

Jesse Ranta

# LINEAARIKONEET NYT JA TULEVAISUUDESSA

Kandidaatintyö  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Tarkastaja: Paavo Rasilo  
Toukokuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Jesse Ranta: Lineaarikoneet nyt ja tulevaisuudessa  
Tampereen yliopisto  
Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma  
Kandidaatintyö  
Toukokuu 2021

---

Lineaarista liikettä hyödyntävät sähkökoneet eli lineaarikoneet ovat yleistymässä erilaisissa ratkaisuisissa. Aiemmin on jouduttu käyttämään voimansiirtosysteemejä, jotta perinteiset pyörivää liikettä käyttävät sähkökoneet voisivat käyttää lineaarista liikettä. Tässä työssä tarkastellaan eri lineaarikoneiden malleja ja niiden käyttökohteita nykypäivänä ja tulevaisuudessa. Työn tavoitteena on käsitellä lineaarikoneiden hyötyjä ja haittoja sekä tutkia millaisissa erilaisissa sovelluksissa lineaarikoneita olisi järkevä käyttää.

Ensimmäiseksi työssä käsitellään eri lineaarikonetyyppejä. Epätahtikoneet ja tahtikoneet käsitellään tarkemmin ja joitakin erikoisempia koneita mainitaan. Epätahtikoneista ja tahtikoneista käydään läpi erilaisia mahdollisia rakenteita. Seuraavaksi työssä tutkitaan lineaarikoneiden mallinnusta ja esitellään kaavoja, joilla voidaan laskea koneiden voimia. Kaavoista tutkittiin, mitä parametrejä pitäisi säätää tietyn voiman muuttamiseksi. Lopuksi esitellään lineaarikoneiden käyttökohteita. Eri kokoluokan käyttökohteisiin on valittu esimerkkejä, joita käydään tarkemmin läpi. Tämän hetken ja tulevaisuuden käyttökohteet on eritelty eri lukuihin.

Lineaarikoneille paljastui useita etuja. Ne eivät vaadi pyörivien sähkökoneiden tapaista voimansiirtoa, jolloin myös huollon tarve vähenee. Lineaarikoneiden rakenne mahdollistaa kompaktin koon useisiin sovelluskohteisiin. Niitä pystyy myös säätämään hyvin tarkasti. Haitaksi huomattiin erityisesti huonompi hyötysuhde. Se kuitenkin usein kompensoituu koko systeemin mittakaavassa, koska ei ole voimansiirtoa laskemassa hyötysuhdetta. Käyttökohteita löytyi monista tapauksista. Pienemmissä systeemeissä hyödynnettiin lineaarikoneiden pientä kokoa ja tarkkaa säädettävyyttä. Suuremmissa systeemeissä hyödynnettiin usein magneettista levitaatiota. Magneettisessa levitaatiossa kohde pidetään ilmassa magneettikenttien avulla, jolloin liikkuesssa ei synny kitkaa. Magneettista levitaatiota hyödynnettiin etenkin erilaisissa junissa.

Avainsanat: Lineaarikone, lineaarimoottori, MAGLEV, magneettinen levitaatio, mallinnus

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. LINEAARIKONEIDEN RAKENNE .....	2
2.1 Tavallisia rakenteita .....	2
2.2 Epätahtikone .....	3
2.3 Tahtikone .....	3
2.4 Erikoisempia lineaarikonetyyppejä .....	5
3. LINEAARIKONEIDEN MALLINTAMINEN .....	7
3.1 Huomioon otettavia asioita .....	7
3.1.1 Päätyvaikutus .....	7
3.1.2 Reunavaikutus .....	7
3.1.3 Ilmaväli .....	8
3.1.4 Normaalivoima .....	8
3.2 LIM moottorin mallinnus .....	8
3.3 LSM mallinnus .....	11
3.4 Magneettinen levitaatio .....	12
4. LINEAARIKONEIDEN NYKYISET KÄYTTÖKOHTEET .....	14
4.1 Lineaarikoneet lyhyen matkan sovelluksissa .....	14
4.2 Lineaarikoneet pitkän matkan sovelluksissa .....	15
4.2.1 Lineaarikoneilla toteutettu matkatavaroiden kuljetus .....	15
4.2.2 Lineaarikoneet kulkuneuvojen voimanlähteenä .....	16
4.2.3 Magneettiseen levitaatioon perustuvat kulkuneuvot .....	17
5. LINEAARIKONEET TULEVAISUUDESSA .....	20
5.1 Lineaarimoottoreilla toimiva liikenne tulevaisuudessa .....	20
5.2 Lineaarimoottoreilla toimivat laukausysteemit .....	20
5.3 Lineaarimoottorit hisseissä .....	21
5.4 Lineaarigeneraattorit .....	22
6. YHTEENVETO .....	25
LÄHTEET .....	26

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

LIM	Linear induction machine, lineaarinen epätahtikone
LOM	Linear oscillating machine, värähtelevä lineaarikone
LSM	Linear synchronous machine, lineaarinen tahtikone

# 1. JOHDANTO

Useat systeemit ja toimilaitteet vaativat lineaarista liikettä. Lineaarisen liikkeen tuottaminen on ollut ongelmallista läpi historian. Ennen sähkömoottoreita käytettiin esimerkiksi suoraan vesivoimaa, josta saatiin pyörivää liikettä. Perinteisillä sähkömoottoreilla tuotetaan pyörivää liikettä. Lineaarisen liikkeen tuottamiseksi käytettiin ja käytetään osin myös edelleen erilaisia voimansiirtolaitteistoja. Nämä laitteistot koostuvat useista kuluvista osista, jotka lisäävät huoltojen tarvetta. Ne ovat häviöllisiä systeemejä, eli laskevat koko systeemin hyötysuhdetta. Sähkökoneilla voidaan tuottaa myös lineaarista liikettä ja niistä on nykypäivänä saatu tarpeeksi tehokkaita ja kannattavia korvaamaan perinteiset ratkaisut. Lineaarista liikettä käyttävät sähkökoneet, eli lineaarikoneet, tulevat yhä useammissa tapauksissa pyörivien sähkökoneiden sijalle.

Tässä työssä käsitellään lineaarikoneiden toimintaa, käyttökohteita sekä laskennallisia menetelmiä. Tavoitteena on tarkastella missä erilaisissa ratkaisuihin lineaarikoneilla saavutetaan etuja perinteisiin ratkaisuihin nähden. Tarkastellaan myös, että millaiset lineaarikonemallit sopivat tiettyihin sovelluskohteisiin. Mallinnuksen avulla tutkitaan lineaarikoneiden ominaisuuksia. Lineaarikoneiden magneettikentät ovat hankalia käsiteltäviä, joten laskennallisissa menetelmissä joudutaan käyttämään merkittäviä approksimaatioita. Käyttökohteista käsitellään niin suuritehoisia kuin pienitehoisia kohteita, sekä niistä tarkemmin esimerkkejä. Esimerkeiksi on valittu keskeisimpiä ja aihetta parhaiten kuvaavia käyttökohteita. Työ käsittelee pääosin moottoreita, koska generaattoreille ei ole vielä monia käyttökohteita.

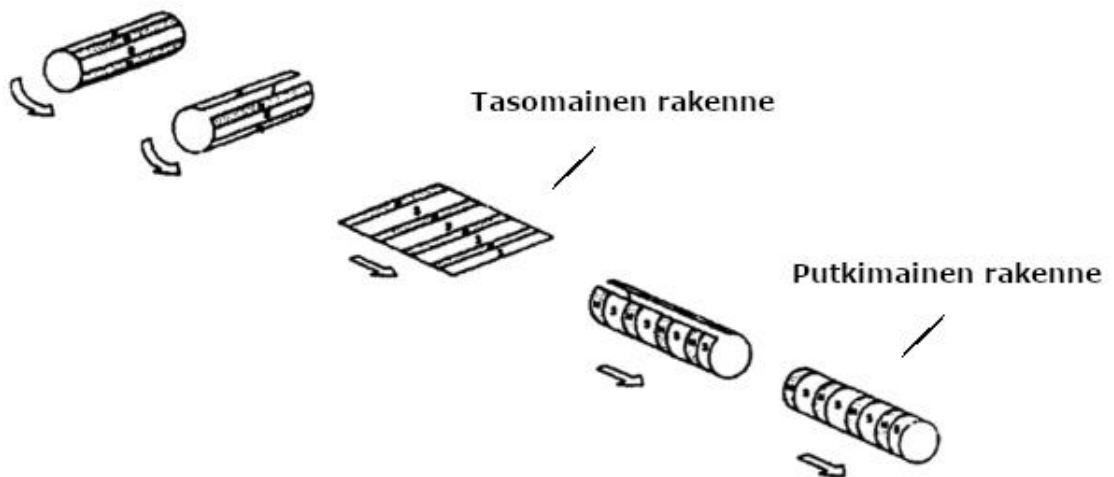
Luvussa 2 tarkastellaan eri lineaarikoneiden rakenteita. Tavalliset epätahtikoneet ja tahtikoneet käsitellään tarkemmin. Luvussa 3 käydään läpi laskennallisia menetelmiä lineaarikoneille. Luku 4 käsittelee nykyisiä lineaarikoneiden sovelluskohteita. Joitakin kohteita tarkastellaan tarkemmin. Lopuksi käsitellään lineaarikoneiden tulevaisuutta luvussa 5. Luku 6 on yhteenveto.

