

Pekka Linna

RANGE EXTENDERIT KAUPUNKISÄHKÖLINJA-AUTOISSA

Energianhallintastrategiat

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Kemiantekniikan koulutus
Toukokuu 2021**



Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Toukokuu 2021	Tekijä/tekijät Pekka Linna
Koulutus Kemiantekniikka		<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK
Työn nimi Range extenderit kaupunkisähkölinja-autoissa Energianhallintastrategiat		
Työn ohjaaja Laura Rahikka		Sivumäärä 50 + 6
Työelämäohjaaja Matti Malkamäki		
<p>Tämä opinnäytetyön aiheen sain Apugenius Oy:ltä ja työ toteutettiin kirjallisuustutkielmana. Opinnäytetyön tarkoituksena oli kartoittaa energianhallintastrategioita ja tutkia miten range extender -laite toimii range extenderillä varustetun kaupunkisähkölinja-auton tapauksessa. Energianhallintastrategioiden tutkiminen range extenderillä varustetulle ajoneuvoille on tärkeää, jotta hybridiajoneuvot voivat käyttää energianlähteiden energiaa tehokkaasti ja järkevästi.</p> <p>Opinnäytetyössä käsiteltiin yleisesti sähkölinja-autojen tyypit ja niiden erot sekä hybridi- ja täyssähkölinja-autojen akustoon ja lataukseen liittyviä asioita. Työssä käsiteltiin myös kaupunkisähkölinja-autojen energiankäyttöä ja energiankulutukseen liittyviä asioita. Opinnäytetyön pääaiheet olivat range extender -laitteistot ja niillä varustettujen ajoneuvojen energianhallintastrategiat. Pohdinnassa käsiteltiin range extendereitä ja niiden toimintaa Suomen olosuhteissa. Työssä tutkittiin tutkimusraportteja ja kirjallisuutta, joiden perusteella tehtiin työn johtopäätökset.</p> <p>On olemassa monia energianhallintastrategioita, joita voidaan käyttää range extenderillä varustetuissa kaupunkisähkölinja-autoissa. Suosittuja käytettyjä energianhallintastrategioita ovat erilaiset sääntöihin perustuvat strategiat ja optimointiin perustuvat strategiat, joissa käytetään dynaamista ohjelmointia. Range extender voi toimia energianhallintastrategioissa monella eri tavalla tuottaen energiaa erilaisten sääntöjen avulla tai optimoinnista saatujen tietojen pohjalta optimaalisesti tietyllä ajosyklillä.</p>		

Asiasanat Energianhallintastrategia, Range extender

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date May 2021	Author Pekka Linna
Degree programme Chemical engineering		
Name of thesis Range extenders in electric city busses Energy management strategies		
Centria supervisor Laura Rahikka	Pages 50 + 6	
Instructor representing commissioning institution or company Matti Malkamäki		
<p>The subject for this thesis was given by Apugenius Oy. This thesis was done as a literary based thesis. The objective was to survey energy management strategies to range extended city busses and find how range extenders work on range extended city busses. Research on energy management strategies is important so that hybrid vehicles can use energy sources efficiently and sensibly.</p> <p>This thesis covers different types of electric buses in general and differences between buses. Thesis also covers general information about electric bus batteries, charging and how electric buses use energy and which things affect energy consumption. The main topics were range extender devices and range extended vehicle energy management strategies. Discussion covers considerations on range extenders and on how they operate in the Finnish environment. Conclusions were made using literature and research reports.</p> <p>There are many possible energy management strategies to range extended city buses which can be used. Popular energy management strategies include different rule-based strategies and optimization-based strategies which utilize dynamic programming. A range extender device can work in many ways producing energy to a vehicle with set of different rules or based on optimization results in specific driving cycle.</p>		
Key words Energy management strategy, Range extender		

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

AFC

(Alkaline fuel cell) on alkalipolttokenno.

BEB

(Battery electric bus) on akkukäyttöinen sähkölinja-auto.

BL

(Blended strategy) on yhdistelmästrategia, joka on sääntöihin perustuva energianhallintastrategia.

CD-CS

(Charge depleting-charge sustaining) on varauksen vähenemiseen ja varauksen ylläpitoon perustuva energianhallintastrategia.

DP

(Dynamic programming) on dynaaminen ohjelmointi.

ECMS

(Equivalent Consumption Minimization Strategy) on reaaliaikaiseen optimointiin perustuva energianhallintastrategia.

EV

(Electric vehicle) on sähköajoneuvo.

FC

(Fuel cell) on polttokenno.

FCEB

(Fuel cell electric bus) on sähkölinja-auto, jossa on polttokennojärjestelmä.

GPS

(Global Positioning System) on satelliittipaikannusjärjestelmä.

HEB

(Hybrid electric bus) on hybridisähkölinja-auto.

ICE

(Internal combustion engine) on polttomoottori.

LFB

(Lithium ferrophosphate) on litiumrautafosfaattiakku.

LTO

(Lithium titanate oxide) on litiumtitaanioksidiakku.

MGT

(Micro gas turbine) on pieni kaasuturbiini

MPC

(Model predictive control) on reaaliaikaiseen optimointiin perustuva energianhallintastrategia.

NMC

(Nickel manganese cobalt oxide) on nikkeli-mangaani-kobolttioksidiakku.

PMFC

(Proton membrane fuel cell) on protoninvaihtomembraanipolttokenno.

REEB

(Range extended electric bus) on range extenderillä varustettu sähkölinja-auto

REEV

(Range extended electric vehicle) on range extenderillä varustettu sähköajoneuvo.

SOC

(State of charge) on akun varausaste

**TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS**

1 JOHDANTO	1
2 KAUPUNKISÄHKÖLINJA-AUTOT	3
2.1 Sähkölinja-autojen eri tyypit ja vertailu	3
2.1.1 Täyssähkölinja-autot.....	4
2.1.2 Hybridisähkölinja-autot	4
2.1.3 Range extenderillä varustetut sähkölinja-autot	7
2.2 Hybridi- ja täyssähkölinja-auton akusto ja lataus.....	9
3 KAUPUNKISÄHKÖLINJA-AUTOJEN ENERGIANKÄYTTÖ	11
3.1 Täyssähkölinja-auton ja range extenderillä varustetun sähkölinja-auton energiankulutus	11
3.2 Sähkölinja-auton energiankulutuksen arviointi ja siihen vaikuttavat asiat.....	12
4 RANGE EXTENDER.....	17
4.1 Polttomoottorit (ICE).....	17
4.2 Polttokennot (FC).....	19
4.3 Mikrokaasuturbiinit (MGT)	20
4.4 Aurinkokennot.....	22
4.5 Range extenderin mitoitus sähkölinja-autoon.....	23
4.6 Esimerkkitapaus range extender -laitteistosta sähkölinja-autossa	24
5 RANGE EXTENDERILLÄ VARUSTETUN SÄHKÖAJONEUVON ENERGIANHALLINTASTRATEGIAT	26
5.1 Sääntöihin perustuvat energianhallintastrategiat.....	27
5.2 Optimointiin perustuvat energianhallintastrategiat	32
5.3 Oppimiseen perustuvat energianhallintastrategiat.....	34
5.4 Energianhallintastrategiat range extenderillä varustetuissa kaupunkilinja-autoissa.....	35
5.5 Johtopäätökset käsitellyistä tutkimuksista	43
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	45
7 POHDINTA RANGE EXTENDERILLÄ VARUSTETUN KAUPUNKISÄHKÖLINJA- AUTOON SOPIVISTA RANGE EXTENDER-JÄRJESTELMISTÄ JA ENERGIANHALLINTASTRATEGIOISTA.....	47
8 OPINNÄYTETYÖN POHDINTA	49
LÄHTEET	51

1 JOHDANTO

Sähkölinja-autojen määrä on Suomessa ja muissa pohjoismaissa kasvanut suuresti. Esimerkiksi sähkölinja-autojen määrä Pohjois-Euroopassa on kasvanut 56 sähkölinja-autosta 467 sähkölinja-autoon vuonna 2019 (Sustainable bus 2019). Suomeen on tilattu 106 sähkölinja-autoa vuonna 2020, joiden on määrä tulla toimintaan Helsingin ja Turun alueelle (Sustainable bus 2020). Sähkölinja-autojen toimintamatka on riippuvainen akuston koosta eli energiasisällöstä ja sen latausmahdollisuuksista. Akustot ovat kalliita, ja jos sähkölinja-autolle halutaan yhtä pitkä toimintamatka kuin tavanomaiseen diesel linja-autoon, akuston koko on yleensä suuri. Näin ollen vaihtoehtoisen energianlähteen lisääminen sähkölinja-autoon tulee kysymykseen, jotta akustosta koituvia kustannuksia voidaan vähentää ja ajoaluetta pidentää.

Erilaiset range extender -laitteistot tarjoavat mahdollisuuden pidentää sähkölinja-auton ajomatkaa jopa tavanomaisen dieselinlinja-auton pituuteen ja vähentää sähkölinja-autojen riippuvuutta latauksen tarpeesta matkan aikana. Energianhallintastrategiat ovat tärkeitä range extenderillä varustetussa sähkölinja-autossa, koska niillä määrätään energiankäyttö akuston ja range extender -laitteiston välillä.

Työn tavoitteena on kartoittaa mahdollisia energianhallintastrategioita kaupunkilinja-autolle. Opinnäytetyö rajataan range extender -laitteella varustettujen kaupunkisähkölinja-autojen tapauksiin.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on saada vastaukset seuraaviin kysymyksiin:

- Mitä mahdollisia energianhallintastrategioita range extenderillä varustetulla kaupunkisähkölinja-autojen tapauksessa on käytetty ja tutkittu?
- Minkä tyyppisiä energiahallintastrategioita voidaan käyttää range extenderillä varustetulla kaupunkisähkölinja-autolla?
- Millä tavalla range extender -laite toimii energianhallintastrategioissa?

Opinnäytetyössä käydään läpi asioita seuraavasti: käsitellään yleisesti sähkölinja-autojen eri tyypit ja niiden kokoonpanot ja miten sähkölinja-autot kuluttavat sähköenergiaa. Työssä käydään myös läpi yleisesti sähkölinja-autojen akustoon ja lataukseen liittyviä asioita. Opinnäytetyön pääaiheena ovat range extender -laitteistot ja niihin liittyvät asiat, joita käsitellään yleisesti neljän eri range extender -laitteiston osalta, keskittyen niiden toimintaan, ominaisuuksiin, mitoitukseen ja tehontuottoon. Sekä

opinnäytetyössä keskitytään pääasiassa range extenderillä varustetun ajoneuvon energianhallintastrategioihin ja sitä kautta range extenderillä varustetun kaupunkisähkölinja-auton tapaukseen.

2 KAUPUNKISÄHKÖLINJA-AUTOT

Liikennejärjestelmien keskeisimpiä haasteita ovat ajoneuvojen hiilijalanjälki, paikalliset päästöt, meluhaitat ja liikenteen ruuhkat. Sähkölinja-autoilla on mahdollisuus vähentää vaikuttavasti hiilijalanjälkeä, paikallisia päästöjä ja julkisen kaupunkiliikenteen melua. Tavanomaiseen dieselkaupunkilinja-autoon verrattuna nykyään sähkölinja-autojen haasteena on myös rajoitettu ajomatka, jonka seurauksena sähkölinja-autojen käyttö on rajoitetumpi.

Suomessa kaupungissa operoivat sähkölinja-autot ovat tyypillisesti 12–13 metrisiä ja 2-akselisia. Sähkölinja-autojen painot ja korkeudet vaihtelevat riippuen valmistajasta, paino välillä 9 500–12 500 kg ja korkeus 3,25–3,45 metrin välillä. Täyssähkölinja-autot eivät poikkea 2-akselisesta diesellinja-autosta kooltaan, painoltaan tai matkustajakapasiteetiltaan, kuitenkin eri sähkölinja-autoissa on eroja painon suhteen. (Lehtinen & Kanerva 2017, 21.) Sähkölinja-autoissa lämmitys on yleensä toteutettu ilmalämpöpumpulla tai biodieselillä toimiva sisätilalämmityksellä, riippuen kalustovalmistajasta (Lehtinen & Kanerva 2017, 24).

Suomen ilmastossa lämpötilojen vaihtelut ovat vuodessa suuria, joten esimerkiksi lämmityslaitteiden viemällä sähköenergialla on suuri merkitys sähkölinja-auton matkan pituuteen. Sähkölinja-autojen ajomatkaa on mahdollista pidentää ilman akuston koon lisäämistä vaihtoehtoisesti asentamalla range extender -laitteisto, jolla pystytään lisäämään toimintamatkaa ja vähentämään riippuvuutta latauksesta.

2.1 Sähkölinja-autojen eri tyypit ja vertailu

Nykyään maailmalla on käytössä kolme erilaista sähkölinja-autojen variaatiota, joita ovat täyssähkölinja-autot (BEB), polttokennosähkölinja-auto (FCEB) ja hybridisähkölinja-autot (HEB).

Sähkölinja-autojen erot teknologian suhteen vaihtelevat siinä, miten sähköenergia on tuotettu tai varastoitu. (MRCagney 2017, 11.) Opinnäytetyössä keskitytään pääasiassa range extenderillä varustettuun sähkölinja-autoon (REEB), joka on käytännössä hybridisähkölinja-auto.

2.1.1 Täyssähkölinja-autot

Täyssähkölinja-autojen käyttövoimana toimii sähkö ja voimanlähteenä on sähkömoottori, joka saa energian akustosta. Energia siirretään akkuihin sähköisen latausjärjestelmän avulla ja jarrutuksessa saatu kineettinen energia hyödynnetään akkuihin. (MRCagney 2017, 17.) Täyssähkölinja-autojen liikenne on mahdollista järjestää käyttäen päätepusäkkilatausta tai varikkolatausta (Oulun linja-autoliikenteen käyttövoimaselvitys 2018, 23).

Täyssähkölinja-autot on mahdollista jakaa kahteen kategoriaan riippuen toimintamatkasta, joka liittyy akun kokoon ja latauksen rutiineihin. Ensimmäiseen kategoriaan kuuluvat täyssähkölinja-autot, joita voidaan ladata nopeasti päivän aikana, aina kun se on mahdollista, eli niin sanotulla päätepusäkkilatauksella. Toiseen kategoriaan kuuluvat yön yli ladattavat täyssähkölinja-autot, joissa on pidempi toimintamatka, että ne voivat toimia päivän käyttöajan kokonaan, jonka jälkeen ne ladataan hitaalla latauksella yön yli, joka on niin sanottu varikkolataus.

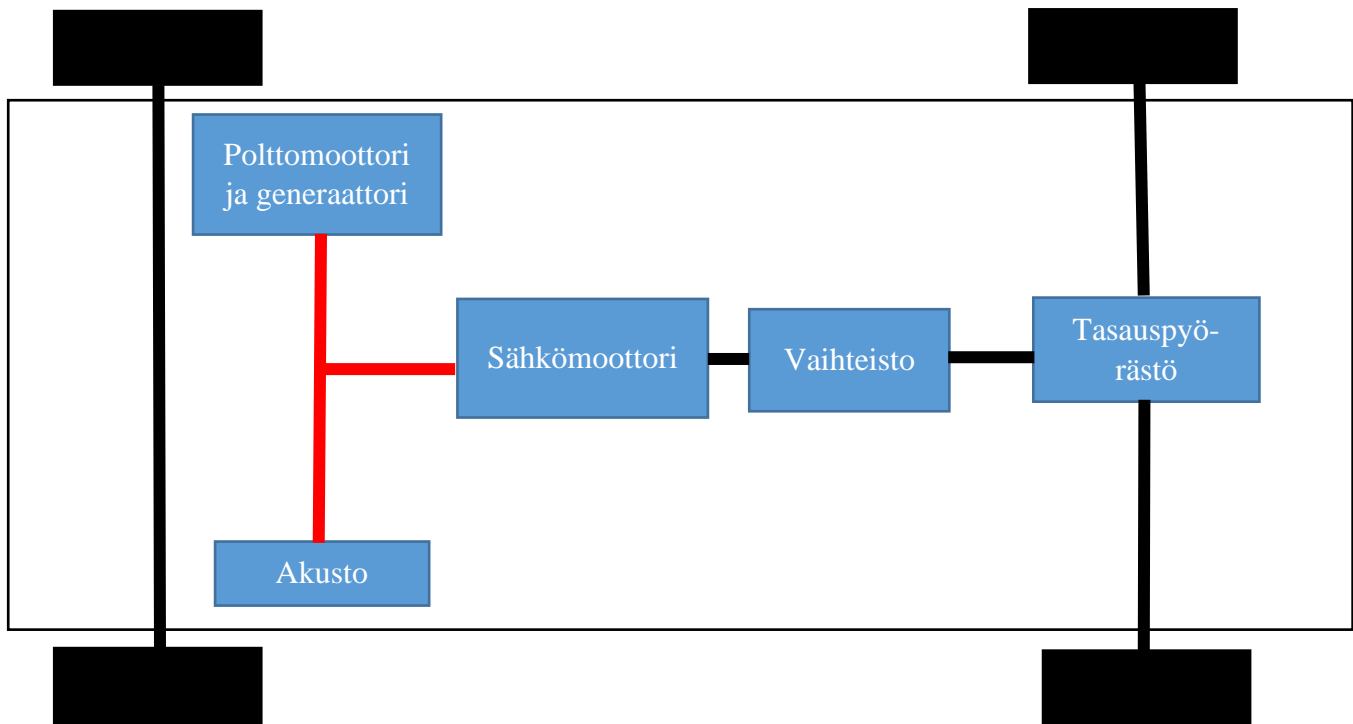
Sähkölinja-autojen hyvinä puolina voidaan pitää päästöjen vähenemistä, sähkömoottorin tuottamaa vähäistä värähtelyä, joka lisää matkustajien mukavuutta, alhaista äänitasoa sähkömoottorin takia ja hyvää energiatehokkuutta. Huonoina puolina voidaan pitää täyssähkölinja-auton hintaa, joka on suurempi kuin esimerkiksi normaalin diesellinja-auton. Täyssähkölinja-auto tarvitsee myös erilaisen infrastruktuurin latausasemien takia. (MRCagney 2017, 18–19.)

2.1.2 Hybridisähkölinja-autot

Hybridisähkölinja-autot käyttävät sekä sähkömoottoria että polttomoottoria. Hybridisähkölinja-autoissa polttomoottori on yleisimmin dieselmoottori. Hybridisähkölinja-autoja on olemassa eri kokoonpanoilla riippuen komponenttien, kuten vetomoottorin, energiavaraston, generaattorin, virranhallintayksikön ja sähköisten ja mekaanisten järjestelmien, yhteen liittämistä. (MRCagney 2017, 13–14.)

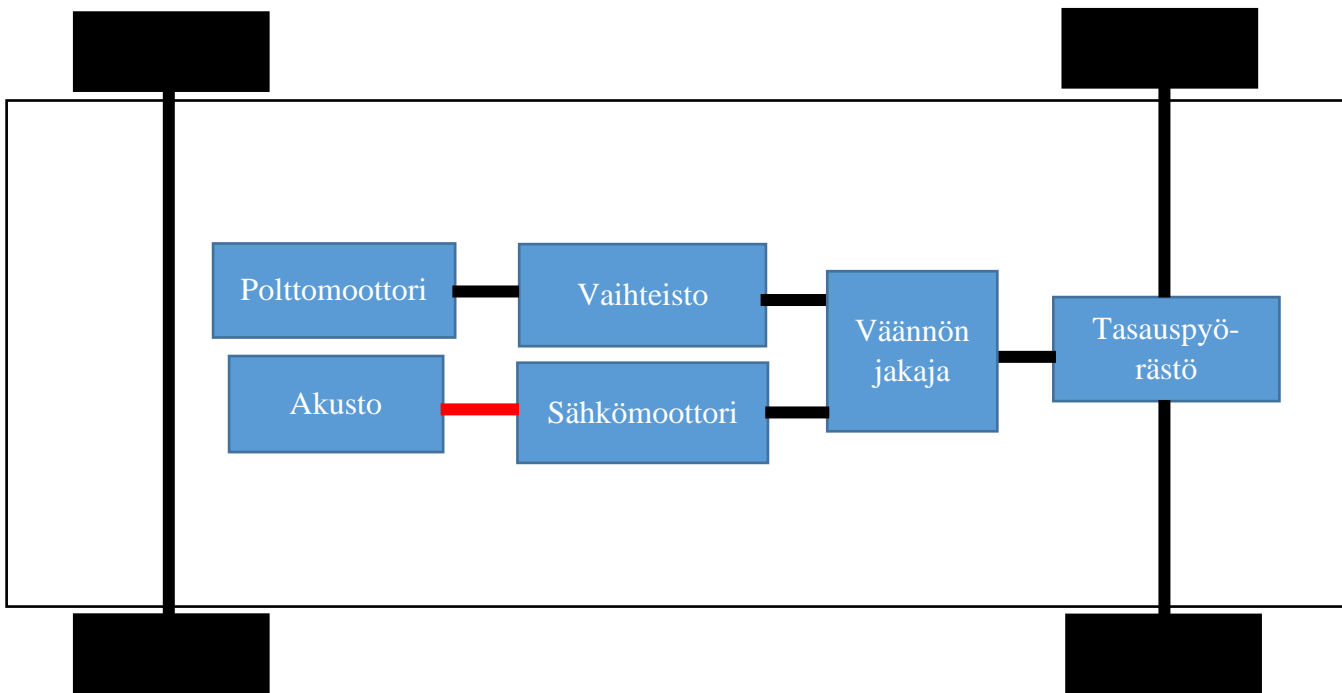
Hybridisähkölinja-autoja on olemassa niin sanottuna pistokehybridinä eli ladattavana hybridinä ja myös ei-ladattavana hybridinä, joissa akun koko vaihtelee siten että tyypillisesti ladattavassa hybridissä on suurempi akku kuin ei-ladattavissa hybridisähkölinja-autoissa. Hybridin ja ladattavan hybridin ero on se, että ladattava hybridi käyttää sähkövoimaa pääasiallisena käyttövoimana, polttomoottoria tai muuta energianlähdettä käytetään lataamaan akustoa.

