



AKKUKÄYTTÖISTEN HENKILÖKULJETUKSEEN SOVELTUVIEN SÄHKÖILMA-ALUSTEN TEKNIIKAN NYKYTILANNE

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2022

Teemu Pasanen

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Lasse Laurila

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Sähkötekniikka

Teemu Pasanen

Akkukäyttöisten henkilökuljetukseen soveltuvien sähköilma-alusten tekniikan nykytilanne

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2022

49 sivua, 13 kuvaa ja 3 taulukkoa

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Lasse Laurila

Avainsanat: sähkölentokone, lentotaksi, eVTOL, akkulentokone, voimalinja, sähkömoottori, invertteri, moottorinohjain, akkuteknologia, nykytilanne

Ilmastonmuutos vaatii uusia ratkaisuja ja suuria muutoksia esimerkiksi liikenteessä. Kaupallinen lentoliikenne tuottaa paljon päästöjä, ja ennen koronapandemiaa päästöjen odotettiin kasvavan tulevaisuudessa kiihtyvällä tahdilla. Yksi ratkaisu lentoliikenteen päästöjen vähentämisessä vähentämättä lentämistä on fossiilisista polttoaineista luopuminen. Tässä työssä keskitytään akkukäyttöisiin sähköilma-aluksiin. Muita ratkaisuja voi olla esimerkiksi vedyn käyttö energiavarastona joko polttoaineena moottoreille tai polttokennoille.

Työn tavoitteena on selvittää akkukäyttöisten sähköilma-alusten voimalinjan tekniikan nykytilanne, esimerkiksi akkujen ja moottorien osalta. Työssä tutkitaan ja vertaillaan eri tekniikoita sekä eri valmistajien kehityksessä olevia akkukäyttöisiä sähkölentolaitteita sekä konsepteja. Työssä luodaan katsaus myös teknologioiden tulevaisuuden kehitykseen.

Tuloksena nähdään, että tällä hetkellä on mahdollista toteuttaa pieniä, muutamien matkustajien sähkölentokoneita sekä eVTOL-aluksia (electric Vertical Take-Off and Landing). Keskomagneettitahtikoneita kehitellään tällä hetkellä paljon sähköilma-aluksiin. Niillä on saavutettu jopa 9 kW/kg ominaisteho. Litiumioniakuilla on tällä hetkellä paras ominaisenergia, noin 250 Wh/kg, mutta sähkölentokoneet vaativat akuilta tähän verrattuna moninkertaista ominaisenergiaa. Akkuteknologia on suurin tekijä, mikä rajoittaa sähköilma-alusten kantamaa sekä hidastaa suurempien matkustajakoneiden kehitystä. Tällä hetkellä ainoastaan yksi akkukäyttöinen pienkone on saanut tyyppihyväksynnän Euroopan unionin lentoturvallisuusvirastolta, ja seuraavan kolmen vuoden sisällä on odotettavissa ainakin kahden eVTOL-aluksen saavuttavan tyyppihyväksynnän, joko Euroopassa tai Yhdysvalloissa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Teemu Pasanen

State of the art of technologies used in battery-powered manned electric aircrafts

Bachelor's thesis

2022

49 pages, 13 figures and 3 tables

Examiner: Associate professor Lasse Laurila

Keywords: electric plane, air taxi, eVTOL, battery powered aircraft, powertrain, electric motor, inverter, motor controller, state-of-the-art

Climate change has led to coming up with new solutions and big changes for example in transportation. Commercial air transportation produces lot of emissions, and before the pandemic, emissions were expected to increase in the coming years. One solution for reducing the emissions of air transportation without reducing flying is to stop using fossil fuels. This thesis is focusing on battery-powered electric aircrafts. Other solutions could be use of hydrogen in fuel cells or directly for combustion in jet engines.

The aim of this thesis is to investigate the state of the art of technologies used in the power train of a battery-powered aircraft, for example motors and batteries. Different technologies used in components and differences between manufacturers are compared. Also, a comparison between already available electric aircrafts and prototypes that are in development is conducted. Finally, a short overview of future technologies and concepts is provided.

Small airplanes and eVTOL (electric Vertical Take-Off and Landing) aircrafts that can carry few passengers are possible to implement with the technology available today. The state of the art of electric motors for aviation are permanent magnet synchronous machines. They can reach a specific power of up to 9 kW/kg. The state-of-the-art batteries are lithium-ion batteries. They have the highest specific energy of all available battery types, around 250 Wh/kg. Bigger electric planes though require up to five times higher specific energy than 250 Wh/kg. Battery technology is the single most decisive factor constraining the range of electric aircrafts and restraining the development of large passenger airplanes. At the moment, only one battery-powered airplane has received a type certification from the European Union Aviation Safety Agency. In the next three years, at least two eVTOL aircrafts are expected to receive type certification either in United States or in Europe.

LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

| | |
|--------|---|
| AFPMSM | Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine |
| BLDC | Brushless Direct Current Motor |
| BMS | Battery Management System |
| CNT | Carbon Nanotube |
| EASA | European Union Aviation Safety Agency |
| eVTOL | Electric Vertical Take-Off and Landing |
| FAA | Federal Aviation Administration |
| GaN | Gallium Nitride |
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistor |
| LCO | Lithium Cobalt Oxide |
| LFP | Lithium Iron Phosphate |
| Li-ion | Lithium ion |
| LMO | Lithium Manganese Oxide |
| LSA | Light Sport Aircraft |
| LTO | Lithium Titanate |
| MOSFET | Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor |
| NCA | Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide |
| NMC | Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide |
| PMSM | Permanent Magnet Synchronous Machine |
| SiC | Silicon Carbide |

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenneluettelo

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Johdanto..... | 6 |
| 2 | Tekniikka..... | 8 |
| 2.1 | Akku..... | 9 |
| 2.1.1 | Käytössä oleva akkuteknologia | 10 |
| 2.1.2 | Akkuteknologian tämänhetkinen tilanne | 11 |
| 2.1.3 | Tulevaisuuden akkuteknologiat | 12 |
| 2.1.4 | Tehoakku vai energia-akku?..... | 13 |
| 2.2 | Moottori..... | 15 |
| 2.2.1 | PMSM-koneet..... | 17 |
| 2.2.2 | Käytössä olevat moottorit | 18 |
| 2.2.3 | Kehityksessä olevat moottorit..... | 19 |
| 2.3 | Tehoelektroniikka | 21 |
| 2.3.1 | BMS | 22 |
| 2.3.2 | Invertteri ja DC/DC-muunnin..... | 22 |
| 2.4 | Johtimet..... | 23 |
| 3 | Kehityksessä olevia prototyyppejä..... | 25 |
| 3.1 | Lentokoneita..... | 26 |
| 3.2 | VTOL-aluksia | 28 |
| 3.3 | Vertailua..... | 28 |
| 4 | Tulevaisuuden kehityssuunnat..... | 35 |
| 4.1 | Konsepteja..... | 35 |
| 4.2 | Patentteja..... | 37 |
| 5 | Yhteenveto..... | 39 |
| | Lähteet | 41 |

1 Johdanto

Ilmastonmuutoksen hillitseminen ja kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen on läsnä monen yhtiön toiminnassa. Teollisuuden prosessit muuttuvat yhä energiatehokkaammiksi, ja koko maailma sähköistyy vauhdilla. Hyvä esimerkki sähköistymisestä on henkilöautoliikenteen sähköistyminen, joka on vuonna 2021 kiihtynyt entisestään. Vuoden 2021 sähköautojen myyntiluvut ovat maailmanlaajuisesti tarkasteltuna yli kaksinkertaistuneet edelliseen vuoteen verrattuna (Irle 2022). Vuoden 2022 tammikuussa uusia sähköautoja rekisteröitiin 87 % enemmän vuoteen 2021 verrattuna (Kane 2022). Sähköistyminen ylettyy kaikille liikenteen osa-alueille, myös lentoliikenteeseen. Sähkölentokoneet vähentäisivät kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi lentoliikenteen meluhaittoja. Näin ollen sähköilma-alukset mahdollistaisivat myös kaupunkiliikenteen toimimalla esimerkiksi lentotakseina, sekä lähikaupunkien välisessä lentoliikenteessä operoituna pieniltä kaupunkikentiltä.

Arvioiden mukaan kaupallinen rahti- ja matkustajalentoliikenne aiheutti yhteensä 918 miljoonan tonnin CO₂-päästöt vuonna 2018, joka on 2,4 % kaikista päästöistä, jotka ovat aiheutuneet fossiilisten polttoaineiden käytöstä (Graver et al. 2019). Vuonna 2018 käytössä oli maailmanlaajuisesti yhteensä 26 307 rahti- ja matkustajalentokonetta, joilla lennettiin yhteensä noin 39 miljoonaa lentoa (Graver et al. 2019, Oliver Wyman 2018). Vuonna 2019 erilaisia sähkökäyttöisiä ilma-aluksia oli kehityksessä 215, joista noin 45 % oli niin sanottuja lentotakseja, noin 40 % yleiseen ilmailuun tarkoitettuja pienkoneita, ja loput, eli noin 15 %, alueelliseen lentoliikenteeseen sekä suuren mittaluokan kaupalliseen matkustajalentoliikenteeseen tarkoitettuja (Thomson 2020).

Työn tavoitteena on selvittää akkukäyttöisten sähköilma-alusten tekniikan nykytilanne, ns. ”state of the art”. Työssä luodaan katsaus tällä hetkellä käytössä oleviin akku- ja moottoritekniikoihin sekä muihin voimalinjan komponentteihin, sekä tutustutaan potentiaalisiin tulevaisuuden teknologioihin. Työssä vertaillaan eri tekniikoita sekä eri valmistajien jo saatavilla olevia ilma-aluksia ja kehityksessä olevia prototyypppejä sekä konsepteja. Työssä käsitellään vähintään yhden ihmisen tai vastaavan massan kuljettamiseen kykeneviä ja kokonaan sähköllä työntövoiman tuottavia akkukäyttöisiä ilma-aluksia.

Tutkimuskysymyksiä ovat:

- Mikä on akkulentokoneiden voimalinjan tekniikan nykytilanne?
- Kuinka tekniikat eroavat eri valmistajien välillä?
- Kuinka käyttökelpoisia akkulentokoneet tällä hetkellä ovat esimerkiksi kantaman ja kuljetuskapasiteetin suhteen?
- Millaiset tulevaisuudennäkymät on sähköisellä ilmailulla?

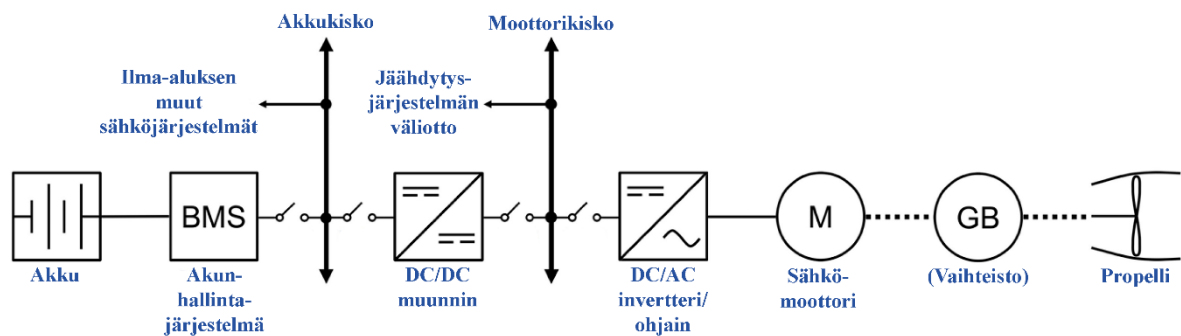
Tutkimusmenetelmänä on kirjallisuustutkimus. Tietoa eri komponenttien kehityksestä ja ominaisuuksista löytyy niiden valmistajien sivuilta ja alan uutisjulkaisuista. Tieteellisissä julkaisuissa käsitellään yleensä myös vielä varhaisemmassa kehityksen vaiheessa olevia tekniikoita. Ilma-aluksia valmistavien ja kehittävien yhtiöiden sivuilta löytyy tietoja esimerkiksi aluksen nopeudesta, toimintamatkasta ja kuljetuskapasiteetista. Valmistajat eivät yleensä kerro tarkempia teknisiä tietoja käytettyihin komponentteihin liittyen kehityksen alkuvaiheilla. Eri komponenttien ominaisuuksia vertaillaan taulukkomuodossa, mistä voidaan helposti havaita eroja ja yhtäläisyyksiä. Erilaisia alusten rakenteita vertaillaan valokuvien perusteella, joista nähdään erilaiset rakenteelliset lähestymistavat ja toteutukset.

Työn alussa perehdytään tärkeimpiin sähköisen voimalinjan komponentteihin ja teknologian nykytilanteeseen, sekä arvioidaan niiden tämänhetkistä hyödynnettävyyttä sähkölentokoneissa. Lisäksi tarkastellaan, kuinka komponenttien kehitys lähitulevaisuudessa etenee. Sen jälkeen tutkitaan erilaisia kehityksessä olevia sähköisiä lentolaitteita sekä prototyyppejä. Ilma-aluksissa käytettyjä teknologioita sekä erilaisia rakenteita vertaillaan eri valmistajien välillä. Lisäksi arvioidaan tämänhetkisten prototyyppien käytännöllisyyttä esimerkiksi kantaman näkökulmasta. Lopuksi luodaan katsaus tulevaisuuden konsepteihin sekä arvioidaan niiden aikataulun ja toteutuksen realistisuutta tämänhetkisen kehityksen valossa.

2 Tekniikka

Erityyppiset sähköilma-alukset jakaantuvat pääasiassa kahteen ryhmään: eVTOL-alukset (Electric Vertical Take-Off and Landing), jotka nousevat sekä laskeutuvat pystysuoraan, sekä perinteiset kiinteäsiipiset lentokoneet. eVTOL-alukset pystyvät kuljettamaan yleensä 1...7 ihmistä. Kiinteäsiipisten sähkölentokoneiden kapasiteetti on tällä hetkellä yleensä kaksi henkilöä. Tulevaisuudessa myös sähköiset satojen matkustajien kepearunko- ja laajarunkokoneet voivat olla mahdollisia. Kepearunkokoneilla tarkoitetaan matkustajakonetta, jossa on vain yksi käytävä istuinten välissä. Laajarunkokoneissa sen sijaan on kaksi käytävää ja enemmän matkustajapaikkoja.

