

Droonien langattomat latausjärjestelmät ja niiden suunnittelunäkökohdat

TURUN YLIOPISTO
Tietotekniikan laitos
TkK-tutkielma
Joulukuu 2025
Sara Turja

TURUN YLIOPISTO
Tietotekniikan laitos

SARA TURJA: Droonien langattomat latausjärjestelmät ja niiden suunnittelunäkökohdat

TkK-tutkielma, 23 s.
Joulukuu 2025

Droonien erilaiset käyttökohteet vaativat pitkiä lentoaikoja ja suurta energiankulutusta. Langattomat latausteknologiat voivat mahdollistaa droonien lataamisen kesken operaatioiden. Latausjärjestelmien suunnittelussa on huomioitava useita droonille ominaispiirteisiä vaatimuksia, kuten droonin paino, akkutyypin rajoitteet ja sensorien tarkkuus laskeutumisessa. Tässä kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan droonien lähialueen langattomien latausjärjestelmien teknologioita, haasteita ja optimointia. Katsauksen perusteella keskeisimpiä haasteita latausjärjestelmien toteutuksissa ovat muun muassa riittävän hyötysuhteen ja keveän toteutuksen aikaansaaminen. Järjestelmien optimointiin voidaan vaikuttaa monilla eri tekijöillä. Tärkeää vaikuttaisi olevan kuitenkin se, että droonin ja sen käyttökohteen vaatimukset otetaan huomioon suunnittelussa, sillä latausjärjestelmä tulisi räätälöidä juuri näiden ominaisuuksien mukaan.

Asiasanat: drooni, langaton latus, induktiivinen tehonsiirto, kapasitiivinen tehonsiirto

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Droonien energialähteet ja energiankulutus	4
2.1	Energialähdeteknologiat drooneissa	4
2.2	Droonien energiankulutus	6
3	Langattomat latausteknologiat	7
3.1	Teknologioiden luokittelu	7
3.2	Kapasitiivinen tehonsiirtojärjestelmä	8
3.3	Induktiivinen tehonsiirtojärjestelmä	9
4	Droonien langattomien latausjärjestelmien ratkaisuja	12
4.1	Kelat ja levyparit	13
4.2	Kompensaatiotopologiat	15
4.3	Latausjärjestelmien tehoelektroniikka	17
4.4	Sähkömagneettinen suojaus	18
4.5	Voimajohdot energianlähteenä	18
5	Pohdinta	20
6	Yhteenveto	22
	Lähdeluettelo	24

Termistö

CPT Capacitive Power Transfer

IPT Inductive Power Transfer

RW Rotary-Wing

1 Johdanto

Droonien toiminnan automatisoinnin myötä on niille kehitetty uusia mahdollisia käyttökohteita. Autonomisia drooneja voitaisiin käyttää esimerkiksi etsintä- ja pelastustehtävissä [1] sekä vaikeasti saavutettavien valvontakohteiden, kuten siltojen tai mastojen, rakenteiden tarkastuksissa [2], [3]. Droonien autonomiseen toimintaan liittyy kuitenkin vielä merkittäviä haasteita. Rungas energiankulutus on niistä yksi suurimmista [4]. Tarpeeksi tehokkaan mutta kevyen energialähteen puuttuessa voisi droonin itsenäinen lataus olla ratkaisuna lyhyen lentoajan pidentämiseksi. Drooni voisi kesken tehtävänsä pysähtyä latautumaan, minkä jälkeen sen olisi jälleen mahdollista jatkaa lentoaan. Langallisen latausyhteyden fyysisen kytkennän mahdollistamiseksi olisi droonin laskeuduttava ja asemoiduttava hyvin tarkasti. Latauksen toteuttaminen langallisesti poistaisi tarpeen fyysiselle kytkennälle. Langaton latausta voitaisiinkin hyödyntää droonien lataukseen, esimerkiksi latauspisteiden muodossa tai voimalinjoja hyödyntämällä.

Tämän tutkielman tarkoituksena on selvittää, mitä langattomia lähikentän latausteknologioita droonien lataukseen on kehitetty ja mitä haasteita teknologioiden käyttöön liittyy. Tutkielmassa tarkastellaan myös, miten langattomia lähikentän latausteknologioita voidaan optimoida droonien käyttöön. Edellä mainitut käyttökohteet koskevat pääosin moniroottorisia drooneja (engl. Rotary-Wing, RW), joten tutkielmassa keskitytään tarkastelemaan tutkimuskysymyksiä tämän droonimallin

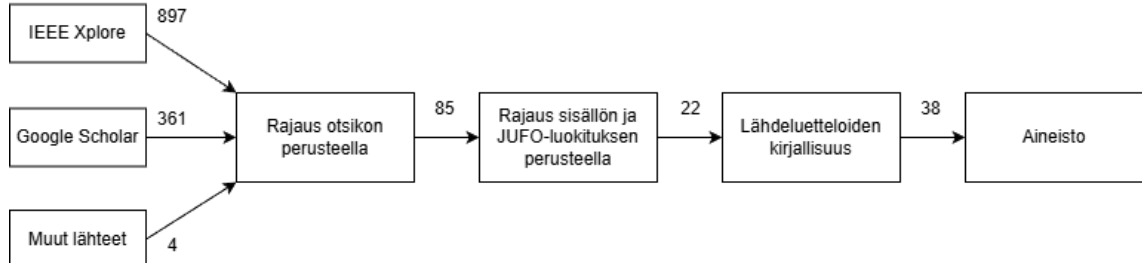
näkökulmasta. Tekstissä termiä drooni käytetään termin moniroottorinen drooni kanssa samassa merkityksessä. Tutkimuskysymksiä on kolme:

TK1 Minkälaisia langattomia latausteknologioita voidaan hyödyntää drooneissa?

TK2 Mitkä ovat keskeiset haasteet droonien langattomissa lähikentän latausteknologioissa?

TK3 Miten langattomia lähikentän latausteknologioita voidaan optimoida droonien käyttöön?

Tutkielma on kirjallisuuskatsaus, jossa hyödynnetään alan suurimpia tietokantoja sekä muuta kirjallisuutta ja julkaisuja. Aineistohakuun valittuja tietokantoja ovat Google Scholar ja IEEE. Muut lähteet koostuvat lähtökohtaisesti muista kirjallisuuskatsauksista, konferenssijulkaisuista sekä alan hankkeiden julkaisuista.



Kuva 1.1: Aineistohakua havainnoillistava kaavio

Hakulauseissa käytettyjä tärkeimpiä avainsanoja olivat "UAV", "drone", "rotary-wing", "wireless charging", "WPT", "wireless power transfer", "capacitive power transfer", "inductive power transfer" ja "energy source". Hakusanoja yhdisteltiin OR- ja AND- operaattoreilla. Hakutulokset käytiin läpi otsikkotasolla ja pois karsittiin ne tulokset, jotka eivät otsikon perusteella liittyneet tutkielman aihealueeseen. Lähteitä karsittiin myös julkaisujen luotettavuutta arvioimalla. Tässä apuna käytettiin JUFO-luokitusta. Lähteellä tuli olla JUFO-luokituksenaan vähintään 1. taso. Muussa tapauksessa se jätettiin kirjallisuuskatsauksesta pois. Kuvassa 1.1

havainnollistetaan prosessia kaaviolla. Kuvassa muut lähteet tarkoittavat aiemmin mainittuja hankkeiden julkaisuja. Lopullisen aineiston koko kasvoi hyödyntämällä aineistohaussa löytyneiden julkaisujen lähdeluetteloita. Sama seulonta suoritettiin myös näille julkaisuille.

