

Joona Kangas

SÄHKÖNTUOTON OPTIMOINTI KIVEN- MURSKAUSLAITOKSESSA ENERGIA- VARASTON AVULLA

Diplomityö
Tarkastaja: Tomi Roinila, Associate Professor
Tarkastaja: Joni Markula, Doctoral Researcher
Informaationtekniikan ja viestinnän tiedekunta
Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Joona Kangas: Sähkötuotannon optimointi kivenmurskauslaitoksessa energiavaraston avulla
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikka
Toukokuu 2023

Työn tavoitteena oli selvittää toteutuskelpoinen energiavarastoteknologia diesel generaattorin rinnalle sähköntuotantoon. Teknologian tulee olla sellainen, että se voidaan toteuttaa mobiiliin kivenmurskauslaitokseen, joka liikkuu hiekkamontusta toiseen useita kertoja vuodessa. Työn tavoitteena oli myös selvittää, kuinka paljon polttoainekustannuksissa voidaan säästää lisäämällä energiavarasto ja tätä kautta arvioida sen kannattavuutta. Työ tehtiin Peab Industri Oy:lle ja siinä tutkittiin Peab Industrin kivenmurskauslaitoksia.

Työn alussa tutkittiin eri energiavarastointiteknologioita ja niiden ominaisuuksia. Tämän lisäksi tutkittiin dieselmoottoria ja generaattoria. Teorian pohjalta lähdettiin tekemään mallia diesel generaattorista, joka verifioitiin käyttämällä mittausdataa laitoksista. Samassa kappaleessa määritettiin energiavarastolle asetettavat vaatimukset. Seuraavassa kappaleessa tutkittiin laitteita, jota tarvitaan energiamuodon muuttamiseen. Näille laitteille esiteltiin eri kokoonpanoja. Sen jälkeen tutkittiin laitoksen sähkönlaatua ja arvioitiin energiavaraston vaikutuksia siihen. Aikaisemman perusteella seuraavassa kappaleessa valittiin sopivin energiavarastoteknologia tähän sovellukseen ja arvioitiin kustannuksia. Kuudennessa kappaleessa rakennettiin energiavaraston malli diesel generaattorin mallin rinnalle. Seuraavassa kappaleessa laskettiin ja arvioitiin tuloksia, polttoainesäästöjä ja päästövähennyksiä. Saman kappaleen lopussa esiteltiin vielä pohdintaa työstä ja sovelluksen kehitysideoista.

Työn lopputuloksena oli, että energiavaraston avulla voidaan parantaa diesel generaattorin polttoainetaloudellisuutta. Tämä saavutetaan tasoittamalla dieselmoottorin kuormaa. Työn teorian pohjalta dieselmoottori ei vaihtuvassa kuormassa pysty toimimaan optimaalisesti turbon aiheuttamana viiveen takia. Simuloidussa mallissa saavutettiin hieman yli yhden prosentin paranus polttoainekulutuksessa, kun energiavarasto suodatti tehopiikkejä. Tämä voi vuodessa johtaa 4600–8300 euron säästöihin, riippuen energiavaraston tehosta, energiamäärästä, tuotannon määrästä ja polttoaineen hinnasta.

Avainsanat: dieselmoottori, generaattori, polttoainesäästöt, energiavarasto, superkondensaattori, mallinnus ja kivenmurskauslaitos

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Joona Kangas: Optimizing electricity production in stone-crushing plant using energy storage
Master's Thesis
University of Tampere
Information and Electrical Engineering
May 2023

The aim of the thesis was to explore a feasible energy storage technology for parallel electricity generation with diesel generators. The technology should be such that it can be implemented in a mobile crushing plant that moves between sand pits several times a year. The objective of the thesis was also to determine how much fuel costs can be saved by adding an energy storage system and thus evaluate its profitability. The thesis was conducted for Peab Industri Oy, examining their crushing plants.

At the beginning of the thesis, various energy storage technologies and their characteristics were investigated. In addition, diesel engines and generators were examined. Based on the theory, a model of the diesel generator was created and verified using measurement data from the plants. In the same section, the requirements for the energy storage system were defined. The next section examined the devices required for energy conversion, presenting different configurations for these devices. Subsequently, the quality of the plant's electricity was investigated, and the impacts of the energy storage system on it were evaluated. Based on the previous findings, the most suitable energy storage technology for this application was selected in the following section, and the costs were assessed. In the sixth section, a model of the energy storage system was built alongside the diesel generator model. The subsequent section calculated and evaluated the results, fuel savings, and emission reductions. The same section concluded with reflections on the thesis and ideas for application development.

The result of the thesis was that the energy storage system can improve the fuel efficiency of the diesel generator by smoothing out its load. Based on the thesis's theory, the diesel engine cannot operate optimally under variable load due to the delay caused by the turbocharger. In the simulated model, a slight improvement of over one percent was achieved in fuel consumption when the energy storage system filtered power spikes. This can lead to savings of €4,600 to €8,300 per year, depending on the efficiency, energy quantity, production volume, and fuel price of the energy storage system.

Keywords: diesel engine, generator, fuel savings, energy storage, supercapacitor, modeling and stone crushing plant

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämän työn valmistuminen päättää minun viisivuotisen taipaleeni sähkötekniikan opiskelijana. Opiskeluvuoteni ovat menneet nopeasti, mutta sen tiedän, että opiskelu ja oppiminen ei tähän lopu. Työelämä on jatkuvaa oppimista ja olkoon tämä koulutus todisteena ja muistutuksena itselleni siitä, että osaan oppia.

Tämän työn mahdollisti Peab Industri Oy. Yrityksen toimihenkilöille kiitokset kuuluvat Joni Kokolle ja Niko Varjoniemelle osallistumisesta työhön ja erityiskiitokset Antti Huh-talle suuresta tuesta työn parissa. Kiitokset kuuluvat myös kollegoilleni Joni Bäckströmille ja Ari-Pekka Päivärinnalle, jotka merkittävästi auttoivat mittausdatan saannissa laitoksista. Näiden lisäksi kiitoksia diplomityön tarkastamisesta Tomi Roinilalle ja Joni Mar-kulalle.

Kiitokset kuuluvat myös minun koulukavereilleni, jotka ovat auttaneet minua oppinoissani ja jaksaneet kuunnella minun pohdintaani työni teoriasta ja mallinnuksesta. Teidän kans-sanne nämä viisivuotta ovat kuluneet rientoisasti. Kiitokset myös Tilda Kouhialle kielio-pilisten virheiden korjaamisesta. Suurimmat kiitokset kuuluvat puolisololleni Ida Kouhialle, joka jaksoi kannustaa minua loppuun asti ja motivoi minua niin koulussa kuin elämässä olemaan parempi versio itsestäni.

Tampereella, 17.05.2023

Joona Kangas

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. ENERGIAN VARASTOINTI JA ENERGIANTUOTTO.....	3
2.1 Teknologiat	3
2.2 Akkujärjestelmä.....	4
2.3 Superkondensaattori	8
2.4 Vauhtipyörä.....	10
2.5 Energiavarastointitekniologioiden yhdistelmä.....	11
2.6 Dieselmoottori, generaattori ja hyötysuhde	14
3. TARKASTELTAVAN LAITOKSEN MALLINNUS JA VAATIMUKSET	17
3.1 Dieselmoottorin ja generaattorin analysointi kuvaajista	17
3.2 Systeemin malli.....	21
3.3 Vaatimukset	26
4. ENERGIAMUODON MUUTTAMINEN JA SÄHKÖNLAATU	36
4.1 Laitteisto	36
4.2 Laitteiden kokoonpano ja mitoitus	40
4.3 Sähkönlaatu	42
5. TEKNOLOGIAN VALINTA	46
5.1 Vaatimusten täytyminen	46
5.2 Kustannukset	47
6. ENERGIANTUOTANNON MALLINNUS.....	48
6.1 Mallin rakennus.....	48
6.2 Mallin testaus	50
7. TULOKSET	53
7.1 Mallin tulokset	53
7.2 Polttoainesäästöt ja päästöjen vähennykset.....	55
7.3 Pohdintaa.....	56
8. YHTEENVETO.....	59
LÄHTEET	61

LYHENTEET JA MERKINNÄT

E	Energia
J	Inertia
ω	Kulmanopeus
Li-ion	Litiumioniakku
m	Massa
PWM	Pulssinleveysmodulaatio
R	Säde
SoC	State of charge
SRF-PLL	Synchronous reference frame phase-locked loop

1. JOHDANTO

Energiakriisin ja energiateknologioiden kehittymisen ja yleistymisen myötä yhä useampien yritysten olisi kannattavaa investoida hybriditeknologioihin energiantuotannossa. Hybridillä tarkoitetaan yleisesti asioiden yhdistelmää, mutta tässä työssä sillä täsmällisemmin tarkoitetaan energiantuotanto- tai varastointitapojen yhdistelmää. Hybriditeknologiat tuovat joustavuutta energiantuotantoon lisäämällä tapoja tuottaa ja varastoida energiaa. Samalla ne myös tuovat monimutkaisuutta ja kustannuksia systeemiin.

Hybriditeknologian yhteydessä voidaan käyttää energiavarastoa, jonka avulla energia saadaan talteen myöhempää käyttöä varten. Energiaa voidaan esimerkiksi varastoida silloin, kun sen tarve on vähäistä. Tämä mahdollistaa energiavaraston käyttämisen esimerkiksi vikatilanteissa tai suurten energiapiikkien kohdalla. Kun puhutaan energiavarastosta, ei aina puhuta tavanomaisista akuista, vaan energiavarastointitapoja on lukuisia. Esimerkiksi sähköisessä liikenteessä hybriditeknologioita on useita ja siten myös energian varastointitapoja on useita. Eri teknologiat eroavat toisistaan esimerkiksi niiden tehon, tilavuuden, painon ja varastoitavan energian mukaan. Eri teknologioiden toimintaperiaatteet eroavat toisistaan laajasti, mutta tässä työssä keskitytään teknologioihin, joita voidaan siirtää tai voidaan helposti yhdistää siirrettävään kalustoon.

Työ tehdään monialaiselle Peab Industri Oy:lle, joka on yksi Peab konsernin tytäryhtiöistä. Työssä keskitytään Peab Industrin kivenmurskauslaitoksiin, jotka toimivat Swerock brändin alla. Swerock tuottaa kiviainesta, valmisbetonia ja avolouhintapalveluita. Työssä keskitytään kivenmurskauslaitoksissa tuotettuun energiaan. Kivenmurskauslaitokset sijaitsevat usein harvaan asutulla alueella, joten riittävän voimakkaan sähköverkon järjestäminen on usein kohtuuttoman kallista. Tämän tyyppisissä laitoksissa tuotannon ollessa käynnissä, sähköntuotanto tapahtuu isolla dieselgeneraattorilla. Tämän kanssa rinnan on pienempi dieselgeneraattori, jonka tarkoitus on tuottaa sähköä öisin, ja kun tuotanto ei ole käynnissä. Laitos tarvitsee jatkuvasti sähköä pitääkseen koneiden öljyt, ohjaamoja ja taukotilat lämpöisinä. Työn tarkoituksena on selvittää toteutuskelpoinen teknologia dieselgeneraattorien rinnalle, jonka avulla voidaan tasata ison dieselmoottorin kuormaa tuotantolaitoksessa. Kuorman tasaukseen kuuluu huippukuorman leikkaus, tyhjäkäynnin hyödyntäminen sekä moottorin sammuttaminen. Työssä analysoidaan kahta mobiilia kivenmurskauslaitosta, johon tämän tyyppinen investointi voitaisiin toteuttaa.

Diplomityön loppuosa koostuu seuraavasti. Kappaleessa 2 tutkitaan eri energianvarastointiteknologioita, generaattoria ja dieselmoottoria. Seuraavaksi kappaleessa 3 tutkittavista laitoksista otetaan mittausdataa, joiden avulla saadaan selville laitosten tehon ja energian tarpeen luonne. Tämän avulla voidaan asettaa vaatimukset energiavarastolle. Mittausten avulla mallinnetaan kuorman ja polttoaineenkulutuksen malli, joka auttaa uuden teknologian testauksessa. Kappaleessa 4 esitellään laitteistot ja tavat, joilla sähköenergia muutetaan eri muotoon. Näiden avulla kappaleessa 5 valitaan sopiva teknologia tähän kyseiseen käyttötarkoitukseen. Teknologian tulee siis olla sellainen, joka täyttää aikaisemmin asetetut vaatimukset. Kappaleessa 6 luodaan laitoksen malli, jossa käytetään aikaisemmin tehtyä kuorman ja moottorin mallia sekä tehdään malli valitulle teknologialle. Mallia testataan ja arvioidaan sen toimivuutta. Kappaleessa 7 esitellään mallin tulokset ja teknologian tuotot. Viimeisenä kappaleessa 8 tehdään yhteenveto teknologiasta, tuloksista ja todetaan lopputulos.

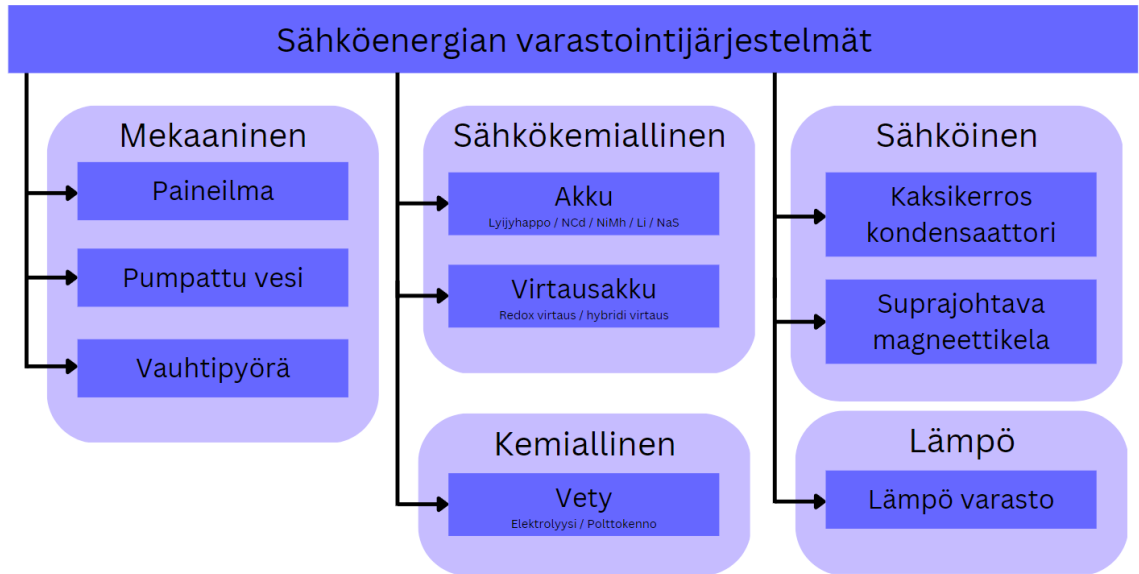
2. ENERGIAN VARASTOINTI JA ENERGIANTUOTTO

Tässä osiossa tutustutaan tarkemmin muutamaankin energian varastointitekнологiaan ja selvitetään niiden suoritusarvot. Kappaleessa tutkitaan erilaisia akkuteknologioita, superkondensaattoria ja vauhtipyörää. Näiden lisäksi kappaleessa esitellään dieselgeneraattorin toimintatapa. Tutkimus tehdään siitä näkökulmasta, että energian varastoteknologia olisi toteutettavissa mobiiliin kivenmurskauslaitokseen. Koska laitokset siirtyvät useamman kerran vuodessa, tulee ottaa huomioon, että teknologia on yhtä hyvin siirrettävissä, kuin muukin laitos. Tämä voi tarkoittaa esimerkiksi sitä, että energiavarasto voidaan yhdistää olemassa olevaan siirrettävään vaunuun tai se voisi omassa kontissa, jota voidaan siirtää.

2.1 Teknologiat

Energianvarastointiteknologiat eroavat toisistaan niiden toimintaperiaatteiden mukaan. Teknologiakohtaisella toimintaperiaatteella on suuri merkitys varaston kokoon, painoon ja suoritusarvoihin. Tärkeitä käsitteitä energiavarastoissa ovat energiakapasiteetti, tehokapasiteetti, hyötysuhde, vasteaika, elinikä sekä kustannus. On tärkeää, että energiavaraston hyötysuhde on mahdollisimman hyvä, jotta energiaa ei menisi hukkaan sitä varastoidessa tai muutettaessa oikeaan muotoon. Lisäksi elinikä ja kustannukset ovat merkittävässä roolissa yrityksen teknologiaan investoidessa. Jotta teknologia voisi toimia sille asetetuissa olosuhteissa, sen energia- ja tehokapasiteetin täytyy olla riittävän suuri. Tässä työssä energia- ja tehokapasiteettivaatimukset määritellään myöhemmin, kun laitojen mittausdataa analysoidaan.

Sähköenergian varastointitavat voidaan jakaa viiteen pääryhmään, joita ovat mekaaninen, sähkökemiallinen, kemiallinen, sähköinen sekä lämpövarastointi. Nämä ryhmät esitellään Kuvassa 1. Ryhmien alla on esimerkki siihen ryhmään kuuluvasta teknologiasta. Teknologioita yhdistää muun muassa se, että niitä kaikkia voidaan käyttää sähköenergian kanssa. Tämä on tärkeää, koska tutkittavat laitokset toimivat sähköenergialla.



Kuva 1: Sähköenergian varastointi, mukailten [1]

Tarjolla olevista teknologioista otetaan tarkasteluun vain parhaiten sopivat vaihtoehdot. Näitä ovat eri akkuteknologiat, superkondensaattori ja vauhtipyörä. Nämä kaikki mahtuvat suhteellisen pieneen tilaan ja niillä on suhteellisen suuri energiatiheys tai tehotiheys [1]. Lisäksi näistä kaikista löytyy toteutettuja energiavarastoja erilaisiin sovelluksiin. Akut ovat pitkälle kehittynyt teknologia ja niitä on useaa eri tyyppiä. Ne ovat myös helposti siirrettäviä ja omaavat hyvän hyötysuhteen. Superkondensaattori on akun kaltainen ratkaisu, jolla on paljon pienempi energiatiheys ja suurempi tehotiheys kuin akulla. [2], [3]. Vauhtipyörässä energiaa varastoidaan mekaanisesti pyörivään vauhtipyörään moottorin kautta, joka toimii myös generaattorina, kun varastoitua energiaa tarvitaan [4].

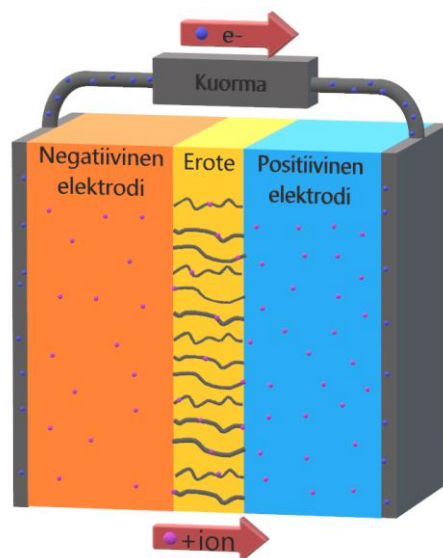
2.2 Akkujärjestelmä

Akkuja käytetään monipuolisesti ja ne ovat osa jokapäiväistä arkea niin teollisuudessa kuin ihmisten arjessa. Akkujen tehtävä on tuottaa energiaa erilaisille laitteille matkapuhelimista autoihin. Akkujen käyttö teollisuudessa on tuntemattomampi aihe monelle. Tiedetään, että monet työkalut toimivat akuilla ja nykyään työkoneiden käynnistystä helpottavat akut. Akuille löytyy monia yksinkertaisia sekä monimutkaisempia sovelluksia teollisuuden maailmassa. Tässä osiossa akulla viitataan asiaan, joka varastoi energiaa sähkökemiallisesti.

Akun toiminta perustuu sähkökemialliseen reaktioon, jonka avulla voidaan muuttaa sähköenergia kemialliseksi energiaksi ja siten se voidaan varastoida pitkiksikin ajoiksi myöhempää käyttöä varten. Akut koostuvat neljästä kemiallisesti tärkeästä osasta, jotka ovat positiivinen elektrodi, negatiivinen elektrodi, elektrolyytti ja erotin. Elektrodit ja erotin on

kuvattu Kuvassa 2. Akkua ladattaessa positiivinen elektroni hapettuu, eli se menettää elektroneja, ja negatiivinen elektrodi pelkistyy, eli se vastaanottaa elektroneja. Kun akkua puretaan, positiivinen elektrodi pelkistyy ja negatiivinen elektroni hapettuu. Positiivisen ja negatiivisen elektronin välillä on sähköinen potentiaali, joka johtuu elektronin materiaaleista. Sähköinen potentiaali, eli jännite saa aikaan elektronien liikkeen eli sähkövirran. [3] Akun purkautuessa elektronit kulkevat negatiiviselta elektrodilta positiiviselle elektrodille ja tällöin virran suunta on positiiviselta elektrodilta negatiiviselle elektrodille. Akkua ladataessa täytyy virtapiiriin lisätä jännitelähde vastakkaissuuntaan, jonka jännite on suurempi kuin akun jännite, jotta elektronit voivat kulkea takaisin negatiiviselle elektrodille [3].

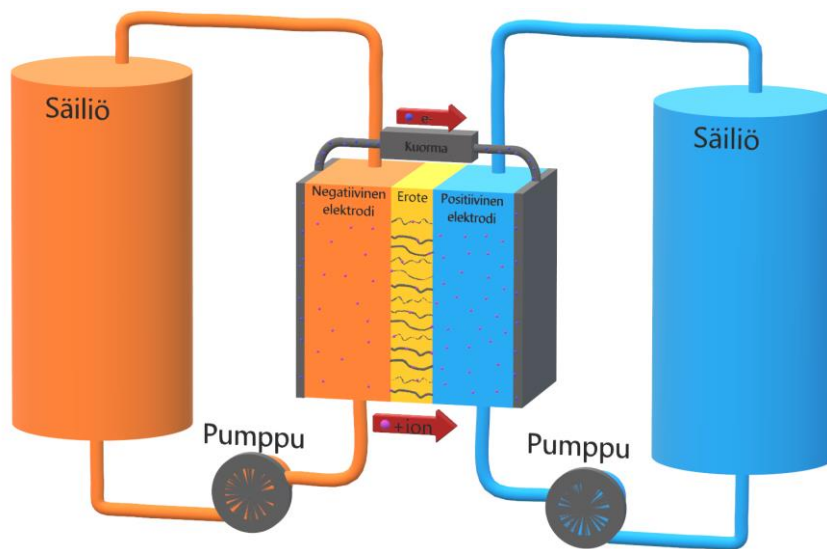
Akun rakenne pyritään pitämään mahdollisimman pienenä ja samalla pyritään saamaan mahdollisimman suuri energiamäärä varastoitua. Tämän takia akkujen positiiviset elektrodit ja negatiiviset elektrodit on laitettu mahdollisimman lähelle toisiaan. Jotta elektronit liikkuisivat vain virtapiirin kautta, täytyy akun sisällä elektronien liike estää erottimen avulla. Kuvassa 2 keltaisella värillä olevan erottimen tehtävä on siis estää oikosulku elektrodien välille. Toinen tärkeä ilmiö, joka tapahtuu akun sisällä, on ioninen liike. Ionit tasapainottavat varauseron elektrodien välillä, eikä akku toimisi ilman ionienkin liikettä. Nämä ionit voivat joko olla negatiivisia, positiivisia tai molempia, riippuen akussa käytettävistä materiaaleista. Ionit tarvitsevat liikkumiseen väliainetta, jossa ne voivat liikkua. Tätä väliainetta kutsutaan elektrolyytiksi ja se on tyypillisesti neste, joka pystyy imeytymään elektrodien ja erottimen rakenteessa oleviin huokosiin. Ionien liikkuminen mahdollistuu elektrolyytin seassa erottimen läpi, mutta elektronit eivät pääse liikkumaan elektrolyytin seassa, joten ne liikkuvat virtapiirin kautta (Kuva 2). [3]



Kuva 2: Akun rakenne, jossa nähdään positiivisten ionien ja elektronien liike akkua purettaessa

Akkujen erot johtuvat niihin käytettävistä materiaaleista ja siitä, miten ne asetellaan. Elektrodiin materiaali vaikuttaa merkittävästi akun tuottamaan jännitteeseen ja siihen, kuinka nopeasti akku pystyy latautumaan ja purkautumaan. Eri elektrodipareja on lukuisia ja niitä kehitetään jatkuvasti, mutta yleisimpiä ovat lyijy Akku, NiMH-akku ja Litiumioniakku (Li-ion). Edellä mainitut akut eroavat merkittävästi toisistaan niiden energia- ja tehosiheyden mukaan, koska niissä on käytetty eri materiaaleja. Seuraavaksi esitellään normaalin akun tavoin toimiva virtausakku.

Virtausakun toiminta perustuu samaan reaktioon kuin normaalin akun toiminta. Virtausakun merkittävin ero normaaliin akkuun verrattaessa löytyy sen elektrolyytistä. Normaalissa akussa energia on varastoitunut elektrodiin, mutta virtausakuissa energia on varastoitu elektrolyyttiin liuenneisiin sähkökemiallisiin aineisiin. Näitä sähkökemiallisia aineita voi olla useampikin liuenneena elektrolyyttiin. Elektrolyytit varastoidaan ulkoisiin säiliöihin, josta ne pumpataan kennoon, jossa kemiallinen reaktio tapahtuu. [1], [3] Säiliöt ja kenno johon putket tulevat säiliöstä voidaan nähdä Kuvassa 3. Kummankin säiliön elektrolyttineste pumpataan kennon omaan (positiiviseen tai negatiiviseen) elektrodiin, joka on huokoista materiaalia. Elektrodiin välissä on erotin, joka normaalin akun tapaan päästää ionit läpi tasapainottaakseen elektronien virtaamisesta aiheutuneen varauseron. [1] Virtausakun jännite riippuu reaktioon osallistuvista sähköaktiivisista aineista ja siitä, kuinka monta kennoa on kytketty sarjaan [2].



Kuva 3: Virtausakun rakenne

Suurena etuna virtausakuilla on tehon ja energia toisiinsa liittymättömyys. Virtausakun tuottama teho riippuu kennojen koosta ja lukumäärästä. Koska virtausakussa energia on varastoituneena elektrolyyttiin, sen energia riippuu varastoidun elektrolyytin määrästä,

eikä se liity sen tehoon. [1], [2] Näiden ominaisuuksien ansiosta virtausakku voidaan suunnitella ja optimoida suoraan sovelluksen luomien tehon ja energiatarpeen mukaan. Tämän lisäksi virtausakulla on hyvä käyttöikä, joka on 5–20 vuotta, ja suuri syklien määrä, joka on yli 10 000 sykliä [1], [3]. Virtausakku häviää muille akkuteknologioille sen pienellä energia- ja tehotehokkuudella. Virtausakkuteknologian energiatehokkuus on 15–50 Wh/kg luokkaa ja tehotehokkuus 0.5–2 W/L luokkaa. [1]

Lyijyakku on vanhin akkuteknologia ja se perustuu lyijyn hapettumis- ja pelkistymisreaktioon. Lyijyakku on turvallinen ja usein halvin akkuteknologia kaikista akkuteknologioista. Sen pitkä historia on johtanut hyvään kierrätysinfrastruktuuriin, mutta joidenkin mielestä akussa oleva lyijy on ympäristöriski. Tämä akkuteknologia on monelle tuttu autoteollisuudesta ja siellä sen yleisin käyttökohte löytyy. Autoissa lyijyakkuja käytetään esimerkiksi moottorin käynnistämiseen, koska se pystyy tuottamaan siihen tarvittavan virran. [3] Tätä akkuteknologiaa kuitenkin rajoittaa sen pieni energiatehokkuus, joka on noin 30–50 Wh/kg luokkaa. Lyijyakun tehotehokkuus voi olla 90–700 W/l välillä. [1], [3], [5] Lyijyakun käyttöikää saatetaan pitää lyhyenä, mutta jopa 15 vuoden käyttöikä on saavutettavissa lyijyakulla [1]–[3]. Lyijyakun hyötysuhde on 75–90 % [1].