Kaikkien komponenttien tulee olla mahdollisimman kevyitä, sillä lentokoneissa massalla on suuri merkitys. Tämänhetkinen akkuteknologia, etenkin akkujen massa, on pääasiallinen rajoittava tekijä suuren mittakaavan sähkölentokoneita ajatellen. Akkujen sisältämä energia massayksikköä kohden, eli ominaisenergia, on huomattavasti pienempi kuin nykyisin käytetyillä polttoaineilla. Tähän ratkaisuna voi olla esimerkiksi vetykäyttöiset lentokoneet, jotka tuottavat sähköä polttokennoilla ja käyttävät sähkömoottoreita työntövoiman tuottamiseen, tai polttomoottorilentokoneet, jotka käyttävät polttoaineena vetyä. Tässä työssä keskitytään pelkästään akkuihin energiavarastoina. Kuvassa 2.1 esitetyt voimalinjan komponentit akkua ja akunhallintajärjestelmää lukuun ottamatta sisältyvät myös muihin kuin akkuja käyttäviin sähkölentokoneisiin.



Kuva 2.1. Akkukäyttöisen lentokoneen sähköisen voimalinjan ja sähkönsiirron tärkeimmät komponentit. Akku- ja moottorikiskojen nuolet kuvaavat mahdollisuutta useiden akkujen ja moottoreiden käytölle. (Gnadt et al. 2018)

Edellä olevassa kuvassa 2.1 on esitetty akkukäyttöisen sähkölentokoneen komponentteja, joihin seuraavissa luvuissa keskitytään tarkemmin. DC/DC-jännitemuuntimella voidaan nostaa jännitettä, jolloin virtaa ja johtimien poikkipinta-alaa voidaan pienentää ja sen avulla vähentää häviöitä johtimissa. Pienkoneissa ei yleensä tarvita jännitemuunninta, sillä akkujen ja moottorin välinen etäisyys ei ole suuri, jolloin tällä välillä ei tapahdu suuria häviöitä. Invertteri muuttaa akulta saatavan tasajännitteen vaihtojännitteeksi, jolla useimmat sähkömoottorit toimivat, sekä toimii samalla ohjaimena ja muuttaa esimerkiksi vaihtojännitteen taajuutta. Kuvassa 2.1 ei ole nimetty erikseen johtimia, kytkimiä tai muita suojalaitteita, mutta niidenkin vaikutus on jossain määrin merkittävä. Vaihteistoa ei yleensä tarvita sähkölentokoneissa, mutta sitä on mahdollista käyttää joissain tapauksissa. Vaihteisto aiheuttaa häviöitä ja sen käyttöä pyritään kuitenkin välttämään, joten sitä ei tässä työssä käsitellä.

2.1 Akku

Akkujen pieni ominaisenergia, eli varastoidun energian suhde akun massaan, verrattuna lentokoneissa käytettäviin polttoaineisiin on yksi suurimmista yksittäisistä tekijöistä, jotka rajoittavat suurten akkukäyttöisten lentokoneiden kehitystä. Esimerkiksi JET A-1 -lentopolttoaineen ominaisenergia on vähintään 42,8 MJ/kg eli noin 11,9 kWh/kg (Neste 2021). Panasonicin NCR18650BF-tyypin Li-ion-kennolle on ilmoitettu ominaisenergiaksi 248 Wh/kg (Panasonic n.d.). Näin ollen lentopolttoaineen ominaisenergia on noin 48-kertainen verrattuna Panasonicin NCR18650BF- kennoon.

Paikallisliikenteessä 30 matkustajan lentokoneella ja 650 km:n kantamalla, akkukäyttöisen lentokoneen akkujen ominaisenergian tulisi olla noin 600 Wh/kg. 930 km:n kantamalle ja 150 matkustajan kapearunkokoneelle akkujen ominaisenergiaksi tarvitaan noin 820 Wh/kg. Suurelta laajarunkokoneelta, jonka kantama olisi 1850 km ja matkustajia 300, vaadittaisiin noin 1280 Wh/kg ominaisenergialtaan olevia akkuja. (Bills et al. 2020.) Näin ollen vaadittaisiin yli kaksinkertainen ominaisenergia NCR18650BF-kennoon verrattuna, jotta voitaisiin toteuttaa pieniä matkustajakoneita lyhyille matkoille. Suurille matkustajakoneille vaadittaisiin yli viisinkertainen ominaisenergian parannus.

Tässä työssä Li-ion-akuilla tarkoitetaan tällä hetkellä markkinoilla olevia akkuja, joiden toiminta perustuu litiumionin liikkumiseen akun anodin ja katodin välillä. Li-ion-akkujen kuusi

yleisintä akkukemiaa ovat LCO (Lithium Cobalt Oxide), LFP (Lithium Iron Phosphate), LMO (Lithium Manganese Oxide), NCA (Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide), NMC (Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide) ja LTO (Lithium Titanate) (Battery University 2021). Näiden nykyisten litiumioniakkujen lisäksi kehitteillä on muitakin litiumia sisältäviä akkuja, joista käytetään muita lyhenteitä kuin Li-ion.

Akkujen C-arvoa käytetään hyvin yleisesti kuvaamaan akun kykyä syöttää tai vastaanottaa virtaa, eli käytännössä akun turvallista purkaus- tai latausvirtaa. Esimerkiksi, jos 10 Ah akulle ilmoitetaan jatkuvan purkamisen C-arvoksi 1C, se tarkoittaa, että akkua voi purkaa jatkuvasti 10 A virralla tunnin ajan. Jos taas C-arvo on 5C, voi akkua purkaa 50 A virralla 1/5 tunnin ajan. Vastaavasti jos kapasiteetti on ilmoitettu yksikössä Wh, saadaan C-arvon perusteella purkuteho. Oletetaan, että edellä mainitun esimerkkiakun nimellisjännite on 3,7 V, jolloin kapasiteetti on 37 Wh. Tällöin akkua voi purkaa 1C arvolla 37 W teholla, josta saadaan virraksi 10 A, jakamalla teho akun nimellisjännitteellä. Yleisesti suuremman ominaiskapasiteetin kennoilla on pienempi C-arvo kuin pienemmän ominaiskapasiteetin kennoilla. Tämän vuoksi puhutaan yleensä tehoakuista ja energia-akuista, sillä suurta ominaisenergiaa ja -tehoa on hankala saada samaan pakettiin.

2.1.1 Käytössä oleva akkuteknologia

Maailman ensimmäinen ja tällä hetkellä ainoa tyyppihyväksytty sähkölentokone on slovenialaisen Pipistrelin Velis Electro (Pipistrel n.d.a). Velis Electro sai EASA:n (European Union Aviation Safety Agency) tyyppihyväksynnän kesäkuussa 2020 (EASA 2020a). Pipistrelillä on myös toinen kaupallisesti saatavilla oleva sähkölentokonemalli, Alpha Electro. Alpha Electroa ei ole kuitenkaan tyyppihyväksytty, sillä se on LSA (Light Sport Aircraft), eli se on riittävän kevyt, jolloin se ei tarvitse tyyppihyväksyntää.

Velis Electrossa käytetään nimelliskapasiteetiltaan 12,4 kWh litiumioniakkuja, joita on kaksi kappaletta rinnan kytkettynä (Pipistrel n.d.a). Yksittäisen akkupaketin massa on noin 72 kg, johon sisältyy myös akkuun integroitu BMS (Battery Management System) eli akustonhallintajärjestelmä (Pipistrel n.d.b). Näin ollen akkupaketin ominaisenergiaksi tulee noin 172 Wh/kg.

Myös Alpha Electrossa käytetään kahta litiumioniakkua, molemmat nimelliskapasiteetiltaan 10,5 kWh, ja massaltaan noin 53 kg (Pipistrel 2017). Näin ollen akkupaketin ominaisenergiaksi saadaan noin 198 Wh/kg. Akkupaketin pienempi massa johtuu ainakin osaltaan nestejäähdytyksen puutteesta verrattuna Velis Electroon.

2.1.2 Akkuteknologian tämänhetkinen tilanne

Tällä hetkellä saatavilla ja kaupallisessa käytössä olevista akkuteknologioista suurin ominaisenergia on litiumioniakuilla. Useilla Panasonicin NCR18650-tyyppisillä Li-ion-kennoilla on markkinoiden paras ominaisenergia, kuten edellä mainitulla NCR18650BF-kennolla, noin 250 Wh/kg. Tämän kennon C-arvo on lyhytaikaisena noin 2,6C ja jatkuvana noin 1,5C (Voltaplex 2020a).

NCR18650BF-kennojen käyttöikä on noin 400...450 latausykliä (Panasonic n.d.). Akkujen käyttöiällä tarkoitetaan yleensä latausyklar määrää, joiden jälkeen akun kapasiteetista on jäljellä 80 %. Yhdellä latausyklillä tarkoitetaan akun kapasiteetin purkamista kokonaan ja sen lataamista. Akut ovat kuitenkin vielä täysin käyttökelpoisia saavutettuaan käyttöiän, ainostaan niiden kapasiteetti on heikentynyt.

Li-ion-akkujen ominaisenergia vaihtelee käytetystä akkukemiasta riippuen tyypillisesti välillä 80...240 Wh/kg (Battery University 2021). Litiumioniakkujen teoreettinen ominaisenergian maksimi on akkukemiasta riippuen 396...607 Wh/kg (Gnadt et al. 2018). Teoreettisesti olisi siis mahdollista saavuttaa pienen 30 matkustajan sähkölentokone litiumioniakuilla, mutta se vaatisi edelleen lisäkehitystä akkujen osalta. Teoreettista ominaisenergiaa ei ole kuitenkaan aina mahdollista saavuttaa tinkimättä esimerkiksi turvallisuudesta tai muista kennojen ominaisuuksista, joten tulevaisuudessa tarvitaan muita akkuteknologioita.

On tärkeää huomata, että kennojen ja itse akkupakettien ominaisenergia eroaa suuresti, sillä kennot täytyy liittää toisiinsa, ne tarvitsevat suojaavan kotelon ympärilleen ja myös akustonhallintajärjestelmän. Kennojen kehittymisen lisäksi myös niiden paketoiminen kokonaiseksi akkupaketiksi täytyy kehittyä ja akkupaketit saada kevyemmiksi. Akut tarvitsevat myös jäähdytystä, joka yleensä hoidetaan nestejäähdytyksellä. Tällä hetkellä sähköajoneuvoissa 65...75 % akkupaketin massasta koostuu itse akkukennoista, mutta tulevaisuudessa on odotettavissa tämän luvun nousevan yli 80 %:iin (Gnadt et al. 2018).

Muitakin näkökulmia, esimerkiksi ympäristöystävällisyys, eettisyys ja turvallisuus, täytyy ottaa huomioon akkujen valmistuksessa ja käytössä. Li-ion-akut ovat melko kalliita, sillä ne sisältävät useita harvinaisia metalleja. Useimmat Li-ion-akkujen kemiat käyttävät myös kobolttia, jota louhivat kaivokset Kongossa käyttävät jopa lapsityövoimaa (Frankel 2016). Li-ion-akut ovat myös melko herkkiä esimerkiksi liian suurelle lämpötilalle sekä mekaanisille vaurioille. Väärinkäsittelyn seurauksena litiumioniakku voi syttyä tuleen, jolloin sitä on hankala sammuttaa.

2.1.3 Tulevaisuuden akkuteknologiat

Tulevaisuudessa akkujen ja kennojen täytyy olla entistä kevyempiä sekä halvempia, sillä matkustajalentokoneluokassa akkuja vaaditaan valtava määrä. Akkujen tulisi myös kestää mahdollisesti tuhansia lataus- ja purkusyklejä, jotta ne olisivat taloudellisesti järkeviä. Alla olevassa taulukossa 2.1 on vertailtu potentiaalisia tulevaisuuden akkuteknologioita.

Taulukko 2.1. Kehityksessä ja tutkimuksessa olevia akkutekniikoita, niiden keskeisimmät ominaisuudet ja uusin tieto kehityksen tilanteesta, suluissa vuosi, jolta tieto on. Metallililma-akkujen luvuissa on otettu myös ilma huomioon, ilman sitä luvut olisivat korkeammat.

| Kemia | Teoreettinen ominaisenergia [Wh/kg] | Saavutettu ominaisenergia [Wh/kg] | Käyttöikä [syklejä] |
|----------|--|--------------------------------------|---|
| Na-ion | - | 90 (2015) [4] 160 (2021) [3] | >2000 (2015) [4] |
| Li-S | 2567 [1] | 400 (2019) [6] 750 (2021) [5] | 60...100 (2019) [6] 250...300 (2021) [5] |
| Li-metal | 1054 [1] | 375 (2021) [2] | 60...100 (2021) [2] |
| Li-Se | 1155 [1] | 430 (2020) [7] | - |
| Zn-air | 1087 [1] | 35 (2017) [8] | - |
| Li-air | 3505 [1] | - | - |
| Al-air | 2793 [1] | 1 350 [9] | Ei ladattava |

Lähteet: [1] Gnad et al. 2018, [2] SolidEnergy 2021, [3] CATL 2021, [4] Cailloce 2015, [5] Li-S Energy 2021, [6] Oxis Energy 2019, [7] Jin et al. 2020, [8] Tullo 2017, [9] Métaelectrique n.d.

SolidEnergy on kehittänyt Li-metal-akkua, jonka ominaisenergia on tällä hetkellä parhaimmillaan noin 375 Wh/kg, ja kaupallistamisen odotetaan olevan edessä vuonna 2025. Kyseinen ominaisenergia saavutetaan C-arvolla 0,1C, kun taas tehokkaamman 5C arvoltaan olevan kennon ominaisenergia on hieman pienempi, 321 Wh/kg. (SolidEnergy 2021.)

Li-S-akkua ovat kehittäneet Oxis Energy ja Li-S Energy. Li-S Energy on saavuttanut jo melko suuren ominaisenergian, noin 750 Wh/kg, ja tekniikan kaupallistamisen odotetaan tapahtuvan kahden vuoden kuluessa (Li-S Energy 2021). Oxis Energyllä on kaksi Li-S-kennoa, joiden ominaisenergiat ovat 300 Wh/kg ja 400 Wh/kg. Pienemmän ominaisenergian kennolla lyhytaikaisen purkamisen C-arvo on 6C, ja jatkuvana 3C. Suuremman ominaisenergian kennolla vastaavat C-arvot ovat 2C ja 1C (Oxis Energy 2019).

Erilaiset metalli-ilma-akut ovat kiinnostavia niiden korkean teoreettisen ominaisenergian vuoksi, esimerkiksi Li-air-akulla suurin teoreettinen ominaisenergia on 3505 Wh/kg (Gnadt et al. 2018). Metallililma-akuissa käytetään jotain metallia anodissa, ja katodi käyttää ympäröivää ilmaa, jolloin katodilla ei tarvita raskaita metalleja ja akku saadaan kevyemmäksi (Liu et al. 2017). Niiden kehitys on kuitenkin vielä hyvin varhaisessa vaiheessa. NantEnergy on tuonut ainoana yhtiönä metalli-ilma-akun kaupallisesti saataville, Zn-air-kemialla. Tällä hetkellä sen ominaisenergia, 35 Wh/kg, on kuitenkin vaatimaton verrattuna esimerkiksi Panasonicin parhaimpiin Li-ion-kennoihin (Tullo 2017).

