



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MARKUS NUUTTILA
SÄHKÖAUTON AKUNHALLINTAJÄRJESTELMÄ

Kandidaatintyö

Tarkastaja: tutkijatohtori Jenni
Rekola

TIIVISTELMÄ

MARKUS NUUTTILA: Sähköauton akunhallintajärjestelmä

(engl. Battery Management Systems in Electric Vehicles)

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 38 sivua, 2 liitesivua

Syyskuu 2017

Tieto- ja sähkötekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma, sähkötekniikka

Pääaine: Tehoelektroniikka

Tarkastaja: tutkijatohtori Jenni Rekola

Avainsanat: sähköautot, mopoautot, akunhallintajärjestelmä, BMS, simulointi, tasavirtakoneet, mittausjärjestelmät

Akunhallintajärjestelmän tehtävänä on maksimoida akulla toimivan sähkölaitteen turvallisuus ja hidastaa laitteen akun kulumista. Tämä toteutetaan estämällä akun toimintatilan joutuminen pois turvalliselta toiminta-alueeltaan. Järjestelmän tehtävä tekee siitä erityisen oleellisen osajärjestelmän sähköautoissa, joissa akku on alttiina auton käyttöympäristön muuttuville olosuhteille. Lisäksi sähköautojen moottoreiden tehot ovat suhteellisen suuria, joten akku on suojattava luotettavasti myös sähkövioilta. Järjestelmän mitoituksessa ja sen toiminnan analyysissä on hyödyllistä käyttää apuna simulointimallia.

Tässä työssä esitellään sähköautolle tyypillisen akunhallintajärjestelmän mikrokontrolleriin pohjautuvaa rakennetta ja eri suureiden hallintaperiaatteita. Työssä testataan simuloimalla yksinkertaisen akunhallintajärjestelmän mallin toimintaa akusta otettavan virran ja jännitteen rajoittamisessa. Tutkittava moottorikäyttö perustuu sähkömopoauton tasavirtamoottoriin. Simuloinneissa keskitytään erityisesti moottorin kiihdytyksissä ottaman maksimivirran rajoittamiseen.

Työssä havaittiin, että akunhallintajärjestelmän perusrakenne ja – toimintaperiaate ovat nykyisin selkeästi määriteltävissä. Järjestelmän toimintaympäristön eri osa-alueet, kuten sähköauton muun tekniikan toteutustapa ja käyttöolosuhteet, määrittävät järjestelmän yksityiskohtaisemman toiminnan. Näihin yksityiskohtiin liittyy useita vaihtoehtoisia toteutustapoja. Niistä parhaan löytäminen ja edelleen kehittäminen vaatii tulevaisuudessa tutkimusta ja perehtymistä kulloinkin suunnittelun kohteena olevaan autoon. Tämä on huomioitava erityisesti sähköautojen yleistyessä.

Simuloitu akunhallintajärjestelmä rajoitti saatujen tulosten perusteella hyvin hetkellisiä ylivirtoja. Akun käyttöiän maksimoimiseksi ja vallitsevan ilmaston huomioon ottamiseksi mallia olisi kuitenkin oleellista laajentaa tarkkailemaan myös akun varaus- ja lämpötiloja. Mallia tulisi myös muokata sopivaksi henkilöautojen vaihtovirtakoneille. Nämä muutokset vaativat monimutkaista laskentaa. Mallinnuksen haasteena voi kuitenkin olla todellisiin akkuihin ja moottoreihin liittyvän tiedon heikko saatavuus julkisesti, joten yritys yhteistyö on tällä hetkellä merkittävää aiheen tutkimiseksi.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	AKUNHALLINTAJÄRJESTELMÄN RAKENNE	2
2.1	Fyysinen toteutus ja topologiat	2
2.2	Mittausjärjestelmät ja mitattavat suureet	6
2.3	Tietoliikenne	7
3.	AKUNHALLINTAJÄRJESTELMÄN TOIMINTA	9
3.1	Akunhallintajärjestelmä sähköauton osajärjestelmänä	9
3.2	Akun sähköisten suureiden hallinta	11
3.3	Akun lämpötilan hallinta	14
3.4	Kennojen välisen tasapainon ylläpito	17
4.	SIMULOINTIMALLI	19
4.1	Kokonaisuus ja akku	19
4.2	Akunhallintajärjestelmä	20
4.3	Moottori	21
4.4	Hakkuriteholähde	23
4.5	Säätöjärjestelmä ja tutkittavat kuormitusyhdöt	24
5.	SIMULOINTIEN TULOKSET	29
6.	YHTEENVETO	36
	LÄHTEET	37
	LIITE 1: KUVA SIMULOINTIMALLIN RAKENTEESTA	39
	LIITE 2: SIMULOINTEIHIN KÄYTETTY MATLAB-SKRIPTI	40

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AD-muunnin	analogia-digitaalimuunnin
BLDC	engl. Brushless DC Machine, harjaton tasavirtakone
BMS	engl. Battery Management System, akunhallintajärjestelmä
DC	engl. Direct Current, tasavirta
ECU	engl. Engine Control Unit, moottorinohjausyksikkö
EKF	engl. Extended Kalman Filter, tilaestimaattori epälinearisille järjestelmille
EMI	engl. Electromagnetic Interference, sähkömagneettiset häiriöt
CAN	engl. Controller Area Network, tiedonsiirtoväylä
IC	engl. Integrated Circuit, integroitu piiri
IGBT	engl. Insulated Gate Bipolar Transistor, jänniteohjattu bipolaaritransistori
Mb	megabitti
PWM	engl. Pulse-Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio
SoC	engl. State of Charge, akun varaustila
SoH	engl. State of Health, akun kuntoa kuvaava suure
SPI	engl. Serial Peripheral Interface, sarjamuotoinen tiedonsiirtoväylä erittäin lyhyille etäisyyksille
UKF	engl. Unscented Kalman Filter, tilaestimaattori epälinearisille järjestelmille
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
f	taajuus
I	sähkövirta
J	hitausmomentti
k_t	engl. torque constant, tasavirtamoottorin konevakio, yksikkö $\frac{\text{Nm}}{\text{A}}$
L	induktanssi
n	pyörimisnopeus
Q	sähkövaraus
R	resistanssi
U	jännite
T	vääntömomentti
t	aika
w	kulmanopeus
η	hyötysuhde

1. JOHDANTO

Nykyisten sähköautojen toimintasäteet ovat lyhyitä verrattuna vastaaviin polttomoottoriautoihin, mikä rajoittaa sähköautojen yleistymistä. Tämä ongelma johtuu erityisesti energian varastoinnin haastavuudesta. [1, s. 1] Vaikka akkujen kapasiteettia kehitettäisiin merkittävästi nykyisestä, ratkaisujen on oltava aina myös turvallisia, jotta ne ovat toteutettavissa kaupallisissa sovelluksissa. Olennainen osa akkujen turvallisuutta on akunhallintajärjestelmä eli BMS (engl. *Battery Management System*), jonka tehtävänä on estää akun joutuminen pois turvalliselta toiminta-alueeltaan. Näin estetään kemiallisia reaktioita, jotka voivat tehdä akusta käyttökelvottoman tai pahimmillaan aiheuttaa henkilövahinkoja. [2]

Työssä rakennetaan yksinkertainen simulointimalli akunhallintajärjestelmästä käyttämällä Matlab -ohjelmiston Simulink -simulointiympäristöä. Mallin moottorin tyyppin ja parametrien valinnassa lähtökohtana on sähkömopoauto eli kevyt nelipyörä, koska mopoautoissa käytetään tasavirta- eli DC-moottoreita (engl. *Direct Current*). Kytkimillä mallinnettu akunhallintajärjestelmä tarkkailee akun virtaa ja jännitettä. Moottori sammutetaan hetkellisesti, jos jompikumpi suureista ylittää sille asetetun ylärajan. Simuloinneissa käytetään kahta erilaista kuormitusyksiötä eli moottorin pyörimisnopeuden asetusarvo vaihtelee ajan funktiona. Lopuksi tarkastellaan tuloksista havaittuja ongelmia ja esitetään tulosten pohjalta jatkokehitysideoita monimutkaisemman mallin kehittämistä varten. Näin mallia voidaan laajentaa sopivaksi muun muassa henkilöautojen sähkökäyttöihin ja tarkkailemaan useampia suureita, kuten akun varaus- ja lämpötiloja. Työssä mainitaan myös ilmiöitä, jotka voivat heikentää tulosten luotettavuutta todellisessa järjestelmässä ja esitellään periaatteita niiltä suojautumiseksi.

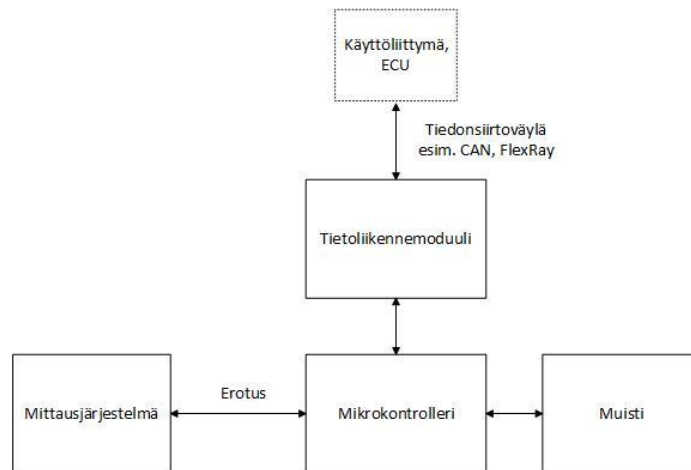
Luvussa 2 käsitellään akunhallintajärjestelmän rakenne pääpiirteittäin. Luvussa tarkastellaan järjestelmän fyysisiä toteutustapoja, sen tarvitsemia tietoliikenne-ratkaisuja ja akun tilan tarkkailuun käytettäviä mittausjärjestelmiä. Luvussa 3 esitellään järjestelmän toimintaperiaate edeten yleisen tason toimintalogiikasta ja kommunikaatiosta tarkkailtavien suureiden hallintaperiaatteisiin ja – menetelmiin. Luvussa 4 kuvataan työssä käytetyn simulointimallin muodostaminen ja rakenne yksityiskohtaisesti, minkä jälkeen simulointien tulokset esitellään luvussa 5.

2. AKUNHALLINTAJÄRJESTELMÄN RAKENNE

2.1 Fyysinen toteutus ja topologiat

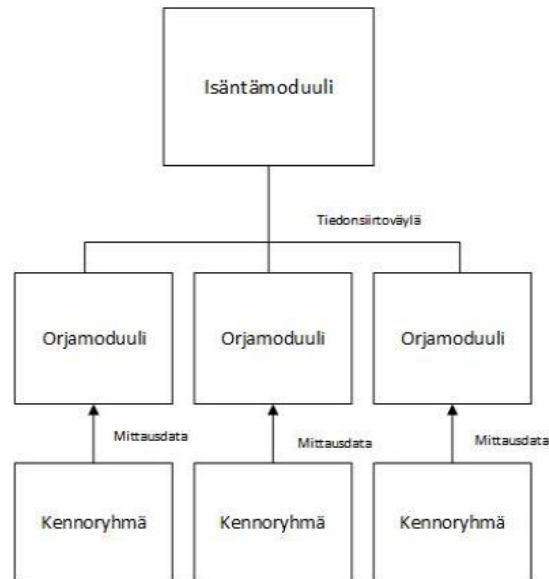
Akunhallintajärjestelmään kuuluviksi komponenteiksi määritellään ainakin mikrokontrolleri, mittausjärjestelmä ja tietoliikennemoduuli. Akunhallintajärjestelmän ohjaukseen ja laskutoimitusten suorittamiseen käytetään mikrokontrolleria, joka on yhteydessä muihin järjestelmän komponentteihin [3] [4] [5]. Järjestelmä sisältää myös muistin. Xu et al. [3] ovat toteuttaneet muistin Flash-muistina, ja Yangin et al. toteutuksessa [4] se sisältyy mittaukseen käytettyihin integroituihin piireihin (IC, engl. *Integrated Circuit*). Mittausjärjestelmä kerää tietoa systeemin inputeista, joita ovat kennojen ja akun jännitteet sekä akun virta ja lämpötila [3]. Mittausjärjestelmää käsitellään tarkemmin luvussa 2.2.

Akunhallintajärjestelmä on yhteydessä auton muihin osajärjestelmiin tiedonsiirtoväylällä moottorinohjausyksikön (ECU, engl. *Engine Control Unit*) kautta [4]. Tietoliikennettä tarkastellaan työn luvussa 2.3. Mitattavien suureiden lisäksi järjestelmä saa tietoa auton ajajalta esimerkiksi käynnistyksestä, sammutuksesta ja siitä, pyritäänkö mahdollisimman taloudelliseen ajoon. Kuljettajalla on mahdollisuus myös kytkeä latausmahdollisuus ja kennojen välisen tasapainon ylläpito pois päältä. Akunhallintajärjestelmä voi myös antaa informaatiota kuljettajalle näyttöjen, merkkivalojen ja hälytysten kautta. Näin kuljettaja saa tiedon mitattavien suureiden arvoista, auton toimintatilasta, akun varaustilasta ja kunnosta sekä vikatilanteista. Lisäksi järjestelmä tarvitsee teholähteen käyttöjännitteensä muodostamista varten. [5] Kuvan 1 lohkoavioon on koottu tässä työssä akunhallintajärjestelmään kuuluviksi määritellyt komponentit.



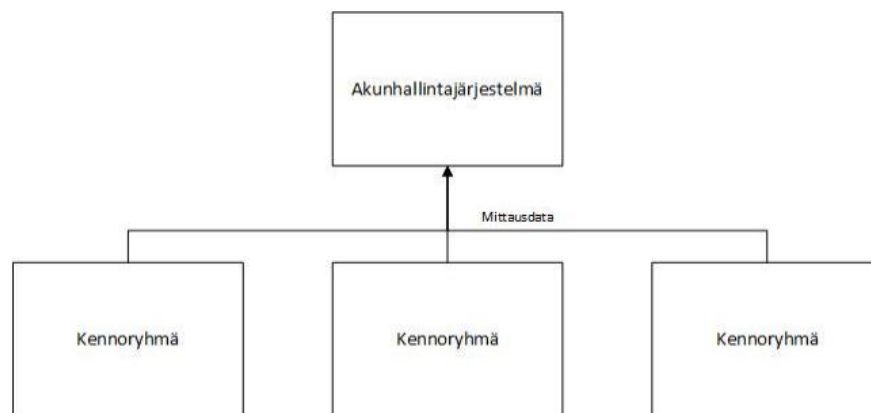
Kuva 1. Lohkokaavio akunhallintajärjestelmän komponenteista ja informaatiovirroista, perustuu lähteisiin [3] ja [4].

Sähköauton akut vaativat suhteellisen paljon tilaa, joten ne on hajautettava autossa useaan paikkaan. Tämän seurauksena nykyään yleisin topologia akunhallintajärjestelmälle on kuvan 2 mukainen hajautettu järjestelmä. Järjestelmä toteutetaan usein master–slave -periaatteella. Tällöin se koostuu yhdestä isäntämoduulista ja useammasta orjamoduulista. Orjamoduulien tehtävänä on suorittaa mittauksia ja tasapainottaa kennojen varauksia. [2, s. 61–63] Suuria tehoja käsitteleville akun kokonaisjännitteen ja virran mittauksille voidaan käyttää erillistä moduulia turvallisuuden parantamiseksi ja häiriöiden minimoimiseksi [1, s. 228–229]. Isäntämoduuli ohjaa orjamoduuleja, suorittaa pääosan laskennasta ja ohjaa tarvittaessa suojaustoimintoja. Moduulit kommunikoivat keskenään tiedonsiirtoväylää käyttäen. Hajautettu akunhallintajärjestelmä on näin ollen helposti skaalattavissa akkujen määrän mukaan moduulien määrää muuttamalla. Se on myös yksinkertainen huoltaa. [2, s. 61–63] Teollisuudessa yleisin ratkaisu on 1 orjamoduuli noin 10 kennon ryhmää kohden [6, s. 271]. Andrean mukaan orjamoduuli voidaan hajautetussa akunhallintajärjestelmässä sijoittaa suoraan kennon päälle. Tämä vähentää mittausten herkkyyttä häiriöille. [7, s. 47–49]



Kuva 2. Hajautettu akunhallintajärjestelmä, perustuu lähteeseen [1, s. 228].