NiMH-akku eli nikkelimetallihydridiakku on suhteellisen uutta teknologiaa sen tultua markkinoille vasta 1989. Merkittävimpinä kiihdyttäjinä NiMH-akun yleistymiselle oli sen käyttö sähköisessä liikenteessä sekä sen hyvät ominaisuudet korvata normaalit paristot. NiMH-akku perustuu nimensä mukaisesti nikkeliin ja metallihydridin reaktioon. Metallihydridi on vetyä sitova metalliseos. [3] NiMH-akun sekä energia- että tehotehokkuus on suurempaa kuin lyijyakulla. NiMH-akun energiatehokkuus on 40–110 Wh/kg välillä [1], [3] ja tehotehokkuus 80–200 W/L välillä [1]. Tämän teknologian yhtenä etuna on, että se toimii suurella lämpötila alueella (-30–70 °C) [3]. NiMH-akun käyttöikä on 5–10 vuotta ja hyötysuhde 65–75 %, jotka ovat muita teknologioita heikompia [1].

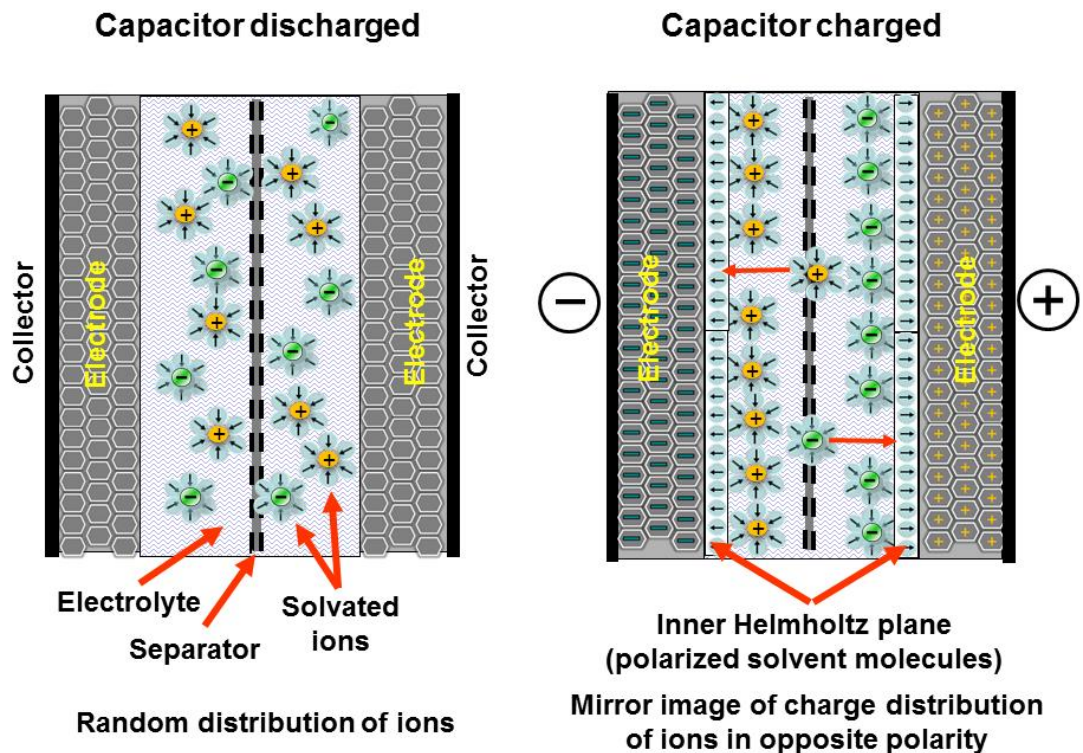
Li-ion eli litiumioniakun nimi viittaa suureen joukkoon eri kemioita, joita kaikkia yhdistää litiumionien siirtyminen elektrodien välillä [2]. Li-ion on yleistynyt sen suuren jännitteen ja hyvän energiatehokkuuden ansiosta. Suuremman jännitteen ansiosta akkupaketti tarvitsee vähemmän kennoja, mikä yksinkertaistaa sovellusta. [1] Kun kennoja laitetaan sarjaan, saadaan suurempi jännite, joka on tarpeen monessa sovelluksessa. Hyvän energiatehokkuutensa ansiosta Li-ion on loistava kannettaviin ja mobiileihin sovelluksiin. Li-ion energiatehokkuus on 60–235 Wh/kg välillä ja tehotehokkuus on 1300–10000 W/L välillä, riippuen siihen käytettävistä materiaaleista [1], [3]. Tämän akkuteknologian käyttöikä on 5–15 vuotta [1], [3], [5] ja hyötysuhde 85–98 % [1], [5]. Li-ion teknologiaa pidättelee sen turvallisuus ja kallis hinta muihin akkuteknologioihin verrattuna. Li-ionin tekee vaaralliseksi sen herkyys voimakkaalle tulipalolle, joka on erityisen hankala sammuttaa. Palavaa Li-ion akkua

ei voi sammuttaa vedellä, koska litiumin reagoiessa veden kanssa syntyy vetyä, joka palaa erityisen voimakkaasti. Li-ionin turvallisuutta on onnistuttu parantamaan vuosien varrella parantamalla akkujen laatua. Samalla teknologian yleistyessä, sen hinta on myös jatkuvasti tippunut. [3]

2.3 Superkondensaattori

Elektroniikassa kondensaattorin tehtävä on esimerkiksi suodattaa jännitepiikkejä ja varastoida energiaa. Normaalin kondensaattorin energiatiheys ei kuitenkaan ole riittävän suuri energiavarastointisovelluksiin. Superkondensaattorilla on huomattavasti suurempi energiatiheys ja se perustuu normaalin kondensaattorin toimintaan. Superkondensaattorin päätehtävä on varastoida ja purkaa energiaa. Superkondensaattorissa eli sähköisessä kaksikerroskondensaattorissa energia on varastoituneena kondensaattorin tapaan sähköenergiana. Tämän takia energian ei tarvitse muuttaa muotoa, joten superkondensaattorin purkausnopeus on todella nopea ja virta suuri. [1], [6] Tämä ansioista superkondensaattoreilla on todella suuri tehosiheys, joka mahdollistaa sen käytön suurta tehoa vaativissa sovelluksissa. Muita superkondensaattorin etuja ovat pitkä käyttöikä, huoltotarpeen vähäisyys, luotettavuus, kestävyys ja toiminta laajalla lämpötila-alueella [1].

Kuvassa 4 nähdään superkondensaattorin neljä pääosaa, joita ovat kaksi elektrodia, elektrolyytti ja erotin [6]. Toisin kuin kondensaattoreissa, eristeen sijasta kondensaattorin keskellä on elektrolyytti, joka mahdollistaa ionien kulun. Elektrodien välissä olevan erotteen tehtävä on estää oikosulku kuten akuissakin. Jotta ekvivalenttinen sarjavastus olisi mahdollisimman pieni, erottimen täytyy olla ohut ja todella huokoinen. [6] Elektrolyytti toimii kulkutienä ioneille, kun superkondensaattoria puretaan tai ladataan. Kun superkondensaattori on kokonaan tyhjä, positiiviset ja negatiiviset ionit ovat sekaisin elektrolyytissä. Kun se on ladattuna, positiiviset ionit kerääntyvät negatiivisen elektrodin pintaan ja negatiiviset ionit positiivisen elektrodin pintaan. [3] Nämä molemmat tilat on kuvattu Kuvassa 4. Todellisuudessa elektrodien rakenne on todella huokoista, joka suurentaa pinta-alaa elektrodin ja elektrolyytin välillä [3].



Kuva 4: Superkondensaattorin rakenne [7]

Vaikka monilla akkuteknologioilla on suurempi energiatiheys kuin superkondensaattorilla, sen tehoitehuys on yli kymmenen kertaa suurempi kuin Li-ion-akulla. Superkondensaattorin tehoitehuys on 40 000–120 000 W/L luokkaa ja energiatiheys 1–15 Wh/kg luokkaa. Tämän lisäksi superkondensaattorien syklien määrä ja käyttölämpötila on suurempi kuin akkuteknologioilla. [6] Superkondensaattorin syklien määrä voi ylittää kymmenestä tuhannesta miljoonaan sykliin [1], [3], [6]. Yleisesti superkondensaattori sopii sovelluksiin, joissa suuria tehoja tarvitaan usein [1], [6]. Superkondensaattoreita käytetään esimerkiksi mikroverkoissa, uusiutuvan energialähteen energianvarastoinnissa, nostureissa ja sähkö- sekä hybridautoissa [6]. Superkondensaattoria ei kannata käyttää pitkäaikaiseen energian varastointiin sen suuren itsepurkautumisnopeuden takia, joka on 20–40 % päivässä [8]. Lyhytaikaisella varastoinnilla superkondensaattori voi päästä 85–98 % hyötysuhteeseen [1].

Superkondensaattoreista on myös kehitetty energiatiheämpiä teknologioita, joita kutsutaan hybridisuperkondensaattoreiksi. Hybridisuperkondensaattori mahdollistaa akkumaisen energianvarastoinnin ja superkondensaattorimaisen tehollähteen. [6] Hybridisuperkondensaattorit voidaan jakaa kolmeen tyyppiin, jotka voidaan erottaa niiden

elektrodirakenteen mukaan. Näitä ovat komposiitti, epäsymmetrinen ja akkutyypinen hybridisuperkondensaattori. Näistä kolmesta lupaavin on akkutyypinen, jossa toinen elektrodeista korvataan akuissa käytettävällä elektrodilla. [9], [10] Hybridisuperkondensaattori mahdollistaa suuremman energiatihedden syklien määrää uhraamalla [9]. Akkutyypisellä litiumionikondensaattorilla on huomattavasti pienempi itsepurkautumisnopeus, joka on vain 5 % kolmea kuukautta kohden [11].

2.4 Vauhtipyörä

Vauhtipyörä käsitteenä on tuttu polttomootorien maailmassa. Moottorissa sen tehtävä on pitää moottori käynnissä ja tasoittaa väännön tuotto. Tässä asiayhteydessä ei sitä kyseisiin tarkoituksiin käytetä. Vauhtipyörä-energiavaraston tehtävä on varastoida sähköenergiaa vauhtipyörän liike-energiaan. Tämä tapahtuu lisäämällä vauhtipyörään roottori, jonka avulla vauhtipyörä voi toimia joko moottorina tai generaattorina. [1], [4]

Vauhtipyöräsysteemi koostuu tyhjiösäiliöstä, laakereista ja pyörivästä akselista, johon kuuluu vauhtipyörä ja sähkökone. Nämä voidaan nähdä Kuvassa 5. Pyörivä osa on tyhjiösäiliössä, jotta voidaan minimoida ilman aiheuttama kitkahäviö. Laakereina käytetään tarkasti rakennettuja kuulalaakereita sekä nopeammin pyörivissä vauhtipyörissä magneettilaakereita [3]. Magneettilaakereita käytettäessä laitteen pyörivä osuus levitöi [4]. Pyörivässä akselissa on vauhtipyöräosa, jonka tehtävä on lisätä inertiaa pyörivään akseliin. Vauhtipyörän inertia on

$$J = \frac{1}{2}mR^2 \quad (1)$$

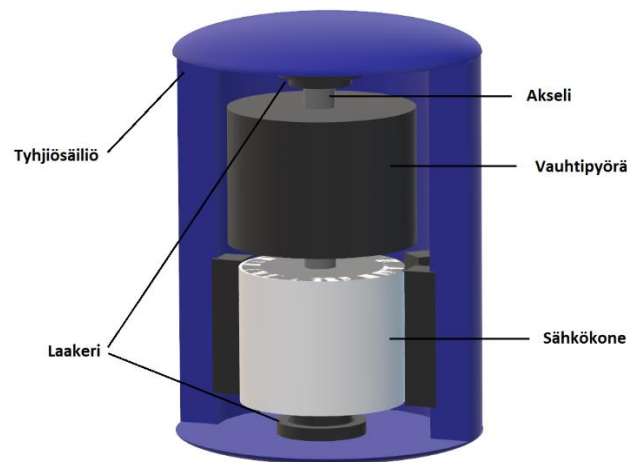
jossa m on vauhtipyörän massa ja R sen säde [12]. Kun lasketaan akselistoon varastoitunut energia, täytyy koko pyörivän akseliston inertia laskea. Kun inertia on tiedossa, saadaan pyörimiseen varastoituneen energia määrä laskettua

$$E = \frac{1}{2}J\omega^2 \quad (2)$$

jossa ω on akselin kulmanopeus [12]. Akseliin kuuluu myös sähkökoneosa, joka voi toimia sekä moottorina, että generaattorina. Kun sähköenergiaa halutaan varastoida, kiihdytetään vauhtipyörän pyörimisnopeutta sähkökoneen avulla [1], [4]. Niin kuin kaavasta 2 voidaan nähdä, tämä lisää energian määrää. Kun varastoitua energiaa halutaan käyttää, hidastetaan vauhtipyörän pyörimisnopeutta ottamalla pyörimisliikkeestä energiaa sähkökoneen avulla [1], [4].

Vauhtipyörät voidaan jakaa nopeisiin ja hitaisiin. Nopeat luokitellaan 10 000–100 000 rpm ja hitaat alle 6000 rpm [12]. Nopeilla vauhtipyörillä on suurempi energiatiheys, koska energiaa voidaan varastoida suuria määriä pyörimisliikkeeseen. Nopeilla vauhtipyörillä

on myös usein huonompi tehotehiys, koska suurien tehojen saanti nopeista pyörimisnopeuksista vaatii jäähdytystä ja sitä kautta kustannuksia. Tämän takia hitailla vauhtipyörillä voi olla suurempi tehotehiys. [12] Vauhtipyörän teho- ja energiatehiyden tarkkaa arvoa on hankala määrittää, koska näihin vaikuttavat monet asiat, kuten käytettävä materiaali, pyörimisnopeus, sähkökoneen tyyppi ja se, otetaanko muut laitteet mukaan laskeihin. Lähteiden [1], [13] mukaan vauhtipyörän tehotehiys on noin 40–5000 W/L välillä ja energiatehiys on noin 5–200 kWh/kg välillä. Tosin lähteen [14] mukaan jopa yli 1000 w/kg energiatehiyksiä on saavutettu ja samalla merkittävästi suurempia tehotehiyksiä. Vauhtipyöräteknologialla voidaan myös saavuttaa lyhyessä ajassa hyvä 70–95 prosentin hyötysuhde [1], [13]. Tämä johtuu teknologian suuresta itsepurkautumisnopeudesta, joka voi olla jopa 1,3–100 % per päivän luokkaa [13].



Kuva 5: Vauhtipyöräenergiavaran rakenne

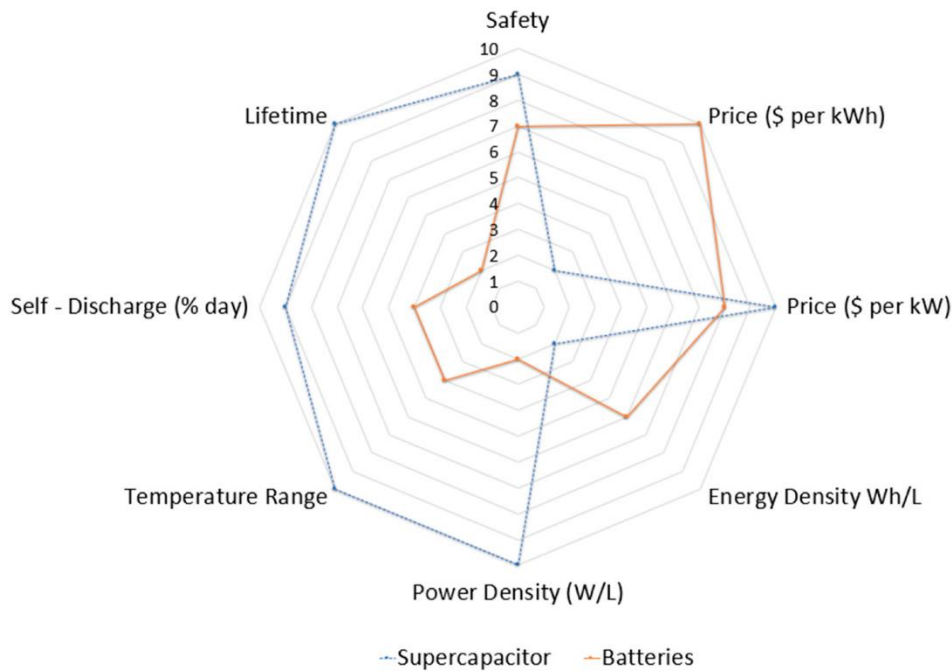
Vauhtipyörän merkittäviä etuja ovat sen pitkä käyttöikä ja suuri syklien määrä [1], [12]. Tulevaisuudessa merkittäviin etuihin voidaan mahdollisesti lukea mukaan myös suuri teho- ja energiatehiys [14]. Sen heikkouksia akkuteknologioihin verrattuna suuri itsepurkautumisnopeus [1]. Tämä takia vauhtipyörä ei normaalin superkondensaattorin tapaan sovellu pitkäaikaiseen energian varastointiin. Vauhtipyörän tehotehiys ei myöskään ainakaan vielä yllä superkondensaattorin tasolle, mutta sen se korvaa suuremmalla energiatehiydellä [1]. Vauhtipyörä on monella tapaa eräänlainen välimuoto akku- ja superkondensaattoritekniikoiden välille.

2.5 Energiavaranointitekniikoiden yhdistelmä

Riippuen sovelluksesta, tarvittavan energiavaran ominaisuudet vaihtelevat todella laajasti. Tämän takia on tärkeää tietää energiavaran ominaisuudet, jotta voidaan valita kaikista optimaalisin tekniikka tiettyyn sovellukseen. Aina tällaista ei kuitenkaan

löydy. Syynä voi olla teknologian energiatiheys, tehottiheys, koko, hinta tai vaikka käyttöikä. Tämänkaltaisessa tilanteessa voidaan harkita kahden tai useamman energiavara-
 rastointitekniikan käyttöä yhdessä. Tällainen yhdistelmä voi pidentää merkittävästi
 teknologioiden elinikää ja jopa hintaa. Se myös monimutkaistaa sovelluksen sähköpuo-
 len toteutusta. Tähän liittyviä ongelmia ja ratkaisuja esitellään osiossa 4.2. Seuraavaksi
 tarkastellaan edellä mainittujen energiavarojen yhdistelmiä.

Akkujen käyttö energiavaroista on jo todettu toimivaksi vaihtoehdoksi. Akkuteknologi-
 oissa on kuitenkin omat rajoitteensa. Akkuilla on rajoitettu syklien määrä ja tämä on moniin
 teknologioiden verrattuna suhteellisen pieni. Tämän lisäksi akkuteknologioiden tehotti-
 heys on rajallinen. Näitä akun heikompia ominaisuuksia voidaan korvata jollakin toisella
 teknologiolla. Kuvassa 6 esitellään akku ja superkondensaattori teknologioiden joitakin
 eroja. Siitä nähdään hyvin, kuinka nämä kaksi teknologiaa täydentävät toisiaan.



Kuva 6: Akun ja superkondensaattorin vertailu [5]

Lähteessä [5] on esitetty monia tutkimuksia akku-superkondensaattori yhdistelmästä. Tutkimukset ovat sellaisia, joissa tällaista hybridijärjestelmää on käytetty kuormanta-
 sarkukseen, verkon inertian ylläpitoon, uusiutuvan energialähteen tasaukseen ja moneen
 muuhun. Näihin mainittuihin käyttökohteisiin voitaisiin myös soveltaa yksittäistä energia-
 varastointitekniikkaa, mutta tällöin systeemin soveltuvuus kaikkiin osa-alueisiin kärsisi.
 Esimerkiksi superkondensaattori sopii suuren tehottiheydensä ja syklien määrän ansiosta
 paremmin huippukuormantasarkukseen kuin akkuteknologiat. Toisaalta akkuteknologia
 sopii paremmin pitkäaikaiseen energian varastointiin. [3] Tämän kaltainen yhdistelmä
 antaisi joustavuutta energiavarojen mitoittamiseen. Tällöin voitaisiin akkuteknologiaa

mitoittaessa keskittyä energian määrään ja superkondensaattoria mitoittaessa keskittyä hetkelliseen tehoon. Tämän lisäksi superkondensaattoriteknologialla on suuri syklien määrä, joten superkondensaattori voisi toimia akun syklien suodattajana ja tällöin pidentää akun käyttöikä. Tämän lisäksi akun tehovaatimuksia voidaan laskea, joka nostaa akun hyötysuhdetta. [5] Superkondensaattorin huonon energiatiheuden takia se ei voi suodattaa kuin tietyn kokoisia energiapiikkejä akulta.

Aikaisemmin todettiin, että vauhtipyörä on eräänlainen välimuoto akun ja superkondensaattorin välillä. Tämä johtuu siitä, että vauhtipyörän ominaisuudet ovat monella tapaa akku- ja superkondensaattoriteknologian välillä. Voisiko akku ja vauhtipyörä yhdistelmä olla parempi kuin akku ja superkondensaattori yhdistelmä? Vauhtipyörätekniikan yhtenä etuna akkuteknologioihin on sen parempi syklien stabiilisuus. Vauhtipyörällä voi myös olla hyvä tehoteho ja energiatiheys. Superkondensaattoria paremman energiatiheuden ansiosta vauhtipyörä voisi sopia suurempien energiamäärien suodattamiseen akulta. Tämä pidentäisi akun käyttöikä ja vähentäisi kapasiteetin katoamista. Tutkimuksessa [15] todettiin simuloimalla, että yhdistämällä vauhtipyörä ja lyijyakku saatiin laskettua energiavaraston hintaa, kun verrataan pelkkään lyijyakkuun. Vauhtipyörän avulla lyijyakun käyttöikä saatiin pidennettyä, joka vähensi systeemin hintaa pitkällä aikavälillä. Toisessa tutkimuksessa [16] simuloitiin kahden eri akkuteknologian yhdistelmää vauhtipyörän kanssa. Nämä teknologiat olivat lyijyakku ja Li-ion-akku. Tutkimuksessa osoitettiin merkittäviä parannuksia molempien akkuteknologioiden käyttöikä, kun ne toimivat vauhtipyöränenergiavaraston kanssa.

Vauhtipyörä- ja superkondensaattoriteknologia omaavat suuren itsepurkautumisnopeuden, joka huonontaa niiden hyötysuhdetta, varastoidessa energiaa pitkälle ajalle. Tämän lisäksi näillä teknologioilla on monia samankaltaisuuksia, joten ne eivät täydennä toisiinsa niin hyvin kuin muut yhdistelmät. Esimerkiksi molemmilla on jo suuri syklien määrä, joten yhdistelmä ei merkittävästi parantaisi toistensa elinikä. Samankaltaisuuksista huolimatta tutkimuksessa [17] yhdistettiin vauhtipyörään superkondensaattori. Superkondensaattorit liitettiin vauhtipyörän pyörivään osaan, jolloin ne tulivat osaksi pyörivää massaa. Tämä paransi tämän energiavaraston tehon tuottoa. Tämän lisäksi sen teho- ja energiatiheys suureni, koska osa vauhtipyörän massasta varastoi sähköenergiaa. Tämä osoittaa, että tietyntyyppinen näiden teknologioiden yhdistelmä voi olla hyödyllinen.

Virtausakun yhtenä etuna muihin teknologioihin on tehon ja energian toisiinsa liittymättömyys. Täten virtausakku voidaan suunnitella optimaalisesti haluttuun sovellukseen. Tehon lisääminen virtausakussa tapahtuu lisäämällä kennoja systeemiin, joka pienentää energiatheyttä systeemissä. Tämän lisäksi virtausakuteknologian tehoteho on teknologioiden pienimmästä päästä. Tämän takia voidaan todeta, että virtausakku ei ole tila-

ja kustannustehokas ratkaisu suurta tehoa vaativiin sovelluksiin. Yhdistämällä superkondensaattori tähän systeemiin, voidaan mahdollisesti tuoda järkevämmän tehoa energia-varastoon. Tällöin energiavaraston tilavuus ja paino eivät kärsisi niin paljon tehon lisäyksestä. Niin kuin normaalin akun tapauksessa, superkondensaattori voi pidentää virtausakun käyttöikä. Tosin virtausakussa tämä etu ei välttämättä ole niin merkittävä, koska virtausakku kestää suuria määriä käyttösyklejä.

2.6 Dieselmoottori, generaattori ja hyötysuhde

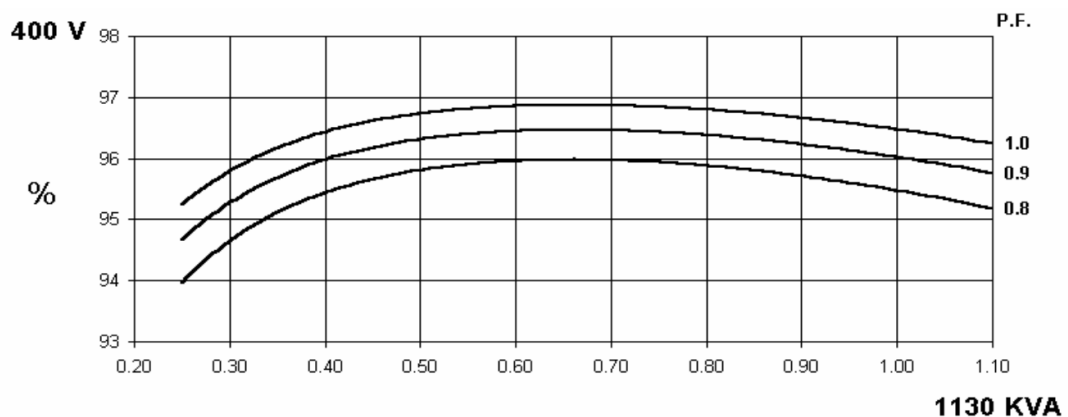
Dieselmoottori on yli sata vuotta vanha keksintö ja sitä käytetään edelleen lukuisissa sovelluksissa. Tässä työssä tarkastellaan sovellusta, jossa dieselmoottoria käytetään sähkökoneen pyörittämiseen. Tässä tapauksessa sähkökone on generaattori, joka tuottaa sähköä tuotantolaitokseen. Dieselmoottorin tehtävä on muuttaa dieselpolttoaineessa oleva energia liike-energiaksi. Kun polttoaineen energia on muutettu liike-energiaksi, se muutetaan generaattorin avulla sähköenergiaksi. Tämän koko systeemin tehtävä on siis muuttaa polttoaineessa oleva energia, laitoksessa käytettäväksi sähköenergiaksi. Moottorin akseli ja generaattorin roottori on mekaanisesti kiinnitetty toisiinsa. Generaattorin toimintatavan vuoksi dieselmoottori pyörii vakiopyörimisnopeudella 1500 rpm. Pyörimisnopeus perustuu Suomessa käytettävään 50 Hz taajuuteen ja generaattorin napalukujen määrään.