Métalectrique on kehittämässä Al-air-primääriakkua, eli ei-ladattavaa akkua eli paristoa. Sen väitetään saavuttavan tällä hetkellä jopa 1 350 Wh/kg ominaisenergian. Al-air-kennossa alumiini reagoi hapen kanssa elektrolyytinesteen kautta, ja muuttuu alumiinioksidiksi, jolloin kennolta saadaan sähkövirtaa ulos. Al-air-kennoja ei pysty lataamaan, mutta alumiinioksidi voidaan muuttaa pelkistysprosessin kautta takaisin alumiiniksi, jota voidaan käyttää uusissa kennoissa, jotka voidaan puolestaan vaihtaa käytettyjen tilalle. (Métalectrique n.d.)

2.1.4 Tehoakku vai energia-akku?

Akkukemioiden ominaisuudet vaihtelevat paljon niiden rakenteen ja niissä käytettyjen erilaisien akkukemioiden vuoksi, sillä eri käyttökohteet vaativat akuilta erilaisia ominaisuuksia.

Yleensä akut jaotellaan niin kutsuttuihin tehoakkuihin ja energia-akkuihin. Tehoakut sopivat melko lyhytaikaisiin ja paljon hetkellistä tai jatkuvaa tehoa vaativiin käyttökohteisiin, sillä niistä saadaan otettua suurta virtaa, mutta niissä on pienempi ominaisenergia verrattuna energia-akkuihin. Energia-akut sopivat käyttökohteisiin, joissa ei vaadita suurta virtaa, mutta akussa täytyy riittää kapasiteettia mahdollisimman pitkäksi ajaksi. Niiden suurin jatkuva virta on paljon pienempi kuin tehoakkujen, mutta vastaavasti ominaisenergia on jonkin verran suurempi.

Esimerkiksi Panasonicin UR18650RX -kenno on niin kutsuttu tehoakku tai -kenno, sillä sen jatkuva C-arvo on noin 12,8C, joka tämän kennon tapauksessa vastaa 25 A virtaa, mutta ominaisenergia on vain noin 150 Wh/kg (Voltaplex 2020b). Näin ollen kyseisen kennon ominaistehoksi saadaan noin 1 920 W/kg. Panasonicin NCR18650BF -kenno on sen sijaan niin kutsuttu energia-akku tai -kenno, sillä sen ominaisenergia on noin 250 Wh/kg, mutta jatkuvan purkuvirran C-arvo on noin 1,5C, joka vastaa tämän kennon tapauksessa noin 4,9 A virtaa. Näin ollen tämän kennon ominaistehoksi saadaan noin 375 W/kg.

Lentokoneen suurin tehontarve saavutetaan lentoonlähdön aikana. Erään 150 matkustajan kapearunkokoneen huipputeho on noin 35 MW, ja 1850 km lennon aikana kulutettu energia on noin 59 MWh. Lentomatkan kasvaessa huipputeho ei merkittävästi kasva, mutta tehontarve matkalentokorkeudessa lentäessä on noin 10 MW, eli energiantarve kasvaisi noin 10 MWh:lla jokaista lisälentotuntia kohden. (National Academies of Sciences, Engineering and Medicine 2016.) Edellä mainituilla kennoilla tämän lentokoneen sähköistäminen mainitulle lentomatkalle vaatisi seuraavassa taulukossa 2.2 esitetyt massat.

Taulukko 2.2. Edellä mainitun kapearunkolentokoneen lentoprofilin huipputehontarpeen ja energiankulutuksen mukaan energiavarastoille lasketut vaadittavat massat. Kahden ominaisuuksiltaan erilaisen litiumionikennon lisäksi taulukossa on tarvittava lentopolttoaineen massa.

| | Energiavaraston massa tehontarpeen mukaan [kg] | Energiavaraston massa energiantarpeen mukaan [kg] |
|-------------------------|--|---|
| UR18650RX-tehokenno | 18 230 | 1 060 000 |
| NCR18650BF-energiakenno | 93 330 | 236 000 |
| Lentopolttoaine | - | 9 920 |

Lentopolttoaineen ominaisenergia on noin 11,9 kWh/kg. Kapearunkokoneiden suihkumootoreiden terminen hyötysuhde on yleensä noin 50 % luokkaa (National Academies of Sciences, Engineering and Medicine 2016). Näin ollen lentopolttoaineesta mekaaniseksi energiaksi saatava osuus on noin 5,95 kWh/kg. Tällöin edellä mainitun lennon energiankulutuksen perusteella lentopolttoainetta tarvittaisiin noin 9 920 kg.

Lentopolttoaineen tarve on puolet vähemmän kuin akkukennoille pienin laskettu tarvittava massa, joka oli saavutettu tehokennoilla tehontarpeen mukaan laskettuna. Sen sijaan tehokennoille energiantarpeen kautta laskettu massa on yli satakertainen polttoaineeseen verrattuna, ja energiakennoillakin yli kaksikymmenkertainen. Myös energiakennoilla saadaan tehontarpeen mukaan laskettuna pienempi massa kuin energiantarpeen perusteella. Akkuteknologian kehityksen suurin haaste on siis saada ominaisenergialtaan suurempia kennoja, sillä ominaistehossa ollaan jo paljon lähempänä vaadittuja ominaisuuksia. Esimerkiksi Airbus A319neo -lentokoneen, jonka maksimikapasiteetti on 160 matkustajaa, suurin lentoonlähtömassa on 75,5 tonnia (Airbus 2022). Tarvittavalla määrällä energiakennoja ei kyseinen lentokone edes pääsisi ilmaan.

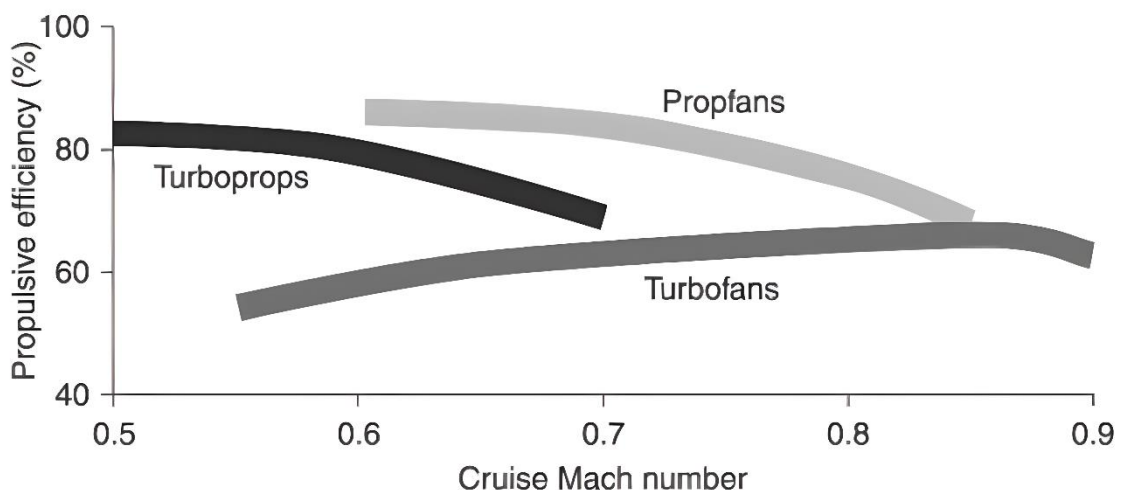
2.2 Moottori

Nykyiset lentokoneissa käytettävät suihkumoottorit ovat tehokkaita niiden kokoonsa nähden. Suihkumootoreiden ominaistehoa, eli tehoa massaa kohden, on vaikea määrittää, sillä suihkumoottorit eivät suoranaisesti tuota tehoa vaan työntövoimaa. Kuitenkin esimerkiksi Rolls Roycen Trent XWB -suihkumoottorin tehosta kerrotaan, että ”kaikki 68 korkeapaineturbiinin siipeä tuottavat 800 hevosvoimaa lentoonlähdessä” (Rolls Royce n.d.). Näin ollen Trent XWB-moottorin huipputehoksi saataisiin noin 40,57 MW. Tällöin ilmoitetulla 7277 kg kuivapainolla ominaistehoksi saadaan noin 5,6 kW/kg (EASA 2019a). Kuivapainolla tarkoitetaan moottorin massaa ilman jäähdytys- tai muita nesteitä sekä ilman lentokoneeseen liittämiseen tarvittavia osia. Tämä ominaisteho ei ole luultavastikaan suoraan vertailtavissa esimerkiksi sähkömoottorien ominaistehoon.

Sähkömoottorilentokoneissa akkujen ei tarvitsisi sisältää yhtä paljon energiaa kuin lentopolttoaine, sillä suihkumootoreiden kokonaishyötysuhde koostuu kahdesta hyötysuhteesta, termodynaamisesta ja propulsiivisesta hyötysuhteesta. Sähkömoottoreiden hyötysuhde on

yleensä paljon parempi kuin suihkumoottoreiden termodynaaminen hyötysuhde. Termodynaaminen hyötysuhde kuvaa sitä, kuinka suuren osan polttoaineen sisältämästä energiasta moottori saa muutettua mekaaniseksi energiaksi. Sähkömoottorin hyötysuhde kuvaa kuinka paljon moottorin ottamasta sähköenergiasta saadaan muutettua mekaaniseksi energiaksi. Propulsiivinen hyötysuhde kuvaa taas sitä työn osuutta mekaanisesta energiasta, joka oikeasti liikuttaa lentokonetta eteenpäin (Soares 2008). Ainoastaan propulsiivinen hyötysuhde vaikuttaa sekä perinteisessä suihkumoottorissa että sähköisissä työntövoimajärjestelmissä.

Sähkömoottoreilla ajetaan yleensä erilaisilla potkureilla varustettuja työntövoimajärjestelmiä. Potkureilla voidaan saavuttaa parhaimmillaan noin 85 % propulsiivinen hyötysuhde (Spakovszky 2002). Toisaalta lentonopeuden kasvaessa ainakin potkuriturbiinien ja propfan-tyyppisten järjestelmien propulsiivinen hyötysuhde pienenee, kun taas suihkumoottorin propulsiivinen hyötysuhde puolestaan kasvaa, kuten nähdään alla olevasta kuvasta 2.2 (Singh et al. 2012). Oletettavasti myös tavallisen potkurimoottorin propulsiivinen hyötysuhde laskee samalla tavalla lentonopeuden kasvaessa, joten potkureilla työntövoiman tuottavilla sähkölentokoneilla tullaan todennäköisesti lentämään hitaammin kuin nykyisillä suihkumoottorikoneilla. Esimerkiksi Airbusin suihkumoottoreilla varustetuilla matkustajalentokoneilla matkalentonopeus on 840...900 km/h, kun taas ATR 72-500 -potkurikoneella matkanopeus on vain 463 km/h (Finnair 2022).



Kuva 2.2. Propfanin, potkuriturbiinin (turboprop) ja suihkumoottorin (turbofan) propulsiiviset hyötysuhteet lentonopeuden funktiona. Lentonopeus on ilmoitettu vaaka-akselilla Macheina, eli suhteessa äänennopeuteen. (Singh et al. 2012)

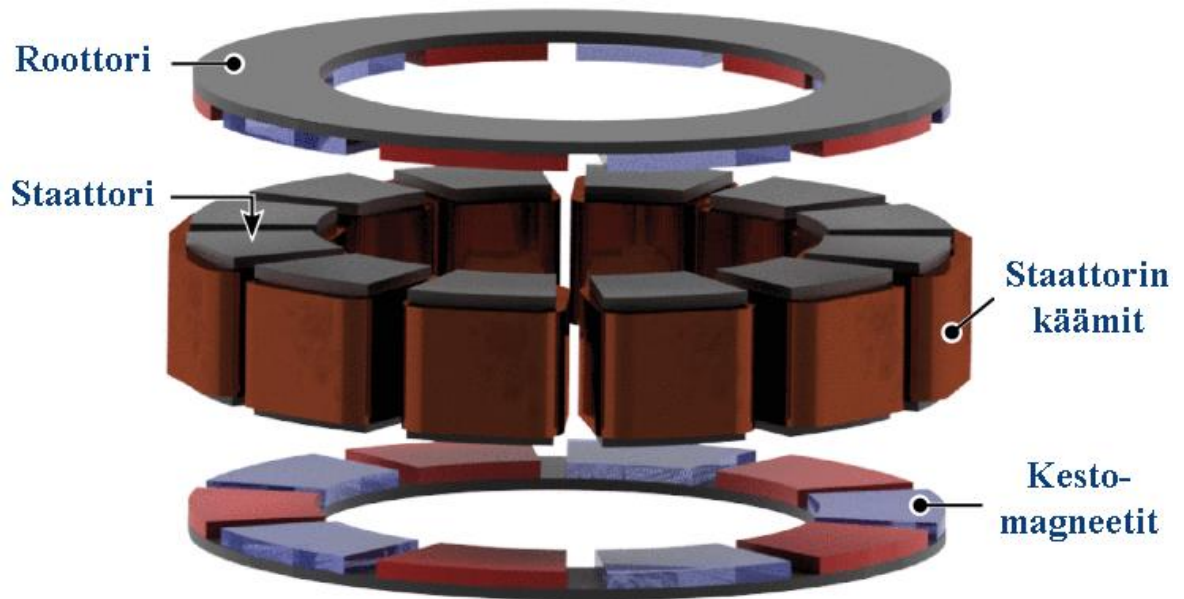
Suurissa matkustajalentokoneissa käytettyjen suihkumoottoreiden propulsiivinen hyötysuhde on parhaimmillaan noin 70 %:n luokkaa, mikä on hieman enemmän kuin kuvassa 2.2 on esitetty. Termodynaaminen hyötysuhde puolestaan on noin 55 %. (National Academies of Science, Engineering and Medicine 2016.) Näin ollen sähkömoottoreiden ei välttämättä tarvitsisi tuottaa mekaanista tehoa aivan yhtä paljon kuin vastaavassa kohteessa käytetyt suihkumoottorit, koska propulsiivinen hyötysuhde potkureilla on hieman parempi verrattuna suihkumoottoriin.

National Academies of Science, Engineering and Medicinen (2016) mukaan pienkoneissa, moottoriteholtaan alle 1 MW, ja kapearunkokoneissa, moottoriteholtaan 1–11 MW, sähkömoottoreiden ominaistehoksi vaadittaisiin enemmän kuin 6,5 kW/kg. National Academies of Science, Engineering and Medicine (2016) uskoo, että laajarunkokoneissa täysin sähköinen voimalinja ei olisi toteuttamiskelpoinen.

