

Samuel Viik

SÄHKÖLENTOKONESOVELLUKSET JA NIIDEN MOOTTORIKÄYTÖT

Kandidaatintyö

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta

Tarkastaja: Paavo Rasilo

Lokakuu 2022

TIIVISTELMÄ

Samuel Viik: Sähkölentokonesovellukset ja niiden moottorikäytöt
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan TkK-tutkinto-ohjelma
Lokakuu 2022

Maailman sähköistyessä kohti fossiilivapaata tulevaisuutta, ilmailuala sähköistyy sen mukana. Polttoaineiden hinnan noustessa yhä korkeammalle voidaan nähdä hyvä mahdollisuus tuoda sähköllä toimivia kulkuneuvoja enemmän esille. Tavoitteena on taloudellisemmat sekä ympäristöystävällisemmät ratkaisut lentokoneille vähentämällä meluhaittojen ja kasvihuonekaasujen päästöjä. Tässä työssä tarkastellaan minkälaisia sähköisiä vaihtoehtoja ja ratkaisuja on lentokoneille, miten niitä voidaan hyödyntää ja millainen vaikutus niillä on lopputulokseen.

Työn alussa tarkastellaan sähkökoneita. Minkälainen sähkökone on rakenteeltaan, mitä erilaisia sähkökoneita on käytettävissä ja kuinka niiden toiminta eroaa toisistaan. Sen jälkeen tutkitaan sähkölentokoneita. Miten niitä voidaan luokitella ja miten ne eroavat toisistaan? Millaisissa sovelluksissa ja systeemeissä voidaan hyödyntää sähköisiä järjestelmiä hydraulisten, mekaanisten ja pneumaattisten järjestelmien sijaan? Tämän jälkeen perehdytään muutamaan sähköiseen sovellukseen ja tutkitaan niiden toimintaa, hyviä sekä huonoja puolia ja miten niitä voidaan käyttää sähkölentokoneissa. Sähkölentokoneiden tulevaisuutta ja haasteita käsitellään ennen, kuin tehdään yhteenveto työssä esille tuoduista asioista.

Työ osoittaa, että sähkölentokonesovelluksissa on useita hyötyjä verrattuna muihin energiatapoihin hyödyntäviin sovelluksiin. Niiden tehokkuuteen, kokoon sekä taloudellisuuteen kohdistuvat hyödyt tulevat esille useaan otteeseen. Sähköisemmällä lentokoneella yritetään pienentää väliä täyssähköisiin lentokoneisiin. Täyssähköiset lentokoneet kohtaavat vielä haasteita, ennen kuin niitä voidaan käyttää matkustajalentämiseen. Suurimpia haasteita tuottavat tehoelektronikassa ja akuteknologiassa todetut puutteet. Arviolta 20 vuoden aikana täyssähköisille lentokoneille on löydetty ratkaisut. Vaikkakin sähkölentokoneet eivät ole läheskään valmiita, tulevaisuus näyttää lupaavalta niille. Useita tutkimusprojekteja tehdään ympäri maailmaa, jotta saataisiin täyssähköiset lentokoneet mahdollisimman pian käyttöön.

Avainsanat: Sähkölentokone, sähkölentokonesovellukset, sähkömoottori, sähköisempi lentokone (MEA), hybridisähkölentokone (HEA), täyssähkölentokone (AEA).

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SÄHKÖISTYMINEN	2
2.1. Sähkökoneet	3
2.2. Sähkölentokoneet	4
3. KÄYTTÖKOHTEET	11
3.1. Aktuaattori	11
3.2. Rullaus	13
3.3. Työntö	14
3.4. Käynnistys ja tuottaminen	16
3.5. Moottorin polttoainepumppu	17
3.6. Vauhtipyöräjärjestelmä	17
4. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT	19
5. YHTEENVETO	23
6. LÄHTEET	24

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	alternating current
AEA	all electric airplane
APU	auxiliary power unit
DC	direct current
ECS	environment control system
eVTOLs	electric vertical takeoff and landing aircrafts
HEA	hybrid electric aircraft
IDG	integrated drive generator
MAR	mid-air recharging
MEA	more electric airplane
MEE	more-electric engine
S/G	starter/generator
SiC	piikarbidi
WIPS	wing ice protection system
g	Maan painovoiman aiheuttama putoamiskiihtyvyys, $\sim 9,81 \text{ m/s}^2$

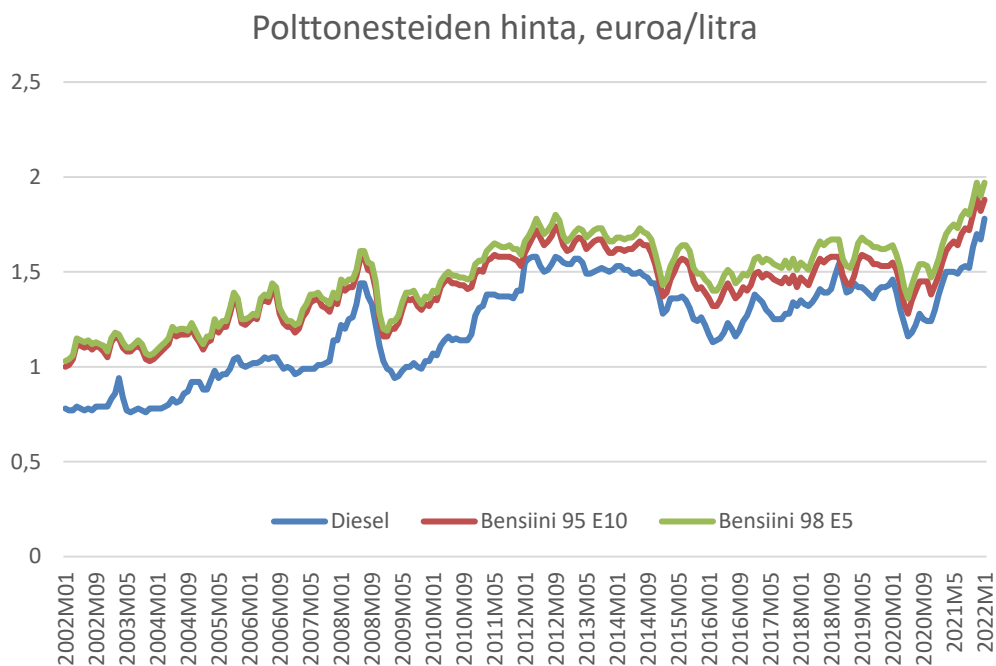
1. JOHDANTO

Maailman edetessä kohti fossiilivapaata ja hiilineutraalia tulevaisuutta yhä useammat kulkuneuvojen käyttäjät alkavat suosia uusiutuvien polttoaineiden ja voimavarojen käyttöä. Vain muutama vuosi sitten ensimmäinen sähkölentokone saapui Suomeen [1] ja niiden määrän uskotaan kasvavan lähivuosina. Sähkölentokoneen hyviä puolia verrattuna tavalliseen lentopetrolikäyttöiseen on melusaasteen vähenemisen lisäksi lähes 80 % pienemmät hiilidioksidipäästöt. Suurimpia kuluja perinteisissä lentokoneissa muodostuu polttoaineesta ja huolloista. Sähkölentokoneissa nämä molemmat ovat noin kymmenyksen alkuperäisestä. [1] Sähkölentokoneita suunniteltaessa täytyy ottaa huomioon niiden käyttötarkoitus – tuleeko niillä päästä kulkemaan pitkiä matkoja vaiko saada mahdollisimman suuri kuorma kuljetettua. Jotta sähkölentokoneisiin saataisiin mahdollisimman suuri hyötysuhde, niiden aerodynamiikkaa tulee tutkia lisää [2]. Sähkölentokonetekniikka on vielä niin alkutaipaleella, että on vaikea ennustaa tarkasti, kuinka paljon se tulee kehittymään lähitulevaisuudessa.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tutkia sähkölentokoneita ja niiden sovellusten sähköistymistä. Työssä verrataan sähkölentokoneita tavallisiin lentokoneisiin, tutkitaan sähkölentokonesovellusten toimintaa, niissä käytettäviä sähkömoottoreita, sekä hyötyjä ja haittoja muilla energiatavoilla toimiviin sovelluksiin. Toinen luku aloitetaan käsittelemällä sähkömoottoreiden ja -lentokoneiden käsitteitä sekä toimintaperiaatteita. Minkälaisia erilaisia sähkömoottoreita ja -lentokoneita on ja miten ne eroavat toisistaan. Kolmannessa luvussa käydään läpi erilaisia käytössä olevia sähkölentokonesovelluksia ja niissä käytettäviä sähkömoottoreita. Perehdytään siihen, minkälaisia sovelluksia voidaan sähköistää ja mitä hyötyjä sähköistämällä saavutetaan. Neljännessä luvussa katsotaan tulevaisuuden näkymiä lyhyellä sekä pidemmällä aikavälillä, sekä missä osa-alueissa on vielä kehittämisen varaa. Lopuksi viidennessä luvussa kootaan yhteen, mitä tässä kandidaatintyössä on käsitelty ja esitetään loppupäätelmät.

2. SÄHKÖISTYMINEN

Sähkön käyttö nykypäivänä on lisääntynyt selvästi. Yhä useammat ihmiset ovat huolissaan ilmastomuutoksesta, toiset taas polttoaineen hinnan noususta. Kaksi yleisintä syytä sähkökäyttöisiin sovelluksiin ovatkin ympäristö- tai taloudelliset tekijät. Viime vuosina polttonesteiden hinnannousu on ollut erittäin suurta verrattuna tavalliseen nousuun, joka voidaan nähdä kuvasta 1.



Kuva 1. Polttonesteiden hinnat, muokattu lähteestä [3]

Voidaan huomata, että tavallista suurempi hinnannousu viime vuosina on tapahtunut vuoden 2020 jälkeen (kuva 1). Tämänhetkisen Ukrainan ja Venäjän välisen sodan vuoksi useat maat boikotoivat Venäjää ja vetäytyvät pois Venäjän markkinoilta [4]. Useat maat eivät enää suostu ostamaan raakaöljyä Venäjältä, mikä näkyy sen hinnassa. Muuallakin kuin Suomessa tämä näkyy polttonesteiden hinnan kasvuna. [5] Tässä voidaan nähdä erinomainen mahdollisuus tuoda entistä tehokkaammin sähkökäyttöisiä kulkuneuvoja markkinoille. Seuraavaksi käsitellään yleispiirteiltään sähkökoneitten toimintaperiaatteita.