Dieselmoottorin yksi etu muihin moottoreihin verrattuna on sen suhteellisen hyvä hyötysuhde, joka on 40 % luokkaa tai joissakin sovelluksissa jopa 50 % [18]. Tämän ansiosta dieselmoottori on yleistynyt monissa sovelluksissa, joissa tarvitaan mekaanista energiaa. Monessa sovelluksessa dieselmoottori käytetään vaihtelevalla kierroslukualueella, kuten autoissa. Vakiokierrosluku käyttäjä on esimerkiksi generaattori, pumppu ja puhalluskäytöt. Tällöin moottorin säätimen tärkein tehtävä on ylläpitää haluttu kierrosluku moottorissa ohjaamalla polttoaineen ja ilman syöttöä.

Dieselmoottori ei kuitenkaan pysty täydellisesti seuraamaan haluttua kierroslukua kuorman muutostilanteissa. Tämä johtuu moottorin hitaudesta reagoida kuorman muutoksiin muun muassa kahdesta syystä. Ensimmäinen näistä johtuu turbosta, jonka tehtävä on nostaa syötetyn ilman painetta. Tämä parantaa moottorin palamisreaktiota ja hyötysuhdetta. Turbo saa energiansa pakokaasusta, joten moottorin pakokaasun määrä vaikuttaa turbon toimintaan. [18] Tästä syystä turbon tuoma lisäteho tulee viiveellä, kun moottorin kuorma nousee yhtäkkiä. Moottorin täytyy ensin lisätä polttoaineen syöttöä, joka lisää pakokaasuja, mikä taas lisää turbon painetta. Olisiko mahdollista laskea polttoaineen kulutusta välttämällä tämä tilanne, jossa polttoainetta lisätään äkillisesti ilman turbon antamaan lisäpainetta? Toinen syistä riippuu moottorin sylintereiden määrästä ja moottorin

asennosta, kun kuorman muutos tapahtuu. Moottorin sylinterien määrä vaikuttaa siihen, kuinka usein työtä tehdään moottorissa. Moottorin asento vaikuttaa siihen, milloin työtä tehdään seuraavan kerran. [19] Tällöin suurempi määrä sylintereitä tai suurempi kierros-luku tarkoittaa pienempää viivettä moottorissa. Tässä työssä tutkittavissa dieselmootto-reissa sylintereitä on 12 kappaletta.

Generaattori on laite, joka muuttaa mekaanisen energian sähköenergiaksi. Generaattorin toiminta perustuu magneettikentän aiheuttamaan sähkövirtaan. Faradayn induktiolaki kertoo, että johtimeen, joka on muuttuvassa magneettikentässä, indusoituu jännite. Tämä jännite aiheuttaa sähkövirran, joka pyrkii vastustamaan magneettikentän muu-tosta. [20] Generaattorin tapauksessa jännite indusoituu staattorissa oleviin käämityk-siin. Muuttuva magneettikenttä luodaan roottorilla. Roottoriin magneettikenttä luodaan käämityksillä, jotka sijaitsevat roottorissa. Käämityksiin syötetään tasavirtaa harjojen ja liukurenkaiden kautta, joka luo magneettikentän. Kun roottori pyörii, se luo staattorin kää-mitykseen muuttuvan magneettikentän, josta indusoituu jännite staattoriin. Tämän in-dusoituneen jännitteen taajuus riippuu roottorin pyörimisnopeudesta ja generaattorin na-pojen määrästä. [20] Tässä työssä tutkittavien generaattorien napaluku on neljä. Tällöin roottorin pyöriessä 1500 rpm syntyy 50 Hz taajuisia sähköä. Generaattorin hyötysuhde on tyypillisesti yli 90 % luokkaa. Laitoksissa käytettävissä generaattoreissa valmistaja tarjoaa teknisen tietolomakkeen, josta saadaan Kuva 7. Tämä Kuva kertoo generaattorin hyötysuhteen eri kuormitus ja tehokerroin arvoilla. Siitä voidaan huomata, että generaat-torin hyötysuhde on parhaimmillaan 60–70 % kuormituksella ja huonoimmillaan matalilla kuormituksilla.



Kuva 7: Generaattorin hyötysuhde käyrä [21]

Työn tarkoituksena on selvittää, kuinka voidaan tuottaa sähköenergiaa tehokkaammin. Diesel generaattorille ei ole löytynyt tai tule löytymään korvaajaa lähitulevaisuudessa. Siksi yksi tärkeistä asioista on selvittää, voidaanko diesel generaattorin hyötysuhdetta

parantaa energiavaraston avulla. Hyötysuhdetta kuvaa se, kuinka monta litraa polttoainetta on kulutettu tuotettua sähköenergiaa kohden. Parantamalla dieselmoottorin polttoaineenkulutusta, voidaan parantaa diesel generaattorin hyötysuhdetta. Dieselmoottorin polttoainekulutuksen parantamiseksi on ehdotettu vaihtuvan nopeuden käyttöä dieselmoottorissa. Tällöin moottori voisi toimia optimaalisella kierroslukualueella tarvittavaan tehoon nähden. Tämä johtaa siihen, että tuotettu sähköön taajuus vaihtelisi kierroslukujen mukaan. Taajuus muutettaisiin 50 Hz taajuusmuuttajalla, jolloin systeemiin tulisi lisää monimutkaisuutta. [22] Tällaisen järjestelmän sähköverkon inertia myös kärsisi, koska sähköverkko ei ole suoraan kytkettynä generaattoriin. Tämä voi johtaa taajuuden suurempaan vaihteluun systeemissä.

Monessa tutkimuksessa ehdotetaan aurinkopaneelien lisäämistä systeemiin ja testataan sen hyötyjä. Tämä varmasti vähentäisi aurinkoisina päivinä polttoainekulutusta. Tämä työ ei kuitenkaan ota liiemmin kantaa aurinkopaneelien tuomaan etuun. Aurinkopaneelien etu on vaihtelevaa ja laitokset ovat usein syvälle kaivetussa kivimontuissa, joka lisäksi rajoittaa aurinkopaneeleista saatavaa hyötyä. Työssä halutaan löytää tapoja parantaa diesel generaattorilla tuotetun sähköön hyötysuhdetta, koska sitä ei ole tällaisessa aihepiirissä vielä laajasti tutkittu. On kuitenkin huomautettava, että mikäli tällainen energiavarasto parantaisi diesel generaattorin hyötysuhdetta, olisi myös järkevää lisätä aurinkopaneeleja systeemiin. Tällöin voitaisiin maksimoida energiavaraston hyödyt ja vielä ennestään vähentää laitoksen polttoainekulutusta.

3. TARKASTELTAVAN LAITOKSEN MALLINNUS JA VAATIMUKSET

Tämän kappaleen tarkoituksena on selvittää laitoksen energian- ja tehontarve. Niiden avulla voidaan arvioida ja valita sopiva teknologia diesel generaattorin rinnalle. Tässä osiossa myös selvitetään malli tehontuoton ja polttoainekulutuksen välille. Sen avulla voidaan esimerkiksi arvioida, millä tehoalueella dieselmoottori on kaikista ekologisista. Lisäksi tätä mallia käytetään myöhemmin arvioidessa mahdollisia säästöjä polttoainekustannuksissa, kun systeemiin lisätään jokin energianvarastointiteknologia. Dataa kerätään ComAp laitteelta, joka saa mittausdataa dieselmoottorilta, generaattorilta ja sähköiseltä kiskolta. ComAp hoitaa kommunikoinnin dieselmoottorin ECU:n kanssa. ComAp laitteelta data lähetetään Revolution PI laiteelle, joka muokkaa datan muotoa ja lähettää sen OPC UA serverille. Sieltä data siirretään Influxdata alustalle. Influxissa voidaan tehdä kuvaajia, alustavaa laskentaa ja suodatusta datalle. Influx mahdollistaa myös datan viemisen esimerkiksi Matlabiin käsiteltäväksi. Matlabia käytetään mallin luontiin, verifiointiin ja vaatimusten määrittelemiseen.

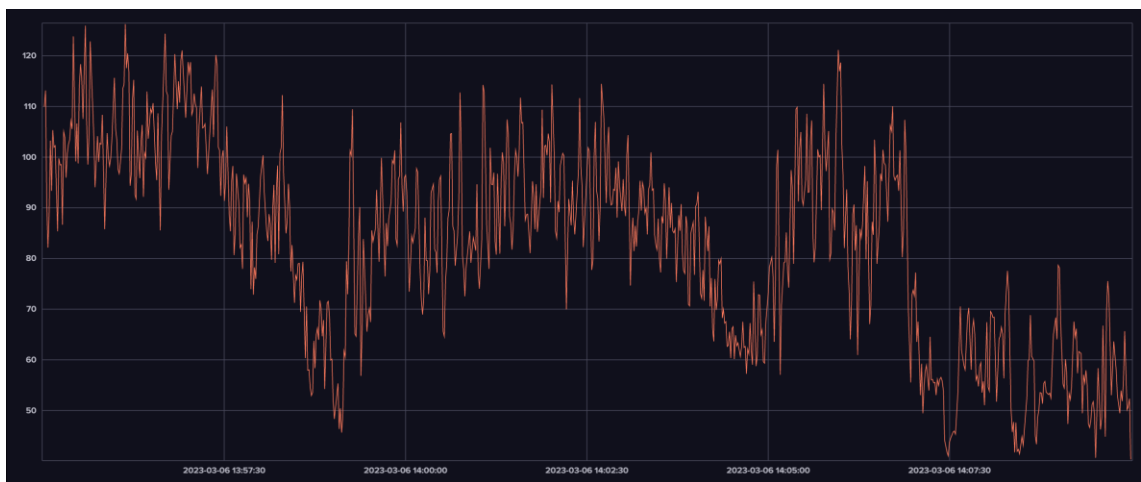
3.1 Dieselmoottorin ja generaattorin analysointi kuvaajista

Kuorman analysointi alkaa datan käsittelystä. Sitä varten esitellään useita kuvaajia, joissa on mittausdataa yhdestä laitoksista. Kuvaajista voidaan huomata joitakin ominaisuuksia laitoksen ja diesel generaattorin toiminnasta, mutta tarkempi analyysi vaatii matemaattista analyysiä ja mallinnusta. Kuvassa 8 nähdään tuotettu näennäisteho ja Kuvassa 9 nähdään polttoainekulutus tietyltä ajanjaksolta. Kuvassa 8 nähdään, kuinka paljon tuotettu teho vaihtelee laitoksessa. Tämä teho antaa suoran kuvan, kuinka paljon laitos käyttää tehoa. Tästä myös nähdään hyvä esimerkki laitoksen tehon vaihtelusta. Ajanhetken 13:57 ja 14:00 välissä olevan kuopan kohdalla tapahtuu suurehko tehon muutos. Kyseisessä kohdassa teho nousee 207 kVA (282–489 kVA) kahdeksan sekunnin aikana. Kuvassa 8 nähdään myös useita nopeita 100 kVA hyppyjä tehossa kumpaankin suuntaan. Tämä kertoo siitä, että kuorma vaihtelee huomattavan paljon.



Kuva 8: Tuotettu näennäisteho (kVA)

Kuvassa 9 nähdään hetkittäinen polttoainekulutus tuntia kohden. Kuvia 8 ja 9 vertailemalla voidaan nähdä, että kulutus nousee tuotetun tehon mukaan, joka on loogista. Kuvassa 8 aikaisempi mainitun tehon nousukohtaan aikana polttoainekulutus nousee noin 60 litraa (45–105 L/h), joten polttoainekulutus yli kaksinkertaistuu. Samaan aikaan tehon tuotto 1,73 kertaistuu, joten voidaan pohtia mihin tämä poltetun polttoaineen energia on mennyt? Polttoainekulutus myös myötäilee tuotetun tehon nopeaa vaihtelua, eli saman kaltainen hajonta on nähtävissä molemmissa kuvaajissa.



Kuva 9: Polttoainekulutus (L/h)

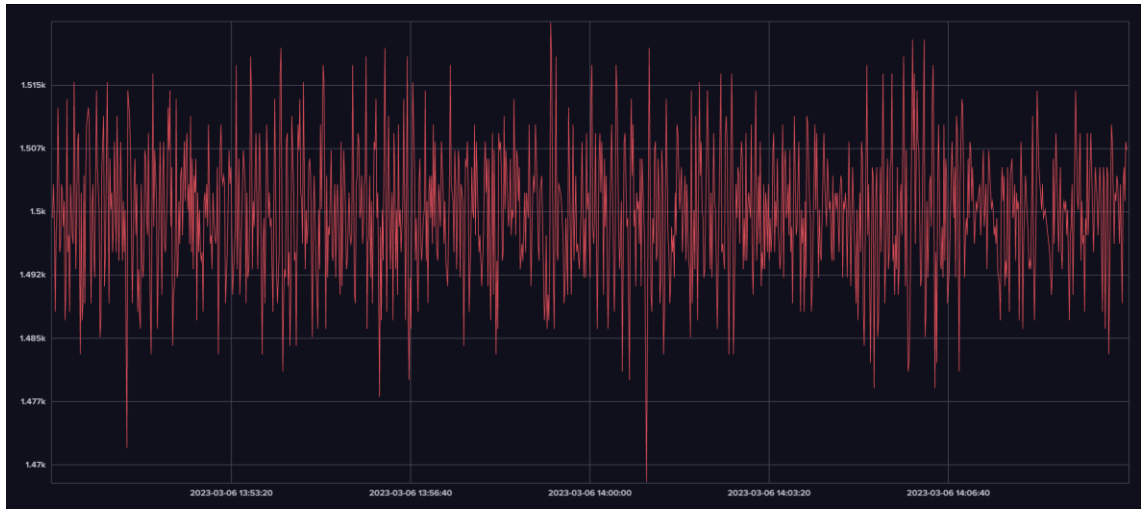
Moottorin tehtävä oli ylläpitää haluttu 1500 rpm kierrosluku, joka tuottaa 50 Hz taajuuden. Tämän se tekee säätämällä polttoaineen- ja ilmansyöttöä kuormituksen mukaan. Moottorin tuottamaa mekaanista energiaa kuluttaa generaattori, joka muuttaa sen sähköenergiaksi laitoksen kuormituksen mukaan. Tilanne, jossa generaattorin kuormitus on pienempää, kuin moottorilla tuotettu mekaaninen teho, johtaa se moottorin kierrosluvun nousuun. Tilanne, jossa kuormitus on suurempaa, johtaa se kierrosluvun laskuun. Tämä kierrosluku on suoraan verrannollinen tuotetun sähkön taajuuteen.

Aikaisemmin todettiin, että dieselmoottorilla on hidas dynamiikka useasta syystä. Tämä johtaa siihen, että moottorin tuotettu teho ei voi täydellisesti vastata nopeasti muuttuvaan laitoksen kuormaan. Tämän seuraus voidaan nähdä Kuvassa 10, jossa taajuus heittelee 49,3–50,8 Hz välillä. Siitä nähdään, että moottori joutuu jatkuvasti säätämään polttoainesyöttöä pitääkseen taajuuden hallinnassa. Aikaisemmin mainitussa 207 kVA hypyn kohdalla nähdään myös taajuudessa muutoksia. Aluksi taajuus tippuu 49,5 Hz ja nopeasti tämän jälkeen nousee 50,6 Hz ja hetken päästä jopa 50,8 Hz. Tämä viittaisi siihen, että aluksi moottori alkoi hieman myöhässä nostamaan mekaanista tehoa. Mahdollisesti tämän myöhästymisen takia tehoa nostettiin liikaa, joka johti kierrosluvun ja samalla taajuuden nousuun.



Kuva 10: *Generaattorin tuotetun sähkön taajuus (Hz)*

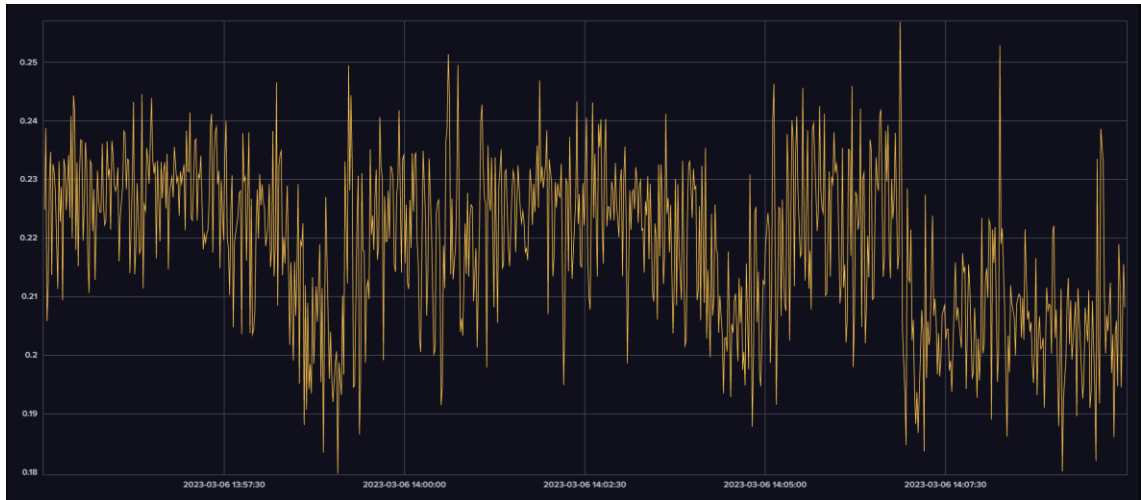
Hieman tarkempaa kuvaa taajuudesta antaa moottorin kierrosluku, koska sen mittaus on yhden desimaalin tarkempi. Tämä on tärkeää varsinkin, kun dataa ruvetaan käsittelemään. Kuvassa 11 nähdään moottorin kierroslukumittaus, joka käyttäytyy taajuuden mukaan. Tästä kierrosluvusta voidaan yksinkertaisesti laskea myös taajuus, joka on sama kuin generaattorin sähköntaajuus.



Kuva 11: *Dieselmoottorin pyörimisnopeus (RPM)*

Kuvaan 12 on laskettu kulutuksen ja energian suhde. Kuvaajan yksikkö on litraa per kilowattitunti ja se kertoo, kuinka monta litraa polttoainetta on käytetty yhden kWh tuottamiseen. Sen avulla voidaan arvioida moottorin hyötysuhdetta. Tämä noin 0,2 L/kWh kulutus vastaan noin 50 % hyötysuhdetta, kun laskennassa käytetään 10 kWh/L energiamäärää dieselöljylle. Tämä vaikuttaa liian suurelta, koska tämä hyötysuhde olisi nimittäin dieselmoottorin ja generaattorin yhteinen hyötysuhde. 0,23 L/kWh kulutuksella hyötysuhde on 43 % luokkaa, joka alkaa olemaan hieman uskottavampi. Voi siis olla, että polttoainekulutuksen mittari ei ole täysin tarkka. Tämän lisäksi lämpötila tuolloin on ollut -1 °C ja -6 °C välillä, joten polttoaineen energiasisältö on ollut hieman suurempi.

Aikaisemmin huomattiin, kuinka taajuus heitteli 200 kVA tehon nousun kohdalla. Aluksi taajuus tippui 49,3 Hz ja tämän jälkeen se nousi 50,8 Hz. Tämä hyppy nähdään myös hyppynä L/kWh suhteessa. Tämä hyppy kertoo, että polttoainetta kulutetaan enemmän, kuin tehoa tuotetaan generaattorilla. Niin kuin aikaisemmin todettiin, tämä johtaa taajuuden nousuun, joka nähdään heti hypyn jälkeen. Mielenkiintoista on se, mitä tapahtuu L/kWh suhteelle tämän hypyn jälkeen. Se tippuu välittömästi huomattavan määrän, koska nyt suuremman kierrosluvun ansiosta diesel generaattorilla on hieman ylimääräistä kineettistä energiaa. Tämä ylimääräinen kineettinen energia hetken ajan ylläpitää generaattorin sähköntuottoa, kun dieselmoottori pyrkii vähentämään kierroslukua vähentämällä polttoaineensyöttöä. Esimerkiksi tästä voi johtua hetkellinen näennäinen parempi hyötysuhde. On myös mielenkiintoista nähdä, että matalammilla tehoilla litraa per kWh suhde on pienempää kuin korkeammilla tehoilla. Tämä viittaisi siihen, että suurilla tehoilla diesel generaattorin hyötysuhde kärsii hieman.



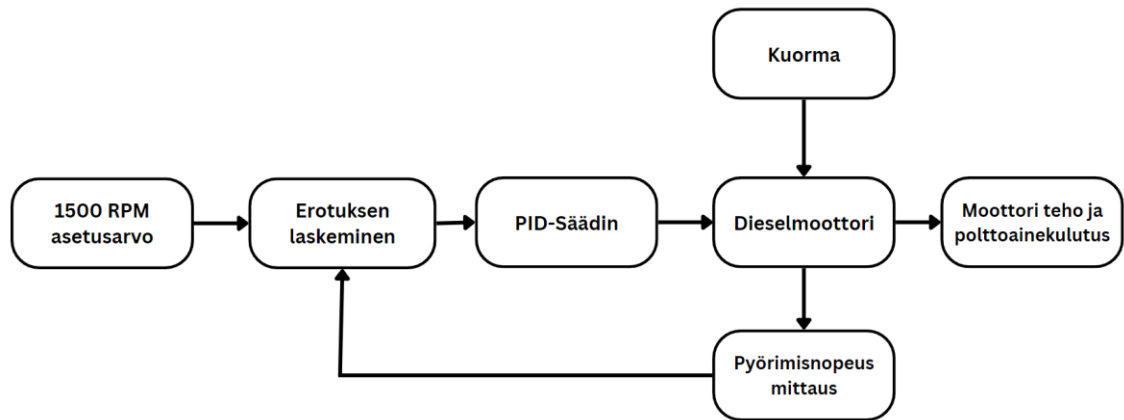
Kuva 12: Litraa per tuotettu energia (L/kWh)

3.2 Systeemin malli

Tässä osiossa tehdään malli generaattorilta tuotetun tehon ja polttoainekulutuksen välille. Mallin tavoite on antaa mahdollisuus tutkia polttoainekulutusta, kun systeemiin lisätään energiavarasto. Mallin on tärkeää olla mahdollisimman tarkka, jotta voidaan hyvin tutkia korkea taajuisista vaihtelua tehontuotossa. On myös tärkeää, että malli ei ole liian tarkka tai monimutkainen, jotta simulointien laskenta-ajat eivät kärsi liikaa. Tuotettua mallia verrataan mittausdataan, verifioidaksemme mallin hyvyyttä. Malli rakennetaan Matlabin Simulink työkaluun, johon voidaan myös myöhemmin rakentaa energiavarasto. Mallissa ei mallinneta generaattoria tarkasti, koska sillä ei ole merkittävästi vaikutusta diesel generaattorin hyötysuhteeseen. Mallissa otetaan kuitenkin huomioon generaattorin vaihteleva hyötysuhde eri kuormituksilla.

Mallin teko aloitetaan dieselmoottorin mallinnuksesta. Tähän on käytetty Simscape kirjastoa, joka sisältää lukuisia valmiita malleja mekaanisille ja sähköisille laitteille. Ensimmäisen mallin lohkokaavio on Kuvan 13 mukainen. Diesel moottorin mallintamiseen on käytetty Generic Engine -palikkaa. Tämä yksinkertaistaa huomattavasti mallin toteutusta. Kuorma on toteutettu ideaali väännöllä, joka on moottorin tuottamaan vääntöä vastaan. Tämä ideaali vääntö on Simscapen tavoin mekaanisesti yhdistetty moottoriin. Lohkokaaavion PID-säätimen tehtävä on säätää ”kaasua” siten, että haluttu 1500 kierrosluku säilyy. Simscapen Generic Engine -mallista saadaan ulos moottorin tuottama teho ja polttoainekulutus, jota käytetään mallin verifiointiin. Tämän Generic Engine -palikka tarvitsee lukuisia arvoja toimiakseen halutulla tavalla. Nämä arvot on pääosin selvitetty testaamalla, mikä antaa vastaavia tuloksia kuin mittausdata. Mallin rakentamiseen ja testaamiseen on käytetty mittausdatasta saatua generaattorin tuottamaa pätötehoa. Tästä

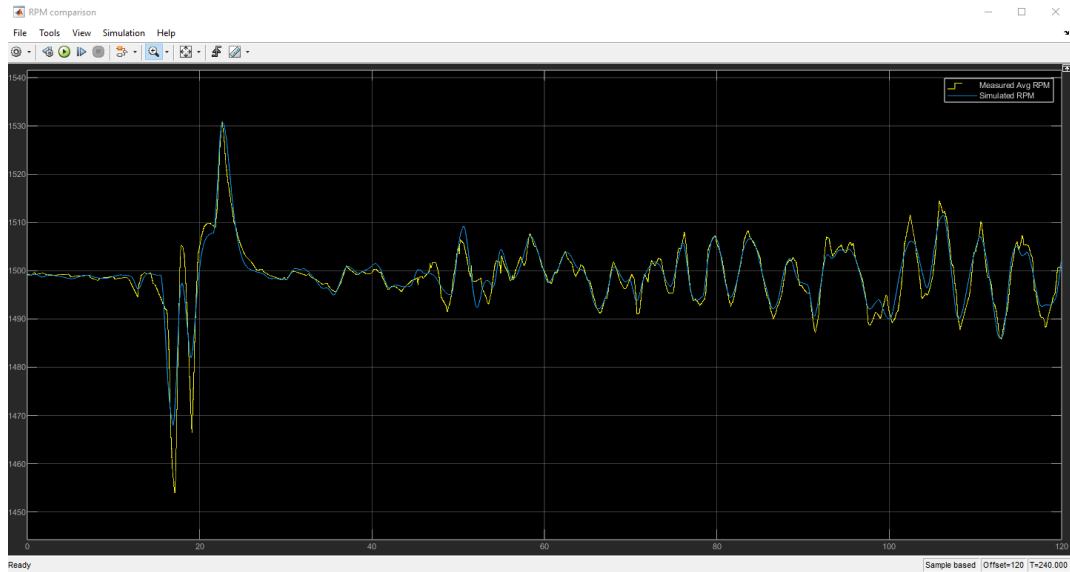
on laskettu moottorille aiheutuva pätöteho ja sitä kautta vääntö, jota nimitetään lohko-kaaviossa nimellä kuorma. Moottorin pyörimisnopeus saadaan Simscapen Ideal Rotational Motion Sensor -palikan avulla.