2.2.1 PMSM-koneet

PMSM-koneilla (Permanent Magnet Synchronous Motor) eli kestopagneettitahtikoneilla on korkea ominaisteho ja vääntö sekä hyvä hyötysuhde, ja ne soveltuvat hyvin sähköisiin työntövoimajärjestelmiin (Sayed et al. 2021). PMSM-koneen staattori, eli paikallaan pysyvä osa, muodostuu staattorilevyistä ja niihin upotetusta käämityksestä, johon syötetään kolmivaiheista vaihtojännitettä. Vaihtojännite saa aikaan pyörivän magneettikentän, jonka pyörimisnopeus riippuu jännitteen taajuudesta. Roottorissa, eli pyörivässä osassa, on kestopagneetteja. Kestopagneettien muodostaman magneettikentän ja staattorin magneettikentän navat vetävät toisiaan puoleensa, jolloin pyörivä magneettikenttä saa roottorinkin pyörimään. Niimensä mukaisesti roottori pyörii samassa tahdissa, eli samalla nopeudella kuin staattorin magneettikenttä, riippuen kuitenkin roottorin napapariluvusta.

Perinteisessä sisäroottorisessa radiaalivuokoneessa PMSM-moottorin staattori on roottorin ympärillä, jolloin magneettivuon on poikittainen akseliin nähden. Toisenlaisessa rakenteessa, aksiaalivuokoneessa, roottori ja staattori ovat seuraavan kuvan 2.3 mukaisesti. Tällöin magneettivuon on akselin suuntainen. Tällä tekniikalla on mahdollista saavuttaa suurempi vääntötiheys (Sayed et al. 2021). Tällaista konetta kutsutaan AFPMSM-koneeksi (Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine) magneettivuon suunnan mukaisesti.



Kuva 2.3. Kestomagneettitahtimoottori, jossa on kaksi roottoria ja yksi staattori, ja jonka magneettivuo on akselin suuntainen (Sayed et al. 2021)

Suurten matkustajalentokoneiden tehontarve aiheuttaa sähkömoottorien kehitykselle ongelmia. Mikäli halutaan nostaa sähkömoottorin tehoa, täytyy joko jännitettä tai virtaa kasvattaa tai molempia. Suurempi jännite aiheuttaa ongelmia johdinten ja käämilankojen eristysten suhteen, sillä tarpeeksi isolla jännitteellä eristeiden jännitelujuus ei välttämättä riitä, jolloin täytyy kehittää uusi eristemateriaali tai käyttää paksumpia eristekerroksia. Virtaa kasvattaessa häviöt suurenevat, jolloin täytyy johdinten poikkipinta-alaa suurentaa. Häviöiden lisääntyminen ja paksumpien eristekerroksien käyttäminen johtaa myös tarpeeseen parantaa moottorin jäähdytystä. Erityisesti PMSM-koneiden tapauksessa jäähdytys on tärkeää, sillä liian korkea lämpötila voi aiheuttaa kestopagneettien magneettisuuden heikkenemistä, jolloin moottori toimii huomattavasti heikommin tai huonoimmassa tapauksessa ei ollenkaan.

2.2.2 Käytössä olevat moottorit

Pipistrel Velis Electrossa moottorina käytetään Pipistrelin kehittämää ja valmistamaa AFPMSM-konetta (EASA 2020b). Moottoria ohjaava invertteri toimii 400 V tasajännitteellä. Potkuri on kiinnitetty suoraan roottoriin, eli välissä ei ole mitään vaihteistoa. Kyseisen

moottorin maksimiteho lentoalähdössä on 57,6 kW, ja sen kuivapaino on 22,7 kg (EASA 2020b). Näin ollen sähkömoottorin ominaistehoksi saadaan noin 2,5 kW/kg. Tässä ei ole otettu huomioon esimerkiksi nestejäähdytysjärjestelmän massaa, joka pienentäisi ominaistehoa.

Sekä Volocopter että EHang käyttävät eVTOL-alustensa prototyypeissä BLDC-moottoreita (Brushless Direct Current Motor) eli hiiliharjattomia tasavirtamoottoreita (Volocopter 2019, EHang 2021a). Kyseiset alukset ovat kahden henkilön kuljettamiseen suunniteltuja.

MagniX on kehittänyt kaksi sähkölentokoneisiin suunniteltua työntövoimayksikköä, magni350 ja magni650. Näiden maksimitehot ovat 350 kW ja 640 kW, ja vastaavat kuivapainot 111,5 kg ja 200 kg. Molempiin kuivapainoihin sisältyy moottorin lisäksi myös moottorinohjausyksiköiden eli invertterien massa, joka on 12 kg per yksikkö. Yksiköitä on pienemmässä moottorissa kaksi ja isommassa neljä. Tällöin itse moottorien kuivapainot ovat 87,5 kg ja 152 kg, ja ominaistehot vastaavasti noin 4 kW/kg ja 4,2 kW/kg. Invertterit käyttävät maksimissaan 800 V tasajännitettä. Useampi invertteri mahdollistaa mahdollisissa viikatilanteissa edelleen moottorin toiminnan joko 50 % teholla tai 75 % teholla. (magniX 2022.)

Myös EMRAX valmistaa AFPMSM-koneita. EMRAX 348 LV -moottorin maksimiteho on 380 kW, ja massa nestejäähdytetylle versiolle 42 kg, jolloin ominaisteho on noin 9 kW/kg. EMRAX 348 LV-moottori käyttää enintään 420 V tasajännitettä invertterillä. (EMRAX 2020.)

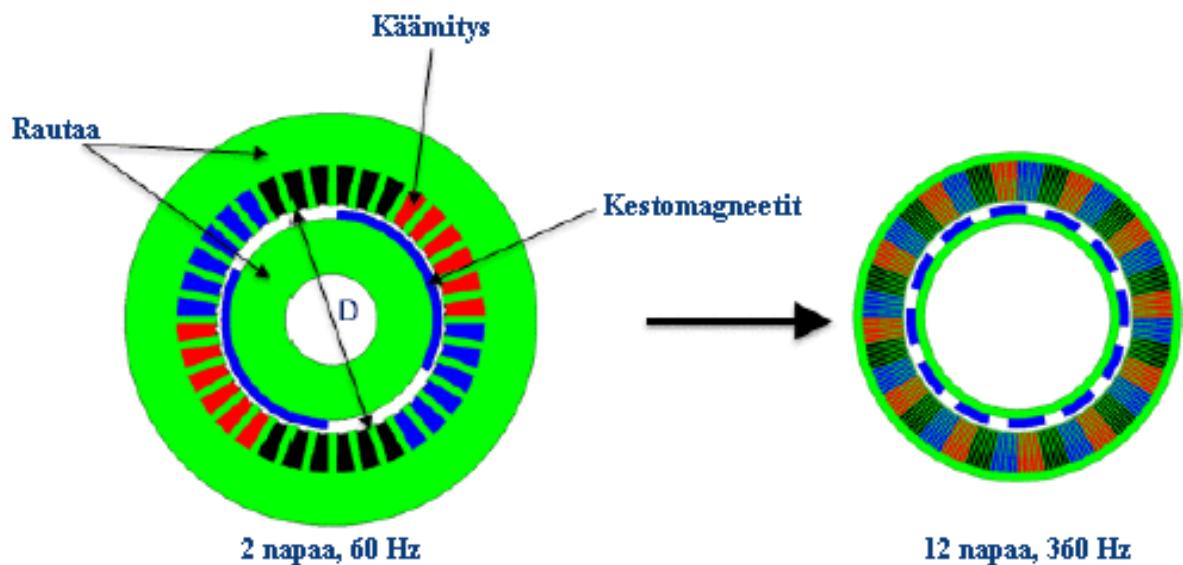
Edellä mainittujen PMSM-koneiden ominaisteho on jo aivan eri tasolla kuin perinteisten teollisuudessa käytettävien induktiokoneiden. Tarkastellaan esimerkkinä ABB:n valurautakuorisista induktiokoneista, joiden pyörimisnopeus on 3 000 rpm. Esimerkiksi 110 kW:n moottorin massa on 801 kg, jolloin ominaisteho on noin 0,14 kW/kg, ja 355 kW:n moottorin massa on 1 565 kg ja ominaisteho noin 0,23 kW/kg (ABB 2021).

2.2.3 Kehityksessä olevat moottorit

Rolls-Royce on kehittämässä megawattiluokan sähkökonetta. Tällä hetkellä Rolls-Royce kertoo saavuttaneensa 2,5 MW tehoisen koneen. Ominaistehon kerrotaan olevan lähes 10

kW/kg. Moottorin käyttöjännite on oletettavasti muutaman kilovoltin luokkaa, sillä moottoria ohjaavan invertterin jännitekestovaatimukseksi ilmoitetaan 3 kV. (Rolls-Royce 2022a.) Myös Wright Electric on kehittämässä 2 MW tehoista lentokoneisiin soveltuvaa sähkömoottoria. Moottorin ominaistehoksi kerrotaan 10 kW/kg. (Wright Electric 2021a.)

Yoonin et al. (2016) mukaan kestmagneettikonetta voidaan keventää lisäämällä roottoriin magneetteja eli kasvattamalla napojen määrää. Suuren napojen lukumäärän ansiosta voidaan vähentää staattorin ja roottorin paksuutta ja samalla massaa, tehden moottorista kevyemmän. Jotta moottorista saataisiin sama pyörimisnopeus, täytyy syöttöjännitteen taajuutta kasvattaa. Näin ollen moottorista saadaan useammalla navalla sama teho, mutta rautaa tarvitaan vähemmän eli ominaistehoa saadaan kasvatettua. Alla olevassa kuvassa 2.4 on havainnollistettu moottorin rakenteen muutoksia.



Kuva 2.4. Havainnekuva napojen lisäämisen mahdollistamista muutoksista moottorin rakenteeseen (Yoon 2016)

HTS-koneet (High Temperature Superconducting) ovat potentiaalisia vaihtoehtoja ilmaaluksiin niiden mahdollisen korkean ominaistehon, jopa 16 kW/kg, ansiosta (Terao et al. 2018). Niiden toiminta perustuu suprajohdaviin materiaaleihin, jotka saavuttavat suprajohdavuuden mahdollisimman korkeissa lämpötiloissa. Nämä lämpötilat ovat kuitenkin vielä paljon huoneenlämpöä alempana, esimerkiksi yleisesti jäähdytyksessä käytetyn nestemäisen

typen kiehumispisteen, 77 K eli noin -196 °C luokkaa. Jäähdytysjärjestelmä vaatii kuitenkin tilaa ja tuo lisää massaa, joten kehitystä vaaditaan paljon.

Tulevaisuudessa myös täyssähköiset laajarunkokoneet voivat olla mahdollisia. Sähkömoottoreiden ei tarvitse saavuttaa niin valtavia teholumkia kuin perinteiset suihkumoottorit, jos käytetään useampia pienempiä sähkömoottoreita tuottamaan työntövoimaa. Gnadtin et al. (2018) mukaan optimaalinen moottorien lukumäärä 180 matkustajan kapearunkokoneessa olisi neljä. Optimointi on suoritettu pääasiassa energiantarpeen sekä massan mukaan. Toisaalta Pelzin et al. (2021) mukaan optimaalinen moottorien määrä samantyyppiselle 180 matkustajan lentokoneelle olisi 4...11. Tämä on optimoitu aerodynaamisten häviöiden näkökulmasta. Useampi työntövoimaa tuottava moottori parantaa myös turvallisuutta ja luotettavuutta, sillä jos yksi moottori vikaantuu, on useita muita moottoreita käytettävissä. Jos moottorin vikaantuminen sattuu lähellä lentokorkeutta, toimivien moottoreiden avulla voidaan jatkaa lentoa normaalisti tai lähes normaalisti, sillä suurin tehontarve ilmenee lentoonlähdön aikana.

Esimerkiksi NASAlla on kehitteillä kokeellinen sähkölentokone, NASA X-57 Maxwell. X-57 käyttää kahtatoista 10,5 kW moottoria sekä kahta 60 kW moottoria. Pienemmät moottorit on tarkoitettu avustamaan lentoonlähdössä vaaditun työntövoiman tuottamisessa, sekä kaksi suurempaa moottoria tuottavat tarvittavan työntövoiman itse lennon aikana. Pienemmät moottorit sammutetaan silloin kun niitä ei lennon aikana tarvita, ja potkureiden siivet taivuttavat taaksepäin, jotta ne eivät aiheuta ylimääräistä ilmanvastusta. (NASA 2019.)

eVTOL-tyyppisissä ilma-aluksissa on jo luonnollisesti niiden rakenteesta johtuen useampia sähkömoottoreita, joilla tuotetaan pääasiassa nostovoimaa ja myös työntövoimaa. Rakenne muistuttaa paljon esimerkiksi videokuvauksessa käytettäviä multikoptereita. Roottoreiden määrä voi vaihdella kuitenkin neljästä jopa kahdeksaatoista.

2.3 Tehoelektroniikka

Tehoelektroniikkaa tarvitaan sähkölentokoneissa muun muassa akkujenhallintajärjestelmässä, jännitemuuntimissa sekä moottorinohjaimissa. Akkujenhallintajärjestelmä huolehtii akun kunnosta ja suojaa akkukennoja. Jännitemuuntimilla voidaan muuttaa akuista saatava jännite suuremmaksi, jotta akkujen ja moottorien väliset johtimet saadaan ohuemmiksi.

Moottorinohjaimilla muutetaan tasajännite moottorien vaatimaksi vaihtojännitteeksi sekä säädetään moottoreiden pyörimisnopeutta ja vääntöä. Sähköjärjestelmissä tarvitaan myös erilaisia suojalaitteita sekä katkaisijoita erottamaan järjestelmän osia toisistaan. Katkaisijoilta vaaditaan suurta virrankatkaisukykyä entistä suurempitehoisten sähkölentokoneiden myötä. Benzaquen et al. (2021) mukaan sähkölentokoneissa käytettävän tehoelektroniikan ominaistehon tavoite vuodelle 2035 olisi 25 kW/kg.

2.3.1 BMS

Akkujenhallintajärjestelmää käytetään suojaamaan akkukennoja esimerkiksi ylilataamiselta ja seuraamaan akun tilaa. BMS on tärkeässä roolissa etenkin litiumioniakkuja käytettäessä, sillä niiden vääränlainen lataaminen, liian suuri purkuvirta, liian pieni tai suuri kennojännite tai liian korkea lämpötila voi vahingoittaa kennoja sekä pahimmassa tapauksessa aiheuttaa esimerkiksi tulipalon. Muut tulevaisuudessa mahdollisesti yleistyvät akkukemiat eivät ole yhtä herkkiä esimerkiksi latausolosuhteille, mutta akkujenhallintajärjestelmää on oletettavasti hyvä käyttää myös niiden kanssa, sillä ilmailussa turvallisuusstandardit ovat hyvin vaativia.