2.1. Sähkökoneet

Sähkökoneiden jaottelussa voidaan sanoa olevan kaksi pääluokkaa – vaihto- sekä ta-
sasähkökoneet. Näiden lisäksi pienempään luokkaan kuuluu erikoiskoneet. Vaihtosäh-
köt koneet voidaan vielä jakaa tahti- ja epätahtikoneisiin. [6, s. 3] Nämä kaksi eroavat
toisistaan kuten niiden nimistäkin voidaan päätellä. Tahtikone pyörii tahdissa, kun taas
epätahtikone ei pyöri tahdissa. Epätahtikone voi olla joko oikosulku- tai liukurengaskone.
Tahtikoneet voidaan taas luokitella joko umpi- tai avonapaisiinkoneisiin. [6, s. 3] Sähkö-
koneiden pyörimisnopeutta voidaan määrittellä niin sanotulla tahtinopeudella

$$n_s = \frac{f}{p}, \quad (1)$$

missä n_s on tahtinopeus, f on taajuus ja p on napapariluku [6, s. 5].

Jos käytettävissä oleva vaihtosähkökone on tahtikone, pyörii se kaavan (1) mukaisella
nopeudella [6, s. 5]. Epätahtikoneiden pyörimisnopeutta ei saada selville samaa kaavaa
käyttäen. Sen laskemiseksi tarvitaan oma kaava, joka esitellään myöhemmin tässä lu-
vussa. Epätahtikoneita käytetään prosentuaalisesti eniten muihin sähkökoneisiin näh-
den, ainakin Suomen teollisuudessa [6, s. 4]. Käsitellään epätahtikoneen toimintaa ja
otetaan tarkasteluun oikosulkumoottori.

Oikosulkumoottori koostuu roottorista sekä staattorista. Roottori on koneen pyörivä osa
ja staattori paikallaan pysyvä osa. Roottorin käämitys koostuu urissa olevista sauvoista,
jotka on suljettu oikosulkurenkailla roottorin molemmista päistä. Staattoriin syötettäessä
vaihtovirtaa, muodostaa se ympärilleen pyörivän magneettivuon. Roottorin sauvan
ohitse menevä vuoaalto aikaansaa sähkökentän

$$\underline{E} = \underline{B} \times \underline{v}, \quad (2)$$

jossa E on sähkökenttä, B on magneettivuon tiheys ja v on sauvan ja magneettikentän
välinen suhteellinen nopeus [6, s. 11].

Kaavan (2) suureet kuvastavat vektorisuureita, joka nähdään suureen alapuolella ole-
vasta viivasta. Tämän lisäksi sauvan ohitse kulkeva vuoaalto aiheuttaa myös virran I ,
joka pääsee kulkemaan häkkikäämityksen oikosulkurenkaan kautta. Varsinaiseen sau-
vaan kohdistuu voima

$$F = IlB \sin(\alpha), \quad (3)$$

jossa F on kohdistuva voima, I on virta, l on sauvan pituus, B on vuontiheys ja α on
sauvan kulma suhteessa muuttuvaan magneettivuon kenttään nähden [6, ss. 10–11].

Tämä voima yrittää pyörittää roottorin sauvoja samaan suuntaan kuin sauvan ohittava magneettivuoaalto. Roottori ei kuitenkaan pysty pyörimään samaan tahtiin kuin magneettivuoaalto, vaan jää hieman jälkeen. Tätä kutsutaan jättämäksi, joka on oleellinen osa moottorin toimintaa. Jättämä ilmaisee, kuinka monta prosenttia roottorin nopeus on tahtinopeutta ”hitaampi” tai jäljessä. Jättämä saadaan laskettua kaavalla

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}, \quad (4)$$

jossa s on jättämä, n_s on tahtinopeus ja n on todellinen pyörimisnopeus [6, s. 6].

Jos epätahtikoneessa ei ilmaantuisi jättämää, ei sauva kokisi muuttuvaa magneettikenttää, eikä siihen silloin indusoituisi virtaa. Tämän seurauksena roottoriin ei myöskään kohdistuisi mitään pyörittävää voimaa. [6, ss. 10–12]

Jättämä on yleensä positiivista, mutta voi olla myös negatiivista. Tämä tapahtuu silloin, jos roottori pyörii nopeammin kuin moottorin tahtinopeus. Tällöin kone ei kuluta sähköä, vaan tuottaa sitä, eli toimii generaattorina. [6, s. 56] Tätä toimintaperiaatetta käytetään syöttämään jarrutuksesta muodostunutta energiaa takaisin verkkoon, esimerkiksi hybridi- ja sähköautoissa, joissa jarruttaessa akut latautuvat [7]. Epätahtigeneraattoreita hyödynnetään myös sähkölentokoneissa. Yksi käyttökohde on esimerkiksi lentokoneen sähköisessä rullausjärjestelmässä. Tämä asia esitellään luvussa 3.2.

2.2. Sähkölentokoneet

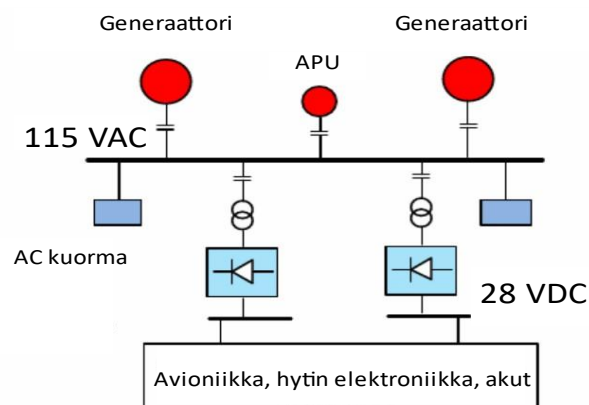
Sähkölentokoneita voidaan luokitella eri kategorioihin: sähköisempi lentokone (more electric aircraft, MEA) ja hybridi- (hybrid-electric aircraft, HEA) tai täyssähkölentokone (all-electric aircraft, AEA) [8], [9, s. 2]. HEA voidaan vielä jakaa joko rinnakkais- tai sarja-HEA:aan [9, s. 6]. Näiden lisäksi voidaan myös luokittelussa käyttää lentokoneen lähtö- ja laskeutumistapaa. Tällaisesta esimerkkinä on sähköiset pystysuorat lentoonlähtö- ja laskeutumiskoneet (electric vertical takeoff and landing aircrafts, eVTOLs) [10]. Niiden tarkoituksena on luoda ekoystävällisempiä ja taloudellisimpia vaihtoehtoja nykyisille käytössä oleville lentokonemalleille.

Jo 1970-luvulla tuotiin esille AEA-konsepti, jossa yksivaiheista sähköenergiaa hyödynnettiin korvaamaan lentokoneen toissijaisia tehoja. Toissijaisiin tehoihin kuuluu pneumaattinen, hydraulinen, sähköinen sekä mekaaninen voima. Useita projekteja aloitettiin, joiden tarkoituksena oli kehittää sähköisten aktuaattorien teknologiaa lentoko-

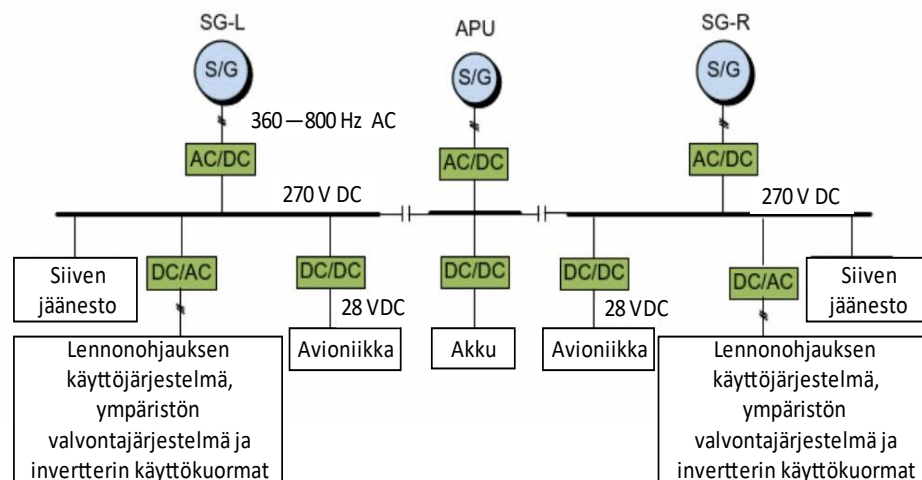
nesovelluksissa. Niissä hyödynnettiin kestopagneettien ja puolijohdemateriaaleissa tehtyjä teknisiä kehityksiä. Myöhemmin tehdyt tutkimustoimet kallistuivat kuitenkin enemmän kohti MEA:ta. Yhtenä syynä oli liian suuri muutos kerralla ilmailualalle. AEA:ta lähettiin lähentymään MEA:n kautta tekemällä pienempiä muutoksia asteittain. MEA:n ja tulevan AEA:n tarkoituksena onkin yksinkertaistaa tavanomaista järjestelmää ja optimoida polttoaine-sähkötehon muuntoprosessia. Tämänhetkisellä teknologialla yritetään pienentää AEA:n ja MEA:n välistä eroa toisistaan. [8], [11]

Lähiaikoina on tapahtunut suuri muutos järjestelmäsuunnittelussa MEA:ssa. Sähköjärjestelmät ovat joko osittain tai täysin korvanneet sovelluksia, joita ennen ohjasivat hydrauliset, mekaaniset tai pneumaattiset käyttöjärjestelmät. [8], [12] Eräissä lentokoneissa, kuten Boeing 787 ja Airbus A380, on huomattavasti suuremmat sähköjärjestelmät verrattuna muihin koneisiin. Airbus A380 on maailman suurin sekä tilavin matkustajalentokone tällä hetkellä [13]. Boeing 787 on myös kookas matkustajalentokone, mutta huomattavasti pienempi kuin Airbus A380. Airbus A380 onkin Boeing 787:ään verrattuna 15 metriä pidempi, 7 metriä korkeampi, lähes 20 metriä siipiväliltään leveämpi ja siihen pysyttään ottamaan yli kaksi kertaa enemmän matkustajia, riippuen Boeing 787:n mallista [13], [14].

Lisääntyneen sähköenergian tarpeen myötä on tullut suuri tarve nopealle teknologian kehitykselle, erityisesti tehoelektronikassa. [12] Tavanomaisen lentokoneen ja MEA:n sähköjärjestelmissä olevia eroja voidaan nähdä kuvista 2–3.