## 2. LINEAARIKONEIDEN RAKENNE

Lineaarikoneiden rakenne on hyvin samanlainen kuin tavallisilla pyörivillä sähkökoneilla. Pyörivät sähkökoneet koostuvat staattoriin ja roottoriin. Staattori on osa, johon generaattorikäytössä indusoituu virta ja moottorikäytössä johdetaan virtaa. Roottori on pyörivän sähkökoneen pyörivä osa. Se voi olla kestopagneetti tai magnetoitu piiri. Teoriassa jokaisesta pyörivän sähkökoneen mallista voidaan tehdä lineaarinen malli. Kaikki eivät kuitenkaan ole käytännössä mahdollisia. [1, s. 303–304]

### 2.1 Tavallisia rakenteita

Lineaarikoneissa voidaan ajatella, että pyörivän sähkökoneen staattori ja roottori ovat katkaistu ja avattu levyiksi [2]. Tällainen lineaarikone on tasomainen. Lineaarikone voi myös olla putkimainen, jos katkaistu ja avattu staattori pyöritetään takaisin pyöreäksi, mutta nyt toisinpäin kuin se oli alun perin. Kuvassa 1 on esitetty lineaarikoneen tasomaisen ja putkimaisen rakenteen yksinkertaiset mallit. Putkimaisessa rakenteessa liike tapahtuu putken pituussuunnassa.



**Kuva 1.** Tasomainen ja putkimainen rakenne. Muokattu lähteestä [3, s. 11].

Toinen yleinen rakenne on yksipuolisen sijaan kaksipuolinen rakenne. Siinä tasomaisen roottoriin molemmilla puolilla on tasomaiset staattoriin. Kun tehoa syötetään roottoriin sen molemmilta puolilta, saadaan tehokkaampaa tehonsiirtoa. [7] Tässä rakenteessa ongelmana on, että joskus se ei ole käytännöllinen. Liikutettava kohde voi olla roottoriin päällä. Kaksipuolisessa rakenteessa liikutettava kohde jäisi staattoriin väliin.

## 2.2 Epätahtikone

Kuten pyörivillä sähkökoneilla, myös lineaarikoneita on sekä epätahtikoneita että tahtikoneita. Epätahtikoneissa syntyvän liikkeen nopeus poikkeaa koneen magneettikentän nopeudesta. Tätä eroa kutsutaan jättämäksi. [4] Lineaarisissa epätahtikoneissa (LIM) jättämä voidaan laskea kulmanopeuden sijaan nopeutena. Nimitetään epätahtikoneessa staattoriipiiriä ja roottoriipiiriä selvyuden vuoksi ensiöpiiriksi ja toisiopiiriksi.

Ensiöpiirissä on pyörivien epätahtikoneiden tapainen kolmivaihekäämitys. Toisin kuin pyörivissä epätahtikoneissa, lineaarisissa epätahtikoneissa toisiopuolella käytetään usein johtavasta materiaalista valmistettua kiinteää levyä [3, s 13]. Toisiopuolella voidaan käyttää rautalevyä, jossa on ensiöpiiriä vastaan ohut alumiinilevy. Moottorikäytössä ensiöpiirin luoma magneettikenttä indusoi virran toisiopuolen alumiinilevyyn. Toisiopiirin sähkövirta luo oman magneettikentän. Nämä kaksi magneettikenttää vaikuttavat toisiinsa ja tämä vaikutus aiheuttaa liikkeen koneessa. [5] Toisiopuolella olevan rautalevyn tehtävä on vahvistaa magneettikenttiä.

Lineaarikoneissa ensiöpiiri ja toisiopiiri liikkuvat toistensa suhteen ja toinen puoli kulkee lopulta kokonaan toisen ylitse. Jos molemmat piirit olisivat yhtä pitkiä, ylitse menevä puoli olisi käyttämättömänä ja käytännössä aiheuttaisi vaikeuksia suunnittelussa. Tämän takia toinen piiri suunnitellaan toista lyhyemmäksi. Mallia, jossa ensiöpiiri on toisiopiiriä lyhyempi, kutsutaan lyhyen ensiön malliksi. Mallia, jossa toisiopiiri on ensiöpiiriä lyhyempi, kutsutaan pitkän ensiön malliksi. Useimmissa ratkaisuissa käytetään lyhyen ensiön mallia, jossa ensiöpiiri liikkuu ja toisiopiiri pysyy paikallaan [5]. Koska LIM:ssä toisiopiirinä on yleensä vain metallilevy, tulee lyhyen ensiön mallin kustannukset yleensä pienemmiksi.

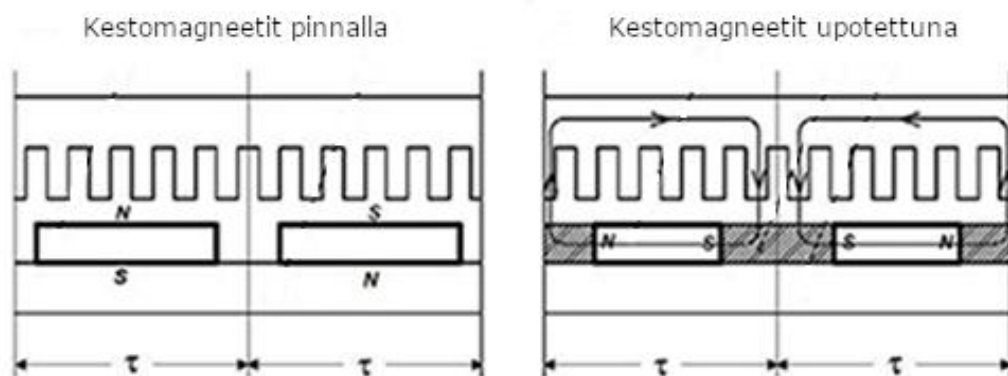
## 2.3 Tahtikone

Lineaarisissa tahtikoneissa (LSM) liike on tahdissa magneettikentän kanssa. LSM:t voivat olla tasomaisia tai putkimaisia sekä kaksipuolisia tai yksipuolisia. Niillä on myös lyhyen ensiön ja pitkän ensiön malleja. LSM:n ensiöpuolta kutsutaan ankkuriksi. Toisiopuolelle on eri nimityksiä rakennetyypistä riippuen. [6] Kutsutaan tässä työssä sitä reaktiokiskoksi.

Tahtikoneille on useita eri magnetointitapoja. Tahtikoneen magnetointitavat voidaan jakaa passiiviseen reaktiokiskoon ja aktiiviseen reaktiokiskoon. Aktiivisen reaktiokiskon mallissa on yleensä pitkä ankkuri (pitkä staattori) ja passiivisessa reaktiokiskon mallissa lyhyt ankkuri. [7] Aktiivisessa reaktiokiskossa magnetointi tapahtuu reaktiokiskossa,

mutta passiivisessa magnetointisysteemi on mukana ankkurissa. Koneessa pyritään minimoimaan kustannukset tekemällä halvempi piiri pitkäksi ja kalliimpi lyhyeksi.

Magnetointi toteutetaan yleensä kestopagneettien avulla. Aktiivisen radan mallissa kestopagneetit sijoitetaan reaktiokiskoon. Ne voivat olla joko reaktiokiskon pinnalla tai upotettuna siihen. Rakenteessa, jossa kestopagneetit ovat reaktiokiskon pinnalla, reaktiokisko on tehty ferromagneettisesta aineesta, kuten esimerkiksi raudasta. Kestopagneetit asetetaan siten, että magneetit ovat magnetoituneet kohtisuoraan ankkuria vastaan. [6] Vastaavasti rakenteessa, jossa kestopagneetit ovat upotettuna reaktiokiskoon, magneetit ovat magnetoituneet liikkuvan magneettikentän suuntaan. Jos kestopagneetit ovat upotettuna reaktiokiskoon yksipuolisessa koneessa, reaktiokiskoa ei tehdä ferromagneettisesta aineesta. Reaktiokiskon puolelta vuotava magneettivuo olisi suuri suhteessa ankkurin puolella olevaan vuohon. Kestopagneeteilla toteutetun aktiivisen reaktiokiskon mallin huonona puolena on, että reaktiokiskon rakenne on todella kallis. [6] Kestopagneetit joudutaan valmistamaan harvinaisista maametalleista, joiden hinnat ovat korkealla [8, s. 469–473]. Kuvassa 2 on esitetty kestopagneettien sijoittaminen reaktiokiskoon. Yläpuolella on ankkuri ja alapuolella reaktiokisko. Oikeanpuoleisessa kuvassa näkyy myös yksinkertaistettu magneettikentän kulku. Koska reaktiokiskon materiaali ei ole ferromagneettinen, se ei ole hyvä kulkutie magneettivuolle.