Hybridisähkölinja-autot voivat toimia rinnakkais- ja sarjakokoonpanolla tai rinnan ja sarjan kokoonpanolla. Kaaviosta 1 voidaan huomata, että sarjakokoonpanolla toimiva hybridilinja-auto ei käytä polttomoottoria työntömoottorina vaan polttomoottori pyörittää generaattoria, joka lataa akkuja tai vaihtoehtoisesti lähettää energiaa suoraan sähkömoottorille. (MRCagney 2017, 13–14.)



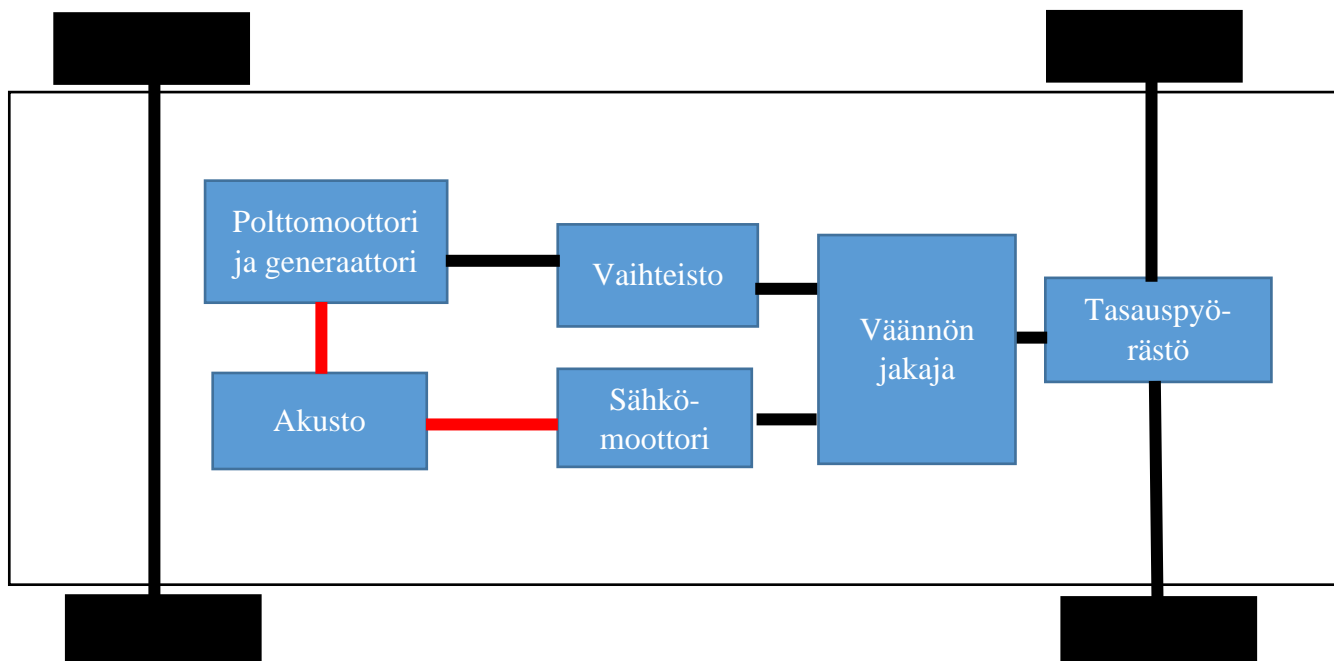
KAAVIO 1. Tavanomainen sarjakokoonpanolla toimiva hybridisähköajoneuvon kokoonpano (Sähköliitännät: Punainen ja Mekaaniset liitännät: Musta)

Nykyään suurin osa hybridisähkölinja-autoista toimii sarjakokoonpanolla. Sarjakokoonpanolla toimiva hybridisähkölinja-auto on joustava komponenttien paikasta, ja moottorinohjaus ei ole riippuvainen ajoneuvon nopeudesta. (Lajunen 2013, 2.) Rinnakkaiskokoonpanolla toimiva hybridilinja-auto toimii siten, että se tuottaa sähkömoottorilla ja polttomoottorilla voiman vaihteistolle ja sen kautta renkaille. Tavanomainen rinnakkaiskokoonpano voidaan nähdä kaaviosta 2. Rinnakkaiskokoonpanolla toimivassa hybridilinja-autossa polttomoottori ja sähkömoottori on molemmat kytketty suoraan renkaisiin, joten sillä saadaan korkeamman hyötysuhteen omaava voimansiirto kuin sarjakokoonpanossa. (Lajunen 2013, 2.)



KAAVIO 2. Rinnakkaiskokoontanolla toimivan hybridisähköajoneuvon kokoonpano
(Sähköliitännät: Punainen ja Mekaaniset liitännät: Musta)

Sarjan ja rinnan kokoonpanolla toimivassa hybridisähkölinja-autossa yhdistetään sarjan ja rinnan kokoonpanot, kaavio 3. Yhdistetyssä kokoonpanossa polttomoottorin pyörittämä generaattori voi ladata akustoa, kuten sarjakokoonpanolla toimivassa tavanomaisessa hybridisähkölinja-autossa, mutta se voi myös tuottaa työntövoimaa polttomoottorilla.



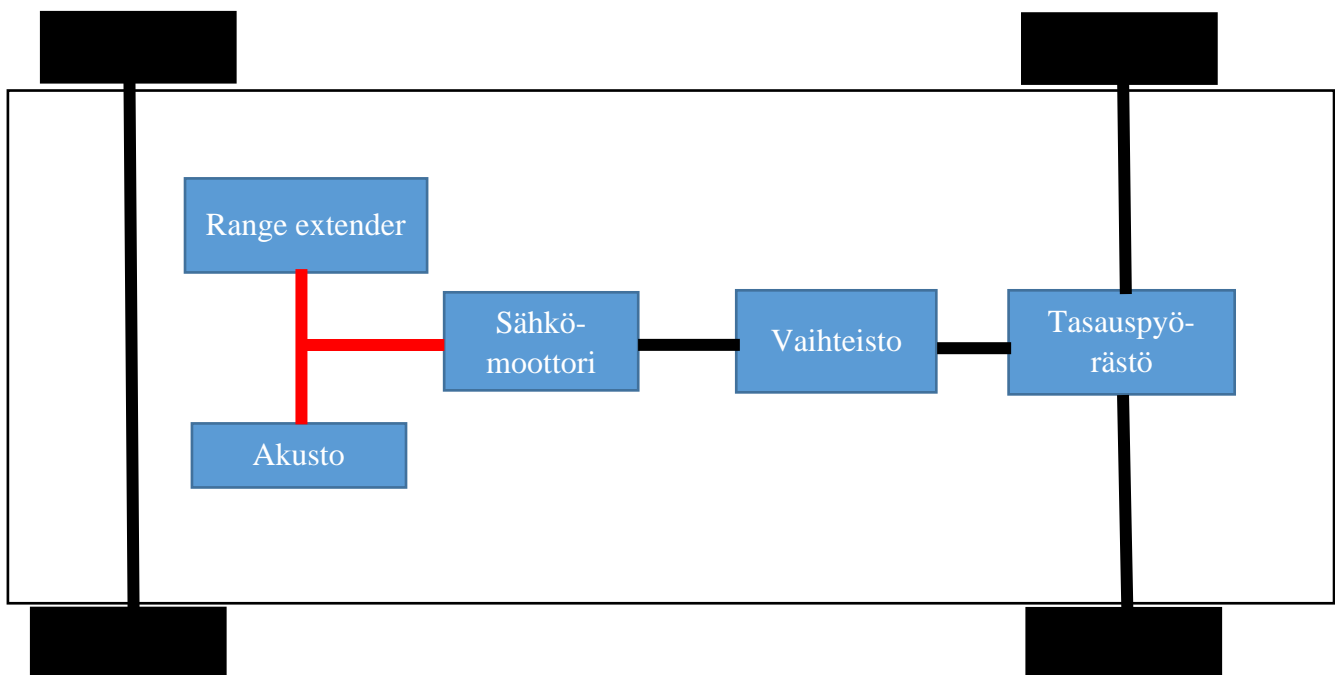
KAAVIO 3. Sarjan ja rinnan kokoonpanolla toimivan hybridisähköajoneuvo
(Sähköliitännät: Punainen ja Mekaaniset liitännät: Musta)

Hybridisähkölinja-auton hyvinä puolina voidaan pitää pienempiä teknologian muutoksia, koska teknologia polttomoottorin osalta on samaa kuin normaalissa diesel linja-autossa. Huonoina puolina voidaan pitää voimansiirtolinjan muutoksien tuomaa painoa: lisääntynyt paino vähentää linja-auton kapasiteettia maksimi akselipainon rajan takia. Voidaan tarvita muutoksia infrastruktuuriin latausasemien takia. (MRCagney 2017, 13–14.)

2.1.3 Range extenderillä varustetut sähkölinja-autot

Range extenderillä varustetut sähkölinja-autot eli (REEB) ovat range extenderillä varustettuja ajoneuvoja (REEV). Range extenderillä varustettu hybridiajoneuvo ja ladattava hybridiajoneuvo ovat molemmat hybridiajoneuvoja, koska molemmissa on kaksi energianlähdettä, sisältäen polttoainesäiliön ja akun (Liu, He & Wang 2015, 2).

Range extenderillä varustettu hybridiajoneuvon ero normaaliin ei-ladattavaan hybridiajoneuvoon on se, että range extender ei aja suoranaisesti ajoneuvoa, vaan sen on tarkoitus olla ylimääräinen energianlähde, joka tuottaa vain sähköenergiaa, kun taas normaalissa hybridissä sähkömoottori ja polttomoottori toimivat pääasiallisina vetovoiman tuottajina. Kaaviosta 1 ja 4 voidaan nähdä, että range extenderillä varustettu ajoneuvo vastaa kokoonpanoltaan sarjakokoonpanolla varustettua ladattavaa hybridiajoneuvoa.



KAAVIO 4. Range extenderillä varustetun sähköajoneuvon kokoonpano

(Sähköliitännät: Punainen ja Mekaaniset liitännät: Musta)

Range extender -laite muuntaa käytetyn polttoaineen sähköenergiaksi, joka ohjataan sähkömoottoriin ja akustoon. REEB koostuvat tyypillisesti kahdesta energianlähteestä, range extenderistä ja akusta. Range extenderillä varustetussa sähkölinja-autossa virranvirtausta virtalähteiden välillä ohjataan energianhallintajärjestelmillä erilaisissa ajojaksoissa. Tyypillinen voimansiirtolinja koostuu akusta, range extenderistä, tehonmuuntoyksiköstä ja sähkömoottorista. Pyörät liikkuvat suoraan vetomoottorin kautta, johon liittyy vaihteisto ja tasauspyörästö. Vetomoottori saa energian akustosta ja range extenderistä sähköliitännän kautta. Kun range extenderillä varustetun sähkölinja-auton energiantarve on suurempi kuin minkä akku voi toimittaa range extender kompensoi energian puutetta ja varmistaa ajoneuvon suorituskyvyn. (Gao & Du 2016, 1.)

Range extenderillä varustetun sähkölinja-auton hyvinä puolina voidaan pitää range extenderin tuomaa matkan pidennystä, lataustarpeen vähenemistä ja apulaitteiden viemän energian kompensointia. Range extenderin käyttö sähkölinja-autoissa ratkaisee ilmastoinnin, valaistuksen, lämmityksen ja muiden apulaitteiden viemän energiankulutuksen. Tämä tekee range extenderillä varustetusta sähkölinja-autosta sopivan vaihtoehdon kaupunkilinja-autoksi. (Wu, Hu & Chen 2014, 2.) Range extenderilla varustetun sähkölinja-auton huonona puolena voidaan pitää mahdollista range extender -laitteiston tuomaa päästöjen

lisääntymistä verrattuna täyssähkölinja-autoon, joka on kuitenkin riippuvainen käytetystä range extender-laitteistosta.

2.2 Hybridi- ja täyssähkölinja-auton akusto ja lataus

Sähkölinja-autoissa yleisimmin käytettävät akkutyypit ovat litiumioniakkuja, joita ovat litiumrautafosfaatti (LFP), litiumtitaanioksidi (LTO) ja nikkeli-mangaani-kobolttioksidi (NMC). Kaikista tärkeimmät ominaisuudet sähkölinja-autojen akustossa kennotyypin osalta ovat energiatiheys, latausnopeus ja akun latauksien kesto. (Göhlich, Jeffries, Fay & Lauth 2018, 7.) Sähkölinja-autojen akuston koot vaihtelevat 60–548 kW/h välillä, mutta tyypillisimmin akun kapasiteetti on välillä 200–300 kW/h (Gao 2017, 1).

Sähkölinja-auton akuston kokoa ja ominaisuuksia valittaessa tulee ottaa huomioon sähkölinja-auton käyttökohde ja millaisella alueella sen on tarkoitus toimia, jotta kaikki hyöty akusta energianlähteenä saadaan hyödynnettyä. Sähkölinja-autoissa range extenderin käyttö ylimääräisenä energianlähteenä antaa mahdollisuuden pienemmän akun käyttöön, joka vähentää akuston hinnasta koituvia kustannuksia. Range extenderin käytöllä on myös mahdollista välttää akuston liikaa purkautumista ja erilaisten olosuhteiden tuomaa liikaa energiankulutusta.

Suorituskyvyn ja kestävyuden takia akuston tulisi toimia tietyllä lämpötila-alueella. On huomattu, että 50 °C lämpötilan jälkeen akun elinikä lyhenee ja tehokkuus laskee. Alle 10 °C lämpötiloissa akuston suorituskyky ja tehokkuus laskevat myös merkittävästi. (Dickinson & Nasri 2014, 4.) Sähköajoneuvoissa akun varausaste (SOC) pidetään tyypillisesti 20–80 % välillä, kun akku on uusi eli se käyttää tyypillisesti 60 % akun kapasiteetista. Akun varauksen lasku liian vähäiseksi lyhentää akuston elinikää. (Buchmann 2021.)

Sähkölinja-autoja ladataan käytännössä kahdella erilaisella sähköverkkolatausperiaatteella; matkalla tapahtuvalla latauksella tai yön yli latauksella varikolla. Matkalla tapahtuva sähköverkkolataus tapahtuu yleensä suurella latausteholla, 500 kW:iin asti. Sitä käytävillä täyssähkölinja-autoilla on pienikokoisemmat akut, joka täten vähentää painoa ja lisää sähkölinja-auton hyötysuhdetta. Huonoina puolina voidaan matkalla tapahtuvalla latauksella pitää riippuvuutta reitistä ja täten latauslaitteista reitin varrella. Yön yli latausta käyttävät sähkölinja-autot on suunniteltu siten että niillä voidaan ajaa sama matka kuin normaaleilla dieselbusseilla. Yön yli lataus toteutetaan alle 100 kW:n latausteholla. Yön yli latauksen

käyttäminen vähentää latausten määrää eikä rasita sähköverkkoa samalla tavalla kuin matkalla tapahtuva lataus. (Gallo, Bloch-Rubin & Tomić 2014, 18–19.)

Range extenderillä varustettua sähkölinja-auton tapauksessa sähköverkkolataus suoritetaan tyypillisesti yön yli latauksella ja matkan aikana tarvittava lataus suoritetaan range extender-laitteistolla, joten sähkölinja-auton ei tarvitse pysähtyä lataamaan matkalla oleville latauspaikoille. Range extenderillä varustetun sähköajoneuvon ladattavuus sähköverkosta mahdollistaa sen, että sillä voidaan hyödyntää sähköverkosta saatu energia akkuihin, akusta saatua energiaa on kannattavaa hyödyntää niin paljon kuin mahdollista ja akun varaustason nostaminen merkittävästi range extenderillä ei ole järkevää ekonomian kannalta. Ei ole kannattavaa ladata akkua suuremmille varausasteille, koska sillä tuotettu sähköenergia on kalliimpaa kuin sähköverkosta saatu (Rogge, Rothgang & Uwe Sauer 2013, 2).

3 KAUPUNKISÄHKÖLINJA-AUTOJEN ENERGIANKÄYTTÖ

Sähkölinja-autojen energiankäytön tutkimukset antavat range extender -laitteiston mitoittamiseen suuntaa ja myös energiankulutukseen vaikuttavat asiat tulee huomioida.

3.1 Täyssähkölinja-auton ja range extenderillä varustetun sähkölinja-auton energiankulutus

Akusta kulutettu energia jakautuu sähkölinja-autoissa vierimisvastuksen, taajuusmuuntajan, sähkömoottorin ja voimansiirron, mekaanisten jarrujen, ilmanvastuksen, ilmastoinnin ja lämmityksen, apulaitteiden ja akun höytysuhteen välille. Sähkölinja-autojen kulutusta arvioitaessa tulee esimerkiksi mallinnuksen lisäksi ottaa huomioon bussin operaattorin, kuljetusviranomaisten, paikallisen sähkölaitoksen ja bussireitin vaikutukset. (Pihlatie, Kukkonen, Halmeaho, Karvonen & Nylund 2014, 3.) Sähkölinja-autot kuluttavat keskimäärin noin 1 kWh/km sähköenergiaa. Sen kulutus vaihtelee kalustovalmistajasta, kuljettajan ajotavasta, sääolosuhteista ja liikennöinnistä riippuen. (Lehtinen & Kanerva 2017, 26.)

Täyssähkölinja-auton energiankulutusta koskevia tutkimuksia, jotka sisältävät mallinnusta ja ajodatan keräystä on tehty monia ja niistä voidaan nähdä keskimääräinen täyssähkölinja-auton kulutus. Taulukkoon 1 on kerätty kolmen eri tutkimuksen energiankulutustulokset. Esimerkiksi Chernykhin tutkimuksessa Tampereen kaupungissa operoivan neljän täyssähköbussin kulutus vaihteli vuodenaikasta riippuen, 14,34–16,52 kW/h välillä ja kilometriä kohden energiankulutus vaihteli 0,97–1,8 kW/km välillä. Sähkölinja-autot olivat käytössä 16 tuntia normaalina työpäivänä. Suurimmat kulutuslukemat tulivat talvella, mikä johtuu akuston huonommasta suorituskyvystä ja lisääntyneestä lämmityslaitteiston viemästä energiasta talviolosuhteissa (Chernykh 2019, 24–25.)

TAULUKKO 1. Täyssähkölinja-autojen energian kulutuksen määrät eri tutkimuksissa.

Tutkimus	Keskimääräinen energian kulutus kilometriä kohden (kW/km)	Energian kulutus tuntia kohden (kW/h)	Tapaus
Chernykh 2019	0,97 – 1,8	14,34 – 16,52	Neljän Tampereen sähkölinja-auton kulutusluokat, neljältä vuodelta.
Gallet, Massier & Hamacher 2018	1,62 – 2,11		Sähkölinja-autot, jotka operoivat Macaossa.
Gao, Lin, La-Clair, Liu, Li, Birky & Ward 2017	1,24 – 2,48		Standardisoitu linja-auton ajosyklilaskelma, Knoxville area transit dataa hyväksikäyttäen.