Tutkielman toisessa luvussa perehdytään droonien energialähteisiin ja energiankulutuksen haasteisiin. Kolmannessa luvussa esitellään langattomien latausteknologioiden periaatteita. Neljännessä luvussa käsitellään droonien langattoman latauksen haasteita. Lisäksi vertaillaan ehdotettuja ratkaisuja ja langattoman latauksen optimointistrategioita. Tutkielman viimeiset luvut ovat pohdinta ja yhteenveto.

2 Droonien energialähteet ja energiankulutus

2.1 Energialähdeteknologiat drooneissa

Drooneissa voidaan hyödyntää useita eri energialähdeteknologioita. Varsinkin kiinteäsiipisille drooneille (engl. fixed-wing drone), eli drooneille jotka hyödyntävät sisäänrakennettujen siipien nostovoimaa [4], on vaihtoehtoja monia [5]. Niissä on mahdollista hyödyntää polttomoottoreita ja rakenteisiin voidaan integroida aurinkokennoja. RW-drooneissa koko, paino ja käyttökohteet rajaavat mahdollisia energialähteitä. Suosituimmat energialähteet tämän mallisille drooneille ovat erityyppiset akut [5], [6], [7].

Townsend ym. [5] vertaili yhdeksää eri akkutyyppeä ominaisuuksien, kuten energiatiheden (engl. Energy Density), tehotiheyden (engl. Power Density) ja käyttöker-taiän (engl. Cycle Life) mukaan. Energiatiheys kuvaa energiamäärää, joka on mahdollista varastoida akkuun sen massayksikköä kohti. Tehotiheys taas viittaa siihen määrään energiaa, jonka akku pystyy tietyllä hetkellä vapauttamaan sen massayksikköä kohti. Kummatkin ovat tärkeitä mittareita RW-droonien akkujen valinnassa. Suurella energiatihedellä voidaan minimoida akun paino ja maksimoida energiamäärä. Suuri tehotiheys on tärkeää, jotta droonilla on tarpeeksi voimaa lähteä len-

toon. Käyttökertaiän perusteella voidaan arvioida, kuinka usein akku on korvattava uudella.

Taulukossa 2.1 listataan Chittoor ym. [4] mainitsevat RW-drooneissa tyypillisimmin käytetyt akkutyypit. Akkutyypin tärkeimpien ominaisuuksien lukuarvoja on poimittu Townsend ym. [5] tekemästä vertailusta. Litiumpolymeeri- (Li-Po) ja litiumioniakkujen (Li-ion) energiatiheys on nikkelimetallihydridi- (NiMH) ja lyijyakkuihin (Pb-acid) verrattuna suuri. Tehotiheys ja käyttökertaikä sijoittuvat vertailussa keskitasolle. Näin ollen Li-Po- ja Li-ion-akut ovat ominaisuuksiltaan tasapainoisimpia akkutyypeistä. Haasteena on kuitenkin energiatheyden riittämättömyys droonien käyttötarkoituksiin.

Taulukko 2.1: Tyypillisimmät akkutyypit drooneissa

	Li-Po	Li-ion	NiMH	Pb-acid
Energiatiheys (Wh/kg)	100–265	100–265	60–120	30–40
Tehotiheys (W/kg)	245–430	250–340	250–1000	180
Käyttökertaikä	500	400–1200	180–2000	<350

Myös polttokennot ja eri energialähteitä yhdistelevät hybriditeknologiat ovat olleet tutkimuksen kohteina. Polttokennojen energiatiheys voi olla moninkertainen akkuihin verrattuna [8]. Tutkiakseen polttokennojen hyödyntämistä drooneissa Mizat ym. [9] korvasivat RW-droonin Li-Po-akun vetypolttokennolla (engl. Proton Exchange Membrane Fuel Cell). Järjestelmän suuremmalla painolla oli vaikutus saavutettuun suorituskykyyn. Lisäksi polttokennojen tehotiheys on huomattavasti pienempi kuin akuilla. Mizat ym. [9] päätyivät siihen tulokseen, ettei polttokennoja voida käyttää yksinään drooneissa, vaan hyödyntäminen edellyttäisi hybridijärjestelmän kehittämistä. Myös muut ovat tulleet siihen tulokseen, etteivät polttokennot yksinään ole optimaalisin energialähde RW-drooneille [7].

2.2 Droonien energiankulutus

Droonin operointi kuluttaa runsaasti energiaa, ja tällä hetkellä käytettävissä olevat energialähteet riittävät yleensä vain yhden, lyhyen, lentokerran ajaksi. Suurin energiakulu ovat droonin moottorit [7], jotka tuottavat tarvittavan nostovoiman lentoa varten. Droonin massa, nopeus ja liikkeen suunta sekä ympäristön olosuhteet [10], kuten tuulen suunta ja nopeus [11], ovat muutamia esimerkkejä energiankulutukseen vaikuttavista tekijöistä.

Vaihtelevien ympäristötekijöiden vuoksi droonin lennon tulee olla dynaamista. Sen pitää pystyä reagoimaan olosuhteiden nopeisiin muutoksiin, esimerkiksi tuulenpuuskiin. Suuri tehotehoisuus on tämän kannalta tärkeää. Toisaalta useisiin energiapiikkeihin mukautuminen edellyttää suurta energiatiheyttä ja kuten aiemmin todettiin, akkujen energiatiheys ei aina ole riittävä. Akun kulumista voidaan yrittää hidastaa muun muassa laskelmoimalla energiatehokkain reitti. Reitinlaskennan (engl. Path Planning) algoritmeissa käytetään energiankulutusmalleja (engl. Energy-Consumption Model) [10], joissa otetaan huomioon edellä lueteltuja muuttujia. Droonin ja ympäristön vuorovaikutus on kuitenkin monimutkainen yhtälö [10], mikä tekee mallien luomisesta haastavaa. Varsinkin droonin kiihtyvyyden ottaminen huomioon yksinkertaisissa malleissa on ollut vaikeaa [12]. Mallit eivät siis yksinään riitä energiankulutuksen haasteiden voittamiseen, mutta ne voivat olla apuna energiankulutuksen hallinnassa. Niiden avulla drooni voi esimerkiksi navigoida monen latausaseman välillä [11].

3 Langattomat latausteknologiat

3.1 Teknologioiden luokittelu

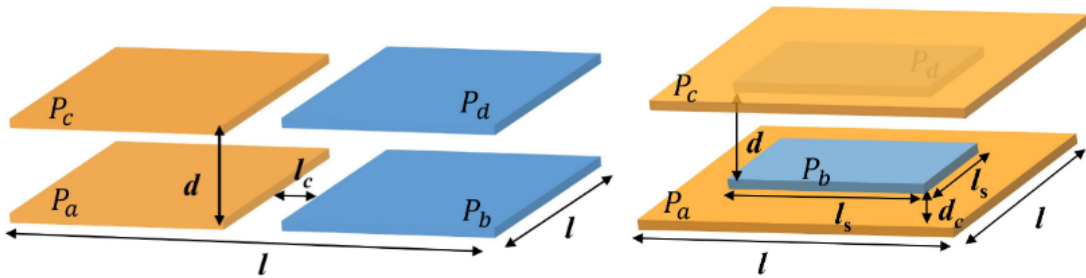
Droonien langattoman latauksen teknologioita on kehitetty monenlaisia. Teknologiat voidaan jakaa ryhmiin niiden ominaisuuksien mukaan. Usein jako tehdään toimintaetäisyyden perusteella lähialueen (engl. Near-Field) ja kaukoalueen teknologioihin (engl. Far-Field) [13], [14]. Ensimmäiseen ryhmään sisältyvät kapasitiivisen (engl. Capacitive Power Transfer, CPT) ja induktiivisen (engl. Inductive Power Transfer, IPT) tehonsiirron sovellukset. Jälkimmäiseen ryhmään voidaan luokitellaan muun muassa aurinkokennot (engl. PV-arrays) sekä lasersäteisiin (engl. laser beaming) ja mikroaaltoihin perustuva tehonsiirto (engl. Microwave Power Transmission). Myös erilaiset akunkestoja pitkittävät menetelmät, kuten akkujen pudottaminen (engl. Battery Dumping) ja ilmapvirtausten hyödyntäminen (engl. Gust Soaring) luokitellaan ajoittain kaukoalueen teknologioihin [4], [5], vaikka ne eivät olekaan varsinaisia latausteknologioita.