Kuva 13: Dieselmoottorin mallinnus lohkokaavio

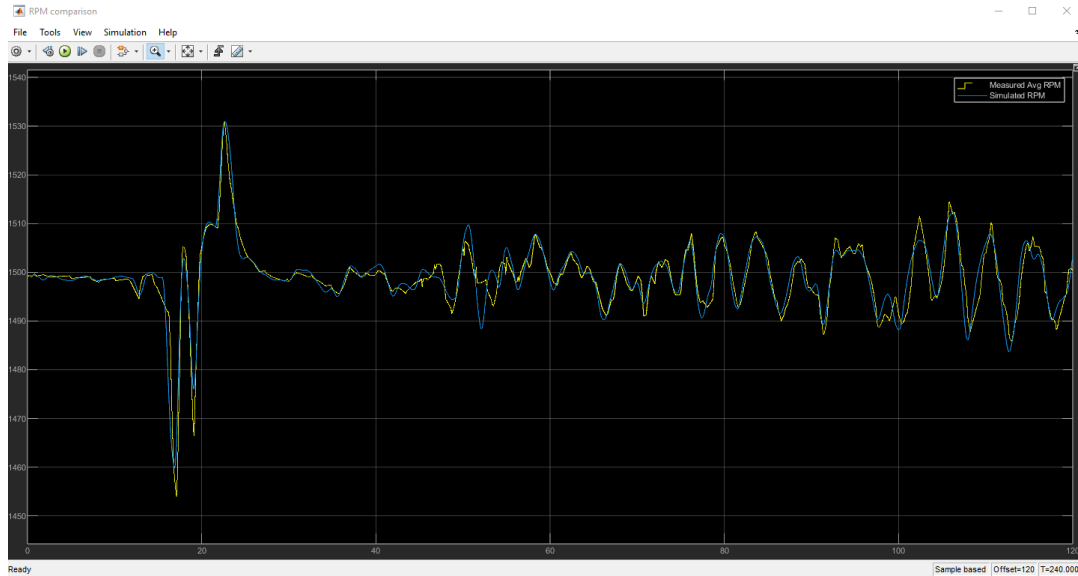
Kuvan 14 mukaisiin tuloksiin päästiin kierrosluvuissa mallin avulla, josta nähdään, että tietyiltä osin malli seuraa mittausdatan mukaista käytöstä. Mallia tehdessä kuitenkin huomattiin, että täysin samankaltaisia tuloksia, kuin mittausdatassa, oli hankala saavuttaa. Dieselmoottoria käsittelevässä osassa todettiin, että turbo aiheuttaa viivettä reagoida kuorman muutoksiin. Turbon aiheuttama viive vaikuttaa nimenomaan tilanteissa, jossa moottorin kuorma kasvaa, eli polttoaineen syöttö kasvaa. Tällöin turbon luoma lisäpaine tulee viiveellä, joten paras mahdollinen hyötysuhdekin tulee hieman viiveellä. Kuvasta 14 huomataan, että mallin kierrosluvut eivät alimmissa kierrosluku tilanteissa seuraa mittausdatan mukaisia kierroslukuja. Tästä syystä on siis syytä epäillä, että Generic Engine

-palikka ei sisällä turbon aiheuttamaan lisäviivettä. Asiasta ei myöskään lukenut Generic Enginen -dokumentaatiossa, joten sitä ei ole varmasti mallinnettu.



Kuva 14: Mitattu kierrosluku (keltainen) ja simuloitu kierrosluku (sininen)

Turbon aiheuttama lisäviive vaikuttaa tehon tuottoon ja hyötysuhteeseen systeemissä. Tästä syystä on oleellista mallintaa se malliin. Koska turbon aiheuttama viive huonontaa hetkellisesti moottorin hyötysuhdetta, on se mallinnettu lisäkuormana moottorille. Lisäkuorma lasketaan kaasun positiivisesta derivaatasta. Derivaatasta lasketaan tietyn ajan mittainen keskiarvo ja tämän jälkeen se skaalataan oikeaksi. Kuvassa 15 nähdään simulaation ja mittauksen kierroslukuvertailu, kun turbon aiheuttama lisäviive on mallinnettu. Malli seuraa paremmin alaspäin tapahtuvia kierroslukukuoppia ja tämän jälkeen tapahtuvia kierroslukupiikkejä, jotka johtuvat osittain säädön yliampumisesta. Malliin tuli myös hieman ylimääräistä värähtelyä. Tämä värähtely on hyväksyttävää, koska mallin kierrosluku seuraa nyt merkittävästi paremmin mittausdataa kuopissa. Tämä on tässä työssä oleellista polttoainekulutuksen kannalta, koska näissä kuopissa tapahtuu suurimmat tehon lisäykset, joita energiavarastolla pyritään suodattamaan.



Kuva 15: Mitattu kierrosluku (keltainen) ja simuloitu kierrosluku (sininen) mallin päivittämisen jälkeen

Seuraavaksi mallin polttoainekulutus täytyy saada kohdalleen mittausdatan kanssa. Tähän käytettiin apuna moottorin datalehteä, joka kertoo polttoainekulutuksen määrän eri tehoalueilla. Tehoista tehtiin vektori ja ne muunnettiin vääntömomentiksi. Koska General Engine -palikka vaatii, tehtiin pyörimisnopeuksista kolmen pituinen vektori. Seuraavaksi tehtiin matriisi, jonka sarakkeet vastasivat eri tehoarvojen polttoaineenkulutusta. Tämän matriisin rivit taas vastasivat eri kierroslukualueen polttoaineenkulutusta. Nämä kaksi vektoria ja matriisi on nähtävissä Kuvassa 16.

```

Speed_vector =
    1450.00    1500.00    1550.00

Power_vector =
    168.00    220.00    330.00    440.00    660.00    880.00

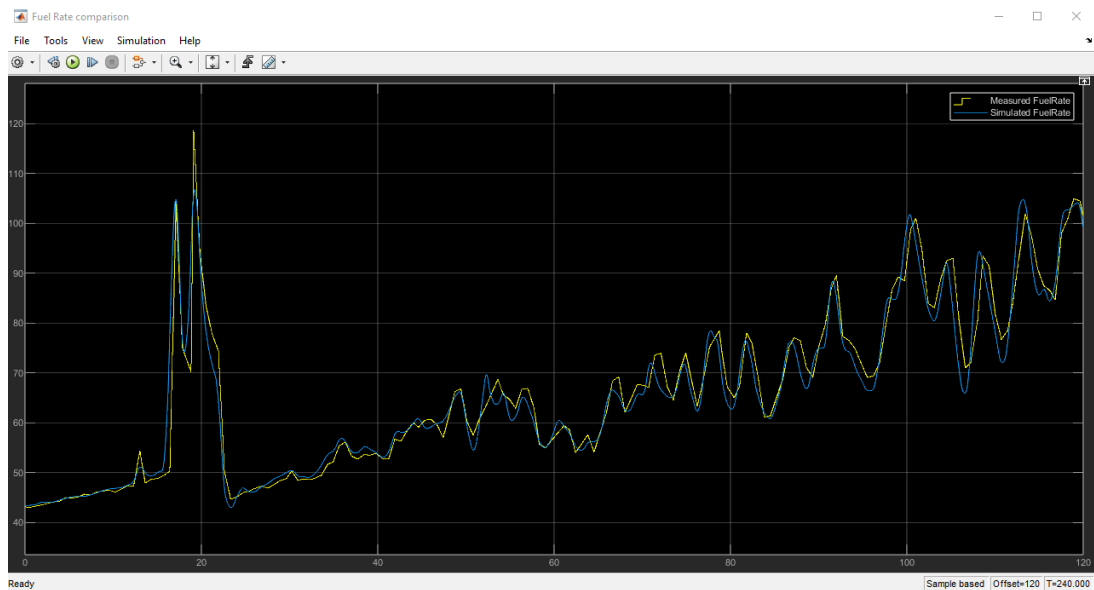
Fuel_Consumption =
    41.92    47.38    69.01    105.06    155.53    208.06
    40.70    46.00    67.00    102.00    151.00    202.00
    44.77    50.60    73.70    112.20    166.10    222.20

```

Kuva 16: General engine palikan polttoaineenkulutuksen mallintamiseen tarvittavat vektorit ja matriisi

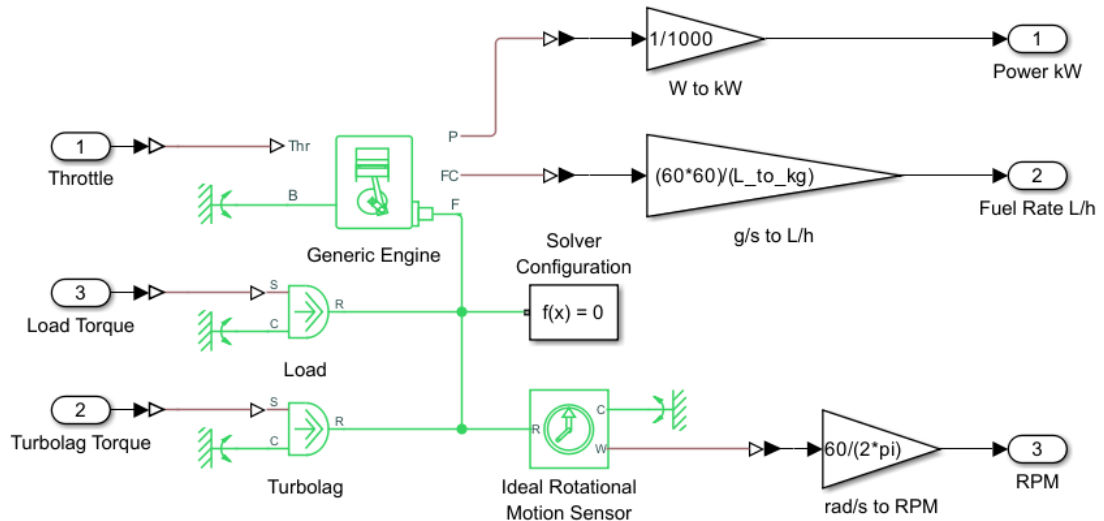
Kuvassa 16 matriisin ylin rivi kuvastaa polttoaineenkulutusta 1450 kierrosluvulla ja alin rivi 1550 kierrosluvulla. Kulutukset näille riville on valittu siten, että ylemmällä rivillä on hieman suuremmat ja alemmalla rivillä on paljon suuremmat polttoainemäärät. Tämä johtuu siitä, miten moottoria ohjataan. Kierroslukujen laskiessa normaalisti laskisi se polt-

toaineen kulutusta. Kuitenkin mallia testatessa huomattiin, että tällöin nostamalla kulu-
tusta parantaa se mallin tuloksia mittausdataan nähden. Kierroslukujen noustessa polt-
toainekulutus kasvaa, koska moottorin kitkahäviöt suurenevat. Kuvassa 17 nähdään si-
muloitu polttoainekulutus sinisellä. Tämä seuraa suhteellisen hyvin keltaisella olevaa
mittausdataa. Tämä malli voidaan todeta hyväksi mallintamaan kyseisen systeemin die-
selmoottorin kulutusta generaattorin tuottaman tehon mukaan. Tätä kyseistä mallia käy-
tetään arvioidessa valittua energiavarastoteknologiaa, sekä laadittaessa vaatimuksia
teknologialle.



Kuva 17: Mitattu polttoainekulutus (keltainen) ja simuloitu polttoainekulutus (sininen)

Kuvassa 18 nähdään vielä mallin mekaaninen osuus ja palikat mitkä aikaisemmin mai-
nittiin. Kyseisessä kohdassa on tehty kolme muunnosta eri mittauksille mallissa. Ensim-
mäisenä ylimpänä Kuvassa 18 muunnetaan moottorin tuottama teho kilowateiksi. Toi-
sessa kohdassa muunnetaan polttoainekulutus grammaa per sekunnista litraa per
tunneiksi. Siinä L_to_kg muuttujana on käytetty arvoa $0.85 \frac{kg}{dm^3}$, joka kevyen polttoöljyn
tiheys. Viimeisessä muunnoksessa on muunnettu Motion-sensorilta tuleva kulmanopeus
kierrosta minuutissa -arvoksi.

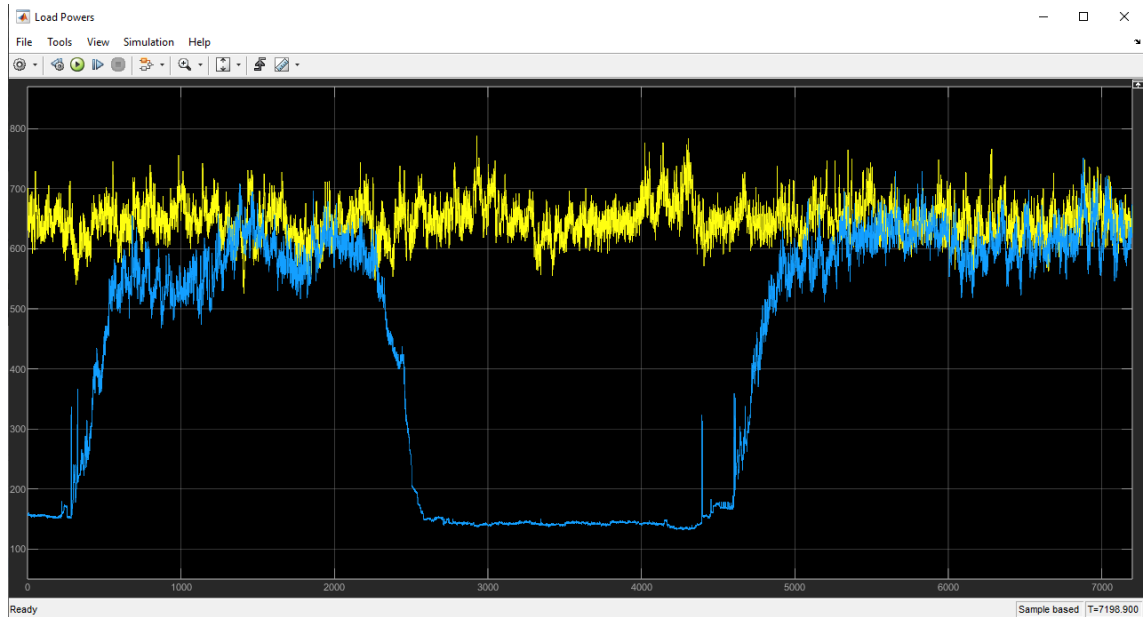


Kuva 18: Mallin mekaaninen osuus

3.3 Vaatimukset

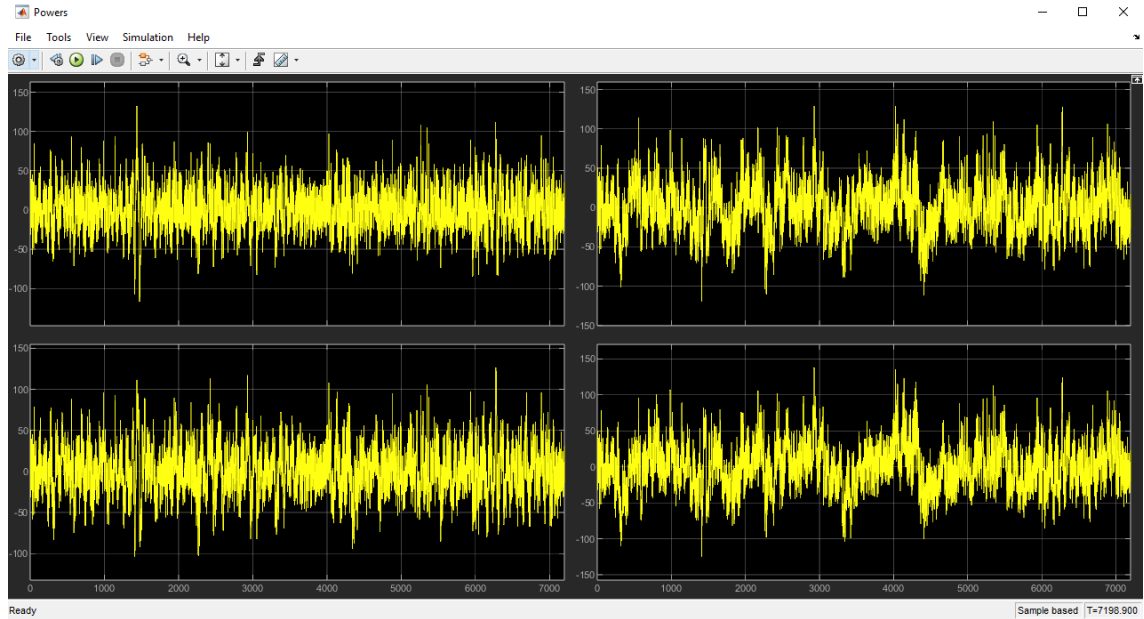
Energiavarastointiteknologian vaatimusten määrittely on tärkeää valittaessa oikeanlainen teknologia tähän sovellukseen. Vaatimukset tulevat osittain mittaosdatasta ja siitä, kuinka paljon tehoa ja energiaa laitos tarvitsee ja kuinka useasti. Tässä osiossa selvitetään muun muassa tehopiikkien koko ja energiamäärä. Näiden avulla voidaan selvittää tehopiikkien suodattamiseen tarvittava teho ja energia. On myös tärkeää miettiä, kuinka suuria tehopiikkejä on taloudellisesti kannattavaa lähteä suodattamaan. Mikäli tilanne on se, että diesel generaattorin tehontuotto on lähellä maksimia, on energiavarasto tällöin mitoitettava suurimpien huipputehojen mukaan. Mikäli diesel generaattorin teho riittää suurimpien tehopiikkien tuottamiseen, on todennäköisesti taloudellisesti turhaa mitoittaa energiavarasto suodattamaan harvoin tapahtuvat suurimmat tehopiikit.

Tehon vaihtelua ja siitä muodostuvaa tehon vaatimusta lähdetään tutkimaan ottamalla kahden tunnin mittainen dataosuus käsittelyyn. Dataosuudessa on tärkeä tietää, millaisessa ajossa laitos on. Kun laitos on koko dataosuuden tuotantoajossa, saadaan tuotannon aikainen energia- ja tehontarve selville. Dataosuudessa voi myös olla kohtia, joissa tuotanto lasketaan alas tai nostetaan ylös. Mikäli tuotannon ylösnostossa halutaan osallistua tehopiikkien suodatukseen, on tuotannon ylösnostoon tarvittavasta energiasta ja tehosta myös tärkeä saada tietoa. Aluksi tarkastellaan, kuinka paljon teho vaihtelee laitoksessa ja tämän jälkeen lasketaan tehopiikkien energiamääriä. Kummassakin teho- ja energiakohtassa ensin tarkastellaan tilannetta, jossa tuotantolaitos on koko dataosuuden ajan käynnissä ja tämän jälkeen tilannetta, jossa laitos ajetaan ylös kahteen kertaan. Kuvassa 19 keltaisella on tilanne, jossa laitos on käynnissä yhtäjaksoisesti ja sinisellä laitos ajetaan kahdesti ylös. Molemmassa dataosuuden pituus on kaksi tuntia.



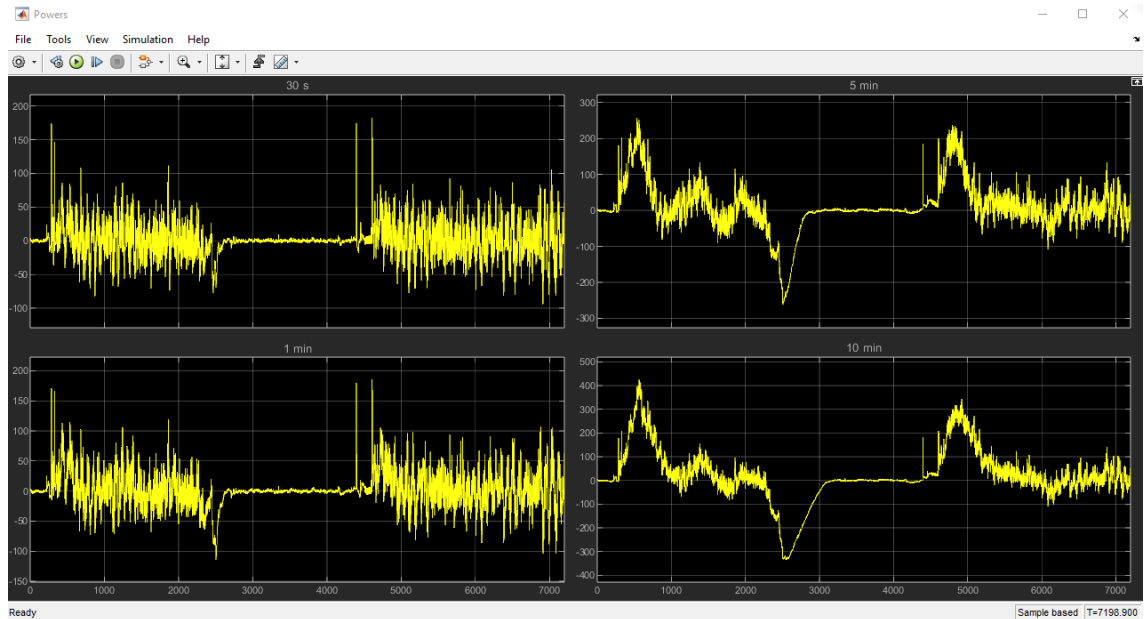
Kuva 19: Tutkittava dataosuudet generaattorin kuormituksesta

Laitoksen tehopiikit lasketaan ottamalla generaattorin tuottamasta tehosta keskiarvo. Tämä keskiarvo on joko 30 sekuntia, 1 minuutti, 5 minuuttia tai 10 minuuttia taaksepäin. Tätä keskiarvoa verrataan hetkelliseen tehoon, josta saadaan tehopiikit laskettua. Tämä tarkoittaa sitä, että alle keskiarvoajan kestäviä tehonmuutoksia suodatetaan. Kuvassa 20 nähdään kaikkien keskiarvoaikojen tehopiikkien suuruudet, kun laitos on koko ajan tuotantokäytössä. Kaikilla keskiarvoilla tehopiikkien arvot jäävät alle 150 kilowatin ja merkittävin osa tehopiikeistä näyttäisi osuvan 50 kilowatin kohdille. Tämän perusteella energiavarastoteknologian teho voitaisiin suunnitella 50–150 kilowatin suuruiseksi. Tämä riippuu siitä, kuinka harvinaisesti tapahtuvia tehopiikkejä halutaan tai on tarpeellista suodattaa.



Kuva 20: Tehopiikit eri keskiarvoajoilla (30 s, 1 min, 5 min ja 10 min)

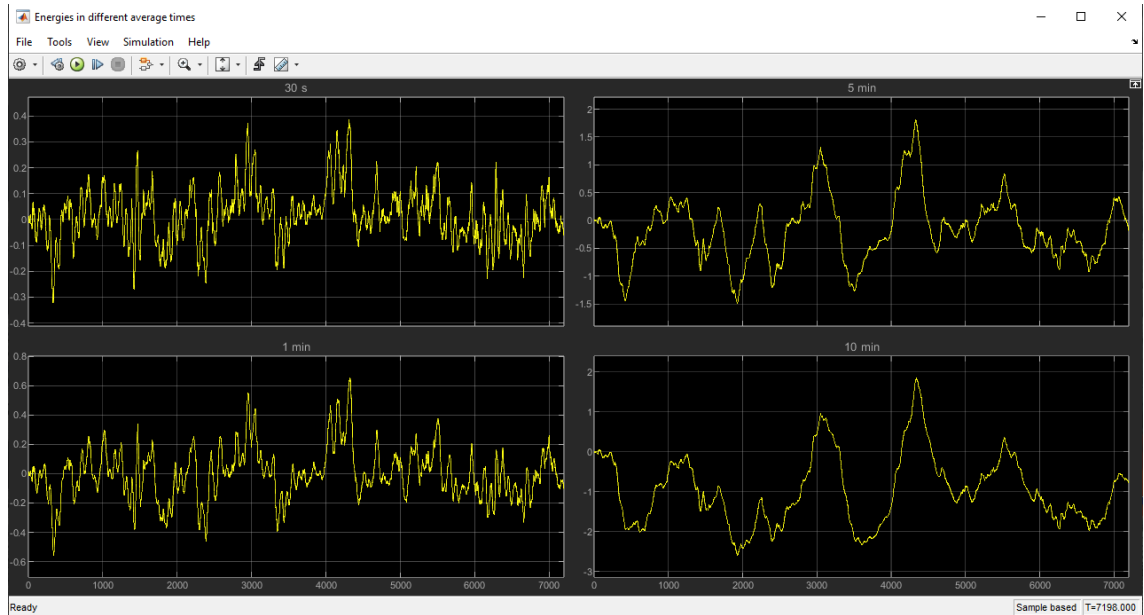
Laitos ei aina käy vain tuotantotehoilla, vaan laitos pitää ajaa myös ylös. Tämä sisältää paljon tehopiikkejä, kun laitteita käynnistetään ja tuotanto aloitetaan. Tämä takia on myös tärkeää tarkastella tilannetta, jossa tuotanto ajetaan ylös. Kuvassa 21 on eri keskiarvoilla lasketut tehopiikit. Suuremmilla keskiarvoilla tehot nousevat merkittävästi korkeammalle, kuin tasaisessa tuotantokäytössä. Mikäli näin suuria tehoja haluttaisiin suodattaa, täytyisi energiavarastoteknologian tehojen olla 200–400 kilowatin luokkaa ja tämä myös vaatisi paljon energiaa. Tuotannon ylösajoja ei myöskään kovin usein tapahdu, joten voi olla kannattavampaa keskittyä vain tuotannon aikaiseen suodatukseen. Pienemmällä 1 minuutin keskiarvolla huomataan, että tehopiikit ovat hieman yli 150 kilowatin, joka ei ole kaukana tuotannon aikaisesta maksimitehopiikistä.



Kuva 21: Tehopiikit eri keskiarvoilla laitoksen ylösajotilanteet

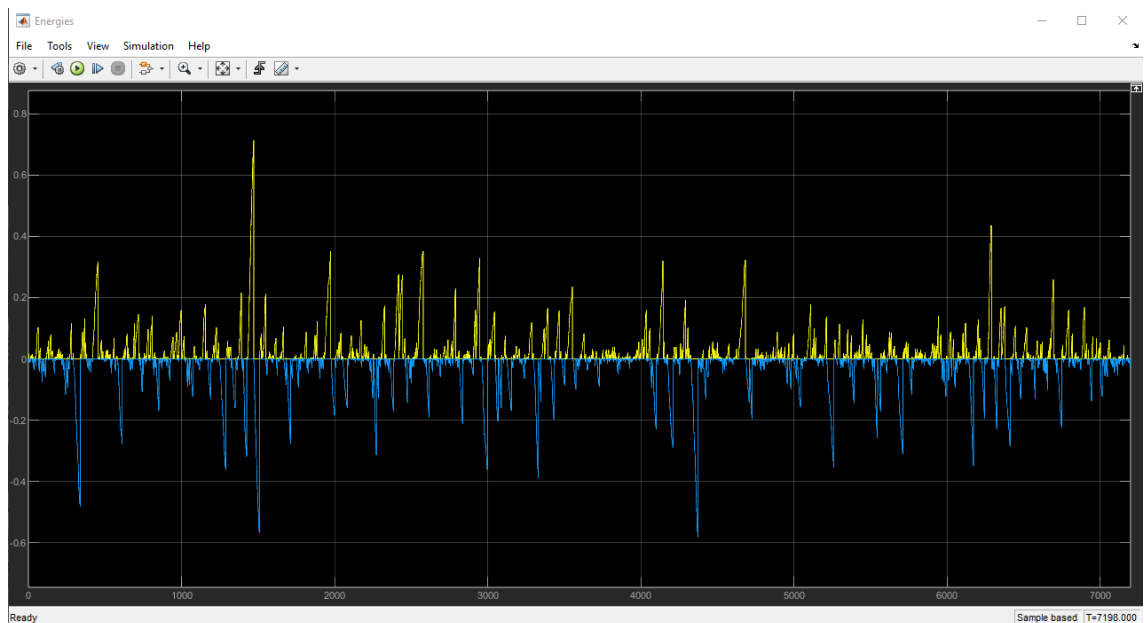
Tehopiikkien energiamäärien selvittäminen on tärkeä osa vaatimuksien määrittelyä. Piikkien energiamäärä määrittää, kuinka paljon energiaa energiapiikkejä suodattavan energiavarasto täytyy sisältää. Energiamäärässä on myös tärkeä ottaa huomioon energiavaraston hyötysuhde ja energiamuodon muuttamiseen liittyvä hyötysuhde, jotta energiamäärä riittää järjestelmässä. Kuvassa 19 nähdään kahden tunnin mittainen generaattorin tehontuotto eri ajanjaksoilta. Tästä kyseisestä tehosta otetaan 30 sekunnin, 1 minuutin, 5 minuutin ja 10 minuutin keskiarvo, jota verrataan hetkelliseen tehoon. Tästä vertailusta saadaan laskettua energiamäärä, jolla voitaisiin suodattaa tehopiikit, jotka eroavat keskiarvosta.