Tyypillisesti sähkölinja-auton kulutus ilmaistaan energiankulutuksella kilometriä kohden eli kilowattia per kilometri.

3.2 Sähkölinja-auton energiankulutuksen arviointi ja siihen vaikuttavat asiat

Energiankulutusmallit voidaan yleensä luokitella kahteen eri kategoriaan, joita ovat polttoaine- ja ajoneuvon aktiivisuuden perustuvat lähestymistavat. Polttoaine tyyppinen lähestymistapa arvioi energian kulutusta polttoaine taloudellisuus tietojen avulla ja se ilmaistaan keskimääräisenä energiankulutuksena matkaysikköä kohti. Polttoaine tyyppisellä lähestymistavalla saa karkean keskimääräisen arvion energiankulutuksesta, mutta siinä jätetään huomioimatta linja-auton operointiominaisuudet, tien korkeus ja ajoneuvon painon vaihtelut johtuen matkustajamäärän muutoksista. Näiden asioiden takia energiankulutuksen arviointi ei välttämättä sovellu kaikkiin linja-autoihin vaihtelevissa liikenneolosuhteissa. (Ma, Miao, Wu & Liu 2020, 2.)

Ajoneuvon toimintaan perustuvat polttoaineen kulutusmallit on kehitetty kiertämään polttoaine tyyppisen lähestymistavan huonot puolet eli operointiominaisuudet, tienkorkeuden ja painon vaihtelut. Ajo-

neuvon toimintaan perustuvat mallit tukeutuvat yksityiskohtaisiin parametreihin, kuten kiihtyvyys ja hidastuvuusarvoihin, ajoneuvon hetkelliseen nopeuteen, matkustajamäärään ja tien laatuun, joiden avulla voidaan arvioida linja-auton energiankulutusta tarkasti. Ajoneuvon toimintaan perustuvalla mallilla voidaan mahdollisesti kuvata tilapäisiä energian muutoksia kulkureittien ja matkustajamäärän tuoman kuormituksen perusteella, sen sijaan että arvioitaisiin keskimääräistä energiantarvetta yhdellä arvolla. (Mäyly, 2020, 1.)

Sähkölinja-auton energiankulutukseen vaikuttavat erilaiset longitudinaaliset voimat, niihin liittyvillä yhtälöillä voidaan määrittää sähkölinja-auton energiankulutusta, joka johtuu voimansiirron energiankulutuksesta. Ajoneuvonpitkittäissuuntaista dynamiikka voidaan kuvata yhtälöllä:

$$m_{eff} a_x = F_X - F_{r,f} - F_{r,r} - F_{aero} - \sin(\alpha) F_g \quad (1)$$

yhtälössä m_{eff} on ajoneuvon tehollinen massa ja a_x on longitudinaalinen kiihtyvyys. Tehollinen massa pitää sisällään renkaitten pyörimisinertian ja voimansiirron komponentit, jotka kokevat pyörimisen kiihtyvyyttä kun a_x ei ole nolla.

Linja-autoilla tehollinen massa on tyypillisesti 102 % ajoneuvon kokonaismassasta. Yhtälön 1 oikealla puolella olevat arvot kuvaavat moninaisia voimia, jotka toimivat pitkittäissuuntaisesti ajoneuvoon ja pitävät sisällään ajovoiman F_X , yhdistetty vierintävastusvoiman F_r , joka pitää sisällään $F_{r,f}$ ja $F_{r,r}$ summattuna, aerodynaamisen vetovoiman F_{aero} ja longitudinaalisen painovoima komponentin F_g . Ajoneuvoa liikuttava voima voidaan ilmaista yhtälöllä 2:

$$F_x = \eta \frac{P_{DC}}{v} \quad (2)$$

jossa η on voimansiirron kokonaistehokkuus akun ja renkaitten välillä, P_{DC} on voimansiirron ottama sähkövoima DC otettuna akusta ja v on ajoneuvon kiihtyvyys. Pyörimisvastus voidaan mallintaa yhtälöllä 3:

$$F_r = f_r F_g \cos(\alpha) \quad (3)$$

jossa f_r on pyörimisvastus koeffisientti, α on tien kaltevuus ja F_g on gravitaatiovoima yhtälön 4 mukaisesti:

$$F_g = m g \quad (4)$$

jossa g painovoima kiihtyvyys ja m on ajoneuvon massa. Aerodynaaminen vetovoima voidaan kuvata yhtälöllä 5 seuraavasti:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho C_d A_f V^2 \quad (5)$$

Yhtälössä 5 ρ on ilman tiheys, C_d on aerodynaamisen vetovoiman kerroin ja A_f on ajoneuvon etuosa. Yllä olevien yhtälöiden järjestämisen ja korvauksen jälkeen saadaan yhtälö 6:

$$P_{DC} = \frac{V}{\eta} (m_{eff} a_x + f_r m g \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho C_d A_f V^2 + \sin(\alpha) m g) \quad (6)$$

yhtälöllä 6 voidaan ilmaista voimansiirron akusta ottama voima, kiihtyvyyden V ja pitkittäissuuntaisen kiihtyvyyden, joukon ajoneuvon parametreja ja joukon ympäristöön liittyvien parametrien funktiona. Oletetaan että ajoneuvon nopeusprofiili ajan funktiona tunnetaan. Kun energiankulutusta määritetään yhtälöllä, haaste tulee malliparametrien tarkassa määrittämisessä. (Beckers, Besselink, Frints & Nijmeijer 2019, 3–4.)

Sähkölinja-auton energiankulutukseen liittyvinä tekijöinä, joilla on suuri vaihtelevuus kaupunkilinja-autojen energiankulutuksen arvioinnissa ovat (Beckers ym. 2019, 6)

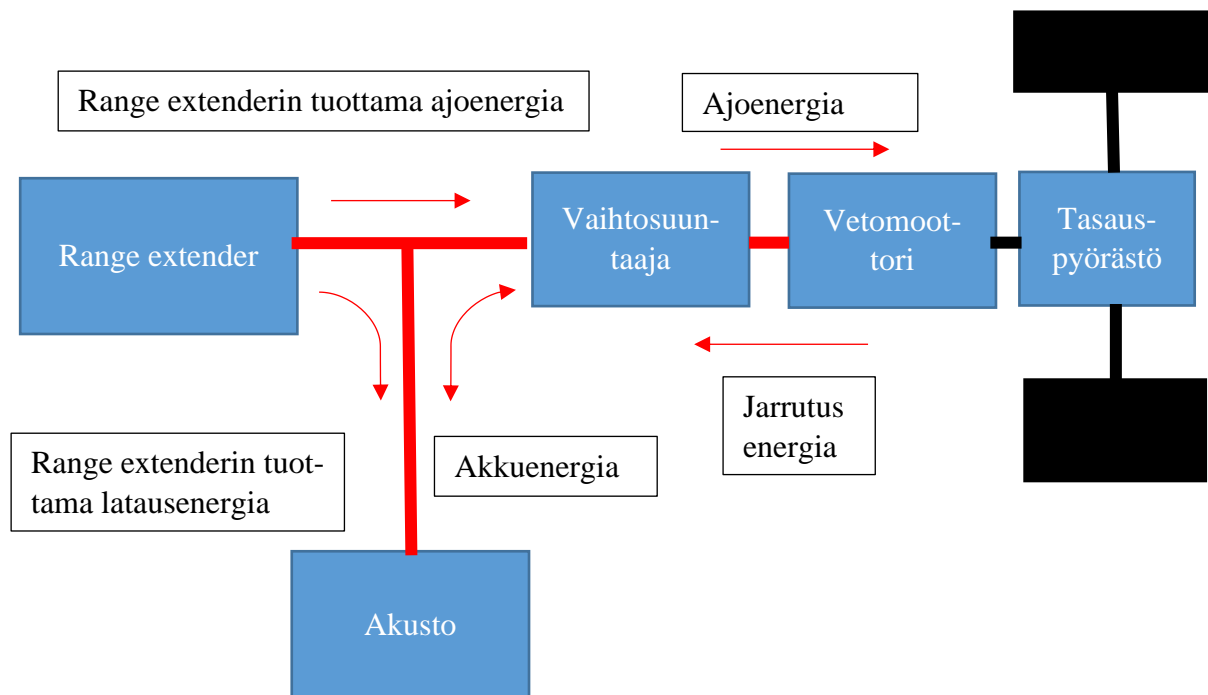
- Ajoneuvon kokonaismassa, johon sisältyvät matkustajat

- Voimansiirron tehokkuus, joka tuo yhteenvetona voimahäviöt akun ja renkaiden välillä
- Vierintävastus kerroin, joka pitää sisällään tien ja sään tuomat vaikutukset
- Tien kaltevuus

Sähkölinja-auton energiankulutusta arvioitaessa voimansiirron ottaman energian lisäksi tulee ottaa huomioon myös apulaitteiden viemä sähköenergia, johon kuuluu valaistuksen viemä energia, ohjaustehostimen viemä energia, ohjausjärjestelmän viemä energia ja lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmän energiankulutus. Lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmän kuluttama energia voi vähentää ajoneuvon kokonaisajoaluetta jopa noin 40–60 % tyypillisissä vakioituissa ajo-olosuhteissa. (Suh, Lee, Kim, Oh & Won 2014, 1.) Esimerkiksi Suomen olosuhteissa lämpötilan muutokset ovat suuria vuodenaikojen välillä, joten lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmän energiatehokkuudella on merkitystä.

Sähkökulutuksen nousu sähkölinja-autoissa talviolosuhteissa johtuu myös vierintävastuksen ja ilmanvastuksen kasvusta, myös jäinen tie heikentää jarrutuksesta saadun energian talteenottoa (Lehtinen & Kanerva 2017, 26). Regeneroiva jarrutusjärjestelmä on keskeisessä asemassa sähköajoneuvojen matkan pidennyksessä. Regeneroiva jarrutusjärjestelmä ottaa hukkaan menevästä jarrutusenergiasta kineettistä energiaa, jota voidaan käyttää hyväksi. Energiämäärä, jonka se pystyy ottamaan, on riippuvainen sen toteuttamasta strategiasta. Sähköajoneuvoissa sähkömoottoria voidaan käyttää generaattorina, siten että mekaanista energiaa muunnetaan sähköenergiaksi. Regeneroivan jarrutusjärjestelmän ohjauksen tulee jakaa vääntömomentti oikein mekaanisen ja sähköisen jarrutusjärjestelmän välille. (Maia, Mendes, Araújo, Silva & Nunes 2020, 1–3.)

Range extenderillä varustettu sähkölinja-auton sähköenergian kulutukseen vaikuttavat asiat ovat käytännössä samat kuin täyssähkölinja-auton. Range extenderillä varustettu sähkölinja-auto ottaa tarvittavan energian akustosta ja range extender laitteesta. Kaaviosta 1 voidaan nähdä eri energiavirtaukset mitä range extenderillä varustetussa sähkölinja-autossa eri tilanteissa voi esimerkiksi olla. Sähköenergia menee akulta suoraan vetomoottorille, kun akusta saatu sähköteho ei enää itsessään riitä kattamaan matkan jatkamista range extender alkaa tuottamaan sähköenergiaa. Kun akun varaus on alhainen range extender lataa akkua ja samalla tuottaa sähköenergiaa vetomoottorille. Jarruttaessa regeneroiva jarrutusjärjestelmä hyödyntää jarrutuksesta saadun energian akkuihin.



KAAVIO 5. Range extenderillä varustetun sähkölinja-auton energiavirtaukset. (Mukaiillen Wu ym. 2014, 3) (Sähköliitännät: punaisella ja mekaaniset liitännät: mustalla)

4 RANGE EXTENDER

Range extenderillä tarkoitetaan vaihtoehtoista energianlähdettä, joka on asennettu olemassa olevaan sähköajoneuvoon lisäämään ajoneuvon toimintamatkaa. Range extendereiden eri sovellukset voidaan jakaa niiden energiantuotantotyyppin mukaan sähkökemiallisiin ja termodynaamisiin lähteisiin. (Ambaripeta 2015, 12). Range extenderien tapauksessa esimerkiksi polttomoottorit ja kaasuturbiinit ovat termodynaamisia energianlähteitä ja polttokennot ovat sähkökemiallisia energianlähteitä. Range extender käytännössä toimittaa vain keskimääräisen energiantarpeen, joten se voi olla pienikokoisempi energianlähde kuin tavanomaisten ajoneuvojen energianlähde. Tämän takia range extender voi olla kompakti, kevyt, hiljainen ja vähän värähtelyä tuottava laite. (Wahono, Santoso, Nur & Amin 2015, 2.)

Range extenderien tapauksessa ajoneuvon huipputehontarve voidaan kattaa akustolla, joten range extender on ylimääräinen virtalähde, jolla on vähemmän tehoa (Walters, Kuhlmann & Ogrzewalla 2015, 1). Range extenderin käyttö sähkölinja-autossa mahdollistaa range extenderin ja akuston optimoinnin, täten range extender -järjestelmän energiantuottajan hyötysuhdetta voidaan parantaa. Akuston optimoinnin mahdollisuuden ansiosta range extenderin käyttö sähkölinja-autossa voi lisätä akun elinikää, koska akku voi toimia hyvissä toimintaolosuhteissa ilman ylilatausta tai liikaa akun purkautumista. (Wu 2014, 2.)

Range extenderin eri sovellukset eroavat toisistaan suuresti rakenteeltaan ja käyttövoimiltaan. Range extenderit voidaan käytännössä jakaa neljään ryhmään polttomoottoreihin, mikrokaasuturbiineihin, polttokennojärjestelmiin ja aurinkokennojärjestelmiin. Käsittelen opinnäytetyössä neljä range extender - tyyppiä yleisesti toiminnaltaan ja ominaisuuksiltaan.

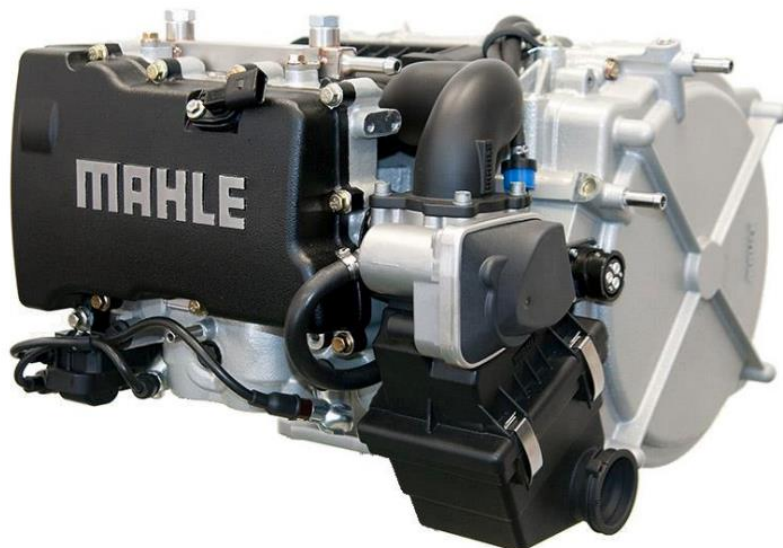
4.1 Polttomoottorit (ICE)

Yleisesti puhuttaessa range extenderillä varustetusta sähköajoneuvosta, range extenderillä yleensä tarkoitetaan polttomoottoria, joka on yhdistetty generaattoriin. Erilaisia polttomoottoriratkaisuja on useita. Range extenderillä varustettujen sähkölinja-autojen tapauksessa yleisimmin polttomoottorina toimii diesel- tai bensiinimoottori. Range extender voi olla esimerkiksi 4-tahtiottomoottori tai wankelmoottori, jotka ovat kiinnostavimmat vaihtoehdot polttomoottori range extenderien osalta (Virsik & Heron 2013, 5). Polttomoottorilla toimivat range extenderit koostuvat kokonaisuudessaan neljästä pääkomponentista:

- Polttomoottorista
- Sähkögeneraattorista
- Range extenderin ohjausyksiköstä
- Virtamuuntajasta

Range extenderissä polttomoottori pyörittää generaattoria, joka muuttaa mekaanisen energian sähköenergiaksi. Tämä sähköenergia käytetään lataamaan akkua. Kun mitoitetaan polttomoottoria ja generaattoria tulee ottaa huomioon, ajoneuvon tekniset tiedot ja tietty ajosykli. (Ambaripeta 2015, 24.) Polttomoottorien hyötysuhteet vaihtelevat tyypillisesti 19–31 % välillä (Virsik & Heron 2013, 6).

Esimerkiksi yritys Mahle Powertrain Ltd. on kehittänyt bensiinikäyttöisen 4-tahti polttomoottori range extender -laitteiston kuva 1, joka on kaksisylinterinen 900cc tilavuudeltaan ja teholtaan 30–50 kW, riippuen onko laitteistossa ahdinta. Range extender painaa noin 70 kg generaattorin kanssa. Range extender on suunniteltu toimivan sähköajoneuvon tehontarpeen mukaan ylläpitämään akun varausastetta, seuraamaan ajoneuvon moottorin nopeutta ja minimoimaan äänentuotto ja polttoaineenkulutus. Range extenderin on mahdollista toimia GPS:ään perustuvaan energianhallintastrategialla, jos ajoreitti on tiedossa range extenderin moottorin toiminta voitiin optimoida sille matkalle. (Mottershead)



KUVA 1. Mahle Powertrain Ltd. Polttomoottori range extender. (Mottershead)

4.2 Polttokennot (FC)

Nykyään range extenderien tapauksessa erilaiset polttokennolaitteistot ovat yleistyneet ja tutkimuksia niihin liittyen tehdään laajasti. Polttokennolaitteistoja suositaan esimerkiksi hyvän hyötysuhteen ja päästöttömyyden takia verrattaessa polttomoottoriin.

Polttokennot muuntavat kemiallisen energian sähköenergiaksi. Erilaiset polttokennoteknologiat poikkeavat toisistaan käytettävien elektrolyyttien ja käytettävien polttoaineiden osalta. Polttokennoissa eniten käytetty polttoaine on vety. (Virsik & Heron 2013, 4.) Polttokennojärjestelmissä kennot käyttävät vetyä ja happea erillään olevissa elektrodeissa, anodissa ja katodissa, tuottaen sähköä ja vettä (Guaitolini, Yahyaoui, Fardin, Encarnaçao & Tadeo 2018, 1). Vetyä käytetään polttokennoilla toimivissa sähköajoneuvoissa sen korkean energiasisällön ja ympäristöystävällisyyden takia. Polttokennoilla on monia hyviä puolia käytettäväksi sähköajoneuvoissa, kuten hyvä hyötysuhde tuottaessa sähköenergiaa polttoaineesta, meluton toiminta, nopea polttoaineen tankkaus, vähäiset tai olemattomat päästöt, kyky tuottaa korkeatiheyksistä sähkövirtaa ja hyvä kestävyys. (Un-Noor, Padmanaban, Mihet-Popa, Nurunnabi Mollah & Hossain 2017, 26.)

Erilaisia polttokennojärjestelmiä on useita, kuten protoninvaihtomembraanipolttokennot (PMFC), alkalipolttokennot (AFC), fosforihappopolttokennot (PAFC), sulakarbonaattipolttokennot (MCFC), kiinteäoksidipolttokennot (SOFC) ja mikrobiset polttokennot (MFC). Polttokennoilla keskimääräiset hyötysuhteet vaihtelevat 42–55 % välillä. (Guaitolini ym. 2018, 2–5.)

Protoninvaihtomembraanipolttokennot ovat yleisin polttokennotyyppi niiden korkean energiatihyden, alhaisen toimintalämpötilan ja pienemmän korroosion takia ajoneuvosovelluksissa verrattuna muihin polttokennotyyppeihin. (İnci, Büyüç, Hakan & İlbec 2020, 6.) Range extenderien tapauksessa, korkean lämpötilan protoninvaihtomembraanipolttokennot olisivat hyvä vaihtoehto range extenderiksi, niiden epäpuhtauksien kestävyuden ja korkean toimintalämpötilan takia, joka mahdollistaa sopivamman jäädytyksen ja järjestelmä suunnittelun. (Jensen, Schaltz, Member, IEEE, Koustrup, Andreasen & Kær 2013, 5.) Polttokennojärjestelmän hyvinä puolina voidaan pitää hyvää hyötysuhdetta ja päästöttömyyttä, kun taas huonoina puolina voidaan pitää polttokennojen korkeaa hintaa (İnci ym. 2020, 3).