Menetelmistä eniten huomiota ovat saaneet edellä mainitut lähialueen latausteknologiat. Ne ovat vaikuttaneet lupaavimmilta latausmenetelmiltä, sillä tehonsiirron hyötysuhde on suurempi muihin menetelmiin verrattuna [4]. Lisäksi kaukoalueen latausmenetelmät ovat usein luonteeltaan sopimattomia moniin RW-droonien käyttötarkoituksiin. Näistä syistä tässä tutkielmassa käsitellään vain IPT:n ja CPT:n sovelluksiin perustuvia lähialueen langattoman latauksen menetelmiä. Menetelmis-

sä lähialue on senttimetrien luokassa, ja tehonsiirto rajoittuu kymmeneen kilowattiin [15]. Seuraavissa kappaleissa perehdytään CPT- ja IPT-latausjärjestelmien toimintaperiaatteisiin.

3.2 Kapasitiivinen tehonsiirtojärjestelmä

Tyypillisessä sähkömagneettista vuorovaikutusta hyödyntävässä latausjärjestelmässä on lähetin (engl. Transmitter) ja vastaanotin (engl. Receiver) joiden välisen tehonsiirron hyötysuhde pyritään maksimoimaan. Järjestelmien suunnittelupäätöksiä on monia. Suurpiirteisesti rakenne koostuu kuitenkin energialähteestä ja kuormasta, vaihto- ja tasasuuntaajista, kompensatioverkoista sekä kytkentälaitteista [16].



Kuva 3.1: Kapasitiivisen tehonsiirtojärjestelmän levyparit [17]. © 2021, IEEE.

Kapasitiivinen tehonsiirto perustuu vaihtelevalla sähkökentällä saavutettuun kytkentään (engl. Coupling). Järjestelmän rakenne seuraa edellä mainittua kokoonpanoa. Kytkentään käytetään yksinkertaisimmillaan kahta levyparia [13], [18]. Parien toinen puoli muodostaa lähttimen ja toinen vastaanottimen. Lähttimen ja vastaanottimen kytkennän voimakkuutta mitataan kytkentäkertoimella, johon vaikuttavat keskinäiskapasitanssi (engl. Mutual Capacitance) ja itsekapasitanssi (engl. Self-Capacitance) [16]. Kaksi erilaista kahden levyparin järjestelmää on havainnollistettu kuvassa 3.1. Vasemmalla puolella levyparit ovat sijoitettu horisontaalisesti vierekkäin (HCC), kun taas oikealla puolella levyparit ovat vertikaalisesti vierekkäin

(VCC). Kuvassa P_a ja P_b ovat lähettimen puolella kun taas P_c ja P_d ovat vastaanottimen puolella.

Kompensoinnilla tarkoitetaan järjestelmän komponenteissa syntyvän reaktanssin tasapainottamista toisilla komponenteilla, yleensä kondensaattoreilla ja keloilla. Kapasitiivisessa tehonsiirtojärjestelmässä reaktanssi syntyy levyparien välisestä sähkökentästä ja ilmenee vaihtovirran suunnanmuutoksen vastustuksena. Reaktanssin vaikutukset pyritään minimoimaan, jottei tehonsiirron hyötysuhde laskisi [16]. Kompensaatioverkkoa käytetään samalla virittämään vastaanottimen ja lähettimen resonanssitaajuuDET samansuuruisiksi, sekä tekemään järjestelmästä kuormituksen vaihteluun sopeutuvan.

Yleinen käsitys vaikuttaa olevan, että CPT:llä on muutamia etuja IPT:n verrattuna. Tärkeimpänä mainitaan yleensä se, että CPT perustuu sähkökentällä saatettuun tehonsiirtoon. Tästä syystä magneettikentän pyörrevirrat (engl. Eddy Currents) eivät aiheuta tehohäviöitä kuten IPT:ssä [18]. Lisäksi usein mainitaan järjestelmän keveys, osien edullisuus ja metallin läheisyyden sietokyky [14], [19].

Eduista huolimatta CPT:n perustuvissa langattomissa latausjärjestelmissä on suuria haasteita. Induktioon perustuviin latausjärjestelmiin verrattuna CPT-latausjärjestelmät ovat vielä uusia ja vähemmän tutkittuja [18]. CPT-järjestelmät ovat herkkiä sovituserheille [16]. Lisäksi jos levyjen etäisyys on liian suuri, teho laskee huomattavasti. Etäisyyden kasvaessa tarvitaan joko suurempi jännite tai korkeampi vaihtovirran taajuus [19]. Teknologian haasteet ovat hankaloittaneet drooneille toteuttamiskelpoisten järjestelmien kehittämistä.

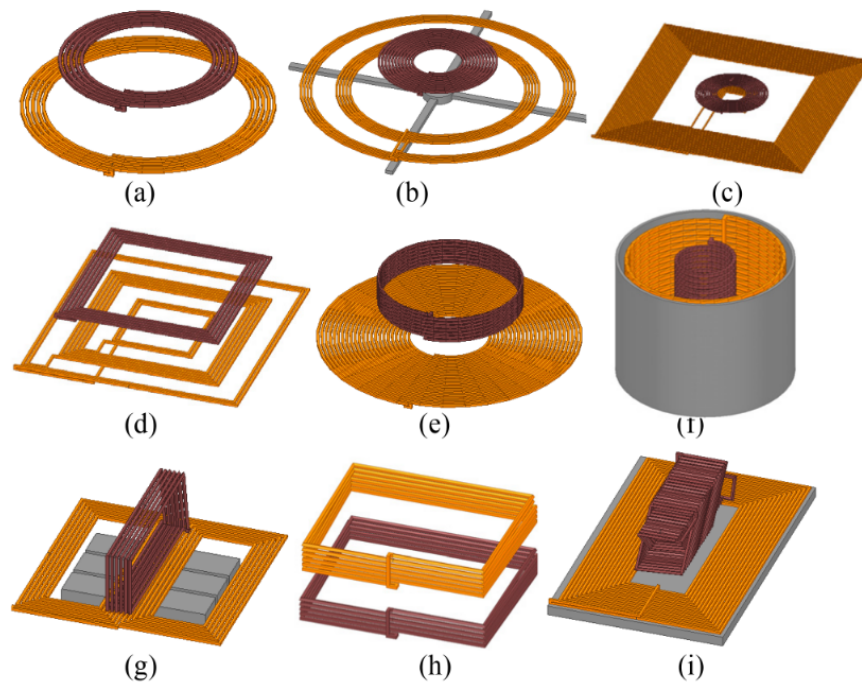
3.3 Induktiivinen tehonsiirtojärjestelmä