2.3.2 Invertteri ja DC/DC-muunnin

DC/DC-muuntimella voidaan nostaa jännitettä akkujen ja moottorien välissä, jotta virta saadaan pienemmäksi ja vähennetään häviöitä. Jännitemuuntimilta ja inverttereiltä vaaditaan suurta virrantuottokykyä, sillä suurissa matkustajalentokoneissa tehontarve on suurimmillaan useita kymmeniä megawatteja. Tehoa vaaditaan paljon, ja samalla komponenttien tulisi olla mahdollisimman kevyitä.

Pipistrelin Velis Electrossa käytettävän invertterin massa on 7 kg ilman jäähdytysnesteitä, ja tehokapasiteetti on oletettavasti vähintään saman verran kuin sen ohjaaman moottorin maksimiteho, eli 57,6 kW (EASA 2020b). Näin ollen ominaistehoksi saadaan noin 8,2 kW/kg.

Perinteisistä piipohjaisista kytkinkomponenteista siirrytään koko ajan kohti edistyneempiä SiC (Silicon Carbide) eli piikarbidi- ja GaN (Gallium Nitride) eli galliumnitriditeknologiaan

perustuvia kytkinkomponentteja. Niillä voidaan saavuttaa parempi ominaisteho, hyötysuhde ja luotettavuus. (Barzkar & Ghassemi 2020, National Academies of Sciences, Engineering and Medicine 2016.) Nitzschin et al. tutkimuksessa (2019) vertailtiin kahta 20 kW invertteriä. Toisessa on käytetty perinteisiä Si IGBT -piitranstoreja (Insulated Gate Bipolar Transistor) ja toisessa SiC MOSFET -piikarbiditransistoreja (Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). 50 kHz kytkentätaajuudella SiC MOSFET -invertterin hyötysuhde oli koko tehoalueella 0...20 kW noin 1...3 %-yksikköä parempi kuin Si IGBT -transistorin. Myös kaikilla kytkentätaajuuksilla SiC MOSFET on hyötysuhteeltaan parempi ja ero kasvaa kytkentätaajuuden kasvaessa. 20 kHz:n kytkentätaajuudella ero on alle yhden prosenttiyksikön, mutta 120 kHz:n kytkentätaajuudella ero on jo noin 3 %-yksikköä. Samalla hyötysuhteella SiC MOSFET -invertterillä voidaan saavuttaa kolminkertainen kytkentätaajuus Si IGBT -invertteriin verrattuna. Mitä isompi kytkentätaajuus, sitä fyysisesti pienempi komponentti ja tällöin myös kevyempi. (Nitzsche et al. 2019) MagniX:n sähköisiin työntövoimajärjestelmiin kuului myös invertteri magniDrive100, jonka tehokapasiteetti on 170 kW ja massa 12 kg (magniX 2022). Näin ollen sen ominaisteho on noin 14,2 kW/kg. Kyseinen moottorinohjausyksikkö on valmistettu käyttäen SiC-tekniikkaa (magniX 2022).

Wright on kehittämässä sähkölentokoneisiin megawattiluokan invertteriä, joka olisi skaalattavissa 500 kW:sta jopa 20 MW:iin asti. Ominaiستهoksi Wright ilmoittaa 30 kW/kg, ja hyötysuhde olisi 99,5 % (Wright Electric 2021b). Näin ollen Benzaquen et al. (2021) tehoelektronikan ominaistehon tavoite 25 kW/kg olisi ainakin inverttereiden osalta saavutettu ja jopa ylitetty lähivuosien aikana.

2.4 Johtimet

Jo nykyisissä lentokoneissa on sähköistetty paljon toimintoja ja toimilaitteita. Boeingin uusimmassa 787-mallin lentokoneessa on noin 200 km sähkökaapeleita, joiden yhteismassa on yli 4 000 kg (Wileman et al. 2021).

Sähkölentokoneissa kaikki ohjaukset ja tehonsiirrot tehdään sähköisesti, joten johtimia tarvitaan vieläkin suurempia määriä. Nykyisten johdinmateriaalien ongelmana on massan ja johtavuuden huono suhde. Kupari on johtavuudeltaan 58,7 MS/m, mutta se on melko

painavaa, tiheydeltään $8,9 \text{ g/cm}^3$. Alumiini sen sijaan on huomattavasti kevyempää, $2,7 \text{ g/cm}^3$, mutta sen johtavuus on jonkin verran huonompi kuin kuparilla, $36,9 \text{ MS/m}$ (Tibtech 2018).

Yhtenä ratkaisuna kevyempiin johtimiin voi olla CNT (Carbon Nanotube) eli hiilinanoputket. Hiilinanoputkilla on potentiaalia olla sekä kuparia johtavampia että alumiinia kevyempiä, johtavuuden ollessa jopa 100 MS/m ja tiheyden $1,3 \dots 1,8 \text{ g/cm}^3$ (Pyrhönen et al. 2020). Tätä teknologiaa voi soveltaa myös sähkökoneiden käämityksiin, jolloin saataisiin sähkömoottoreista kevyempiä. Tällä hetkellä kuitenkin CNT-johtimien johtavuus on noin 15 MS/m luokkaa, eli vielä noin neljä kertaa kuparia huonompi (Pyrhönen et al. 2020).

3 Kehityksessä olevia prototyyppejä

Kuten aikaisemmin on mainittu, slovenialaisen Pipistrelin Velis Electro on maailman ensimmäinen ja tällä hetkellä ainoa tyyppihyväksytty sähköilma-alus. Pipistrelillä on myös toinen kaupallisesti saatavilla oleva sähkölentokone, Alpha Electro. Sillä ei ole EASA:n tyyppihyväksyntää, sillä tyyppihyväksyntää ei tarvitse, mikäli suurin lentoonlähtömassa on alle 600 kg. Pipistrelin lisäksi on useita muita yrityksiä ympäri maailman, jotka kehittävät sähköilma-aluksia.



Kuva 3.1. Pipistrelin Velis Electro -sähkölentokone (Pipistrel n.d.a)

Velis Electrossa, kuvassa 3.1, on huipputeholtaan 57,6 kilowatin AFPMSM-moottori, jonka ominaisteho on noin 2,5 kW/kg. Akkukapasiteetti on 24,8 kWh. Matkalentonopeus on hieman alle 170 km/h, ja lentoaika reservit huomioon ottaen enimmillään 50 minuuttia (Pipistrel n.d.a). Tällöin kantamaksi saadaan noin 140 kilometriä.

Alpha Electrossa on 60 kW moottori, oletettavasti rakenteeltaan samanlainen AFPMSM kuiten Velis Electrossakin. Akkukapasiteetti on 21 kWh, jolla lentokone lentää noin 150 km/h lentonopeudella 130 kilometriä (Pipistrel 2017). Molemmat ovat kaksipaikkaisia.

3.1 Lentokoneita

Rolls-Royce on rakentanut osana sähköisen ilmailun kehitysohjelmaa sähkölentokoneprototyyppin, nimeltään Spirit of Innovation. Tämä lentokone rikkoi maailmanennätyksen nopeimpana sähkölentokoneena vuoden 2021 marraskuussa. Lentokone saavutti kolmen kilometrin matkalla 555,9 km/h keskinopeuden, joka ylitti edellisen ennätyksen yli 200 km/h. Kyseinen lentokone on varustettu yhdellä 400 kW:n moottorilla (Rolls-Royce 2022b). Moottori on hankkeen yhteistyökumppanin YASAn kehittämä AFPMSM-moottori (Rolls-Royce 2018).

Tällä hetkellä kiinteäsiipisiä lentokoneita kaupallisiin tarkoituksiin ovat kehittämässä muun muassa israelilainen Eviation sekä yhdysvaltalainen Bye Aerospace.



Kuva 3.2. Tietokoneella tehty renderöinti Eviation Alice -sähkölentokoneesta (Eviation 2021)

Eviation Alice, kuvassa 3.2, on yhdeksänpaikkainen matkustajalentokone, jonka kantama on noin 815 km. Alice käyttää työntövoiman tuottamiseen kahta magniX:n magni650-moottoria, joiden avulla saavutetaan noin 456 km/h matkalentonopeus (Eviation 2021). Alicen ensimmäinen testilento oli suunniteltu alkuvuodelle 2022 (Eviation 2022). Eviationin tavoitteena on saada lentokoneelle FAA:n (Federal Aviation Administration) eli Yhdysvaltain ilmailuhallinnon hyväksyntä vuonna 2024 tai 2025 (Ostrower & Head 2022).

Bye Aerospace kehittää useaa sähkölentokonemallia, eFlyer 2, 4 ja 800. eFlyer 2 on kaksi-paikkainen, pääasiassa koulutuslentoihin suunniteltu, kun taas eFlyer 4 on nelipaikkainen. Moottorina eFlyer 2:ssa on yksittäinen Safranin valmistama 110 kW tehoinen ilmajäähdytetty moottori (Bye Aerospace 2021). Moottorissa on integroituna moottorinohjain, jolloin moottorin ominaisteho on 5 kW/kg (Safran n.d.). Akkuteknologiana toimii Bye Aerospace (2021) mukaan ”suuritiheysinen litiumakku”, mikä tällä hetkellä oletettavasti tarkoittaa litiumionikennoja. Matkalentonopeudeksi ilmoitetaan hieman alle 180 km/h, jolloin toimintamatka olisi noin 400 kilometriä. eFlyer 4 -koneelle puolestaan ilmoitetaan matkalentonopeudeksi noin 210 km/h, kantaman ollessa pelkästään lentäjällä noin 590 km ja täydellä lastilla noin 480 kilometriä (Bye Aerospace 2021).



Kuva 3.3. Renderöinti Bye Aerospace:n eFlyer 800 -sähkölentokoneesta (Bye Aerospace 2021)

Bye Aerospace'n eFlyer 800 -lentokoneessa, kuvassa 3.3, on kahden lentäjän lisäksi matkustajapaikkoja kuusi, ja mahdollisuus jopa kymmenelle. 700 kg:n maksimikuormalla ja noin 520 km/h lentonopeudella kantama olisi hieman yli 920 km (Bye Aerospace 2021). Safran on kehittänyt myös tähän lentokonemalliin moottoria, jonka huipputehoksi on saavutettu 750 kW (Bye Aerospace 2022). Moottoreissa on kahdet käämitykset toimintavarmuuden parantamiseksi, toiset ovat varalla vikatilanteita varten. Moottoreita olisi käytössä yhteensä kaksi, kummallakin siivillä yhdet.

3.2 VTOL-aluksia

VTOL, Vertical Take-Off and Landing, tarkoittaa ilma-alusta, joka pystyy nousemaan ja laskeutumaan pystysuoraan. Tällä hetkellä eVTOL-aluksia kehittävät muun muassa yhdysvaltalaiset Joby Aviation ja Archer Aviation, saksalaiset Lilium ja Volocopter sekä kiinalainen EHang.



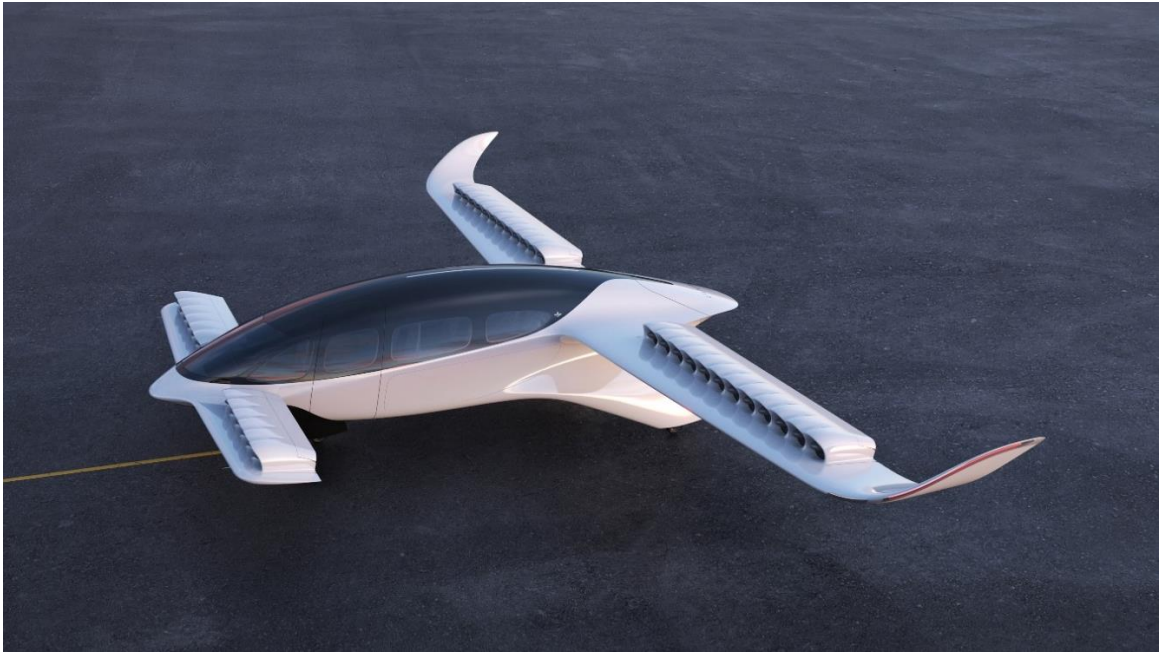
Kuva 3.4. Joby Aviationin eVTOL-alus (Joby Aero Inc. 2022)

Joby Aviationin kehittämä VTOL-alus, kuvassa 3.4, on yhdistelmä perinteistä kiinteäsiipistä lentokonetta ja multikopteria. Siinä on kuusi moottoria ja potkuria, joiden avulla alus pystyy

nousemaan ja laskeutumaan pystysuoraan. Vauhdin kiihtyessä potkurit kääntyvät vaakasuoraan, jolloin alus toimii käytännössä kiinteäsiipisenä lentokoneena. Alukseen mahtuu lentäjän lisäksi neljä matkustajaa, ja lentomatkaksi luvataan yli 240 km jopa 320 km/h huippunopeudella (Joby Aviation 2022a). Joby on kehittänyt alustaan jo 10 vuoden ajan. Ensimmäinen täysikokoisen prototyypin lento tapahtui vuonna 2017, ja kaupallinen lentotoiminta on odotettavissa alkavaksi vuonna 2024 (Joby Aviation 2022b). Vuonna 2021 Jobyn prototyypillä lennettiin testilennon aikana lähes 250 km, mikä on saman verran kuin alukselle on luvattu (Joby Aero Inc. 2021). Tämä testilento tosin suoritettiin ilman yhtään kyydissä olevaa matkustajaa tai lentäjää

Archer Aviation on kehittänyt VTOL-prototyypin nimeltään Maker. Se vastaa rakenteeltaan paljon Jobyn alusta. Siinä on myös siivet, joissa on yhteensä 12 moottoria. Puolet näistä on kiinteästi asennettu niin, että potkurit tuottavat vain nostovoimaa, ja puolet on Jobyn aluksen tapaan vaakatasoon kääntyviä. Kaikki tuottavat tarvittavan nostovoiman nousussa ja lasussa, ja matkalennon ajaksi kiinteästi asennetut moottorit sammutetaan. Matkustajia mahtuu kaksi, ja toimintamatka on hieman alle 100 km tämänhetkisellä akkuteknologialla huippunopeudella 240 km/h.