Kuvan 3 mukaisessa keskitetyssä järjestelmässä kaikki toiminnot suoritetaan yhdellä mikroprosessorilla. Komponenttien pienempi määrä pienentää kustannuksia ja yksinkertaistaa järjestelmän tietoliikennettä verrattuna hajautettuun järjestelmään. Keskitetty järjestelmä on kuitenkin epäkäytännöllinen sähköautossa käytettäväksi, eikä se skaalautu helposti. [1, s. 227]



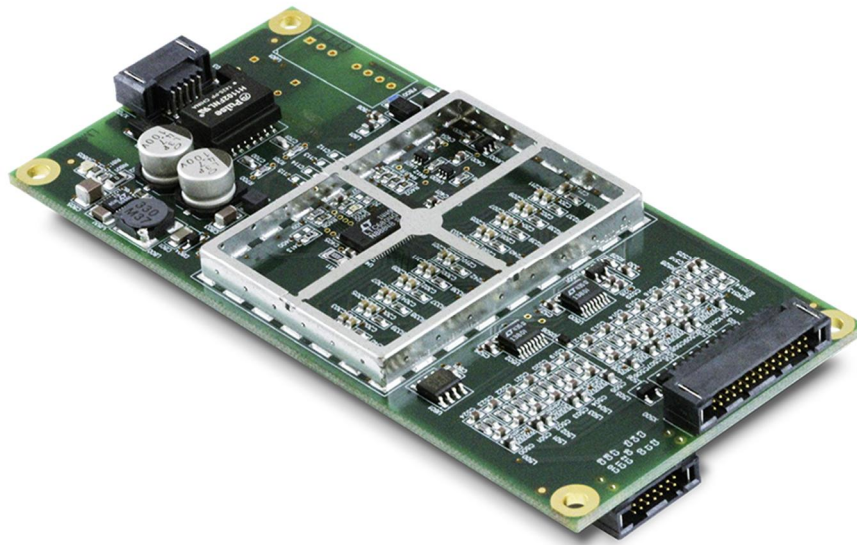
Kuva 3. Keskitetty akunhallintajärjestelmä, perustuu lähteeseen [7, s. 44].

Andrea mainitsee keskitetyn ja hajautetun järjestelmän lisäksi kaksi muuta topologiaa, jotka sijoittuvat rakenteeltaan keskitetyn ja hajautetun järjestelmän välille. Näissä järjestelmissä akunhallintajärjestelmän elektroniikka on yhdessä paikassa erillään kennoista kuten keskitetyssä järjestelmässä. Modulaarinen järjestelmä koostuu identtisistä moduuleista, joista yksi toimii isäntänä ja loput ovat orjia. Tämä vähentää huollettavien moduulien määrää verrattuna hajautettuun järjestelmään. Toisaalta suuri osa orjamoduulien ominaisuuksista jää modulaarisessa järjestelmässä tarpeettomiksi. Toinen Andrean mainitsemista topologioista muistuttaa hajautettua järjestelmää moduulien sijoittelua lukuun ottamatta. Moduulit myös kommunikoivat näissä

molemmissa järjestelmissä johtimien avulla tiedonsiirtoväylän sijaan, mikä lisää johtimien määrää verrattuna väylän käyttöön. [7, s. 45–47]

Akunhallintajärjestelmän komponentit on suojattava ympäristön olosuhteilta, kuten kosteudelta, lämmöltä, pölyltä ja sähkömagneettisilta häiriöiltä (EMI, engl. *Electromagnetic Interference*). Tämä on erityisen tärkeää mikrokontrollerissa, jossa ympäristön vaikutus voi muuttaa bittejä ja tehdä ohjelmistosta käyttökelvottoman. Komponentit eivät ole standardoituja, joten suunnittelussa vaaditaan erityistä tarkkuutta. Jos valmiista järjestelmästä osoittautuu, että jokin osa siitä ei täytä vaatimuksia, järjestelmän muokkaaminen on hankalaa. Eroja komponenttien välillä voi olla esimerkiksi mittausjärjestelmän topologiassa, tarkkuudessa tai näytteenottotaajuudessa. Järjestelmä ottaa usein käyttöehonsa ajoakuista, joten siellä vaikuttaa vuosien ajan jatkuvasti suuri jännite. Järjestelmän on pystyttävä toimimaan myös akun tavallisen toiminta-alueen ulkopuolella. Komponentteihin ja liittimiin liittyy oikosulun riski, joka on huomioitava niiden mitoituksessa, sijoittelussa ja asennuksessa. [2, s. 241–252]

Kuva 4 havainnollistaa akunhallintajärjestelmän fyysistä toteutusta. Kuvan järjestelmä on Kreisel Electricin valmistama.



Kuva 4. Kreisel Electricin akunhallintajärjestelmä [8].

Esimerkkejä akunhallintajärjestelmän toteutuksesta ovat myös Yangin et al. [4] ja Xun et al. [3] tutkimat järjestelmät. Nämä kaksi järjestelmää ovat keskenään hyvin samanlaisia, mutta Yangin et al. käyttämät DS2438-mittauspiirit (Maxim Integrated) on kytketty mikrokontrolleriin johtimella ja erotettu siitä optoerottimella. Xun et al. toteutuksen mittauspiiri LTC6802-1 (Linear Technology) hyödyntää puolestaan SPI-väylää (engl. *Serial Peripheral Interface*) ja digitaalista erotusta. Lisäksi DS2438 sisältää muistia akun parametrien tallennukseen toisin kuin LTC6802-1.

2.2 Mittausjärjestelmät ja mitattavat suureet

Tärkeimmät akusta mitattavat suureet ovat yksittäisten kennojen jännitteet, akun kokonaisjännite, virta ja lämpötila [1] [2] [7]. Näille suureille tarvittava mittausjärjestelmä koostuu ainakin anturista, pitopiiristä ja AD- (analogia-digitaali-) muuntimesta. Se sisältää lisäksi sopivan mittauskytkennän ja vahvistimen. [1] Lisäksi akunhallintajärjestelmä tarkkailee mahdollisia eristysvikoja [1, s. 242].

Tarkkuus on erityisen tärkeä ominaisuus jänniteanturille, koska jännitettä hyödynnetään varaustilan laskennassa [2, s. 71–77]. Jännitteenjako ei ole riittävän tarkka menetelmä kennojen jännitteiden mittaamiseen, koska kennoja on kytketty akussa sarjaan suuri määrä. Jos mittausjärjestelmä, pitopiiri ja AD-muunnin toteutetaan erillisinä, voidaan mittauksessa käyttää apuna puolijohdekytkimiä. Tällöin kennot kytketään mitattaviksi yksi kerrallaan, ja mitattavan kennon miinusnapa kytketään maapotentiaaliin. Mitattu jännite viedään mittausmoduulille, joita on kappaleen 2.1 mukaisesti yksi kutakin kennoryhmää kohden. [1, s. 230–231] Vaihtoehtona kytkimille on käyttää jokaiselle jännitteelle omaa vahvistinta [9, s. 271]. Ratkaisun haittoina ovat valosähköisten kytkimien korkea hinta, kelluva maapotentiaali ja mitattavien jännitteiden suuresta määrästä johtuva epätarkkuus [3].

Nykyisin yleinen menetelmä on käyttää jännitteiden mittauksessa siihen tarkoitettua integroitua piiriä. Piireihin voidaan sisällyttää tarvittavien mittausjärjestelmän osien lisäksi myös lämpötilan mittaus, suojausominaisuuksia ja kennojen tasapainotuksen ohjaus. Integroitu piiri on pienikokoinen ja sen avulla vältetään komponenttien yhteensopivuusongelmat. Näin sillä saavutetaan parempi mittaustulos kuin kytkimiä käyttämällä. [1, s. 232–235] Esimerkkinä tällaisesta piiristä on Xun et al. [3] käyttämä LTC6802-1. Piirit kytketään usein tiedonsiirtoväylällä toisiinsa siten, että alimmassa potentiaalissa oleva mittauspiiri on yhteydessä akunhallintajärjestelmää ohjaavaan mikrokontrolleriin [2, s. 243–244]. Jännitteen mittauksen on toimittava oikein myös akun normaalin toiminta-alueen ulkopuolella tai kennon napaisuuden vaihtuessa. Mittaus ei siis saa satureitua, ja sen on toimittava, vaikka ensisijaiset mittauskomponentit olisivat estosuunnassa. Turvallisuuden varmistamiseksi ja vikatilanteiden havaitsemiseksi mittausjärjestelmiä on käytössä yleensä kaksi. Jos ensisijainen systeemi ei toimi oikein, kennot eivät esimerkiksi saa alkaa latautua ja purkautua toistuvasti liikaa. [2, s. 71–77]

Akun kokonaisjännite mitataan jännitteenjaolla. Akun jännite on suuri, joten mittauksessa käytettävien vastusten resistanssit valitaan suuriksi. Näin mittaukseen kuluva pätöteho saadaan minimoitua. [1, s. 241–242] Tämä periaate on yleinen jännitteiden mittauksessa, ja tehonkulutukseen on kiinnitettävä huomiota myös mittausjärjestelmän ollessa lepotilassa [2, s. 71–77].

Lämpötilan mittauksessa käytetään yleisesti termistoria tai integroitua piiriä. Anturit on sijoitettava siten, että minkä tahansa kennon ylikuumentuminen on havaittavissa. [2, s. 88–92] Termistorit ovat puolijohdekomponentteja, joiden resistanssi muuttuu epälineaarisesti lämpötilan funktiona. Ne ovat nopeita ja herkkiä, mutta niiden epätarkkuus rajoittaa niiden käyttöä. [1, s. 235–237] Termistori mitoitetaan toimimaan mahdollisimman tarkasti halutulla toiminta-alueella. Tulos saadaan usein riittävän tarkaksi akunhallintajärjestelmäkäyttöön linearisoimalla se. [2, s. 88–92] Mittauskytkentänä käytetään jännitteenjakoa kiinteän vastuksen kanssa ja operaatiovahvistimella toteutettua jännitteen seuraajakytkentää [9, s. 273]. Referenssijännite on valittava kennon alimpaan potentiaaliin oikosulkuriskin minimoimiseksi [2, s. 88–92]. Integroidut piirit ovat hyvin yleinen ratkaisu, ja niitä on olemassa sekä analogisina että digitaalisina. Niiden etuina ovat edullisuus ja nopeus. [1, s. 235–237] Esimerkiksi LTC6802-1 perustuu termistoriin. Sillä saavutetaan riittävä mittaustarkkuus, vaikka integroidut piirit ovat joskus epätarkkoja suurilla virroilla. [3]

Akun virtaa mitataan jännitemittauksella tarkkuusvastuksen yli tai Hall-anturilla. Tarkkuusvastukset ovat edullisia ja tarkkoja, mutta suurikokoisia virtojen ollessa suuria. Jännitesignaali on myös vahvistettava ennen sen mittaamista. [2, s. 77–85] Hall-anturissa puolijohteeseen synnytetään jännite käämin ja magneettikentän avulla. Sen tarkkuutta voidaan parantaa anturin outputiin kytkettävällä kompensointikämmityksellä, joka muodostaa negatiivisen takaisinkytkennän. [1, s. 239–240] Suurjännitepuolen eristys elektroniikasta tapahtuu Hall-anturissa luonnollisesti, mutta anturi on herkkä ulkoisille magneettikentille ja lämpötilan muutoksille. Anturin lähtösignaalia on tämän takia muokattava ja anturi on sijoitettava häiriöttömään paikkaan [2, s. 77–85]. Xu et al. käyttivät toteutuksessaan Hall-anturia. He havaitsivat, että anturin epälineaarisuus vaikutti mittaustuloksiin merkittävästi ilman signaalin muokkaamista. [3]

Akunhallintajärjestelmän suorittamia mittauksia häiritsevät myös auton tehoelektronikkalaitteiden kytkimistä peräisin olevat sähkömagneettiset häiriöt [10]. Häiriöt voivat johtaa mittaustulosten vääristymiseen ja tietoliikennevikoihin anturilta lähtevässä SPI-väylässä. Muita tällaisten häiriöiden lähteitä ovat auton muu elektroniikka sekä matkustajien matkapuhelimet ja tietokoneet. Aiello et al. suodattivat IC-jänniteanturin inputia RC-alipäästösuotimilla. Suodin havaittiin tehokkaaksi taajuusalueelle 10-600 MHz sijoittuvia häiriöitä vastaan. Sen sijaan anturin lähtöön vaikuttavat häiriöt ovat erityisen ongelmallisia, koska SPI-väylää ei voida suodattaa. [11]

2.3 Tietoliikenne

Akunhallintajärjestelmä kommunikoi laturin ja moottorinohjausyksikön kanssa tiedonsiirtoväylien avulla. Tätä tarkoitusta varten järjestelmässä on ohjain, jonka kautta

data siirtyy väylälle. Yleisin autoteollisuuden käyttämä väylä on Boschin kehittämä CAN-väylä (engl. *Controller Area Network*). Väylän periaatteena on, että kaikki laitteet pystyvät sekä lähettämään että vastaanottamaan informaatiota. Törmäysten välttämiseksi laitteiden ja siten viestien prioriteetit eroavat toisistaan. CAN-väylän tiedonsiirtomediana toimii kierretty pari, koaksiaalikaapeli tai optinen kuitu. Väylällä on hyvä hinta-laatusuhde ja yksinkertainen rakenne. [1, s. 251–253] Väylän rajoitteina ovat kuitenkin 1 Mb/s tiedonsiirtonopeus ja tiedonsiirron reaaliaikaisuutta rajoittava tapahtumapohjaisuus [12, s. 3–4]. Myös CAN-väylän kaistanleveys voi jäädä liian pieneksi sähköautokäyttöön akkujen määrän kasvaessa tulevaisuudessa [13].

Esimerkkinä tiedonsiirron toteutuksesta CAN-väylällä on akunhallintajärjestelmän sisäisten sekä laturin ja moottorinohjausyksikön yhteyksien toteuttaminen erillisinä. Laturille kulkee tietoa suurimmasta sallitusta latausvirrasta, latauksen tilasta ja latauksen aloittamisesta ja lopettamisesta. Moottorinohjausyksikkö puolestaan tarvitsee tietoa erityisesti akun jännitteestä, varaustilasta ja moottorin suurimmasta sallitusta tehosta. [1, s. 251–253]

CAN-väylää uudempi tiedonsiirtoväylä on FlexRay, jota ensimmäisenä autonvalmistajana käytti BMW vuonna 2006 [12, s. 93]. FlexRay perustuu kommunikaatiosykleihin, mikä antaa mahdollisuuden sekä aika- että tapahtumapohjaiseen tiedonsiirtoon. Tämä parantaa sekä väylän reaaliaikaisuus- että nopeusominaisuuksia verrattuna CAN-väylään. [12, s. 42] FlexRayn avulla voidaan myös saavuttaa jopa 10 Mb kaistanleveys. Peng et al. osoittivat, että FlexRay sopii hyvin käytettäväksi akunhallintajärjestelmässä. Estimoidulla akun varaustilalla Kalman-suotimella ja käyttämällä FlexRay-väylää kommunikaatioon estimointivirhe jäi maksimissaan 2 prosenttiin. [13] Varaustilan estimointia tarkastellaan lyhyesti kappaleessa 3.2.

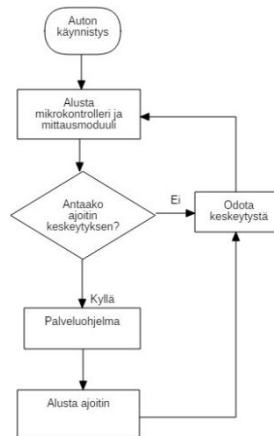
3. AKUNHALLINTAJÄRJESTELMÄN TOIMINTA

3.1 Akunhallintajärjestelmä sähköauton osajärjestelmänä

Auton ollessa käytössä akunhallintajärjestelmä tarkkailee akkua jatkuvasti. Kun auto pysäköidään, akku on irrotettava piiristä sen purkautumisen minimoimiseksi. Tämä on myös turvallisinta akun ja auton kannalta. [1, s. 255] Järjestelmä ohjaa moottorin toimintaa akun turvallisuuden näkökulmasta. Hätätilanteissa, kuten onnettomuuksissa tai vähintään yhden kennoista ollessa vaarallisella toiminta-alueella, järjestelmä voi sammuttaa moottorin välittömästi. Jos kyseessä ei ole hätätilanne, moottorin sammuttamista pyritään välttämään, jotta auto voi liikkua itsenäisesti. [6, s. 267–268] Järjestelmän hälytys- ja suojaustoiminnot välittävät tiedon ongelmatilanteista auton kuljettajalle [1, s. 255].