Induktiivinen tehonsiirto perustuu vaihtelevan magneettikentän toimintaan [4]. Magneettikenttä syntyy, kun vaihtovirta kulkee lähettimessä. Tällöin lähettimen ja vastaanottimen kelat kytkeytyvät ja tehonsiirtoa voi tapahtua. Kytkeytymisen voi-

makkuutta kuvataan edelleen kytkentäkertoimella [16]. Tässä tapauksessa se muodostuu keskinäisinduktanssin (engl. Mutual Inductance) ja itseinduktanssin (engl. Self-Inductance) suhteesta. Lähetin on kytkettynä virtalähteeseen ja vastaanotin kuormaan, eli droonin akkuun. Virtalähde voi olla joko vaihto- tai tasavirtalähde, sillä järjestelmissä on vaihtosuuntaaja, joka muuntaa virran korkeataajuisesti vaihtovirraksi [20]. Vastaavasti vastaanottimen puolella on tasasuuntaaja, joka muuntaa vaihtovirran tasavirraksi. Nämä komponentit ovat osa latausjärjestelmän tehoelektroniikkaa. Tasa- ja vaihtosuuntaajissa aiheutuu tehohäviötä, jota voidaan pienentää korkeammalla vaihtovirran taajuudella. Korkeampi taajuus kuitenkin lisää sähkömagneettista säteilyä, minkä vuoksi muut komponentit vaativat suojausta. [4]

Myös induktiivisessa tehonsiirtojärjestelmässä tarvitaan kompensointia. Vaihtovirran kulkiessa kelassa, magneettikentän synnyttämä reaktanssi vastustaa virran suunnan muutosta. Tyypillisesti induktiivisen tehonsiirtojärjestelmän yksinkertainen kompensointijärjestelmä toteutetaan liittämällä kondensaattori kelojen kanssa sarjaan tai rinnan [21]. Kompensaatiojärjestelmän avulla on myös tarkoitus saattaa vastaanotin ja lähetin resonanssiin virittämällä ne samalle resonanssitaajudelle [20]. Tällä voidaan saavuttaa suurempi tehonsiirtoetäisyys ja sovituserheen sietokyky. Resonanssia hyödyntävillä järjestelmillä onkin säännöllisesti suurempi hyötysuhde, kuin sitä hyödyntämättömillä järjestelmillä [22].

Vastaanottimen optimaalinen sijainti ja muoto on tärkeää tehonsiirron mahdollistamiseksi. Gordhan ym. [23] kokosivat artikkeliinsa kelojen eri malleja. Osa ke-loista on tasomaisia ja osa sylinterimäisiä, minkä lisäksi kelat vaihtelivat pyöreiden ja kulmikkaiden välillä. Kelat ovat mallinnettu kuvaan 3.2, jossa lähettimen väri on oranssi ja vastaanottimen ruseka. Vastaanottimen tulee yleisesti olla mahdollisimman pieni, sillä drooni halutaan pitää mahdollisimman kevyenä. IPT:n hyötysuhde riippuu vahvasti siitä, kuinka suuri kelojen keskipisteiden vertikaalinen etäisyys toisistaan on. Zhang ym. [13] näyttävät artikkelissaan, että hyötysuhde laskee radi-



Kuva 3.2: Kelojen malleja [23]. Kuva lisensoitu CC BY 4.0 International -lisenssillä. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

kaalisti, jos etäisyys kasvaa suuremmaksi, kuin kelojen halkaisija. Myös horisontaalisella etäisyydellä on suuri vaikutus hyötysuhteeseen [1]. Kelan muoto voidaan siis valita niin sovitusrvirheen sietokyvyn kuin painon, tehotiheyden, hajavirtauksen ja hyötysuhteen optimoinniksi [23].

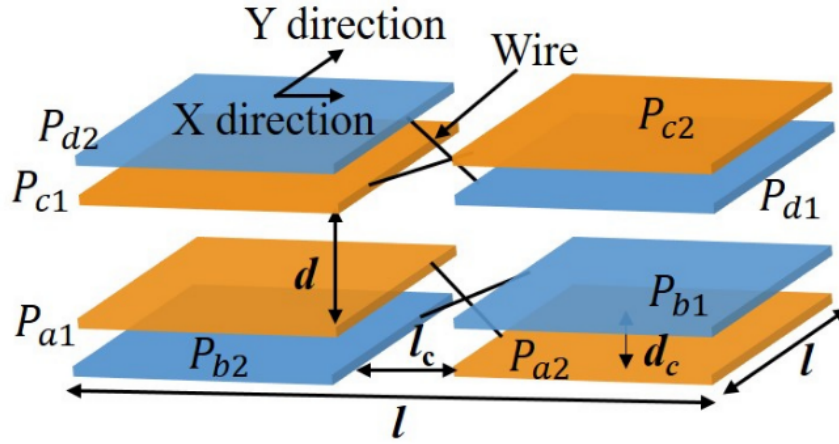
IPT:n perustuvan langattoman latausjärjestelmän tärkeimmät huomioonotettavat seikat ovat haasteiden perusteella sovitusrvirheen sieto sekä dronin keveyden varmistaminen.

4 Droonien langattomien latausjärjestelmien ratkaisuja

Seuraavaksi käsitellään ratkaisuja droonien langattomien latausjärjestelmien optimoimiseksi. Järjestelmien yleispiirteinen rakenne on sama eli IPT:n ja CPT:n peruseriaatteet pätevät kaikissa ratkaisuissa. Järjestelmiä voidaan kuitenkin optimoida eri tekijöiden kannalta. Aiemmin mainitut kelojen ja levyjen muodot sekä niiden lukumäärä ovat keskeisiä lähestymisnäkökulmia ratkaisuissa. Näillä suunnittelupäätöksillä vaikutetaan järjestelmän sovitusrvirheen ja etäisyyden sietokykyyn sekä tehonsiirron hyötysuhteeseen, mitkä ovat mainittu teknologioiden suurimpina haasteina. Lisäksi droonien kannalta järjestelmän koko ja paino tulee ottaa huomioon. Muita käsiteltyjä lähestymisnäkökulmia järjestelmien suunnitteluun ovat erilaiset kompensaatitopologiat, tehoelektronikka-valinnat ja sähkömagneettisen suojausten toteutustavat [4], [13].

Latausasemien rinnalle myös voimajohtojen hyödyntämistä droonien autonomiseen lataukseen on tutkittu jonkin verran. Euroopan unionin rahoittaman Drones4safety-hankkeen¹ osana tutkittiin sekä vaihto- että tasavirtalinjojen soveltuvuutta RW-droonien lataukseen. Tällaisessa ratkaisussa keskitytään vastaanottimen suunnitteluun, sillä lähetin koostuu sähkölinjoista.

¹Drones4safety-hankkeen verkkosivut: <https://drones4safety.eu/>



Kuva 4.1: Lomitetut levyparit [17], © 2021, IEEE.