Yritys nimeltä HyMove valmistaa vedyllä toimivia polttokenno range extender -järjestelmiä raskaaseen kalustoon kuten sähkölinja-autoihin. Heidän polttokennojärjestelmänsä voivat lisätä ajomatkaa 100–500

km kaupunkisähkölinja-autossa. He tarjoavat kolmea eri tehoista polttokennojärjestelmää, kuten kuvassa 2 oleva 30 kW järjestelmä, 45 kW järjestelmä ja 60 kW järjestelmä. (HyMove 2017.)



KUVA 2. HyMove 30 kW moduuli (HyMove 2017)

4.3 Mikrokaasuturbiinit (MGT)

Mikrokaasuturbiinit käyttävät fossiilisista polttoaineista saatua kemiallista energiaa lisäämään fluidin sisäistä energiaa palotilassa. Turbiini muuttaa lämmön mekaaniseksi energiaksi, jota käytetään ajamaan kompressoria ja generaattoria. (Bohn 2005, 7.)

Pienet kaasuturbiinit ovat pieniä polttoturbiineja, jotka ovat dieselmoottoriin verrattuna vain kolmanneksen kooltaan, joilla teho vaihtelee välillä 25–500 kW. Pieni kaasuturbiini voi toimia monilla erilaisilla polttoaineilla, kuten nestekaasulla, vedyllä, kerosiinilla, alkoholilla ja myös esimerkiksi dieselillä. (HILTech Developments Limited 2000, 1.) Mikrokaasuturbiineilla (MGT) on potentiaalia olla vaihtoehtoinen voimantuottaja hybridisähköajoneuvojen sovelluksissa. MGT puhdas palaminen teoreettisesti edistää vähäisiä ajoneuvopäästöjä, kun se toimii range extenderinä verrattaessa polttomoottoriin. Pienen kaasuturbiinin toimintanopeus on tyypillisesti 100 000 kierrosta minuutissa asti. Pienissä kaasuturbiineissa käytetään ilmalaakereita ja se tarvitsee ilmansuodatuslaitteiston ja täten puhtaan ilman syötön, koska käsittelemätön ilma voi jättää kerrostumia kompressoriin ja täten vaikuttaa ilmavirran profiiliin ja näin heikentää pienen kaasuturbiinin tehokkuutta. (Shah, McGordon, Amor-Segan & Jennings 2013, 1.)

Pieni kaasuturbiini koostuu seuraavista komponenteista:

- Generaattorista
- Kompressorista
- Ilmalaakereista
- Turbiinista
- Palotilasta
- Rekuperaattorista

Suurin osa MGT-malleista on varustettu rekuperaattorijärjestelmällä, joka lisää pienen kaasuturbiinin termistä hyötysuhdetta. Pakokaasuista saatu lämpö siirretään paineilmaan lämmönvaihdinkanavien avulla. Yksi kriteeri, joka lämmönvaihdinta suunniteltaessa tulee ottaa huomioon, on minimoida lämmönvaihtimen kanavien tuoma painehäviö. Suuri painehäviö voi vähentää termistä hyötysuhdetta ja täten MGT suorituskykyä. (Shah ym. 2013, 1.) MGT hyötysuhteet vaihtelevat tyypillisesti 25–35 % välillä (Virsik & Heron 2013, 5). MGT:n hyvinä ominaisuuksina voidaan pitää vähäisiä päästöjä verrattuna polttomoottoriin ja soveltuvuutta eri polttoaineille.

Esimerkiksi yritys nimeltä Capstone tarjoaa C30 mikroturbiini range extenderiä. Sillä on 30 kW tehontuotto ja sähköinen hyötysuhde on 26 %. Se on soveltuva eri polttoaineille kuten maakaasulle, dieselille ja biodieselille. C30 mikro turbiinin paino on 23 kg. Kuvasta 3 voidaan nähdä mikrokaasuturbiinin rakenne (Optimal group Australia)



KUVA 3. Capstone range extender. (Optimal group Australia)

4.4 Aurinkokennot

Aurinkokennoja voidaan käyttää täydentämään energiavarausta. Aurinkokennoilla voidaan tuottaa energiaa tien päällä aurinkokennopaneeleilla, joten niitä voidaan käyttää pidentämään sähköajoneuvon matkaa. Sähkölinja-autoissa on laajasti tilaa, johon voidaan aurinkokenno moduuleja asentaa ja kerätä aurinkoenergiaa. Aurinkokennoilla voidaan tuottaa suuri osa alhaisissa nopeuksissa ja joutokäynnillä tarvittavasta vetovoiman kuormasta, kun verrataan esimerkiksi ajoon moottoritiellä. (Mallon, Assadian & Fu 2017, 2)

Tutkimuksessa, jossa sähkölinja-auton katolle ja kylkiin lisättiin aurinkokenno -laitteistot (Mallon ym. 2017), sähkölinja-auton toimintamatka lisääntyi keskimääräisesti 8,9 km ja parhaimmillaan 13,4 km 100 km kohden. Aurinkokennojen aurinkoenergian päivittäinen keräämisen määrä vaihteli suuresti vuodenajasta ja sääolosuhteista. Energiantuoton määrä vaihteli vuodessa 3–33,4 kW/h välillä. (Mallon ym. 2017, 19) Range extenderin tapauksessa aurinkokennojärjestelmän tehontuoton tulisi pystyä ylläpitämään sähköajoneuvon akun varaustasoa, kun varausasteen rajoissa akusta käytetty energia on käytetty. Vuodenajasta ja sääolosuhteista riippuvaisuus sähköenergian tuotannossa on suuri, joten range extender käytössä aurinkokennojen käyttö energiantuotantoon ei välttämättä ole riittävä, koska aurinkokennojärjestelmä ei ole joka olosuhteissa kykenevä ylläpitämään akun varaustasoa. Kuitenkin aurinkokennoilla on mahdollista pidentää sähköajoneuvon ajomatkaa. Hyvänä ominaisuutena voidaan pitää esimerkiksi ilmaisen aurinkoenergian hyödyntämistä. Huonoina puolina aurinkokennojärjestelmillä voidaan pitää sään ja vuodenaajan olosuhteiden suurta vaikutus sähköntuotantoon.

Esimerkiksi yritys nimeltä Trilar toimittaa aurinkokennomattoja kuva 4, joita voidaan asentaa sähkölinja-autoon. Aurinkopaneelit asennetaan sähkölinja-auton katolle. Järjestelmän paino on 34 kg. (Trilar, 2.)



KUVA 4. Trailer aurinkopaneelit linja-autossa. (Trailar, 2)

4.5 Range extenderin mitoitus sähkölinja-autoon

Range extenderin mitoituksessa tulee ottaa huomioon asioita kuten ajoneuvon määrittely, jossa etsitään ajoneuvon vaikuttavat parametrit, jotka vaikuttavat ilmanvastukseen, kuten vierimisvastuskerroin, massa, aerodynaamisen vastuksen kerroin ja ajoneuvon otsapinta-ala. Myös voimansiirron kaikkien komponenttien tehokkuus tulee tietää. Toisena asiana tien kunnon määrittäminen ajojakson ja tien kaltevuuden osalta missä range extenderillä varustettu ajoneuvo tulee operoimaan. Kolmantena asiana määritellään akun varaustason vaatimukset, jotka range extenderin tulee suorittaa. Ajoneuvon liikkumiseen tarvittavan keskimääräisen energian laskemisen jälkeen voidaan määrittää range extenderin tarvittava tehontuotto. (Reksowardojo, Putra, Santoso, Purwadi & Nurprasetio 2018, 1–3.) Käytännössä sähkölinja-auton keskimääräinen energiantarve on se minkä range extenderin tulee vähintään tuottaa, jotta sähkölinja-auton matka voi jatkua, akun varausasteen rajoissa.

Range extender -laitteistojen tehontuotto vaihtelee eri käyttötarkoituksen ja järjestelmän mukaan. Taulukosta 2 voidaan nähdä eri laitetoimittajien range extender -laitteistojen tehontuotto. Taulukossa on ilmoitettu range extender -laitteiston toimittaja, range extenderin tyyppi ja tehontuotto kilowatteina. Taulukosta voidaan nähdä, että range extender -laitteistojen tehontuotot vaihtelevat noin 25–65 kW.

TAULUKKO 2. Range extender-laitteistoja toimittajilta

Toimittaja	Range extender tyyppi	Tehon tuotto (kW)
HyMove (Hymove 2017)	Polttokenno	30 kW, 45 kW ja 60 kW
Symbio (Symbio)	Polttokenno	45 kW
Loop Energy (Loop energy)	Polttokenno	30 kW, 50 kW ja 60 kW
Peec-Power (Peec-Power 2017)	Polttomoottori	25 kW
Mahle (Mottershead)	Polttomoottori	30 kW
Capstone (Optimal group Australia)	Mikroturbiini	C30,30 kW ja C65, 65 kW
Engiro (Engiro 2021)	Polttomoottori	RE 40, 40 kW

4.6 Esimerkkitapaus range extender -laitteistosta sähkölinja-autossa

Giantleap-projektissa mukana olleet toimijat suunnittelivat ja valmistivat polttokenno range extender -järjestelmän sähkölinja-autolle. Range extender -järjestelmä piti sisällään tarkoitukseen suunnitellun trailerin, jonka voi liittää ja vetää sähkölinja-autolla. Riippuen tehotarpeesta, polttokennojärjestelmä tuottaa tarvittavan käyttövoiman ajoneuville ja samalla ladataan ajoneuvon akkuja. (Eckert 2019, 2.)

Giantleap-projektin range extender -laitteisto koostuu trailerista, joka toimii mukana vedettävänä lataus-asemana. Kuvan 5 Traileri koostuu seuraavista osista (Bouwmann 2019, 8.):

- Polttokennoista, teholtaan 80kW
- Polttokennoa ympäröivästä järjestelmästä ja DC/DC tasasuuntaajasta
- Jäähdytysjärjestelmästä
- Vetysäiliöstä, johon mahtuu 30 kg vetyä

Giantleap-projektin raportissa ilmoitettiin polttoainenkulutukseksi noin 3,9 kg vetyä tunnissa, kun energiaa tuotettiin tasaisesti 60 kW. Kulutuslukema saatiin tasaisella maalla ja ilman matkustajia. (Fischer 2019, 7).



KUVA 5. Giantleap traileri ja sähkölinja-auto (Zenith 2020)

5 RANGE EXTENDERILLÄ VARUSTETUN SÄHKÖAJONEUVON ENERGIANHALLINTASTRATEGIAT

Luvussa 5 käydään läpi erilaisia energianhallintastrategioita ja niiden toimintaa range extenderillä varustetun sähköajoneuvon pohjalta. Luvussa 5.4 käsittelen erilaisia tutkimusraportteja aiheesta, joiden perusteella tehdään johtopäätöksiä. Kirjallisuudessa energianhallintastrategiosta käytetään nimityksiä kuten energy management strategy eli energianhallintastrategia ja control strategy eli kontrollointistrategiat. Tässä työssä asiasta puhutaan energianhallintastrategiaina.

Energianhallintastrategioiden tarkoituksena ladattavissa hybridisähköajoneuvoissa on tyydyttää energiantarve ja samalla ylläpitää ajoneuvon optimaalista suorituskykyä, jotta ajoneuvo voi toimia halutulla tavalla ja käyttää energianlähteitä tehokkaasti. Energianhallintastrategiat koordinoivat range extenderin ja akuston sähköenergian toimitusta range extenderillä varustetun sähköajoneuvon tapauksessa.

Range extenderillä varustettujen sähkölinja-autoissa akkujen ollessa täyssähkölinja-autoja pienemmät, energianhallintastrategian vallinnalla range extenderille on suuri merkitys ajomatkan pidentämiseen.

Energianhallintastrategialla on kriittinen osa ajomatkan pidennyksessä ja polttoaineen kulutuksen pienentämisessä (Li, Jin & Xiong 2017, 1). Range extenderillä varustetun hybridiajoneuvon monien toimintatapojen ja monimutkaisen voimantarpeen takia tarvitaan energianhallintastrategia, jotta hybridijärjestelmä voi toimia tehokkaasti ja luotettavasti (Chen, Xiong, Wang & Jiao 2015, 2). Range extender voi toimia erilaisien strategioiden avulla riippuen, miten sen halutaan tuottavan energiaa sähköajoneuville. Riippuen range extenderilla varustetun ajoneuvon laitteiston kokoonpanosta. Range extenderillä varustetun ajoneuvon energianhallintaan voi soveltaa käytännössä samoja energianhallintastrategioita kuin sarjakokoonpanolla toimiville ladattaville hybridisähköajoneuvoille, koska ne vastaavat kokoonpanoltaan toisiaan.

Range extenderin toimiessa itsenäisesti ajotilanteesta, sen energiantuoton ei tarvitse vastata vaadittuun vetovoimaan. Tämän takia range extenderin toimintastrategia voidaan optimoida. Toimintastrategian eli tässä tapauksessa energianhallintastrategian optimointi voidaan määritellä parametreilla kuten, akun varausaste (SOC), voimansiirron ja apulaitteiden energiantarve, moottorin ja akuston lämpötila ja järjestelmän kokonaishyötysuhde, johon kuuluu moottori, generaattori ja invertteri. (Rogge ym. 2013, 2.) Eri-laiset parametrit riippuvat paljolti käytetyn range extenderin tyypistä ja sen järjestelmästä.

Energianhallintastrategioita on käsitelty kirjallisuudessa laajasti hybridisähköajoneuvoille. Opinnäytetyön tarkoituksena on etsiä range extenderillä varustetulle kaupunkisähkölinja-autolle sovellettavia energianhallintastrategioita, tutkia mitä energianhallintastrategioita on käytetty ja sitä kautta käsitellä range extenderin toimintaa sähkölinja-autossa. Hybridisähköajoneuvojen energianhallintastrategiat voidaan karkeasti jakaa kahteen merkittävään kategoriaan, sääntöihin perustuviin energianhallintastrategioihin ja optimointiin perustuviin energianhallintastrategioihin (He 2020, 1). On kuitenkin olemassa vielä kolmas kategoria, joka on oppimiseen perustuvat energianhallintastrategiat. (İnci ym. 2020, 12.)

5.1 Sääntöihin perustuvat energianhallintastrategiat

Sääntöihin perustuvassa energianhallinnassa valitaan ennalta määritetyt säännöt ilman aikaisempaa tietoa matkasta ja hallintapäätökset tehdään tämänhetkiseen ajoneuvon tilaan ja energiantarpeen mukaan. Sääntöihin perustuvat strategiat ovat helposti toteutettavissa, mutta niiden toteutukset eivät ole välttämättä optimaalisia, koska niissä ei oteta huomioon tulevia liikenneolosuhteita. (Wu, Qi, Barth & Boriboonsomsin 2016, 10.)

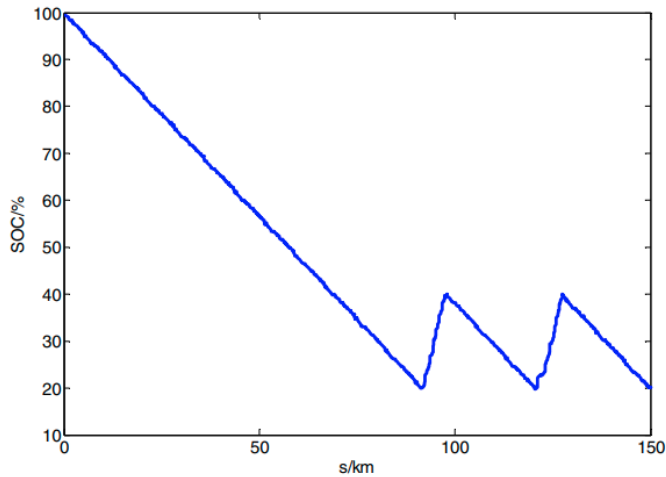
Sääntöihin perustuvassa energianhallintastrategiassa määrätään tiettyjä sääntöjä, joiden perusteella energianlähteet toimivat. Säännöissä on yleensä tietty logiikka, kuten määrätty kynnys ylitettäessä suoritetaan toimenpide. Sääntöihin perustuvan energianhallintastrategian suurimpia hyötyjä on yksinkertainen toteutus. (Hmidi, Ben Salem & El Amraoui 2019, 1.) Käytännössä valitaan komponentin, kuten esimerkiksi range extenderin tai vetomoottorin, toimintapiste käyttäen hyväksi sääntötaulukkoita tai vuokaavioita täyttämään ajajan tai muiden komponenttien, kuten akuston vaatimukset (Panday & Bansal 2014, 4). Sääntöihin perustuvia energianhallintastrategioista on erilaisia variaatioita riippuen käytetyistä parametreista ja mitä halutaan saavuttavaa. Range extenderin toiminta määräytyy valitun energianhallintastrategian mukaan. Sääntöihin perustuvat energianhallintastrategiat ovat reaaliaikaisesti käytettäviä energianhallintastrategioita. Sääntöihin perustuvat energianhallintastrategiat voidaan jakaa vielä kahteen eri kategoriaan:

- Deterministisiin sääntöihin perustuviin energianhallintastrategioihin kuten:
 - Charge Sustaining-Charge Depleting strategy eli (CD-CS) strategia
 - Thermostat control strategy on niin sanottu päälle/pois päältä strategia
 - Power follow strategy eli tehontarvetta seuraava strategia
 - Blended strategy (BL) eli yhdistelmä strategia

- Fuzzy rule-based eli sumeaan logiikkaan perustuvat energianhallintastrategiat, jotka voidaan jakaa vielä osiin kuten:
 - Optimized Fuzzy eli optimoiva sumeaan logiikkaan perustuva strategia
 - Adaptive Fuzzy eli sopeutuva sumeaan logiikkaan perustuva strategia
 - Predictive Fuzzy eli ennustava sumeaan logiikkaan perustuva strategia

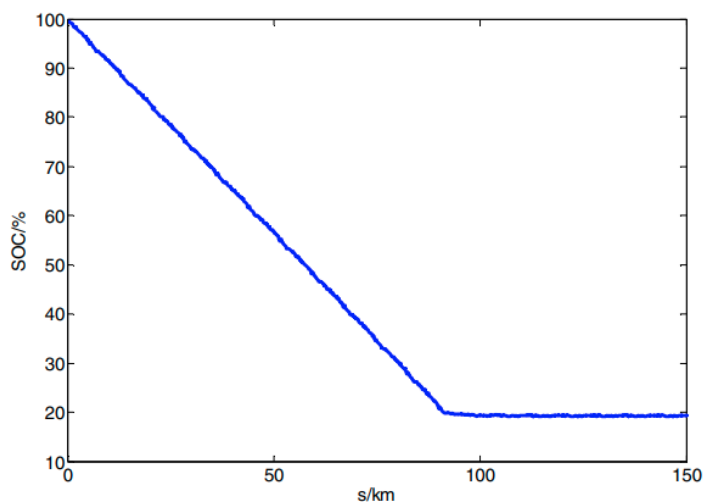
Akun varausasteen aleneminen-akun varausasteen ylläpito eli CD-CS strategia ja yhdistelmästrategia (BL) ovat yleisesti käytettyjä sääntöihin perustuvia energianhallintastrategioita (Chen ym. 2015, 2). Yleisesti CD-CS energianhallintastrategia voidaan jakaa kahteen vaiheeseen, varauksen vähenemiseen ja varauksen ylläpitoon. Range extenderin tapauksessa varauksen vähenemisen eli ”charge depleting”(CD) aikana range extender on pois päältä sähköajoneuvon käyttäessä vain akusta saatua sähköenergiaa ja varauksen ylläpidossa ”charge sustaining”(CS) range extender lataa akustoa. Tässä tapauksessa vain akussa olevaa sähköenergiaa käytetään ja range extender tuottaa sähköenergiaa vain akustolle. Varauksen ylläpito CS pitää sisällään erilaisia toimintastrategioita, jossa valitaan tiettyjä toimintapisteitä range extenderille riippuen, miten sähkötehoa halutaan range extenderin tuottavan, esimerkiksi halutaanko range extenderin toimivan esimerkiksi parhaalla hyötysuhteella minimoimaan polttoaineen kulutus vai vastaamaan tarvittavaan vetovoimaan. CD-CS energianhallintastrategiassa range extender voi toimia erilaisilla strategioilla, kuten esimerkiksi thermostat control ja power follow (Wu, Hu, Du & Ding 2013, 2).

Thermostat control-strategiassa, kun akun varausaste on pienempi kuin valittu raja-arvo, moottori käynnistetään, tässä tapauksessa range extender tuottamaan sähköenergiaa tasaisesti pienimmällä polttoainekulutuksella. Tuotettu sähköenergia jaetaan sähkömoottorin ja akuston kesken. Kun taas akun varausaste ylittää tietyn akun varausasteen raja-arvon range extender sammuttaa itsensä. Strategian päätavoite on pitää akun varausaste optimi vaihteluvälillä. (Xue, Zhang, Teng, Zhang, Feng & Lv 2020, 12–13.) Kuvasta 6 voidaan nähdä tyypillinen CD-CS strategian akun varausaste käyrä, kun range extender toimii thermostat control-strategialla.