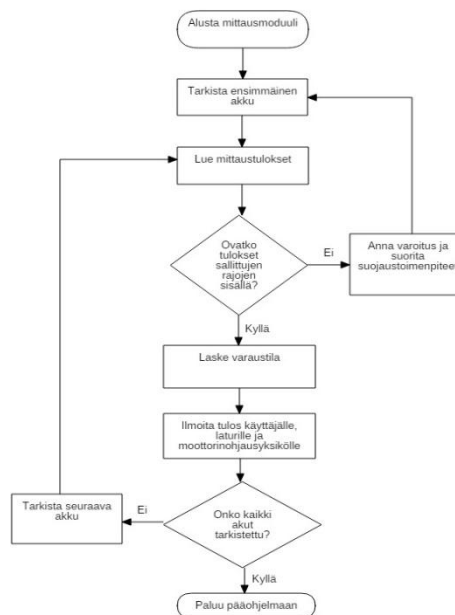
Nian et al. ovat mallintaneet Matlab- ja Simulink -ohjelmistojen avulla akun latausta ja purkautumista erityisesti tilanteessa, jossa mallin harjatonta tasavirtamoottoria (BLDC, engl. *Brushless DC Machine*) käytetään auton jarruttamiseen. Tällöin moottori toimii generaattorina ja lataa akkua. Mallissa akun lataus, purkautuminen ja auton oleminen pysähdyksissä on kukin mallinnettu omassa lohkoissaan. Näistä lohkoista vain yksi voi olla aktiivisena samanaikaisesti. Akkua purettaessa pätötehon suunta on valittu mallissa positiiviseksi. Tällöin akunhallintajärjestelmä laskee akun varaustilan ja sitä hyödyntäen maksimijännitteen, joka akusta voidaan moottorille kyseisellä hetkellä antaa. Maksimijännitteestä ja moottorilta vaadittavasta tehosta saadaan laskettua maksimivirta. Akkua ladattaessa tai moottorilla jarrutettaessa järjestelmä laskee suurimman sallitun akun jännitteen ja latausvirran. Kun auto pysähtyy tai moottorilla jarruttamisesta saatava teho laskee liian pieneksi akun lataamiseen, akulta otettava teho on nolla. Jarrutettaessa auto vaihtaa tällöin tavalliseen mekaaniseen jarrutukseen. Simuloinneissa autoa jarrutettiin nopeudesta $70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ nolnaan, ja mekaaninen jarrutus aloitettiin nopeudessa $30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Kuljettajalla on aina mahdollisuus jarruttaa myös mekaanisesti, mitä varten jarrupolkimessa on porrastus. [14]

Акунhallintajärjestelmän toimintalogiikkaa voidaan havainnollistaa esimerkiksi kuvien 5 ja 6 mukaisilla vuokaavioilla. Kaaviot perustuvat Yangin et al. toteutuksessaan käyttämään ohjelmaan ja laitteistoon. Ohjelmiston yleinen toimintaperiaate on kuvassa 5.



Kuva 5. Vuokaavio akunhallintajärjestelmän ohjelmiston toiminnasta, perustuu lähteeseen [4].

Kuva 6 esittelee edellisessä kuvassa mainitun keskeytyksenpalveluohjelman toiminnan. Palveluohjelma suorittaa mittaustulosten lukemisen, tarvittavan laskennan sekä suojaustoimenpiteet. Myös akunhallintajärjestelmän kommunikaatio ympäristönsä kanssa suoritetaan palveluohjelmassa.



Kuva 6. Vuokaavio kuvan 5 keskeytyksenpalveluohjelmasta, perustuu lähteeseen [4].

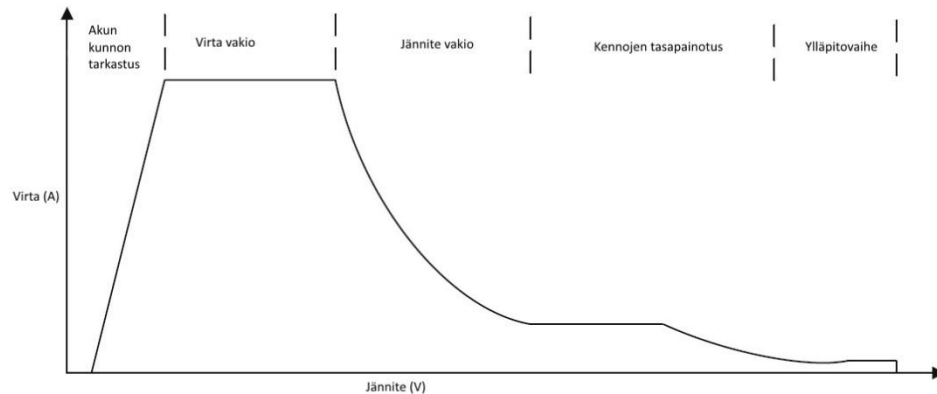
Yksittäisen kennon turvallinen toiminta-alue vaihtelee riippuen kennosta, mutta sekä Weickerin että Lun et al. mukaan noin 2,5...3,75 V jännitteet kuuluvat lähes aina

turvalliselle alueelle. [2, s. 36] [5] Akun purkautuminen alle 0 % tai lataaminen yli 100 % varaustilaan aiheuttavat akun kulumista muun muassa kemiallisten reaktioiden kautta. Akun purkautuminen liaksi voi johtaa myös elektroniikkavikoihin, jos komponenttien yli vaikuttavien jännitteiden polariteetit vaihtuvat purkautumisen seurauksena. Liian korkea lämpötila johtaa kemiallisiin reaktioihin, jotka aiheuttavat vuotoja sekä tulipalon tai räjähdysvaaran. Weickerin mukaan kennojen tulisi pysyä alle 45 °C lämpötilassa kulumisen minimoimiseksi ja yli 60 °C lämpötila aiheuttaa turvallisuusriskin. Matalissa lämpötiloissa kennon negatiiviselle elektrodille voi pelkistyä metallista litiumia, mikä johtaa sisäisten oikosulkujen riskiin. Akun latausvirta ja –nopeutta on tämän estämiseksi rajoitettava alle 0 °C lämpötiloissa, eikä akun lataamista suositella lämpötilan ollessa alle -10 °C [2, s. 36–37] Myös akun sisäinen impedanssi kasvaa voimakkaasti 0 °C alapuolella [9, s. 283]. Akunhallintajärjestelmän on pystyttävä huomioimaan laskennassaan myös akun ikääntyminen [2, s. 36–37].

3.2 Akun sähköisten suureiden hallinta

Akun antaman virran, kennojen jännitteiden sekä akun kokonaisjännitteen hallinnan periaate on yksinkertainen. Suureille on määritelty ylä- tai alarajat, joiden välissä mitattujen arvojen on pysyttävä. Jos arvo ei ole rajojen sisässä, akun virtaa rajoitetaan ja se katkaistaan tarvittaessa kokonaan. Virralle määritellään akun ominaisuuksien perusteella ylärajat jatkuvalla kuormituksella ja yksittäiselle maksimiarvolle. Nämä rajat ovat erisuuret akkua ladattaessa ja purettaessa. Kennojen jännitteiden hallinnassa hyödynnetään jännitteiden keskiarvoa siten, että järjestelmä pystyy erottamaan hetkellisestä kiihdytyksestä johtuvat tilanteet vaaratilanteista. Kokonaisjännitteen hallinnassa merkittävä keino on kappaleessa 3.4 käsiteltävä kennojen välisen tasapainon ylläpito. Kokonaisjännite on merkittävä lähinnä muiden auton osien kuten moottorin jännitekestoisuuksien kannalta. [7, s. 59–63]

Ladattaessa akkua sähköverkosta akunhallintajärjestelmä voi joko toimia puhtaasti yksittäisiin kennoihin liittyvän mittaustiedon kerääjänä tai suorittaa säätöön tarvittavan laskennan itse. Jos akunhallintajärjestelmän tehtävänä on kerätä vain mittaustieto, laturi suorittaa säädön. [1, s. 124–127] Lataustapoja ja –nopeuksia on useita. Esimerkiksi Zhang ja Mi esittelevät kuvan 7 mukaisen lataustavan.



Kuva 7. Esimerkki akun latauksesta, akun virta jännitteen funktiona [9, s.277].

Latauksen aluksi akun kunto tarkastetaan pienen virran avulla. Lataus suoritetaan pitämällä virta vakiona, kunnes jokin kennoista saavuttaa maksimijännitteensä. Tämän jälkeen virtaa voidaan rajoittaa tai akun lataamista jatkaa vakiojännitteellä. Samalla suoritetaan kennojen tasapainotus. Akun ollessa täynnä laturi voi suorittaa ylläpitolatausta pienellä virralla, mistä on hyötyä erityisesti kylmissä oloissa. Akkua voidaan ladata myös käyttämällä auton moottoria generaattorina autoa jarrutettaessa. Tällöin on kiinnitettävä erityistä huomiota suureen latausvirtaan ja sen aiheuttamaan akun lämpenemiseen, mikä tekee säädöstä monimutkaista. [9, s. 277]

Yksi akunhallintajärjestelmän merkittävimmistä tehtävistä on akun varaustilan (SoC, engl. *State of Charge*) laskeminen. Auton kuljettajalle ilmaistaan tieto jäljellä olevasta ajomatkasta varaustilan avulla. Lisäksi varaustilaa hyödynnetään akun kunnon analysoinnissa ja tähän liittyvien suureiden laskennassa. [2, s. 199] Varaustilaa tarkkaillaan myös akun käyttöiän maksimoimiseksi, ja akusta saatavaa tehoa voidaan rajoittaa tämän perusteella [2, s. 178]. Varaustilan laskentaan on useita eri menetelmiä. Ne ovat usein matemaattisesti monimutkaisia, joten niitä käsitellään tässä työssä suhteellisen lyhyesti.

Akun purkukäyrällä tarkoitetaan akun antamaa jännitettä varauksen funktiona. Käyrä on hyvin jyrkkä akun ollessa lähes täyteen ladattu tai tyhjä, mutta lähes vaakasuora muualla. [2, s. 200] Tästä seuraa, että pelkät jännitemittaukset eivät ole tarkkoja varaustilan päättelyssä. Akun jännitteen pysyessä lähes vakiona varauksen suhteen pienet mittausvirheet johtavat suuriin eroihin lasketuissa varaustilan arvoissa. [15]

Yksinkertaisin varaustilan laskentamenetelmä hyödyntää varauksen laskentaa integroimalla akun virtaa ajan suhteen. Tämän työn simuloinnit suoritetaan Matlab-ohjelmiston version R2017a Simulink-ympäristössä. Työssä käytettävässä Simscapen sähkökäyttöjen akkulohkossa varaustila ajanhetkellä $t = \tau$ lasketaan lausekkeesta

$$SOC = \left(1 - \frac{1}{Q} \int_0^{\tau} i(t) dt\right) * 100 \%, \quad (1)$$

jossa Q on akun kapasiteetti eli varaus täyteen ladattuna ja $i(t)$ akun virta ajan funktiona. Lu et al. esittelevät lausekkeesta yleisemmän muodon:

$$SOC = \left(\frac{soc(\tau_0)}{100 \%} - \frac{1}{Q} \int_{\tau_0}^{\tau} \eta i(t) dt\right) * 100 \% \quad (2)$$

Ajanhetki τ_0 voi siis poiketa nollassa, eikä akkua oleteta täyteen ladatuksi kyseisellä hetkellä, toisin kuin Simulinkissä. Hyötysuhdeparametri η saa arvon 1 akkua purettaessa, ja akkua ladattaessa sen arvo on pienempi kuin 1. [5]

Integroinnin ongelmana on virheiden summautuminen, jos mittaukset eivät ole tarkkoja [2, s. 203]. Eryityisesti alkuarvon ja – pisteen on oltava oikeita [2, s. 203] [5]. Pitkän integrointiajan käytöllä voidaan vähentää mittauskohinan vaikutusta tulokseen. Lyhyillä integrointiajoilla ja suurilla virroilla mittausvirhe on puolestaan pieni suhteessa virtaan. Näin ollen integrointimenetelmä sopii parhaiten sovelluksiin, joissa akun toistuvat lataukset ja purut ovat nopeita ja akun koko kapasiteetti hyödynnetään. Integrointi ei kuitenkaan ota huomioon akun purkautumista itsestään [9, s. 274]. Myös akun ikääntyminen rajoittaa integroinnin käyttöä, joten nykyisissä järjestelmissä hyödynnetään useita laskentamenetelmiä rinnakkain [2, s. 204].

Kalman-suodin on tilahavaitsija, eli sillä voidaan estimoida systeemin tila mittausdatasta. Suotimen matemaattinen malli on monimutkainen, joten se sivuutetaan tässä työssä. Suodinta käytettäessä hyödynnetään sekä varauksen laskentaa integroimalla että jännitemittauksia. Näitä painotetaan kussakin tilanteessa sopivilla kertoimilla. Tavallinen Kalman-suodin toimii vain lineaarisilla ja aikainvarienteilla järjestelmillä. Akun kaltaisia epälineaarisia järjestelmiä varten suotimeen on kehitetty laajennuksia, kuten EKF (engl. *Extended Kalman Filter*) ja UKF (engl. *Unscented Kalman Filter*). [2, s. 206–211] Näitä menetelmiä on tutkittu paljon. Esimerkiksi Chengin et al. Simulink-malli [15] sekä Pengin et al. [13] ja Yangin et al. [4] toteutukset hyödyntävät Kalman-suodinta varaustilan laskennassa. Xiong et al. lisäsivät EKF-suotimeen adaptiivisuutta. Adaptiivisuuden tehtävänä on vähentää mallinnusvirheistä johtuvaa kohinan vaikutusta estimaattiin, mikä parantaa estimaatin tarkkuutta tavalliseen EKF-suotimeen verrattuna. [16]

Varaustilaa voidaan estimoida myös hermoverkoilla, sumealla logiikalla tai mallipohjaisesti ekvivalenttipiirien tai sähkökemiallisen mallin avulla. Vianselvityksessä voidaan hyödyntää myös impedanssien tutkimista taajuusvastemenetelmällä. [5]

Eräs akun kuntoa kuvaava suure on State of Health (SoH). Se on abstrakti käsite [2, s. 213], eikä sen yksikäsitteisestä laskentatavasta ole päästy sopimukseen [5]. Uuden akun SoH on kuitenkin aina 100 %. Suureen avulla voidaan mallintaa akun ikääntymistä.

Normaalin, käytöstä johtuvan kulumisen lisäksi myös oikosulut ja akkuun esimerkiksi onnettomuuksissa kohdistuvat mekaaniset iskut pienentävät suureen arvoa. Arvo riippuu muun muassa akun kapasiteetista, sisäisestä resistanssista ja siitä, millä nopeudella akku purkautuu itsestään. Sen laskemiseen käytetään mallipohjaista estimointia. [5]

3.3 Akun lämpötilan hallinta

Akkuun liittyviä lämmönlähteitä ovat muun muassa ohmiset häviöt, akussa tapahtuvat kemialliset reaktiot sekä akun jännitteeseen liittyvä hystereesi-ilmiö. Hystereesi syntyy, koska akun lataus- ja purkujännitteet eroavat hieman toisistaan. Tämä hystereesi, akun sisäinen impedanssi ja jotkin kemialliset ominaisuudet riippuvat voimakkaasti lämpötilasta. [2, s. 174–177] Kappaleessa 3.1 käsiteltyjen turvallisuusseikkojen lisäksi akun ja ympäristön lämpötilat vaikuttavat akun toimintaan. Korkea lämpötila nopeuttaa akun kulumiseen ja itsestään purkautumiseen liittyviä kemiallisia reaktioita. Esimerkiksi 10 K lämpötilan nousu kaksinkertaistaa reaktionopeuden. [17, s. 327] Ympäristön lämpötilan laskeminen alle 0 °C puolestaan kasvattaa voimakkaasti akun sisäistä impedanssia. Jo -20 °C lämpötilassa akusta saatava teho laskee hyvin pieneksi. [9, s. 283] Näiden ilmiöiden ehkäisemiseksi ja auton turvallisuuden takaamiseksi akunhallintajärjestelmän tehtävänä on ohjata akun lämmitystä ja jäädytystä suorittavia laitteistoja. Yksinkertaisimmillaan järjestelmä voi ainoastaan rajoittaa akun virtaa tai katkaista sen. [7, s. 60] Autoissa akun käyttölämpötila-alue on kuitenkin erittäin laaja. Alue voi olla jopa -40 °C...85 °C, joten akkua on pystyttävä lämmittämään ja jäädyttämään auton pitämiseksi ajokunnossa säästä riippumatta. [7, s. 63]

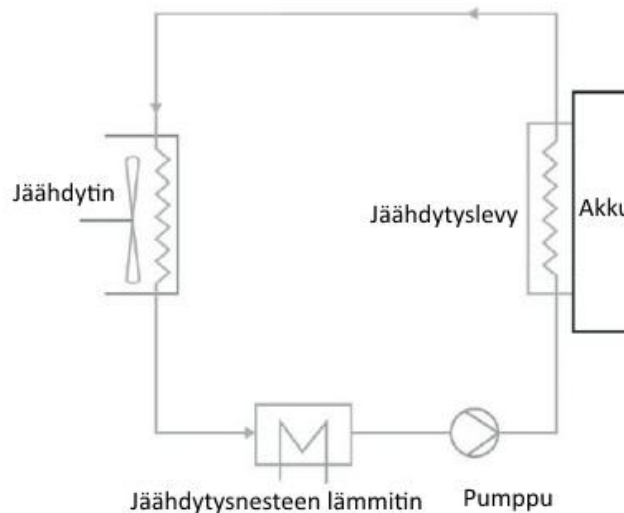
Yleensä akkua lämmitetään ainoastaan ladattaessa sitä sähköverkosta. Jos kennojen tasapainotus on toteutettu vastuksilla, samoja vastuksia voidaan hyödyntää myös akun lämmitykseen. [7, s. 63] Akun lataaminen voidaan joutua lopettamaan jo lämpötilan laskiessa alle 0 °C. Myös akusta otettavaa virtaa on rajoitettava jo alle 20 °C lämpötiloissa. [2, s. 175] Lämmitysjärjestelmää suunniteltaessa on huomioitava kytkinvian riski. Kytkimen jääminen vian seurauksena kiinni voi johtaa jatkuvaan lämmitykseen ja sen seurauksena akun joutumiseen vaaralliselle toiminta-alueelle. Kytkimen rikkoutuessa lämmitystä on näin ollen pystyttävä ohjaamaan toisella kytkimellä. [2, s. 115]

Akkua voidaan jäädyttää ilman ja tuulettimen avulla tai auton olemassa olevalla jäädytysjärjestelmällä. On kuitenkin huomioitava, että ilmajäädytys pystyy ainoastaan tasapainottamaan akun ja ympäristön lämpötilat. Jos ympäristön lämpötila on akun lämpötilaa korkeampi, pelkästä tuulettimesta ei ole hyötyä akun lämpötilan hallinnassa. [7, s. 64] Ilmajäädytysjärjestelmään on tällöin sisällytettävä myös ilmastointi [17, s. 338]. Esimerkkejä eri automallien jäädytysjärjestelmistä on lueteltu taulukossa 1.