**Kuva 2.** Kestopagneettien sijoittaminen reaktiokiskoon. Muokattu lähteestä [6].

Tapa vähentää kestopagneettien kustannuksia on asettaa ne lyhyeen ankkuriin. Tässä rakenteessa reaktiorata on passiivinen. Reaktiorata koostuu ferromagneettisista kuutioista, jotka on erotettu toisistaan ei ferromagneettisella aineella. Ankkurin kestopagneetit magnetoivat reaktioradan ferromagneettiset osat. Tällaista mallia kutsutaan homopolaarisiksi LSM:ksi. [6]

Magnetointi voidaan toteuttaa myös perinteisesti ilman kestopagneetteja esimerkiksi tasavirran avulla. Tällaiselle mallille on olemassa useita rakenteita. Eräässä mallissa on



pitkä kolmivaihekäämitetty ankkuri ja lyhyt tasasähkömagnetoitu reaktiokisko. Reaktiokisko on siis aktiivinen ja se on tämän systeemin liikkuva osa. [7] Suuren kokoluokan systeemeissä tasavirtalähde on mukana liikkuvassa osassa. Pienemmissä systeemeissä voidaan käyttää esimerkiksi hiiliharjoja, mutta on olemassa myös erilaisia harjattomia ratkaisuita. [6] Kuvassa 3 on eräs pieni harjallinen tasasähkömagnetoitu LSM. Yläpuolella on liikkuva reaktiokisko ja alapuolella pitkä ankkuri.



**Kuva 3.** Harjallinen LSM [7].

Suuren teholuokan koneissa voidaan magnetoinnissa käyttää apuna suprajohtavia magneetteja. Suprajohde on aine, jonka resistiivisyys on nolla. Aine voi olla suprajohtavassa tilassa vain tietyn lämpötilan alapuolella. Yleensä nämä lämpötilat ovat hyvin pieniä. [9] Suprajohtava magneetti on kela, joka on käämitty suprajohteesta [10, s 308]. Suprajohtavilla magneeteilla saadaan aikaan magneettivuon tiheys, joka on suurempi kuin ankkurissa käytetyillä ferromagneettisilla aineilla saturaatiossa. Tämän takia ferromagneettista ydintä ei tarvita ankkurissa ja ytimenä toimii pelkkä ilma. [6]

## 2.4 Erikoisempia lineaarikonetyyppejä

Kuten aiemmin mainittiin, jokaisella pyörivällä sähkökoneella on lineaarinen vastine. On useita erikoisempia pyöriviä sähkökoneita, joten on myös useampia erikoisia lineaarikoneita. Erilaisia koneita tehdään sellaista vaativiin sovelluksiin.

Värähtelevä lineaarikone (LOM) tuottaa jatkuvan liikkeen sijaan värähtelevää liikettä. LOM värähtelee tietyllä resonanssi taajuudella. Ne toimivat yleensä yksivaiheisella vaihtojännitteellä ja niissä käytetään kestopagneetteja. Rakenteessa voidaan käyttää jousia,

joiden välillä mäntä värähtelee tai se voi olla ilman jousia. Värähtelevä liike voi ylittää 25 mm koneen tasapainoasemasta. LOM voi saavuttaa yli 90 % hyötysuhteen yli 50 W tehoilla. [7]

Tasasähkökoneet toimivat tasavirralla ja niille on toimiva lineaarinen vastine. Sähkökoneet tarvitsevat muuttuvan magneettivuon, joka tasavirralla ei onnistu. Tämän takia joudutaan käyttämään esimerkiksi hiiliharjoja muuttamaan se vaihtovirraksi. Lineaarisissa tasasähkökoneissa hiiliharjasysteemit voivat olla hieman monimutkaisempia verrattuna pyöriviin sähkökoneisiin. Hiiliharjasysteemit ovat yleensä systeemin heikkous, joten niistä halutaan eroon. Harjat kuluvat ja niiden kontakti ei ole aina varmaa. Harjattomalla systeemillä ei ole näitä haittoja. [40] Magnetoinnissa lineaarisissa tasasähkökoneissa käytetään usein kestopagneetteja.

## 3. LINEAARIKONEIDEN MALLINTAMINEN

Lineaarikoneiden mallintamisessa voitaisiin käyttää ekvivalenttisten pyörievien sähkökoneiden malleja, mutta niillä ei kuitenkaan päästä kovin tarkkoihin tuloksiin. Lineaarikoneilla on ominaisuuksia, joita ei ole tavallisilla pyörivillä sähkökoneilla. Ne johtuvat lineaarikoneiden rakenteesta. Näitä joudutaan ottamaan huomioon laskuissa ja mallinnuksessa.

### 3.1 Huomioon otettavia asioita

Lineaarikoneilla on ominaisuuksia, jotka vaikuttavat koneen voimiin. Nämä johtuvat koneen rakenteesta. Näitä ei joko löydy tavallisista pyörivistä sähkökoneista tai ne ovat mitättömiä.

#### 3.1.1 Päätyvaikutus

Lineaarikoneilla on alkupää ja loppupää, jotka vaikuttavat ilmvälissä kulkevaan magneettivuohon. Tämä aiheuttaa häviöitä lineaarikoneissa. Tätä vaikutusta kutsutaan päätyvaikutukseksi (end effect). [7] Sitä aiheuttaa kaksi asiaa. Lineaarikoneen molemmissa päädyissä ilmvälön reluktanssi muuttuu ja indusoituviin virtoihin tapahtuu muutos [12]. Päätyvaikutuksen voidaan ajatella indusoivan oman virran, joka luo epätasaisuutta virtajakaumaan. Pyörivillä sähkökoneilla staattori- ja roottori-piirit ovat näennäisesti äärettömän pitkät, jonka takia niissä ei tapahdu päätyvaikutusta. Myös todella pitkällä lineaarikoneilla voidaan olla huomioimatta päätyvaikutus.

#### 3.1.2 Reunavaikutus

LIM:ssä eräs häviötekijä on reunavaikutus (edge effect). Magneettivuon tiheys on jakautunut epätasaisesti ilmvälön reunoilla, koska reluktanssi muuttuu reunoja kohti mennessä [13]. LIM:n toisiopiirin alumiinilevyyn indusoituva virrantiheys voidaan jakaa kahteen komponenttiin. Vain toinen komponentti tuottaa työntövoimaa. Pitkittäissuuntainen komponentti tuottaa pääasiassa vain häviöitä. Pitkittäissuuntainen komponentti indusoi ylimääräisiä virtoja, joista ei ole hyötyä. [7]

### 3.1.3 Ilmaväli

Lineaarikoneilla on yleensä suhteellisen suuri ilmaväli. Pyörivissä sähkökoneissa ilmaväli pyritään aina minimoimaan, koska suuri ilmaväli tuottaa niissä yleensä tehohäviöitä. Suuri ilmaväli tulee lineaarikoneen rakenteeseen luonnostaan, mutta se aiheuttaa häviöitä. [3] Pidemmässä lineaarikoneissa on suurempi ilmaväli. Esimerkiksi lyhyen matkan LIM:ssä ilmaväli voi olla noin 1 mm, pidemmällä matkoilla se voi olla 6–8 mm. Myös nopeus vaikuttaa käytetyn ilmavälin suuruuteen. [7] LSM:ssä, joissa käytetään suprajohdavia magneetteja magnetoinnissa, ei ilmavälillä ole suurta vaikutusta [3].

### 3.1.4 Normaalivoima

Lineaarimoottoreissa syntyy kaksi voimaa. Ensimmäinen on työntövoima, joka työntää liikutettavaa puolta koneen pinnan suhteen tangentialisesti. Toinen voima on normaalivoima, joka on pinnan normaalin suuntainen. Se voi olla joko hylkivä tai puoleensa vetävä. Pyörivissä sähkökoneissa normaalivoimat kumoavat toisensa koneen symmetrian takia. [3] Kaksipuolisessa rakenteessa normaalivoimat myös kumoavat toisensa. Vain yksipuolisessa rakenteessa normaalivoima ei ole netto nolla.

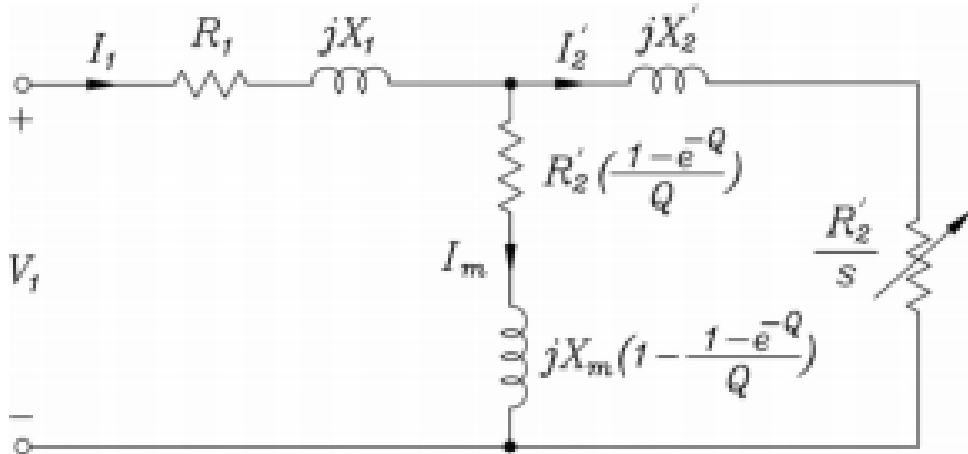
## 3.2 LIM moottorin mallinnus

Epätahtikoneiden käytännöllisyyttä ja tehokkuutta voidaan tutkia hyvyyskerroimen avulla

$$G = \frac{\sigma\mu\omega A_e A_m}{l_e l_m}. \quad (1)$$

Yllä olevassa kaavassa  $G$  on hyvyyskerroin,  $\sigma$  on toisiopiirin johtavuus,  $\mu$  on permeabiliteetti,  $\omega$  on kulmanopeus,  $A_e$  ja  $A_m$  ovat sähköisen- ja magneettisen piirin poikkileikkauksien pinta-alat ja  $l_e$  ja  $l_m$  ovat sähköisen- ja magneettisen piirin pituudet. Hyvyyskerroin ei suoraan kerro koneen tehokkuutta. Se ottaa huomioon asioita, jotka tekevät koneesta järkevän. Jos hyvyyskerroimeksi saadaan yli 1, on kone todennäköisesti järkevä. [11] Hyvyyskerroin sopii LIM laskentaan. Sillä voidaan arvioida hyvän LIM:n mittoja.