Akun kapasiteetti on 75 kWh ja massa 400 kg, eli ominaisenergia on noin 188 kWh/kg (Archer Aviation 2021a). Akku on toteutettu litiumioni-teknologialla, ja akkupaketin oletettavasti hetkittäinen huipputeho on 672 kW, jolloin ominaisteho on noin 1 680 W/kg (Archer Aviation 2021b). Akkujen ominaisteho on hieman pienempi kuin Panasonicin UR18650RX-tehokennossa mutta ominaisenergia hieman suurempi.



Kuva 3.5. Liliumin 7-paikkainen VTOL-alus tietokonerenderöinnissä. Pienet moottorit koteloiheen erottuvat siivistä selvästi. (Lilium 2021a)

Liliumin kehittämä Lilium Jet, kuvassa 3.5, on myös pystysuoraan nouseva ja laskeutuva alus, jossa on myös lentokoneen tapaan kiinteät siivet. Nosto- ja työntövoima tuotetaan 36 pienemmällä moottorilla, jotka kääntyvät pystysuorasta vaakatasoon. Kyytiin mahtuu jopa kuusi matkustajaa yhden lentäjän lisäksi. Lentonopeudeksi ilmoitetaan 280 km/h ja kantamaksi yli 250 km (Lilium 2021b). Kuitenkin tällä hetkellä kaupallisesti saatavissa olevalla akkuteknologialla (250 Wh/kg kenno) saavutetaan vain 181 kilometrin toimintasäde. 320 Wh/kg kennoilla on mahdollista saavuttaa jo 261 km toimintasäde, ja 400 Wh/kg kennoilla jopa 353 km (Nathen 2021). Lilium pyrkii saavuttamaan samanaikaisen tyyppihyväksynnän sekä Yhdysvalloissa FAA:lta sekä Euroopassa EASA:lta. Liliumin tavoitteena on saada alukselleen tyyppihyväksyntä vuonna 2025 (Lilium 2022).



Kuva 3.6. Volocopterin Volocity -alus (Volocopter 2020)

Volocity on Volocopterin kehittämä VTOL-alus. Volocity, kuvassa 3.6, muistuttaa enemmän helikopteria rakenteeltaan, sillä sen kaikki 18 roottoria ovat kiinteästi vaakatasoon asennettuja. Alus on suunniteltu alusta alkaen autonomiseksi, jolloin kyytiin mahtuu kaksi matkustajaa ilman lentäjää. Akkuteknologiana käytetään litiumionikenoja, joiden voimalla alus lentää 35 kilometriä enimmillään 110 km/h nopeudella. Moottoreina toimii harjattomat DC-moottorit. (Volocopter 2019.)

EHang 216 on samanlaisella rakenteella toteutettu kuin Volocity. Myös EHang on Volocityn tavoin suunniteltu autonomiseksi kahden matkustajan lentotaksiksi. Kantamaksi ilmoitetaan 35 km ja huippunopeudeksi 130 km/h (EHang 2021b). Siinä on kahdeksan vartta, joiden päässä on kaksi moottoria ja potkuria, yksi yläpuolella ja toinen alapuolella, eli yhteensä 16 roottoria. Moottorit ovat Volocityn tapaan myös BLDC-moottorit (EHang 2021a).

3.3 Vertailua

Suurin osa tällä hetkellä sähköisiin ilma-aluksiin kehiteltävistä sähkömoottoreista on PMSM-koneita, ja niistä hyvin moni aksiaalivuorakenteella. Vain harvasta tämän hetken lentokoneprototyypeistä on kerrottu niissä käytetystä moottoriteknologiasta. Oletettavaa on,

että suurin osa käyttää PMSM-moottoreita. VTOL-aluksien kanssa tilanne voi olla toinen, sillä ainakin Volocity ja EHang puolestaan käyttävät BLDC-moottoreita.

Akkuteknologiana kaikissa sähköilma-aluksissa, missä akun tyyppi on kerrottu, käytetään ainakin toistaiseksi litiumioniakkuja, sillä niiden ominaisenergia on tällä hetkellä saatavilla olevista akkuteknologioista paras. Kantama on melko lyhyt vielä esimerkiksi Pipistrelin lentokoneissa ja tämänhetkisisissä eVTOL-prototyypeissä, kantaman vaihdellessa EHangin ja Volocityn 35 kilometristä Jobyn hieman yli 200 kilometriin. Bye Aerospace'n eFlyer 2 kantama on jo enemmän, 400 km. eFlyer 4 ja 800 -malleille ilmoitetut toimintamatkat ovat vielä pidemmät, mutta yhtiön sivuilla on niihin liittyen huomautus, että suorituskykyarvot ovat arvioita ja voivat vielä muuttua. Todennäköisesti näissä luvuissa on ainakin jossain määrin otettu huomioon akkuteknologian kehittyminen. EFlyer 2:n tyyppihyväksyntähakemus on ollut vireillä jo vuodesta 2018 lähtien, mutta eFlyer 4 tai 800 -malleille ei ole ilmoitettu mitään aikataulua kehityksen osalta (Bye Aerospace 2021).

Sähköilma-aluksia on kehitetty pääasiassa kolmella erilaisella rakenteella, perinteinen kiinteäsiipinen lentokone, esimerkiksi Pipistrelin pienkoneet ja Eviationin matkustajakone, moniroottorinen multikopteri, esimerkiksi Volocity, sekä näiden yhdistelmä, esimerkiksi Jobyn ja Liliumin alukset. EHangin ja Volocityn toimintamatkat olivat selvästi lyhyemmät kuin muiden alusten, joten ne ovat todennäköisesti tarkoitettu käytettäväksi niin kutsuttuina lentotakseina kaupungin sisäisessä liikenteessä. Jobyn ja Liliumin alukset pystyvät nousemaan ja laskeutumaan pystysuoraan EHangin ja Volocityn tavoin, mutta ne tuottavat nostovoimaa lennon aikana siipien avulla, jolloin toimintamatka pitenee noin 200 kilometriin. Niitä tul- laan käyttämään todennäköisesti maan sisäisiin kaupunkien välisiin lentoihin, vaihtoehtoina autoilulle ja maanpäälliselle julkiselle liikenteelle. Pienille matkustajalentokoneille luvataan jo noin 500...900 kilometrin kantama, joten niillä voitaisiin korvata yksityisautoilua puhtaampana ja junia nopeampana matkustusmuotona.

Seuraavassa taulukossa 3.1 on esitetty voimalinjan komponenttien massojen vertailu perinteisen suihkumoottorilentokoneen ja akkukäyttöisen sähkölentokoneen välillä. Sähkölentokoneiden tekniikoita vertaillaan tämänhetkisellä tekniikan tilanteella, sekä eri lähteissä esitettyjen tavoitteiden perusteella.

Taulukko 3.1. Voimalinjan komponenttien massojen vertailua suihkumoottori- ja sähkölentokoneiden välillä.

| Lentokone | Energiavarasto [kg] | Moottorit [kg] | Invertterit [kg] | Johtimet [kg] | Yhteensä [kg] |
|--------------------------------|---------------------|----------------|------------------|---------------|---------------|
| Suihkumoottori (tämänhetkinen) | 6 639 | 5 716 | - | 2 000 | 14 355 |
| Sähkö (tämänhetkinen) | 225 714 | 8 333 | 2 465 | 8 000 | 244 512 |
| Sähkö (tavoite) | 48 171 | 3 500 | 1 400 | 2 000 | 55 071 |

National Academies of Sciences, Engineering and Medicine (2016) mukaan erään 150 matkustajan kapearunkokoneen huipputeho on 35 MW ja energiantarve 1850 km lentomatkalle 59 MWh. Bills et al. (2020) on määrittänyt 150 matkustajan lentokoneelle ja 930 km lentomatkalle vaadittavan akun ominaisenergian. National Academies of Sciences, Engineering and Medicine (2016) mukaan 1850 km lennon aikana energiaa kuluu itse matkalennossa noin 39 MWh, joten 930 km lennon aikana energiaa kuluu oletettavasti noin puolet, eli 19,5 MWh. Tällöin yhteensä energiaa kuluu noin 39,5 MWh, kun oletetaan, että muut lennon vaiheet kuluttavat saman verran energiaa. Tätä arvoa käytetään taulukossa 3.1 esitettyjen lukujen laskennassa.

Perinteisen lentokoneen esimerkkinä käytetään Airbus A319neo -kapearunkolentokonetta, jonka maksimimatkustajakapasiteetti on 160. Polttoaineen määrä lasketaan energiankulutuksen perusteella. Kyseisessä lentokoneessa käytetään kahta suihkumoottoria, Pratt & Whitney PW1100G-JM (Airbus 2022). Kyseisen suihkumoottorin massa on noin 2 858 kg (EASA 2019b). Johtimien massaksi oletetaan puolet verrattuna edellä mainittuun Boeing 787-lentokoneeseen, joka on matkustajakapasiteetiltaan noin kaksinkertainen.

Sähkölentokoneen komponenttien massat tämänhetkisen tekniikan tilanteen mukaan on laskettu aikaisemmin työssä esitettyjen arvojen mukaan. Akkukennojen ominaisenergiana käytetään 250 Wh/kg ja akkujen paketoititehokkuutena Gnadtin et al. (2018) mukaisesti 70 %, jolloin koko akun ominaisenergia on 175 Wh/kg. Moottorien ominaistehona käytetään magniX:n moottorien mukaan 4,2 kW/kg. Myös invertterin ominaistehona käytetään magniX:n

invertterin mukaisesti 14,2 kW/kg. Johtimien massa oletetaan suuresta sähkötehosta johtuen nelinkertaiseksi verrattuna Boeing 787:ään.

Tavoitteellisen sähkölentokoneen komponenttien massat on laskettu myös aikaisemmin työssä esitettyjen tavoitteiden ja kehityksessä olevien tekniikoiden mukaan. Akkupaketin ominaisenergiaksi Billsin et al. (2020) mukaan tarvitaan 150 matkustajan ja 930 km lento-
matkalle noin 820 Wh/kg. Moottorien ominaistehona käytetään Rolls-Roycen ja Wrightin tällä hetkellä kehityksessä olevien moottoreiden ominaistehoa noin 10 kW/kg. Invertterin ominaisteholle käytetään Benzaquen et al. (2021) tavoitetta 25 kW/kg. Lisäksi oletetaan, että hiilinanoputkitekniologialla saataisiin johtimista noin neljä kertaa kevyempiä verrattuna nykyisiin kuparijohtimiin.

Kuten taulukosta 3.1 voidaan havaita, suurin haaste akkukäyttöisissä sähkölentokoneissa on akkujen pieni ominaisenergia. Tulevaisuudessa sähkömoottorit ja invertterit ovat mahdollisesti jopa kevyempiä kuin suihkumoottorit, toisaalta suihkumoottoreiden kehitystä ei ole otettu huomioon. Tavoitesähkölentokoneen sähköisen voimalinjan massa, 55 071 kg, on edelleen melko paljon verrattuna Airbus A319neo:n suurimpaan lentoonlähtömassaan, 75 500 kg. Työntövoimaa tarvittaisiin luultavasti lisää, jotta noin 48 tonnia akkuja saataisiin ilmaan.

Sähkölentokoneet todennäköisesti lisäävät lentoliikennettä pieniltä kaupunkien läheisyydessä sijaitsevilta lentokentiltä. Sähköiset VTOL-alukset ovat ainakin valmistajien mukaan melko hiljaisia. Jobyn aluksen melutaso 100 metrin korkeudella paikallaan leijussa on 65 dBA (Joby Aero Inc 2022). Liliumin aluksen melutaso leijussa samassa korkeudessa on noin 60 dBA (Lilium 2021b). Volocopterin (2022) mukaan Volocityn roottorit tuottavat ääntä kapealla taajuusalueella, ja ne kumoavat suuren osan tuottamastaan melusta. Volocopterin (2022) mukaan Volocity on ”neljä kertaa hiljaisempi kuin pieni helikopteri”.

EASA:n tietokannassa (2022a) olevien tyyppihyväksytyjen kevyiden, suurin lentoonlähtömassa alle 3 175 kg, helikopterien keskimääräinen melutaso ylilennon aikana on noin 80 dBA. Ylilento suoritetaan 150 metrin korkeudessa (ICAO 2004). EASA:n tietokannassa (2022b) olevien tyyppihyväksytyjen kevyiden, keskimääräinen suurin lentoonlähtömassa noin 2 080 kg, potkurilentokoneiden ylilennon melutason keskiarvo on 70,5 dBA. Näin ollen ainakin Jobyn ja Liliumin VTOL-alukset ovat paljon hiljaisempia kuin helikopterit ja jonkin verran hiljaisempia kuin pienet potkurilentokoneet.

4 Tulevaisuuden kehityssuunnat

Tulevaisuudessa on odotettavissa entistä suurempia lentokoneita, joihin mahtuu enemmän matkustajia. Myös perinteisistä matkustajalentokoneista eroavia rakenteita saatetaan nähdä tulevaisuuden matkustajakoneissa.

4.1 Konsepteja

Sähkömatkustajalentokonekonsepteja on kehitelty monenlaisilla erilaisilla rakenteilla. Esimerkiksi NASAn X-57 Maxwell on konsepti hajautetusta propulsiosta perinteisessä kiinteäsiipisessä lentokoneessa. Siinä on yhteensä 14 työntövoimaa tuottavaa moottoria. Kyseisen konseptilentokoneen ensimmäinen lento on suunniteltu vuodelle 2022.



Kuva 4.1. NASAn X-57 Maxwell -sähkölentokonekonsepti. Siivissä on yhteensä kaksitoista pienempää moottoria ja kaksi isompaa moottoria. (NASA 2022)

Myös kaupalliset yhtiöt ovat esittäneet sähkölentokonekonsepteja, esimerkiksi yhdysvaltalaiset Ampaire ja Wright Electric ja ruotsalainen Heart Aerospace.

Ampaire Tailwind on yhdeksän matkustajan lentokone, jonka suunnittelun tavoitteena on saada aikaan parempi hyötysuhde kuin vastaavan kokoisessa polttomoottorikäyttöisessä potkurikoneessa (Brown et al. 2019). Tailwind eroaa perinteisistä yksipotkurisista lentokoneista siten, että sen potkuri on koteloitu ja se sijaitsee keulan sijasta lentokoneen perässä.