Taulukko 1. Sähköautomallien akkujen jäähdytysjärjestelmiä [17, s. 352].

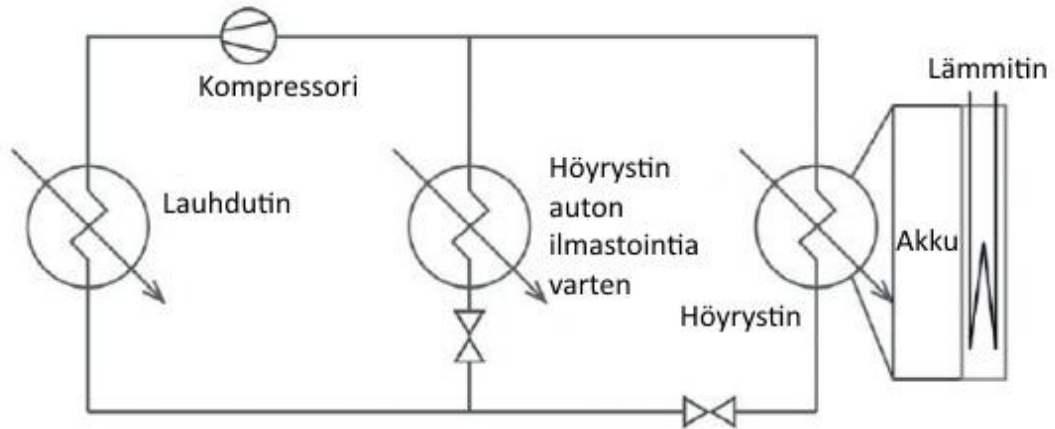
Malli	Jäähdytysjärjestelmä
Tesla Model S	Nestejäähdytys
Nissan Leaf	Ilma
BMW i3	Kompressori

Nestejäähdytyksessä lämpö siirretään akusta jäähdytysnesteeseen, joka on erotettu kennoista lämmönjohteella. Tyypillinen johdemateriaali on alumiini. Lämpö siirtyy kennoista nesteeseen johtumalla. Nestejäähdytys on tehokas, helposti säädettävissä ja ääriolosuhteisiin sopiva. Se on kuitenkin myös painava, altis vuodoille ja tarvitsee säännöllisesti huoltoa. Kaaviokuva järjestelmästä on kuvassa 8. [17, s. 339]



Kuva 8. Nestejäähdytys [17, s. 339].

Nestejäähdytyksen ohella toinen tapa toteuttaa auton jäähdytysjärjestelmä on hyödyntää kompressoria ja aineen olomuodon muutoksia kuvan 9 mukaisesti. Tällainen järjestelmä toimii jääkaapin tapaan. Järjestelmässä voidaan käyttää esimerkiksi hiilidioksidia. Neste höyrystetään akusta otettavalla lämmöllä, jonka jälkeen se tiivistetään uudelleen lauhduttimessa ja pumpataan uudelleen akulle. [17, s. 340–341]



Kuva 9. Kompressoripohjainen jäähdytys [17, s. 341].

Akun lämpötilan hallintaan käytettävät laitteet mitoitetaan akun kuormituksen ja auton haluttujen käyttölämpötilojen perusteella. Kennojen sarjakytkennän toimintaa rajoittava tekijä on huonoimmin toimiva kenno, joten lämpötila pyritään saamaan mahdollisimman samaksi kaikkialla akussa. Lämpötilan vaihtelun eri kennojen välillä tulisi olla selvästi alle 5 K Huberin ja Kuhnin selvityksen mukaan. [17, s. 335–337]

Akunhallintajärjestelmän tulisi tehdä lämpötilan hallintapäätökset pienimmän tai suurimman mittausarvon perusteella päätöksestä riippuen. Päätöksiä ei tule tehdä mittausten keskiarvon pohjalta, jotta yksittäiset kennot eivät joudu vaaralliselle toiminta-alueelle. Toisaalta auton toimintaa on pyrittävä rajoittamaan mahdollisimman vähän. [2, s. 174–175] Sekä suurimmalle että pienimmälle sallitulle lämpötilalle käytetään usein kahta raja-arvoa. Ensimmäisen arvon ylittyessä akulta otettavaa tehoa rajoitetaan tarvittaessa ja toisen arvon ylittyessä akun virta on katkaistava. Jos virta on jouduttu katkaisemaan, akun annetaan kytkimien kulumisen minimoimiseksi jäähtyä ennen virran kytkemistä uudelleen. [1, s. 259] Raja-arvoissa on oltava riittävästi varmuusvaraa mittausvirheiden ja antureiden mittausalueen ylittävien tulosten varalta [2, s. 175]. Toimilaitteilta akunhallintajärjestelmälle on takaisinkytkentä, jonka avulla järjestelmä päättää, toimivatko toimilaitteet oikein. Akkuun voi myös kertyä lämpötilan hallinnan seurauksena liiallista kosteutta, joka on poistettava. Kosteuden poistossa hyödynnetään erillistä mittausta. [2, s. 114]

3.4 Kennojen välisen tasapainon ylläpito

Akun kennojen keskenään erisuuret kapasiteetit ja varaukset rajoittavat akun tehoa, energiaa ja kapasiteettia [2, s. 184]. Tämä johtuu muun muassa kennon varaustilan ja sisäisen impedanssin välisestä riippuvuudesta [2, s. 184], kennojen sisäisten impedanssien eroista sekä sarjakytkennoistä [9, s. 264]. Riippuen siitä, ladataanko vai puretaanko kytkentää, sarjakytkennan täysin tai tyhjin kenno määrittää kytkennästä saatavan energian [9, s. 264]. Jos jokin akun kennoista on täyteen ladattu tai tyhjä, akun virta on katkaistava. Näin ollen kennojen varauksia on tasapainotettava akunhallintajärjestelmän avulla, jotta akusta saatava teho ja energia pystytään maksimoimaan. [2, s. 184]

Yksittäisen akun kennot pyritään saamaan toiminnaltaan keskenään mahdollisimman samanlaisiksi huolellisella suunnittelulla ja kennojen valinnalla. Tällöin lopullinen kennojen tasapainotus voidaan toteuttaa akunhallintajärjestelmällä tehokkaasti. [18, s. 285] Jos jännitteet eivät ole turvallisella toiminta-alueella, akkua ei voida tasapainottaa [2, s. 197]. Akkua purettaessa varauksia tasapainotetaan akun ollessa kuormittamattomana [9, s. 266]. Tasapainotuksen suunnittelu on optimointiongelma. Jos akunhallintajärjestelmä tasapainottaa kennoja tihein väliajoin, akun energia saadaan hyödynnettyä lähes kokonaan. Tämä kuitenkin kasvattaa sekä kustannuksia että järjestelmän tehonkulutusta. [2, s. 185]

Yksinkertaisin ratkaisu on tasapainottaa kennojen varaustilat keskenään samoiksi. Akun kapasiteetti saadaan tällöin hyvin lähelle pienimmän kennon kapasiteetin määräämää arvoa. [2, s. 185] Menetelmä helpottaa akun kokonaisvaraustilan laskentaa, koska varaustila voidaan arvioida yksittäisten kennojen varaustilojen pohjalta [1, s. 218]. Tämä ratkaisu ei kuitenkaan maksimoi akun suorituskykyä, koska osaan kennoista jää aina varausta osan tyhjentyessä kokonaan. Järjestelmän mitoituksen määrittää se varaustilan arvo, jolla kennojen halutaan olevan keskenään tasapainossa. Esimerkiksi hybridiautossa 50 % varaustila on hyvä arvo. Tällöin akun ominaisuudet ovat mahdollisimman samanlaiset sekä ladattaessa että purettaessa. Järjestelmän on pystyttävä myös erottamaan kennojen varaustilojen hitaat muutokset nopeista, koska akun nopea purkautuminen itsestään voi johtua sisäisestä oikosulusta. [2, s. 185]

Jos akusta saatava energia halutaan maksimoida, voidaan akku ja sen kaikki kennot ladata aina mahdollisimman täyteen. Akku on tällöin myös purettava mahdollisimman tyhjäksi. [1, s. 215] Usean akun kokonaisuus voidaan tasapainottaa suurimman käytettävissä olevan kapasiteetin perusteella. Tässä menetelmässä akku, jonka kapasiteetti on pienin, määrää, miten kokonaisuus tasapainotetaan. [1, s. 211–212] Tasapainotus voi perustua myös jännitemittauksiin. Tämä johtaa kuitenkin tasapainotuksen kohteen jatkuvaan vaihteluun erityisesti usean akun järjestelmässä. [1,

s. 209–211] Tasapainotus kannattaa tällöin myös tehdä nopeasti latauksen loppuvaiheessa. Tämä nopeusvaatimus kasvattaa järjestelmän kokoa ja kustannuksia. [1, s. 219] Joissain kahden akun järjestelmissä akku, jonka kapasiteetti on pienempi, on mahdollista ladata täyteen. Tällöin voidaan keskittyä tasapainottamaan vain toista akkua. [1, s. 220–221] Jännitemittauksia voidaan hyödyntää myös laskentatehon tarpeen pienentämiseksi, kun akkua tasapainotetaan varaustilan perusteella ja sen virta on nolla [2, s. 186].

Tasapainotuksen toteuttamiseen on useita erilaisia kytkentöjä. Yksinkertaisin kytkentä muodostuu vastuksista ja kytkimistä. Virta johdetaan vastukselle, jos kenno on ladattu täyteen tai sitä joudutaan purkamaan. Ratkaisu on pienikokoinen ja edullinen, mutta hidas, koska pienikokoisia vastuksia käytettäessä myös virran on oltava pieni. Lisäksi vastukset muuttavat energiaa lämmöksi. [18, s. 286] Vastuksilla voidaan tasapainottaa tarkasti jännitteitä, mutta ei energioita [9, s. 266]. Energiaa voidaan myös siirtää kennojen välillä kondensaattorien, kelojen tai hakkuriteholähteiden avulla. Kondensaattorit ovat edullisia verrattuna keloja sisältäviin kytkentöihin, mutta se ei ole tehokas ratkaisu pienillä jännite-eroilla. Kondensaattorin outputin on myös oltava inputia matalammassa potentiaalissa. [2, s. 190] Kelaa käytettäessä virralle muodostetaan paluureitti diodilla. Kelalla voidaan kuitenkin siirtää kennon energiaa vain sen viereisiin kennoihin. [2, s. 190–192]

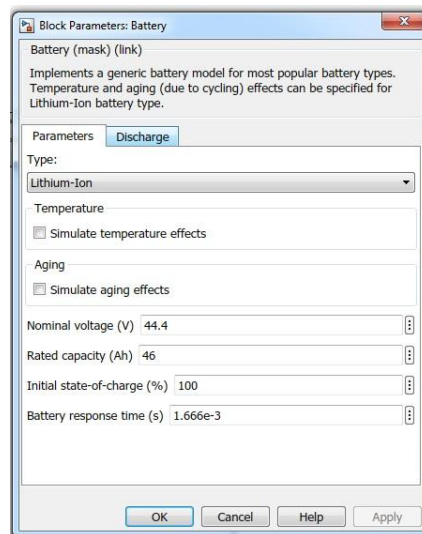
Hakkuritopologioista tasapainotuksessa yleisiä ovat esimerkiksi Čuk – ja Buck-Boost – hakkurit. Hakkureita voi olla useita, tai yksittäinen hakkuri voidaan kytkeä kytkinmatriisin avulla minkä tahansa kennoparin kennojen välille. [18, s. 290–291] Tasapainotus hakkurilla aloitetaan kennoista, joiden jännitteiden ero on suurin [9, s. 269]. Kytkinmatriisin käyttö mahdollistaa viallisten kennojen irrottamisen piiristä, mutta sähköautolle tyypilliset suuret virrat kasvattavat kytkennän kokoa ja kuormittavat oikein toimivia kennoja vikatilanteessa. [18, s. 291–292] Ilman kuolleita aikoja kytkentäsekvenssissä kytkimiin liittyy myös oikosulkuriski [2, s. 189]. Hakkuri on parhaimmillaan nopea ja tehokas. Sen säätö on kuitenkin monimutkaista ja kustannukset suuret verrattuna yksinkertaisempiin ratkaisuihin. [18, s. 287]

4. SIMULOINTIMALLI

4.1 Kokonaisuus ja akku

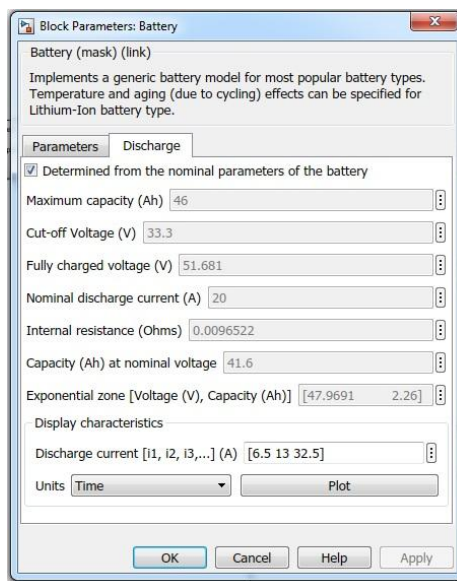
Työn simuloinnit suoritettiin Simulinkillä Matlabin versiossa R2017a. Liitteessä 1 on simulointimallin ylimmän tason rakennetta esittävä kuva. Mallin moottorina on harjaton DC-moottori, jonka nimellisjännite on 48 V ja –teho mopopautolle sallittu 4 kW. Moottoria tarkastellaan laajemmin kappaleessa 4.3. Järjestelmä on yksivadranttikäyttö, ja moottoria ohjataan yksinkertaisella hakkuriteholähteellä. Hakkuria säädetään kappaleen 4.5 mukaisen säätöjärjestelmän avulla. Säätimen ohjaus muutetaan pulssinleveysmodulaatiolla (PWM, engl. *Pulse-Width Modulation*) jännitteen ohjaussignaalista kytkinten ohjaussignaalksi. Tutkittava akunhallintajärjestelmä sijoittuu PWM:n ja moottorin väliin.

Järjestelmään syötetään tehoa litiumioniakusta, jota mallinnetaan Simulinkin Simscape-kirjastossa olevalla valmiilla akkumallilla. Kyseisen mallin polku on Simscape/Power Systems/Specialized Technology/Electric Drives/Extra Sources/Battery. Mallin outputeina saadaan akun varaustila, virta ja jännite ajan funktiona. Tarkasteltavaksi akuksi valittiin saksalaisen AKASOL GmbH:n [19] valmistama AKAMODULE Nano NMC. Sen nimellisjännite on $U_{\text{bat}} = 44.4 \text{ V}$ ja kapasiteetti eli varaus täyteen ladattuna $Q_{\text{bat}} = 46 \text{ Ah}$. Lohkon asetuksista kuvasta 10 näkyy myös akun 1,66 ms vasteaika, joka on valittu riittävän nopeaksi suhteessa käytettävään 1 s simulointiaikaan.