LIM moottorille voidaan tehdä sijaiskytkentä, jonka avulla voidaan laskea tarvittavia virtoja ja jännitteitä. Eräs yleisesti käytetty sijaiskytkentä on Duncanin sijaiskytkentä [14]. Se on esitetty kuvassa 4.



**Kuva 4.** Duncanin sijaiskytkentä [14]

Duncanin sijaiskytkennässä tavalliseen epätahtikoneen sijaiskytkentään on lisätty päätyvaikutus. Siinä  $R_1$  on ensiöpiirin resistanssi vaihetta kohti. Se voidaan laskea kaavalla [15]

$$R_1 = \frac{2(W_s + l_{ec})N}{\sigma_\omega A_\omega}. \quad (2)$$

Kaavassa (2)  $\sigma_\omega$  on ensiöpiirissä käytettyjen johtimien johtavuus,  $A_\omega$  on johteen poikkipinta-ala,  $W_s$  on ensiön leveys,  $l_{ec}$  on ensiön korkeus rakojen kohdalta ja  $N$  on käämi-kerrosten lukumäärä.  $X_1$  on ensiön hajavuon reaktanssi ja se saadaan laskettua kaavalla

$$X_1 = 2\mu_o\omega_1 \left( \frac{(\lambda_s(1 + \frac{3}{2}p) + \lambda_d)W_s}{q} + \lambda_e l_{ec} \right) \frac{N^2}{p}, \quad (3)$$

jossa  $\mu_o$  on tyhjiön permeabiliteetti,  $p$  on napapariluku,  $q$  on uraluku,  $\omega_1$  on ensiön jännitteen ja virran kulmanopeus ja lambda-arvot ovat kertoimia. [3]  $X_m$  on magnetisaatio-reaktanssi, joka saadaan kaavalla

$$X_m = \frac{6\mu_o\omega_1 W_{se} k_\omega^2 N^2 \tau}{\pi^2 p g_e}. \quad (4)$$

Kaavassa (4)  $W_{se}$  on ensiöpiirin vastaava leveys,  $k_\omega$  on käämityskerroin,  $g_e$  on efektiivinen ilmaväli ja  $\tau$  on napajako. [3] Efektiiviseen ilmaväliin lasketaan mukaan LIM toisiopiirin alumiinilevyn paksuus ja sitä tarkennetaan eri kertoimilla

$$g_e = \left( \frac{k_c k_l}{k_{tm}} \right) (1 + k_s) g_m. \quad (5)$$

Efektiivisen ilmavälin kaavassa (5)  $g_m$  on fyysinen ilmaväli, jossa on alumiinilevyn paksuus mukana,  $k_c$  on Carterin kerroin,  $k_l$  magneettivuon vuotamisesta tuleva kerroin,  $k_{tm}$

tulee reunavaikutuksesta ja  $k_s$  johtuu ferromagneetin saturoitumisesta.  $R'_2$  on toision resistanssi redusoituna ensiöpiiriin. Sen laskemiseen voidaan käyttää apuna hyvyyskerrointa (1)

$$R'_2 = \frac{X_m}{G}. \quad (6)$$

[3] Duncanin sijaiskytkennässä olevilla kertoimilla  $Q$  otetaan huomioon päätyvaikutus. Kerroin saadaan laskettua kaavalla [14]

$$Q = \frac{l_s R'_2}{(L_m + L'_2) v_r}. \quad (7)$$

Siinä  $l_s$  on ensiön pituus,  $L_m$  on magnetointi-induktanssi,  $L'_2$  on toisiopiirin hajainduktanssi ja  $v_r$  on moottorin nopeus. Kuvassa 3 on vielä parametri  $X_2$ , joka on toisiopiirin ensiöpiiriin redusoitu reaktanssi ja  $s$ , joka on koneen jättämä. Duncanin sijaiskytkennän virrat ovat samat kuin pyörivässä epätahtikoneessa.  $I_1$  on ensiöpuolen virta,  $I'_2$  on toisiopiirin ensiöpiiriin redusoitu virta ja  $I_m$  on magnetointivirta.

LIM moottorin työntövoima ja normaalivoima voidaan laskea analysoimalla magneettikenttiä. Käyttämällä apuna Maxwellin yhtälöitä voidaan päätyä yksipuolisen LIM moottorin tapauksessa kahteen yhtälöön

$$F_x = \frac{l_s W_s \mu_0}{2} \cdot \frac{\sigma_s \mu_0 \tau s \omega}{(\sinh \beta g_e)^2 \pi} J_1^2 \quad (8)$$

$$F_y = \frac{l_s W_s \mu_0}{4} \cdot \frac{1}{(\sinh \beta g_e)^2} J_1^2. \quad (9)$$

Yhtälöissä  $F_x$  on työntövoima ja  $F_y$  on normaalivoima. Yhtälöissä (8) ja (9)  $l_s$  on primääripiirin pituus,  $\sigma_s$  on toisiopiirin johdelevyn johtavuus,  $\beta$  on napojen urien välinen kulma ja  $J_1$  on ensiöpiirin virrantiheyden osa, joka tuottaa magnetomotorisen voiman. [16] Yhtälöiden parametreista vain  $s$ ,  $\omega$  ja  $J_1$  ovat sellaisia, joita voidaan koneen rakentamisen jälkeen muuttaa. Ne eivät riipu koneen rakenteesta. Yhtälöistä voidaan huomata, että jättämä muuttuu voiman suhteessa. Mitä isompi jättämä sitä isompi voima saadaan. Huomataan myös, että muuttamalla kulmanopeutta tai ensiöpiirin virtaa voidaan muuttaa työntövoimaa. Normaalivoimaa voidaan muuttaa vain muuttamalla ensiöpiirin virtaa. Yhtälöihin 8 ja 9 on päädytty tekemällä approksimaatioita. Esimerkiksi olettamalla koneen ferromagneettiselle aineelle ääretön permeabiliteetti ja toisiopiirin johdelevyn katsotaan olevan äärettömän ohut. [16]

### 3.3 LSM mallinnus

Tutkitaan kestopagneeteilla toimivaa LSM:ää. Kestomagneeteilla toimivaa LSM:ää kuvataan matemaattisesti yleensä  $d$  ja  $q$  akseleilla. Jännitteet, virrat ja sähkövuot jaetaan näille kahdelle akselille

$$V_d = i_d R + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q \quad (10)$$

$$V_q = i_q R + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d. \quad (11)$$

Kaavoissa (10) ja (11) jännite  $V$ , sähkövirta  $i$  ja sähkövuo  $\psi$  on jaettu  $d$  ja  $q$  akseleille.  $R$  on resistanssi. Tutkimalla tehoja päästään käsiksi työntövoimaan ja normaali voimaan. Koneen kokonaisteho on

$$V_d i_d + V_q i_q = i_d^2 R + i_q^2 R + i_d \frac{d\psi_d}{dt} + i_q \frac{d\psi_q}{dt} + \omega(\psi_d i_q - \psi_q i_d). \quad (12)$$

Tämä kaava voidaan jakaa kolmeen osaan. Kaavan ensimmäinen osa on koneen häviöteho

$$P = i_d^2 R + i_q^2 R. \quad (13)$$

Kaavan toisesta osasta saadaan derivoimalla ilmavälin suhteen koneesta saatava normaalivoima

$$F_y = i_d \frac{\partial \psi_d}{\partial g_m} + i_q \frac{\partial \psi_q}{\partial g_m}. \quad (14)$$

Kaavan (12) viimeinen osa on koneesta saatava työntövoima. [17] Se täytyy ensin jakaa moottorin nopeudella, joka tahtikoneella on

$$v_s = 2 f \tau. \quad (15)$$

Kaavassa (15)  $f$  on taajuus ja  $\tau$  on koneen napojen välinen etäisyys. [18] Nyt työntövoimaksi saadaan