Kuva 2. Tavallisen lentokoneen sähköjärjestelmä, muokattu lähteestä [15, s. 336]

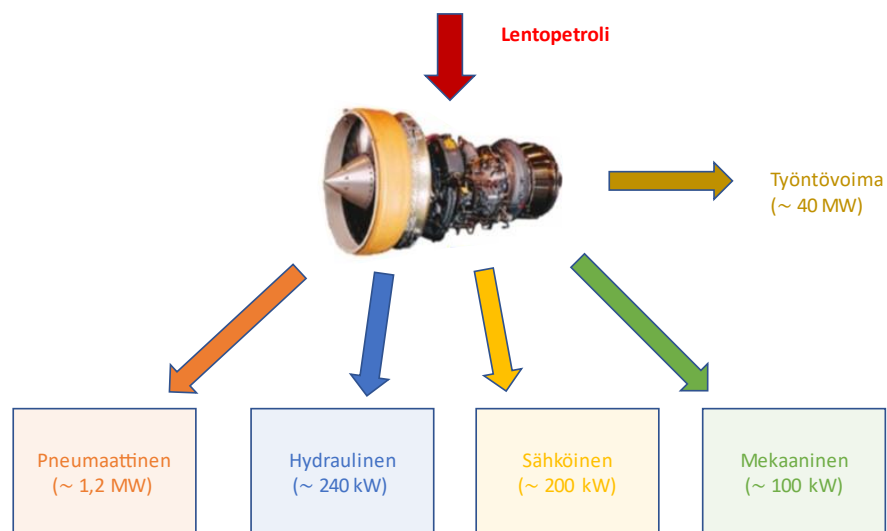


Kuva 3. MEA:n sähköjärjestelmä, muokattu lähteestä [15, s. 338]

Tavallisessa lentokoneessa (kuva 2) jokainen generaattori tuottaa vaihtovirtaa (alternating current, AC) tietyllä taajuudella. Generaattorit tuottavat 115 VAC/400 Hz sähkötehoa pääasiassa vaihtovirtajohtimeen. Tuotettu 115 VAC:n virta muutetaan tasavirraksi (direct current, DC) 28 VDC-tasasuuntamuuntimen avulla. Muunnettua virtaa käytetään muun muassa avioniikassa, hytin erilaisissa elektroniikassa sekä akussa. (kuva 2) MEA:ssa (kuva 3) starterit/generaattorit (SG ja S/G) ja tarvittaessa apuvoimalaite (auxiliary power unit, APU) tuottavat AC-virtaa, joka muunnetaan DC-virraksi. Muunnettua virtaa voidaan käyttää suoraan sellaisenaan tai sitä joudutaan muuntamaan joko takaisin AC-virraksi tai alentamaan pienemmäksi DC-virraksi. Käyttökohteesta riippuu se, muunnetaanko virtaa AC/DC-, DC/AC- tai DC/DC-muuntimella. DC/DC-muuntimen tarkoituksena on joko suurentaa tai pienentää alkuperäistä DC-virtaa. Tämä on siitä syystä, jos käyttökohde ei kestä alkuperäisen virran suuruutta tai sitä ei ole tarpeeksi haluttua lopputulosta varten.

Sähköjärjestelmiä voidaankin nyt MEA:ssa käyttää esimerkiksi siipien jäänsuojauksessa (wing ice protection system, WIPS), ympäristön hallinnassa (environmental control system, ECS) ja lentokoneen käyttöjärjestelmässä sekä polttoaineen pumppauksessa, jotka hoidettiin aikaisemmin muita järjestelmiä käyttäen. [8], [12], [15, s. 338] Avioniikka ja akku hyödyntävät myös samaa sähköjärjestelmää (kuva 3).

AEA:n suurin ero tavallisiin lentokoneisiin on niiden voimanlähde. Tavalliset lentokoneet saavat voimansa lentopolttonesteestä, jonka moottorit muuttavat tehoksi. Tyypillinen tehojen jakautuminen on esitetty kuvassa 4. Suurin osa käytetystä tehosta tavallisessa lentokoneessa kuluu työntövoimana. Loput tehosta käytetään toissijaisiin tehoihin, niin kutsuttuihin ei työntäviin voimiin, joita ovat pneumaattinen, hydraulinen, mekaaninen ja sähköinen voima. [15, s. 335] Työntövoiman avulla lentokone pysyy liikkeellä ilmassa. Pneumaattinen voima saadaan moottorin vuodatusilmasta ja sitä käytetään esimerkiksi, WIPS:ssä ja ECS:ssä. ECS:sään lentokoneessa sisältyy ohjaamon sekä matkustamotilan ilmansyöttöä, lämpötilan ja paineen hallintaa. Lisäksi sitä käytetään avioniikan jäähdyttämiseen, savun havaitsemiseen sekä palon sammukseseen. Hydraulisia voimia hyödynnetään lennonohjauksen toimintalaitteissa, laskutelineissä ja jarruissa. Sähköisiä voimia käytetään valaistuksessa ja avioniikkajärjestelmissä. Mekaanisia voimia hyödynnetään öljyn sekä polttonesteen pumppauksessa. [15, s. 335], [16]



Kuva 4. Tehon käyttö tavallisessa lentokoneessa, muokattu lähteestä [15, s. 335]

AEA käyttää voimanlähteenään vain sähköenergiaa, kun taas HEA hyödyntää myös polttonestejärjestelmää. Sähkölentokoneissa käytettävä sähköenergia varastoidaan yleisesti akkuihin. Ilmailukäyttöjärjestelmiä koskevien akkujen tyypilliset vaatimukset ovat joko korkean tason tai matalan tason vaatimuksia. Korkean tason vaatimukseen kuuluu solujen korkea energiatiheys suhteessa painoon, kennon mekaaninen kestävyys ja tulenpitävyys. Matalan tason vaatimukseen kuuluu tehon tiheys, solun mitat (tilavuus), latausaika ja hinta. [17] Akkujen haasteita ja erilaisia vaatimuksia on tarkasteltu eVTOLs:n

käytössä. Tarvetta nopealle akkujen lataukselle asiakkaiden vaihtovälissä, sekä pidempää akkujen käyttöikää on tuotu esille. [10]

AEA:n toiminta perustuu sähköenergiaan, joka on varastoitu akkuihin. AEA:n moottorit toimivat tällä varastoidulla sähköenergialla. Kyseiset moottorit ovat kiinnitettyinä potkuruihin, jotka tuottavat tarvittavan työntövoiman AEA:lle. Sarja-HEA:sta löytyy samanlainen työntöä tuottava elementti, mutta sähköenergia on yleensä peräisin kemiallisesta muutoksesta. Tämä on tyypillisesti peräisin polttoainekäyttöisestä turbiinista, joka pyörittää generaattoria. Rinnakkais-HEA:ssa kemiallisesti toimivat turbiinit tuottavat sekä työntävän voiman että generaattoreiden kautta yhden tai useamman sähkömoottorin käyttämiseen tarvittavan sähköenergian. [9, s. 6]

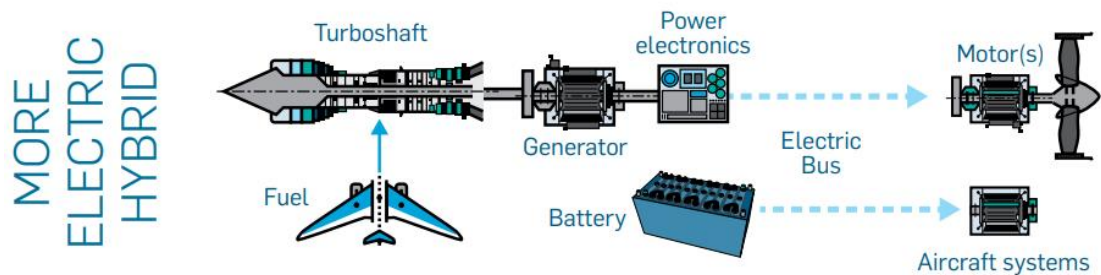
AEA:lla on ehdotettu lennon aikana suoritettavaa latausta (mid-air recharging, MAR) lisäenergian lähteeksi vähentääkseen akun kuormaa. MAR käyttää avaruusauringon energian satelliittia energian siirtämiseen radiotaajuusaallon avulla AEA:han. Radiotaajuudella välitettävän energian AEA vastaanottaisi suurella määrällä suunta-antenneja, joita oletettavasti olisi asetettu siipien ja rungon alle. Ideaalisinta olisi, jos antennit olisivat koko rungon päällä, mutta esimerkiksi siipien päällä on liikkuvia osia, joka hankaloittaisi niiden toimintaa. MAR mahdollistaisi AEA:lle akkujen latauksen lennon aikana, minkä myötä pystyttäisiin pienemmällä akulla kulkemaan pidempiä matkoja ja samalla lentokoneen massaa saataisiin pienennettyä. [18]

Sähkölentokoneiden akkujen kokoa valittaessa huomioitavia asioita ovat esimerkiksi tarvittavat tehot lähtöön, nousuun, lentoon vakionopeudella, laskuun ja laskeutumiseen. Näiden lisäksi oletetaan, että 20 % akun kapasiteetista varataan hätätilanteita varten. Lentokoneen tehon tarve on riippuvainen sen lähtömassasta, joten alkuun akun kapasiteetti vain arvioidaan. [10] Tarkempaan akun kapasiteetin laskemiseen käytetään hyödyksi erilaisia algoritmeja. Lentokoneen rungon valmistusmateriaali on myös tärkeää ottaa huomioon, sillä se vaikuttaa suuresti lopulliseen massaan sekä muihin tärkeisiin ominaisuuksiin. Sähkölentokoneen rungon valmistusmateriaaliksi on ehdotettu käyttää komposiittia, jonka avulla saataisiin massaa pienennettyä. Se sallisi myös sähköjärjestelmien maadoituksen ilman mekaanisen jäykkyyden heikentymistä. [19]

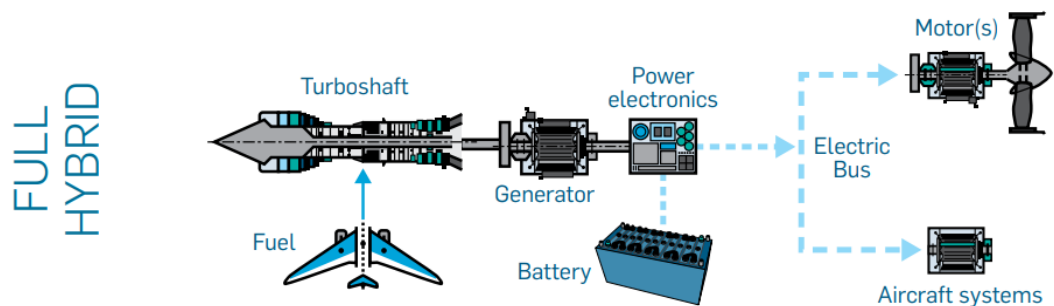
Tämän hetkinen haaste sähkölentokoneissa käytettävien akkujen kanssa on niiden matala energiantiheys sekä niiden rajoitukset kuljetulle matkoille. Tälläkin hetkellä yritetään tutkia keinoja, joilla saataisiin akkujen energiatihelyttä parannettua ja samalla tehtyä niistä kevyempiä. [19] Tähän yhtenä vaihtoehtona voitaisiin ehdottaa aikaisemmin mainittu MAR, mutta muitakin keinoja tarvitaan. MAR:n haasteita on sen kallis hinta, eikä sen kattavuus ole maailmanlaajuinen [18].

