCA.pdf
- [11] Jiale. Sun, B. Luo, and H. Li, "A Review on the Conventional Capacitors, Supercapacitors, and Emerging Hybrid Ion Capacitors: Past, Present, and Future," 2022. Ligipääs: Märts 22, 2023. [Online]. Saadaval: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/aesr.202100191>
- [12] G. H. Lane and E. Jezek, "Electrochemical studies of acetonitrile based supercapacitor electrolytes containing alkali and alkaline earth metal cations," *Electrochim Acta*, vol. 150, pp. 173–187, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.10.112>.
- [13] C. Liu, Z. Yu, D. Neff, A. Zhamu, and B. Z. Jang, "Graphene-Based Supercapacitor with an Ultrahigh Energy Density," *Nano Lett*, vol. 10, no. 12, pp. 4863–4868, Dec. 2010, doi: 10.1021/nl102661q.
- [14] Skeleton Technologies, "Instructions for Testing of Skeleton Technologies' Ultracapacitors," 2016. Ligipääs: Märts 22, 2023. [Online]. Saadaval: https://1188159.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/1188159/171101_TestingInstructionsForUltracapacitors-1.pdf
- [15] Axys Projektbüroo, "Sepise tn. 7 ärihoone elektrivarustuse tugevoolu tööprojekt." 2023.

- [16] Kohler, "Kohler V500CU2," 2023 Ligipäas: Märts 22, 2023. [Online]. Saadaval: <https://www.kohler-sdmo.com/images/shared/PPR/800/MK-IN-FL-BR-EN-221.pdf>
- [17] M. Aamir, K. Ahmed Kalwar, and S. Mekhilef, "Review: Uninterruptible Power Supply (UPS) system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 1395–1410, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.335>.
- [18] INVT, "HT33 Series Tower Online UPS 60kVA" Ligipäas: Märts 22, 2023. [Online]. Saadaval: <https://www.invt.com/products/ht33-series-tower-ups-60-500kva-124>
- [19] Bender, "ATICS-BP-3-63A-SET," 2014 Ligipäas: Märts 22, 2023. [Online]. Saadaval: https://www.bender-uk.com/fileadmin/content/Products/m/d/ATICS-BP-3-SET_D00161_M_DEEN.pdf
- [20] Bender, "ATICS-2-63A-ISO," 2021 Ligipäas: Märts 22, 2023. [Online]. Saadaval: https://www.bender-it.com/fileadmin/content/Products/m/e/ATICS-2-ISO_D00046_M_XXEN.pdf
- [21] Skeleton Technologies, "SkelCap supercapacitor," 2022 Ligipäas: Märts 22, 2023. [Online]. Saadaval: <https://1188159.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/1188159/02-DS-220909-SKELCAP-CELLS-1D-1.pdf>
- [22] Skeleton Technologies, "SkelMod 102V 88F," 2022 Ligipäas: Märts 22, 2023. [Online]. Saadaval: <https://1188159.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/1188159/01-DS-211228-SKELMOD-102V88F-1E.pdf>
- [23] Skeleton Technologies, "SkelMod 162V 92F," 2021 Ligipäas: Märts 22, 2023. [Online]. Saadaval: <https://f.hubspotusercontent00.net/hubfs/1188159/02-SMT-310821-1B.pdf>
- [24] Schneider Electric, "Schneider Galaxy VS UPS 60kW 480V for External Batteries," 2022 Ligipäas: Märts 22, 2023. [Online]. Saadaval: <https://www.se.com/ww/en/product/GVSUPS60KGS/galaxy-vs-ups-60kw-480v-for-external-batteries-startup-5x8/?%3Frange=65772-galaxy-vs&parent-subcategory-id=8030&selected-node-id=27602447535>
- [25] Skeleton Technologies, "SkelCap User Manual," 2016. Ligipäas: Märts 22, 2023. [Online]. Saadaval: https://1188159.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/1188159/02-SkelCap_Manual-170510-1.pdf