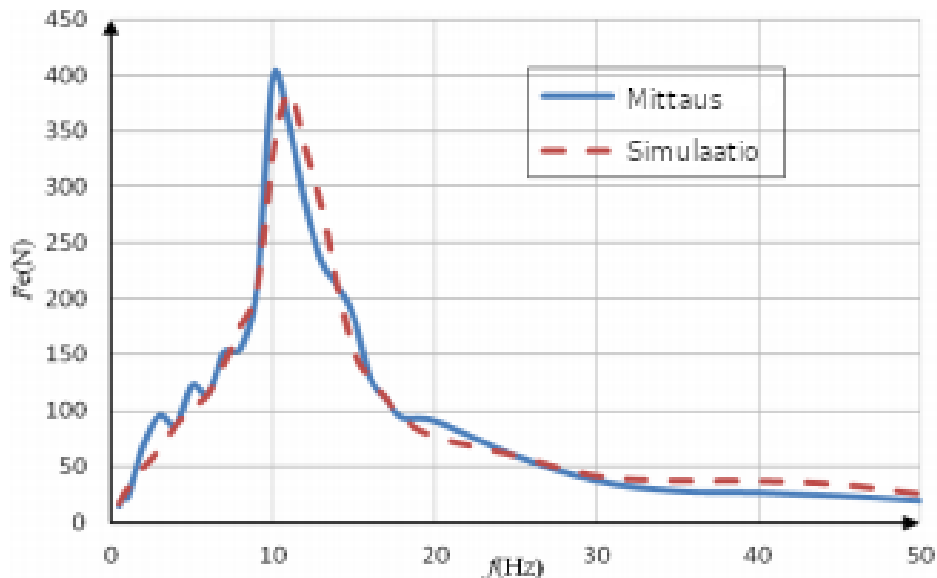
$$F_x = \frac{\pi}{\tau} (\psi_d i_q - \psi_q i_d). \quad (16)$$

Avaamalla sähkövuon lausekkeet ja olettamalla että induktanssit ovat samat molemmilla akseleilla saadaan tulokseksi

$$F_x = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\pi}{\tau} \Psi_{pm} i_q. \quad (17)$$

Siinä  $\Psi_{pm}$  on kestopagneettien staattoriin synnyttämä vuo. [17]

LSM:n työntövoiman lausekkeessa (17) kaikki muut parametrit paitsi  $i_q$  riippuvat koneen rakenteesta. Niihin ei pysty vaikuttamaan koneen valmistuksen jälkeen. Työntövoima riippuu siis sähkövirrasta. Sähkövirtaan voidaan vaikuttaa taajuudella ja syöttöjännitteellä. [18] Kuvassa 5 on esitetty taajuuden vaikutus työntövoimaan moottorikäytössä. Kuvassa on sekä simulaatio että oikea mittaus.



**Kuva 5.** Työntövoima taajuuden funktiona. Muokattu lähteestä [18]

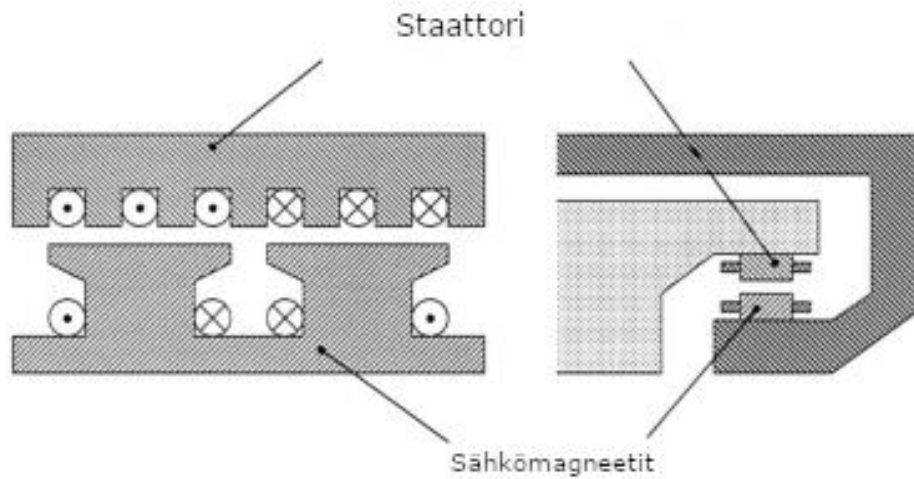
Kun taajuus pienenee, koneen nopeus pienenee ja koneen virta kasvaa. Koska virta kasvaa, samoin kasvaa koneen työntövoima. Tarpeeksi suurilla virroilla magneettikenttä saturoituu. Tämä rajoittaa koneen voimia. Kuvassa 5 saturoiminen näkyy noin 10 kHz kohdalla.

### 3.4 Magneettinen levitaatio

Monissa tapauksissa lineaarikoneita käytetään magneettisen levitaation yhteydessä, joten sitä on aiheellista käsitellä tässä. Magneettisessa levitaatiossa liikutettava kohde ei ole maakosketuksessa, eli se leijuu ilmassa. Siitä on hyötyä monissa käyttökohteissa, koska silloin ei synny ollenkaan kitkaa. Lineaarikoneiden normaalivoimalla voidaan toteuttaa magneettinen levitaatio, mutta usein ja varsinkin suurempi massaisissa systeemeissä tarvitaan erillinen järjestelmä. Erillinen järjestelmä voidaan toteuttaa kestopagneeteilla, suprajohtavilla magneeteilla tai sähkömagneeteilla. Yleisimmin käytössä on tavallisia sähkömagneetteja käyttäviä systeemejä. [41] Levitaatio voi olla joko hylkivä tai puoleensa vetävä. Hylkivässä rakenteessa magneetit hylkivät toisiaan. Puoleensa vetävässä magneetit vetävät toisiaan puoleensa. Puoleensa vetävässä rakenteessa mag-



neetit nostavat liikutettavaa kohdetta. [7] Kuvassa 6 on esitetty puoleensa vetävien sähkömagneettien systeemi. Tällä rakenteella magneettinen levitaatio voidaan toteuttaa siten, että sähkömagneetit nostavat liikutettavaa kohdetta.



**Kuva 6.** Puoleensa vetävä magneettisen levitaatiosysteemin rakenne. Muokattu lähteestä [42]

Magneettisen levitaation voimat riippuvat magneettien geometrisesta muodosta. Tarkastellaan U-muotoisia magneetteja käyttävää systeemiä. Se on yksi yleisempiä käytössä olevia rakenteita. Tällaisessa systeemissä syntyvä voima saadaan kaavalla

$$F = \frac{B^2}{2\mu_0} 2pl. \quad (18)$$

Siinä  $B$  on magneettivuontiheys,  $\mu_0$  on tyhjiön permeabiliteetti,  $p$  on U-muotoisen magneetin kärkien leveys ja  $l$  on magneetin pituus. Kaavassa (18) oleva magneettivuontiheys voidaan laskea kaavalla

$$B = \frac{AT}{plR_m}. \quad (19)$$

Siinä  $AT$  on magnetomotorinen voima, tai niin sanottuja ampeerikierroksia, ja  $R_m$  on magneettipiirien ja ilmvälän reluktanssien summa. Sitä voidaan vielä avata, jolloin saadaan

$$B = \frac{kwhJ}{navan\ ala * magneettinen\ reluktanssi}. \quad (20)$$

Absoluuttisia arvoja kaavaan (20) on kuitenkin hankala saada, koska hajavuota on todella vaikea käsitellä. [41, s. 91–98] Kaavassa (18) ainoa muuttuvissa oleva parametri on magneettivuon tiheys. Magneettivuon tiheyden kaavassa (20) ainoa muuttuva parametri on taas virrantiheys. Tarvittavaa voimaa voidaan siis muuttaa muuttamalla sähkömagneeteille tulevaa virtaa.

## 4. LINEAARIKONEIDEN NYKYISET KÄYTTÖKOHTEET

Lineaarikoneet antavat tehokkaan vaihtoehdon pyöriville sähkökoneille, jotka tekevät lineaarista liikettä erilaisten voimansiirtosysteemien kautta. Lineaarikoneilla päästään eroon erilaisista voimansiirroista. Tämä nostaa koneen elinikää, koska siinä on vähemmän kuluvia osia. Lineaarikoneilla ei päästä samoihin hyötysuhteisiin kuin pyörivillä koneilla, mutta voimansiirron puute tasoittaa tätä eroa. Lineaarikoneet ovat luotettavia ja niillä voidaan päästä pienempiin kustannuksiin. [19]

Lineaarikoneille on sekä pitkän matkan sovelluskohteita että lyhyen matkan sovelluskohteita. Lyhyen matkan sovelluksissa vaaditaan yleensä suurta tarkkuutta ja kompaktia kokoa. Sovelluskohteita lyhyelle matkalle on esimerkiksi kameroiden zoomauksessa, mikrofoneissa ja kaiuttimissa. [19] Pitkän matkan sovelluksissa lineaarikoneiden etuna on esimerkiksi pienempi kitka. Pitkällä matkalla lineaarikoneita voidaan käyttää erityisesti erilaisissa kulkuneuvoissa.