Aluksi tarkastellaan Kuvan 19 keltaista kuvaajaa, jossa laitos on koko ajan tuotannossa. Siinä 30 sekunnin, 1 minuutin, 5 minuutin ja 10 minuutin keskiarvoistuksia käytetään tehovaihteluiden energiamäärien laskemiseen. Näiden energiamäärien tulokset nähdään Kuvassa 22. Siitä nähdään, että mitä suurempi keskiarvoistus, sitä suurempia energiamääriä suodatetaan ja sitä suurempi energiavaraston energiamäärä täytyy olla. Dieselmootorin kulutuksen puolesta on merkittävämpää suodattaa nopeasti tapahtuvia tehopiikkejä. Tämän lisäksi tehopiikit pysyivät maltillisempina pienemmällä keskiarvoajalla, joten otetaan tarkempaan tarkasteluun yhden minuutin keskiarvo.



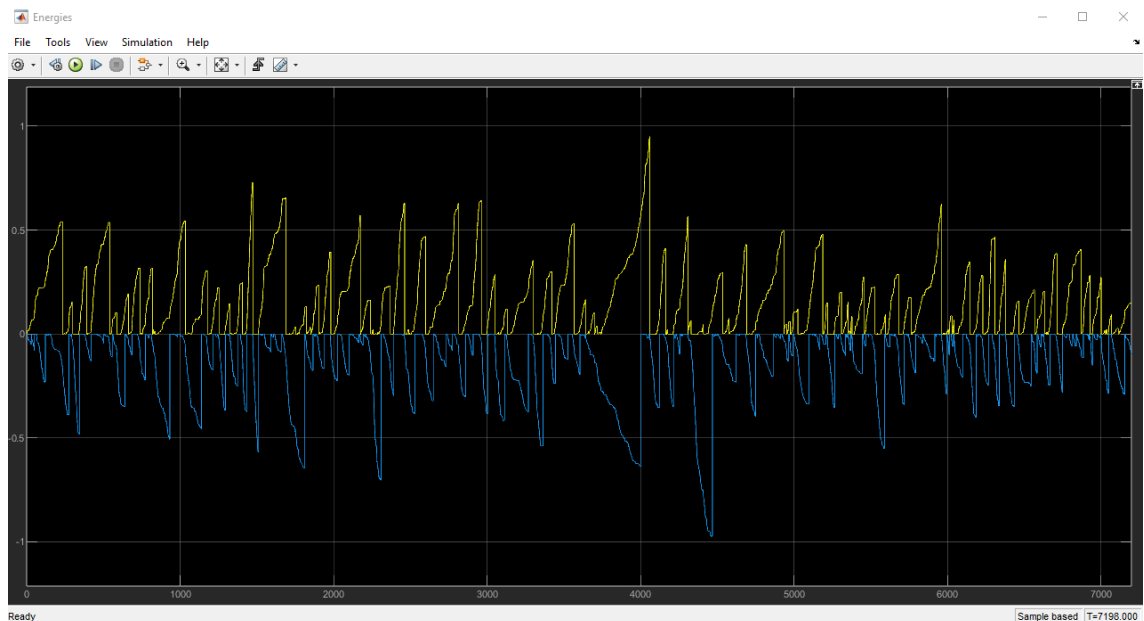
Kuva 22: 30 s, 1 min, 5 min ja 10 min keskiarvoistuksen tehovaihtelun energiamäärä

Tehon keskiarvon ja tehon hetkellisen arvon vertailusta erotellaan positiiviset ja negatiiviset piikit. Näistä piikeistä lasketaan niiden energiamäärät. Aina kun tehopiikki menee nolllaan, nollataan energiamäärä. Tällöin saadaan suhteellisen hyvin hetkelliset energia-piikit laskettua. Tämän tulos nähdään Kuvassa 23, josta voidaan todeta, että hetkelliset energiamäärät voivat nousta noin 0.7 kWh kohdalle. Kuvassa 23 keltaisella on tehon keskiarvoa yli mennyt hetkellinen energiamäärä ja sinisellä on tehon keskiarvoa alle mennyt hetkellinen energiamäärä.



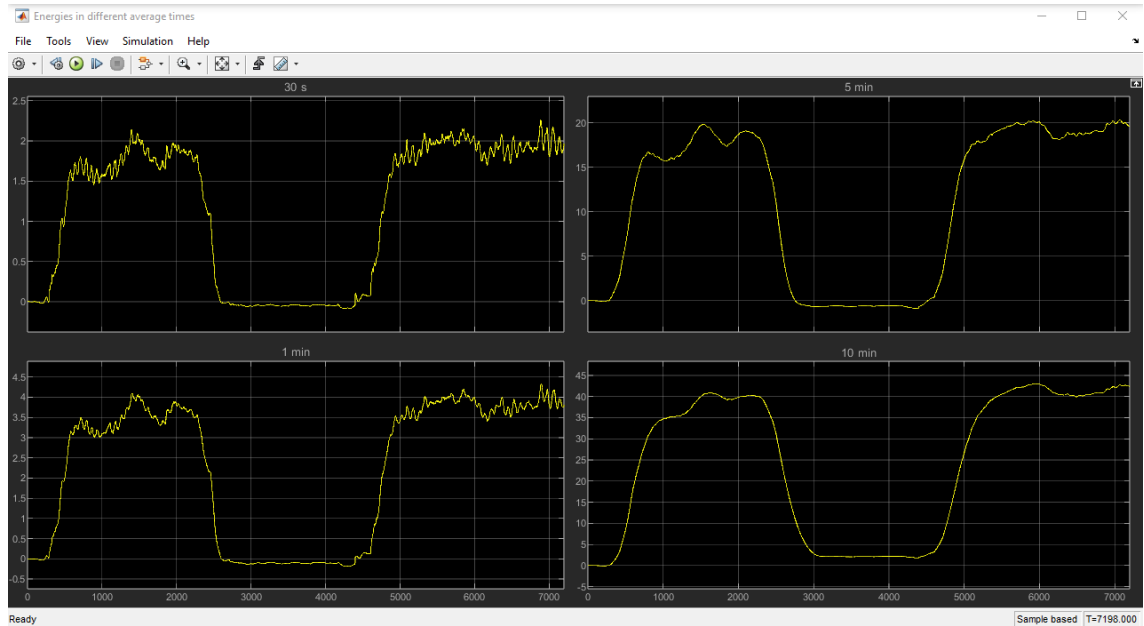
Kuva 23: Tehopiikkien energiamäärät tasaisella tuotannolla

Kuvasta 23 huomataan, että monissa kohdissa on samansuuntaisia energiapiikkejä monta peräkkäin ilman, että vastakkaissuuntaisia on juurikaan. Tämä tarkoittaa, että energiavarasto ei pääsisi latautumaan tai purkautumaan niissä kohdissa, jotta energiamäärä pysyisi samana. Muokkaamalla tehorajaa, jossa energiamäärä nollaantuu, 40 kilowattiin saadaan Kuvan 24 mukaisia tuloksia. Nämä tulokset havainnollistavat paremmin todellisen energian tarpeen. Kuvassa 24 huomataan, että suurimman positiivisen energiapiikin kohdalla nähdään myös paljon negatiivista energiaa. Negatiivinen energia on sen verran suurta, että todellisuudessa tuo energiamäärä on huomattavasti pienempi, niin kuin samasta kohdasta nähdään Kuvassa 23. Mutta esimerkiksi 4000 ja 5000 sekunnin välissä on negatiivinen energiapiikki, joka ylittää 1 kWh kohdalle. Tästä syystä ei ole myöskään epäilystä, että positiivisia 1 kWh energiapiikkejä voi myös syntyä.



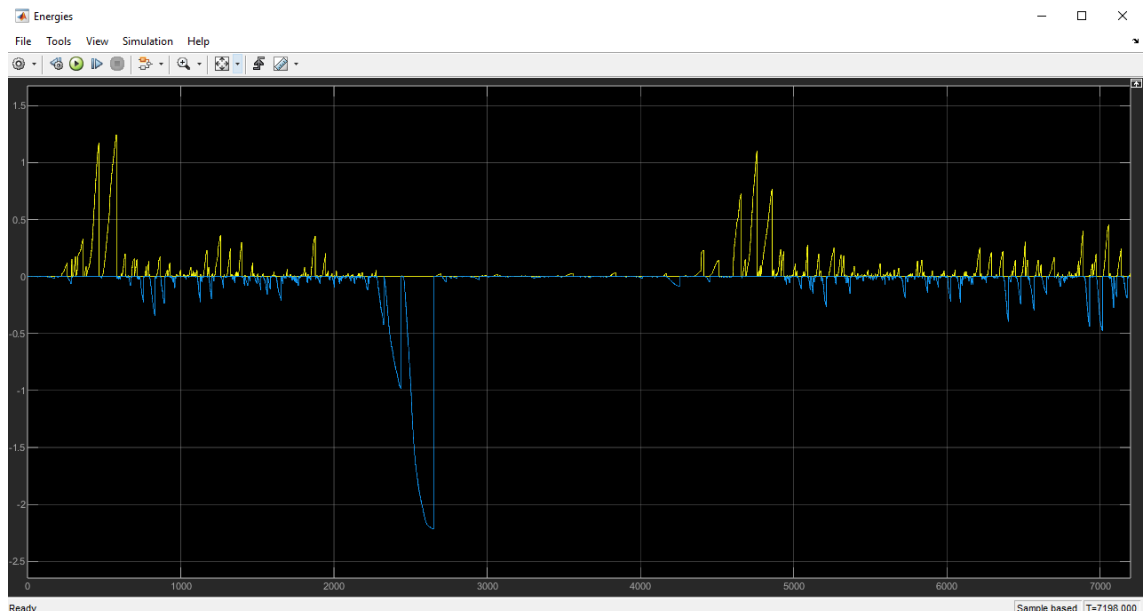
Kuva 24: Tehopiikkien energiamäärät, kun energian nollaus tapahtuu myöhemmin

On tärkeää huomioida, että keskiarvon pituus vaikuttaa merkittävästi tarvittavaan energiamäärään. Esimerkiksi 10 minuutin keskiarvolla Kuvan 24 tuloksista olisi voinut todeta, että energiavaraston energiamäärä tulisi olla vähintään 5 kWh. Toisaalta näistä tuloksista voidaan sanoa, että myös pienellä energiavarastolla voidaan suodattaa tehoa erittäin tehokkaasti. Seuraavaksi tutkitaan kuormitustilannetta, jossa laitos ajetaan ylös, alas ja takaisin ylös. Tämän tyyppinen kuormitustilanne nähdään Kuvassa 19 sinisellä. Niin kuin aikaisemmin, tätä kuormitustilannetta arvioidaan ensin 30 sekunnin, 1 minuutin, 5 minuutin ja 10 minuutin keskiarvolla. Kuvassa 25 huomataan, että 10 minuutin keskiarvoilla energiamäärä nousee yli 40 kWh. 1 minuutin keskiarvolla energiamäärä jää alle 5 kWh. Koska aikaisemmin tarkasteltiin 1 minuutin keskiarvoa ja se antaa tässäkin järkeviä tuloksia, otetaan se tarkempaan tarkasteluun.



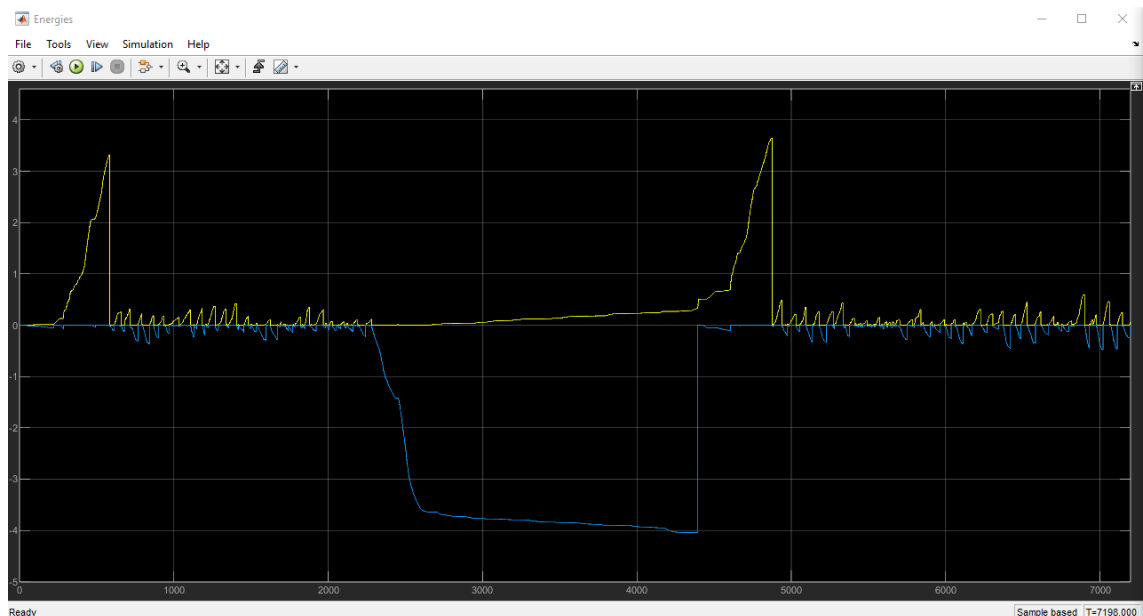
Kuva 25: 30 s, 1 min, 5 min ja 10 min keskiarvoistuksen tehovaihtelun energiamäärä

Niin kuin aikaisemmin, tehon vertailusta erotellaan positiiviset ja negatiiviset piikit. Nämä tehopiikkien energiamäärät summataan yhteen ja nollataan, kun teho tippuu takaisin nol- laan. Tällä järjestelyllä saadaan Kuvan 26 mukainen kuvaaja. Siinä huomataan useita positiivisia piikkejä tuotannon ylösajoissa. Myös merkittäviä negatiivisia piikkejä näh- dään, kun laitos ajetaan alas. Tästä on hankala nähdä todellinen energiamäärä tuotan- non ylösajossa.



Kuva 26: Tehopiikkien energiamäärät tuotannon vaihdellaessa

Aikaisemmin muokattiin tehorajaa, jossa energiamäärä nol्लाantuu ja se tuotti hieman erilaisia tuloksia. Tällä tavalla saatiin Kuvaan 24 paremmin näkymään todellinen tarvittava energiamäärä. Tämä saavutettiin muokkaamalla tehorajaa, jolla energiamäärä nol्लाantuu. Nämä tehorajat vaihdettiin tähän dataan 20 kilowattiin ja sillä saatiin Kuvan 27 mukaisia tuloksia. Kuvaajasta nähdään hyvin laitoksen ylösajon tehopiikkien energiamäärä. Ensimmäisessä ylösajossa energia nousee yli 3 kWh ja toisessa yli 3.5 kWh, joten energiavaraston energiamäärä tämän perusteella saisi olla 4–5 kWh. Alasajon aikana negatiivinen energiamäärä nousee yli 3.5 kWh ja tyhjäkäynnissä energiamäärä jatkaa hieman nousua, koska tehon vaihtelu on niin pientä, että se ei yllä 20 kilowattiin. Kuvasta 26 nähdään myös, että laitoksen tyhjäkäynnissä ei suuria tehonvaihtelusta johtuvia energiapiikkejä synny.



Kuva 27: *Tehopiikkien energiamäärät, kun energian nol्लाus tapahtuu myöhemmin*

Laitoksen tehonvaihtelua on tutkittu ja siitä päästään Taulukon 1 mukaisiin johtopäätöksiin. Tässä vaiheessa on hankalaa arvioida, kuinka suuria teho- ja energiapiikkejä on kannattavaa pyrkiä suodattamaan, joten jotkin Taulukon 1 tulokset jäivät suhteellisen epätarkoiksi. Energiavaraston tehontarve on 50–180 kilowattia, riippuen siitä kuinka suuria tehopiikkejä on tarpeellista ja taloudellista suodattaa. Esimerkiksi mikäli dieselmoottorin tehorajat tulisivat vastaan, voi 180 kilowattia olla vielä liian vähän. Energiavaraston energiamäärä on 0.8–5 kWh, riippuen siitä kuinka suuria tehopiikkejä suodatetaan. Energiämäärään vaikuttaa myös, kuinka pitkäkestoisia tehopiikkejä suodatetaan. Mutta niin kuin aikaisemmin todettiin, dieselmoottorin kannalta on tärkeämpää suodattaa lyhyitä tehopiikkejä. Taulukko 1 antaa kuitenkin hyvät alkuarvot lähteä suunnittelemaan energiavarastoa ja kertovat paljon tehon ja energian suhteesta toisiinsa. Näistä tuloksista

voidaan todeta, että tässä työssä tutkittavan laitoksen tehopiikkien suodattamiseen ei tarvita merkittäviä määriä energiaa, koska tehovaihtelu on tasaista positiiviseen ja negatiivisen suuntaan.

Taulukko 1. *Teho- ja energiavaatimukset*

	Tasainen tuotanto	Vaihteleva tuotanto	Yhdistelmä
Teho	50–150 kW	50–180 kW	50–180 kW
Energia	0.8–1 kWh	4–5 kWh	0.8–5 kWh

On myös tärkeä huomioida, että tehonpiikkien määrä on todella iso, joten niitä suodatettava energiavarasto tulee kokemaan suuria määriä syklejä. Syklien määrä voidaan helposti laskea summaamalla molempiin suuntiin tapahtuvien tehopiikkien energia ja jakamalla se energiavaraston energiamäärällä. Tämä tehdään 1 minuutin keskiarvolla ja usealla eri energiavaraston energiamäärällä. Tästä tulokset ovat nähtävissä Taulukossa 2. Taulukkoon on valittu 16 tunnin aika, koska tämä on harvoin tapahtuva maksimiaika mitä laitokset ovat käynnissä päivässä. Vuodessa tapahtuvien tuotantopäivien määräksi on arvioitu 200. Vuodessa on työpäiviä yli 250, mutta huoltoseisokit sekä laitosten siirrot vähentävät käyttöpäiviä. Toivottu elinikä energiavarastolle on vähintään 10 vuotta. Mikäli energiavaraston eliniäksi arvioisi 10 vuotta, nousee matalilla energiavaraston energiamäärillä syklien määrä todella isoksi. Syklien määrä on tästä syystä myös osa vaatimusten määrittelyä. Syklien määrän laskennassa ei otettu huomioon hyötysuhteita.

Taulukko 2. *Syklien määrät eri energiavarasto arvoilla*

	1 kW	5 kW	10 kW	50 kW	200 kW
2 h	44	9	4	0.9	0.2
16 h	349	70	35	7	1.7
200 d	69755	13951	6975	1395	349
10 a	697500	139510	69755	13951	3488

Tässä vaiheessa taloudellista kannattavuutta on hankala arvioida, koska ei tiedetä, tuottaako tämä investointi. Voimme kuitenkin hieman vertailla eri teknologioiden hintaluokkia toisiinsa. Lähteessä [8] on kerätty eri energiavarastoteknologioiden hintoja taulukkoon, jonka avulla voimme vertailla tässä työssä oleellisia teknologioita. Näiden oleellisten teknologioiden hinnat kilowattia ja kilowattituntia kohden on kerätty taulukkoon 3. Siihen on

myös kerätty hinta per kWh per sykli, joka näyttäisi olevan matalin superkondensaattorilla ja vauhtipyörällä. Koska tämä lähde on suhteellisen vanha, ei näitä hintoja voida käyttää kuin alustavaan vertailuun.

Taulukko 3. *Eri teknologioiden hinnat kilowattia ja kilowattituntia kohden*

	\$/kW	\$/kWh	€/kWh per sykli
Lyijy-akku	300–600	200–400	20–100
Li-ion-akku	1200–4000	600–2500	15–100
Virtausakku	600–1500	150–1000	5–80
Vauhtipyörä	250–300	1000–10000	3–25
Superkondensaattori	100–300	300–2000	2–20

Taulukosta 3 on poimittu teknologioiden hinnat ja niistä laskettu Taulukon 1 teho- ja energiavaatimusten mukaisesti hinnat Taulukkoon 4. Siitä nähdään, että teho selkeästi dominoi energiavaraston hinnan muodostamisessa. Tästä syystä hyvät teho-ominaisuudet omaavat superkondensaattori- ja vauhtipyöräteknologia vaikuttavat halvimmilta vaihtoehtoilta. Tämä kertoo siitä, että näillä teho- ja energia-alueilla, tehon valinta vaikuttaa enemmän energiavaraston kuin energian hintaan. On tärkeää huomauttaa, että nämä hinnat ovat varmasti muuttuneet kuluneiden vuosien varrella ja sen suunta on ollut laskeva.

Taulukko 4. *Eri teknologioiden hinnat valittuja kilowatteja ja kilowattitunteja kohden*

	\$/50 kW	\$/100 kW	\$/1 kWh	\$/5 kWh
Lyijy-akku	15000–30000	30000–60000	200–400	1000–2000
Li-ion-akku	60000–200000	120000–200000	600–2500	3000–12500
Virtausakku	30000–75000	60000–150000	150–1000	750–5000
Vauhtipyörä	12500–15000	25000–30000	1000–10000	5000–50000
Superkondensaattori	5000–15000	10000–30000	300–2000	1500–10000

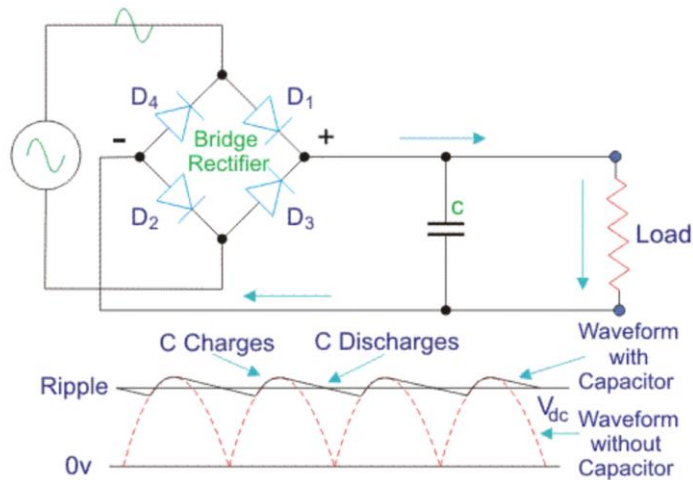
4. ENERGIAMUODON MUUTTAMINEN JA SÄHKÖNLAATU

Energiamuodon muuttaminen on oleellisessa osassa energian varastoinnissa. Tähän soveltuu erityisen hyvin sähköenergia. Tämä johtuu siitä, että nykypäivänä on suhteellisen helppoa muuttaa sähköä vaihto- tai tasasähköksi tai sähköenergiaa mekaaniseksi energiaksi. Tässä kappaleessa tutkitaan ja analysoidaan laitteistoa, jolla sähköä muunnetaan. Tutkittavissa teknologioissa sähköä voidaan muuntaa vaihtosähköstä tasasähköksi, tasasähköstä vaihtosähköksi, tasasähköstä eri jännitteiseksi tasasähköksi ja vaihtosähköstä eri taajuiseksi vaihtosähköksi. Esimerkiksi akulta saatava sähkö on tasasähköä ja se täytyy siis muuttaa 50 hertsin taajuiseksi vaihtosähköksi, jotta sitä voidaan hyödyntää laitoksen sähkölaitteissa.

4.1 Laitteisto

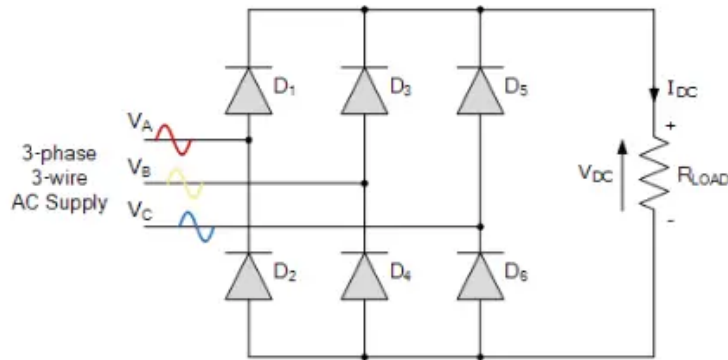
Tässä osiossa esitellään laitteita, jolla sähköä muunnetaan eri muotoon tai eri jännitetasoihin. Tämän tyyppiset laitteet perustuvat puolijohdekomponenteille, kondensaattorille ja kelalle. Tällaisia laitteita kutsutaan usein tehoelektroniikkalaitteiksi. Tehoelektroniikkalaitteet mahdollistavat sähköenergian käsittelyn ja muodon muuttamisen. Tällaisilla laitteilla on mahdollisuus vaikuttaa sähköän jännitteeseen, virtaan, taajuuteen ja tehokertoimeen [23]. Tämä työn kannalta neljä tärkeintä laitetta ovat tasasuuntaaja, vaihtosuuntaaja, taajuusmuuttaja ja tasasähkömuunnin.