KUVA 6. Akun varausaste käyrä CD-CS strategialla, range extenderin toimiessa thermostat control-strategialla (Wu ym. 2013, 3)

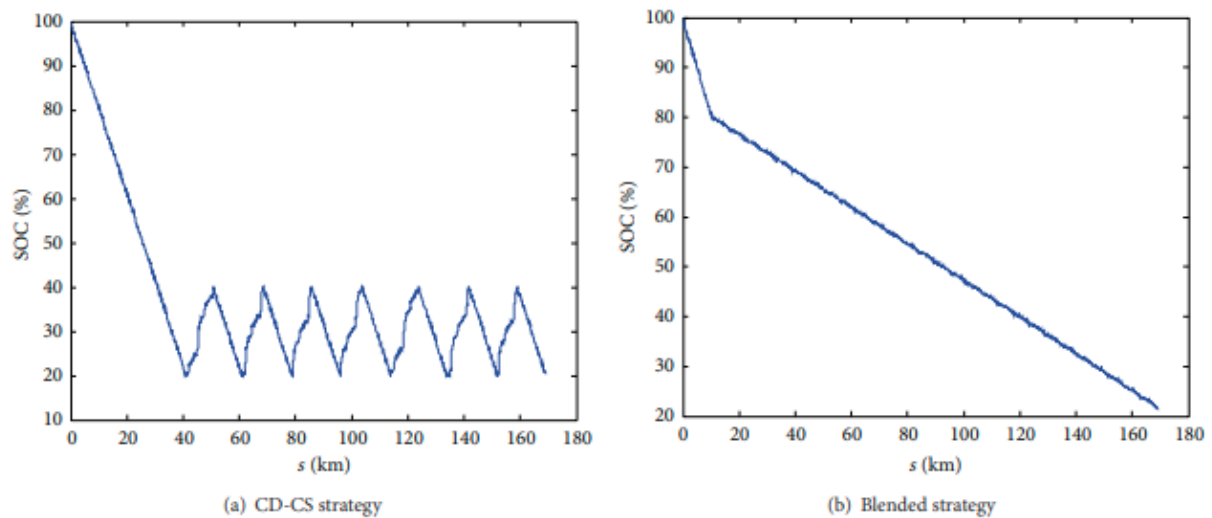
Power follow-strategiassa moottorin tai tässä tapauksessa range extenderin käynnistyminen ja sammuminen määritellään kahdella tekijällä, akun varausasteella ja ajoneuvon tehontarpeella. Range extenderillä varustetussa ajoneuvon tapauksessa strategiassa otetaan akun varausaste raja-arvoksi ja ajoneuvon teho vaatimuksen kytkentäehdoksi. Range extender on pois päältä, kun tehotarve on pieni ja akun varausaste on suuri. Range extender käynnistetään, kun tehontarve on suuri tai akun varausaste on matala. (Xue ym. 2020, 12–13.) Kuvasta 7 voidaan nähdä akun varausasteen käyrä CD-CS strategialla, kun range extender toimii power follow-strategialla.



KUVA 7. Akun varausaste käyrä CD-CS strategialla, range extenderin toimiessa power follow-strategialla. (Wu ym. 2013, 3)

Thermostat control- ja power follow-strategioista on yhdistetty strategia, jossa on molempien strategioiden hyödyt. Tehotarpeeseen ja akun varausasteeseen perustuen laaditaan hallintasäännöt, että range extender ja akusto voivat toimia korkealla hyötysuhdetasolla ja saavuttaa korkeimman kokonaishyötysuhteen. (Xue ym. 2020, 12–13.)

Yhdistelmästrategiassa (BL) tehontarve jaetaan akun ja moottorin kesken (Chen ym. 2015, 2), eli tässä tapauksessa range extenderin ja akun kesken. BL energianhallintastrategiassa range extender voi toimia esimerkiksi määrättyllä vakioteholla koko ajomatkan aikana, jolloin akun varausaste käyrä loivenee, tai range extender voi toimia kuormitusta seuraavana, jolloin range extenderin tehotuotto vaihtelee ajoneuvon kuormituksen mukaan.



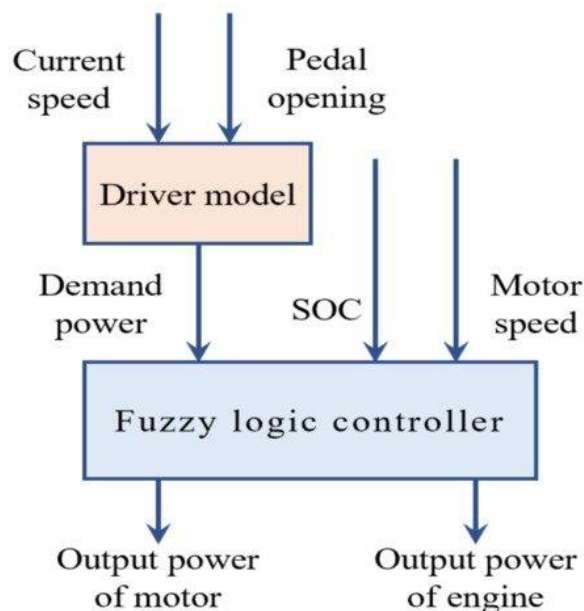
KUVA 8. Akun varausasteen käyrät kahdella eri energianhallintastrategialla. (Wu ym. 2014, 8)

Kuvasta 8 voidaan huomata tyypillisten CD-CS ja BL strategioiden erot akun varausastekäyrien eroista. Kuten edellä mainittiin, sääntöihin perustuvia energianhallintastrategioista on erilaisia variaatioita riippuen valituista säännöistä. On olemassa esimerkiksi nopeutta seuraava strategia. Nopeutta seuraavalla strategialla akun varaustasoa hallitaan erilaisten nopeusparametrien avulla, kuten esimerkiksi siten, että tietyn nopeuden ylitettäessä käynnistyy toinen hybridiajoneuvon moottori tuottamaan energiaa ja kun nopeus laskee tietyn rajan alle, moottori sammuttaa itsensä. Tämän tyyppisellä strategialla pyritään saamaan parempi moottorin hyötysuhde tietyssä pisteessä. (Hmidi ym. 2019, 2–3.) Tämänkin tyyppinen energianhallintastrategia voi toimia myös range extenderillä varustetulla ajoneuvolla, kun hybridisähköajoneuvo tarvitsee suuremmissa nopeuksissa enemmän sähköenergiaa, range extender alkaa tuottamaan sähköenergiaa tietyn nopeuden ylittyessä ja sammuu kun tietty nopeus alittuu.

Valittaessa deterministisiin sääntöihin perustuvan energianhallintastrategian tulee ottaa huomioon esimerkiksi seuraavia asioita. Energianhallintastrategiat eivät ole tarkkoja ja tarvitsevat ihmisen järjeistämistä (İnci ym. 2020, 12). Deterministisiin sääntöihin perustuvat energianhallintastrategiat tarvitsevat suunnittelukokemusta valittuihin sääntöihin ja rajoihin, ne eivät voi sopeutua monimutkaisiin ja vaihteleviin olosuhteisiin (Xue ym. 2020, 18). Sääntöihin perustuvassa energianhallintastrategiassa annetut säännöt pätevät vain yhteen ajosykliin, joten ne pitää muuttaa ajosyklin vaihtuessa, jos vaihtoa ei suorita polttoaine ekonomia huononee (Yang, Zhang, Tian & Li 2020, 1).

Fuzzy logic eli sumea logiikka on ei-lineaarinen kontrollointimetodi, joka perustuu sumeaan järjeistämiseen, jolla pystytään yksinkertaistamaan monimutkaiset hallintaongelmat ei-lineaarisista ajallisesti muuttuvista järjestelmistä. Varhaiset sumeaan logiikkaan perustuvat hallintastrategiat käyttivät tilamuuttujia kuten ajoneuvon nopeutta, akun varaustasoa ja ajoneuvon vetovoiman tarvetta syötettävänä parametreinä säätimeen. Ne jakoivat toimintatilat ja määrittelivät voimanjaon sumean järjeistämisen prosessilla. (Xue ym. 2020, 18–19.)

Kuvasta 9 voidaan nähdä sumeaan logiikkaan perustuvan energianhallintastrategian periaate, jossa erilaiset parametrit syötetään sumea logiikka säätimeen, josta saadaan esimerkiksi sähkömoottorin ja polttomoottorin tehontuotot.



KUVA 9. Tyypillinen sumean logiikkaan perustuva energianhallintastrategian periaate kaavio (Xue ym. 2020, 17)

Sumeaan logiikkaan perustuvien energianhallintastrategioiden etu on se, että sen ei tarvitse saavuttaa tarkkaa järjestelmämallia, on soveltuva ihmisen järkeistykselle, nopea laskentanopeus ja niitä voidaan soveltaa online-pohjaisesti eli reaaliaikaisesti sulautettuihin järjestelmiin. Sumeassa logiikassa käytetyt parametrit voidaan optimoida optimointiin perustuvilla algoritmeilla kuten esimerkiksi geneettisellä algoritmilla tai ”Particle Swarm optimization” algoritmilla. (Xue ym. 2020, 19.)

Optimized Fuzzy energianhallintastrategiassa optimointi suoritetaan säätämään ohjausmekanismia polttoainekulutuksen, päästöjen vähentämisen, akun varausasteen korjauksen ja ajamisen suorituskyvyn parantamiseen. Adaptive Fuzzy energianhallintastrategiassa sopeutuvia metodeja lisätään sumeaan logiikkaan perustuvaan strategiaan parantamaan itsesäätävyyttä. (İnci ym. 2020, 11.) Tässä energianhallintastrategiassa optimoidaan polttoainetehokkuus ja päästöt samanaikaisesti (Panday ym. 2014, 5).

Predictive Fuzzy eli ennustava sumeaan logiikkaan perustuva energianhallintastrategia on olemassa optimointiin ja sopeutumiseen perustuviin metodeihin. Strategiaa käytetään seuraavan tilan ennustavien sääntöjen ja reaaliaikaisen sopeutumisen pohjalta. (İnci ym. 2020, 11.) Yleiset syöttötiedot strategiassa ovat ajoneuvon nopeusvaihtelut, ajoneuvon nopeustila ennakoidulla jaksolla ja ennalta määritetyn reitin korkeustasot tietyissä pisteissä. Strategiassa on mahdollista hyödyntää GPS:ää, jonka avulla voidaan tunnistaa todennäköisiä esteitä kuten esimerkiksi vilkasta liikennettä ja jyrkän maanpinnan muotoja. (Panday ym. 2014, 5–6.)

Valittaessa sumeaan logiikkaan perustuvan energianhallintastrategian tulee huomioon ottaa esimerkiksi seuraavat asiat. Sumealla logiikalla ei voi saavuttaa globaalia optimointia ja se tarvitsee suunnittelutietämystä parametreihin. Jotta sumealla logiikalla saavutetaan parempi säätövaikutus energianhallintaan, tulee siinä käytettävät parametrit optimoida käyttäen erilaisia optimointialgoritmeja. (Xue ym. 2020, 19.)

5.2 Optimointiin perustuvat energianhallintastrategiat

Optimointiin perustuvilla energianhallintastrategioilla pyritään optimoimaan ennalta määritetty häviöfunktio. Funktio pitää sisällään erilaisia parametreja riippuen sovelluksesta, kuten esimerkiksi polttoainekulutuksen, päästöt ja vääntömomentin. (Panday ym. 2014, 6.) Optimointiin perustuvat energianhallintastrategiat perustuvat ennustetun ajojakson tiettyyn ajankohtaan, johon käytetään optimaalista hallintakäytäntöä lyhyellä aikavälillä (Chen ym. 2015, 2). Optimointiin perustuvassa energianhallintastrategiassa tulokseksi ei saada suoraan reaaliaikaista energianhallintaa, mutta välittömällä häviöfunktioilla se on mahdollista saada. (Panday ym. 2014, 6.)

Optimointiin perustuvat energianhallintastrategiat voidaan jakaa kahteen ryhmään:

- Globaaleihin optimointiin perustuviin energianhallintastrategioihin
- Reaaliaikaiseen optimointiin perustuviin energianhallintastrategioihin

Käyttö riippuu siitä, optimoidaanko ajosykli ennakkoon vai tapahtuuko optimointi reaaliaikaisesti eli onko energianhallintastrategia sopiva reaaliaikaiseen analysointiin vai ei. Globaalit energianhallintastrategiat ovat niin sanottuja ei-reaaliaikaisia energianhallintastrategioita. Optimointiin perustuvat globaalit energianhallintastrategiat käyttävät kehittyneitä optimointialgoritmeja ratkaisemaan energianvirtauksen ongelmia (Chen, ym 2015, 3).

Optimointiin perustuvat globaalit energianhallintastrategiat tarvitsevat tiedot koko ajojaksosta. Tietoihin sisältyy akun varausaste, ajo-olosuhteet, kuljettajan reagointikyky ja reitti. Esimerkiksi lineaarista ohjelmointia, dynaamista ohjelmointia ja geneettisiä algoritmeja käytetään ratkaisemaan energianhallinta-ongelmia (Panday ym. 2014, 6). Esimerkiksi dynaaminen ohjelmointi (DP) laskee kaikki mahdolliset toimintatilat perustuen koko ajosykliin ja valitsee optimaalisen ohjausmenetelmän niistä ottaen huomioon ajoneuvon talouden ja päästöt (He, Wang, Li, Dou Lian & Li 2020, 2).

Globaaleissa optimointiin perustuvissa energianhallintastrategioissa tulee ottaa huomioon seuraavia asioita. Globaaleista optimointiin perustuvista strategioista saatuja tuloksia voidaan käyttää vertailuun ja arvioimaan muita energianhallintastrategioita. Globaaleissa energianhallintastrategioissa on esimerkiksi välttämätöntä tietää ajosyklin olosuhteet ennalta ja strategiassa laskentamäärä on suuri. (Xue ym. 2020, 22.) Esimerkiksi Lajusen raportissa todetaan, että globaalien energianhallintastrategioiden optimointi ei ole mahdollista ilman tietoa toimintaolosuhteista etukäteen. Tämä rajoittaa globaalien optimointistrategioiden käytön vain kehitysohjelmiin, jossa esimerkiksi dynaamisesta ohjelmoinnista saatuja tuloksia voidaan käyttää vain optimoimaan toimintastrategian parametreja. (Lajunen 2012, 1.)

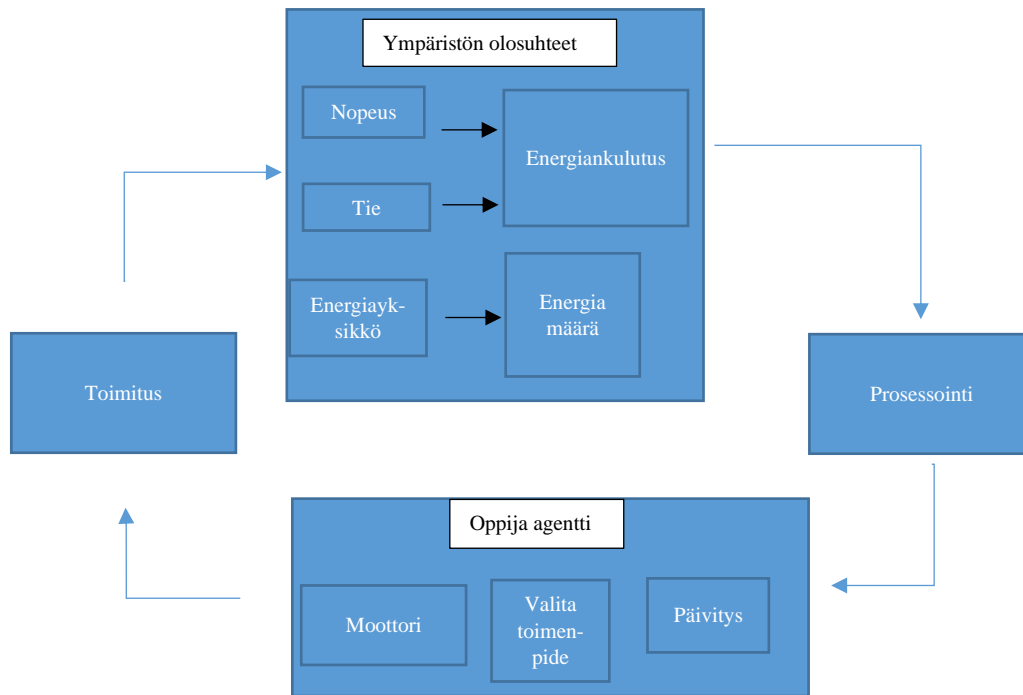
Reaaliaikaiseen optimointiin perustuvassa energianhallintastrategiassa häviöfunktio on riippuvainen vain nykyhetkellä olevista järjestelmäparametreista. Reaaliaikainen optimointi suoritetaan energianlähteiden voimanjaolle ylläpidettäessä akun varaustasoa. (Panday ym. 2014, 9.) Reaaliaikaisiin tai välittömiin energianhallintastrategioihin ei tarvitse tietää kaikkia ajosyklin olosuhteita ennalta ja se tarvitsee vähemmän laskentaa verrattuna globaaliin optimointistrategiaan. Reaaliaikainen optimointi on metodi voimajärjestelmän jakamiseen, joka yleensä sisältää esimerkiksi ”Equivalent Consumption Minimization Strategy” (ECMS) ja ”Model Predictive Control” (MPC) metodien käyttöä. Esimerkiksi ECMS

metodin etu verrattuna dynaamiseen ohjelmointiin (DP) on se, että siinä on lyhyempi laskenta-aika ja siinä ei tarvitse tietää ajosyklin olosuhteita ennalta. (Xue ym. 2020, 21.) Valittaessa reaaliaikaiseen optimointiin perustuvan energianhallintastrategian on otettava huomioon esimerkiksi seuraavat asiat. Sillä voi saavuttaa vain paikallisen optimoinnin, mutta ei globaalia optimointia. Strategia tarvitsee tarkan ajo-neuvomallin, tarvitsee paljon laskentaa ja tilakapasiteettia hallintajärjestelmälle. (Xue ym. 2020, 22.)

Sääntöihin ja optimointiin perustuvissa energianhallintastrategioissa haittapuolina voidaan pitää sitä, että niillä on suuri riippuvuus ennalta tiedettyihin tuleviin ajo-olosuhteisiin ja suuret laskennalliset kustannukset, jotka on vaikea toteuttaa reaaliaikaisesti. (Wu ym. 2016, 31.)

5.3 Oppimiseen perustuvat energianhallintastrategiat

Oppimiseen perustuvissa energianhallintastrategiassa ei tarvitse tietää täydellistä mallia, jotta voidaan suorittaa järjestelmän tarkastus, mutta tarkan tietokannan tekemisellä on suuri vaikutus järjestelmän toimintaan ja kokoon. Oppimiseen perustuvissa energianhallintastrategioissa käytetään esimerkiksi algoritmeja kuten vahvistusoppimista eli ”Reinforced learning” ja ”Neural Network learning”. Esimerkiksi vahvistusoppimiseen perustuva strategia voi automaattisesti määrittää optimaalisen toimenpiteen perustuen tiedon tuloon ilman minkäänlaista ennustamista. Vahvistusoppimisessa valvonta sisältää kaksi ryhmää, oppimisagentin ja ympäristön. Oppimisagentti valvoo ympäristön tilaa ja valitsee toimenpiteet, jotka menevät ympäristöön. (İnci ym. 2020, 13.) Kaaviosta 6 voidaan nähdä vahvistusoppimisen toimintaprosessi.



KAAVIO 6. Vahvistusoppimisen algoritmin operatiivinen prosessi (mukaillen İnci ym. 2020, 13)

Wun ym. (2016) tutkimusraportissa ehdotetaan vahvistusoppimiseen perustuvaa energianhallintastrategiaa, jolla on mahdollista samaan aikaan kontrolloida ja oppia optimaalisen voimanjaon operaatiot reaaliajassa. Raportissa ehdotettu energianhallintastrategia on teoreettisesti johdettu dynaamisella ohjelmoinnilla laatimalla ja verrattu dynaamiseen ohjelmointiin laskennallisen monimutkaisuuden näkökulmasta. Tutkimuksessa numeerinen analysointi osoitti, että lähes optimaalinen ratkaisu on mahdollista saavuttaa reaaliajassa, kun malli on hyvin koulutettu menneillä ajosykleillä. Ehdotetulla energianhallintastrategialla on mahdollista saavuttaa 12 % parempi polttoaine-ekonomia kuin tavanomaisella binäärisellä strategialla eli toisin sanoen CD-CS strategialla matka tasolla. (Wu ym. 2016, 31–32, 43.) Valittaessa oppimiseen perustuvan energianhallintastrategian tulee ottaa huomioon esimerkiksi seuraava asia: tarkan datan kerääminen voi olla vaikeaa ja aikaa vievää (İnci ym. 2020, 12).