### 4.1 Lineaarikoneet lyhyen matkan sovelluksissa

Varsinkin teollisessa käytössä lineaarinen liike tehdään pyörivillä sähkökoneilla johdinruuvien avulla. Johdinruuvisysteemin voi korvata esimerkiksi putkimaisella LSM:llä. LSM:llä päästään suurempiin nopeuksiin kuin pyörivällä sähkökoneella. Pyörivällä sähkökoneella taas saadaan suurempi työntövoima massan suhteen. LSM:ssä on vain kaksi kuluva osaa, kun taas johdinruuvisyteemissä niitä on useampia. LSM on myös hiljaisempi. Pyörivä sähkökone johdinruuvisyteemillä on vielä halvempi kuin LSM, koska kysyntä LSM:lle on vielä pientä. [20]

Lineaarikoneilla voidaan toteuttaa hyvin tarkkaa asemointia. 2- ja 3-ulotteista asemointia käytetään esimerkiksi 3d-tulostimissa ja laserleikkauksissa. Joissakin kohteissa käytetään myös 1-ulotteisia ratkaisuita. Lineaarikoneilla saadaan paljon yksinkertaisempi rakenne asemointisyteemille kuin vastaavalla pyörivillä sähkökoneilla ja johdinruuveilla [20]. Asemointiin sopii hyvin putkimainen kestopagneeteilla varustettu LSM. Se on rakenteeltaan yksinkertainen ja sopiva tällaiseen kokonaisuuteen. Tällaisen moottorin tarkkuus voi olla noin 100 nm. [21]

Esimerkki lineaarikoneista lyhyen matkan sovelluksessa on kompressor. Kompresso-reja käytetään kylmäkoneissa ja lämpövoimakoneissa. Kompressorien toiminta perustuu

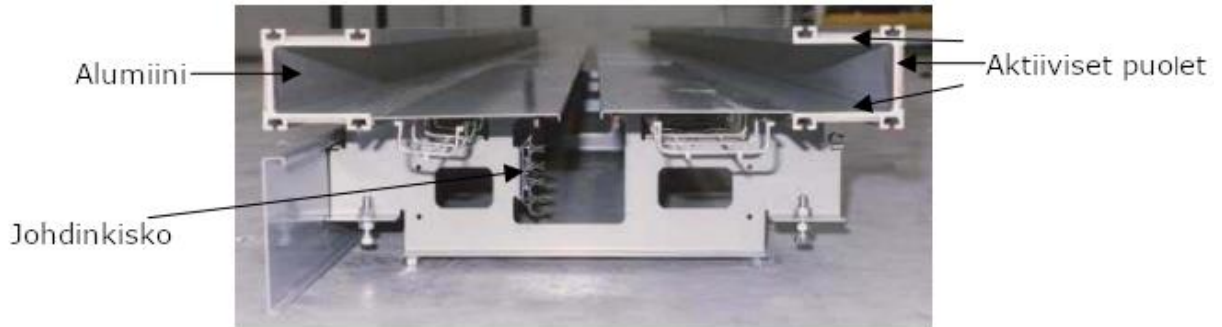
väliaineen puristukseen ja laajenemiseen, jolloin työtä tekemällä saadaan siirrettyä lämpöä. Tavallisesti kompressorit käyttävät pyöriviä sähkökoneita ja voimansiirtosysteemejä tuottamaan edestakaista lineaarista liikettä. Nämä voidaan korvata suoraan LOM:llä, jolloin ei tarvita mitään voimansiirtoa. [38] Edestakaisessa liikkeessä mäntä puristaa ja laajentaa väliainetta. Mekaanisten häviöiden vähenemisen ja luotettavuuden lisäksi LOM:ssä suurena etuna on säädettävyys. Pyörivillä koneilla säätö tapahtuu sammuttamalla kone kokonaan. LOM systeemi voi olla koko ajan päällä. Värähdyksiä säätämällä voidaan vaikuttaa koneen siirtämään lämpöön. Tällä päästään parempaan systeemin hyötysuhteeseen. [39]

## **4.2 Lineaarikoneet pitkän matkan sovelluksissa**

Lineaarikoneilla voidaan toteuttaa tehokasta kuljetusta pitkillä matkoilla. Lineaarikoneille on pitkillä matkoilla sekä pienemmän että suuremman kokoluokan systeemejä. Pieniä systeemejä esimerkiksi lentokentille matkatavaroiden kuljetukseen ja suuria esimerkiksi junissa. Erilaisissa ratkaisussa voidaan käyttää magneettista levitaatiota, jolla päästään eroon maakosketuksesta. Ilman maakosketusta tulee vähemmän häviöitä, koska päästään eroon kitkasta.

### **4.2.1 Lineaarikoneilla toteutettu matkatavaroiden kuljetus**

Esimerkkinä pitkän matkan pienemmän tehon systeemistä on lentokenttien matkatavaroiden kuljetus. Lentokenttien käyttäjämäärät lisääntyvät ja matkatavaroiden siirtämiset paikasta toiseen on toteutettava tehokkaasti. Matkatavaroiden siirrossa on yleensä käytetty liukuhihnoja. Lineaarikoneet antavat tähän toisen ratkaisun. Eräs matkatavaroiden kuljetukseen valmistettu lineaarikoneilla toimiva systeemi on FABRICOMin kehittämä "TELEBAG". Siinä käytetään tasomaisia LIM moottoreita, joilla on lyhyen primäärin rakenne. Tavaroiden kulkema rata toimii toisiopiirinä. Radalla kulkee kärryjä, joissa jokaisessa on kyydissä oma LIM moottorin ensiöpuoli. Ensiöpuolet saavat sähkövirtansa radasta harjojen avulla. [22] TELEBAG systeemin rata on esitetty kuvassa 7.



**Kuva 7.** TELEBAG systeemin rata. Muokattu lähteestä [22]

Systeemissä koneen toisiopiiri on U-muotoinen. Tällä saadaan kolme aktiivista puolta yhden sijaan. Kuvassa nähdään myös johdinkisko, josta saadaan harjojen avulla virta systeemin kääryihin. Tässä systeemissä päästään magneettisen levitaation avulla eroon maakontaktista. Lisäksi lineaarimoottorit mahdollistavat kääryjen pysäyttämisen tarkkaan paikkaan. Lineaarikoneiden säädettävyyden avulla systeemistä saadaan tehtyä täysin automaattinen. Automaattisessa systeemissä kääryjen välimatka täydessä vauhdissa on 5 m ja kääryjen nopeus on noin 5–6 m/s. Kaikki systeemin tärkeimmät osat ovat kääryjen kyydissä. Viallisen tai huollettavan kääryn voi poistaa systeemistä huollon ajaksi ilman, että muuta systeemiä tarvitsee sammuttaa. [22]

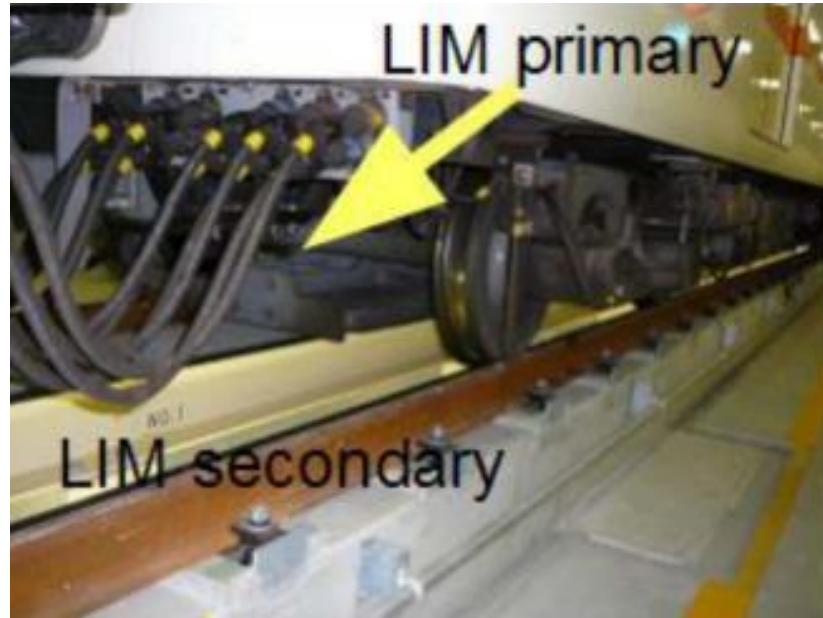
#### 4.2.2 Lineaarikoneet kulkuneuvojen voimanlähteenä

Lineaarikoneita käytetään metroissa ja junissa tehokkuuden ja käytännöllisemmän rakenteen saavuttamiseksi. Lyhyen primäärin LIM käytetään etenkin pienempien nopeuksien julkisessa liikenteessä ja LSM käytetään etenkin suurnopeusjunissa. Suurnopeusjunien LSM on joko pitkän tai lyhyen ankkurin malli. [23] Lineaarimoottoreita käyttävä julkinen liikenne keskittyy Aasian alueelle.

Junat ja metrot, jotka toimivat lineaarikoneilla voivat kulkea tavallisilla raiteilla tai omalla raiderakenteella. Tavallisilla raiteilla tarvitaan kolmas raide perinteisten raiteiden väliin. Se toimii lineaarikoneen toisena piirinä. Jos käytetään magneettista levitaatiota, tarvitaan oma raiderakenne. Japanissa toimivat lineaarimetrot kulkevat tavallisilla raiteilla [24]. Kiinassa Shanghaissa toimiva suurnopeusjuna kulkee yksiraiteisella rakenteella. Siinä käytetään magneettista levitaatiota. Myös Japanissa on testirata, jossa käytetään magneettista levitaatiota. Sillä voidaan päästä yli 500 km/h nopeuksiin. [23]

Yksi Japanin lineaarimetroista on Tokiossa linja numero 12. Linjan pituus on noin 41 km [25]. Metrot kulkevat tavallisilla raiteilla, joiden välissä on LIM moottorin toisiopiiri [24].

Lineaarimetron etuna on, että pystytään tekemään jyrkempiä nousuja. Tavallisilla metroilla voidaan tehdä noin 3.5 % gradientteja, kun taas lineaarikoneilla voidaan tehdä jopa 8 %. Lineaarimetrot ovat myös hiljaisempia kuin tavanomaiset metrot. Lineaarikoneilla metroista voidaan rakentaa matalampia. Näin sisätiloista saadaan mukavimmat ja tunneleista voidaan tehdä poikkipinta-alaltaan pienempiä. [25] Erään lineaarimetron rakenne on esitetty kuvassa 8.