Täysin aurinkoenergialla toimivat kaupalliset lentokoneet eivät ole myöskään käytännöllisiä. Vaikka saataisiin koko runko peitettyä aurinkokennoilla ei voida olettaa, että aurin-
gon säteily kohdistuisi suoraan koko rungolle. Voidaan olettaa, että noin 65 % aurin-
gon säteilystä saataisiin hyödynnettyä. Tämäkään ei riitä aurinkokennojen huonon hyötysuh-
teen takia, sillä ne eivät pystyisi tuottamaan tarpeeksi tehoa, siinäkään tapauksessa,
vaikka häviöitä ei olisi. [9, ss. 5–6]

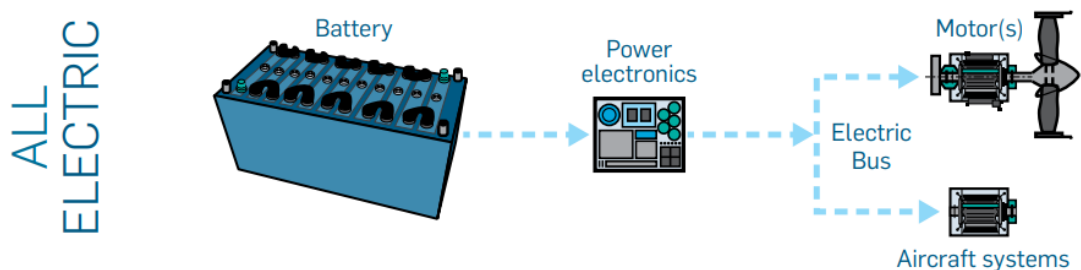
AEA:n yksi hyödyistä on, ettei se tarvitse polttoainetta toimiakseen, vaan se toimii täysin
sähköllä. Tämä mahdollistaa sen, ettei se tarvitse yhtä monta komponenttia kuten MEA
tai HEA. Tämä on havainnollistettu kuvissa 5–7.



Kuva 5. MEA:n voimantuotto [20]



Kuva 6. HEA:n voimantuotto [20]



Kuva 7. AEA:n voimantuotto [20]

Nähdään, että AEA toimii vähemmällä komponenteilla verrattuna MEA:aan ja HEA:aan (kuvat 5–7). MEA:ssa turbiinimoottori saa tarvittavan voiman polttonesteestä, jonka avulla se mekaanisella energiallaan saa tuotettua sähköenergiaa generaattorin avulla [6, s. 9]. Tehoelektronikan avulla tämä tuotettu sähköenergia saadaan kuljetettua moottoreille sähköjohtimia pitkin. Generaattorien tuottama sähköenergia täytyy ensin muuttaa AC/DC-muuntimella sopivaksi virraksi (kuva 3). Lentokoneen järjestelmät saavat taas tarvittavan tehon akusta (kuva 5). HEA:n toiminta on äskeiseen verrattuna lähes samanlainen, mutta poikkeaa hieman. HEA:ssa moottoriin ja lentokoneen järjestelmiin käytettävä energia kulkeutuu sähköjohtimia pitkin aina tehoelektronikka komponenttien kautta. Tarvittava energia saadaan akun ja generaattorin avulla. (kuvat 5–6)

AEA:ssa on pystytty kokonaan poistamaan polttonestettä kuluttava turbiinimoottori sekä generaattori (kuva 7). Näiden avulla lentokoneen massaa ja kuluvien osien määrää saadaan pienennettyä, mikä mahdollistaa kulujen säästämisen [10]. Teho AEA:n järjestelmille ja moottoreille siirretään sähköjohtimilla. Tämä kulutettava sähköenergia, mikä on varastoitu akkuun, kulkeutuu niille tehoelektronikka komponentin kautta. (kuva 7)

3. KÄYTTÖKOHTEET

Sähköistetyissä lentokoneissa löytyy useita erilaisia sovelluksia, jotka hyödyntävät sähköisiä koneita tai muita sähköisiä järjestelmiä. Niiden tarkoituksena on parantaa jo käytettäviä systeemejä tai komponentteja. Muutoksen haluttuna seurauksena voi olla tehokkuuden parantaminen, taloudelliset ja/tai ympäristölliset hyödyt. Tässä kappaleessa käsitellään muutamia sovelluksia ja niiden toimintaa sähköistetyissä lentokoneissa. Käsiteltäviksi sovelluksiksi on valittu aktuaattori, rullaus, työntö, käynnistäminen ja tuottaminen, moottorin polttoainepumppu sekä vauhtipyöräjärjestelmä.

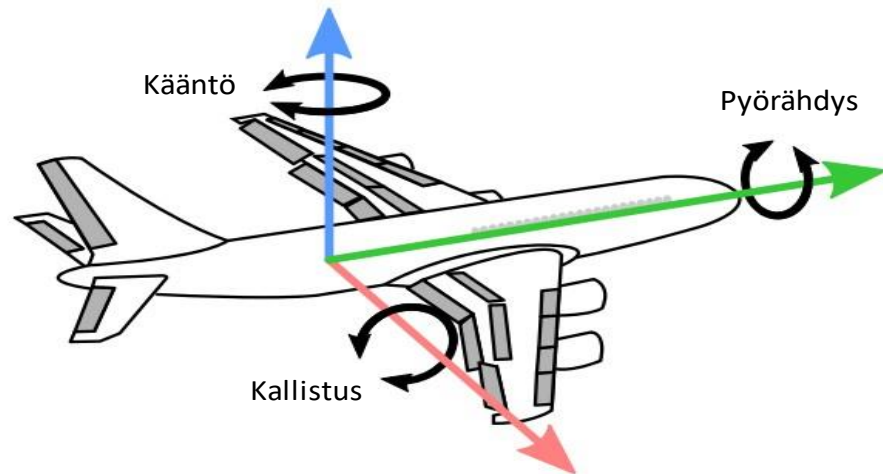
3.1. Aktuaattori

Ilmailualalla aktuaattorilla, toisin sanoen toimilaitteella, tarkoitetaan fyysistä komponentti yksikköä, joka ajaa mekaanista kuormaa keskitetystä voimanlähteestä. Sen avulla saadaan käynnistettyä mekaaninen toiminta tai liike alulleen. Mikä tahansa lentokone tarvitsee useita aktuaattoreita suorittaakseen toimintansa. Tyypillisiä käyttökohteita aktuaattoreille löytyy lentokoneen ohjauksesta, moottoreista sekä laskutelineistä. [9, ss. 73–75]

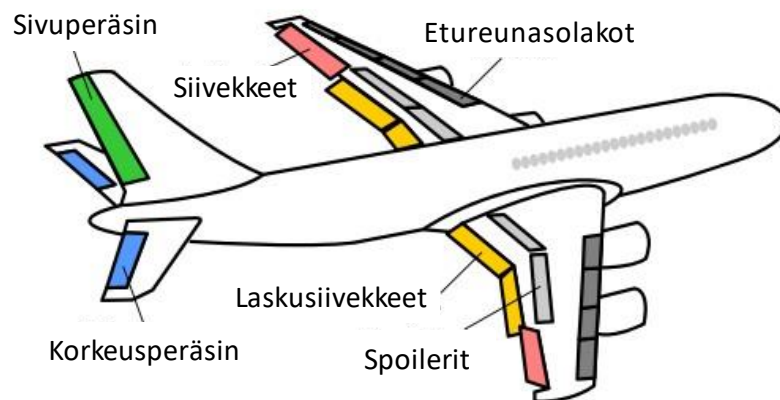
MEA:lle suosittuja aktuaattoreita ovat sähkömekaaniset sekä hydrostaattiset aktuaattorit. Luotettavuus on tärkeässä asemassa ilmailualalla, minkä vuoksi on kehitetty vikasietoinen toimilaitesysteemi. Vikasietoiset harjattomat DC-moottorit ovat suosituimpia vaihtoehtoja sähkömekaanisille sekä sähköhydrostaattisille aktuaattorijärjestelmille MEA:ssa. Uuden vikasietoisen kaksoisroottorisen harjattoman DC-moottorin käyttöä on ehdotettu, sillä se kykenee käsittelemään mekaanisia ja käämitys vikoja. Se on koottu kaksoisroottorista sekä -moottorista, jotka ovat samassa kotelossa. Tämän vuoksi koneen kokonaiskoko on saatu pienemmäksi. Vian ilmetessä kone osaa vaihtaa virran ulommalta staattorilta sisemmälle staattorille. Tällaista kokoonpanoa sopii parhaiten käyttää vikasietoisissa sovelluksissa, mikä pystyy itse käsittelemään mekaanisia ja sähköisiä vikoja. [21]

Lentokoneet tarvitsevat aktuaattoreita liikkeen tuottamiseksi. Lentokoneella on kolme kriittistä hallinta-astetta, joita ovat pyörähdys, kallistus ja kääntö. Tätä havainnollistaa kuva 8. Lentokoneen pyörähdys on lentokoneen pyörimistä sen nokka-pyrstö pituusakselin suhteen. Kallistuksella tarkoitetaan lentokoneen liikkumista ylös tai alas siipi-siipi

poikittaisakselin suhteen ja käännöllä liikutaan vasemmalle tai oikealle pystyakselin suhteen. Ensisijaisiin lentokoneen hallintalaitteisiin kuuluu siivekkeet sekä sivu- ja korkeusperäsin. Toissijaisiin hallintalaitteisiin luokitellaan loput, joita ovat spoilerit, laskusiivekkeet ja etureunasolakot. Tätä havainnollistaa kuva 9. [8], [12], [22]



Kuva 8. Lentokoneen kriittiset hallinta-asteet, muokattu lähteestä [8]



Kuva 9. Ensi- ja toissijaiset lentokoneen hallintalaitteet, muokattu lähteestä [8]