Tasasuuntaaja on laite, joka muuttaa vaihtosähköän tasasähköksi. Tämä on monessa tilanteessa tarpeellista. Esimerkiksi akut eivät voi suoraan hyödyntää vaihtosähköä, joten sähkövirta täytyy tasasuunnata ennen sen syöttämistä akulle. Ennen tähän käytettiin sähkökoneita, mutta se ei ollut kovin tehokas prosessi. Nykyään tämä tehdään diodien ja tyristorien avulla. Perinteinen yksivaiheinen kokoaaltoasasuuntaaja on Kuvan 28 mukainen. Se koostuu neljästä diodista, jotka hoitavat sähkövirran tasasuuntauksen. Näistä diodeista kaksi on aina johtavassa tilassa ja kaksi on ei-johtavassa tilassa. Diodien lisäksi tasasuuntaajiin voidaan lisätä kondensaattori tasaamaan tasasuuntaajan aaltoilua Kuvan 28 alareunan mukaisesti. [24]



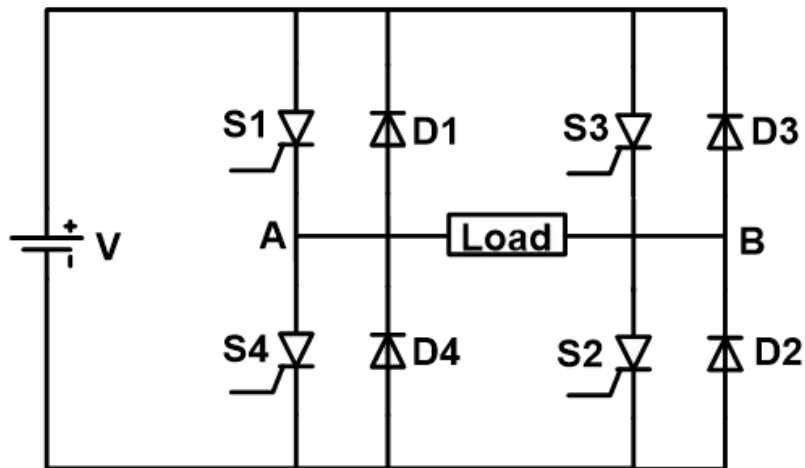
Kuva 28: Kokoaaltotasasuuntaaja rakenne ja sen ulostulojännite [24]

Todellisuudessa yksivaiheista tasasuuntaajaa ei juuri teollisuuden koneissa tarvita. Yleisin käytössä oleva tasasuuntaaja on kolmivaihe kokoaaltotasasuuntaajaa [25], joka nähdään Kuvassa 29. Millä tahansa hetkellä vain kaksi diodeista on johtavassa tilassa ja loput neljä ei-johtavassa tilassa [23]. Koska tasasuuntaajaan syötetään kolmivaihesähköä, ei jännite ehdi tippua nolnaan, niin kuin yksivaihe tasasuuntaajassa. Tämä johtuu siitä, että aina kun jonkin vaiheen jännite tippuu riittävän alas, seuraava vaihe alkaa syöttämään eri diodeja. Tämä johtaa pienempään aaltoiluun ulostulossa, joka parantaa sähkönlaatua. Tämän ansiosta kolmivaihe tasasuuntaajan ulostulon keskiarvojännite on 0,955 kertaa syötettävän jännitteen huippuarvo, ja yksivaihe tasasuuntaajan on vain 0,637 kertaa syötettävä jännitteen huippuarvo. [23] Tällaista tasasuuntaajaa voitaisiin käyttää tutkittavassa laitoksessa akun tai superkondensaattorin latauksen yhteydessä, koska laitoksen pääkisko on kolmivaiheinen. Toisaalta aina ei haluta, että esimerkiksi akku latautuu jatkuvasti tai täydellä teholla. Tällaisessa tilanteessa tasasuuntaaja voi olla vaihdeohjattu. Tällaisessa tasasuuntaajassa diodien tilalla on tyristori, jonka sulkeutumisista voidaan ohjata. Tyristori avautuu, kun sitä kautta kulkeva virta on riittävän pieni. Tasasuuntaaja voi olla myös täysin ohjattu, jolloin diodin kanssa sarjassa on ohjattava kytkin, joka voi sulkea ja avata piirin. Tällaista tasasuuntaajaa ohjataan pulssinleveysmodulaatio (PWM) signaalilla. [23]



Kuva 29: Kolmivaihe kokoaaltotasasuuntaaja [25]

Seuraavaksi tarkastellaan vaihtosuuntaajaa tai toiselta nimeltä invertteriä. Se on laite, joka muuttaa tasasähköä vaihtosähköksi. Invertterin sisäänvalo voi tulla esimerkiksi tasasuuntaajalta, akulta tai aurinkopaneelilta. Niin kuin tasasuuntaajan käsittelevässä kohdassa todettiin, siltä tuleva tasasähkö voi olla joko ohjattua tai ohjaamatonta. Invertteri voidaan tehdä niin monivaiheiseksi kuin halutaan, mutta yleisimmät ovat yksi- ja kolmevaihe invertterit. Invertterit voidaan jaotella sen energialähteen mukaan joko jännitelähde invertteriksi tai virtalähde invertteriksi. Invertterin toiminta perustuu puolijohdevirtakytkimien eri aikaiseen sulkemiseen ja avaamiseen. Ohjailemalla eri aikaan kytkimiä, se luo vaihtosähköä siihen kytkettyyn kuormaan. [23] Tätä havainnollistaa Kuva 30. Siitä nähdään, kuinka virran suunta muuttuu, kun suljettuja kytkimiä avataan ja suljetaan. Aluksi virta kulkee kytkimien S1 ja S2 kautta. Kun kuormassa virran suuntaa halutaan vaihtaa, avataan S1 ja S2 sekä suljetaan S3 ja S4. Kuvasta nähdään myös tyrystoreiden kanssa rinnan olevat takaisinkytkentädioidit, jotka antavat esimerkiksi induktiiviselle virralle reitin kulkea [23]. Kolmivaihe kokoaaltoinvertterin toiminta on hieman monimutkaisempi kuin yksivaiheisen. Siinä vaihtosähkö tuotetaan kolmivaiheiseen järjestelmään, ohjaamalla kuutta kytkintä. Kytkimiä voidaan joko ohjata kanttiaalto- tai PWM-signaalilla. Invertterissä PWM ohjaus parantaa ulostulon sähkönlaatua, mutta lisää monimutkaisuutta ohjaukseen [23].



Kuva 30: Yksivaihe kokoaaltoinvertteri [26]

Taajuusmuuttaja on laite, joka muuttaa käytettävän vaihtosähkön taajuutta. Sen se tekee muuttamalla sähkön ensin tasasuuntaajalla tasasähköksi ja sitten invertterillä halutun taajuiseksi vaihtosähköksi. Tällaisia laitteita käytetään paljon teollisuudessa esimerkiksi vaihtosähkötöiden ohjaukseen tai tuuliturbiinilta tulevan sähkön muuttamiseen oikeaan vaiheeseen ja taajuuteen.

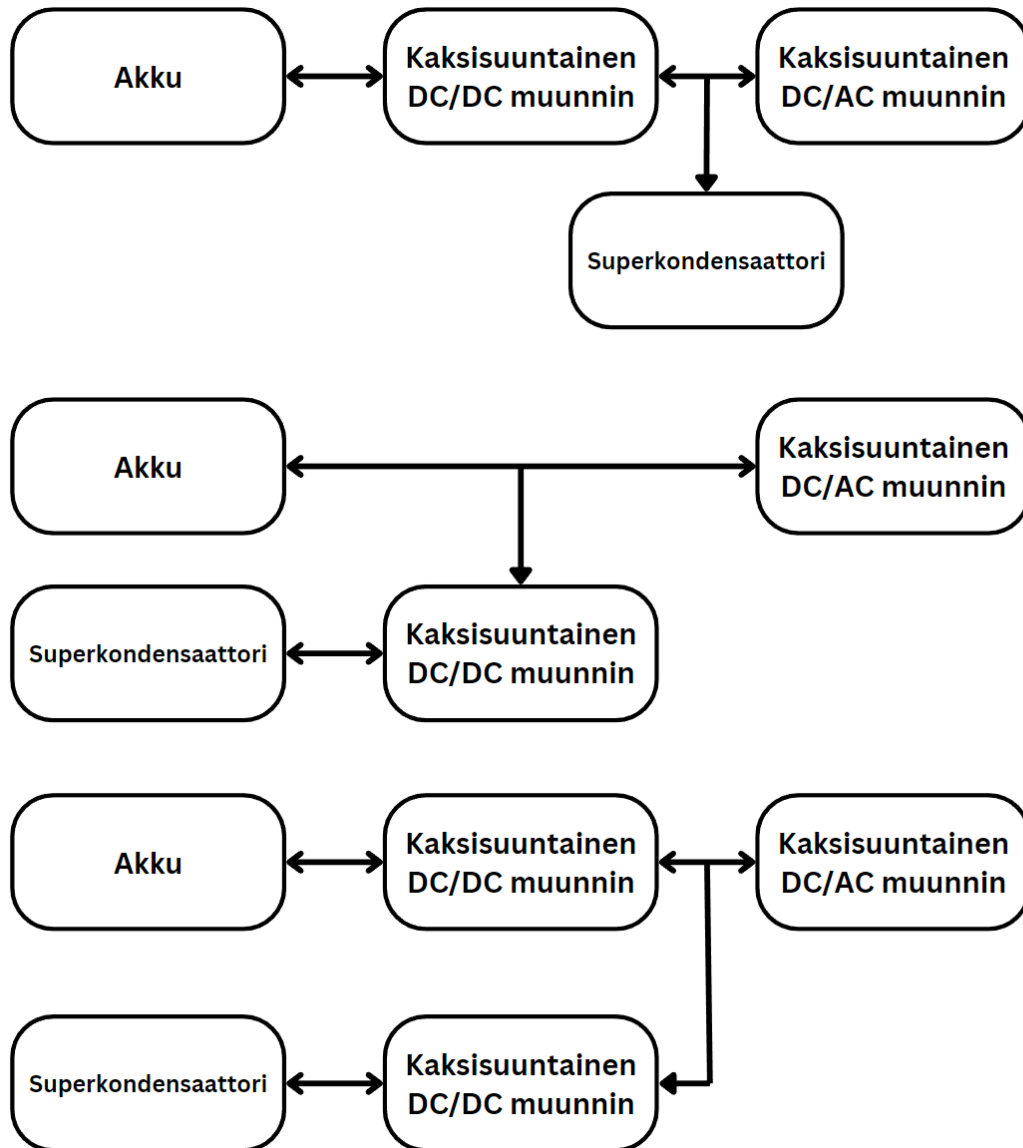
Tasasähkömuunnin on laite, joka muuntaa tasasähkön jännite- ja virtatasoa. Tällainen muunnin voi olla esimerkiksi buck, boost tai buck-boost tyyppinen. Näitä kaikkia yhdistää se, että ne ovat ohjattavissa. Muuntimen sisääntulojännite voi vaihdella, mutta ohjauksen avulla ulostulojännite voidaan pitää halutun suuruisena. Buck-tyyppinen muunnin pystyy laskemaan jännitetasoa tietyissä määrin. Boost-tyyppinen muunnin pystyy nostamaan jännitetasoa tietyissä määrin. Buck-boost taas pystyy sekä laskemaan että nostamaan jännitetasoa. [23] Tämän kaltaista muunninta voidaan käyttää esimerkiksi auton akun jännitteen muuttamiseen sopivaksi puhelimen lataukseen.

On tärkeää, että invertteri pystyy synkronoitumaan sähköverkon taajuuteen. Tähän tarvitaan tarkkaa mittausta ja laskentaa liittyvästä sähköverkosta. Verkon synkronointimenetelmiä on lukuisia ja ne voidaan jakaa kahteen ryhmään, jotka ovat taajuusalueen ja aika-alueen menetelmät. Kolmivaiheverkossa todennäköisesti laajin käytössä oleva tekniikka on synkroninen referenssikehyksen vaihelukittu silmukka (Synchronous reference frame phase-locked loop, SRF-PLL) ja se kuuluu aika-alueen menetelmiin. Ideaaltilanteessa SRF-PLL saa nopean ja tarkan mittauksen vaihekulmasta ja jännitteen amplitudista, mutta ei ole paras epätasapainoisissa verkkohäiriötilanteissa. [27] Energiavaran tarkoitus ei ole osallistua vikatilanteiden hoitamiseen, joten SRF-PLL voisi olla hyvä tämän sovelluksen käyttötarkoitukseen.

4.2 Laitteiden kokoonpano ja mitoitus

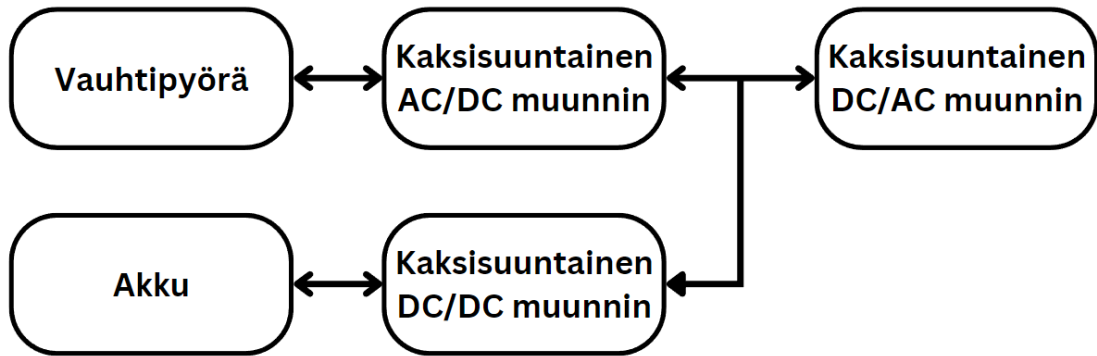
Tässä osuudessa tarkastellaan energiamuodon muuttamiseen tarvittavien laitteiden kokoonpanoja. Laitteiden kokoonpanot ovat suhteellisen yksinkertaiset, kun energiavarastoteknologioita on vain yksi. Tällöin voidaan yhdellä tai maksimissaan kahdella laitteella muuntaa energiamuoto oikeaksi energiavarastolle ja siitä takaisin. Näitä laitteita ovat tasasuuntaaja, invertteri, taajuusmuuttaja sekä tasasähkömuunnin. Akkuteknologia tarvitsee kaksisuuntaisen DC/AC-muuntimen. Tämä tarkoittaa, että muunnin pystyy muuttamaan tasasähkön vaihtosähköksi ja toisinpäin. Muunnin siis pystyy toimimaan sekä tasasuuntaajana että invertterinä. Samanlaisella kokoonpanolla toimii myös superkondensaattoritekнологia. Vauhtipyörä taas tarvitsee kaksisuuntaisen taajuusmuuttajan, koska siinä oleva sähkökone toimii vaihtosähköllä.

Yhdistellessä eri energiavarastointitekнологioita täytyy ottaa huomioon niiden yhteen toimivuus. Esimerkiksi akku ja superkondensaattori energiavarastoja ei kannata suoraan kytkeä rinnan, koska niillä on todennäköisesti eri jännitetasot ja eri jännitekäyrät, kun niitä puretaan. Tällöin toinen energiavarasto jäisi täysin purkautumatta ja kaikkea energiaa ei saisi käytettyä. Se, miten kaksi energiavarastoa kannattaa kytkeä, vaatii tarkkaa tutkimusta esimerkiksi siitä, miten eri teknologioita kuormitettaisiin ja mitkä ovat niiden vahvuudet ja heikkoudet. Kuvassa 31 on kolme mahdollista tapaa akun ja superkondensaattorin yhdistelmälle, joihin on otettu mallia lähteestä [28]. Ylimmäisessä kokoonpanossa akku on yhdistetty DC/AC-muuntimeen DC/DC-muuntimen kautta ja superkondensaattori suoraan DC/AC-muuntimeen. Keskimmäisessä kokoonpanossa akku on yhdistetty suoraan DC/AC-muuntimeen ja superkondensaattori on yhdistetty DC-muuntimen kautta. Tässä kokoonpanossa laitekustannukset ovat suuremmat kuin ylimmässä kokoonpanossa, koska superkondensaattorin kanssa oleva DC/DC-muunnin täytyy suunnitella kestävämmän superkondensaattorin suurempia virtoja. Alimmaisessa kokoonpanossa kustannukset ovat kaikista kalleimmat, koska siinä molemmat akku ja superkondensaattori on yhdistetty DC/AC-muuntimeen DC/DC-muuntimen kautta. Tämä myös monimutkaistaa ohjausta, mutta antaa mahdollisuuksia käyttää kumpaakin energiavarastoa erikseen. [28]



Kuva 31: Kolme kokoonpanovaihtoehtoa akku ja superkondensaattori yhdistelmälle

Vauhtipyöräenergiavarasto tarvitsee yksin toimiakseen kaksisuuntaisen taajuusmuuttajan. Tämä käytännössä tarkoittaa, että se tarvitsee kaksisuuntaisen AC/DC- ja DC/AC-muuntimen. Jos vauhtipyörä yhdistettäisiin akku- tai superkondensaattorienergiavaraston kanssa yhteen, olisi Kuvan 32 mukainen kokoonpano todennäköinen. Tästä kokoonpanosta voitaisiin jättää akun DC/DC-muunnin pois. Tällöin olisi järkevää laittaa katkaisin akulle, koska jatkuva akun kuormittaminen lyhentää sen käyttöikä. Mikäli vauhtipyöräenergiavarasto olisi sen tyyppinen, että se sisältäisi suuria määriä energiaa, voisi superkondensaattorin yhdistäminen sen kanssa olla järkevää. Tällöin superkondensaattori olisi Kuvassa 32 akun tilalla ja tällöin voitaisiin huoletta jättää DC/DC-muunnin pois, koska superkondensaattorin syklinen käyttöikä on niin suuri.



Kuva 32: Kokoonpano vauhtipyörä- ja akkuteknologia yhdistelmälle

Sähkönmuotoa muuttavat laitteet tulee lähinnä mitoittaa energiavaraston tehontarpeen mukaan. Aikaisemmin todettiin, että energiavaraston tehontarve on 50–180 kW välillä. On selvää, että Kuvien 31 ja 32 DC/AC muunnin tulee suunnitella halutun maksimitehon mukaan. Toinen suunnitteluparametri voi olla, kuinka hyvälaatuista vaihtosähköä muunnin tuottaa. Akkujen ja superkondensaattorien kohdalla DC/DC muuntimien suunnittelussa on enemmän vaihtoehtoja. Mikäli tällainen yhdistelmä toteutettaisiin, olisi järkevää suunnitella se siten, että superkondensaattori hoitaisi suurimman tehontuoton ja ottaisi vastaan eniten syklistä rasitusta. Tällöin voitaisiin akun DC/DC muunnin suunnitella pienemmille tehoille ja itse akku voitaisiin valita energian eikä tehon mukaan. Esimerkkitalanne voisi olla, että superkondensaattorin DC/DC muunnin olisi suunniteltu teholle 100 kW ja akun DC/DC muunnin 50 kW.

4.3 Sähkönlaatu

Sähkönlaatua voidaan mitata monella tavalla ja sillä voi olla merkittäviä vaikutuksia sähkölaitteisiin. Sähkönlaatua mittaavia tekijöitä ovat esimerkiksi sähkön taajuus, jännite, virta ja tehokerroin. Näitä kaikkia mitataan molemmista laitoksista ja täten niitä voidaan arvioida. Tässä osiossa siis arvioidaan sähkö taajuuden heittälyä, jännitteen heittälyä, virtapiikkejä ja tehokertoimen arvoa. Tässä ei arvioida harmonisia yliaaltoja, koska niiden mittaaminen tarvitsisi merkittävästi tarkemman mittausvälineistön.

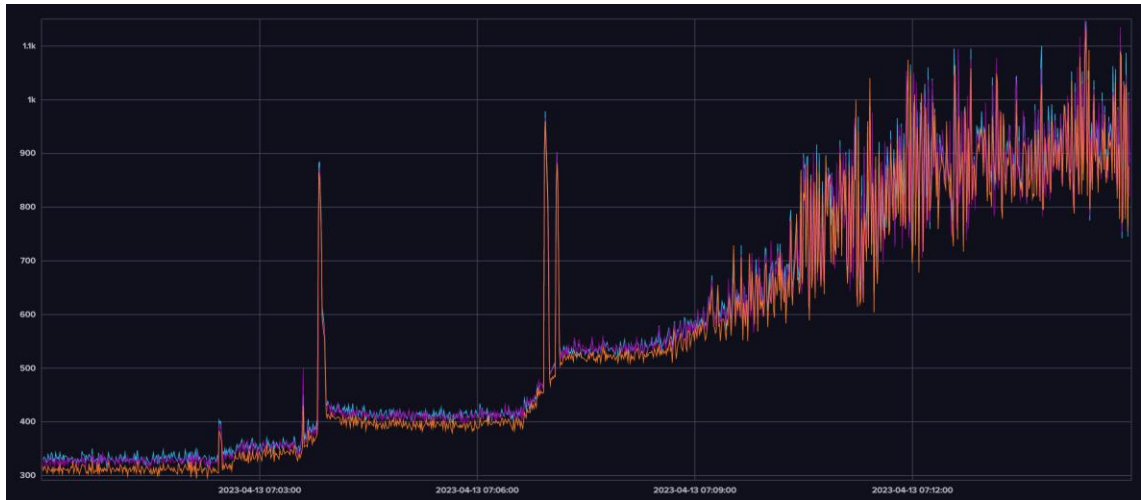
Sähkön taajuutta tarkasteltiin aikaisemmin kohdassa 3.1. Siellä Kuvasta 10 nähdään, miten generaattorin tuottama taajuus vaihtelee. Tämä vaihtelu johtuu taajuuden ja tehon yhteydestä toisiinsa. Kun laitoksen teho nousee, täytyy dieselmoottorin nostaa myös tuottamaansa mekaanista tehoa. Mikäli moottori ei pysty nostamaan tehoa riittävän nopeasti, tippuu moottorin ja samalla generaattorin kierrosnopeus. Tämä johtaa taajuuden tippumiseen. Toisin sanoen taajuuden vaihtelu johtuu pääasiassa siitä, että dieselmoottori ei pysty joka hetki täydellisesti tuottamaan samaa määrää mekaanista tehoa, kuin laitos kuluttaa. Kuvasta 10 nähdään, että taajuus heittelee 49.3–50.8 Hz välillä, mutta

melkein 2 Hz-taajuus heittelyä on huomattu mittausdatasta. Näin suuri taajuuden vaihtelu alkaa jo vaikuttamaan suoraan kytkettyjen oikosulkumoottorien pyörimisnopeuteen. Kun laitoksen teho nousee yhtäkkiä, vaikuttaa se myös jännitteen tuottoon generaattorissa. Samalla kun taajuus tippuu, tippuu myös jännite. Kuvassa 33 nähdään kaikkien vaiheiden vaihejännitteet tilanteessa, jossa laitosta käynnistetään. Siinä nähdään, että kahdessa kohdassa kaikki jännitteet tippuvat alle 216 V. Tämä yhtäkkinen suuri tehon tarve johtuu todennäköisesti jonkin suuren laitteen käynnistämisestä. Näissä kyseisissä jännitteen kuoppakohdissa taajuus on käynyt lähellä 48 Hz.



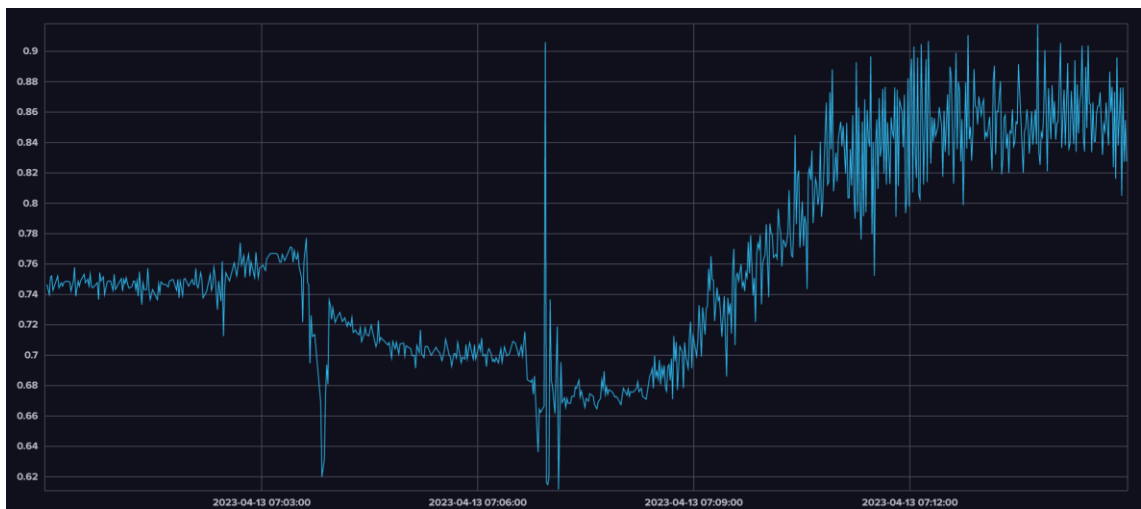
Kuva 33: *Jännitteen heittely laitoksen käynnistysvaiheessa*

Generaattorin tuottama teho on virta kertaa jännite. Kun jokin laite käynnistetään, nähdään se nousuna virrassa. Mikäli jännite tippuu samalla, täytyy virran vielä entisestään nousta, jotta riittävä teho päätyy laitteelle. Tästä syystä jännitteen tippuminen johtaa virran entistä suurempaan nousuun. Kuvassa 34 on samalta ajanhetkeltä virran arvot, kuin Kuvassa 33. Siitä nähdään, että jonkin laitteen käynnistäminen, johtaa hetkelliseen 900 ampeerin virrannousuun. Tämä vastaa melkein tuotannon aikaista virran määrää generaattorissa.



Kuva 34: *Virran vaihtelut laitoksen käynnistysvaiheessa*

Tehokerroin kertoo pätötehon ja näennäistehon suhteesta. Kun tehokerroin on yksi, näennäistehon arvo on sama kuin pätötehon arvo, jolloin loistehoa ei tuoteta. Niin kuin Kuvassta 7 nähdään, että tehokerroin vaikuttaa myös generaattorin hyötysuhteeseen. Kuvasssa 35 nähdään taas samalta aikajaksolta tehokertoimen arvot. Siitä huomataan, että myös tehokerroin notkahtaa samalla, kun taajuus ja jännite tippuu. Tällöin huomataan myös hyvin, kuinka tehokertoimen arvo nousee, kun tuotanto ajetaan ylös. Ennen tuotannon aloittamista lähes kaikki sähkömoottorit pyörivät ja tästä syntyy loistehoa. Kun laitoksen sähkömoottoreita aletaan kuormittaa, pysyy niissä loisteho suhteellisen vakiona ja samalla pätöteho nousee merkittävästi.



Kuva 35: *Generaattorin tehokerroin*

Laitoksen sähkönlaatua ei voida ainakaan kehua, mutta sen vaikutusta laitoksen toimintaan on hankala arvioida. Mikäli sillä olisi merkittäviä vaikutuksia laitteiden ikään, näkyisi se epätavallisen lyhyenä käyttöikänä laitteissa. Tämä voitaisiin huomata, jos verrataan

sähkökoneiden ja taajuusmuuttajien elinikää laitoksessa, joka saa energiansa diesel generaattorilta laitokseen, joka saa energiansa sähköverkosta. Voidaan kuitenkin todeta, että huono sähkönlaatu voi vaikuttaa laitteiden ikään ja hyötysuhteeseen [29]. Laitoksissa on esimerkiksi huomattu, kun diesel generaattorissa on jotain vikaa, se vaikuttaa taajuusmuuttajien toimintaan. Taajuusmuuttajat antavat tällöin esimerkiksi alijännitehälytystä, joka viittaa sähkön huonoon laatuun. Mikäli sähkönlaatu olisi jatkuva ongelma laitoksessa, se voitaisiin huomata toistuvista taajuusmuuttajien hälytyksistä.

Sähkönlaatu voisi parantua monella tapaa lisäämällä energiavarasto tukemaan sähkön tuotantoa. Merkittävimmät parannukset nähtäisiin taajuudessa, jännitteessä ja jännitteen kautta myös virrassa. Energiavarasto toimisi tehopiikkien suodatuksessa, joten sitä hitaammin reagoivan dieselmoottorin kuorma olisi tasaisempi. Tällöin dieselmoottorin pyörimisnopeus ei heittelisi niin paljon, joka johtaisi myös tasaisempaan taajuuteen. Tätä kautta myös generaattorin jännitteen tuotto pysyisi vakiona, joka pienentäisi virtapiikkejä. Ellei energiavaraston tehoelektronikkalaitteita suunnitella loistehon kompensointiin, ei se merkittävästi vaikuta tehokertoimeen arvoon. Kun laitoksen sähkön taajuus tippuu, johtaa se suoraan kytkettyjen oikosulkumoottorien pyörimisnopeuteen ja tämä pyörimisnopeus taas vaikuttaa sähkömoottorin tehokertoimeen. Eli energiavarasto saattaisi tasoitaa generaattorin tehokerrointa. Vaikkakaan harmonisia yliaaltoja ei otettu tarkasteluun, on syytä mainita, että energiavaraston tehoelektronikka laitteisto voi huonontaa tällä saralla sähkönlaatua.