5.4 Energianhallintastrategiat range extenderillä varustetuissa kaupunkilinja-autoissa

Kaupunkilinja-autot operoivat yleensä saman tyyppisillä reiteillä ja niiden aikataulu on yleensä ennalta tiedossa. Tämän tyyppinen tieto antaa mahdollisuuden kehittää energianhallintastrategian ladattavalle hybridisähkölinja-autolle ja täten optimoida sen toiminnan. Energianhallintastrategioiden optimoinnissa

polttoaineenkulutus halutaan minimoida, mutta ladattavissa hybridisähköajoneuvoissa esimerkiksi akuston elinkaari on myös tärkeä tekijä, koska akustot korkealla energiakapasiteetilla on kalliita. (Lajunen 2012, 1.)

Opinnäytetyössä rajattiin käsitellyt tutkimukset nimenomaan range extenderillä varustetun sähkölinja-autojen tapauksiin, jotka toimivat sarjakokoonpanolla. Taulukosta 3 voidaan nähdä tutkimuksen tekijä, tutkimuksen kohde, käytetyn range extender -laitteen tyyppi, ehdotettu ja vertailut energianhallintastrategiat range extenderillä varustetulle sähkölinja-autolle ja johtopäätökset tutkimuksesta. (LIITE 1). Löytämistäni tutkimuksista pyrin löytämään tiedot, millä tavalla range extender -laite toimii ehdotetussa energianhallintastrategiassa ja ehdotetun energianhallintastrategian yleistoiminnan.

TAULUKKO 3. Tutkimuksia range extenderillä varustettujen sähkölinja-autojen energiahallintastrategioista.

Tekijä	Kohde	Range extender	Energianhallintastrategiat	Johtopäätökset
Wu ym. 2014	Range extenderillä varustettu sähkölinja-auto	Dieselpoltto-moottori ja generaattori	CD-CS ja BL	Tutkimuksessa kahden ei-optimoidun energianhallintastrategian välillä, CD-CS strategialla oli parempi voimansiirron energiatehokkuus kuin BL strategialla. He suosittelevat CD-CS strategiaa Harbin kaupungin ajosyklille.
Wu & Lu 2012	Range extenderillä varustettu sähkölinja-auto, sarja kokoonpanolla oleva hybridi.	Dieselpoltto-moottori ja generaattori (45 kW)	CD-CS ja BL	Kiinalaisen kaupunkilinja-auton toimintaolosuhteissa. Range extenderin toimiessa kuormitusta seuraavalla periaatteella, tietyissä olosuhteissa CD-CS strategialla oli parempi polttoaine-ekonomia kuin BL strategialla.
Xu, Yang, Hu, Li &	Range extenderillä varustettu sähkölinja-auto	Polttomoottori ja generaattori (35 kW)	DP, CD-CS ja BL	Pienin teoreettinen kulutus saatiin DP strategialla, mutta he suosivat

Ouyang 2012				CD-CS strategiaa tälle tietylle voimasiirtolinjalle. CD-CS strategiassa range extender suosi power follow eli tehon seuranta tilaa, jolla saatiin pienempi kulutus jatkuvan tasaisen tehon tilan sijaan.
Gao & Du 2016	Range extenderillä varustettu sähkölinja-auto	Polttomoottori ja generaattori (55 kW)	Konvekssiin optimointiin perustuva algoritmi	Tutkimuksessa esitetty konvekssiin optimointiin perustuva optimointi algoritmi, joka oli suunniteltu Harbin kaupungin ajosyklille. Tämän tyyppistä energianhallintastrategiaa pystytään soveltamaan range extenderillä varustettuun sähkölinja-autoon ja se sopii täyttämään voimansiirron suorituskyvyn vaatimukset.
Chen, Wu, Wu & Du 2014	Range extenderillä varustettu sähkölinja-auto	Dieselpoltto-moottori ja generaattori (55 kW)	DP	DP strategialla pystytään hyödyntämään akun varaus kokonaan ja pitämään akun varausaste järkevällä tasolla.
Chen ym. 2015	Range extenderillä varustettu sähkölinja-auto	Dieselpoltto-moottori (82 kW) ja generaattori (50 kW)	DP ja sääntöihin perustuva, δ SOC strategia	Tutkimuksen tuloksista todettiin, että ehdotetun strategian tehokkuus on korkealla tasolla. Ottaen huomioon reaaliaikaisen suorituskyvyn, energianhallintastrategia on ideaalinen tutkimuksessa olevalle range extenderillä varustetulle sähkölinja-autolle.
Xie, Tian, Huang & Zhan 2013	Range extenderillä varustettu kaupunki sähkölinja-auto	Bensiinipoltto-moottori ja generaattori	CD-CS ja neljävaiheinen	Simulaatiosta saatujen tuloksien mukaan neljävaiheinen energianhallintastrategialla oli parempi polttoaine-ekonomia kuin CD-CS strategialla.

			energiahallintastrategia	
Du, Chen, Song, Gao & Ouyang 2017	Range extenderillä varustettu sähkölinja-auto	Polttomoottori (82 kW) ja generaattori (50 kW)	CD-CS, DP ja VB-PSR-RB strategia	Tutkimuksessa todettiin, että ehdotetulla VB-PSR-RB strategialla perusolosuhteissa, energiatehokkuus ja kustannustehokkuus paranivat hiukan. Energiansäästösuhde oli samantyyppinen kuin DP strategialla. Ehdotetulla strategialla energiansäästösuhde oli noin 8 % pienempi kuin CD-CS strategialla.
Wang, Huang, Xie & Tian 2014	Range extenderillä varustettu sähkölinja-auto	Polttomoottori ja generaattori	ECMS ja CD-CS	Tutkimuksessa ehdotettu ECMS energianhallintastrategiaa käytettiin yhdessä ajomallin tunnistamisen kanssa ajoneuvosimulaatiossa, ja verrattiin CD-CS strategiaan polttoaineenkulutuksen suhteen. Ehdotetulla strategialla saavutettiin 49 % pienempi polttoaineenkulutus kuin CD-CS strategialla.
Haryadi, Haryanto, Prmaishella & Santosa 2019	Range extenderillä varustettu sähkölinja-auto	Polttomoottori ja generaattori (50 kW)	DP	Tutkimuksessa optimoitiin energianhallintastrategia käyttäen dynaamista ohjelmointia (DP) Japanilaisessa ajosykliissä. Tutkimuksessa saatiin tulokseksi sähkömoottorin tarvitsema teho, akusta otettu teho, range extenderin tuottama teho ja polttoaineen kulutus ajosykliissä.
Li ym. 2016	Range extenderillä varustettu sähkölinja-auto	Dieselpolttimoottori ja generaattori (80 kW)	DP	Tutkimuksessa todettiin, että strategia voi tuottaa tärkeän lähtökohdan suunnitteluparametreille ja energianhallintastrategioille. Se

				voi toimia vertailuna todellisessa käytössä oleville energianhallintastrategioille.
Xu, Yang, Li, Ouyang & Hua 2012	Ladattava poltto- tokennojärjestelmällä varustettu kaupunkisähkölinja-auto	Protoninvaihtomembraanipoltto- tokenno (40 kW)	DBSD, CD-CS ja DP	Tutkimuksessa esitettiin reaaliaikainen energianhallintastrategia ja sillä saavutettiin pienempi polttoaineenkulutus kuin CD-CS strategialla.
Schranagl, Moser, Langthaler, & Re 2016	Range extenderillä varustettu sähkölinja-auto	Dieselpoltto- moottori ja generaattori (36 kW)	MILP (Mixed integer linear programming) ja MPC	Tutkimuksessa esitettiin reaaliaikainen energiatehokas energianhallintastrategia sarjahybridiajoneuvolle. Strategian mahdollinen hyödyntämiskohde on kaupunkilinja-autot, joiden tapauksessa tiedot menneistä ajosykleistä tiedetään.

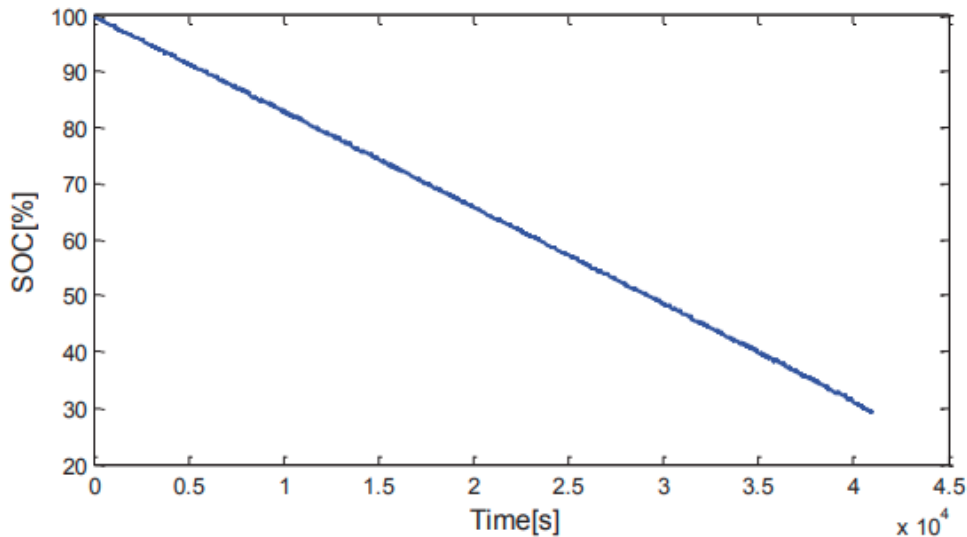
Wun ym. (2014) raportissa analysoitiin kahta eri energianhallintastrategiaa, CD-CS ja BL strategioita Harbin kaupungin ajosyklissä, jonka pituus oli keskimäärin 150–180 km. Tulokseksi saatiin, että CD-CS strategia käyttää vähemmän energiaa kuin BL strategia. Tutkimuksessa keskivauhti oli 14,5 km/h ja maksiminopeus oli 50 km/h. Range extender toimi CD-CS strategiassa edellä mainitulla thermostat control-strategialla. BL strategiassa range extender toimi edellä mainitulla power follow-strategialla eli seuraten vetovoiman tarvetta. (Wu ym. 2014.)

Wun ym. (2012) raportissa analysoitiin CD-CS ja BL energianhallintastrategioita ajoneuvosimulaatiomallilla kiinalaisessa kaupunkilinja-auton ajosykliolosuhteissa ekonomian ja tehokkuuden näkökulmasta. Ajomatka, jonka pituus oli 200 km, CD-CS energianhallintastrategialla sähköenergian kulutus oli 3,15 % pienempi kuin BL strategialla ja range extenderin polttoaineenkulutus oli 2,59 % pienempi kuin BL strategialla. Matkan aikana keskinopeuden ollessa 18,9 km/h ja maksiminopeuden ollessa 50,9 km/h. Range extender toimi CD-CS strategiassa power follow-strategialla ja BL strategialla tuottaen tasaisesti energiaa matkan ajan. (Wu ym. 2012.)

Edellä mainituissa tutkimuksissa kyseessä olevat range extenderit olivat dieselpolttomootoreita varustettuna generaattorilla. Molemmilla tutkimuksilla todettiin, että kaupunkiajositykleille CD-CS energianhallintastrategia oli sopivampi range extenderillä varustettuun sähkölinja-autoon verrattuna BL strategiaan.

Xun ym. (2012) raportissa vertailtiin 12 metrisen range extenderillä varustetun sähkölinja-auton energianhallintastrategioita. Vertailtuja energianhallintastrategioita olivat DP strategia, CD-CS strategia ja Yhdistetty BL strategia. Tutkimuksessa simulaatiosta pienin saatu kulutuslukema saatiin DP strategialla, joka oli 26,1 kg 100 kilometriä kohden, kulutuslukema oli 7,4 % pienempi kuin CD-CS strategialla ja 10,3 % pienempi kuin BL strategialla. Tutkimuksessa tien päällä tapahtuvassa testauksessa kuitenkin pidettiin parhaana energianhallintastrategiana CD-CS strategiaa, strategialla range extenderin toimiessa tehontarpeen mukaan ilman tyhjäkäyntiä voitiin päästä lähes DP strategian kulutuslukemiin. Tutkimuksessa olevalla voimansiirtolinjalla he suosivat CD-CS strategiaa, polttoaineenkulutus tyhjäkäynnillä oli korkeampi kuin normaalitasolla, joten sen vaikutusta ei voitu jättää huomiotta. Range extender toimi tutkimuksessa kahdella tavalla CD-CS ja BL strategiassa, tuottaen tasaisesti tietyn määrän sähköenergiaa tai vastaten vaadittuun vetovoimaan eli power follow-strategialla. DP strategiassa range extender toimi ajosyklille optimoidulla tehontuotolla. (Xu ym. 2012.)

Gaon ym. (2016) raportissa esiteltiin konvekseen optimointialgoritmiin perustuva energianhallintastrategia, jossa voimansiirron komponentit on rakennettu pääosin käyttäen konvekseja malleja. Tutkimuskohteenä oli 12 metrinen range extenderillä varustettu sähkölinja-auto. Tutkimuksessa optimointikohteet olivat polttoaineen ja sähkön käyttökustannuksien minimointi. Ehdotettu energianhallintastrategia toteutettiin simuloinnilla Kiinalaisen Harbin kaupungin ajosyklille. Range extender toimi energianhallintastrategiassa tuottamaan sähköenergiaa siten että akusta on hyödynnetty energia matkan lopussa akun varausasteen rajoissa ja että akun varausastekäyrä laskee optimaalisesti. Kuvasta 10 voidaan nähdä tutkimuksessa ehdotetun strategian varausastekäyrä. (Gao ym. 2016.)



KUVA 10. Konvekseen optimointiin perustuvan strategian akunvarausastekäyrä. (Gao ym. 2016, 4)

Chenin ym. (2014) raportissa käsitellään dynaamiseen ohjelmointiin liittyvää energianhallintastrategiaa range extenderillä varustetulle sähkölinja-autolle. Optimaalinen akun varausasteen väheneminen ja voimajako kaikille pisteille laskettiin Kiinalaisen Harbin kaupungin ajosyklille. Range extender toimi tutkimuksessa sille ajosyklille lasketuissa tehontuotto pisteissä, jotta akun varaus saatiin kokonaan hyödynnettyä matkan aikana. (Chen ym. 2014.)

Chenin ym. (2015) tutkimusraportissa saavutettiin simulointimalli range extenderillä varustetulle sähkölinja-autolle. Ehdotettu energianhallintastrategia johdettiin DP strategiasta, se muodostettiin akun varausasteen vaihtelun sekunnissa ja sähkömoottorin tehon yhteyden mukaan. Sillä pystyttiin saavuttamaan reaaliaikainen energianhallinta ilman viivettä. Ehdotettu energianhallintastrategia simuloitiin Harbin kaupungin ajosyklille. Range extender toimi optimoinnista saatujen tuloksien mukaan minimi polttoaineenkulutuksella optimoidulle ajosyklille. (Chen ym. 2015.)

Xien ym. (2013) tutkimusraportissa neljävaiheinen energianhallintastrategia asetettiin range extenderillä varustettuun kaupunkisähkölinja-autoon. Esitettyssä strategiassa tiedetään tai arvioidaan kuljettava matka, jonka ajoneuvo kulkee. Ensimmäisessä vaiheessa ajoneuvo käyttää vain akusta saatua energiaa niin kauan kunnes akun varausaste menee 50 %. Toisessa vaiheessa ajoneuvo toimii hybridinä, range extender tuottaa sähköenergiaa ladataan akkua 80 %, jonka jälkeen vain akusta käytetään energiaa ja range extender on sammuksissa. Kolmannen vaiheeseen siirrytään, kun ohjain määrittää, että riittääkö akun energia kattamaan lopun matkan. Kolmannessa vaiheessa range extender on pois päältä ja akusta otetaan

vain energiaa akun varausastetasolle 25 %. Neljännessä vaiheessa range extender ylläpitää akun varaustetta loppumatkan välillä 25–35 %, ajoneuvo toimii tässä vaiheessa yhdistetyllä strategialla. Tutkimuksessa range extender toimi joko tasaisella energiantuotolla tai seuraten tehotarvetta. Simulaatiosta saaduista tuloksista todettiin, että range extender toimiessa seuraten tehotarvetta on parempi akun eliniän kannalta kuin range extenderin toimiessa tasaisella tehontuotolla. (Xie ym. 2013.)

Dun ym. (2017) tutkimusraportissa tutkittiin globaaliin optimointiin perustuvaa energianhallintastrategiaa, joka on reaaliaikainen ja sopeutuva erikokoisille akkukapasiteetilla olevilla range extenderillä varustetuille sähkölinja-autoille. Simulaatio suoritettiin kiinalaiselle kaupunkimaiselle ajosyklille. PSR-RB strategia on samantyyppinen kuin DP strategia, kun katsotaan akun varausastekäyrää. Strategiassa määritetään voimanjaon suhteen säännöt, jonka mukaan range extender tuottaa sähköenergiaa. Energianhallintastrategiassa on kolme toiminta moodia, range extenderin ollessa pois päältä ja akustosta otetaan tarvittava energia sähkömoottorille tai range extender toimii joko pääasiallisena voimantuottajana akuston käyttäessä energiaa vain apulaitteisiin tai range extender toimii maksimi tehontuotolla akuston toimittaessa jäävän tehontarpeen. (Du ym. 2017.)

Wangin ym. (2014) tutkimusraportissa ehdotetaan ECMC energianhallintastrategiaa, joka käyttää reaaliaikaista ajomallin tunnistusta, range extenderillä varustetulle sähkölinja-autolle. Ajomallin tunnistuksen ansiosta energianhallintastrategiaa voidaan soveltaa reaaliaikaisesti saamaan optimaalinen suorituskyky. Energianhallintastrategiassa akustosta ja range extenderistä otettu sähköteho otetaan siten että polttoaineen kulutus minimoidaan. Range extender toimii energianhallintastrategiassa seuraten sähkölinja-auton tehotarvetta. Range extender tuotti sähköenergiaa silloin, kun tehotarve oli positiivinen ja silloin kun tehotarve oli negatiivinen range extender ei tuottanut sähköenergiaa. (Wang ym. 2014.)

Haryadin ym. (2019) tutkimusraportissa saavutettiin energianhallintastrategia range extenderillä varustetulle sähkölinja-autolle, joka perustui dynaamiseen ohjelmointiin. Simulointi suoritettiin käytetylle japanilaiselle ajosyklille. Saavutetussa energianhallintastrategiassa akustosta otettu sähköenergia oli suurempi kuin range extenderistä otettu. Tutkimuksessa range extenderin tehontuotto rajoitettiin 50 kW ja se toimi optimoinnista saatujen arvojen mukaan ajosyklissä. (Haryadi ym. 2019.)

Lin ym. (2016) raportissa analysoitiin monitavoitteellinen energianhallintastrategia, joka ottaa huomioon kompromissin range extenderin polttoaineenkulutuksen ja akuston terveydentilan (SOH) osalta.

Tutkimuksessa käytettiin dynaamista ohjelmoinnin algoritmia DP ratkaisemaan monipäämääräisen ongelman kahdelle eri ajosyklille. Range extenderin polttoaineenkulutus optimoitiin ja se toimi sille optimaalisella tavalla minimoiden polttoaineenkulutuksen ajosyklissä. (Li ym. 2016.)