Ensisijaiset lentokoneen hallintalaitteet kontrolloivat kriittisten hallinta-asteiden liikettä. Toissijaisten hallintalaitteiden, kuten laskusiivekkeiden ja etureunasolakoiden, tehtävä on pääsääntöisesti hidastaa lentokoneen sakkausnopeutta turvallista lentoonlähtöä ja

laskeutumista varten. Spoilerit häiritsevät ilmavirtaa siipien yli vähentääkseen nostoa sekä edistääkseen lentokoneen rullausta. Tavallisissa lentokoneissa laskusiivekkeitä ohjataan kahdella hydraulimoottorilla. Laskusiivekkeiden sijaintia tarkkaillaan, koska niiden symmetria molempien siipien välillä on kriittistä ohjaamisen kannalta. Jos laskusiivekkeiden epäsymmetrisyys ilmenee tai polttoainepumppu pettää, kaikki laskusiivekkeet lukituvat paikoilleen välttääkseen epävakaan lisääntymistä. Näiden hydromekaanisten järjestelmien korvaaminen sähköisesti ohjattavilla yksittäisillä aktuaattoreilla jokaista laskusiivekettä kohden tarjoaisi enemmän hyödyllisiä toimintoja ja poistaisi tarpeen keskitetylle hydraulipumpulle. Lentokone pystyisi lentämään ilman toissijaisia hallintalaitteita, jos siihen olisi tarve. Niiden käyttö on olennaista lennon mukavuuden ja tehokkuuden kannalta. [8], [11], [22]

Nykyisin tavallisissa lentokoneissa laskutelineet ovat hydraulisesti ohjattuja. Sähköjärjestelmien käyttäminen hydraulisten tilalla toisi lentokoneelle lisää turvallisuutta. Erilaisia käyttökohteita laskutelineen aktuaattorille ovat muun muassa laskutelineen ulos ja sisään vetäytyminen, ohjaus, jarrutus sekä telineen ovien liike ja lukitus. Etulaskutelinettä ohjataan vain rullauksen yhteydessä, jonka vuoksi sen turvallisuusvaatimukset eivät ole niin tiukkoja. [9, s. 75], [11]

3.2. Rullaus

Rullauksella tarkoitetaan ajanjaksoa, jolloin lentokone liikkuu kiitoradalla, pois lukien lentoonlähtöä edeltävä kiihdytys ja laskeutumisen jälkeinen jarrutus. Rullauksessa lentokone liikkuu itse omia voimalähteitä käyttäen, eikä esimerkiksi toisen kulkuneuvon hinattavana. [8], [23]

Tavallinen rullaus kiitoradalla saa tarvittavan tehon lentokoneen päämoottoreista. Tämä metodi on kallista sekä saastuttavaa, sillä se käyttää pääsääntöisenä voimanlähteenään suuren määrän polttonestettä matalalla hyötysuhteella. Näiden lisäksi muita haittoja ovat moottorien käyttöiän pieneneminen niitä käytettäessä matalilla nopeuksilla, moottoreista muodostuvat kovat meluhaitat sekä kasvava riski suihkumoottorionnettomuuksille. [8], [23]–[25]

Yksi lupaava menetelmä rullauksen parantamiseksi on sähkömoottorien integrointi lentokoneen pää- tai etulaskutelineen renkaiden vanteisiin [24], [25]. Päälaskutelineet sijaitsevat yleensä joko rungon tai siipien alla. Nämä moottorit toimivat APU:sta tai muualta lentokoneen sisäisestä sähköenergiälähteestä saadulla teholla. Yleinen idea sähköisen rullauksen takana on luoda tehokkaampi systeemi, jonka avulla pystyttäisiin vähentä-

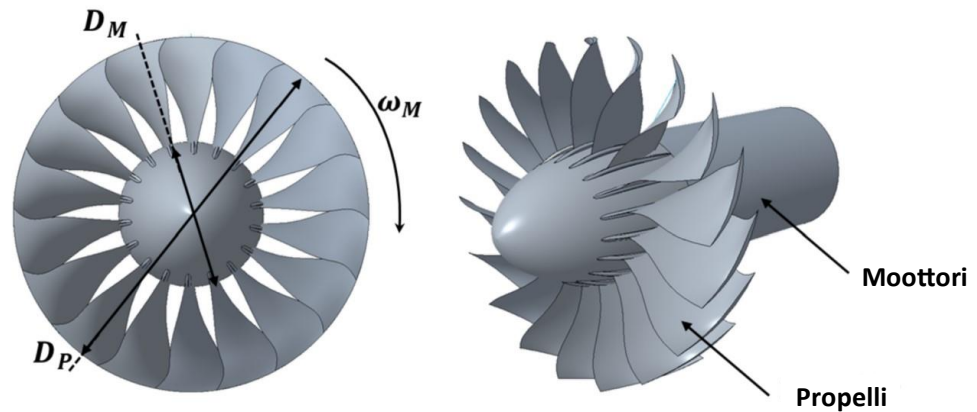
mään polttoaineen kulutusta, päämoottorien toiminta-aikaa sekä parantamaan lentokoneen ohjattavuutta rullauksen aikana. Tämän avulla saataisiin vähennettyä lentokoneen toiminta-aikaa maalla. Yksi syy rullaukseen kulutetun ajan lyhentymiseksi on se, ettei lentokone tarvitsisi ollenkaan ulkoista työntö- tai hinausapua, esimerkiksi traktorilta. [24], [25]

Traktorilla hinattaessa on omat haittansa. Huoltoajoneuvojen määrän kasvaessa muodostuu lisää taakkaa niiden liikenteenhallinnassa, sekä ne tuovat suuremman riskin lentokoneiden ja hinauslaitteiden väliselle törmäykselle. Lisäksi potentiaalinen riski lentokoneiden laskutelineiden turvallisuudelle kasvaa. [25] Etulaskutelineeseen integroidulla sähkömoottorilla on myös haasteita. Yhtenä haasteena huomattiin olevan tehon puute. Lentokoneen massa nähden se ei pystynyt tuottamaan tarpeeksi suurta nopeutta rullauksen ajaksi. Lähes kaikki lentokentät vaativat vähintään 20 km/h nopeuden rullauksen ajaksi. Testien mukaan lentokone saavutti parhaimmillaan vain 7 km/h nopeuden. [9, s. 153] Rullaukseen käytetyillä sähkökoneilla on myös lämpöhaasteita, koska ne ovat alttiina korkeille lämpötiloille lähellä olevien jarrujen takia. Tämän lisäksi niihin kohdistuu myös 20–30 g:n iskuja laskeutumisen yhteydessä. [8]

3.3. Työntö

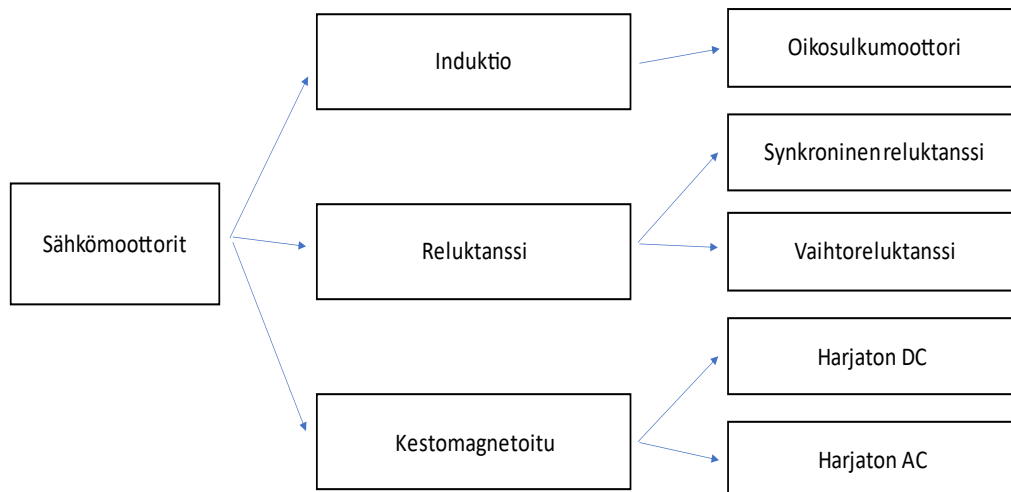
Lentokoneen työntövoima voidaan tuottaa monella eri tapaa. Pääpiirteittäin erilaisia vaihtoehtoja ovat sähkö-, hybridi- sekä tavalliset moottorit [15, Luku 6–8]. Tavallisiin moottoreihin voidaan luokitella potkuriturbiini ja ohivirtausmoottori. Nämä molemmat käyttävät kaasuturbiinia hyödykseen. [15, ss. 106–108] Sähköllä tuotettua työntöä voidaan saada joko akkuihin tai polttokennoihin varastoidulla sähköenergialla [15, s. 148]. Hybridissä yleisesti vaihtoehtoina ovat joko rinnakkain tai sarjaan kytketyt akut [15, ss. 162–167]. Hybridien on myös mahdollista toimia ilman akkuja. Tällöin normaalisti akuista saatava sähköenergia tuotetaan ohivirtausmoottorin ja generaattorin avulla. Tätä havainnollistaa kuva 6, jos siitä otettaisiin akku pois. [15, s. 171]

Propulsorijärjestelmä yksinkertaisemmillaan koostuu sähkömoottorista, johon on suoraan kiinnitettyä propellit (kuva 10). Kuva 10 havainnollistaa moottorin (D_M) ja propellin halkaisijan (D_P) sekä koko järjestelmän pyörimissuunnan ja -nopeuden (ω_M). Moottorin suora kytkentä eliminoi vaihdelaatikon tarpeellisuuden, jonka myötä se parantaa järjestelmän tehokkuutta ja luotettavuutta. [26]



Kuva 10. Sähkölentokoneen propulsorijärjestelmä, muokattu lähteestä [26]

Kuten aiemmin on mainittu, sähkökoneista löytyy useita vaihtoehtoja, riippuen siitä mihin käyttötarkoitukseen niitä halutaan käytettävän. Kuvassa 11 on havainnollistettu esimerkkejä sähkökonetyypeistä MEA:lle käytettäväksi.