5. TEKNOLOGIAN VALINTA

Tässä kappaleessa valitaan energiavarastointitekniologia mittausdatan ja aikaisemman teorian pohjalta. Teknologian tai teknologioiden tulisi täyttää aikaisemmin määritellyt vaatimukset. Näihin vaatimuksiin kuuluvat riittävä teho, riittävä energia, hyvä käyttöikä ja taloudellinen kannattavuus. Näiden lisäksi se täytyy pystyä toteuttamaan siten, että sitä voidaan taloudellisesti ja suhteellisen helposti liikuttaa muun laitoksen mukana. On myös tärkeää huomauttaa, että kivenmurskauslaitoksilla on usein suuria määriä hiekkapölyä, joka ei saa haitata merkittävästi teknologian toimintaa.

5.1 Vaatimusten täytyminen

Vaatimukset olivat siis riittävä teho (50–150 kW), riittävä energia (1–5 kWh), syklinen ikä (50 000–500 000 sykliä) ja taloudellinen kannattavuus. Näistä rajaavimpia ovat teho ja syklinen ikä, koska ne ovat hankalimmat saavuttaa nykyisillä energiavarastointitekniologioilla. Näiden lisäksi on tärkeää ottaa huomioon teknologian hyötysuhde, koska sillä on suuri merkitys, kuinka paljon energiaa menee hukkaan sitä varastoidessa. Tämä lisäksi täytyy myös pohtia, kuinka sopiva teknologia on kivenmurskauslaitoksen ympäristöön. Laitoksen ympäristö on usein hiekkamonttu. Siellä on usein suuria määriä hiekkapölyä, jonka vaikutusta teknologioihin on hankala arvioida. Näiden lisäksi lämpötilat ovat hiekan radikaalimmat näissä olosuhteissa. Kesäisin hiekkamonttu lämpiää korkeisiin lämpötiloihin, eikä tuuli pääse viilentämään monttua. Nämä kaikki laitoksen ominaisuudet tulee ottaa huomioon teknologiaa valittaessa.

Sykliseen ikään pienillä energiamäärillä tällä hetkellä kykenee vain superkondensaattori ja vauhtipyörä -teknologiat. Mikäli energiamäärä nostettaisiin 50–100 kWh, voisi akku-teknologiat olla vaihtoehto, mutta tämä nostaisi energiavaraston hintaa. Tämän lisäksi näillä kahdella teknologialla on hyvä tehotehoisuus ja matalimmat hinnat kilowattia kohden. Superkondensaattori- ja vauhtipyöräteknologian parhaimmat hyötysuhteet yltyvät yli 90 %, joka mahdollistaa tehokkaan energian varastoinnin. Negatiivisena puolena näille teknologioille on niiden itsepurkunopeus. Kumpikaan näistä ei sovellu pitkäaikaiseen energian varastointiin, poikkeuksena hybridisuperkondensaattori. Mikäli tälle olisi tarvetta ja haluttaisiin esimerkiksi vähentää yöllistä pienen diesel generaattorin käyttöä, olisi Li-ion-teknologia hyvä vaihtoehto superkondensaattorin tai vauhtipyörän rinnalle.

Superkondensaattori- ja vauhtipyöräteknologia ovat hyvin erilaisia energiavarastoja. Toisessa energia varastoituu sähköenergiana ja toisessa kineettisenä energiana. Vauhtipyöräteknologiassa huolestuttaa sen mekaaninen osuus. Kivenmurskauslaitoksen ympäristössä olosuhteet voivat olla hieman hankalat. Mekaanisen rakenteen takia vauhtipyörän huolettavuus on todennäköisesti suurempi kuin superkondensaattorin, joka ei ole puhtainta pölyisessä ympäristössä. Epäilystä herättää myös se, kuinka tarkka on energiavaraston asento sen pitkä käyttöiän takaamiseksi. Mikäli energiavarasto yhdistettäisiin dieselgeneraattorin kanssa samaan vaunuun, saattaisi moottorin värinä myös aiheuttaa ongelmia vauhtipyöräteknologian kanssa. Näitä ongelmia ei todennäköisesti olisi superkondensaattorienergiavarastossa, mutta hiekkapöly voi aiheuttaa harmia esimerkiksi jäähdytyksen tehokkuuteen. Näistä kaikista edellä mainituista syistä paras vaihtoehto energiavarastoteknologiaksi on superkondensaattori.

5.2 Kustannukset

Energiavarastoteknologian kustannuksia on hankala määrittää tarkasti. Itse energiaa varastoivan osan lisäksi kustannuksiin kuuluu energiamuodon muuttamiseen ja kaiken ohjaamiseen tarvittavat laitteet. Lisäksi laitteiden asennus sekä testaus vaativat aikaa ja kustannuksia, jotka täytyy ottaa huomioon kustannuksia laskiessa. On tärkeä myös tiedostaa teknologian käyttökustannukset, jotta voidaan antaa mahdollisimman tarkka arvio teknologian kustannuksista ja siitä, onko investointi kannattava.

Energiavarastojen hinnat eivät yleensä ole saatavilla niitä myyvien yritysten verkkosivuilla. Tämän lisäksi yritykset tarjoavat usein koko paketin, johon kuuluu itse energiavarasto, energiamuodon muuttamiseen liittyvät laitteet, suojalaitteet, ohjaus ja kotelointi. Hinnan tälle koko paketille saa selville laittamalla tarjouspyynnön yritykselle. Tämän työn perusteella saadaan vähintään hyvä pohja sille, millainen energiavarasto ratkaisun tähän systeemiin tarvitaan. Tämä auttaa huomattavasti oikean yrityksen valinnassa ja tarjouspyyntöä tehdessä. Vaatimusten määrittely -osiossa tehdystä Taulukosta 4 nähdään, että superkondensaattoritekhnologia on halvimmasta päästä teknologioita. Tämä johtuu siitä, että dieselmoottorin kuormantasaus vaatii huomattavan määrän tehoa, joka on muihin teknologioihin verrattuna halvempaa toteuttaa superkondensaattorilla. Tämän lisäksi Taulukosta 3 nähdään, että superkondensaattorin hinta per kilowattituntia sykliä kohden on halvin. Tämä on merkittävää, kun otetaan huomioon suuri syklien määrä tämänkaltaisissa systeemissä.

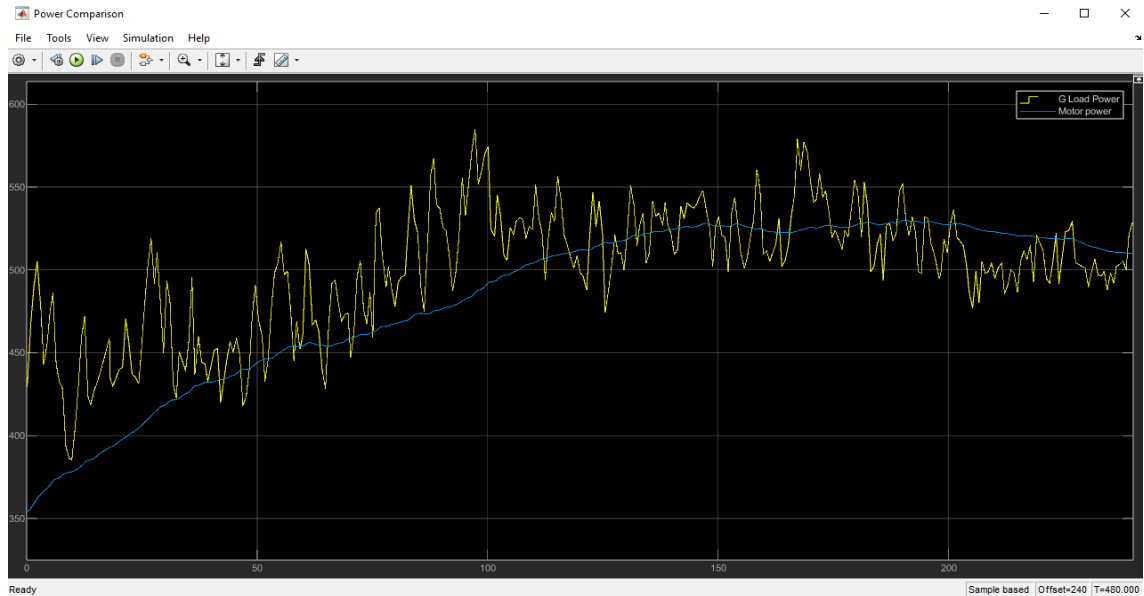
6. ENERGIANTUOTANNON MALLINNUS

Tässä kappaleessa kuvaillaan mallin rakennetta ja perustellaan tehdyt päätökset. Mallia lähdettiin rakentamaan yleisellä tasolla, jotta se on helposti muokattavissa eri teknologioille. Mallin parametrejä on helppo muuttaa soveltumaan toiseen teknologiaan. Tällöin voidaan myös helposti käydä läpi, miten muut kuin valittu teknologia suoriutuu. Malli on pyritty pitämään mahdollisimman yksinkertaisena, jotta simulointiajat pysyvät maltillisina. Simuloinnin nopeus on merkittävää, kun simuloidaan kokonaisten päivien polttoainekulutusta.

6.1 Mallin rakennus

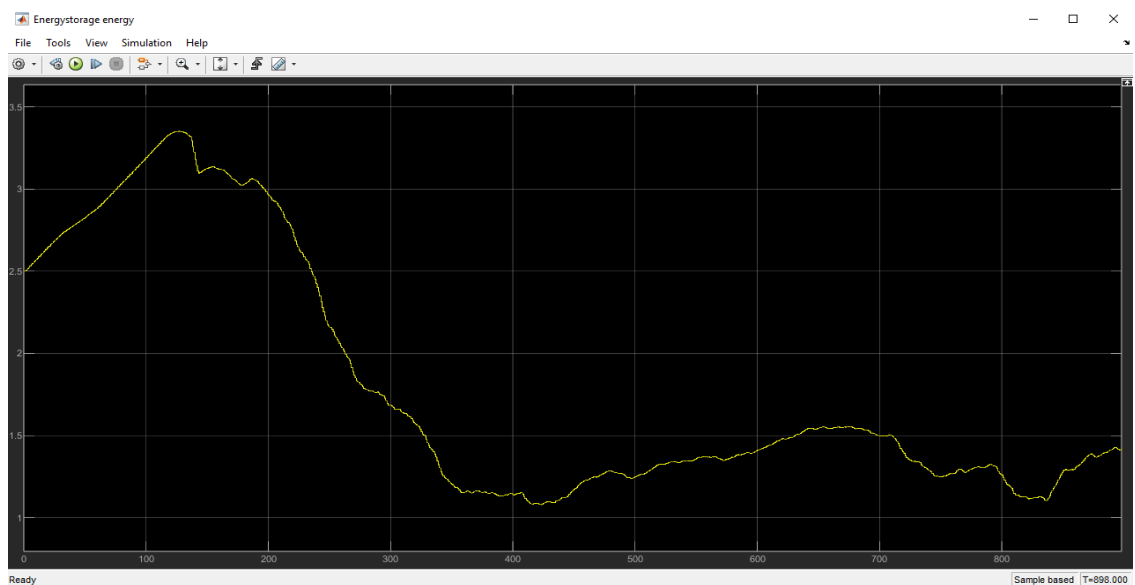
Aikaisemmin mallinnettiin dieselmoottorin ja generaattorin toiminta. Koska dieselmoottorilla oli suuremmat vaikutukset polttoainetalouteen, sen malliin käytettiin enemmän aikaa. Generaattorin mallissa otettiin huomioon vain vaihtuva hyötysuhde eri tehoalueilla. Koska tehoelektronikkalaitteilla on huomattavasti lyhyempi vasteaika, kuin diesel generaattorilla, voidaan energiavarastointiteknologia mallintaa siten, että se joko lisää diesel moottorin kuormaa tai vähentää sitä tarpeen mukaan. Tämä kuorma oli jo mallinnettu dieselmoottori malliin, joten se on helppo implementoida siihen. Energiavarastoon rakennettiin myös ohjaus, jonka mukaan se kompensoi tehopiikkejä. Tätä ohjausta rajoittaa energiavaraston energiamäärä, jonka laskemisen malli myös hoitaa.

Ensimmäisenä energiavaraston mallille tehtiin ohjaus, jolla pystyttiin kompensoimaan tehopiikkejä. Tähän käytettiin vaatimusten määrittelyssä osiossa käytettyä, keskiarvoistusmenetelmää. Keskiarvoksi laitettiin yksi minuutti ja tästä otettiin erotus hetkellisestä tehosta. Tällä tavalla saatiin helposti laskettua tehopiikkien suuruudet. Ohjaus kompensointiin tehtiin yksinkertaisella P-säätimellä, jonka tehtävä on hoitaa keskiarvotehon ja hetkellisen tehon erotukseksi nolla. Tämän jälkeen määritellään lataus- ja purkutehot energiavarastolle ja lisättään tyhjäkäynnin tehoraja, jossa energiavarasto alkaa latautumaan. Samalla määritettiin tyhjäkäynnin aikaiselle lataukselle tehoraja. Tässä vaiheessa mallissa ei otetaan huomioon energiamääriä, mutta tässä vaiheessa voidaan testata kompensoinnin toimivuus. Kuvassa 36 on tämän testauksen tulos, jossa sinisellä nähdään dieselmoottorin tuottama teho ja keltaisella dieselmoottorille menevä kuorma. Kyseisessä testissä ei ole tehorajoja akun latauksella tai purulle ja siitä nähdään, että tehopiikkien kompensointi tasoittaa merkittävästi dieselmoottorilta otettua tehoa.



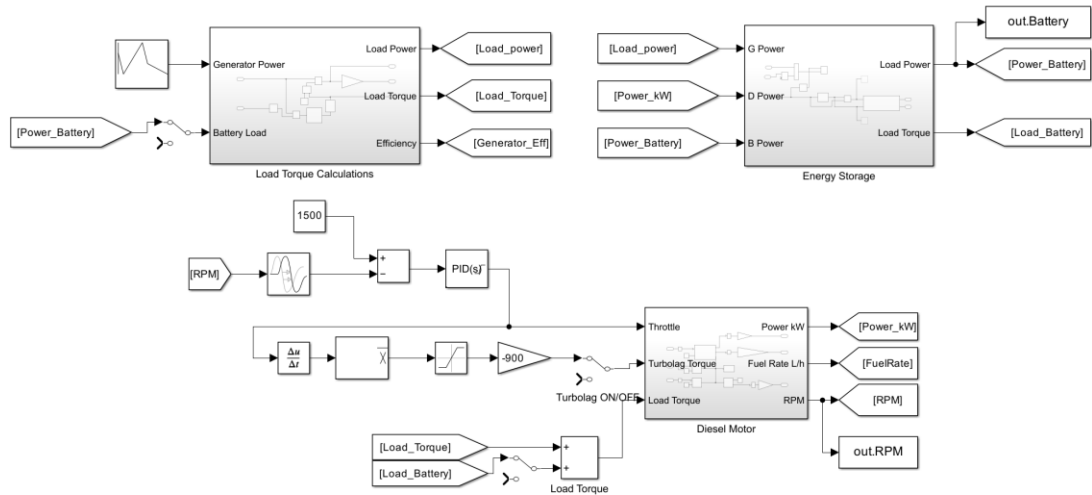
Kuva 36: Tehopiikkien kompensoinnin testaus

Seuraavaksi mallissa otettiin huomioon energiamäärä. Tämä tehtiin laskemalla kompensoidusta tehosta energiamäärä. Tämän avulla voidaan tarkastella energiavaraston energiamäärän prosenttiosuutta (State of Charge, SoC). Tätä käytettiin hyödyksi ohjaamaan energiavaraston energiankulutusta. Kun energiavaraston SoC laskee alle 10 %, puoliteetaan energiavaraston purkuteho ja kun se laskee alle 5 %, lopetetaan energiavaraston purkamisen kokonaan. Energiavarasto toimii normaalien tehorajojen mukaan, kun SoC on 10–99 % välissä. Kun energia määrä nousee yli 99 %, lopetetaan energiavaraston lataaminen. Todellisuudessa tämä ohjaus voitaisiin toteuttaa huomattavasti paremmin ja monimutkaisemmin, mutta tässä työssä sillä ei ole merkittävää vaikutusta tuloksiin. Energiavaraston energiamäärän mallinnuksen toimivuus nähdään Kuvassa 37.



Kuva 37: Energiavaraston energian testaus

Näiden lisäksi energiavaraston teho lisättiin myös generaattorin hyötysuhteen laskentaan, joten energiavaraston vaikutus otetaan huomioon generaattorin hyötysuhteen vaikutuksissa. Kuvassa 38 on koko Simulink-malli kyseisestä systeemistä. Siinä nähtyjen palikoiden lisäksi Simulink-malli sisältää lukuisia määriä Kuvan 37 mukaisia ikkunoita, joista nähdään simuloinnin tulokset. Tätä mallia testataan seuraavassa osiossa varmistuaksemme sen toimivuudesta eri tilanteissa. Mallia testaan esimerkiksi erilaisilla energiavaraston tehorojoilla ja energiamäärillä.

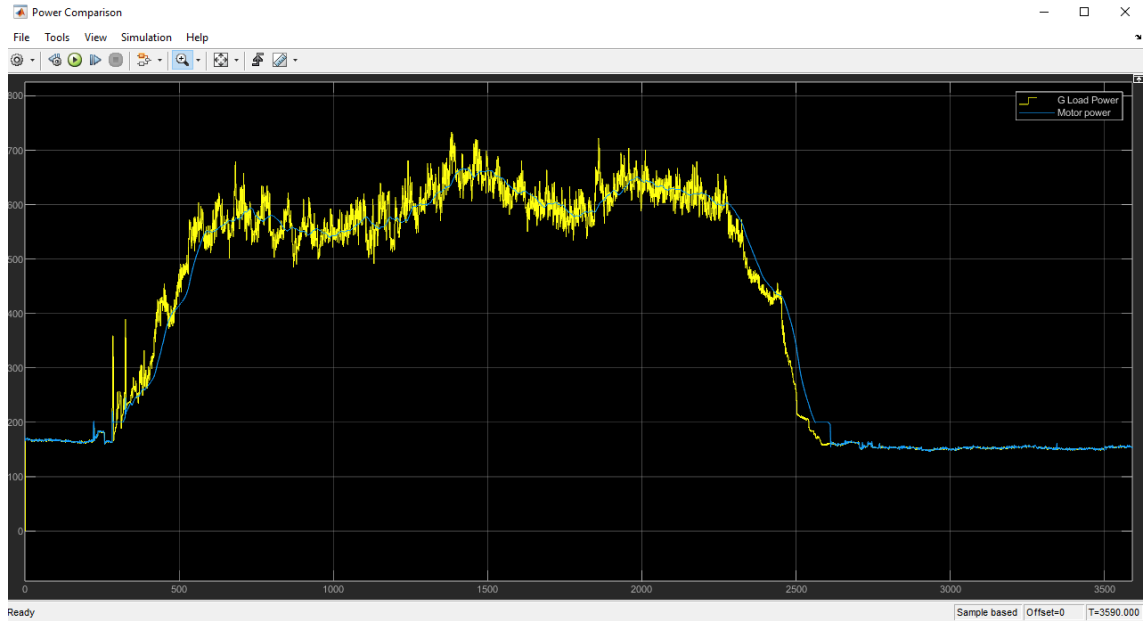


Kuva 38: Simulink-malli koko systeemille

6.2 Mallin testaus

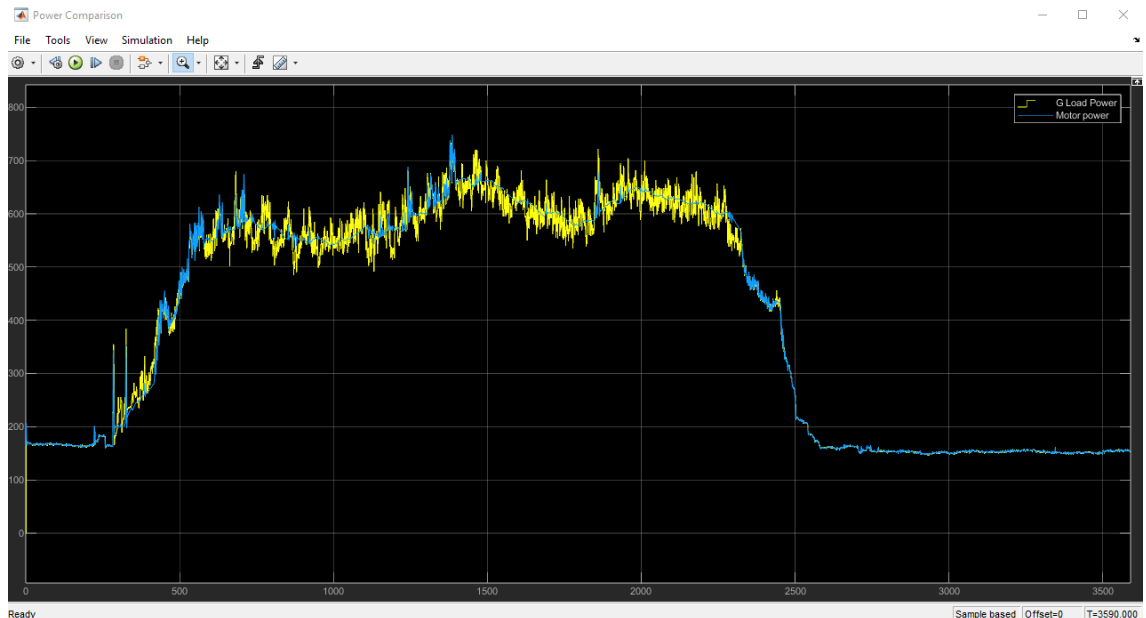
Mallia testataan laitoksen yhden tunnin mittaisella testidatalla. Energiavarastoa simuloimassa varmistetaan, että energiavarasto toimii oikein. Simuloinnin aikana voidaan esimerkiksi seurata energiavaraston energiamäärä ja varmistaa, että se riittää kyseisiin skenaarioihin. Kun energiamäärä riittää, pystyy energiavarasto suodattamaan tehopiikkejä jatkuvasti, jolloin sen hyöty maksimoituu. Kun energiamäärä loppuu, ei energiavarasto pysty suodattamaan nousevia tehopiikkejä. Samalla varmistetaan, että tehopiikkien kompensointi toimii oikein tehorojoja säätämällä.

Aloitetaan tarkastelemalla dieselmoottorille asetettua kuormaa ja vertaamalla tätä dieselmoottorin tuottamaan tehoon. Kuvassa 39 nähdään sinisellä moottorin tuottama teho ja keltaisella moottorille asetettu kuorma. Kuvasta nähdään kuinka hyvin energiavarasto tasoittaa moottorin kuormaa. Tämän pitäisi teoriassa parantaa polttoainekulutusta, koska moottorin ei tarvitse tehdä suuria tehon muutoksia, jolloin moottori ei turbon takia toimi joka hetki optimaalisesti. Tässä kyseisessä simulaatiossa energiavaraston energiamäärä oli 5 kWh, joka oli riittävän suuri kyseiseen tilanteeseen. Energiavaraston latauksen ja purun tehorojat olivat molemmat 150 kW.



Kuva 39: Moottorin tuottama teho (sinisellä) ja moottorin kuorma (keltaisella)

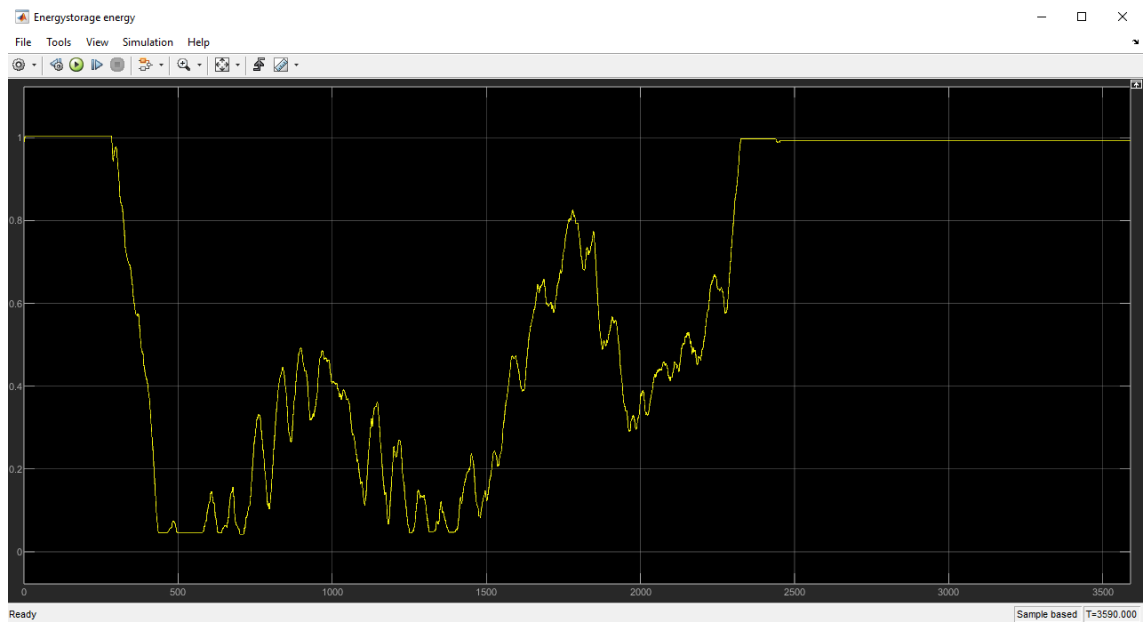
Seuraavaksi muutetaan energiavaraston energiamäärä 1 kWh ja muutetaan latauksen ja puron tehorajat 50 kW. Tällöin voidaan odottaa enemmän vaihtelua moottorin tuottamassa tehossa ja polttoainekulutuksessa. Tehoraja rajoittaa jatkuvasti tehopiikkien suodatusta, mutta tämän lisäksi energian loppuminenkin haittaa nousevien tehopiikkien suodatusta. Tämä tulos nähdään Kuvassa 40, josta huomataan, kuinka paljon moottorin tuottama teho värähtelee.



Kuva 40: Moottorin tuottama teho (sinisellä) ja moottorin kuorma (keltaisella)

Tässä kyseisessä simulaatiossa energiavaraston energiamäärä oli asetettu 1 kWh, joka ei ollut täysin riittävä. Laitoksen ylösajo toteutetulla energiavaraston ohjauksella kuluttaa

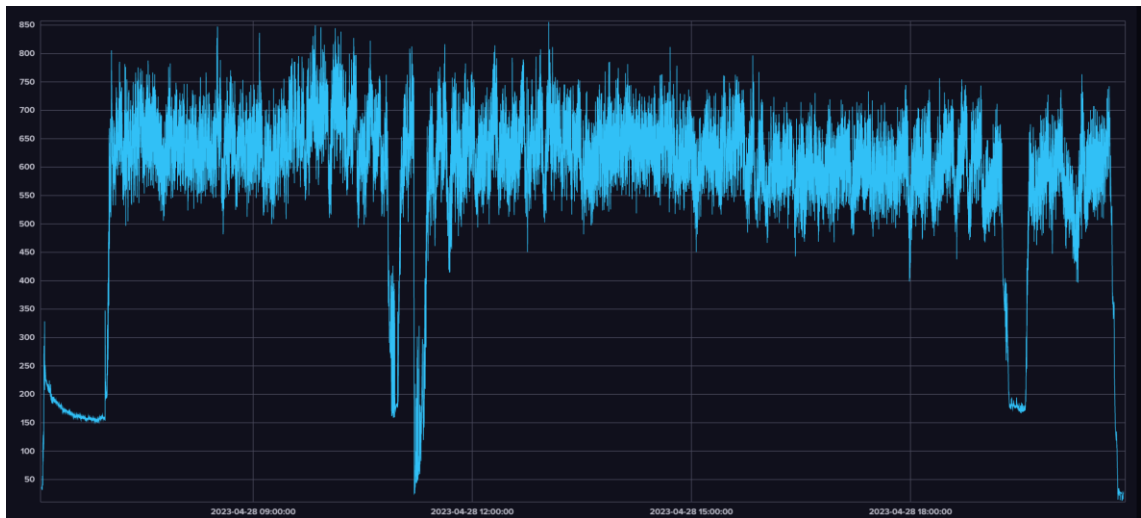
huomattavan määrän energiasta, joka nähdään Kuvasta 41. Kuvista 40 ja 41 voidaan huomata, kun energiavaraston energiamäärä on alhaalla, alkaa moottorin tuottama teho vaihtelevaan merkittävästi. Myös energiavaraston täytyminen aiheuttaa värähtelyä, kun laitos ajetaan alas. Tällä ei ole merkittävää vaikutusta, koska tehopiikit ovat todella pieniä laitoksen alasajon ja tyhjäkäynnin aikana. Tämän ja tarkemman itsetehdyn tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että energiavarasto toimii kuten se oli suunniteltu. Kuvasta 41 huomataan myös, että kovin suurilla tyhjäkäyntilataustehoilla ei tarvitse käyttää, koska energiavarasto latautuu täyteen jo laitoksen alasajovaiheessa.