Xun ym. (2016) raportissa ehdotettiin reaaliaikaista energianhallintastrategiaa ladattavalle polttokennosähkölinja-autolle, joka sisälsi neljä varauksenlaskun vaihetta ja se perustui dynaamiseen ohjelmointiin. Tutkimuksessa ehdotettu DBSD eli Depleting-Blended-Sustain-Depleting strategia toimi akun varauksen vähenemisellä, yhdistetyllä strategialla BL, akun varausasteen ylläpidolla CD ja akun varaustason vähenemisellä matkan aikana. Ehdotettua energianhallintastrategiaa vertailtiin CD-CS ja DDP eli dynaamiseen ohjelmointiin perustuvaa strategiaan simuloinnilla ja oikeassa elämässä testaamalla. Ehdotettu energianhallintastrategialla DBSD oli tapauksessa parempi polttoaine-ekonomia kuin CD-CS strategialla. Tutkimuksessa polttokennojärjestelmää käytettiin tuottamaan ilmastointiin energia, joten polttokennojen tyhjäkäynti toi yli kolmanneksen käyttökustannuksista. Range extender eli polttokennojärjestelmä toimi ehdotetussa strategiassa ollen joko pois päältä tai tuottaen sähköenergiaa tehon 0–35 kW välillä. (Xu ym. 2016.)

Schranagl ym. (2016) tutkimuksessa laskettiin alempi raja-arvo globaalille optimaaliselle energiantoimitukselle ennalta tiedetystä ajosyklistä, jota käytettiin päämäärän lähtökohtana. Tutkimuksessa reaaliaikainen energianhallintastrategia käytti hyväksi MPC-metodia ja lyhytaikaista ennustetta tulevaisuuden tehotarpeesta. Tutkimuksessa vertailtiin ei-reaaliaikaista ja reaaliaikaista MPC ratkaisua polttoainekulutuksen ja laskenta-ajan osalta oikeassa kaupunkilinja-auton reitissä. Reaaliaikainen MPC strategialla oli vain marginaalisesti huonompi polttoaineenkulutus kuin ei-reaaliaikaisessa optimoinnissa. Range extender toimi tutkimuksessa ollen pois päältä tai tasaisella 20 kW tehotuotolla matkana aikana. (Schranagl ym. 2016.)

5.5 Johtopäätökset käsitellyistä tutkimuksista

Range extenderillä varustettujen sähkölinja-autojen tapauksessa, löytämistäni tutkimuksista yleisimpänä energianhallintastrategioina tulee esille CD-CS ja BL energianhallintastrategiat ja dynaamista ohjelmointia (DP) käyttävät globaaliin optimointiin perustuvat strategiat, joita on käytetty range extenderillä varustetun kaupunkilinja-autojen tapauksissa. Tutkimuksista voidaan todeta, että yleensä niissä ehdotettua energianhallintastrategiaa vertaillaan tavanomaisen CD-CS strategian kanssa tai vertaillaan optimointiin perustuvan (DP) energianhallintastrategian tai yhdistetyn (BL) energianhallintastrategian

kanssa. Erilaisia ehdotettuja energianhallintastrategioita on useita ja niistä on tehty erilaisia sovelluksia. Erilaiset sääntöihin perustuvat strategiat ovat suosittuja, kuten CD-CS strategia, jossa range extender toimii tuottaen energiaa akustolle erilaisten akun varausasteen raja-arvojen välillä. Myös optimointiin liittyvät ei-reaaliaikaiset energianhallintastrategiat, kuten dynaamista ohjelmointia käyttävät DP strategiat, ovat monessa tutkimuksessa käytössä, joissa range extenderin toiminta on optimoitu sille tietylle ajosyklille. Optimointiin perustuvilla strategioilla yleisesti ottaen saavutettiin parempi polttoaine-ekonomia kuin sääntöihin perustuvilla strategioilla. Käsitellyistä tutkimuksista kolmessa käytettiin reaaliaikaisia optimointiin perustuvia energianhallintastrategioita MPC, DBSD ja ECMS. ECMS-strategialla saavutettiin parempi polttoaine-ekonomia kuin sääntöihin perustuvalla strategialla. Osassa tutkimuksista otettiin myös huomioon akuston elinikä ehdotetussa energianhallintastrategiassa. Suurimmassa osassa käsittelemissäni tutkimuksista energianhallintastrategiaa testattiin tietyn ajosyklin simuloinnin avulla, kahdessa tutkimuksessa energianhallintastrategian testaus suoritettiin oikeassa elämässä tietyllä ajosyklillä.

Kerätyistä tutkimuksista koskien range extenderillä varustettuun sähkölinja-autoon voidaan todeta, että range extender voi toimia energianhallintastrategioissa monella eri tavalla sen energiantuoton suhteen ajosyklin aikana. Yleisesti range extender toimi tuottaen energiaa tasaisesti, vastaten tehontarpeeseen tai optimoinnista saatujen tulosten perusteella. Löytämistäni tutkimuksista range extenderinä toimi tyypillisesti polttomoottori. Polttomoottori oli joko diesel tai bensiini käyttöinen ja se oli varustettu generaattorilla. Yhdessä tutkimuksessa range extenderinä toimi myös protoninvaihtomembraanipolttokenno.

Energianhallintastrategioiden käyttökelpoisuutta on tärkeä miettiä ennen sen energianhallintastrategian valintaa hybridiajoneuvolle kuten range extenderillä varustetulle kaupunkisähkölinja-autolle. Esimerkiksi Xue:n raportissa todetaan, että sääntöihin perustuvat ja optimointiin perustuvat energianhallintastrategiat ovat nykyään tutkimuskohteena. Raportissa jaetaan hybridiajoneuvojen energianhallintastrategiat teollisessa käytössä oleviin strategioihin ja tieteellisessä tutkimuksessa oleviin strategioihin. Esimerkiksi erilaiset sääntöihin liittyvät energianhallintastrategiat ovat teollisella alalla ja erilaiset optimointiin liittyvät tieteellisten tutkimuksien alalla. Raportissa myös todetaan, että suurta osaa energianhallintastrategioista ja algoritmeista ei ole testattu ammattialalla, ja ovat täten tutkimuksen tasolla. (Xue ym. 2020, 23.)

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Sähkölinja-autoja on olemassa eri kokoonpanoilla, joilla ne eroavat rakenteeltaan toisistaan. Range extenderilla varustetun sähkölinja-auto vastaa kokoonpanoltaan sarjakokoonpanolla toimivaa hybridi sähköajoneuvoa. Range extenderillä varustetun sähkölinja-auton akuston koon ja latauksen suunnittelu on tärkeässä osassa sen toiminnan kannalta. Erilaiset range extender -laitteet tarjoavat erityyppisiä ratkaisuja komponenttien, toiminnan ja käytettyjen polttoaineiden osalta. Kaupunkisähkölinja-autojen keskimääräinen energiankulutus, energiankulutusmallit ja tiedot mihin energiaa kuluu mahdollistavat range extenderin mitoituksen tehontuotoltaan. Keräämissäni lähteissä range extender -laitteistot ovat tyypillisesti teholtaan 25–65 kW välillä.

Erilaisilla energianhallintastrategioilla on erilaisia ominaisuuksia, joiden mukaan energianlähteet kuten range extender voivat toimia ja niillä on myös omat heikkoutensa. Energianhallintastrategioista on todella paljon eri variaatioita ja sovelluksia riippuen minkä tyyppiseen ajoneuvoon ne on liitetty. Kuitenkin kaikilla strategioilla pyritään saamaan aikaan järkevää akun varauksen käyttö ja niin hyvä polttoaine-ekonomia kuin on mahdollista. Sääntöihin perustuvat energianhallintastrategiat ovat yksinkertaisia, helposti sovellettavia ja vakaita strategioita, joita voidaan käyttää reaaliaikaisesti. Sumeaan logiikkaan perustuvien energianhallintastrategioiden selvänä etuna, että niillä pystytään helposti ratkaisemaan monimutkaisia energianhallintaongelmia ja niissä voidaan ottaa huomioon esimerkiksi liikenteen tuomat vaikutukset kaupungissa GPS:n avulla. Sääntöihin perustuvien energianhallintastrategioiden heikkous on, että ne tarvitsevat osaamista suunnittelijalta ja niillä ei yleensä saavuteta optimaalista energianhallintaa esimerkiksi polttoaineenkulutuksen osalta. Sääntöihin perustuvat energianhallintastrategiat ovat yleisesti käytettyjä strategioita hybridiajoneuvojen sovelluksissa. Optimointiin perustuvilla energianhallintastrategioilla on mahdollista ratkaista optimaalinen energianhallintaongelma häviöfunktioilla, joko reaaliaikaisesti tai ei-reaaliaikaisesti käyttäen hyväksi erilaisia metodeja ja algoritmeja. Optimointiin perustuvissa strategioissa käytettyjä algoritmeja on hyvä käyttää parantamaan sääntöihin perustuvien strategioiden parametreja, jolloin niillä on mahdollista saavuttaa parempi energianhallinta.

Globaalien energianhallintastrategioiden hyvänä puolena voidaan pitää mahdollisuutta saavuttaa optimaalinen energianhallinta eli esimerkiksi niin hyvä polttoaineenkulutus kuin mahdollista. Globaalien energianhallintastrategioiden heikkouksia ovat asiat kuten, että niissä tarvitsee tietää ennalta ajosyklin tiedot ja olosuhteet, ja niistä saatuja tuloksia voi käyttää vain sille ajosyklille eikä se voi toimia käytännössä reaaliaikaisesti energianhallintana.

Optimointiin perustuvissa reaaliaikaisissa energianhallintastrategioissa välittömällä häviöfunktiolla on mahdollista saavuttaa reaaliaikainen optimointi, mutta strategian huonona puolena voidaan pitää suurta laskenta aikaa ja välittömien häviöfunktioiden tarvetta. Oppimiseen perustuvat energianhallintastrategiat ovat reaaliaikaisia strategioita, ja niistä tehdyt tutkimukset ovat osoittaneet hyvää reaaliaikaista suorituskykyä tutkimuksissa. Niillä voidaan opettaa ajoneuvo toimimaan halutulle ajosyklille ja ajoneuvon on mahdollista oppia ajosyklissä itse toimimaan optimaalisesti. Kuitenkin niihin tarvittava datan keräys voi olla aikaa vievää.

Range extenderillä varustetun kaupunkisähkölinja-auton tapauksessa erilaiset sääntöihin perustuvat energianhallintastrategiat ovat tyypillisesti käytettyjä strategioita ja reaaliaikaiset optimointiin perustuvat energianhallintastrategiat ovat tutkimuksen kohteena. Käytännössä kuitenkin kaikkia edellä mainittuja energianhallintastrategioita on mahdollista soveltaa range extenderillä varustetun sähkölinja-auton tapauksessa. Range extenderin voi toimia eri energianhallintastrategioissa monella eri toimintatavalla ja eri tehontuotolla. Yleisesti kuitenkin voidaan todeta, että range extender toimii sille annetuilla säännöillä, joihin liittyy erilaiset parametrit kuten akun varausaste. Range extender voi toimia myös sille optimaalisella käyttöalueella optimoinnista saatujen tulosten perusteella tietyille ajosyklille, minimoiden polttoaineenkulutuksen ja että akustossa oleva energia tulee hyödynnettyä.

7 POHDINTA RANGE EXTENDERILLÄ VARUSTETUN KAUPUNKISÄHKÖLINJA-AUTOON SOPIVISTA RANGE EXTENDER-JÄRJESTELMISTÄ JA ENERGIANHALLINTASTRATEGIOISTA

Ympäristöystävällisyyden ja energiatehokkuuden näkökulmasta erilaiset polttokenno range extender laitteistot sopisivat hyvin kaupunkisähkölinja-autoon, koska ne ovat päästöttömiä ja omaavat hyvän hyötysuhteen verrattuna polttomoottoreihin ja mikrokaasuturbiineihin. Polttokennolaitteistot ovat nykypäivänä suosittu tutkimuskohde, ja niillä on suurta potentiaalia erilaisissa range extender-sovelluksissa. Kuitenkin toistaiseksi polttokennolaitteistojen hinnat ovat korkeita. Suomessa kylmät olosuhteet tuovat haasteita sähkölinja-autoille. Akuston ja ohjaamon lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät tulee suunnitella hyvin, jotta energianlähteiden käyttö olisi optimaalista. Range extender -laitteisto voisi tuoda kylmiin olosuhteisiin seuraavia ominaisuuksia: Esimerkiksi polttomoottori ja mikrokaasuturbiini range extender-laitteistot vapauttavat lämpöä polttoprosessissa, joten sen lämmön talteenotolla voisi ratkaista lämmitysongelmat, koska niistä saatava lämpö voitaisiin ohjata lämmittämään akustoa ja matkustamoja kovilla pakkasilla näin parantaen akuston suorituskykyä kylmissä olosuhteissa ja vähentäen akustosta otettua lämmitysenergiaa. Polttomoottorit ja kaasuturbiinit eivät kuitenkaan ole päästöttömiä, mutta ne voivat tarjota tämän tyyppisen ominaisuuden. Myös esimerkiksi korkean lämpötilan polttokennojärjestelmällä tämä voisi olla mahdollista sen korkean toimintalämpötilan takia. Kaupunkisähkölinja-autossa päästötömyys olisi kuitenkin suotavaa, koska operointi tapahtuu kaupungissa.

Energianhallintastrategioita, jotka soveltuvat range extenderillä varustetulle kaupunkisähkölinja-autolle, on monia. Helpoin ja yksinkertaisin ratkaisu olisi sääntöihin perustuvat energianhallintastrategiat, jotka ovat yksinkertainen toteuttaa kaupunkilinja-auton tapauksessa. Yleensä kaupunkilinja-autojen reitit ovat tiedossa ennalta, joka antaa mahdollisuuden käyttää myös optimointiin perustuvia energianhallintastrategioita, joilla voidaan saavuttaa optimaalinen polttoaineenkulutus range extenderille tietyllä ajosyklillä. Energianhallintastrategiat kaupunkilinja-autolle, kun käytetään polttomoottori tai kaasuturbiini range extenderiä olisi päästöjen kannalta suotavaa, että niitä käytettäisi vasta kun akun varausaste sitä vaatisi eli kaikki sähköenergia käytettäisi ensin hyödyksi akustosta, ettei päästöjä synny kaupunki ympäristössä. Kuitenkin todella matalissa lämpötiloissa range extenderin olisi hyvä toimia käytännössä vaihtoehtoisesti kokoaikaisesti matkan aikana, jolloin lämmitysjärjestelmän viemää akun energiaa voitaisiin kompensoida range extenderillä. Jos valitaan sääntöihin perustuva energianhallintastrategia voisi määritellä säännöt akuston ja matkustamon lämpötilan osalta, milloin range extender on toiminnassa. Löytämistäni

energianhallintastrategioita koskevissa tutkimuksissa ei otettu huomioon ympäristön lämpötiloja ja tietoja koskien kylmiin ilmastoihin sopivuudesta ei löytynyt, joten mahdollinen valittu energianhallintastrategia range extender -laitteelle tulisi testata esimerkiksi Suomen talven todella alhaisissa lämpötiloissa, jotta strategian suorituskyky voitaisiin varmistaa.

8 OPINNÄYTETYÖN POHDINTA

Opinnäytetyön tarkoituksena oli aluksi laskea kustannuksia ja energiankulutuksia range extenderillä varustetulle kaupunkisähkölinja-autolle, kysyen range extendereiden toimittajilta tarvittavia tietoja sähköpostitse. Tarvittavia tietoja ei laitetoimittajilta ollut mahdollista saada, joten opinnäytetyössä keskityttiin energianhallintastrategioihin. Mahdollisesti nykyisestä markkinatilanteesta johtuen eivät yritykset voineet antaa tietoja, kuten hintoja, polttoainekulutuksia ja hyötysuhteita, joiden avulla olisi laskettu kustannus- ja energiankäyttöarvioita.

Opinnäytetyössä käsiteltiin yleisesti sähkölinja-autojen kokoonpanot, lataus ja akuston tiedot sekä kaupunkisähkölinja-auton energiankulutukseen liittyviä asioita. Opinnäytetyön pääaiheen oli range extender-laitteet ja niille mahdolliset energianhallintastrategiat. Työssä tutkittiin erilaisia energianhallintastrategioita yleisesti ja muiden tutkijoiden tekemien raporttien pohjalta, range extenderillä varustettujen sähkölinja-autojen osalta. Opinnäytetyö antaa yleiskuvan erityisesti erilaisista range extendereista ja energianhallintastrategioista, sekä muista siinä käsitellyistä asioista. Tietojen avulla voidaan arvioida range extender -laitteisto vaihtoehtoja ja niiden toimintaa.

Energianhallintastrategioista tehtyjä tutkimuksia on tehty suuri määrä erilaisille ajoneuvokokoonpanoille, työssä käsitellyt energianhallintastrategiat eivät ole ainoita energianhallintastrategioita, jotka voivat toimia kaupunkisähkölinja-autojen tapauksessa. Tässä tutkimuksessa keskityttiin nimenomaan range extenderillä varustetun sähkölinja-auton tapauksiin. Myös esimerkiksi hybridihenkilöautojen ja erilaisen hybridiajoneuvojen energianhallintastrategioita, jotka toimivat sarjakokoonpanolla voi olla mahdollista soveltaa sähkölinja-autojen tapauksessa. Tutkimukset, joista tehtiin johtopäätöksiä eivät olleet vertailukelpoisia, koska esimerkiksi ajosyklit ja ajoneuvojen mallit vaihtelivat parametrien osalta. Täten tutkimusten pohjalta ei voi suoraan määrittää esimerkiksi parhaiten soveltuvaa energianhallintastrategiaa, mutta opinnäytetyössä käsitellyt tutkimukset voivat toimia suuntaa antavina siten että mitä energianhallintastrategioita kannattaa tutkia kaupunkilinja-autojen tapauksessa tarkemmin.

Range extendereillä varustettujen kaupunkilinja-autojen tutkimuksen jatkamismahdollisuudet:

- Eri energianhallintastrategioiden kattava simulointi samassa ajosyklissä vertaillen eri strategioita
- Energianhallintastrategioiden vertailu oikeassa elämässä tapahtuvilla testeillä

- Energianhallintastrategian testaus range extenderillä varustetulla sähkölinja-autolla Suomen talviolosuhteissa

Range extender -laitteistojen yleistyessä niitä koskevat tutkimukset tulevat entistä enemmän ajankohtaiseksi.