Kuva 11. Sähkökone vaihtoehdot MEA:lle, muokattu lähteestä [11]

Sähkömoottorivaihtoehtoja MEA:lle on valittu epätahtikoneisiin kuuluvat oikosulku- ja vaihtoreluktanssimoottori. Oikosulkumoottorit ovat suosittuja ilmailualalla niiden yksinkertaisuuden, kestävyys, luotettavuuden ja halvan hinnan takia. Tahtikoneisiin kuulu-

vista on valittu kestmagnetoitu harjaton AC sekä synkroninen reluktanssimoottori. Reluktanssimoottorilla on vankka roottorin rakenne, mikä ei käytä käämitystä tai kestmagneetteja ja on kykenevä kestäämään suuria lämpö sekä mekaanisia rasituksia. Näiden vuoksi se on ihanteellinen valinta edullisille sovelluksille. [11]

Synkronisessa reluktanssimoottorissa roottorin operoidessa synkronisella nopeudella, roottoriin ei induoidu sähkömotorista voimaa. Tämän ansiosta kyseinen moottori kykenee olemaan induktiomoottoria tehokkaampi eliminoituaan roottorissa olevat energiahäviöt. Staattorin käämit ovat sinimuotoisesti jakautuneet ilmavälin ympärille, mikä tuottaa voimakkaan yhtenäisen kytkennän vaiheiden välillä ja samalla rajoittaen sen soveltamista lentokoneissa huonon vikasietoisuuden takia. [11]

Kestomagnetoitujen harjattomien AC- ja DC-moottorien ero on syötetyn sähkön muodossa. Riippuen kestmagnetoinnin sijainnista moottorissa, sillä on erilaisia hyötyjä. Pintamagneettimoottori tuottaa matalalla inertialla hyvää dynaamista suoritusta, kun oppomagnetoitu moottori saa aikaan korkeamman induktanssin jokaista yksikköä kohden. Kestomagnetoitua harjatonta DC- sekä AC-moottoria käytetään tahtimoottoreina. [11]

Nykyinen sähköntuotantojärjestelmä voitaisiin yksinkertaistaa integroimalla sähkögeneraattorit polttomoottorien sisään, joka tunnetaan enemmän sähköisenä moottorina (more-electric engine, MEE) [8]. MEE:ssä suurin osa moottorin systeemeistä toimisi sähköenergialla. Moottoria ohjaavat elementit, kuten polttoaineen pumppaus, öljyn pumppaus ja moottorin käyttö tavallisesti toimivat mekaanisesti. MEE:ssä nämä on muunnettu sähköllä toimiviksi operaatioiksi. MEE:n hyötyjä ja haittoja tutkitaan yhä, minkä vuoksi sitä ei olla vielä otettu käyttöön. [9, ss. 26–27]

3.4. Käynnistys ja tuottaminen

Tavallisista lentokoneista löytyy kaksi tyypillistä sähköjakelujärjestelmää, joita ovat 28 VDC matalajännite pienitehoisille kuormille, sekä kolmivaiheinen 400 Hz ja 115 VAC jännite suurille kuormille. Tavallisissa lentokoneissa vakionopeusvaihteiston mekaaninen voimansiirto yhdistää moottorin generaattoriin pitääkseen tuotetun jännitteen vakiona. Tällainen voimansiirto sisältyy yleensä generaattoriin integroituna ajogeneraattorina (integrated drive generator, IDG). IDG yleensä on yhdistettynä moottorin akseliin vaihdelaatikon kautta. MEA:ssa vaihdelaatikon on korvattu sähkökoneilla, peräkkäisillä AC/DC- ja DC/AC-muuntimilla tai AC/AC-matriisimuuntimilla sekä sähköjohdoilla. Tästä syystä IDG korvataan niin sanotulla kaksisuuntaisella vaihtuvanopeuksisella vakiotajuussysteemillä. Kyseinen systeemi toimii moottorin käynnistimenä moottoritilassa ja takaa vakiotajuuden sähkötehon tuottamistilassa. [8], [9, s. 29]

3.5. Moottorin polttoainepumppu

Tavanomaisesti vaihdelaatikko lähettää mekaanista tehoa lentokoneen polttoainepumpulle. Lentokoneen polttoainepumppujärjestelmä koostuu sekä sähkökäyttöisistä matalapainepumpuista että mekaanisesti tai hydraulisesti toimivista korkeapainepumpuista. Korkeapainepumppujen sähköistäminen lisää järjestelmän tehokkuutta ja luotettavuutta sekä vähentää painoa ja kokoa. Sähköistys lisäksi mahdollistaa pumppujen toiminnan vaihtelevan nopeuden tilassa, jolloin saavutetaan tarkka polttoaineen syötönohjaus moottorin palamisen optimoimiseksi. Vikasietoisesta moottoriohjattavasta polttoainepumpusta on tehty prototyyppi. Se on nelivaiheinen, 30 krpm, 100 kW pintamagneetti-AC-moottori, joka kykenee käsittelemään yksittäisen sähkövian sen ilmetessä. [8], [11]

3.6. Vauhtipyöräjärjestelmä

Lentokoneissa vauhtipyöräjärjestelmä toimii energian varastointiin. Sen toiminta perustuu pyörivän massan periaatteeseen. Se on mekaaninen varastointilaite, joka jäljittelee sähköenergian varastointia muuntamalla sen mekaaniseksi energiaksi. Vauhtipyörään varastoitu energia on rotaatioenergian muodossa. Pyöriminen kiihtyy energiaa varastoidessa ja hidastuu sen purkautuessa. Pyörivää vauhtipyörää ohjaa sähkömoottorigeneraattori, joka suorittaa sähköenergian vaihdon mekaaniseksi energiaksi ja päinvastoin. [27]

Vauhtipyöräjärjestelmää voitaisiin hyödyntää lentokoneen lentoalähdössä. Yhdysvaltojen merivoimilla käytössä olevilla lentotukialuksilla ei pystytä toteuttamaan tyypillistä lentoalähtöä kiitoradan pituuden ollessa normaalia lyhyempi. Nykyisin niissä käytetään höyryllä toimivia katapultteja, jotka sijaitsevat lentotukialuksen kannella. Siinä hyödynnetään höyrykattilaan varastoitua energiaa, jota ei ole vielä siirretty höyryturbiineihin. Katapulttien avulla lentokoneille saadaan annettua tarpeeksi vauhtia lentoalähtöä varten. Höyryn tilalla voitaisiin käyttää sähkömagneettista laukaisujärjestelmää, joka hyödyntäisi vauhtipyöräjärjestelmää. Tämän avulla tehontuotantojärjestelmän kokoa saataisiin pienemmäksi, sillä sitä ei tarvitsisi mitoittaa huipputeholle. [27]–[29]

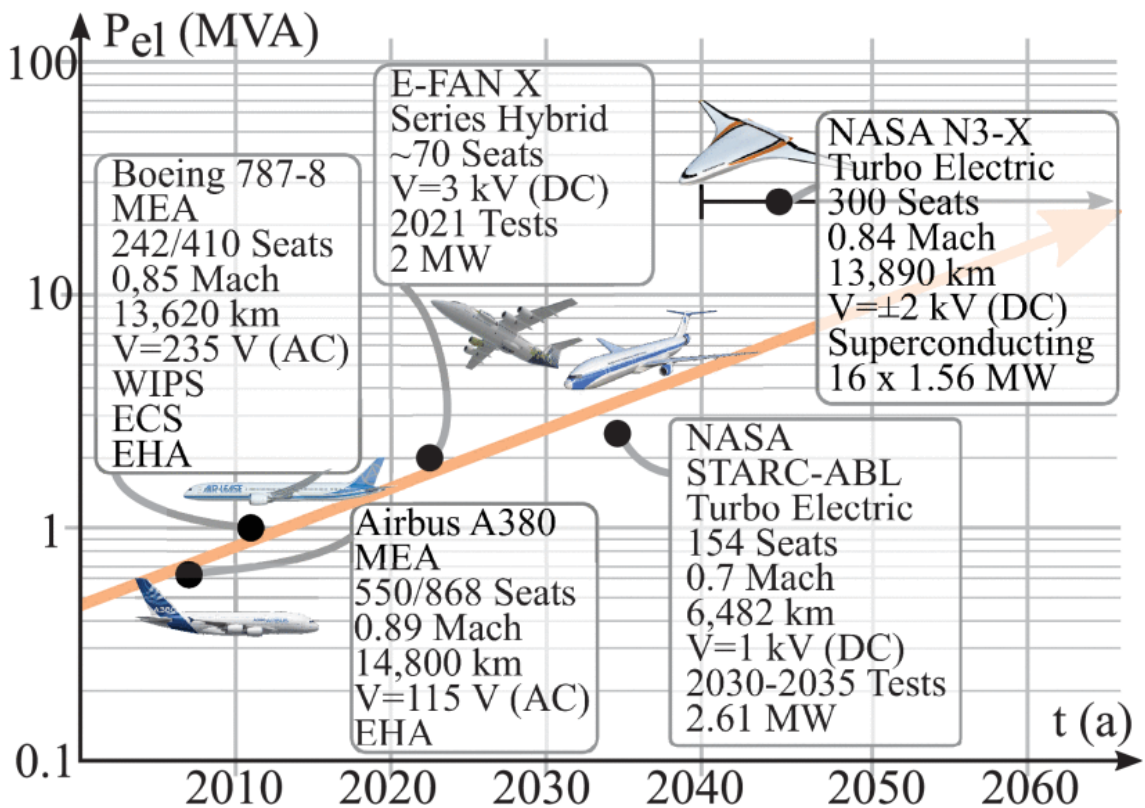
Lentokoneen laskeutumisessa voidaan myös hyödyntää vauhtipyöräjärjestelmää. Lentokoneen laskeutuessa kiitoradalle, sitä täytyy hidastaa jarruttamalla. Jarruttamisen yhteydessä muodostuu lämpöenergiaa, mikä voidaan huomata jarrujen lämpenemisenä. Vauhtipyöräjärjestelmän avulla pyritään muuttamaan suuri määrä liike-energiaa hyödylliseksi sähköenergiaksi, samalla minimoiden lämpöä sekä kulumista jarruissa. Tätä tutkittaessa huomattiin, että yli 50 % jarrutukseen käytettävästä energiasta voidaan ottaa

talteen. [30] Rotaatioenergia saadaan muutettua sähköenergiaksi akselille asennetulla 3 kW:n harjattomalla kestopagneettimoottorilla. Roottori koostuu nelinapaisesta kestopagneettisesta ryhmästä, jotka ovat päällystetty grafiitti-kuitukuorella. Staattori koostuu sarjasta kuparikeloja, joita jäähdytetään lämmönjohtavuus alumiinin läpi. Täydellä nopeudella vauhtipyöräjärjestelmässä voi olla 5 kWh liike-energiaa ja se pystyy toimittamaan sähköiselle kuormalle 3 kW tehoa kolmivaiheisella 208 V jännitteellä. [31]