Kuva 4.2. Renderöinti Ampairen sähköisestä TailWind-lentokonekonseptista (Ampaire 2020)

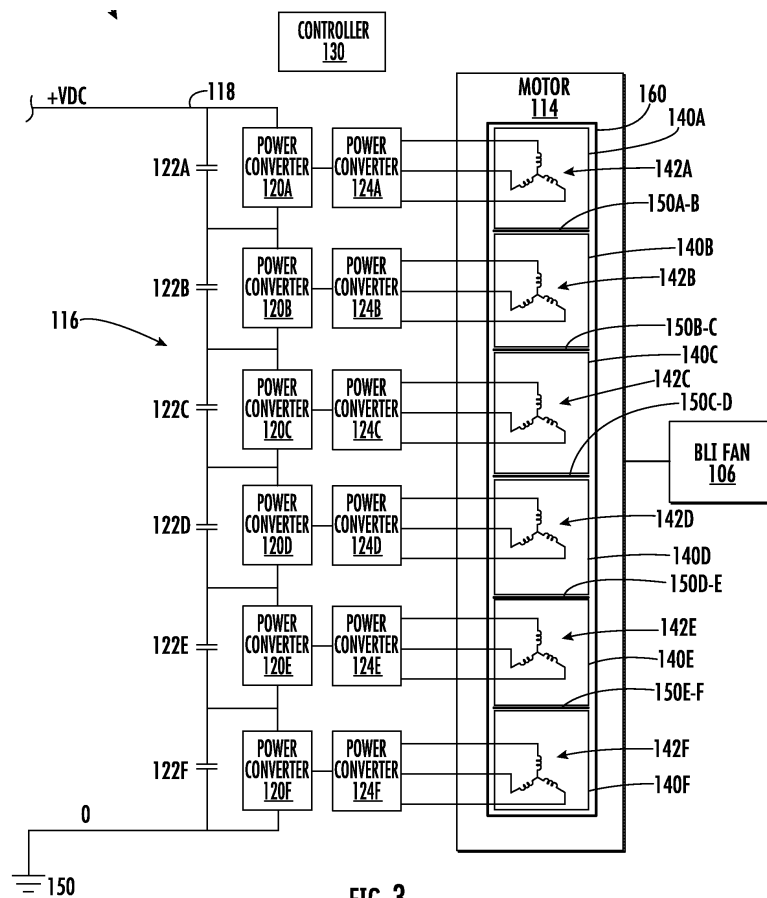
Wright Electric suunnittelee saavansa vuoteen 2026 mennessä muunnettua suihkumoottorikoneen täysin sähköiseksi. Sähkölentokoneeksi muutettava malli on BAe 146, 100 matkustajan lyhyen kantaman suihkumoottorikone, jossa on neljä moottoria. Sillä olisi mahdollista lentää ”yhden tunnin lentoja”. (Wright Electric 2022.) Yhden tunnin lennoilla tarkoitetaan luultavasti enintään 600 kilometrin mittaisia lentomatkoja. Vuoteen 2030 mennessä Wrightin suunnitelmissa on kehittää jopa 186 matkustajan ja noin 1 300 kilometrin lentomatalla varustettu täysin uusi sähkölentokone (Wright Electric 2022).

Heart Aerospace tavoitteena on saada 19 matkustajan ES-19-lentokone 400 km:n kantamalla käyttöön vuoden 2026 lopulla (Heart Aerospace 2022).

4.2 Patenteja

Yatesin et al. (2017) patentissa on esitetty mahdollisia ratkaisuja akkukäyttöisten sähkölentokoneiden kantaman pidentämiseksi. Patentissa esitetään, että akkukennot, joiden varaus-taso on laskenut liian alhaiseksi, voidaan esimerkiksi heittää pois lentokoneen kyydistä, jolloin lentokoneen massa pienenee ja jäljellä olevilla akuilla päästään pidemmälle. Nämä pudotetut akkumoduulit voivat laskeutua maahan esimerkiksi laskuvarjojen avulla, tai ne voivat lentää jollain muulla tavalla. Tällaisten lentävien akkujen avulla voidaan myös vaihtaa tyhjät akkumoduulit ladattuihin. Patentissa esitetään myös mahdollisuus lentokoneen akkujen lataamiseen erillisen miehittämättömän ilma-aluksen avulla ilmassa kesken lennon. (Yates et al. 2017.)

Osaman (2022) patentissa on esitetty suurjännitesähkökoneen rakenne, joka koostuu useista staattorikäimityksistä käyttäen useita inverttereitä. Kuvassa 4.3 on esitetty kyseisen kytkennän kaavio.



Kuva 4.3. Sähkökoneen staattorikäimitysten magnetointi kuudella sarjaan kytketyllä invertterillä (Osama 2022)

Patentissa staattorikäänitys on jaettu kuvan 4.3 mukaisesti useampaan osaan, joita tässä patentissa kutsutaan moduuleiksi. Useammalla invertterillä saadaan kunkin moduulin yli olevaksi jännitteeksi pienempi kuin yhdellä invertterillä toteutetulla käämityksellä. Tällöin sekä käämityksen kierrosten että eri moduulien välillä on pienempi potentiaaliero, jolloin voidaan käyttää ohuempia eristekerroksia. Moduulit ovat myös galvaanisesti erotettuja toisistaan, jolloin esimerkiksi eristeen rikkoutuessa moduulien välillä ei ole sähkövirralle galvaanista yhteyttä. Patentissa on käytetty esimerkkinä 1,8 kV DC-syöttöä inverttereille, jolloin kuudella invertterillä ja moduulilla on kussakin käämityksessä vain 300 V potentiaaliero. (Osama 2022.)

5 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli selvittää akkukäyttöisten sähköilma-alusten tekniikan nykytilanne. Tutkimuskysymyksiä olivat: Mikä on akkulentokoneiden voimalinjan tekniikan nykytilanne? Kuinka käyttökelpoisia akkulentokoneet tällä hetkellä ovat esimerkiksi kantaman ja kuljetuskapasiteetin suhteen? Kuinka tekniikat eroavat eri valmistajien välillä? Millaiset tulevaisuudennäkymät on sähköisellä ilmailulla?

Akkukäyttöisiin sähkölentokoneisiin vaadittava tekniikan taso on tällä hetkellä siinä pisteessä, että pieniä lentokoneita ja VTOL-aluksia voidaan toteuttaa. Suurin rajoittava tekijä on akkuteknologia, sillä tämän hetken prototyyppien suurin kantama on hieman yli 200 km. Kaupallisesti saatavilla oleviin Pipistrelin sähkölentokoneisiin mahtuu vain kaksi henkilöä, ja lentomatka on parhaimmillaan vain noin 140 kilometriä. Jobyn prototyyppillä lennettiin noin 250 km, mutta kyydissä ei ollut yhtään henkilöä, joten lentäjällä ja neljällä matkustajalla lentomatka jäisi vielä paljon lyhyemmäksi.

Kaikki komponentit, moottorit, invertterit, akut ja jopa johtimet kehittyvät jatkuvasti ja niistä saadaan koko ajan kevyempiä. Tämänhetkisten kehitysprojektien valossa ainakin moottorien ja tehoelektronikan osalta saavutettaisiin myös isommissa sähkölentokoneissa vaadittava ominaisteho lähitulevaisuudessa.

Johtimien osalta potentiaalinen hiilinanoputki-teknologia (CNT) vaatii vielä paljon kehitystä. Myös akkuteknologian puolella on paljon erilaisia potentiaalisia akkukemioita, jotka vaativat edelleen paljon tutkimusta ja kehitystä. Li-S-akkujen osalta kehitys on edennyt jo melkein kaupalliseen käyttöön, mutta niilläkään ei välttämättä vielä saada toteutettua esimerkiksi suuria matkustajalentokoneita.

Tekniikat olivat melko yhteneviä eri valmistajien laitteiden välillä. Pääasiallinen moottoritekniikka oli PMSM, kahdella valmistajalla oli BLDC-moottorit. Akkutekniikkana toimi kaikilla tarkastelluilla valmistajilla litiumionikennot. Ilma-aluksien rakenteet poikkesivat kuitenkin suuresti toisistaan, oli perinteisiä kiinteäsiipisiä lentokoneita, multikoptereita sekä näiden hybridejä. Muutamissa konseptilentokoneissa oli myös esitetty hieman erilaisia toteutustapoja esimerkiksi hajautetun propulSION muodossa.

Lisäksi yksi suuri haaste uuden tekniikan käyttöönotossa ilmailussa on turvallisuus. Ilmailuksille on tiukat turvallisuusstandardit, ja uuden tekniikan kypsyminen ja tyyppihyväksyttäminen vie aikaa. Tällä hetkellä näyttää kuitenkin siltä, että sähkölentokoneiden uskotaan olevan ainakin osa ratkaisua lentoliikenteen päästöjen vähentämisessä, ja kehitystä halutaan viedä mahdollisimman nopeasti eteenpäin.

Ainakin kahdella yhtiöllä, Heart Aerospace ja Wright Electricillä, on suunnitelmissa saada kaupalliseen käyttöön akkukäyttöiset matkustajalentokoneet jo vuoteen 2026 mennessä. Heart Aerospace'n lentokoneen kapasiteetti on 19 matkustajaa ja sille luvataan noin 400 km kantama, mikä vaikuttaa jossain määrin mahdolliselta akkujen kehityksen näkökulmasta. Wrightin lentokone sen sijaan on sadalle matkustajalle suunniteltu ja sillä aiotaan lentää mahdollisesti noin 500 km lentoja, mikä ei vaikuta todennäköiseltä ainakaan tällä aikataululla.

Lähteet

ABB. 2021. CATALOG. Low voltage – General performance cast iron motors for Europe. Viitattu 24.1.2022. Saatavilla: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK108196&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

Airbus. 2022. A319neo. Verkkosivu. Viitattu 31.3.2022. Saatavilla: <https://aircraft.airbus.com/en/aircraft/a320/a319neo>

Ampaire. 2020. Valokuva. Viitattu 30.3.2022. Saatavilla: <https://drive.google.com/drive/u/1/folders/1yBnpI8kbUS06ducUj2ECMqMk2gavsOAA>

Archer Aviation. 2021a. Verkkosivu. Viitattu 9.3.2022. Saatavilla: <https://www.archer.com/maker>

Archer Aviation. 2021b. Verkkosivu. Viitattu 9.3.2022. Saatavilla: <https://www.archer.com/technologies>

Battery University. 2021. BU-205: Types of Lithium-ion. Verkkosivu. Viitattu 3.12.2021. Saatavilla: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>

Barzkar A., Ghassemi M. 2020. Electric Power Systems in More and All Electric Aircraft: A Review. IEEE Access, vol. 8. Viitattu 27.1.2022. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3024168>

Benzaquen J., He J., Mirafzal B. 2021. Toward more electric powertrains in aircraft: Technical challenges and advancements. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, vol. 5, nro. 3. Viitattu 24.1.2022. Saatavilla: <https://doi.org/10.30941/CES-TEMS.2021.00022>

Bills A., Sripad S., Fredericks W.F., Singh M., Viswanathan V. 2020. Performance Metrics Required of Next-Generation Batteries to Electrify Commercial Aircraft. ACS Energy Letter, vol 5, nro. 2, s. 663-668. Viitattu 3.12.2021. Saatavilla: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsendergylett.9b02574>

Brown K. A., Fleming J., Langford M., Ng W., Schwartz K., Combs C. 2019. Development of a Ducted Propulsor for BLI Electric Regional Aircraft - Part I: Aerodynamic Design and Analysis. AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum. Viitattu 22.3.2022. Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/335215109_Development_of_a_Ducted_Propulsor_for_BLI_Electric_Regional_Aircraft_-_Part_I_Aerodynamic_Design_and_Analysis

Bye Aerospace. 2021. ELECTRIC TRAINING AIRCRAFT. Verkkosivu. Viitattu 13.3.2022. Saatavilla: <https://byeaerospace.com/electric-airplane/>

Bye Aerospace. 2022. Bye Aerospace eFlyer 800 Program Advances. Viitattu 13.3.2022. Saatavilla: <https://byeaerospace.com/bye-aerospace-eflyer-800-program-advances/>

CATL. 2021. CATL Unveils Its Latest Breakthrough Technology by Releasing Its First Generation of Sodium-ion Batteries. Viitattu 15.12.2021. Saatavilla: <https://www.catl.com/en/news/665.html>

Cailloce L. 2015. A Battery Revolution in Motion. CNRS News 27.11.2015. Viitattu 15.12.2021. Saatavilla: <https://news.cnrs.fr/articles/a-battery-revolution-in-motion>

EASA. 2019a. TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET No. EASA E.111 for Engine Trent XWB series engines. Viitattu 6.1.2022. Saatavilla: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA%20E111%20TCDS%20issue%2012_Trent%20XWB.pdf

EASA. 2019b. TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET No. IM.E.093 for PW1100G-JM Series Engines. Viitattu 6.4.2022. Saatavilla: <https://www.easa.europa.eu/downloads/20016/en>

EASA. 2020a. EASA certifies electric aircraft, first type certification for fully electric plane world-wide. European Union Aviation Safety Agency. Viitattu 26.12.2021. Saatavilla: <https://www.easa.europa.eu/newsroom-and-events/news/easa-certifies-electric-aircraft-first-type-certification-fully-electric>

EASA. 2020b. TYPE-CERTIFICATE DATA SHEET No. EASA.E.234 For type E-811 Engine. Viitattu 7.1.2022. Saatavilla: <https://www.easa.europa.eu/downloads/114474/en>

EASA. 2022a. Rotorcraft noise database. Viitattu 27.4.2022. Saatavilla: <https://www.easa.europa.eu/downloads/16971/en>

- EASA. 2022b. Light propeller driven aeroplanes noise database. Viitattu 27.4.2022. Saatavilla: <https://www.easa.europa.eu/downloads/16973/en>
- EHang. 2021a. Verkkosivu. Passenger Transportation – Design Features. Viitattu 11.3.2022. Saatavilla: <https://www.ehang.com/ehangaav/design/>
- Ehang. 2021b. Verkkosivu. Passenger Transportation – Overview. Viitattu 11.3.2022. Saatavilla: <https://www.ehang.com/ehangaav/>
- EMRAX. 2020. Manual for EMRAX Motors / Generators. Viitattu 10.1.2022. Saatavilla: https://emrax.com/wp-content/uploads/2020/03/manual_for_emrax_motors_version_5.4.pdf
- Eviation. 2021. Verkkosivu. Viitattu 28.2.2022. Saatavilla: <https://www.eviation.co/aircraft/#alice-specifications>
- Eviation. 2022. Eviation Statement. Viitattu 28.2.2022. Saatavilla: <https://eviation.co/wp-content/themes/eviation/Eviation-Statement-feb-14-22.pdf>
- Finnair. 2022. Verkkosivu. Finnairin laivasto. Viitattu 8.3.2022. Saatavilla: <https://www.finnair.com/fi-fi/tietoa-lennoista/finnairin-laivasto>
- Frankel T. 2016. The Cobalt Pipeline – Tracing the path from deadly hand-dug mines in Congo to consumers’ phones and laptops. Washington Post. Viitattu 6.12.2021. Saatavilla: <https://www.washingtonpost.com/graphics/business/batteries/congo-cobalt-mining-for-lithium-ion-battery/>
- Gnadt A., Speth R., Sabnis J., Barret S. 2018. Technical and environmental assessment of all-electric 180-passenger commercial aircraft. Progress in Aerospace Sciences, vol. 105, s. 1-30. Viitattu 4.12.2021. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.11.002>
- Graver B., Zhang K., Rutherford D. 2019. CO2 emissions from commercial aviation, 2018. ICCT. Viitattu 25.11.2021. Saatavilla: https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_CO2-commercl-aviation-2018_20190918.pdf
- Heart Aerospace. 2022. Verkkosivu. Frequently Asked Questions. Viitattu 18.3.2022. Saatavilla: <https://heartaerospace.com/faq/>