*Kuva 8. Lineaarimetron rakenne [24]*

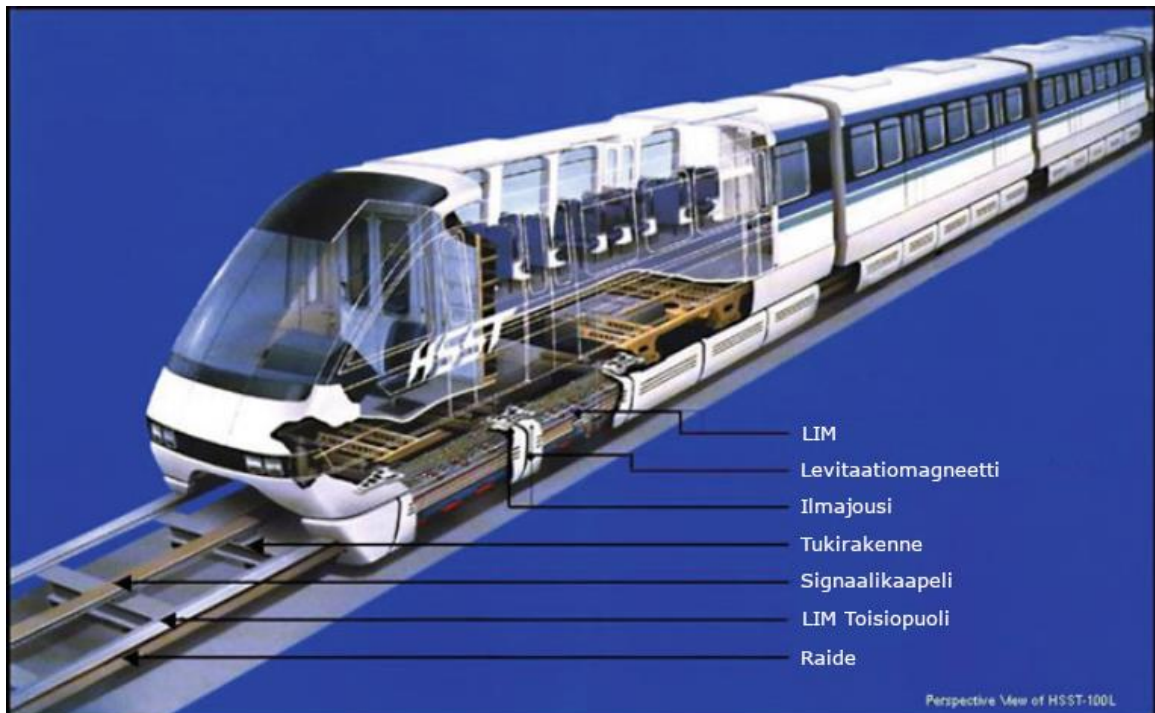
Kuvassa 8 näkyy perinteisten raiteiden välissä LIM moottorin toisiopiiri. LIM moottorin ensiöpiirit ovat mukana vaunuissa vaunujen alla. Lineaarimoottorin ensiöpuoli on litteä, joka mahdollistaa matalan rakenteen metrolle.

### 4.2.3 Magneettiseen levitaatioon perustuvat kulkuneuvot

Junissa voidaan käyttää magneettista levitaatiota. Tällä hetkellä maailmassa on vasta muutama sellaisella toimiva linja. Sillä on kuitenkin useita etuja. Ne ovat tehokkaampia, hiljaisempia, turvallisempia ja mukavampia matkustaa. Magneettisella levitaatiolla toimivilla systeemeillä ei ole niitä haittoja, jotka estävät tavallisia junia pääsemään suuriin nopeuksiin. Nämä syntyvät maakontaktista. [43] Tällä hetkellä toiminnassa olevia magneettiseen levitaatioon perustuvat junia on Kiinassa, Japanissa ja Etelä-Koreassa. Japanilainen juna on nimeltään Linimo ja Etelä-Koreassa oleva juna on ECOBEE. [23] Kiinassa on toiminnassa kolme eri linjaa. Ne sijaitsevat Shanghaissa, Pekingissä ja Changshassa.

Saksalaisten ja kiinalaisten yhteistyössä toteuttama Transrapid-juna kuljettaa matkustajia Shanghaissa Pudongin lentokentältä kaupunkiin. Matka on noin 30 km. Tämä matka kestää noin 8 minuuttia ja junan maksimi nopeus on 430 km/h. Reitti saatiin valmiiksi vuonna 2003. Levitaatioon käytetään sähkömagneetteja, jotka ovat junan kyydissä. Moottorin tyyppinä on LSM. Siinä on pitkä ankkuri, joka on sijoitettu junan kulkemalle radalle. [41][43] Transrapid-juna piti olla vain esittely rata, mutta siitä on tullut tärkeä osa Shanghaiin julkista liikennettä. Se on pysynyt käytössä jatkuvasti jopa vaikeissakin sääolosuhteissa. [41, s. 172]

Japanilaisia Linimo-junia on käytetty Nagoyassa vuodesta 2005. Linimo ei ole suurnopeusjuna vaan sen huippunopeus on 100 km/h. [23] Nagoyan Linimoilla on saavutettu suuremmat voitot kuin niiden käyttökustannukset. Myös Linimossa käytetään sähkömagneetteja levitointiin, mutta moottorina toimii LIM. Levitointiin käytetyt sähkömagneetit ovat tavallisia U-muotoisia magneetteja. LIM:n ensiöpuoli on junan kyydissä ja toisiopiiri radassa. Jokaisessa junan vaunussa on 10 LIM moottoria tuottamassa tarvittavaa voimaa. [41, s. 175–184] Kuvassa 9 Linimoa kuvataan Linimon aiemman prototyypin CHSST-100L rakenteella.



**Kuva 9.** Linimon rakenne. Muokattu lähteestä [41, s. 176]

Kuvasta 9 nähdään, että junassa on junan molemmilla sivuilla lineaarimoottorit ja levitaatioon vaadittavat magneetit. Kuvassa näkyy myös raiderakenne, johon kuuluu signaa-

likaapeli, jota pitkin tapahtuu tehonsiirto ja siitä kulkee tarvittavat signaalit. Linimon raitteet kulkevat yleensä pylväiden päällä muun liikenteen yläpuolella. Pylvään päällä on vierekkäin kaksi raidetta. [41, s. 181–182]

Korealainen magneettisella levitaatiolla toimiva juna ECOBEE aloitti toimintansa vuonna 2016 [23]. Juna kulkee Incheonin lentokentältä ja sen pituus on 6,1 km. Reittiä aiotaan jatkaa tulevaisuudessa yhteensä 57 km pituiseksi. Junan huippunopeus on 110 km/h. ECOBEE:n rakenne on lähes samanlainen kuin Linimolla, mutta sitä on vielä hieman kehitetty. Levitaatioon käytetään U-muotoisia sähkömagneetteja ja moottorina toimii LIM. Raitteet kulkevat myös pylväiden päällä, jossa niitä on kaksi vieretysten. Erona Linimoon, junassa on lisää turvavarusteita. Siinä on esimerkiksi laskeutumisen varalta liukumissuojat. [41, s. 184–210]

## 5. LINEAARIKONEET TULEVAISUUDESSA

Lineaarikoneiden monet edut vanhempiin ratkaisuihin nähden tekevät lineaarikoneista merkittävän osan tulevaisuuden systeemejä. Kun lineaarikoneiden hyötysuhteita saadaan vielä korkeammaksi ja koneiden yleinen kysyntä kasvamaan, saadaan niistä vielä edullisempia vaihtoehtoja. Lineaarikoneet ovat myös osana automaatiosteemejä. Automaatio on yhä enemmän ja enemmän mukana jokapäiväisissä asioissa. Lineaarikoneiden suuri tarkkuus nopeuksissa ja asemoinnissa takaavat kehittyneemmät automaatiosteemit [26].

### 5.1 Lineaarimoottoreilla toimiva liikenne tulevaisuudessa

Magneettiseen levitaatioon perustuvia junia ollaan jo rakentamassa lisää. Japaniin ollaan rakentamassa japanilaista L0 junaa [41]. Kiinassa on rakenteilla Fenghuang-rata, joka on 9,12 km pitkä ja junien huippunopeus on noin 100 km/h [44]. Useita muita järjestelmiä on suunniteltu, mutta ei ole vielä saatu toteutettua.