Vauhtipyöräjärjestelmää käytettäessä huomattiin siitä aiheutuvan lisäpainoa lentokoneelle. Systemin ylimääräisen painon huomattiin olevan alle 0,5 % lentokoneen maksimaalisesta lentoonlähön painosta. Tätä ylittyvää painoa voidaan kompensoida materiaalien valitsemisella sekä pienentämällä hieman suunniteltua kuormaa, jotta lentokoneen rakenteellinen tehokkuus säilyisi. [30]

4. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT

Ilmailualan suuntana on vihreämmät ratkaisut, jota MEA ja AEA tukevat. Vihreämpiin ratkaisuihin lentokoneissa yritetään päästä sähköistämisen lisäksi, esimerkiksi vähentämällä lentokoneiden kaasu- ja melupäästöjä [20]. Tulevaisuuden ennuste ilmailualan sähköistymiselle on nähtävissä (kuva 12). Kuvassa 12 sähköenergian tarve näkyy logaritmisesti ajan funktiona. Ennusteeseen ei ole otettu huomioon kaikkia tutkimuksessa olevia projekteja, kuten eVTOLs ja pienen alueen sähköistettyjä lentokoneita. [2]



Kuva 12. Sähköistyksen suuntaus ilmailualan sovelluksissa [2]

Vuonna 2007 tilattu Airbus A830 voidaan luokitella MEA:ksi, jonka maksimaalinen istumakapasiteetti oli 853 ja tyypillisesti käytössä oli 550 paikkaa. Lentokoneen lentonopeus on 0,89 Machia ja sen lentosäde on 14800 km. [2] Mach on ilmailualalla käytössä oleva nopeuden yksikkö, joka kuvastaa lennossa olevan kappaleen nopeutta suhteessa äänen nopeuteen väliaineessa, johon sää voi vaikuttaa [32]. Osa hydraulisista komponenteista on sähköistetty Airbus A380:ssa, kuten lennonohjausjärjestelmät. Lisääntyneen sähköenergian tarve on korvattu neljällä 115 VAC jännitteisellä päämoottorin generaattorilla. Tällä lentokoneella on saatu äänimelua vähennettyä 50 % lentoonlähdössä ja jopa neljä kertaa vähemmän melua laskeutumisessa, 33 % parannettua polttoaineen palamista

sekä hiilidioksidi päästöjä verrattuna aikaisempiin lentokoneisiin. Moottorit lisäksi vähentävät melua yhdessä siipien ja laskuvälineiden suunnittelulla. [2], [13]

Seuraava MEA on Boeing 787–8 Dreamliner, joka lanseerattiin vuonna 2011. Se kykenee ottamaan enintään 410 matkustajaa kyytiin, mutta normaalisti käytössä on vain 242 istumapaikkaa. Sen lentonopeus on 0,85 Machia ja lentosäde 13620 km. Tämän tyyli- sessä lentokoneessa suuri osa pneumaattisista ja hydraulisista järjestelmistä on korjattu sähköisillä järjestelmillä. Tehoelektronikalla ja kompressoreilla varustetut sähkökoneet korvaavat suuria pneumaattisia kuormia, kuten WIPS ja ECS. Suuren sähköenergian tarpeen vuoksi, lentokoneen sisään rakennettiin 235 V:n vaihtojännitteinen verkko. Mo- lempien päämoottoreiden neljä generaattoria tuottavat yhteensä 1 MVA sähköenergiaa. Lentokoneessa käytetään hyödyksi komposiittia ja optimoitua lentokoneen rakennetta. Näiden teknologioiden avulla äänimelut ovat vähentyneet 60 %, ylläpito kustannukset 30 %, käyttökustannukset 15 % ja polttoaineen kulutus 20 %. [2], [14]

E-FAN-projektia alun perin johtivat Airbus, Rolls Royce ja Siemens. Ensimmäiset testi- lennot oli suunniteltu vuodelle 2021. Sillä on käytössä neljä moottoria. Yksi näistä nel- jästä moottorista saa 2 MW tehon sähkömoottorista, joka on yhdistetty 3 kV sisäiseen virtalähteeseen invertterin avulla. Se on sarjahybridijärjestelmä ja lentokone on suunni- teltu siten, että sen avulla pystytään tutkimaan lämmönhallinnan, korkeuden ja dynaa- misten haasteiden vaikutuksia korkean suorituksen sähköisessä työntöjärjestelmässä, samalla säilyttäen korkean luotettavuuden sekä turvallisuuden. Tarkoituksena on saa- vuttaa EU:n määräämät tavoitteet ilmailualan päästöjen vähentämiseksi, muun muassa hiilidioksidi, äänimelu sekä typen oksidipäästöissä. [2], [33]

NASA STARC-ABL:ssä käytettävän teknologian arvioidaan olevan valmiina vuosien 2030–2035 aikana. Sen lennonopeus tulee olemaan 0,70 Machia, lentosäteen 6482 km ja istumapaikkojen määrän olevan 154 arviolta. Se on rinnankytketty hybridi, jonka siipien alla ovat moottorit tuottavat työntöä sekä sähköenergiaa. Jokainen moottori tuottaa arviolta 1,5 MW sähköenergiaa ja on yhdistettynä invertterin avulla 1 kVDC sisäi- seen voimalähteeseen. [2]

NASA N3-X arvioidaan olevan valmiina vuoteen 2040 mennessä. Sen lentonopeus tulee olemaan 0,84 Machia, lentosäde 13890 km ja istumapaikkojen määrä 300 arviolta. Tut- kimukset osoittavat, että parhain painonkevennyskeino voidaan saavuttaa käyttämällä suprajohtavuutta sekä sisäistä ± 2 kVDC-verkkoa. Tulevaisuuden suunnitteilla olevat tek- nologiset ratkaisut pystyisivät vähentämään polttoaineen kulutusta 60 % ja typen oksidi- päästöjä 80 % lentoonlähdon sekä laskeutumisen yhteydessä. [2]

Sähköisten lentokoneiden lisääntyessä akkuteknologia ja niiden lataamisen täytyy myös kehittyä. Jos halutaan AEA:lla kuljettavan pidempiä matkoja matkustajalentokoneella, täytyy akuista saada tarvittava teho koko matkan ajalle, ellei MAR:ää hyödynnetä. Vaikka akkujen kapasiteetti riittäisi koko lennon ajaksi, täytyy ne joko ladata uudestaan ennen seuraavaa lentoa tai mahdollisesti vaihtaa jo valmiiksi täyteen ladattuihin akkuihin. Lentojen välinen lataus ei saisi kestää liian kauaa, sillä se voisi mahdollisesti vaikuttaa lentojen pituuteen. Akkujen elinikä tulisi myös selvittää, jotta tiedettäisiin, kuinka usein niitä tarvitsee vaihtaa kokonaan uusiin käytön myötä alentuneen kapasiteetin takia. [20]

Tehoelektroniikan täytyy kehittyä, jotta se kykenee toimimaan AEA:n sovelluksissa. Nykyisin käytössä olevat puolijohdelaitteet käyttävät pääsääntöisesti piitä. Jotta suurempia tehoja pystytään käsittelemään, tarvitaan suuria energiavöiden omaavia puolijohdelaitteita. Potentiaalisena ratkaisuna tähän voidaan käyttää piikarbidia (SiC). SiC-laitteiden nähdään 20 vuoden aikana yli nelinkertaistamassa tehoelektroniikkalaitteiden tehoa suhteessa niiden painoon tehonmuunnossa sekä maksimaalisen käyttövirran jopa kahdeksankertaistuvan nykytilanteeseen. [15, s. 365]

Aikaisemmin puhutussa sähköisessä rullauksessa on myös tehokkuuteen liittyviä haittoja. Järjestelmä ei ole aina välttämättä hyödyllinen, sen tuodessa lisäpainoa lentokoneeseen. Lisäpainon myötä polttoaineenkulutus kasvaa lennon aikana. Tämä vaikutus korostuu erityisesti pidemmällä lennoilla. On siis löydettävä keino selvittää, milloin on kannattavampaa käyttää sähköistä rullausta polttoaineen säästämiseksi rullauksen yhteydessä. [24]

Vauhtipyöräjärjestelmissä on myös kehittämisen varaa. Energiahäviöitä löytyy myös vauhtipyöristä, niin kuin monesta muustakin systeemistä. Vauhtipyöräjärjestelmissä olevista laakereista muodostuva kitka aiheuttaa suurimmat häviöt systeemissä. Tämän takia vauhtipyöräjärjestelmä ei ole yhtä tehokas kuin akkupohjaiset järjestelmät energian pitkäaikaista varastoinnista varten. [30] Tähän yritetään löytää ratkaisua. Yhtenä keinona yritetään käyttää korkean lämpötilan suprajohtavia laakereita. Ne tarjoavat mahdollisuuden erittäin pienille pyörimishäviöille ja niitä on tutkittu useisiin eri sovelluksiin. Lisäksi korkean lämpötilan suprajohtavat laakerit mahdollistavat tehokkaan päivittäisen energian varastoinnin, minkä vuoksi tätä teknologiaa on pyritty kehittämään maailmanlaajuisesti useissa eri laboratorioissa. [31]

Tietyillä sähkökoneilla voidaan myös havaita eristykseen liittyviä ongelmia. Korkean käyttöjännitteen ja suuren energiavöiden välin myötä tehoelektroniikassa tulee esille

eristys ongelmia, erityisesti suuritehoisille pienivolyymisille sähkökoneille. Eristysmateriaalien lisätutkimusta tulisi suorittaa eristyksen parantamiseksi, samalla koneen lämpösuorituskykyä heikentämättä. [8]

5. YHTEENVETO

Taloudelliset- ja ympäristötekijät ovat ajaneet lentokoneiden sähköistämiseen, jonka tavoitteena on vähentää päästöjä. Tässä kandidaatintutkielmassa käytiin läpi mitä tarkoittaa sähkölentokone, minkälaisia sähköisiä ratkaisuja niissä käytetään ja mitä voidaan tulevaisuudessa käyttää. Sähkölentokonesovelluksista tarkemmin tutkittiin aktuaattoreita, rullausta, työntöä, käynnistystä ja tuottamista, polttoaineen pumppausta sekä vauhtipyöräjärjestelmää. Erityisesti keskityttiin selvittämään miten niiden sähköistäminen vaikuttaa lentokoneen toimintaan sekä minkälaisia hyötyjä niistä saadaan.