LÄHTEET

- Ambaripeta, H P. 2015. Range Extender Development For Electric Vehicle Using Engine Generator Set. The Graduate Faculty of The University of Akron. Saatavissa: https://etd.ohiolink.edu/apex-prod/rws_etd/send_file/send?accession=akron1424202532. Viitattu: 4.2.2021
- Beckers, C. Besselink, I. Frints, J J M. Nijmeijer, H. 2019. Energy Consumption Prediction For Electric City Buses. Paper number ITS-SP181313th ITS European Congress. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/335542182_Energy_Consumption_Prediction_for_Electric_City_Buses. Viitattu: 22.1.2021
- Bouwmann, R. 2019. Fuel-Cell Range Extender for Electric Buses. Saatavissa: <https://zenodo.org/record/3631293/files/D6.2.pdf?download=1>. Viitattu: 10.4.2021
- Bohn, D. 2005. Micro Gas Turbine and Fuel Cell – A Hybrid Energy Conversion System with High Potential. Saatavissa: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Educational%20Notes/RTO-EN-AVT-131/EN-AVT-131-13.pdf>. Viitattu: 24.2.2021
- Buchmann, I. 2021. BU-1003a: Battery Aging in an Electric Vehicle (EV). Saatavissa: https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_1003a_battery_aging_in_an_electric_vehicle_ev. Viitattu: 2.4.2021
- Chen, Z. Xiong, R. Wang, K. Jiao, B. 2015. Optimal Energy Management Strategy of a Plug-in Hybrid Electric Vehicle Based on a Particle Swarm Optimization Algorithm. Saatavissa: <https://ideas.repec.org/a/gam/jeners/v8y2015i5p3661-3678d48929.html>. Viitattu: 3.3.2021
- Chen, J. Wu, J. Wu, X. Du, J. 2014. Study on energy management strategy based on DP for range extended electric bus in Chinese driving cycles. 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.centria.fi/document/6941152>. Viitattu: 8.2.2021.
- Chernykh, A. 2019. Data Analysis Of Electrical Energy Consumption Of Electric Buses. Tampere. Tampere University. Electrical Engineering. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/117215/ChernykhAleksandr.pdf?sequence=2>. Viitattu: 22.1.2021
- Dickinson, D. Nasri, M. 2014. Range Extender Vehicle Concept Based on High Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell. 2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER) Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6844106?tp=&ar-number=6844106&refinements%3D4274155644%26queryText%3DNasri,%20M>. Viitattu: 13.2.2021
- Du, J. Chen, J. Song, Z. Gao, M. Ouyang, M. 2017. Design method of a power management strategy for variable battery capacities range-extended electric vehicles to improve energy efficiency and cost-effectiveness. Energy Volume 121(15), 32–42 Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.centria.fi/science/article/pii/S036054421631934X>. Viitattu: 2.3.2021
- Eckert, P. 2019. Results from demonstration of the range extender. Saatavissa: <https://giantleap.eu/?p=361>. Viitattu: 19.4.2021

- ENGIRO GmbH. 2021. New 40 kW Range Extender for Light and Heavy Duty Vehicles. Saatavissa: <https://www.engiro.de/en/news/2016/article/new-40-kw-range-extender-for-light-and-heavy-duty-vehicles>. Viitattu: 15.4.2021
- Fischer, H. 2019. Giantleap Improves Automation of Non-polluting Transportation with Lifetime Extension of Automotive PEM fuel cells. Saatavissa: <https://giantleap.eu/wp-content/uploads/2020/02/D7.7.pdf>. Viitattu: 14.2.2021
- Gallet, M. Massier, T. Hamacher T. 2018. Estimation of the energy demand of electric buses based on real-world data for large-scale public transport networks. Applied Energy Volume 230(15), 344–356. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.centria.fi/science/article/pii/S030626191831256X>. Viitattu: 25.1.2021
- Gallo, J-B. Bloch-Rubin, T. Tomić, J. 2014. Peak Demand Charges and Electric Transit Buses. U.S. Department of Transportation Federal Transit Administration. Saatavissa: <https://calstart.org/wp-content/uploads/2018/10/Peak-Demand-Charges-and-Electric-Transit-Buses.pdf>. Viitattu: 15.1.2021
- Gao, Z. Lin, Z. LaClair, T, J. Liu, C, J M. Birky, A K. Ward, J. 2017. Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service. Energy Volume 122(1), 588–600. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.centria.fi/science/article/pii/S0360544217301081>. Viitattu: 25.1.2021
- Gao, M. Du, J. 2016. Design method of energy management strategy for range-extended electric buses based on convex optimization. Power Engineering and Renewable Energy Technologies. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.centria.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7884249>. Viitattu: 19.1.2021
- Guaitolini, S V M. Yahyaoui, I. Fardin, J F. Encarnação, L F. Tadeo, F. 2018. A review of fuel cell and energy cogeneration technologies. The 9th International Renewable Energy Congress (IREC 2018). Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.centria.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8362573>. Viitattu: 22.3.2021
- Göhlich, D. Jefferies, D. Fay, T-A. Lauth, E. 2018. Design of urban electric bus system. Design Science, Volume 4, 2018, e15. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/326875120_Design_of_urban_electric_bus_systems. Viitattu: 28.1.2021
- HILTech Developments Limited. 2000. The use of Micro turbine in hybrid electric vehicles. Saatavissa: <https://www.bioturbine.org/Publications/PDF/microturbine-01-HILTECH.pdf>. Viitattu 25.1.2021
- Hmidi, M E. Ben Salem, I. El Amraoui, L. 2019. Analysis of rule-based parameterized control strategy for a HEV Hybrid Electric Vehicle. 2019 19th international conference on Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering (STA). Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.centria.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8717250>. Viitattu: 3.3.2021
- Haryadi, G D. Haryanto, I. Pramaishella, S N.I. Santosa, S P. 2019. Modelling and Optimization of Energy Range Extended Electric Bus Strategy Management System Using Dynamic Programming. 2019 6th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT). Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.centria.fi/document/8994022>. Viitattu: 25.2.2021

- He, H. Wang, Y. Li, J. Dou, J. Lian, R. Li, Y. 2020. An Improved Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles Integrating Multi-states of Vehicle-Traffic Information. IEEE Transactions on Transportation Electrification. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.centria.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9336725>. Viitattu: 19.3.2021
- Hymove. 2017. Hydrogen fuel cell power systems. Saatavissa: <https://www.hymove.nl/products/>. Viitattu 15.3.2021
- İnci, M. Büyük, M. Hakan, M D. İlbeyc, G. 2020. A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects. Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 137, March 2021, 110648. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032120309321>. Viitattu: 2.3.2021
- Jensen, H-C. Schaltz, E. Member, IEEE. Koustrup, P S. Andreasen, S J. Kær, S K. 2013. Evaluation of Fuel-Cell Range Extender Impact on Hybrid Electrical Vehicle Performance. IEEE Transactions on vehicular technology, Vol. 62(1). Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.centria.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6302225>. Viitattu: 11.3.2021
- Lajunen, A. 2012. Development Of Energy Management Strategy For Plug-in Hybrid City Bus. School of Engineering, Aalto University. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.centria.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6243456>. Viitattu 10.2.2021
- Lajunen, A. 2013. Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses. Volume 38, January 2014, 1–15. Saatavissa: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.centria.fi/science/article/pii/S0968090X13002234>. Viitattu: 11.1.2021
- Lehtinen, A. Kanerva, O. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä. 2017. Selvitys sähköbussien edistämiseksi suomalaisilla kaupunkiseuduilla. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2017-21_selvitys_sahkobussien_web.pdf. Viitattu: 26.2.2021
- Li, J. Jin, X. Xiong, R. 2017. Multi-objective optimization study of energy management strategy and economic analysis for a range-extended electric bus. Applied Energy Volume 194(15), 798–807 Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261916315100>. Viitattu: 8.3.2021
- Liu, W. He, H. Wang, Z. 2015. A Comparison Study of Energy Management for A Plug-in Serial Hybrid Electric Vehicle. CUE2015-Applied Energy Symposium and Summit 2015: Low carbon cities and urban energy systems. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021630128X>. Viitattu: 13.3.2021
- Loop energy. eFlow Data Sheet NA-rev.DS201023.1NAEN. Saatavissa: <https://loopenergy.com/wp-content/uploads/2020/10/eFlow-Data-Sheet-NA-rev.DS201023.1NAEN.pdf>. Viitattu: 12.4.2021
- Ma, X. Miao, R. Wu, X. Liu, X. 2020. Examining influential factors on the energy consumption of electric and diesel buses: A data-driven analysis of large-scale public transit network in Beijing. School of Transportation Science and Engineering, Beijing Key Laboratory for Cooperative Vehicle Infrastructure System and Safety Control, Beihang University. Saatavissa: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.centria.fi/science/article/pii/S0360544220323033>. Viitattu: 21.1.2021

- Maia, R. Mendes, J. Araújo, R. Silva, M. Nunes, U. 2020. Regenerative braking system modeling by fuzzy Q-Learning. Volume 93, August 2020, 103712. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.centria.fi/science/article/pii/S0952197620301354#!> Viitattu: 6.2.2021
- Mallon, K R. Assadian, F. Fu, B. 2017. Analysis of On-Board Photovoltaics for a Battery Electric Bus and Their Impact on Battery Lifespan. *Energies* 2017, 10(7), 943. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/7/943>. Viitattu: 3.3.2021
- Mottershead, D. 2021. MAHLE REX Presentation_September 2015. Yksityinen sähköposti. 18.1.2021. Viestin saaja Pekka Linna.
- MRCagney. 2017. Electric Bus Technology Transport Research Report. Saatavissa: http://www.mrcagney.com/uploads/documents/MRC_Electric_Bus_Report_11072017.pdf. Viitattu: 18.1.2021
- Oulun linja-autoliikenteen käyttövoimaselvitys. 2018. Saatavissa: <https://www.ouka.fi/documents/6584597/0/Oulu+k%C3%A4ytt%C3%B6voimaselvitys+20190109.pdf/4e482613-fec1-4ce8-8f04-cc634fa75c0d>. Viitattu: 15.2.2021
- Optimal Group Australia. Drive Solution Range Extender. Saatavissa: <https://www.optimal-group.com.au/products/drive-solution-range-extender/>. Viitattu: 15.3.2021
- PEEC-POWER. 2017. Range extender. Saatavissa: https://peec-power.com/technology_range_extender.html. Viitattu: 14.4.2021
- Panday, A. Bansal, H O. 2014. A Review of Optimal Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicle. *International Journal of Vehicular Technology*. Volume 2014. Saatavissa: <https://www.hindawi.com/journals/ijvt/2014/160510/>. Viitattu: 16.3.2021
- Pihlatie, M. Kukkonen, S. Halmeaho, T. Karvonen, V. Nylund, N. 2014. Fully electric city buses – The viable option. *IEEE International Electric Vehicle Conference*. 1–9. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisut/muut/2014/OA-Fully-Electric.pdf>. Viitattu: 21.1.2021
- Reksowardojo, I K. Putra, G N. Santoso, W B. Purwadi, A. Nurprasetyo, I P. 2018. Development of Engine Power Capacity Calculation Method for Range Extender and Case Study in Medium-Size Electric Bus. 2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT). Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.centria.fi/document/8628385>. Viitattu: 11.2.2021
- Rogge, M. Rothgang, S. Uwe Sauer, D. 2013. Operating Strategies for a Range Extender used in Battery Electric Vehicles. *Electrochemical Energy Conversion and Storage Systems Group. 2013 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6671695>. Viitattu: 19.1.2021
- Schranagl, P. Moser, D. Langthaler, P. Re, L D. 2016. Quasi-optimal Energy Management of Range Extender Buses in Presence of Changing Traffic Conditions. 2016 IEEE Conference on Control Applications (CCA). Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.centria.fi/document/7587826>. Viitattu: 11.3.2021

- Sustainable bus. 2020. BYD in Finland, what a debut! 106 e-buses ordered by Nobina (including 15-meter models). Saatavissa: <https://www.sustainable-bus.com/news/byd-finland-electric-buses-nobina/>. Viitattu: 15.4.2021
- Sustainable bus. 2019. Electric buses in North Europe foreseen to rise from 56 to 467 in 2019. Saatavissa: <https://www.sustainable-bus.com/news/electric-buses-in-north-europe-to-rise-from-56-to-467-in-one-year/>. Viitattu: 15.4.2021
- Suh, I S. Lee, M L. Kim, J. Oh, S T. Won, J-P.2015 Design and experimental analysis of an efficient HVAC (heating, ventilation, air-conditioning) system on an electric bus with dynamic on-road wireless charging. Energy Volume 81(1), 262–273. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544214014054>. Viitattu: 21.1.2021.
- Shah, R M R A. McGordon, A. Amor-Segan, M. Jennings, P. 2013. Micro Gas Turbine Range Extender - Validation Techniques for Automotive Applications. IET Hybrid and Electric Vehicles Conference 2013 (HEVC 2013). Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6728833>. Viitattu: 21.2.2021
- Symbio. Stackpack. Saatavissa: <https://www.symbio.one/en/modules-2/>. Viitattu 15.3.2021
- Trailer. Bus solution specification sheet. Saatavissa: <https://www.trailar.co.uk/products>. Viitattu: 20.3.2021
- Un-Noor, F. Padmanaban, S. Mihet-Popa, L. Nurunnabi Mollah, M. Hossain, E. 2017. A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development. Energies 2017, 10(8), 1217. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/8/1217>. Viitattu: 20.3.2021
- Virsik, R. Heron, A. 2013. Free piston linear generator in comparison to other rangeextender technologies. Institute of Vehicle Concepts, German Aerospace Center. 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27). Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.centria.fi/document/6914925>. Viitattu: 2.2.2021
- Walters, M. Kuhlmann, A. Ogrzewalla, J. 2015. Fuel Cell Range Extender for Battery Electric Vehicles. International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS). Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.centria.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7101509>. Viitattu: 19.1.2021
- Wang, J. Huang, Y. Xie, H. Tian, G. 2014. Driving Pattern Recognition and Energy Management for Extended Range Electric Bus. 2014 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.centria.fi/document/7007052>. Viitattu: 17.3.2021
- Wahono, B. Santoso, W B. Nur, A. Amin. 2015. Analysis of range extender electric vehicle performance using vehicle simulator. Energy Procedia Volume 68, April 2015, Pages 409–418. Saatavissa: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.centria.fi/science/article/pii/S1876610215005780>. Viitattu: 22.2.2021

- Wu, X. Hu, C. Du, J. Ding, N. 2013. The Economic Analysis of a Plug-in Series Hybrid Electric Vehicle in Different Energy Management Strategy*. 2013 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6671716>. Viitattu: 21.3.2021
- Wu, X. Hu, C. Chen, J. 2014. Energy Flow Chart-Based Energy Efficiency Analysis of a Range-Extended Electric Bus. *Mathematical Problems in Engineering*. Volume 2014. Saatavissa: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2014/972139/>. Viitattu: 5.2.2021
- Wu, G. Qi, X. Barth, M. Boriboonsomsin, K. 2016. Advanced Energy Management Strategy Development for Plug-in Hybrid Electric Vehicles. A Research Report from the National Center for Sustainable Transportation. Saatavissa: https://escholarship.org/content/qt7q40f9wc/qt7q40f9wc_noSplash_024b01873af17b0ccccca961e94ac8fd.pdf?t=pnhod8. Viitattu: 2.3.2021
- Wu, X. Lu, L. 2012. Simulation Research of Energy Management Strategy for Range Extended Electric Bus. 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee.org.ezproxy.centria.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6422672>. Viitattu: 16.2.2021
- Xie, H. Tian, G. Huang, Y. Zhan, L. 2013. A four stage energy control strategy and fuel economy simulation for extended-range electric city bus. 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27). Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6914974/authors#authors>. Viitattu: 4.3.2021
- Xu, L. Yang, F. Hu, M. Li, J. Ouyang, M. 2012. Comparison of energy management strategies for a range extended electric city bus. *Proceedings of the 31st Chinese Control Conference*. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.centria.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6391149>. Viitattu: 6.4.2021
- Xu, L. Yang, F. Li, J. Ouyang, M. Hua, J. 2012. Real time optimal energy management strategy targeting at minimizing daily operation cost for a plug-in fuel cell city bus. *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 37, Issue 20, October 2012, Pages 15380–15392. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319912016515>. Viitattu: 1.4.2021
- Xue, Q. Zhang, X. Teng, T Zhang, J. Feng, Z. Lv, Q. 2020. A Comprehensive Review on Classification, Energy Management Strategy, and Control Algorithm for Hybrid Electric Vehicles. *Energies* 2020, 13(20), 5355. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/20/5355>. Viitattu: 5.3.2021
- Yang, Y. Zhang, Y. Tian, J. Li, T. 2020. Adaptive real-time optimal energy management strategy for extender range electric vehicle. *Energy* Volume 197, 15 April 2020, 117237. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544220303443?via%3Dihub>. Viitattu: 11.4.2021
- Zenith, F. 2020. Giantleap Range Extender Enters Service. Saatavissa: <https://giantleap.eu/?p=395>. Viitattu: 19.4.2021

TAULUKKO 3. Tutkimuksia range extenderillä varustettujen sähkölinja-autojen energiahallintastrategioista.

Tekijä	Kohde	Range extender	Energianhallintastrategiat	Johtopäätökset
Wu ym. 2014	Range extenderillä varustettu sähkölinja-auto	Diesel polttomoottori ja generaattori	CD-CS ja BL	Tutkimuksessa kahden ei-optimoidun energiahallintastrategian välillä, CD-CS strategialla oli parempi voimansiirron energiatehokkuus kuin BL strategialla. He suosittelevat CD-CS strategiaa Harbin kaupungin ajo syklille.
Wu & Lu 2012	Range extenderillä varustettu sähkölinja-auto, sarja kokoonpanolla oleva hybridi.	Diesel polttomoottori ja generaattori (45 kW)	CD-CS ja BL	Kiinalaisen kaupunkilinja-auton toimintaolosuhteissa. Range extenderin toimiessa kuormitusta seuraavalla periaatteella, tietyissä olosuhteissa CD-CS strategialla oli parempi ekonomia kuin BL strategialla.
Xu, Yang, Hu, Li & Ouyang 2012	Range extenderillä varustettu sähkölinja-auto	Polttomoottori ja generaattori (35 kW)	DP, CD-CS ja BL	Pienin teoreettinen kulutus saatiin DP strategialla, mutta he suosivat CD-CS strategiaa tälle tietylle voimansiirtolinjalle. CD-CS strategiassa range extender suosii (power follow) eli tehonseuranta tilaa, jolla saatiin pienempi kulutus jatkuvan tasaisentehon tilan sijaan.
Gao & Du 2016	Range extenderillä varustettu sähkölinja-auto	Polttomoottori ja generaattori (55 kW)	Konveksiin optimointiin perustuva algoritmi	Tutkimuksessa esitetty konveksiin optimointiin perustuva optimointi algoritmi, joka oli suunniteltu Harbin kaupungin ajo syklille. Tämän

				tyyppistä energianhallintastrategiaa pystytään soveltamaan range extenderillä varustettuun sähkölinja-autoon ja se sopii täyttämään voimansiirrot suorituskyvyn vaatimukset.
Chen, Wu, Wu & Du 2014	Range extenderillä varustettu sähkölinja-auto	Diesel polttomoottori ja generaattori (55 kW)	DP	DP strategialla pystytään käyttämään akun varaus kokonaan ja pitämään akun varausaste järkevällä tasolla.
Chen ym. 2015	Range extenderillä varustettu sähkölinja-auto	Diesel Polttomoottori (82 kW ja generaattori (50 kW)	DP ja sääntöihin perustuva, δ SOC strategia	Tutkimuksen tuloksista todettiin, että ehdotetun strategian tehokkuus on korkealla tasolla. Ottaen huomioon reaaliaikaisen suorituskyvyn energianhallintastrategia on ideaalinen tutkimuksessa olevalle range extenderillä varustetulle sähkölinja-autolle.
Xie, Tian, Huang & Zhan 2013	Range extenderillä varustettu kaupunki sähkölinja-auto	Bensiini polttomoottori ja generaattori	CD-CS ja neljävaiheinen energiahallintastrategia	Simulaatiosta saatujen tuloksien mukaan neljä vaiheinen energianhallintastrategialla oli parempi polttoaine ekonomia kuin CD-CS strategialla.
Du, Chen, Song, Gao & Ouyang 2017	Range extenderillä varustettu sähkölinja-auto	Polttomoottori (82 kW) ja generaattori (50 kW)	CD-CS, DP ja VB-PSR-RB strategia	Tutkimuksessa todettiin, että ehdotetulla VB-PSR-RB strategialla perusolosuhteissa, energiatehokkuus ja kustannustehokkuus paranivat hiukan. Energiansäästösuhde oli samantyyppinen kuin DP strategialla, ehdotetulla strategialla energiansäästösuhde oli noin 8 % pienempi kuin CD-CS strategialla.

Wang, Huang, Xie & Tian 2014	Range extenderrillä varustettu sähkölinja-auto	Polttomoottori ja generaattori	ECMS ja CD-CS	Tutkimuksessa ehdotettu ECMS energianhallintastrategiaa käytettiin yhdessä ajomallin tunnistamisen kanssa ajoneuvosimulaatiossa ja verrattiin CD-CS strategiaan polttoaineenkulutuksen suhteen. Ehdotetulla strategialla saavutettiin 49 % pienempi polttoaineenkulutus kuin CD-CS strategialla.
Haryadi, Haryanto, Prmaishella & Santosa 2019	Range extenderrillä varustettu sähkölinja-auto	Polttomoottori ja generaattori (50 kW)	DP	Tutkimuksessa optimoitiin energianhallintastrategia käyttäen dynaamista ohjelmointia (DP) Japanilaisessa ajosykliissä. Tutkimuksessa saatiin tulokseksi sähkömoottorin tarvitsema teho, akusta otettu teho ja range extenderin tuottama teho ja polttoaineen kulutus ajosykliissä.
Li ym. 2016	Range extenderrillä varustettu sähkölinja-auto	Diesel polttomoottori ja generaattori (80 kW)	DP	Tutkimuksessa todettiin, että strategia voi tuottaa tärkeän lähtökohdan suunnitteluparametreille ja energianhallintastrategioille. Se voi toimia vertailuna todellisessa käytössä oleville energianhallintastrategioille.
Xu, Yang, Li, Ouyang & Hua 2012	Ladattava polttokennojärjestelmällä varustettu kaupunkisähkölinja-auto	Protoninvaihtomembraanipolttokenno (40 kW)	DBSD, CD-CS ja DP	Tutkimuksessa esitettiin reaaliaikainen energianhallintastrategia ja sillä saavutettiin pienempi polttoaineen kulutus kuin CD-CS strategialla.

Schrangl, Moser, Langthaler, & Re 2016	Range extende- rillä varustettu sähkölinja-auto	Diesel poltto- moottori ja gene- raattori (36 kW)	MILP (Mixed in- teger linear program- ming) ja MPC	Tutkimuksessa esitettiin reaaliai- kainen energiatehokas energian- hallintastrategia sarjahybridi ajo- neuvolle. Strategian mahdollinen hyödyntämiskohde on kaupunki- linja-autot, joiden tapauksessa tie- dot menneistä ajosykleistä tiede- tään.
---	---	---	---	---