4.1 Kelat ja levyparit

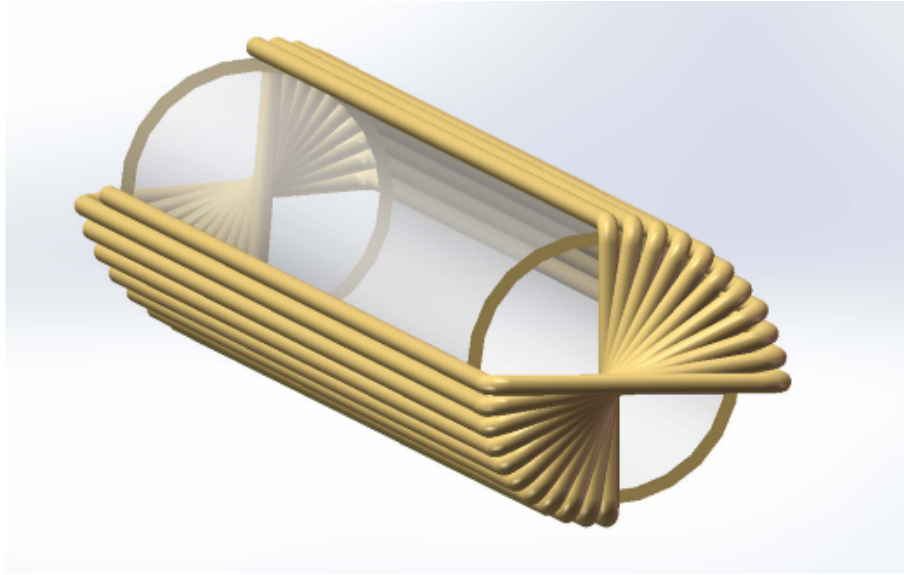
CPT-latausjärjestelmien kytkentää suunniteltaessa keskitytään suurimmaksi osaksi levyparien asetteluun suhteessa toisiinsa, eikä niinkään levyjen muotoon. Kappaleessa 3.2 kuvailtiin yksinkertaisia topologioita levypareille. Muita mahdollisia vaihtoehtoja ovat vain kahta tai kolmea levyä käyttävät topologiat sekä neljästä kahdeksaan tai useampaa levyä käyttävät topologiat [16]. Liu ym. [17] tarkastelivat kapasitiivista tehonsiirtojärjestelmää, joka hyödyntäisi toistensa väliin lomitettuja levyjä. Tämänkaltaisen rakenteen olisi mahdollista hyödyntää yhtäaikaaisesti suurta itse- ja keskinäiskapasitanssia. Lomitetut levyparit on havainnoillistettu kuvassa 4.1. Asettelun ansiosta kytkennän voimakkuus on suurempi, kuin esimerkiksi HCC-topologiassa. Lomiuttaminen kasvattaa levyjen päällekkäistä pinta-alaa, josta kytkennän vahvuus johtuu [17]. Liu ym. vertasivat perustopologioiden suoriutumista lomitettuun topologiaan verrattuna kokeellisesti. Suurimmalla hyötysuhteella suoriutui juurikin lomitettu topologia. Tutkimus on esimerkki siitä, miten levyjen asettelu vaikuttaa järjestelmän ominaisuuksiin.

IPT-järjestelmien kohdalla asettelun lisäksi kelojen muodolla on väliä. Tasomaiset pyöreät kelat on koettu tasapainoisimmaksi vaihtoehdoksi droneissa, sillä ne

ovat kevyitä ja syntyvä magneettivuo on symmetrinen [4], [24]. Munsu ym [24] päättivät käyttää resonanssia hyödyntävässä järjestelmässään ympyrämäisiä keloja. Vastaanottimen paino oli 168 gramma kun taas lähettimen paino 2.2 kilogrammaa. Artikkelin kokeellisessa osuudessa saavutettiin 86.77% hyötysuhde järjestelmälle. He tekivät myös analyysin siitä, missä kohtaa suurin tehohäviö ilmenee. Vastaanottimen ja lähettimen kytkennän osuus aiheutetusta tehohäviöstä oli suurin, 68% verrattuna vastaanottajapuolen tasasuuntaajan 18%:n ja lähettäjäpuolen vaihtosuuntaajan 14%:n häviöön. Kokeessa saavutetun hyötysuhteen voidaan pitää olevan käyttökelpoisen järjestelmän rajojen sisällä, sillä tavanomaisesti IPT- ja CPT-latausjärjestelmillä saavutetaan yli 70% hyötysuhde [24].

Munsi ym. käyttivät huomattavasti painavampaa lähetintä, kuin vastaanotinta. Lähettimen suunnittelussa onkin enemmän liikkumavaraa, koska järjestelmän paino ja koko eivät ole niin suuria rajoitteita, kuin drooniin integroidussa vastaanottimessa. Zhang ym. [25] tutkivat, miten magneettista resonanssia hyödyntävän induktiivisen tehonsiirtojärjestelmän energiatehokkuus hyötöyisi kolmannen kelan lisäämisestä järjestelmään. Kolmas kela sijoitettaisiin lähettimen puolelle. Zhang ym. todistivat teoreettisesti, että kolmen kelan järjestelmästä voi olla hyötyä tilanteissa, jossa vastaanotin ja lähettäjä ovat heikosti kytkettyneet. Hyödyn ilmeneminen edellyttää, että kolmas kela on sijoitettu lähelle lähetintä. Niin sanottujen toistokelojen käyttäminen voisi siis olla yksi tapa muun muassa lisätä järjestelmien hyötysuhdetta. Varsinkin painorajoitteettoman lähettimen puolella ratkaisu olisi toteuttamiskelpoinen.

Yksittäisistä keloista on mahdollista muodostaa myös yksi kokonaisuus. Cai ym. [26] ehdottivat lähetintä, jossa neljä kulmikasta kelaa muodostavat yhdessä lähetykelan. Kelat ovat kierretty vastakkaisiin suuntiin ja ydin sijaitsee niiden takana. Tämänlainen rakenne vähentää magneettista häviötä (engl. Magnetic Leakage) mutta säilyttää paremman sovitussuhteen sietokyvyn.

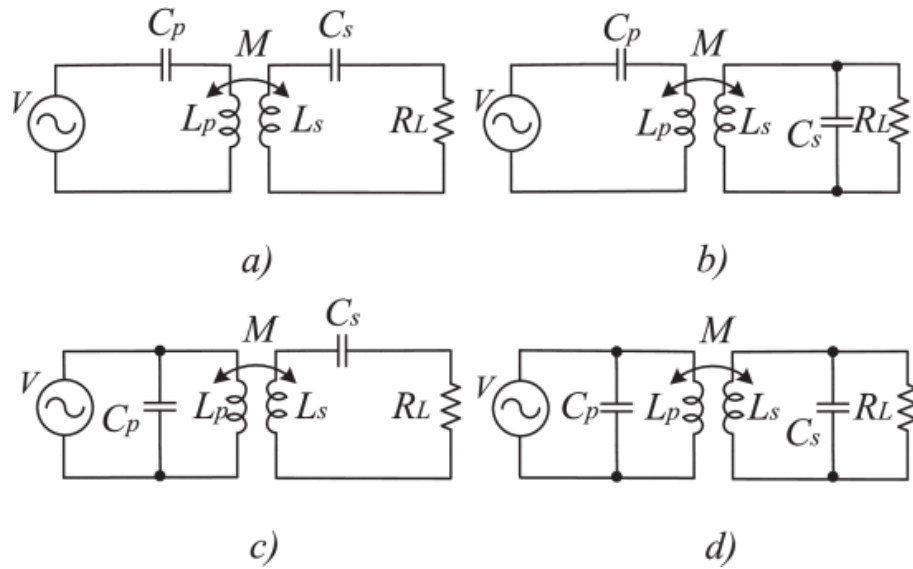


Kuva 4.2: Cao ym. [27] ehdottama kela. © 2023, IEEE

Käytettyjen kelojen ei välttämättä tarvitse olla tasomaisia. Varsinkin vastaanottimen kelat voivat hyödyntää myös kolmiulotteisia muotoja. Cao ym. [27] suunnittelivat järjestelmän, joka käyttää vastaanottimena häkkimäistä kela. Muoto mahdollistaa kelan integroimisen droonin jalkoihin. Tämän ansiosta lähettimen ja vastaanottimen etäisyys saadaan pieneksi. Kuvassa 4.2 näkyy, miten kela kietoutuisi sylinterimäisen jalan ympärille. Lähettimiksi Cao ym. ehdottivat kahta ympyränmuotoista kela.