Kuva 10. Akulle valitut parametrit Simulinkissä.

Akun purkuominaisuuksiin liittyvät parametrit laskettiin mallintamisen yksinkertaistamiseksi automaattisesti Simulinkillä. Saadut tulokset ovat kuvassa 11.



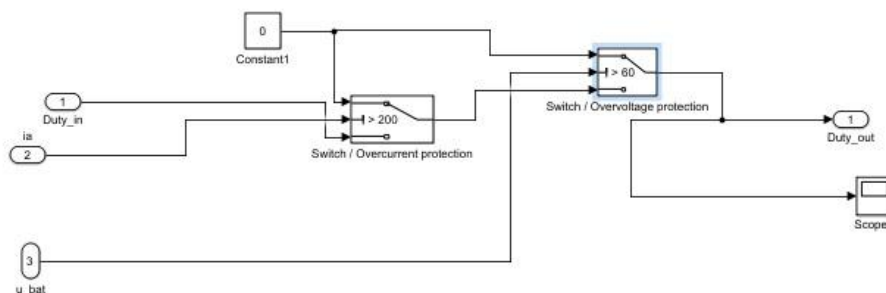
Kuva 11. Akun purkuominaisuuksien laskenta.

Tässä työssä ei simuloitu varaustilan hallintaa akunhallintajärjestelmällä, koska sen tutkimiseksi akku pitäisi saada tyhjentyään alle 10 % varaustilaan. Akun kapasiteetin asettaminen riittävän pieneksi simulointiaikaan nähden muuttaa kuitenkin akun purkuominaisuuksia ja siten akusta saatavia jännitteitä ja virtoja. Tämä johtaa tarkasteltavan kokonaisuuden näkökulmasta mallinnusvirheisiin. Esimerkiksi moottori ei välttämättä edes käynnisty, jos akun kapasiteetti on liian pieni.

Akkulohkossa on mahdollisuudet myös akun lämpötilan ja ikääntymisen vaikutusten mallintamiseen. Näihin ominaisuuksiin liittyy monipuolinen valikoima käyttäjän muokattavissa olevia parametreja. Lämpötilan vaikutusten mallintaminen antaa outputinaan akun ja ympäristön lämpötilat. Ikääntymisen mallissa on akun kapasiteettia sekä ikää kuvaavat ulostulot. Sopivien parametrien avulla akunhallintajärjestelmään voitaisiin siis lisätä myös lämpötilasuojaus ja varaustilan hallintaa laajentaa käsittämään ikääntyminen.

4.2 Akunhallintajärjestelmä

Kahdesta kytkimestä koostuva akunhallintajärjestelmä sijoittuu PWM:n ja hakkurin väliin. Kuvassa 12 on esitetty järjestelmän malli, joka on liitteen 1 kuvan BMS-lohkon sisällä.



Kuva 12. Akunhallintajärjestelmän malli.

Järjestelmälle on takaisinkytkentä sekä ankkurivirralla että akun jännitteeltä. Säätimen virityksen yhteydessä tutkittiin moottorin ankkurijännitettä ja – virtaa moottorin pyöriessä tasaisella nopeudella. Tulosten pohjalta akunhallintajärjestelmän virtarajaksi asetettiin 200 A ja jänniterajaksi 60 V. On huomioitava, että moottorin kuorman muuttuessa näitä rajoja on muokattava kyseiselle tilanteelle sopiviksi. Tämän akunhallintajärjestelmän pääasiallinen tarkoitus on estää vikavirtoja ja ylijännitteitä vaikuttamasta akkuun. Jos jompikumpi rajoista ylittyy, hakkurin kytkinkomponentteja ohjaava signaali asetetaan nolaksi, kunnes mittaustulokset ovat jälleen laskeneet sallitulle alueelle. Akunhallintajärjestelmä on mallissa ohitettavissa manuaalisen kytkimen avulla.

4.3 Moottori

Mallin moottorina on harjaton DC-moottori, jonka malli on Simulinkin kirjastossa polussa Simscape/Power Systems/Specialized Technology/Fundamental Blocks/DC Machine. Kyseisellä mallilla voi mallintaa myös erillismagnetoitua moottoria. DC-koneiden kilpiarvoista oli saatavissa hyvin niukasti tietoa, joten malli ja parametrit jouduttiin valitsemaan osin kokeilemalla ja yhdistelemällä. Lähtökohtana toimi italialaisen Estrima Birò – sähkömopoauton moottori [20], jonka 48 V nimellisjännitteen ja 4 kW nimellistehon pohjalta laskettiin moottorin nimellisvirta ja –momentti.

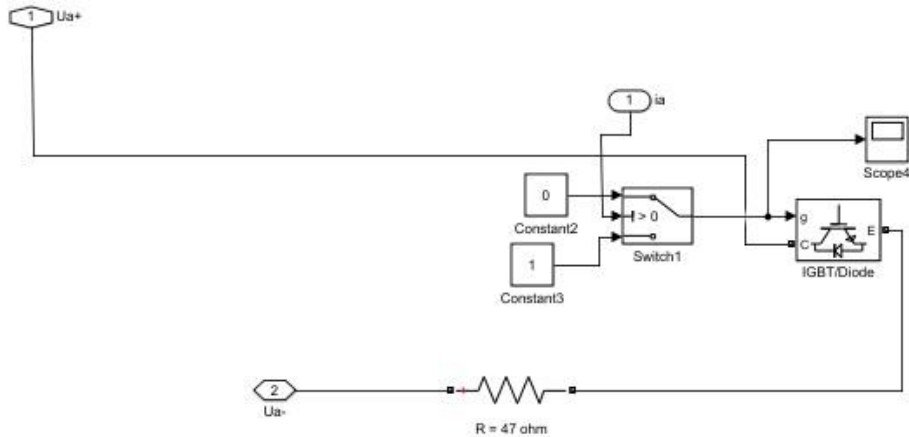
Moottorin nimellinen pyörimisnopeus n_n sekä ankkurin resistanssi R_a ja induktanssi L_a asetettiin kiinalaisen Golden Motorin [21] 5 kW BLDC-moottorin mukaan. Moottorin hitausmomentti J ja konevakio k_t (engl. *torque constant*) jäivät valittaviksi iteratiivisesti kokeilujen pohjalta. Parametrit on koottu taulukkoon 2, ja ne määriteltiin Matlabiin liitteen 2 skriptillä.

Taulukko 2. Tutkittavan moottorin kilpiarvot.

Parametri	Arvo	Selitys
U_n	48 V	Nimellinen ankkurijännite
P_n	4 kW	Nimellisteho
I_n	84,17 A	Nimellinen ankkurivirta, laskettu nimellistehon ja – jännitteen osamääränä
n_n	3500 rpm	Nimellinen pyörimisnopeus
ω_n	$366,52 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Nimellinen kulmanopeus
R_a	6,2 m Ω	Ankkurin resistanssi
L_a	68 μH	Ankkurin induktanssi
J	0,03 kgm ²	Hitausmomentti
T_n	10,9 Nm	Nimelliskuorman vääntömomentti, laskettu nimellistehon ja – kulmanopeuden osamääränä
k_t	$0,1295 \frac{\text{Nm}}{\text{A}}$	Konevakio

Kokeessa käytettäväksi pyörimisnopeusalueeksi valittiin 0...1000 rpm, jossa 350 rpm vastaa $30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ vauhtia ja 525 rpm $45 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ vauhtia. Tämä mitoitus on tehty olettaen, että henkilöauton suuri oikosulkukone pyörisi nimellisellä nopeudellaan auton vauhdin ollessa $\frac{2}{3}$ maksimivauhdista. Pyörimisnopeudet $30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ja $45 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ vauhteissa olisivat tutkittavalle DC-koneelle 3500 rpm ja $\frac{3}{2} * 3500 \text{ rpm} = 5250 \text{ rpm}$ taulukon 2 perusteella. Moottorin dynamiikka on kuitenkin hidas simulointiaikaan nähden, eikä moottori ehtisi kiihtyä tarvittaviin nopeuksiin simuloinnin aikana. Jatkuvuustilan saavuttamiseksi nopeuksia oli skaalattava alaspäin. Jakamalla lasketut nopeudet luvulla 10 saatiin tähän työhön sopivat arvot.

Malli on yksikvadranttikäyttö, joten moottori tarvitsee rinnalleen jarrutusvastuksen muuttamaan jarrutuksissa generoituva teho lämmöksi. Sen malli on kuvassa 13.

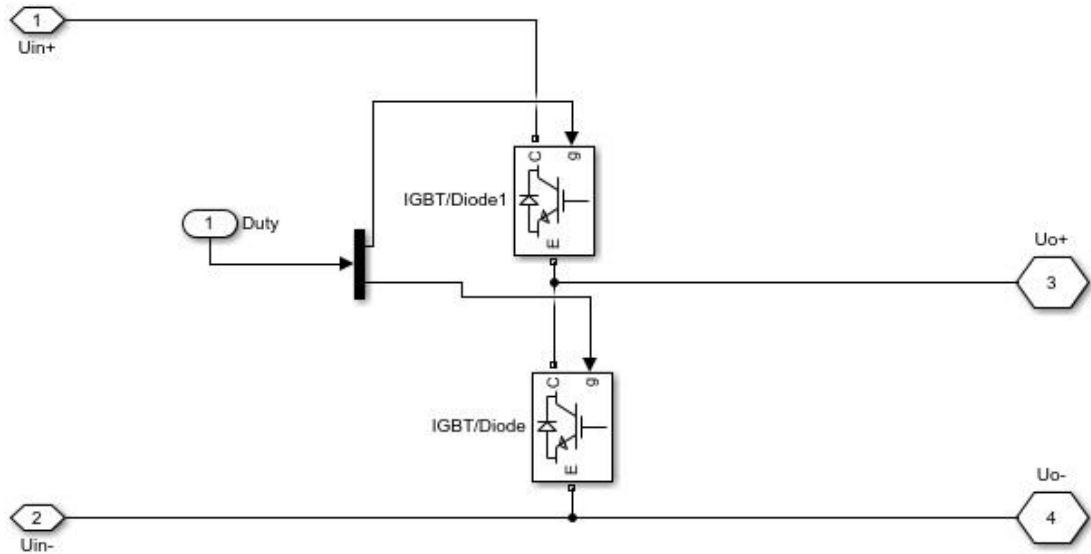


Kuva 13. Jarrutusvastuksen malli.

Kytkimenä toimii IGBT (engl. *Insulated Gate Bipolar Transistor*) eli jänniteohjattu bipolaaritransistori. Tämän työn kaikkien transistoreiden parametrit pidettiin oletusarvoissaan. Ankkurivirran ollessa negatiivinen kytkin suljetaan. Vastuksen resistanssi mitoitettiin ohjaussignaalia tarkastelemalla siten, että kytkin pysyy kiinni koko jarrutuksen ajan. Mitoituksessa käytettiin kappaleen 4.5 kuormitusyklejä, joilla myös varsinaiset kokeet suoritettiin.

4.4 Hakkuriteholähde

Yksikvadranttikäytön hakkuriteholähde koostuu vain kahdesta IGBT-transistorista, koska moottori on itsessään induktiivinen kuorma. Hakkurin input on kytketty akkuun ja output moottoriin. Kytkimet ovat auki vuorotellen, jotta hakkuriin ei synny oikosulkua. Hakkurin malli on kuvassa 14, ja se sijaitsee liitteen 1 kuvan Converter – lohkoissa.

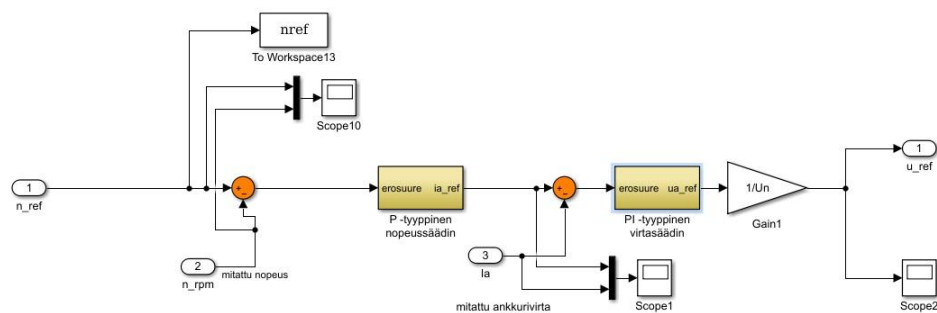


Kuva 14. Hakkuriteholähteen malli.

KytKentätaajuudeksi valittiin $f_s = 2 \text{ kHz}$, jotta simuloinnin todellinen suoritus aika ja mallinnuksen riittävä tarkkuus saatiin optimoituja keskenään. Työssä käytettäväksi simulointiajaksi valittiin hakkurin kytKentätaajuuden perusteella 1 s, simulointiaskeleen maksimikooksi $1 \cdot 10^{-4} \text{ s}$ ja suhteelliseksi toleranssiksi 1 ms.

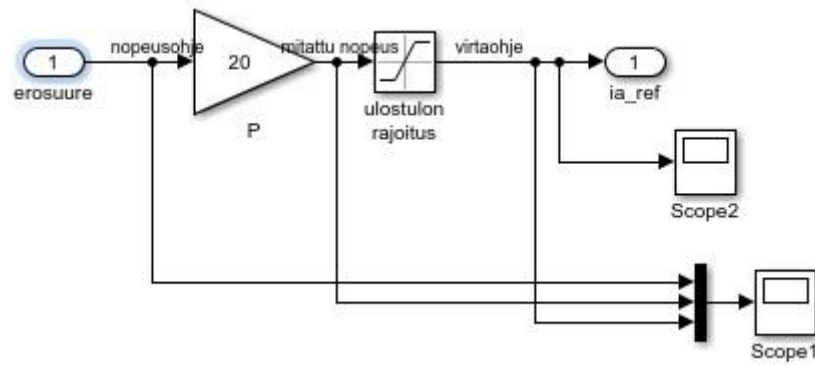
4.5 SääTöjärjestelmä ja tutkittavat kuormitusykliT

Tasavirtakoneen sääTimen rakenteena on kuvan 15 mukainen kaskadisääTö, jossa ulompi P-sääDin sääTää koneen pyörimisnopeutta ja sisempi PI-sääDin ankkurivirtaa. SääTimen malli on peräisin TTY:n kurssilta DEE-33030 SähkÖmoottorikäytöt lukuvuoden 2016-2017 toteutuskerralta [22].



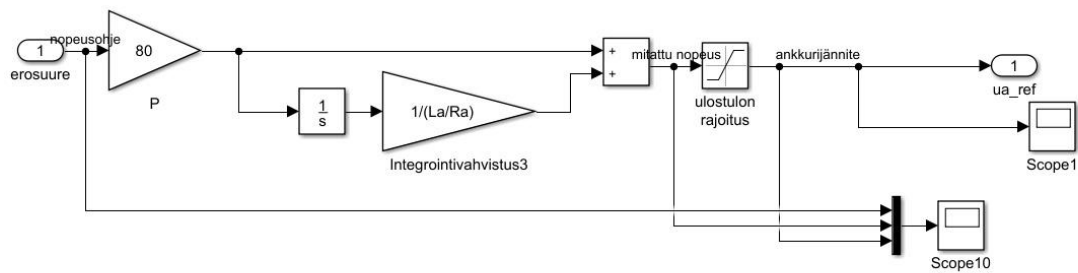
Kuva 15. KaskadisääDön malli.

NopeussääDin viritetään virtasääDintä hitaammaksi, ja sen lähtö on rajoitettu kaksinkertaiseksi nimellisvirran suuruuteen nähden. Sen malli näkyy kuvasta 16.