Sähkölentokoneita voidaan luokitella sähköisemmiksi lentokoneiksi sekä hybridi- että täyssähkölentokoneiksi. Näiden lisäksi on myös pystysuoraan lento- ja laskeutumiseen luokiteltavia lentokoneita. MEA:ssa sähköenergiaa käytetään lentokoneen järjestelmiä varten. Työntöä tuottaviin moottoreihin tarvittava energia saadaan polttonesteestä turbiinimoottorin ja generaattorin avulla. HEA hyödyntää polttonesteestä sekä akuista saatua energiaa moottoreissa sekä lentokoneen järjestelmissä. AEA:sta on saatu poistettua kokonaan polttonestettä kuluttava turbiinimoottori sekä generaattori, eli se toimii pelkällä akuista saatavalla sähköenergialla.

MEA:n ollessa eniten käytössä oleva sähkölentokone, sille löytyy jo monia erilaisia sähköisiä sovelluksia. Niiden avulla siitä on saatu tehokkaampi sekä ympäristöystävällisempi ratkaisu lentämiseen. Kokoajan yritetään löytää uusia ja parempia ratkaisuja optimoimaan polttoaineen kulutusta sekä minimoimaan kasvihuone- ja melupäästöjä.

AEA:ta lähestytään asteittain tekemällä pieniä muutoksia MEA:han, jottei ilmailualalle tulisi suuria ja radikaaleja muutoksia liian nopeasti. Jos näin kävisi, se olisi taloudellisesti suuri haaste kerralla. AEA:n haasteita matkustajalentämiseen on sen tehon puute. Pienemmillä ja lyhyemmillä lennoilla voitaisiin käyttää AEA:ta. Akkuteknologiaa ja niitä koskevat muut kysymykset, kuten latausta ja käyttöikää täytyy vielä tutkia. Akkuja voitaisiin myös ladata lennonaikana, esimerkkinä MAR.

Tehoelektronikassa on paljon vielä tutkittavaa ja kehitettävää, jotta AEA saataisiin tehokkaammaksi ja sitä pystyttäisiin käyttämään useampaan eri käyttötarkoitukseen. Tavoitteena olisi saada tehoelektronikka komponenteista luotettavampia ja tehokkaampia. Sähkökoneiden tulisi olla myös pienempiä ja kevyempiä sekä niiden tulisi pystyä varastoimaan ja kuljettamaan sähköenergiaa tehokkaammin. Seuraavan 20 vuoden aikana on suunniteltu uusia AEA:ta valmistuvan ja niiden ennusteet ovat lupaavia.

6. LÄHTEET

- [1] ”Sähkölentokoneen ensilento Suomessa: Pioneerit uskovat kaupunkien välisen lentoliikenteen kasvuun, vaikka akut eivät vielä riitäkään Helsingistä Tampereelle”, *Yle Uutiset*, 31. heinäkuuta 2018. <https://yle.fi/uutiset/3-10331126> (viitattu 7. maaliskuuta 2022).
- [2] H. Schefer, L. Fauth, T. H. Kopp, R. Mallwitz, J. Friebe, ja M. Kurrat, ”Discussion on Electric Power Supply Systems for All Electric Aircraft”, *IEEE Access*, vsk. 8, ss. 84188–84216, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2991804.
- [3] ”Bensiinin ja dieselin hintakehitys - Autoalan Tiedotuskeskus”. https://www.aut.fi/tiilastot/verotus_hintakehitys_ja_liikennemenot/bensiinin_ja_dieselin_hintakehitys (viitattu 7. maaliskuuta 2022).
- [4] ”Venäjän hyökkäys | BP, Shell, Daimler, Volvo, Meta, Tiktok, Netflix, Nokia, Neste... Kansainväliset suuryhtiöt rynnivät nyt vauhdilla Venäjältä”, *Helsingin Sanomat*, 1. maaliskuuta 2022. <https://www.hs.fi/talous/art-2000008651396.html> (viitattu 7. maaliskuuta 2022).
- [5] ”Oil price rises again as buyers shun Russian crude”, *BBC News*, 2. maaliskuuta 2022. Viitattu: 7. maaliskuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.bbc.com/news/business-60584798>
- [6] J. Bastman, ”Sähkökoneet-opetusmateriaali”. Sähkökoneet-kurssi, Tampereen yliopisto, 2021.
- [7] M. Lv, Z. Chen, Y. Yang, ja J. Bi, ”Regenerative braking control strategy for a hybrid electric vehicle with rear axle electric drive”, teoksessa *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*, loka 2017, ss. 521–525. doi: 10.1109/CAC.2017.8242823.
- [8] E. Sayed *ym.*, ”Review of Electric Machines in More-/Hybrid-/Turbo-Electric Aircraft”, *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vsk. 7, nro 4, ss. 2976–3005, joulou 2021, doi: 10.1109/TTE.2021.3089605.
- [9] P. Thalin, R. Dr. Rajamani, J.-C. Maré, ja S. Taubert, *Fundamentals of electric aircraft*. Warrendale: SAE International, 2019.
- [10] S. P. Melo, F. Cerdas, A. Barke, C. Thies, T. S. Spengler, ja C. Herrmann, ”Life Cycle Engineering Modelling Framework for batteries powering electric aircrafts – the contribution of eVTOLs towards a more sustainable urban mobility”, *Procedia CIRP*, vsk. 105, ss. 368–373, tammi 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.02.061.
- [11] W. Cao, B. C. Mecrow, G. J. Atkinson, J. W. Bennett, ja D. J. Atkinson, ”Overview of Electric Motor Technologies Used for More Electric Aircraft (MEA)”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vsk. 59, nro 9, ss. 3523–3531, syys 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2165453.
- [12] P. Wheeler ja S. Bozhko, ”The More Electric Aircraft: Technology and challenges.”, *IEEE Electrification Mag.*, vsk. 2, nro 4, ss. 6–12, joulou 2014, doi: 10.1109/MELE.2014.2360720.
- [13] ”A380 | Airbus”, 16. kesäkuuta 2021. <https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/passenger-aircraft/a380> (viitattu 19. huhtikuuta 2022).
- [14] ”Boeing: 787 Dreamliner”. <https://www.boeing.com/commercial/787/#/overview> (viitattu 19. huhtikuuta 2022).
- [15] F. Blaabjerg, *Control of Power Electronic Converters and Systems: Volume 2*. San Diego, UNITED STATES: Elsevier Science & Technology, 2018. Viitattu: 20. huhtikuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=5377541>
- [16] ”Aircraft Power Systems - an overview | ScienceDirect Topics”. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/aircraft-power-systems> (viitattu 8. maaliskuuta 2022).

- [17] D. Cervinka, I. Pazdera, P. Prochazka, ja B. Klima, "Battery for small electric airplane", teoksessa *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, marras 2013, ss. 4576–4579. doi: 10.1109/IECON.2013.6699873.
- [18] S. T. Goh ja S. A. Zekavat, "All-Electric Aircraft mm-Wave High-Speed and Low Cost Mid-Air Recharging: Satellite and Aircraft Array Configuration Study", teoksessa *2021 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE)*, loka 2021, ss. 115–120. doi: 10.1109/WiSEE50203.2021.9613834.
- [19] N. Thapa, S. Ram, S. Kumar, ja J. Mehta, "All electric aircraft: A reality on its way", *Mater. Today Proc.*, vsk. 43, ss. 175–182, tammi 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.611.
- [20] J. Domone, "The challenges and benefits of the electrification of aircraft". kesäkuuta 2018. Viitattu: 18. maaliskuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.snclavalin.com/~media/Files/S/SNC-Lavalin/documents/beyond-engineering/electrification-white-paper.pdf>
- [21] B. V. Ravi Kumar, K. Sivakumar, K. M. Reddy, ja S. Karunanidhi, "A new fault tolerant dual rotor BLDC drive for electro-mechanical actuator in more electric aircraft applications", teoksessa *2017 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India)*, joulu 2017, ss. 1–4. doi: 10.1109/ITEC-India.2017.8356944.
- [22] P. Wheeler, "Technology for the more and all electric aircraft of the future", teoksessa *2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA)*, loka 2016, ss. 1–5. doi: 10.1109/ICA-ACCA.2016.7778519.
- [23] "Airplane Taxiing: An Introduction to Taxiing and How It Works | Blog- Monroe Aerospace". <https://monroeaerospace.com/blog/airplane-taxiing-an-introduction-to-taxiing-and-how-it-works/> (viitattu 21. maaliskuuta 2022).
- [24] M. T. E. Heinrich, F. Kelch, P. Magne, ja A. Emadi, "Regenerative Braking Capability Analysis of an Electric Taxiing System for a Single Aisle Midsize Aircraft", *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vsk. 1, nro 3, ss. 298–307, loka 2015, doi: 10.1109/TTE.2015.2464871.
- [25] J. Tao, J. Guo, ja C. Liu, "A review of powered wheel for aircraft", teoksessa *2016 IEEE International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS)*, loka 2016, ss. 378–383. doi: 10.1109/AUS.2016.7748078.
- [26] T. Balachandran, J. David Reband, J. Xiao, S. Sirimmana, R. Dhilon, ja K. S. Haran, "Co-design of an Integrated Direct-drive Electric Motor and Ducted Propeller for Aircraft Propulsion", teoksessa *2020 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS)*, elo 2020, ss. 1–11.
- [27] M. E. Amiryar ja K. R. Pullen, "A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications", *Appl. Sci.*, vsk. 7, nro 3, Art. nro 3, maaliskuu 2017, doi: 10.3390/app7030286.
- [28] K. R. Pullen, "11 - Flywheel energy storage", teoksessa *Storing Energy (Second Edition)*, T. M. Letcher, Toim. Elsevier, 2022, ss. 207–242. doi: 10.1016/B978-0-12-824510-1.00035-0.
- [29] D. W. Swett ja J. G. Blanche, "Flywheel charging module for energy storage used in electromagnetic aircraft launch system", *IEEE Trans. Magn.*, vsk. 41, nro 1, ss. 525–528, tammi 2005, doi: 10.1109/TMAG.2004.838745.
- [30] M. A. Conteh ja E. C. Nsofor, "A Study on Flywheel Energy Recovery from Aircraft Brakes", vsk. 1, nro 5, s. 5, 2014.
- [31] M. Strasik *ym.*, "An overview of Boeing flywheel energy storage systems with high-temperature superconducting bearings", *Supercond. Sci. Technol.*, vsk. 23, nro 3, s. 034021, maaliskuu 2010, doi: 10.1088/0953-2048/23/3/034021.
- [32] "What is mach number | Stratos Jets Charters", 16. kesäkuuta 2017. <https://www.stratosjets.com/glossary/mach-number/> (viitattu 3. syyskuuta 2022).
- [33] "The E-Fan X programme". <https://www.rolls-royce.com/media/our-stories/insights/2018/paul-stein-talks-about-e-fan-x.aspx> (viitattu 5. syyskuuta 2022).