4.2 Kompensaatiotopologiat

IPT-järjestelmän kompensaatiotopologiat voidaan luokitella kahden lähtökohdan mukaan. Ensimmäinen lähtökohta on se, sijoitetaanko kompensaatioverkko sekä vastaanottimen ja lähettimen puolelle. Toinen lähtökohta taas on se, mitä komponentteja ja kuinka paljon verkossa käytetään [22]. Esimerkiksi topologiaa, jossa sekä vastaanottimen että lähettimen puolelle on sijoitettu sarjaankytketyt kondensaattorit kutsutaan SS-kompensaatioksi (engl. Series-Series Compensation). Shevchenko ym. [22] kokosivat kuvaan 4.3 yleisimmät peruskompensaatiotopologiat IPT-järjestelmille.

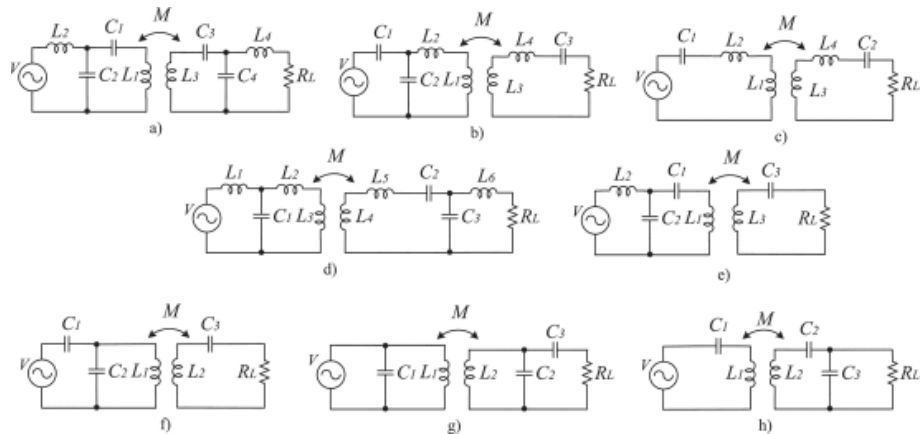


Kuva 4.3: Neljä yleisintä kompensoitotopologiaa IPT-järjestelmille [22]. Kuva lisensoitu CC BY 4.0 International -lisenssillä. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Näistä juuri SS-kompensoitotopologiaa käytetään usein, sillä se on helppo toteuttaa [20] ja suoriutuu muita paremmin [22]. Lisäksi tällä topologiolla on hyödyllisiä ominaisuuksia, kuten vakiovirralla latauksen mahdollistaminen [18], mikä on tärkeää Li-Po- ja Li-ion -akkujen kannalta. Esimerkiksi myös Munsu ym. [24] käyttivät järjestelmässään SS-kompensoitotopologiaa.

CPT:ssä nimitykset kompensoitotopologioille ovat pitkälti samat kuin IPT:n tapauksessa. Perus-kompensoitoverkkojen topologiat ovat samat kuin IPT:ssä, mutta kondensaattoreiden tilalla käytetään keloja [28].

Perustopologioiden lisäksi käytetään myös monimutkaisempia kompensoitoverkkoja. Monimutkaisuus seuraa useampien komponenttien käytöstä sekä sarjaan ja rinnankytkennän yhdistelystä. Shevchenko ym. [22] kokosivat myös monimutkaisemmat topologiat yhteen, kuvaan 4.4. Nimityksissä L-kirjain tulee kelasta ja C-kirjain kondensaattorista. Esimerkiksi LCC-topologiassa kela on sarjaan- ja rinnankytkennässä kahden kondensaattorin kanssa. Monimutkaisempien topologioiden valintaan liittyy kompromissi vastaanottimen painon kasvun kanssa. Mitä enemmän kompensoitotopologiaa



Kuva 4.4: a)LCC-LCC; b)CCL-LC; c)LC-LC; d)LCL-LCCL; e)LCC-S; f)SP-S; g)P-PS; h)S-SP [22]. Kuva lisensoitu CC BY 4.0 International -lisenssillä. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

verkossa käytetään komponentteja, sitä painavammaksi järjestelmä tulee. Esimerkiksi Abdelraziq ym. [29] valitsivat painon ja komponenttien minimoimiseksi SS-kompensaatiotopologian monimutkaisempien ratkaisujen sijaan.

4.3 Latausjärjestelmien tehoelektroniikka

Lähettimen vaihtosuuntaajan tarkoituksena on mahdollistaa vaihtovirran korkea taajuus, joka vuorostaan kasvattaa kelojen laatua [30]. Vastaanottimen puolella tasasuuntaajaa käytetään muuntamaan vaihtovirta tasavirraksi. Korkea taajuus aiheuttaa suuntaajien komponenteissa tehohäviöitä. Tämä näkyi esimerkiksi Munsin ym. [24] edellä mainitussa analyysissä. Käytetyillä vaihto- ja tasasuuntaajatyypeillä sekä niissä käytetyillä komponenteilla on siis väliä latausjärjestelmän suoriutumisen kannalta [4].

Kapasitiivinen tehonsiirto vaatii induktiivista tehonsiirtoa korkeamman ope-
rointitaajuuden [24]. Siksi tehoelektroniikan valinta on erityisen tärkeää CPT-
järjestelmissä. Niissä suosittuja ovat kokosilta- ja Class-E -tyypin vaihtosuuntaa-
jat [31]. Tasasuuntaajista taas passiivinen kokosilta- ja Class-E -tyypit ovat yleisiä.

Esimerkiksi Lu ym. [19] käyttivät kokosilta-tyyppistä vaihtosuuntaajaa järjestelmäsään.

4.4 Sähkömagneettinen suojaus

Luvussa 3 todettiin tehoelektroniikan voivan aiheuttaa huomattavaa sähkömagneettista säteilyä. Tämä on ongelma sekä IPT:n että CPT:n järjestelmissä. Lisäksi järjestelmien sähkö- ja magneettikentät aiheuttavat säteilyä. Droonin kantamia muita laitteita voidaan suojata säteilyltä aktiivisesti tai passiivisesti [4]. Aktiivinen suojaus tarkoittaa ylimääräisten kelojen tai kondensaattoreiden lisäämistä järjestelmään. Esimerkiksi Zhang ym. [32] käyttivät kuuden levyn topologiaa eliminoidakseen säteilyn. Ratkaisussa yksi lisä-levypari rajoittaa sähkövuota. Passiivinen suojaus toteutetaan yleensä alumiinilevyn sijoittamisella suojattavan osan ympärille [4], [30]. Munsu ym. [24] sekä Abdelraziq ym. [29] käyttivät lähettimen suojaukseen juuri-kin alumiinilevyä. Lisäksi kummatkin käyttivät ferriittikappaleita magneettikentän muovaamisessa. Ferriittikappaleet auttavat suuntamaan magneettivuota huluttuun suuntaan [33], mikä taas vähentää magneettista vuotoa. Myös muita materiaaleja on tutkittu ja käytetty ferriitin tilalla [34], [35].

4.5 Voimajohdot energianlähteenä

Drones4safety-hankkeessa tehtiin perusteellinen suunnitelma droonien langattoman latausjärjestelmän toteuttamiseksi. Projektin tuotteena syntyi raportteja ja artikkeleita muun muassa droonin kiinnittymisestä voimajohtoon latauksen mahdollistamiseksi [36], [37] sekä droonien langattomista latausjärjestelmistä [38]. Vom Bögel ym. [38] suunnittelivat järjestelmän, jolla drooni voisi induktiivisen kytkennän avulla ladata akkujaan voimajohdoista. Järjestelmässä vastaanottimen kela on kiidottu voimajohtoon kiinnittyvän osan ympärille. Tämä osa toimii kelan ytimenä.

Vom Bögel ym. muodostivat teoreettisen mallin järjestelmän mahdolliselle teholle. Mallin mukaan voimajohdoista saatava teho olisi riittävä järjestelmän toimeenpanon kannalta. He testasivat järjestelmää myös kokeellisesti. Kokeesta saadut tulokset olivat huomattavasti alhaisempia, kuin teoreettisesti mallinnetut luvut, mutta joillakin parannuksilla tuloksia olisi mahdollista parantaa.