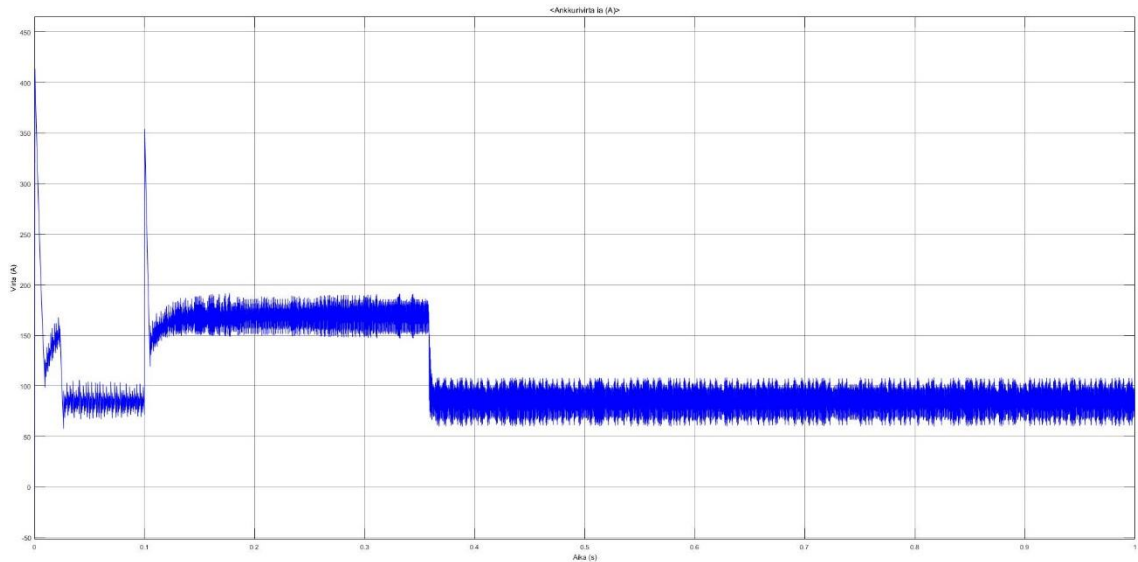
Kuva 16. *P-säätimen malli.*

Virtasäätimen malli on kuvassa 17. Sen integrointiaika määräytyy moottorin aikavakioiden perusteella. Esimerkiksi tässä työssä integrointiajaksi valittiin moottorin ankkuriresistanssin ja – induktanssin osamäärä. Säätimen lähtö on rajoitettu nimellijännitteen suuruiseksi.



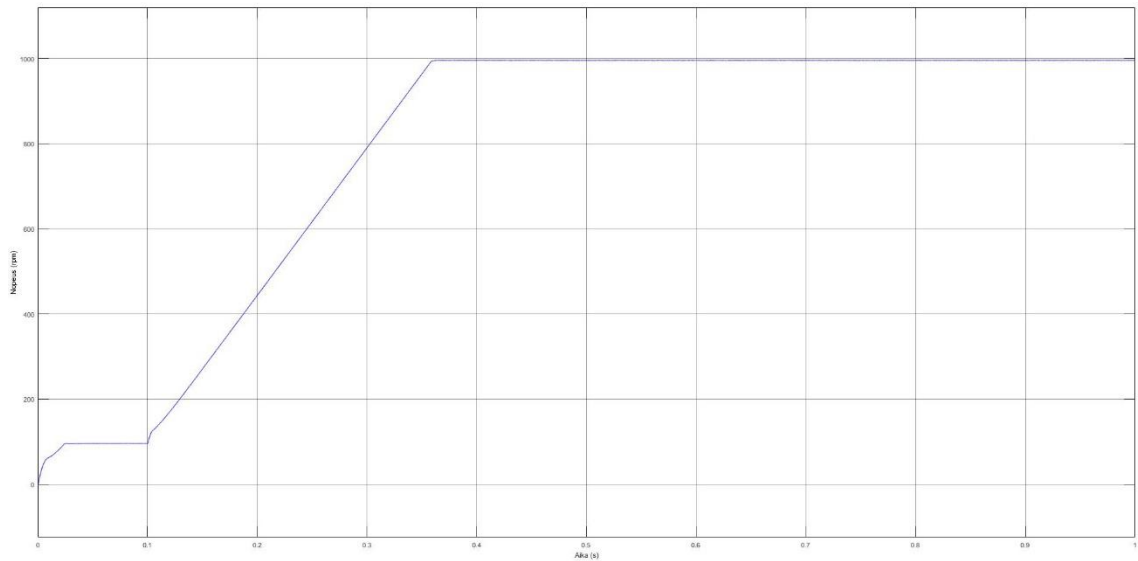
Kuva 17. *PI-säätimen malli.*

Säätimien P-osien vahvistukset valittiin kuvien 16 ja 17 mukaisiksi kokeilemalla askelvastekokeita hyödyntäen. Kokeet suoritettiin tekemällä asetusarvoon muutos 100 rpm pyörimisnopeudesta 1000 rpm nopeuteen. Ankkurivirran askelvaste on kuvassa 18.



Kuva 18. Ankkurivirran askelvaste valituilla viritysparametreilla.

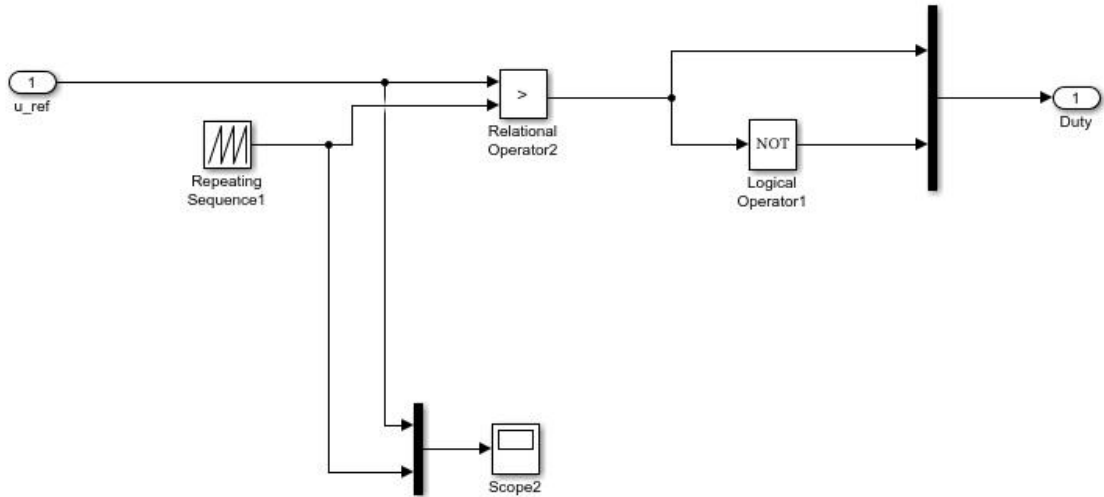
Kuvasta 18 havaitaan suuri 354 A virtapiikki ankkurivirran kasvaessa. Virtapiikki voi aiheuttaa akulle vahinkoa, joten piikkiä on rajoitettava akunhallintajärjestelmällä. Ankkurivirta pienenee takaisin lähtöarvoonsa, kun moottori saavuttaa halutun pyörimisnopeuden. Pyörimisnopeuden askelvaste on kuvassa 19.



Kuva 19. Pyörimisnopeuden askelvaste valituilla viritysparametreilla.

Pyörimisnopeudessa on 4 rpm suuruinen jatkuvuustilan virhe, koska nopeutta säädetään pelkällä P-säätimellä. Kuvasta 19 ilmenee myös moottorin dynamiikan hitaus.

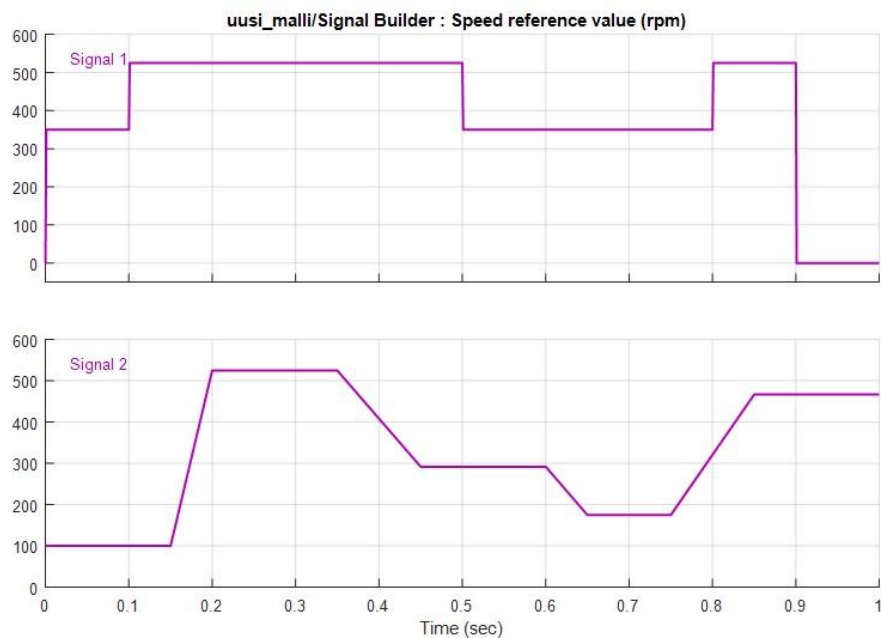
Säätimen lähtö muutetaan kytkimen ohjaussignaaliiksi liitteen 1 kuvan PWM-lohkossa. Lähtöä verrataan kolmioaaltoon, jonka amplitudi on 1. PWM:n malli on kuvassa 20.



Kuva 20. Pulssinleveysmodulaation malli.

Tuloksena saadaan binäärinen signaali, joka saa kytkentäjakson aikana ensin arvon 1 ja sen jälkeen arvon 0. Eri kytkentätilojen kestoajat riippuvat säätimen lähdöstä. Signaali ohjaa suoraan kuvan 14 hakkurin ylempää kytkintä. Se invertoidaan hakkurin alemmalle kytkimelle.

Työssä tutkittavat kuormitussyklit on esitelty kuvassa 21. Syklit on muodostettu Signal Builder –lohkolla, joka on kytketty säätimen asetusarvoksi.



Kuva 21. Tutkittavat kuormitussyklit, pyörimisnopeus ajan funktiona.

Ensimmäinen sykleistä käsittää 0.01 s mittaisia muutoksia nollan, 350 rpm ja 525 rpm pyörimisnopeuksien välillä. Toinen sykleistä sisältää joukon mopoautolle mahdollisia nopeuksia, ja se on kuvattu numeerisesti taulukossa 3.

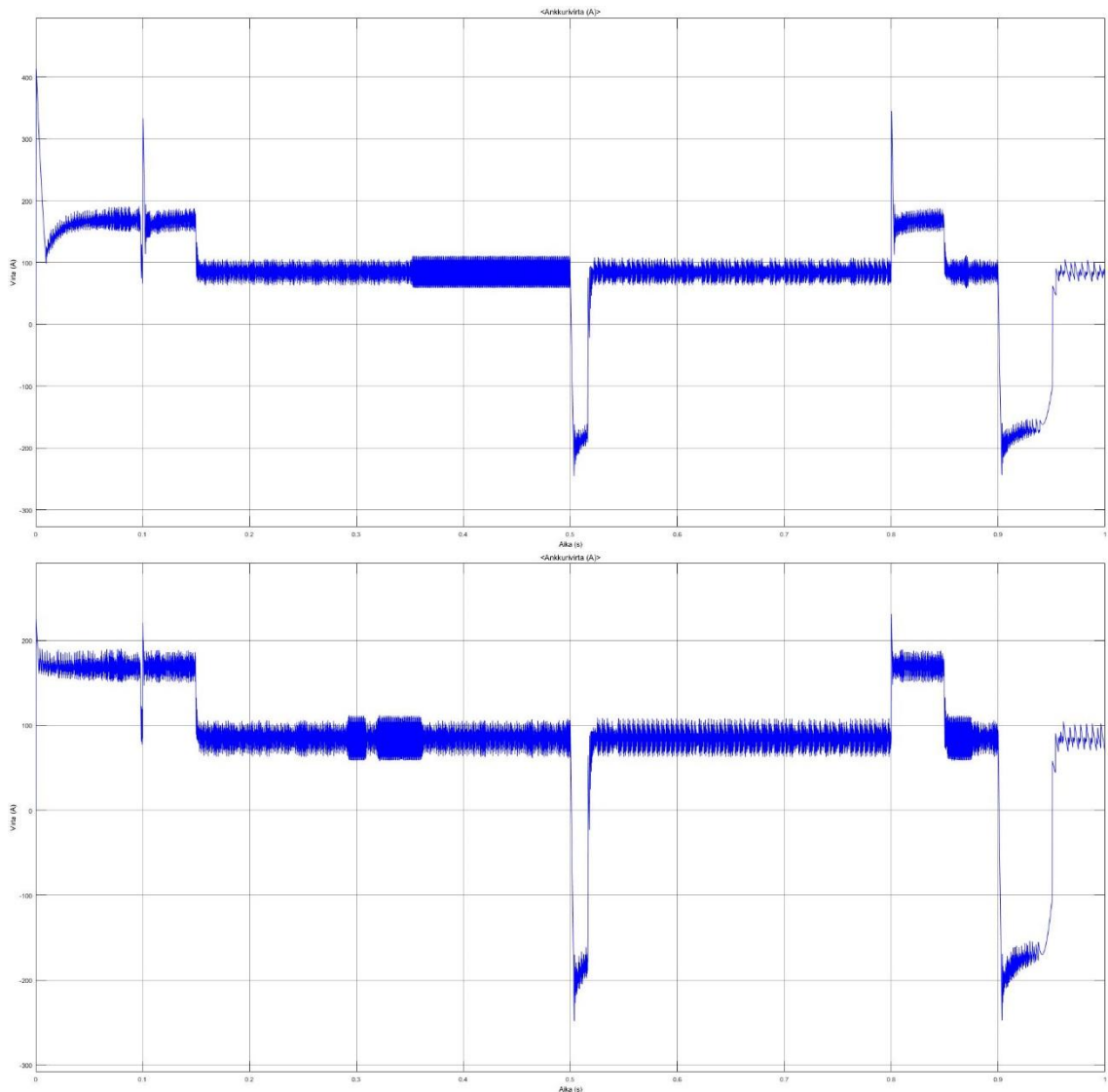
Taulukko 3. Kuvan 21 kuormitus syklin 2 numeerinen kuvaus.

Aikaväli (s)	Pyörimisnopeus (rpm)	Mopoauton vauhti ($\frac{\text{km}}{\text{h}}$)
0...0,15	100	8,6
0,20...0,35	525	45
0,45...0,60	292	25
0,65...0,75	175	15
0,85...1,00	467	38

Sykli 2 kuvaa kaupunkiajoa. Kiihdytykset ja jarrutukset ovat ajassa mitattuna vaihtelevan mittaisia, koska matkalla on muun muassa ruuhkia ja muita hidastavia tekijöitä. Tasaisella nopeudella ajetaan suhteellisesti tarkasteltuna lyhyt aika ennen jarruttamista seuraavaan risteykseen tai uutta kiihdytystä sieltä pois.

5. SIMULOINTIEN TULOKSET

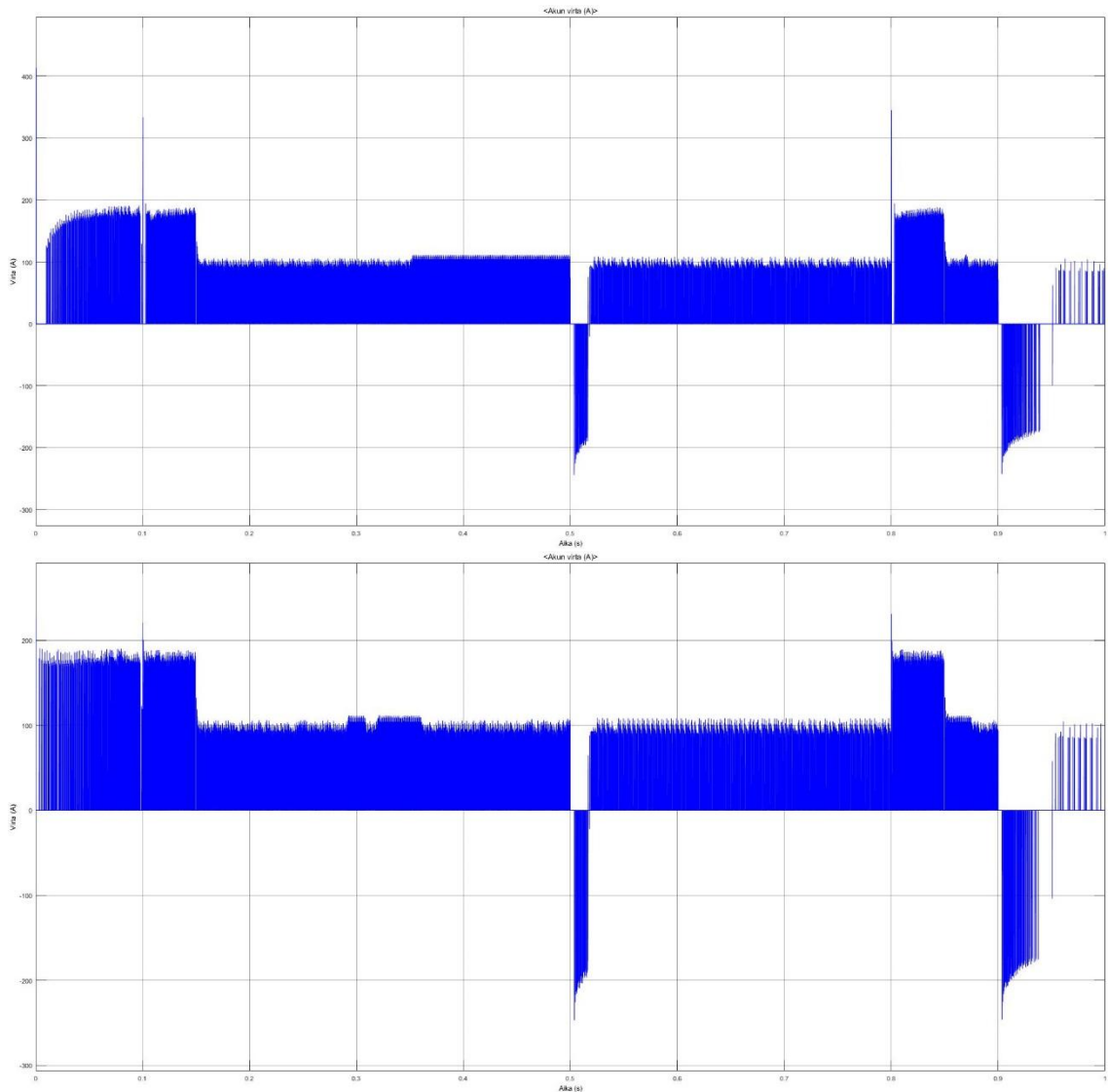
Kuvan 21 ensimmäisellä kuormitusyhdellä saadut tulokset tallennettiin kuvaajina Simulinkin skoopeista. Kuvassa 22 on esitetty moottorin ankkurivirta ajan funktiona. Ylemmän kuvaajan tilanteessa akunhallintajärjestelmä on pois päältä ja alemman kuvan tilanteessa päälle kytkettynä.