Kuva 41: Energiavaraston energiamäärä

7. TULOKSET

Tässä kappaleessa esitellään mallin simulaation tulokset. Tulokset saadaan ottamalla laitoksesta kokopäivän mittainen datajakso, joka nähdään Kuvassa 42, ja ajamalla simulaatio sen avulla. Simulaatio ajetaan ensin ilman energiavarastoa ja tämän jälkeen energiavaraston avulla. Näistä simulaatioista lasketaan dieselmootorin polttoainekulutukset. Tuloksia verrataan toisiinsa ja tämän jälkeen arvioidaan tuotto sekä päästövähennykset. Kappaleen lopussa on tähän tutkimukseen liittyvää pohdintaa.



Kuva 42: Simuloinnissa käytettävä datajakso

7.1 Mallin tulokset

Kokopäivän mittaisia simulointeja toteutetaan lukuisilla eri energiavarastoparametreilla. Tästä otetaan kokonaispolttoainekulutus ylös ja merkitään se taulukkoon. Eri parametreilla tehtyjä simulointeja verrataan ilman energiavarastoa tehtyyn simulointiin. Energiavarastoa simuloidaan eri lataus- ja purkutehoilla, jotka ovat 50 kW, 100 kW ja 150 kW. Tämän lisäksi energiavaraston energiamäärää simuloidaan 1 kWh, 2.5 kWh ja 5 kWh energiamäärillä. Simuloinnissa on valittu energiavaraston hyötysuhteeksi 95 prosenttia. Tehon keskiarvoajaksi valittiin lähes jokaiseen 30 sekuntia. Poikkeuksena olivat simuloinnit, jossa energiamäärä oli 5 kWh ja tehot 100 ja 150 kW. Näihin keskiarvoajaksi valittiin yksi minuutti, koska tällöin pystyttiin paremmin hyödyntämään suurta energiamäärää. Tyhjäkäynnin latausrajaksi asetettiin 200 kW ja lataustehoksi 30 kW. Simulointeja tehdessä huomattiin, että energiamäärä väheni pienellä kulmakertoimella pitkissä simuloinneissa, joka aiheutti huonoa suorituskykyä positiivisia tehopiikkejä suodattaessa. Tämä korjattiin lisäämällä lataus- ja purkutehon laskentaan yhden kilowatin verran

offsetia lataukseen päin. Simulointien alkuun alustettiin energiavaraston energiamäärä 0.99 SoC, koska mittausdatan lopussa energiavarasto ehtii latautumaan täyteen.

Simulointien tulokset energiavaraston kanssa on kerätty Taulukkoon 5 ja ilman energiavarastoa polttoainemääräksi saatiin 1954.10 litraa. Tämä 1954.10 litraa on lähellä oikeaa kulutusta (1947.53 litraa) kyseisen mittauksen ajalta. Taulukosta 5 nähdään, että kun lataus- ja purkutehoa nostetaan, laskee se polttoainekulutusta. Kun energiavarastolla on suurempi teho saatavilla tehopiikkien suodattamiseen, se pystyy suodattamaan paremmin ja suurempia tehopiikkejä, joka johtaa pienempään kulutukseen. Tässä suurin hyppy nähdään 50 kW ja 100 kW välillä, jolloin polttoainemäärä tippuu noin 4 litraa. 100 kW ja 150 kW tehon muutoksessa ei ole kovin merkittävää eroa, joten on todennäköistä, että ei ole kannattavaa lähteä 150 kW tehopiikkejä täysin suodattamaan.

Taulukko 5. *Simulaation tulokset*

	50 kW	100 kW	150 kW
1 kWh	1937.52 L	1933.57 L	1933.35 L
2.5 kWh	1937.29 L	1933.17 L	1932.88 L
5 kWh	1937.29 L	1932.51 L	1932.06 L

Taulukkoon 6 on kirjattu simulointien polttoainemäärän prosentuaaliset säästöt, jonka mukaan noin yhden prosentin säästöihin voitaisiin päästä. Polttoainesäästön määrään vaikuttaa merkittävästi laitoksen tuotannontila. Merkittäviä tehopiikkejä ei tapahdu, kun laitos käy tyhjäkäynnillä, joten silloin ei synny merkittäviä säästöjä. Tosin, kun eri koneita käynnistetään, voi suuria tehopiikkejä ilmetä. Tämä huomattiin sähkönlaatuosiossa ja Kuvassa 34. Kuitenkin merkittävin energiavaraston etu nähdään, kun laitos on tuotanto-käytössä tai tuotannon ylösajossa. Niin kuin vaatimusten määrittely -osiossa huomattiin, laitoksen ylösajo vaatii merkittävän määrän energiaa. Tämän takia energiamäärän lisääminen auttaa eniten laitoksen ylösajotilanteeseen. Tällöin energiavaraston energiamäärä riittää pitkäkestoiseen positiivisen tehon suodatukseen.

Taulukko 6. *Simulaation prosentuaaliset säästöt*

	50 kW	100 kW	150 kW
1 kWh	0.849 %	1.051 %	1.062 %
2.5 kWh	0.860 %	1.071 %	1.086 %
5 kWh	0.860 %	1.110 %	1.113 %

Taulukoista 5 ja 6 nähdään, että taloudellisesta näkökulmasta todennäköisesti kannattavin vaihtoehto on 100 kW teholla oleva energiavarasto. Nostamalla tehoa ei merkittävästi paranneta polttoainekulutusta. Taulukosta 3 nähdään, että tämä nostaisi merkittävästi energiavaraston hintaa. Hieman hankalampaa on arvioida, mikä energiamäärä on kannattavin, koska pientä parannusta on nähtävissä suuremmassa energiamäärässä. Tämän lisäksi suurempi energiamäärä lisää energiavaraston syklistä ikää. Taulukosta 3 nähdään, että energiamäärän suurentamisella ei ole niin merkittävää vaikutusta energiavaraston hintaan, koska energiamäärät ovat suhteellisen pienet. Tämän lisäksi kun halutaan tietty teho energiavarastolle, tulee luonnostaan tietty määrä energiaa, koska superkondensaattoriteknologiassa teho- ja energiamäärä liittyvät toisiinsa.

7.2 Polttoainesäästöt ja päästöjen vähennykset

Kevyen polttoöljyn keskihinta on vaihdellut kuluneen kolmen vuoden aikana merkittävästi. Tammikuussa 2020 kevyen polttoöljyn hinta on ollut 0.72 €/L. Useiden maailmantapahtumien myötä sen hinta on tuon jälkeen lähtenyt nousuun ja se kävi huipussaan maaliskuussa 2022, jolloin sen hinta oli 2.06 €/L. Tämän jälkeen hinta on laskenut epätasaisesti ja nyt huhtikuussa 2023 hinta on 1.4 €/L. [30] Hinnanvaihtelu vaikuttaa merkittävästi energiavaraston tuomaan hyötyyn, ja polttoaineen hinnannousu on yksi kiihdyttävistä tekijöistä tämän kaltaiseen tutkimukseen. Taulukosta 5 nähdään, että polttoainesäästöt ovat 16.58–22.04 litraa riippuen energiavaraston ominaisuuksista. Tämän vuoden huhtikuun hinnan perusteella säästö olisi tällöin noin 23–31 euroa päivältä. Vuoden 2022 maaliskuun hinnalla säästö oli noin 34–45 euroa päivältä. Tähän vaikuttaa myös, kuinka tehokkaasti tuotantolaitos on ollut tuotannossa. Tästä voidaan todeta, että mikäli tuotantoa pystyttäisiin ajamaan simuloitun tilanteen kaltaisesti 200 päivän ajan, vuodessa säästöt voisivat olla noin 4600–6200 euron luokkaa. Tässä on polttoaineen hintana käytetty vuoden 2023 huhtikuun hintaa, joka oli 1.4 €/L.

Hieman paremman kuvan tuotosta voisi antaa säästö tuotantotuntia kohden. Simuloinnissa käytetyssä datajaksossa laitos oli tuotantokäytössä noin 13 tuntia. Mikäli aikaisemmin laskettu 16.58–22.04 litran säästö lasketaan tuotantotunnille, saadaan 1.28–1.70 litraa säästöä per tuotantotunti. Tuotantotunnit laitoksilla ovat noin 3000–3500 tuntia vuodessa. 3000 tunnille polttoainesäästöt ovat noin 3850–5100 litraa. 3500 tunnille polttoainesäästöt ovat noin 4450–5950 litraa. Vuoden 2023 huhtikuun hinnalla saadaan lasketua, että säästöt voisivat olla 5400–8300 euroa vuodessa. Lasketaan seuraavaksi tarkemmin yhdellä simuloinnilla, jossa energiavaraston teho oli 100 kW ja energiamäärä 2.5 kWh. Kyseisillä energiavaraston arvoilla simuloinnissa säästettiin 20.93 litraa poltto-

ainetta. Tämä säästö tuotantotuntia kohden on 1.61 litraa. Käyttämällä aikaisemmin mainittuja tuotantotunteja saadaan laskettua vuosittaiset polttoainesäästöt. Tästä saadaan tulokseksi noin 4850–5650 litraa, josta voidaan vuoden 2023 huhtikuun hinnoilla laskea rahalliset säästöt. Rahalliseksi säästökseksi saadaan noin 6750–7900 euroa vuodessa.

Päästövähennykset voidaan suoraan nähdä prosentuaalisesta polttoainesäästöstä. Päästövähennyksissä pitää myös ottaa huomioon energiavaraston valmistamiseen kuluvat päästöt. Tämän tarkan arvon saa tietää vasta tehon ja energiamäärän valinnan jälkeen. Tämän lisäksi valmistajia ja erilaisia toteutuksia superkondensaattoriteknologialle on lukuisia. Superkondensaattoriteknologia on kuitenkin kokonaisuutena ympäristöystävällinen ja helposti kierrätettävissä [1].

7.3 Pohdintaa

Näiden tulosten perustella on selkeää, että energiavarasto auttaisi diesel generaattorin polttoainetaloudellisuudessa. Ei voida kuitenkaan täydellä varmuudella sanoa, että parannus olisi tuota yhden prosentin luokkaa. Simuloidun mallin heikkouksia on muutamia. Ensimmäinen on energiavarastomallin yksinkertaisuus. Monimutkaisempi malli vaatisi esimerkiksi paremman ohjauksen toteuttamisen ja sähkön mallintamisen. Mallissa ei otettu huomioon energiavaraston purkautumisnopeutta, joka huonontaa energiavaraston hyötyjä. Mikäli malliin olisi mallinnettu sähkö, olisi sähkönlaatua ja tehokerrointa voitu arvioida paremmin. Nyt tehokertoimen huomiointi mallissa jäi pois ja sähkönlaadun arviointi jäi suhteellisen pintapuoliseksi. Mikäli sähkö olisi otettu mukaan malliin, olisi generaattorikin pitänyt mallintaa huomattavasti monimutkaisemmin. Voidaan kuitenkin todeta, että tämän työn tulosten kannalta sähkön mallintaminen olisi ollut turhaa ja se olisi pidentänyt simulointiaikoja merkittävästi. Oletusten myötä saavutettiin tehokas malli diesel generaattorista ja siihen liitettävästä energiavarastosta, jonka tekemiseen ja simulointiin ei kulunut ylettömiä määriä aikaa.

Työssä sivuttiin tilannetta, jossa tehopiikkejä suodattamalla voitaisiin ottaa käyttöön pienempi diesel generaattori. Tämä vähentäisi tyhjäkäynnin polttoaineenkulutusta, diesel generaattorin hintaa sekä mahdollistaisi paremman päästöluokan dieselmoottorin käytön. Kuvassa 43 nähdään kuinka laitoksen kuormanmäärä vaikuttaa diesel generaattorin tehokkuuteen. Tyhjäkäyntitehoilla diesel generaattorin tehokkuus on huonoimmillaan ja paranee, kun kuorma kasvaa. Kuvassa 43 mielenkiintoista on se, että tehokkuus alkaa taas huonontumaan, kun kuorman teho nousee yli 400 kW. Tämä kertoo siitä, että paras

hyötysuhde diesel generaattorilla olisi jossain 200–400 kW välillä. Tämän syynä voi olla dieselmoottori, generaattori, tehokerroin tai tehopiikkien vähäisyys.



Kuva 43: Laitoksen teho (kW) ja tehokkuus (L/kWh)

Pienemmän diesel generaattorin käyttö myös huonontaisi sähkön inertiaa, koska dieselmoottorin ja generaattorin inertia pienisi. Tämän kaltaisen systeemin mitoitus olisi suhteellisen hankalaa, koska niin moni asia vaikuttaa kivenmurskauslaitoksen tehon tarpeeseen. Laitoksen tehoon vaikuttaa esimerkiksi murskattavan kiven laatu ja kovuus, ulkolämpötila sekä haluttu tuote. Joidenkin kivituotteiden tekeminen vaatii esimerkiksi murskainten ajoa raskaammalla kuormalla. Tähän tarkoitukseen tarkoitettu energiavarasto vaatii myös suuremman energiamäärän ja suuremmat maksimitehot, mitä nyt simuloinnissa käytettiin. Nämä lisäävät ennestään energiavaraston hintaa. Tämän kaltaisessa toteutuksessa voitaisiin käyttää toista pienempää diesel generaattoria apuna sähköntuotannossa. Tällöin energiavarasto tukisi suurempaa diesel generaattoria ja kun energiavaraston energia olisi vähissä, käynnistettäisiin pienempi diesel generaattori auttamaan ja lataamaan energiavarasto. Tämän kaltaisella totutuksella on onnistuttu vähentämään

polttoainekulutusta öljynporauslautalla, jossa sähköntuottamiseen käytetään useita diesel generaattoreita [31]. Tämänkaltaiseen toteutukseen voitaisiin vielä yhdistää aurinkopaneeleita, jotka aurinkoisina päivinä vähentäisivät ennestään polttoainekulutusta.

Energiavarastoon investoidessa on todennäköisesti kannattavaa myös investoida aurinkovoimaan. Se voitaisiin implementoida energiavaraston DC-kiskoon, jolloin ei tarvittaisi ylimääräistä invertteriä aurinkopaneeleille. Tällä hetkellä yhden kilowattitunnin energian tuottamiseen diesel generaattorilla kuluu rahaa polttoaineisiin vähintään 0.30 euroa, jonka lisäksi tulee muitakin kustannuksia. Näiden tietojen perusteella voidaan laskea, että aurinkopaneelin takaisinmaksuaika olisi suhteellisen lyhyt, kun vertaa laitoksiin, joissa on sähköverkko. Aurinkopaneeliin sijoittaminen tuo kuitenkin omat haasteensa laitokseen. Paneelit tulisi sijoittaa siten, etteivät hiekkamontun seinät ja hiekkapöly häiritse niiden toimintaa. Tämän toteutus voi lisätä merkittävästikin aurinkopaneelien investointikustannuksia.

8. YHTEENVETO

Työssä selvitettiin toteutuskelpoinen energiavarasto diesel generaattorin rinnalle, joka tasoittaa moottorin kuormaa ja vähentää polttoaineenkulutusta. Myös moottorin sammuttaminen oli työn alussa vaihtoehtona polttoaine säästötavaksi, mutta tämä vaatisi suuria määriä energiaa, joten se jätettiin pois. Työssä tutkittiin eri energian varastointitapoja, mallinnettiin diesel generaattori, tutkittiin tehoelektronikkalaitteistoja ja sähkönlaatua, mallinnettiin energiavarasto diesel generaattorin rinnalle ja simuloitiin mallia useilla eri energiavaraston parametreilla.

Työn alussa tutkittiin eri energiavarastointitekniikoita ja valittiin sieltä sopivimmat tähän sovellukseen. Tärkeinä kriteereinä oli energiavaraston liikuteltavuus, jotta se voidaan yhdistää mobiiliin kivenmurskauslaitokseen, ja toimivuus laitoksen hankalissa olosuhteissa. Työssä tutkittiin akku-, vauhtipyörä- ja superkondensaattoritekniikoita. Akuteknologioihin kuului lyijyakku, NiMh-akku, virtausakku sekä Li-ion-akku. Tämän jälkeen tarkasteltiin näiden teknologioiden yhdistelmien mahdollisuuksia. Koska diesel generaattori oli oleellisessa osassa tätä työtä, myös dieselmoottoria ja generaattoria tutkittiin. Tämä antoi hyvän pohjan jatkaa työtä seuraavissa kappaleissa.

Seuraavaksi työssä tutkittiin laitoksen käyttäytymistä, mallinnettiin dieselmoottori ja generaattori. Työssä mallintamiseen käytettiin Matlabin Simulink -työkalua, johon diesel generaattorin malli tehtiin. Tehty malli verifioitiin mittausdatalla laitoksesta ja todettiin hyväksi. Mallin avulla saatiin polttoainekulutuksesta tietoa, jota käytettiin myöhemmin tulosten arviointiin. Tämän jälkeen tutkittiin laitoksen tehon käyttäytymistä ja määritettiin vaatimukset energiavaraston teholle, energiamäärälle ja sykliselle iälle. Vaatimusten määrittelystä huomattiin, että energiavaraston tehontuotto ja syklinen ikä täytyy olla suuri. Tämän lisäksi huomattiin, että pienellä määrällä energiaa pystytään suodattamaan erityisen hyvin tehopiikkejä moottorilta. Näitä vaatimuksia käytettiin hyväksi valittaessa paras energiavarastointitekniologia tähän tarkoitukseen.

Seuraavassa kappaleessa esiteltiin tehoelektronikkalaitteet, jotka olivat oleellisessa osassa energiavarastoa. Näihin laitteisiin kuuluivat tasasuuntaaja, vaihtosuuntaaja, taajuusmuuttaja sekä tasasähkömuunnin. Näiden laitteiden kokoonpanot esiteltiin erilaisissa tilanteissa, jonka jälkeen tutkittiin laitoksen sähkönlaatua. Sähkönlaatua arvioitiin tutkimalla laitoksen taajuutta, jännitettä, virtaa ja tehokerrointa. Laitoksen sähkönlaatu ei ollut parhain mahdollinen ja todettiin, että se voi vaikuttaa sähkölaitteiden käyttöikänsä. Samalla todettiin, että energiavarasto parantaisi monella tapaa laitoksen sähkönlaatua,

koska suurissa tehopiikeissä sähkönlaatu heikkeni merkittävästi. Seuraavassa kappaleessa valittiin energiavarastoteknologia, joka parhaiten soveltuisi tähän sovellukseen. Valinta tehtiin käyttämällä hyödyksi aikaisemmin tutkittua tietoa ja vaatimusten määrittelyä. Tässä kohtaa karsiutuivat pois kaikki muut, paitsi kaksi teknologiaa, jotka olivat superkondensaattori ja vauhtipyörä. Merkittävimpänä tekijänä näissä teknologioissa oli niiden suuri syklinen ikä. Näistä kahdesta teknologiasta valittiin superkondensaattori, koska se todennäköisemmin toimisi laitosten hankalissa ympäristöissä. Valinta-kappaleen jälkeen lisättiin energiavaraston malli diesel generaattorin rinnalle. Mallia simuloitiin ja tarkasteltiin, että se toimii kuten kuuluukin.

Seuraavassa kappaleessa simuloitiin mallia yhden päivän mittaisella datajaksolla. Simuloinnit tehtiin useilla energiavaraston arvoilla, jotta nähtäisiin tehon ja energiamäärän vaikutus tuloksissa. Tulosten perusteella saatiin noin 16.5–22 litran parannus polttoainekulutukseen 13 tunnin tuotannon aikana. Tämä tarkoitti parhaimmillaan hieman yli yhden prosentin parannusta polttoainekulutuksessa. Useita eri tapoja käytettiin laskemaan mahdollisia säästöjä vuodessa ja tulokset olivat kaikkea 4600–8300 euron väliltä. Tässä työssä ei täydellisesti onnistuttu arvioimaan energiavaraston kannattavuutta, mutta arvokasta informaatiota säästömahdollisuuksista ja energiavaraston vaatimuksista onnistuttiin saamaan. Työn lopussa esiteltiin pohdintaa työstä ja mahdollisia jatkotutkimusmahdollisuuksia.

LÄHTEET

- [1] International Electrotechnical Commission, "Electrical Energy Storage", 2011.
- [2] "Battery Storage", *Cleanpower*. <https://cleanpower.org/facts/clean-energy-storage/battery-storage/> (viitattu 26. tammikuuta 2023).
- [3] K. W. Beard ja T. B. Reddy, Toim., *Linden's handbook of batteries*, 5. p., vsk. Reddy, Thomas B. 2019.
- [4] "Mechanical electricity storage", *Cleanpower*. <https://cleanpower.org/facts/clean-energy-storage/mechanical-electricity-storage/> (viitattu 28. tammikuuta 2023).
- [5] M. Khalid, "A review on the selected applications of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems for microgrids", *Energies*, vsk. 12, nro 23. MDPI AG, 2019.
- [6] M. E. Şahin, F. Blaabjerg, ja A. Sangwongwanich, "A Comprehensive Review on Supercapacitor Applications and Developments", *Energies*, vsk. 15, nro 3. MDPI, 1. helmikuuta 2022.
- [7] "EDLC-Charge-Distribution.png", *Wikipedia commons*, 2013. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EDLC-Charge-Distribution.png> (viitattu 1. helmikuuta 2023).
- [8] Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, ja Yulong Ding, "Progress in electrical energy storage system: A critical review", *Progress in electrical energy storage system: A critical review*, 2009.
- [9] Z. S. Iro, C. Subramani, ja S. S. Dash, "A brief review on electrode materials for supercapacitor", *International Journal of Electrochemical Science*, vsk. 11, nro 12. Electrochemical Science Group, ss. 10628–10643, 2016.
- [10] Julio José Caparrós Mancera, Rosa Rengel, Adrián Zafra Pérez, Francisca Segura Manzano, Eduardo López¹, ja José Manuel Andújar, "Hybrid Supercapacitors as a Promising Alternative for Hybrid Electric Vehicles Fueling", *Hybrid Supercapacitors as a Promising Alternative for Hybrid Electric Vehicles Fueling*, 2020.
- [11] Goran Mandic ja Adel Nasiri, "Modeling and Simulation of a Wind Turbine System with Ultracapacitors for Short-Term Power Smoothing", *Modeling and Simulation of a Wind Turbine System with Ultracapacitors for Short-Term Power Smoothing*.
- [12] S. M. Mousavi G, F. Faraji, A. Majazi, ja K. Al-Haddad, "A comprehensive review of Flywheel Energy Storage System technology", *A comprehensive review of Flywheel Energy Storage System technology*, 2016.
- [13] P. Yulong, A. Cavagnino, S. Vaschetto, C. Feng, ja A. Tenconi, "Flywheel Energy Storage Systems for Power Systems Application", 2017.
- [14] Y. Bai *ym.*, "Storage of Mechanical Energy Based on Carbon Nanotubes with High Energy Density and Power Density", *Advanced Materials*, vsk. 31, nro 9. Wiley-VCH Verlag, 1. maaliskuuta 2019.
- [15] T. R. Ayodele, A. S. O. Ogunjuyigbe, ja N. O. Oyelowo, "Hybridisation of battery/flywheel energy storage system to improve ageing of lead-acid batteries in PV-powered applications", *Hybridisation of battery/flywheel energy storage system to improve ageing of lead-acid batteries in PV-powered applications*, 2020.
- [16] L. Barelli *ym.*, "Flywheel hybridization to improve battery life in energy storage systems coupled to RES plants", *Flywheel hybridization to improve battery life in energy storage systems coupled to RES plants*, 2019.
- [17] H. Toodeji, "A developed flywheel energy storage with built-in rotating supercapacitors", *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vsk. 27, nro 1, ss. 213–229, 2019.
- [18] Constantine D. Rakopoulos ja Evangelos G. Giakoumis, *Diesel Engine Transient Operation*. Springer London, 2009.
- [19] J. Salazar, F. Tadeo, ja C. Prada, "Journal of Renewable Energy and Sustainable Development (RES-D) Modelling Of Diesel Generator Sets That Assist Off-Grid Renewable Energy Microgrids", 2015, [Verkossa]. Saatavissa: <http://apc.aast.edu>
- [20] D. F. Warne, *Newnes Electrical Power Engineer's Handbook*, 2. p. 2005.
- [21] "HCI634K-Technical Data Sheet".
- [22] G. Iwanski, Ł. Bigorajski, ja W. Koczara, "Speed control with incremental algorithm of minimum fuel consumption tracking for variable speed diesel generator", *Energy Convers Manag*, vsk. 161, ss. 182–192, huhti 2018.

- [23] A. M. Trzynadlowski, *Introduction to modern power electronics*. Hoboken: Wiley, 2015.
- [24] "Diode Bridge Rectifier", *Electrical 4 U*, 2020. <https://www.electrical4u.com/diode-bridge-rectifier/> (viitattu 7. helmikuuta 2023).
- [25] "3 Phase Full Wave Diode Rectifier", *Electrical 4 U*, 2021. <https://www.electrical4u.com/three-phase-full-wave-diode-bridge-rectifier/> (viitattu 9. helmikuuta 2023).
- [26] "Power Inverters: What Are They & How Do They Work?", *Electrical 4 U*, 2020. <https://www.electrical4u.com/power-inverter/> (viitattu 17. maaliskuuta 2023).
- [27] R. Teodorescu, *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. teoksessa Wiley - IEEE. Chichester, West Sussex: Wiley, 2010.
- [28] A. Narvaez, C. Cortes, ja C. L. Trujillo, "Comparative analysis of topologies for the interconnection of batteries and supercapacitors in a Hybrid Energy Storage System", teoksessa *2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2017*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., heinä 2017.
- [29] A. Eberhard, Toim., *Power Quality*. InTech, 2011.
- [30] "Suomen virallinen tilasto (SVT): 11xx -- Polttonesteiden keskihintoja, kuukausitiedot, 2002M01-2023M04", 2023. https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_khi/statfin_khi_pxt_11xx.px/ (viitattu 5. toukokuuta 2023).
- [31] D. Pavković, A. Sedić, ja Z. Guzović, "Oil drilling rig diesel power-plant fuel efficiency improvement potentials through rule-based generator scheduling and utilization of battery energy storage system", *Energy Convers Manag*, vsk. 121, ss. 194–211, elo 2016.