ICAO. 2004. Noise Certification Workshop – Annex 16, Volume I and equivalent procedures. Viitattu 27.4.2022. Saatavilla: https://www.icao.int/Meetings/Environmental-Workshops/Documents/NoiseCertificationWorkshop-2004/BIP_2_2_jb.pdf

Irle R. 2022. Global EV sales for 2021 H1. EV-Volumes. Viitattu 30.3.2022. Saatavilla: <https://www.ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/>

Jin Y., Liu K., Lang J., Jiang X., Zheng Z., Su Q., Huang Z., Long Y., Wang C., Wu H., Cui Y. 2020. High-Energy-Density Solid-Electrolyte-Based Liquid Li-S and Li-Se Batteries. *Joule*, vol. 4, nro. 1, s. 262-274. Viitattu 15.12.2021. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.09.003>

Joby Aero Inc. 2021. Joby Completes Flight of More Than 150 Miles with Electric Vertical Take-Off Air Taxi. Viitattu 14.4.2022. Saatavilla: <https://www.jobyaviation.com/news/joby-completes-flight-of-more-than-150-miles/>

Joby Aero Inc. 2022. Joby Aviation Media Kit. Viitattu 30.3.2022. Saatavilla: <https://drive.google.com/drive/folders/1JQwXuIGAbSWB4R-Ui3Ld9Ka1d5Vn10hT>

Joby Aviation. 2022a. Verkkosivut. Home. Viitattu 7.3.2022. Saatavilla: <https://www.jobyaviation.com/>

Joby Aviation. 2022b. Verkkosivut. Our Story. Viitattu 7.3.2022. Saatavilla: <https://www.jobyaviation.com/about/>

Kane M. 2022. Global Plug-In Car Sales: Chinese Models Dominate Top 20 In January 2022. *InsideEVs*, 9.3.2022. Viitattu 30.3.2022. Saatavilla: <https://insideevs.com/news/571750/global-plugin-car-sales-january2022/>

Lilium. 2021a. Valokuva. Viitattu 30.3.2022. Saatavilla: <https://photos.app.goo.gl/ozik5SJcpsQE8fdQ7>

Lilium. 2021b. Fact Sheet. Viitattu 9.3.2022. Saatavilla: https://lilium.com/files/redaktion/refresh_feb2021/investors/Lilium_Fact_Sheet_March_30_2021.pdf

Lilium. 2022. BLOG – The Lilium Design Philosophy: Safety, Collaboration, and Scalability. Viitattu 1.4.2022. Saatavilla: <https://lilium.com/newsroom-detail/lilium-design-philosophy-safety-collaboration-scalability>

- Li-S Energy. 2021. AGM CEO Presentation. Viitattu 15.12.2021. Saatavilla: <https://www.lis.energy/site/PDF/f559da60-c79d-4cec-b271-9d5f92319da5/AGMChairmansStatementandCEOPresentation>
- Liu Y., Sun Q., Li W., Adair K.R., Li J., Sun X. 2017. A comprehensive review on recent progress in aluminum-air batteries. *Green Energy & Environment*, vol. 2, nro. 3, s. 246-277. Viitattu 14.12.2021. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.gee.2017.06.006>
- magniX. 2022. Verkkosivut. Products & Services. Viitattu 10.1.2022. Saatavilla: <https://www.magnix.aero/services>
- Métalectrique. n.d. Verkkosivut. Viitattu 17.12.2021. Saatavilla: <https://www.metalectrique.com/>
- NASA. 2019. NASA Armstrong Fact Sheet: NASA X-57 Maxwell. Viitattu 14.2.2022. Saatavilla: <https://www.nasa.gov/centers/armstrong/news/FactSheets/FS-109.html>
- NASA. 2022. X-57 Maxwell – Project Summary. Valokuva. Viitattu 30.3.2022. Saatavilla: <https://sacd.larc.nasa.gov/asab/asab-projects-2/x57maxwell/>
- Nathen P. 2021. Architectural performance assessment of an electric vertical take-off and landing (e-VTOL) aircraft based on a ducted vectored thrust concept. Viitattu 9.3.2022. Saatavilla: <https://assets.evtol.com/wp-content/uploads/2021/03/Architectural-performance-assessment-of-an-e-VTOL-aircraft.pdf>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2016. Commercial Aircraft Propulsion and Energy Systems Research: Reducing Global Carbon Emissions. Washington, DC: The National Academies Press. Viitattu 6.1.2022. Saatavilla: <https://www.nap.edu/read/23490/chapter/1>
- Neste. 2021. Technical Data Sheet – Aviation Jet Fuel JET A-1. Viitattu 3.12.2021. Saatavilla: https://www.neste.fi/static/datasheet_pdf/145163_fi.pdf
- Nitzsche M., Cheshire C., Fischer M., Ruthardt J., Roth-Stielow J. 2019. Comprehensive Comparison of a SiC MOSFET and Si IGBT Based Inverter. PCIM Europe, International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. 2019. Nürnberg, Saksa. Viitattu 18.3.2022. Saatavilla: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-10896>

Oliver Wyman. 2018. Global fleet & MRO market forecast commentary 2018-2028. Viitattu 2.5.2022. Saatavilla: https://www.oliverwyman.com/content/dam/oliver-wyman/v2/publications/2018/January/2018-2028_Global_Fleet_MRO_Market_Forecast_Commentary_Public_Final_web.pdf

Osama M. 2022. Patentti. High voltage electric machine equipped with galvanic separators for cascaded voltage stator modularization. General Electric Co. US20220069641A1, 25.8.2020. Viitattu 11.4.2022. Saatavilla: <https://patents.google.com/patent/US20220069641A1/en>

Ostrower J. & Head E. 2022. Approaching first flight, Eviation's Alice readies to test FAA. The Air Current, 20.1.2022. Viitattu 28.2.2022. Saatavilla: <https://theaircurrent.com/aircraft-development/eviation-alice-readies-first-flight-faa/>

Oxis Energy. 2019. Ultra Light Lithium Sulfur Pouch Cell. Viitattu 15.12.2021. Saatavilla: <https://45uevg34gwlltnbsf2plyua1-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2019/07/OXIS-Li-S-Ultra-Light-Cell-spec-sheet-v4.2.pdf>

Panasonic. n.d. Specifications for NCR18650BF. Viitattu 3.12.2021. Saatavilla: https://api.pim.na.industrial.panasonic.com/file_stream/main/fileversion/3446

Pelz P., Leise P., Meck M. 2021. Sustainable aircraft design — A review on optimization methods for electric propulsion with derived optimal number of propulsors. Progress in Aerospace Sciences, vol. 123. Viitattu 17.1.2022. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2021.100714>

Pipistrel. 2017. Aircraft information – Pipistrel Alpha Electro. Viitattu 26.12.2021. Saatavilla: <https://www.pipistrel-usa.com/wp-content/uploads/2018/03/Pipistrel-Alpha-ELECTRO-Information-Pack.pdf>

Pipistrel n.d.a. Velis Electro. Verkkosivu. Viitattu 26.12.2021. Saatavilla: <https://www.pipistrel-aircraft.com/aircraft/electric-flight/velis-electro-easa-tc/>

Pipistrel n.d.b. Batteries Systems and BMS – Basic Information. Verkkosivu. Viitattu 26.12.2021. Saatavilla: <https://www.pipistrel-aircraft.com/aircraft/electric-flight/batteries-systems-and-bms/>

Pyrhönen J., Otto M., Ayguzina V., Petrov I., Vauterin J., Ismagilov F.R., Vavilov V.Ye. 2020. Applicability of carbon nanotube materials in present-day and future electrical machines. 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM). 23.-26.8.2020. Göteborg, Ruotsi. Viitattu 30.1.2022. Saatavilla:

<https://doi.org/10.1109/ICEM49940.2020.9270684>

Rolls-Royce. n.d. Trent XWB – Exclusively powers the Airbus A350 family. Viitattu 6.1.2022. Saatavilla: <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/products-and-services/civil-aerospace/airlines/trent-xwb.pdf>

Rolls-Royce. 2018. Rolls-Royce welcomes UK Government funding for project to push the boundaries of all-electric flight research. Viitattu 13.3.2022. Saatavilla:

<https://www.rolls-royce.com/media/press-releases.aspx#16-07-2018-rr-welc-uk-govt-funding-for-proj-to-push-the-boundaries-of-all-electric-flight-research>

Rolls-Royce. 2022a. Verkkosivu. Viitattu 10.1.2022. Saatavilla: <https://www.rolls-royce.com/products-and-services/electrical/propulsion/regional-aircraft.aspx>

Rolls-Royce. 2022b. The ‘Spirit of Innovation’ officially breaks speed record and becomes the world’s fastest all-electric vehicle. Viitattu 7.3.2022. Saatavilla: <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2022/20-01-2022-the-spirit-of-innovation-officially-breaks-speed-record.aspx>

Safran. n.d. ENGINEUS™ Smart Electric Motors. Verkkosivu. Viitattu 13.3.2022. Saatavilla: <https://www.safran-group.com/products-services/engineusm>

Sayed E., Abdalmagig M., Pietrini G., Sa’adeh N.M, Callegaro A.D., Goldstein C., Emadi A. 2021. Review of Electric Machines in More-/Hybrid-/Turbo-Electric Aircraft. IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 7, nro. 4, s. 2976-3005. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3089605>

Singh R., Ameyugo G., Noppel F. 2012. Jet engine design drivers: past, present and future. Innovation in Aeronautics, s. 56-82. Viitattu 4.1.2022. Saatavilla:

<https://doi.org/10.1533/9780857096098.1.56>

Soares C. 2008. Performance, Performance Testing, and Performance Optimization. A Handbook of Air, Land, and Sea Applications, s. 387-470. Viitattu 6.1.2022. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/B978-075067969-5.50015-6>

- SolidEnergy Systems. 2021. Hybrid Li-metal Batteries – Data Week 2021. Viitattu 3.12.2021. Saatavilla: <https://ses.ai/wp-content/pdfs/SES%20Data%20Week%202021.pdf>
- Spakovszky Z. S. 2002. Performance of Propellers. Unified: Thermodynamics and Propulsion. Viitattu 13.2.2022. Saatavilla: <https://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node86.html>
- Terao Y., Kong W., Ohsaki H., Oyori H., Morioka N. 2018. Electromagnetic Design of Superconducting Synchronous Motors for Electric Aircraft Propulsion. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 28, nro. 4. Viitattu 11.1.2022. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/TASC.2018.2823503>
- Thomson R. 2020. Electric propulsion is finally on the map. Roland Berger, Lontoo. Viitattu 25.11.2021. Saatavilla: <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Electric-propulsion-is-finally-on-the-map.html>
- Tibtech. 2018. Metal properties table. Viitattu 30.1.2022. Saatavilla: https://www.tibtech.com/conductivite.php?lang=en_US
- Tullo A. 2017. Batteries that breathe air. Chemical & Engineering News, vol. 95, nro. 9. Viitattu 20.12.2021. Saatavilla: <https://cen.acs.org/articles/95/i9/Batteries-breathe-air.html>
- Volocopter. 2019. VOLOCITY – Design specifications, August 2019. Viitattu 11.3.2022. Saatavilla: https://volocopter-statics.azureedge.net/content/uploads/20190819_VoloCity_Specs.pdf
- Volocopter. 2020. Valokuva. Viitattu 30.3.2022. Saatavilla: <https://mediahub-volocopter.pixxio.media/collection/42>
- Volocopter. 2022. Verkkosivu. VOLOCITY – The air taxi that’s a cut above. Viitattu 27.4.2022. Saatavilla: <https://www.volocopter.com/solutions/volocity/>
- Voltaplex. 2020a. Verkkosivu. Panasonic BF 18650 Battery, 3350mAh, 4.875A, 3.6V, Grade A Lithium-ion (NCR18650BF). Viitattu 14.2.2022. Saatavilla: <https://voltaplex.com/panasonic-bf-18650-battery-ncr18650bf>
- Voltaplex. 2020b. Verkkosivu. Sanyo RX 18650 Battery, 1950mAh, 25A, 3.6V, Grade A Lithium-ion (UR18650RX). Viitattu 15.2.2022. Saatavilla: <https://voltaplex.com/sanyo-rx-18650-battery-ur18650rx>

Wileman A.J., Aslam S., Perimpanayagam S. 2021. A road map for reliable power electronics for more electric aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 127. Viitattu 30.1.2022. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2021.100739>

Wright Electric. 2021a. Building the foundation for a cleaner future: Wright has begun testing a 2MW aviation-grade motor for transport-category zero-emissions aircraft. Viitattu 28.2.2022. Saatavilla: https://uploads-ssl.webflow.com/60903f73e3c957afb630e99b/61705e3e23265989c725a85f_613758e4c91c06f8d7f85a06_Wright%20Electric%20-%20Motor%20Press%20Release%20%20-%20Sept%202021.pdf

Wright Electric. 2021b. Building the foundation for a cleaner future: Wright has demonstrated next-generation inverter technology for transport-category zero-emissions aircraft. Viitattu 28.2.2022. Saatavilla: https://uploads-ssl.webflow.com/60903f73e3c957afb630e99b/60a6d508e63963087739a390_Wright%20May%202021.pdf

Wright Electric. 2022. Verkkosivut. Viitattu 18.3.2022. Saatavilla: <https://www.weflywright.com/>

Yates W., Ussery R., Young B. 2017. Patentti. Long range electric aircraft and method of operating same. Talyn Air Inc. US9815563B2, 4.4.2016. Viitattu 11.4.2022. Saatavilla: <https://patents.google.com/patent/US9815563B2/en>

Yoon A., Yi X., Martin J., Chen Y., Haran K. 2016. A high-speed, high-frequency, air-core PM machine for aircraft application. 2016 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI). 19.-20.2.2016. Urbana, IL, USA. Viitattu 11.1.2022. Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/PECI.2016.7459221>