Kuva 22. Moottorin ankkurivirta ajan funktiona, sykli 1, BMS pois päältä ja päällä.

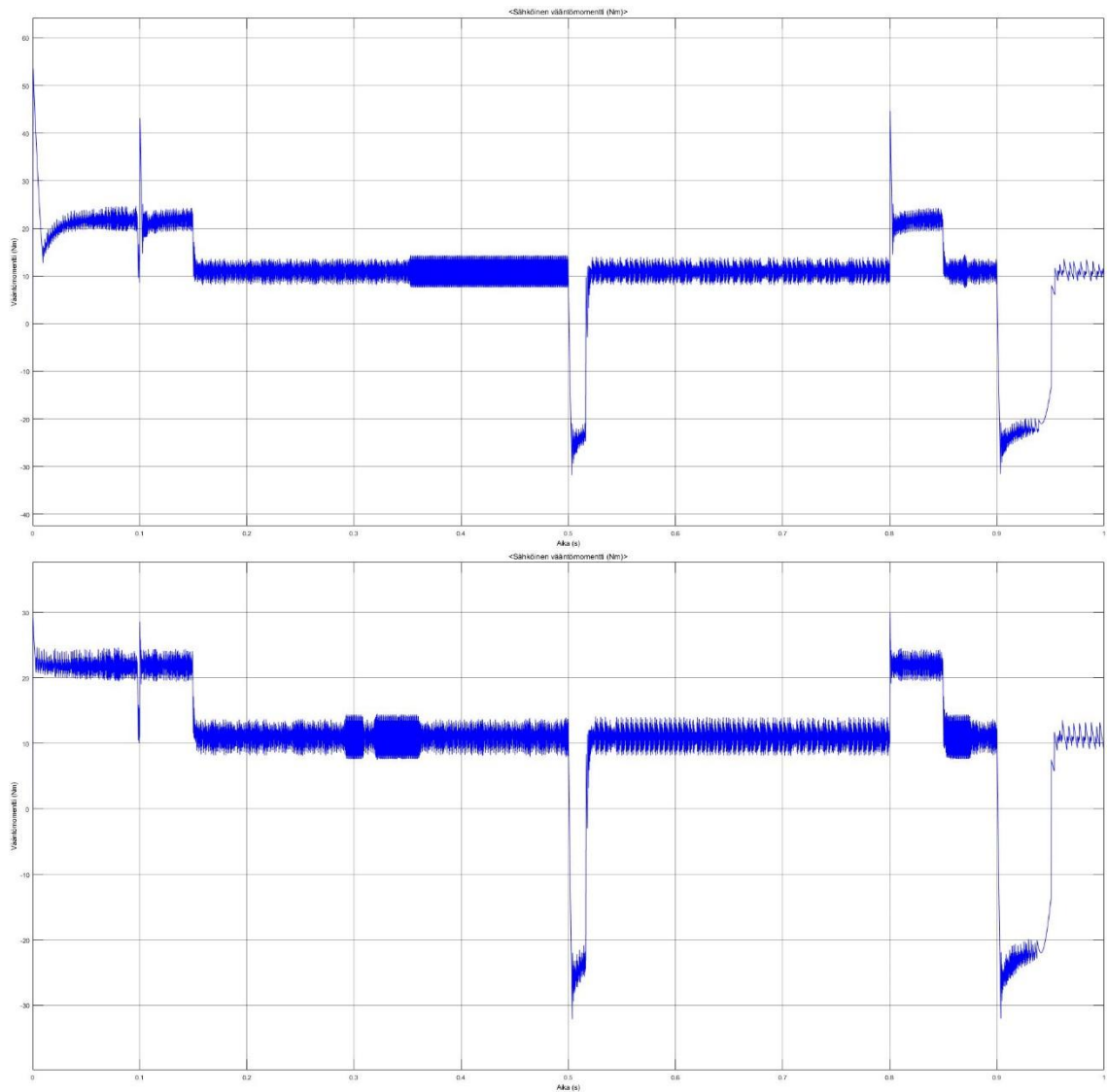
Ensimmäinen kiihdytyksistä aiheuttaa 333,4 A suuruisen virtapiikin ja toinen 345,5 A suuruisen piikin. Akunhallintajärjestelmä rajoittaa nämä piikit 221 A ja 220 A

suuruuksiin. Se pudottaa kytkinten ohjauksen hetkellisesti nolaksi aina, kun piikki havaitaan. Tilanne on esitetty akun puolelta tarkasteltuna kuvassa 23.



Kuva 23. Akun virta ajan funktiona, sykli 1, BMS pois päältä ja päällä.

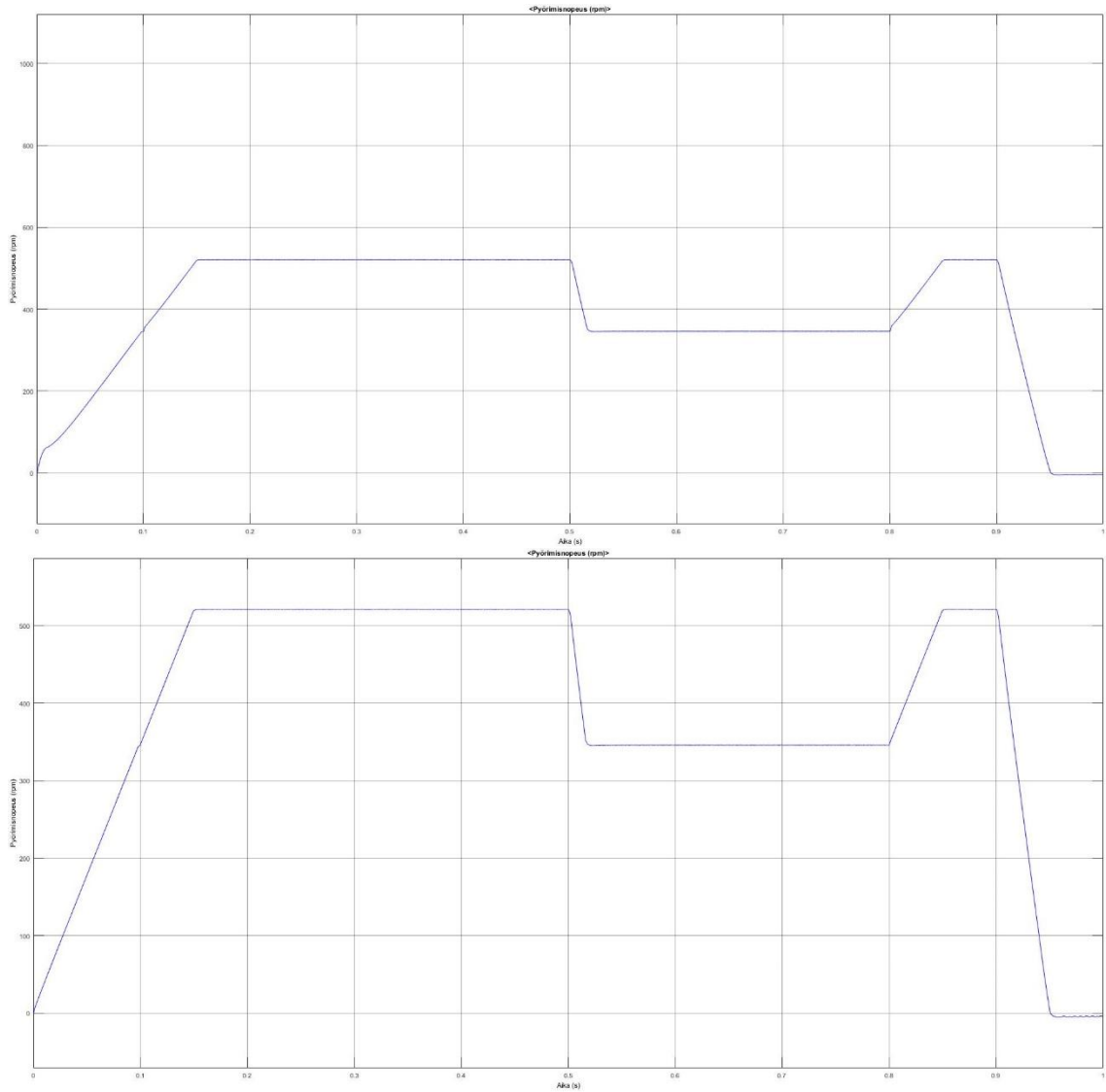
Akusta otettava virta putoaa säännöllisesti noltaan ja nousee sen jälkeen aina takaisin ankkurivirran määräämään arvoon hakkurin kytkentätilan muuttuessa. Ankkurivirta seuraa akun virran verhoikäyrää. Piikit 0,1 s ja 0,8 s kohdalla ovat yhtä suuria kuin ankkurivirrassa. Kuvassa 24 on moottorin sähköisen vääntömomentin T_e kuvaaja.



Kuva 24. Moottorin sähköinen vääntömomentti ajan funktiona, sykli 1, BMS pois päältä ja päällä.

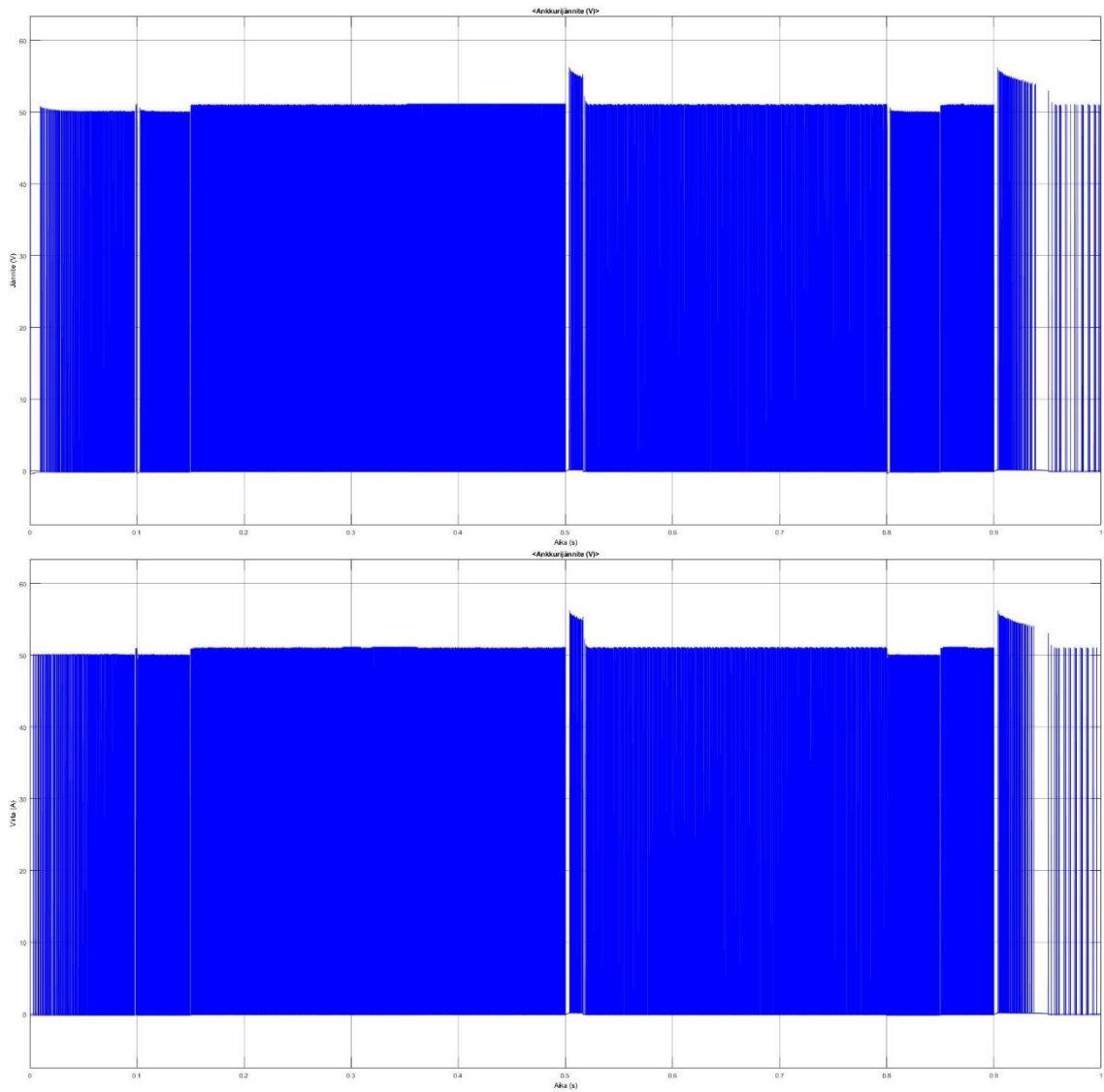
Vääntömomentti on verrannollinen ankkurivirtaan, joten sen kuvaajan käyrämuoto noudattaa ankkurivirran kuvaajan muotoa. BMS rajoittaa suuruuksiltaan alun perin 43,2 Nm ja 44,75 Nm piikit arvoihin 28,6 Nm ja 28,5 Nm.

Tarkastellaan seuraavaksi moottorin pyörimisnopeutta ja ankkurijännitettä. Pyörimisnopeuden kuvaajat ovat kuvassa 25.