Vom Bögel ym. korostivat järjestelmän käytännön toiminnalla olevan monia edellytyksiä. Droonin navigoiminen kiinnittyäkseen vaatii tarkkoja sensoreita ja algoritmeja. Sähkö- ja magneettikentiltä tarvitaan riittävää suojausta voimajohtojen läheisyydessä. Lisäksi on kehitettävä mekanismeja, joilla varmistetaan, ettei drooni tipu latauksen aikana tai jumiin johtoon.

5 Pohdinta

Droonien ominaispiirteiset vaatimukset ja monimutkaisuus asettavat rajoitteita langattomien latausteknologioiden hyödyntämismahdollisuuksille. Tutkielma osoittaa, että drooneille ei ole vain yhtä kaavamaista langattoman latausjärjestelmän toteuttamistapaa, joka toimisi kaikissa sovelluksissa. Aineistossa mainittiin toistuvasti latausjärjestelmien suurimpien haasteiden liittyvän riittävään hyötysuhteeseen, sovitussvirheen sietokykyyn, vastaanottimen painoon ja kokoon, tehohäviöiden minimointiin sekä sähkömagneettisen säteilyn hallintaan. Neljännessä luvussa käsiteltiin keskeisimpiä latausjärjestelmien tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä, joilla ratkotaan edellä mainittuja haasteita. Jokaiseen droonien käyttötarkoitukseen tulisi suunnitella sille ominaisten vaatimusten mukainen järjestelmä. Tämän lisäksi tarkoin suunnitelluissakin järjestelmissä joudutaan yhä tekemään kompromisseja tavoitteiden ja realiteettien välillä.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella induktiiviseen tehonsiirtoon perustuvia järjestelmiä pidetään ominaisuuksiltaan parhaimpana droonien langattomaan lataukseen. Induktioon perustuu myös voimajohtojen hyödyntäminen droonien lataukseen. Työssä käsiteltyjen tutkimusten perusteella myös kapasitiiviseen tehonsiirtoon perustuvilla latausjärjestelmillä on potentiaalia, vaikka tutkimusta tarvitaankin enemmän. Ratkaisevaa on tutkimuksen lisääminen myös kokonaisvaltaisesti. Langattoman latauksen hyödyntäminen esimerkiksi autonomisissa drooneissa vaatii latausteknologioiden kehittämisen lisäksi muun muassa reitinsuunnittelu- ja energianku-

lutusmalleja, tarkkoja algoritmeja droonin laskeutumiseen sekä latausjärjestelmien turvallisuuden varmistamista. Lisäksi koska tutkielma rajoittuu vain ensisijaisiin järjestelmien haasteisiin, tulee mainita, että toimivan systeemin toteuttaminen vaatisi myös muiden yksityiskohtien huomioonottamista.

6 Yhteenveto

Tutkielmassa keskityttiin RW-droonien lähialueen langattomaan lataukseen ja sen optimointiin. Aluksi tarkasteltiin droonien energiankulutuksen haasteita sekä langattomien latausjärjestelmien toimintaperiaatteita ja rakennetta. Todettiin, että droonien energiankulutus on suurta ja energianlähteet riittämättömiä pidemmille lennoille. RW-droonien energialähteitä rajaavat liian suuri paino, koko ja droonin käyttökohteet. Tästä syystä Li-Po- ja Li-ion-akut ovat suosituimpia energianlähteitä. Niiden energia- ja tehotehiys sekä akkujen paino muodostavat sopivimman kompromissin. Pidemmällä lennoilla droonin akkua tulee kuitenkin ladata. Lataukseen potentiaalisimpia langattomia teknologioita ovat induktiivinen ja kapasitiivinen tehonsiirto. Ne erottuvat muista langattomista teknologioista suuremman hyötysuhteen ja luonteensa ansiosta. Drooneissa induktiiviset järjestelmät vaikuttavat olevan käytetyimpiä.

Kirjallisuuskatsauksen loppuun selvitettiin keskeiset haasteet latausjärjestelmien hyödyntämisessä drooneissa. Näitä olivat riittävä hyötysuhde, sovituserheen siirtokyky, paino ja koko, tehohäviöiden minimointi sekä sähkömagneettisen säteilyn hallinta. Tarkastelemalla erilaisia ratkaisuja optimaalisimman järjestelmän rakentamiseksi, voitiin huomata tärkeimmät strategiat latausjärjestelmien ominaisuuksien parantamiseksi. Tärkeimpiä siekkoja näyttivät olevan kelojen ja levyjen muodot, kompensatiotopologiat, tehoelektronikka sekä keinot suojautua sähkömagneettisel-

ta säteilyltä. Erityisesti Drones4safety-hankkeen projektissa korostuivat myös muut kehityskohteet, jotka ovat tärkeitä toimivien latausjärjestelmien toteuttamiselle.

Tutkielman johtopäätöksenä pohdittiin, että latausjärjestelmien rakentamisessa tulisi keskittyä kokonaisvaltaiseen kehittämiseen. Tästä syystä vain tutkielmassa käsiteltyihin optimointistrategioihin keksittyminen ei riitä toimivan ja tehokkaan järjestelmän toteuttamiseksi.

Lähdeluettelo

- [1] M. Lu, M. Bagheri, A. P. James ja T. Phung, "Wireless Charging Techniques for UAVs: A Review, Reconceptualization, and Extension", *IEEE Access*, vol. 6, 2018. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2841376.
- [2] M. Mandirola, C. Casarotti, S. Peloso, I. Lanese, E. Brunesi ja I. Senaldi, "Use of UAS for Damage Inspection and Assessment of Bridge Infrastructures", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 72, huhtikuu 2022, ISSN: 2212-4209. DOI: 10.1016/j.ijdr.2022.102824.
- [3] N. Iversen, O. B. Schofield ja E. Ebeid, "LOCATOR - Lightweight and Low-Cost Autonomous Drone System for Overhead Cable Detection and Soft Grasping", teoksessa *2020 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, marraskuu 2020. DOI: 10.1109/SSRR50563.2020.9292591.
- [4] P. K. Chittoor, B. Chokkalingam ja L. Mihet-Popa, "A Review on UAV Wireless Charging: Fundamentals, Applications, Charging Techniques and Standards", *IEEE Access*, vol. 9, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3077041.
- [5] A. Townsend, I. N. Jiya, C. Martinson, D. Bessarabov ja R. Gouws, "A comprehensive review of energy sources for unmanned aerial vehicles, their shortfalls and opportunities for improvements", *Heliyon*, vol. 6, nro 11, 2020, ISSN: 2405-8440. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e05285.

-
- [6] Y. Chen, D. Baek, A. Bocca, A. Macii, E. Macii ja M. Poncino, "A Case for a Battery-Aware Model of Drone Energy Consumption", teoksessa *2018 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, 2018. DOI: 10.1109/INTLEC.2018.8612333.
- [7] M. N. Boukoberine, Z. Zhou ja M. Benbouzid, "A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects", *Applied Energy*, vol. 255, 2019, ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113823.
- [8] P. Zhefei, A. Liang ja W. Chihyung, "Recent advances in fuel cells based propulsion systems for unmanned aerial vehicles", *Applied Energy*, vol. 240, 2019, ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.02.079.
- [9] M. Mizat, B. Bendjedja ja N. Rizoug, "Impact of Fuel Cell System Technologies on the Design of UAVs", teoksessa *2023 International Conference on Electrical Engineering and Advanced Technology (ICEEAT)*, vol. 1, 2023. DOI: 10.1109/ICEEAT60471.2023.10426115.
- [10] H. Li, Z. Zhan ja Z. Wang, "Energy-consumption model for rotary-wing drones", *Journal of Field Robotics*, vol. 41, nro 6, 2024. DOI: 10.1002/rob.22359.
- [11] R. Alyassi, M. Khonji, A. Karapetyan, S. C.-K. Chau, K. Elbassioni ja C.-M. Tseng, "Autonomous Recharging and Flight Mission Planning for Battery-Operated Autonomous Drones", *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 20, nro 2, 2023. DOI: 10.1109/TASE.2022.3175565.
- [12] H. Yan, Y. Chen ja S.-H. Yang, "New Energy Consumption Model for Rotary-Wing UAV Propulsion", *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, nro 9, 2021. DOI: 10.1109/LWC.2021.3090772.

-
- [13] Z. Zhang, H. Pang, A. Georgiadis ja C. Cecati, "Wireless Power Transfer—An Overview", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, nro 2, 2019. DOI: 10.1109/TIE.2018.2835378.
- [14] M. M. Rahman, M. S. I. Shanto, N. Sarker, T. Rani ja L. C. Paul, "A Comprehensive Review of Wireless Power Transfer Methods, Applications, and Challenges", *Engineering Reports*, vol. 6, nro 10, 2024, ISSN: 2577-8196. DOI: 10.1002/eng2.12951.
- [15] M. Fu, H. Yin, X. Zhu ja C. Ma, "Analysis and Tracking of Optimal Load in Wireless Power Transfer Systems", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, nro 7, 2015. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2347071.
- [16] Z. Dai et al., "Hybrid Wireless Power Transfer: A Review", *Wireless Power Transfer*, vol. 12, nro 1, 2025, ISSN: 2052-8418, 2052-8418. DOI: 10.48130/wpt-0025-0014.
- [17] Y. Liu, T. Wu ja M. Fu, "Interleaved Capacitive Coupler for Wireless Power Transfer", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, nro 12, joulukuu 2021, ISSN: 0885-8993, 1941-0107. DOI: 10.1109/TPEL.2021.3086629.
- [18] X. Mou, D. Gladwin, J. Jiang, K. Li ja Z. Yang, "Near-Field Wireless Power Transfer Technology for Unmanned Aerial Vehicles: A Systematical Review", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 4, nro 1, 2023. DOI: 10.1109/JESTIE.2022.3213138.
- [19] F. Lu, H. Zhang, H. Hofmann ja C. C. Mi, "A Double-Sided LC-Compensation Circuit for Loosely Coupled Capacitive Power Transfer", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, nro 2, 2018. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2674688.
- [20] C. Rong et al., "Magnetically Coupled Resonant Wireless Power Transfer for Internet of Things Perception Layer: A Review", *Renewable and Sustainable*

- Energy Reviews*, vol. 223, 1. marraskuuta 2025, ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2025.116013.
- [21] F. Lu, H. Zhang, H. Hofmann ja C. C. Mi, "An Inductive and Capacitive Combined Wireless Power Transfer System With LC-Compensated Topology", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, nro 12, 2016. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2519903.
- [22] V. Shevchenko, O. Husev, R. Strzelecki, B. Pakhaliuk, N. Poliakov ja N. Strzelecka, "Compensation Topologies in IPT Systems: Standards, Requirements, Classification, Analysis, Comparison and Application", *IEEE Access*, vol. 7, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2937891.
- [23] U. Gordhan ja S. Jayalath, "Comparative Analysis of Wireless Power Transfer Couplers for Unmanned Aerial Vehicles and Drones", *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 5, 2024, ISSN: 2644-1314. DOI: 10.1109/OJPEL.2024.3395174.
- [24] A. Munsif, S. Pradhan ja K. Aditya, "Design and Implementation of Wireless Charging Infrastructure for Autonomous UAV Charging", *IEEE Access*, vol. 13, 2025. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3622258.
- [25] J. Zhang, X. Yuan, C. Wang ja Y. He, "Comparative Analysis of Two-Coil and Three-Coil Structures for Wireless Power Transfer", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, nro 1, tammikuu 2017, ISSN: 1941-0107. DOI: 10.1109/TPEL.2016.2526780.
- [26] C. Cai, D. Shen, S. Wu, X. Liu ja W. Chai, "A High Misalignment Tolerance IPT System for Unmanned Aerial Vehicles Based on Multiwinding Combined Coupling", *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 10, nro 4, joulukuu 2024, ISSN: 2332-7782. DOI: 10.1109/TTE.2024.3364122.

- [27] P. Cao et al., "Embedded Lightweight Squirrel-Cage Receiver Coil for Drone Misalignment-Tolerant Wireless Charging", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, nro 3, maaliskuu 2023, ISSN: 1941-0107. DOI: 10.1109/TPEL.2022.3225307.
- [28] Y. Wang, H. Zhang, Y. Cao ja F. Lu, "Remaining Opportunities in Capacitive Power Transfer Based on Duality With Inductive Power Transfer", *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 9, nro 2, 2023. DOI: 10.1109/TTE.2022.3225578.
- [29] M. Abdelraziq, S. Paul, F. Bartels ja Z. Pantic, "Optimization of Efficiency and Receiver-Coil Mass in an Autonomous 700-W S-S IPT System for UAV Applications", teoksessa *2023 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, maaliskuu 2023. DOI: 10.1109/APEC43580.2023.10131668.
- [30] S. Li ja C. C. Mi, "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, nro 1, 2015. DOI: 10.1109/JESTPE.2014.2319453.
- [31] M. Z. Erel, K. C. Bayindir, M. T. Aydemir, S. K. Chaudhary ja J. M. Guerrero, "A Comprehensive Review on Wireless Capacitive Power Transfer Technology: Fundamentals and Applications", *IEEE Access*, vol. 10, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3139761.
- [32] H. Zhang, F. Lu, H. Hofmann, W. Liu ja C. C. Mi, "Six-Plate Capacitive Coupler to Reduce Electric Field Emission in Large Air-Gap Capacitive Power Transfer", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, nro 1, 2018. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2662583.
- [33] G. A. Covic ja J. T. Boys, "Inductive Power Transfer", *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, nro 6, 2013. DOI: 10.1109/JPROC.2013.2244536.

-
- [34] Y. Wang, B. Zhang, W. Guo, T. Ma, S. Ren ja C. Q. Jiang, "The Challenge of Thermal Runaway in Soft Magnetic Materials for Inductive Power Transfer", teoksessa *2025 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, maaliskuu 2025. DOI: 10.1109/APEC48143.2025.10977505.
- [35] F. Iob et al., "A Novel Lightweight Wireless Charging System for UAV Applications", teoksessa *2024 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, helmikuu 2024. DOI: 10.1109/APEC48139.2024.10509392.
- [36] F. F. Nyboe, N. H. Malle, V. D. Hoang ja E. Ebeid, "Open-Source Hardware/-Software Architecture for Autonomous Powerline-Aware Drone Navigation and Recharging", teoksessa *2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, kesäkuu 2023. DOI: 10.1109/ICUAS57906.2023.10155937.
- [37] F. F. Nyboe et al., "Towards Autonomous UAV Railway DC Line Recharging: Design and Simulation", teoksessa *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, toukokuu 2023. DOI: 10.1109/ICRA48891.2023.10161506.
- [38] G. vom Bögel, L. Cousin, N. Iversen, E. S. M. Ebeid ja A. Hennig, "Drones for Inspection of Overhead Power Lines with Recharge Function", teoksessa *2020 23rd Euromicro Conference on Digital System Design (DSD)*, elokuu 2020. DOI: 10.1109/DSD51259.2020.00084.