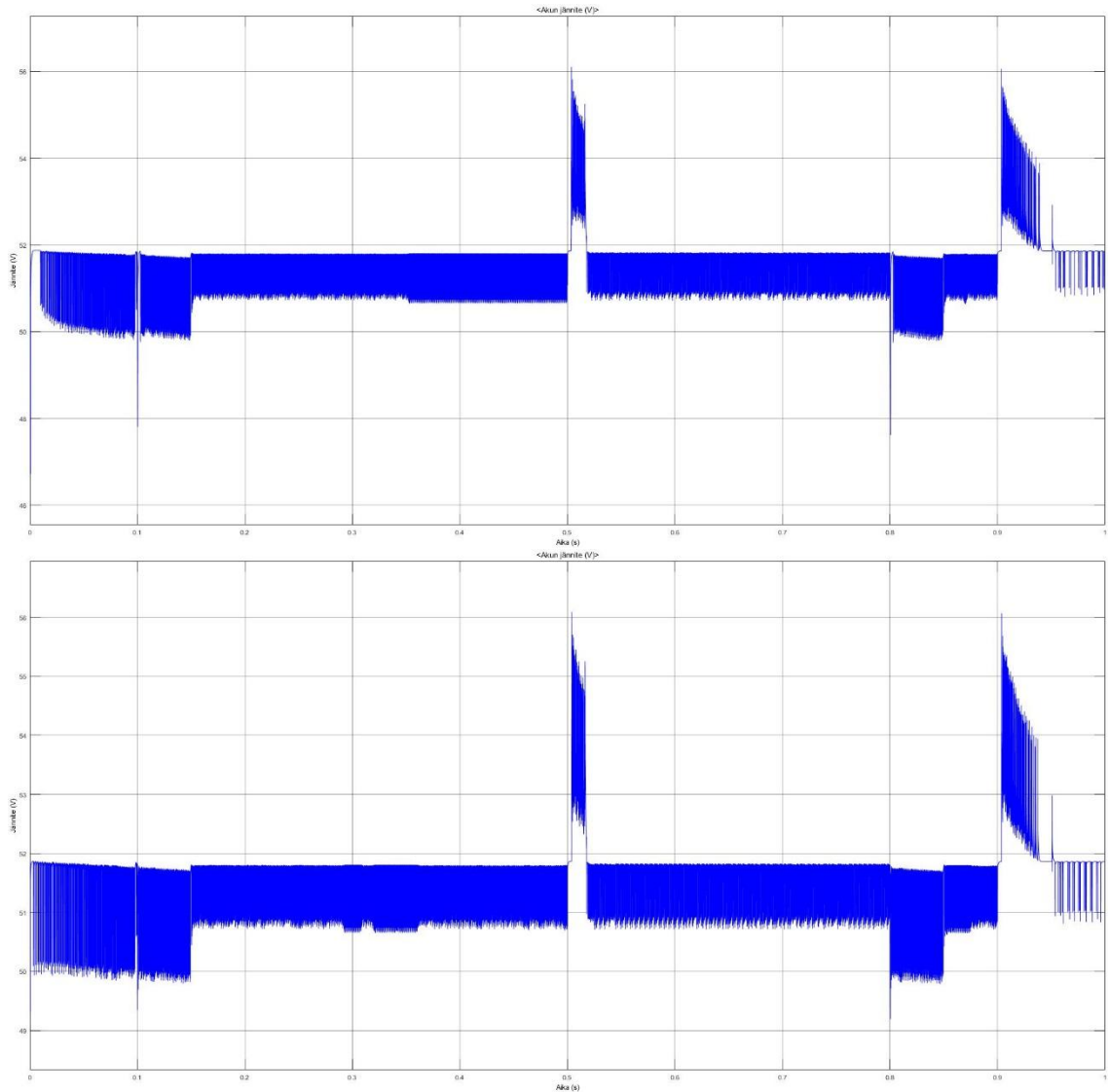
Kuva 25. Moottorin pyörimisnopeus ajan funktiona, sykli 1, BMS pois päältä ja päällä.

Pyörimisnopeudessa ei havaita muutosta kytkettäessä akunhallintajärjestelmä päälle. Tätä selittää osaltaan pyörimisen hidas dynamiikka verrattuna sähköisiin suureisiin. Akunhallintajärjestelmä ei vaikuta säätötulokseen, jossa on edelleen jatkuvuustilan virhettä 4 rpm. Moottorin ankkurijännite ilmenee kuvasta 26.



Kuva 26. Moottorin ankurijännite ajan funktiona, sykli 1, BMS pois päältä ja päällä.

Vastaavasti kuin akun virta, myös ankurijännite käy säännöllisesti nollassa hakkurin kytkentätilojen vaihtuessa. Sen huippuarvo jatkuvuustilassa vaihtelee välillä 50 V...51 V. Jarrutuksissa huippuarvo on suurimmillaan 56 V. Akun jännite näkyy kuvasta 27.

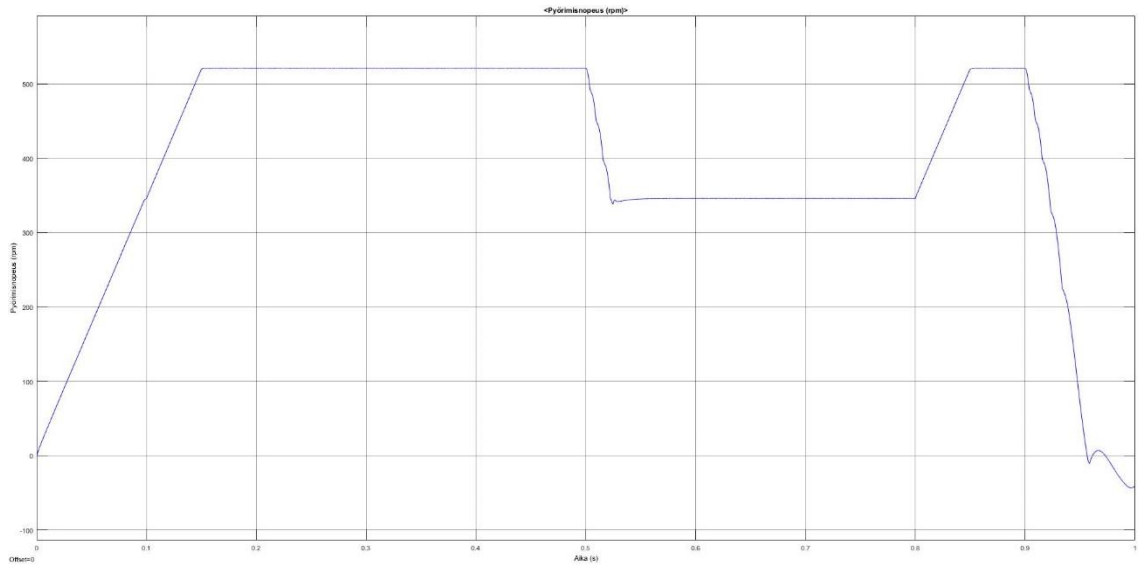


Kuva 27. Akun jännite ajan funktiona, sykli 1, BMS pois päältä ja päällä.

Akun jännitteen keskiarvo on hieman korkeampi kuin ankkurijännitteen huippuarvo. Kuvasta 27 arvioituna se on noin 51,3 V jatkuvuustilassa. Jarrutusten aikana jännitteet ovat suunnilleen saman suuruiset. Akunhallintajärjestelmän virtarajoitus pienentää jännitteen hetkellistä pienenemistä virtapiikkien aikana.

Mallin toimintaa validoitiin testaamalla sitä kuvan 21 toisella syklillä. Syklin kiihdytykset ovat hitaampia, joten vain ensimmäinen niistä aiheutti virtapiikin. Akunhallintajärjestelmä rajasi piikkiä arvosta 272 A arvoon 201 A. Vääntömomentin vastaavat piikit olivat suuruuksiltaan 35,2 Nm ilman akunhallintajärjestelmää ja 26 Nm sitä käyttäen. Vääntömomentin arvo jatkuvuustilassa kiihdytyksen jälkeen oli 21,5 Nm. Jännitteiden ja pyörimisnopeuden käyttäytyminen ei eronnut ensimmäisestä syklistä. Jännitteet asettuivat kutakin pyörimisnopeutta vastaaviin arvoihin myös akunhallintajärjestelmää käytettäessä.

Lopuksi tutkittiin BMS:n jänniterajan asettamista liian pieneen arvoon. Arvo pienennettiin 52 volttiin ja simulointi suoritettiin uudelleen kuvan 21 kuormitusyhdöllä 1 BMS:n ollessa käytössä. Tuloksena saatiin jarrutuksissa oskilloiva pyörimisnopeuden vaste, joka nähdään kuvasta 28. Kaikkiin sähköisiin suureisiin ja vääntömomenttiin syntyi piikkejä suureen käydessä säännöllisesti nollassa.



Kuva 28. Oskilloiva pyörimisnopeuden vaste syklillä 1, BMS:n jänniteraja 52 V.

Oskillointi osoittaa, että jatkuvat vikavirrat ja – jännitteet voivat olla hankalia työssä tutkittavalle järjestelmälle. Tilanne on ongelmallisinta, jos vika sattuu olemaan juuri jännite- tai virtarajan suuruinen. Tällöin BMS alkaa muuttaa hakkurin kytkentätilaa vian määräämisen arvon mukaan. Järjestelmän pitäisi tällöin pystyä asettamaan ohjaus pysyvästi nollassa.

6. YHTEENVETO

Sähköauton akunhallintajärjestelmä on pohjimmiltaan mikrokontrolleriohjattu mittausjärjestelmä, joka ohjaa auton muita osajärjestelmiä akun suojaamiseksi ja pitämiseksi turvallisella toiminta-alueellaan. Tämä kommunikaatio ja turvallisuusvaatimusten täytyminen vaativat auton käyttöolosuhteisiin sopivia komponentteja, laskentamalleja akun tilan kuvaamiseksi ja tehokkaasti toimivaa tietoliikennettä. Hajautettuna toteutetulla järjestelmällä on yksinkertaisinta hallita suurta määrää auton eri osiin sijoittuvia akkuja.

Akunhallinnassa on aina tarkasteltava akkua sekä kokonaisuutena että jokaisen yksittäisen kennon näkökulmasta, jotta kaikki turvallisuuden takaamiseksi olennaiset asiat tulevat huomioituiksi. Järjestelmän toimintalogiikka on pohjimmiltaan yksinkertainen. Se lukee mittauksia, suorittaa niiden pohjalta laskentaa ja ottaa käyttöön suojaustoimenpiteitä laskettuihin tuloksiin perustuen. Akun sekä auton muiden osajärjestelmien ominaisuudet ja auton käyttöolosuhteet määrittävät yksityiskohtaisemmat akunhallintajärjestelmän toimintojen toteutustavat.

Simuloimalla pyrittiin tutkimaan yksinkertaisen akunhallintajärjestelmän mallin toimivuutta sähkömopoautoon sopivassa DC-moottorikäytössä normaaleissa toimintatilanteissa. Akunhallintajärjestelmän havaittiin rajoittavan moottorin kiihdyttäessä syntyviä virtapiikkejä merkittävästi verrattuna tilanteisiin, joissa järjestelmää ei käytetty. Järjestelmä säilytti moottorin muun toiminnan ennallaan, joten malli sopii hyvin rajoittamaan hetkellisiä vikoja. Sen sijaan jatkuvien vikojen ehkäisyä varten mahdollisuus asettaa ohjaus pitkäaikaisesti tai pysyvästi nolllaksi on välttämätöntä, jotta moottori ei ala oskilloida. On myös huomioitava, että todelliset käytöt ovat nelikvadranttikäyttöjä, joissa akkua ladataan jarrutuksissa. Simulointimallin parametreista oli saatavissa niukasti tietoa, mikä aiheuttaa epävarmuutta nyt käytettyyn malliin. Tämä kasvattaa yritys yhteistyön merkitystä aiheen tutkimisessa.

Akunhallintajärjestelmän mallintaminen auton käyttöön liittyvät tilanteet laajasti huomioiden vaatii mallin laajentamista ja monimutkaistamista. Työssä saatujen tulosten perusteella Simulink tarjoaa tähän toimivan ympäristön. Tärkein mallin kehittämiskohteet ovat akun lataamisen mallintaminen sekä akun tyhjentyessä tarvittava moottorin ohjaus varaustilan perusteella. Varaustilan laskennan monimutkaisuus vaatii aiheen tutkimista hyvin yksityiskohtaisella tasolla myös jatkossa, jotta suunnittelun kohteisiin löydetään optimaalisia ratkaisuja. Kun sähköautot yleistyvät ja niiden toimintasäde pitenee, Suomen ilmastossa on erityisen olennaista tutkia akun lämpötilan hallintaa ja siten vuodenaikojen vaikutusta auton toimintaan ja akun turvallisuuteen.

LÄHTEET

- [1] J. Jiang, C. Zhang, *Fundamentals and applications of lithium-ion batteries in electric drive vehicles*, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, Singapore, 2015, 281 p.
- [2] P. Weicker, *A Systems Approach to Lithium-Ion Battery Management*, 1st ed. Artech House Inc, Norwood, Massachusetts, USA, 2013, 300 p.
- [3] D. Xu, L. Wang, J. Yang, *Research on Li-ion Battery Management System*, 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, Wuhan, China, 25-27 June 2010, IEEE, pp. 4106–4109.
- [4] P. Yang, H.Y. Yu, Y.G. Yan, *Implementation of the Li-Ion Battery Management System Based on DS2438*, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 733, Iss. Engineering Decisions for Industrial Development, 2015, pp. 714–717.
- [5] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, M. Ouyang, *A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles*, *Journal of Power Sources*, Vol. 226, 2013, pp. 272–288.
- [6] A. Hauser, R. Kuhn, *11 - High-voltage battery management systems (BMS) for electric vehicles*, in: B. Scrosati, J. Garche, W. Tillmetz (ed.), *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*, Woodhead Publishing, 2015, pp. 265–282.
- [7] D. Andrea, *Battery Management Systems for Large Lithium Ion Battery Packs*, Artech House Inc, Boston, Massachusetts, USA, 2010, 290 p.
- [8] *Battery System*, Kreisel, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.5.2017): http://www.kreiselectric.com/wordpress/wp-content/uploads/2015/12/Batteriesystem_Battery-Management-System-2015.png.
- [9] X. Zhang, C. Mi, *Vehicle Power Management: Modeling, Control and Optimization*, Springer London, London, UK, 2011, 346 p.
- [10] N. Mutoh, M. Nakanishi, M. Kanesaki, J. Nakashima, *EMI noise control methods suitable for electric vehicle drive systems*, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 47, Iss. 4, 2005, pp. 930–937.
- [11] O. Aiello, P.S. Crovetto, F. Fiori, *Susceptibility to EMI of a Battery Management System IC for electric vehicles*, 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), Dresden, Germany, August 16-22, 2015, IEEE, pp. 749–754.

- [12] D. Paret, *FlexRay and its Applications*, John Wiley & Sons Inc, Chichester, UK, 2012, 316 p.
- [13] J.K. Peng, H.W. He, D. Pan, Design on Electric Vehicle Battery Management System with FlexRay Bus, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 789-790, Iss. Manufacturing Science and Technology VI, 2015, pp. 784–790.
- [14] X. Nian, F. Peng, H. Zhang, Regenerative Braking System of Electric Vehicle Driven by Brushless DC Motor, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61, Iss. 10, 2014, pp. 5798–5808.
- [15] K.W.E. Cheng, B.P. Divakar, H. Wu, K. Ding, H.F. Ho, Battery-Management System (BMS) and SOC Development for Electrical Vehicles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 60, Iss. 1, 2011, pp. 76–88.
- [16] R. Xiong, H. He, F. Sun, K. Zhao, Evaluation on State of Charge Estimation of Batteries With Adaptive Extended Kalman Filter by Experiment Approach, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 62, Iss. 1, 2013, pp. 108–117.
- [17] C. Huber, R. Kuhn, 13 - Thermal management of batteries for electric vehicles, in: B. Scrosati, J. Garche, W. Tillmetz (ed.), *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*, Woodhead Publishing, 2015, pp. 327–358.
- [18] A. Hauser, R. Kuhn, 12 - Cell balancing, battery state estimation, and safety aspects of battery management systems for electric vehicles, in: B. Scrosati, J. Garche, W. Tillmetz (ed.), *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*, Woodhead Publishing, 2015, pp. 283–326.
- [19] AKASOL, Advantages & Data AKASOL High Performance Battery Systems, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.6.2017):
<http://www.akasol.com/en/e-mobility/akamodule/advantages-data/>.
- [20] Estrima, Estrima Birò Technical Sheet, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 9.6.2017):
http://www.estrime.com/en/overview/#section_technical-sheet.
- [21] Golden Motor. Powerful, Efficient and Reliable BLDC Motors, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.6.2017):
<https://www.goldenmotor.com/frame-bldcmotor.htm>.
- [22] J. Jokipii, J. Rekola, DC-koneen simulointimalli. Saatavissa (viitattu 24.8.2017):
http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/kurssit/Materiaalisivut/DEE_33030/DC_kone.zip.

LIITE 2: SIMULOINTEIHIN KÄYTETTY MATLAB-SKRIPTI

```
% DC-koneen parametrit

Un = 48;           % [V] nimellisjännite (Estrima Biro)
In = 84.17;       % [A] nimellisvirta, Pn / Un = 4 kW / 48 V = 83.33
A
% Birossa, lopullinen nimellisvirta 84.17 A
nn = 3500;        % [rpm] nimellisyörimisnopeus (Golden Motor 5 kW)
% Nimellinen pyörimisnop. 30 km/h:ssa, maksiminop. 45 km/h pyörii 5250
rpm
w = (2*pi*nn)/60; % [rad/s] nimellisyörimisnopeus
Ra = 0.0062;      % [ohm] ankkuriresistanssi (Golden Motor 5 kW)
La = 6.8e-5;      % [H] ankkuri-induktanssi (Golden Motor 5 kW)
J = 0.03;         % [kgm2] hitausmomentti
Te = 10.9;        % [Nm] nimellismomentti, Pn / w

kt = 0.1295;     % [Nm/A] torque constant
T_L = Te;        % Nimelliskuorma käytössä

% Akun nimellisjännite ja kapasiteetti
Vbat = 44.4;     % [V] AKASOL, viitattu 13.6.2017
% poistui internetistä 16.6.2017
% http://www.akasol.com/en/e-mobility/akamodule/advantages-data/
% AKAMODULE Nano NMC
Qbat = 46;       % [Ah] AKASOL

% Hakkurin parametrit

fs = 2e3;        % [Hz] kytkentätaajuus
Ts = 1/fs;       % [s] kytkentäjakson aika
```