Japanissa on tehty jo pitkään testiajoja magneettisella levitaatiolla toimivilla junilla. Alkuperäistä testirataa laajennettiin 42,8 km pituiseksi vuonna 2013 ja tätä samaa rataa rakennetaan tällä hetkellä julkiseen käyttöön L0-junalle. Rata on suunniteltu kulkemaan lopuksi Osakan ja Tokion väliä Nagoyan kautta. Radan ensimmäinen vaihe tulee olemaan Tokiosta Nagoyaan ja sen on tarkoitus valmistua vuoteen 2027 mennessä. L0-junalla on saatu huippunopeudeksi 603 km/h. Kuitenkin sen huippunopeudeksi käytössä on suunniteltu 505 km/h. L0 käyttää suprajohtavia sähkömagneetteja. Moottorina toimii LSM. Suprajohtavat sähkömagneettien luomat magneettikentät ja LSM magneettikentät toimivat yhdessä. L0:ssa on myös kehitetty aerodynamiikkaa tekemällä junan keulasta 15 m pitkä. Japanilaista L0:aa on suunniteltu käytettävän myös Yhdysvalloissa. Todennäköisin reitti magneettisen levitaation junalle Yhdysvalloissa olisi New Yorkin ja Washington D.C. välillä. [41, s. 210–221]

### 5.2 Lineaarimoottoreilla toimivat laukausjärjestelmät

Elektromagneettisissa laukausjärjestelmissä voidaan käyttää erilaisia lineaarikoneita. Elektromagneettiset laukausjärjestelmät kiihdyttävät kohteen todella nopeasti tarvittavaan nopeuteen. Tällaisia järjestelmiä voidaan käyttää esimerkiksi aseissa ja lentotukialuksilla. [27] Kiihdytettävä kohde voi olla esimerkiksi ohjus tai lentotukialuksilla lentokone.



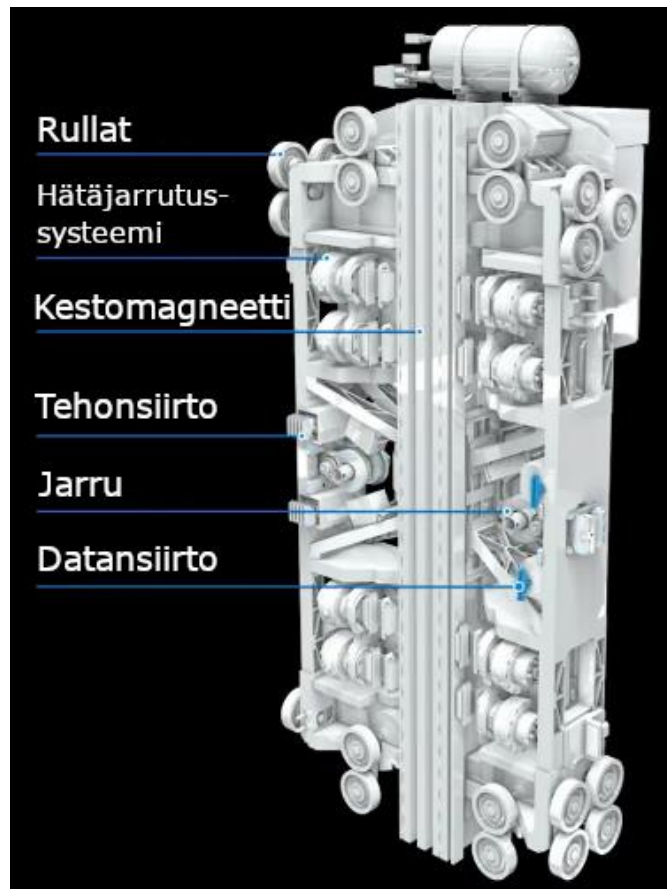
Lineaarikoneilla voidaan toteuttaa lentotukialuksilla lentokoneiden kiihdytys. Ennen tämä on toteutettu mekaanisten katapulttien avulla. Lineaarikoneiden etuna mekaaniseen katapulttiin nähden on ohjelmoitavissa oleva kiihdytysprofiili ja pienempi huollon tarve. Mekaanisella katapultilla tehdyt laukaisut aiheuttavat jännitystä lentokoneiden rungossa. Kun lineaarikoneilla toteutetussa systeemissä laukaisun tehokäyrä voidaan ohjelmoida halutun muotoiseksi, lentokoneiden runkoon kohdistuu pienempi jännitys. [28] Lineaarikoneilla toteutettu systeemi on myös suhteellisen energiatehokas ja siinä ei tarvita monia apulaitteita [29]. Tällaiset systeemit voidaan toteuttaa LIM:illä. LIM voi kiihdyttää 45000 kg lentokoneen 240 km/h vauhtiin 91 m matkalla [30]. Koko systeemi vaatii valtavan energiavaraston. Varaston täytyy pystyä syöttämään energiaa 61 MW teholla kahden sekunnin ajan ja vastaanottamaan energiaa 7.5 MW teholla yli 50 sekuntia, jotta vaadittu minimi latausaika täyttyy. [28]

Lineaarikoneita voitaisiin käyttää myös avaruusrakettien laukaisuissa. Vielä tänä päivänä rakettien laukaisu on hyvin kallista. Lineaarikoneilla saattaisi päästä halvempiin laukaisuihin. Kuitenkin maasta laukaisu olisi liian raskasta maan suuren vetovoiman vuoksi. On ehdotettu, että kuuta pidemmälle tehtävät matkat laukaistaisiin kuun kautta. Kuussa voitaisiin toteuttaa lineaarikoneisiin ja magneettiseen levitaatioon perustuva elektromagneettinen laukaisujärjestelmä, koska painovoima kuussa on paljon pienempi. Tässä voitaisiin säästää kuluissa, koska kuluu vähemmän polttoainetta, laukaisut voidaan toteuttaa pienemmällä massalla ja järjestelmää voidaan käyttää useamman kerran. [31] Tällä systeemillä voidaan myös toteuttaa paluulentoja kuusta. Eräs vaihtoehto laukausjärjestelmän moottoreiksi on kaksipuoliset LIM:t. LIM etuna on pienempi massa ja siinä ei tarvita magneetteja. Eräs systeemi, joka käyttää kaksipuolisia LIM:iä, on Yhdysvaltojen laivastolle suunniteltu MARK-III. Se koostuu useasta moduulista. Jokainen moduuli tuottaa 20000 N työntövoiman ja niitä on systeemissä noin 120–162 kappaletta. Sen voidaan ajatella pystymään 200 g kiihdytykseen. [31] Pakovoima kuussa on noin 2,38 km/s [32]. Jos Mark-III systeemiä käytettäisiin kuussa, sen pituus tulisi olla noin 1,45 km, jotta sillä voidaan toteuttaa onnistunut laukaisu.

### 5.3 Lineaarimoottorit hisseissä

Perinteiset hissit käyttävät vaijereita ja moottoreina toimivat erilaiset pyörivät sähkökoneet. Koska hissit kulkevat lineaarisesti, voisi niissä olla järkevää käyttää lineaarikoneita. Thyssenkruppin kehittämässä MULTI hissisysteemissä hyödynnetään lineaarimoottoreita. Se käyttää kestopagneeteilla toimivia LSM:iä. Kestomagneetit ovat hissien kyydissä ja käämitykset hissien kulkemassa radassa. Tehonsiirto ja signaalien kulku tapahtuu

radan kautta. Hissien ja hissikulun välissä on rullat, jotka pitävät hissien radallaan. Hississä on kyhdissä turvallisuuden vuoksi jarrusysteemi. [45] MULTI systeemin ”kelkka”, eli hissikoppeja kuljettava osa on esitetty kuvassa 10.



*Kuva 10. MULTI systeemin kelkka. Muokattu lähteestä [45]*

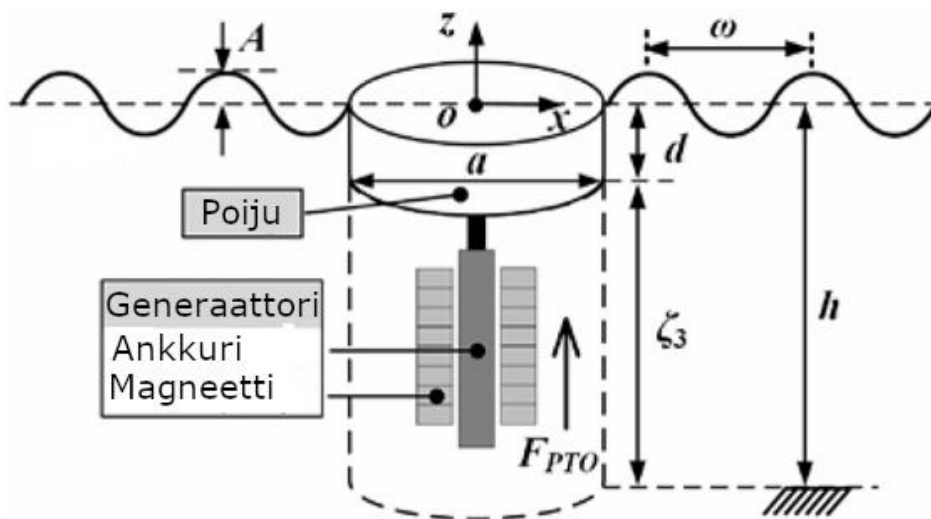
Tämän systeemin etuna on se, että jokaista hissiä voidaan ohjata itsenäisesti. Hissikuiluissa voisi siis kulkea useampia hissejä samaan aikaan. Systeemi vie vähemmän tilaa kuin perinteiset hissit. Hissit voivat liikkua myös sivuttaissuunnassa, joka mahdollistaa aivan uudenlaisien järjestelmien rakentamisen. Tällä hetkellä Thyssenkruppin MULTI systeemiä käytetään Saksassa Rottweilissä sijaitsevassa testitornissa. [45]

## 5.4 Lineaarigeneraattorit

Valtaosa lineaarikoneista on moottorikäytössä. Suurimmassa osassa energiantuotantoa generaattoreille saatava liike on luonnollisesti pyörivää. Höyryvoimalaitoksissa turbiinit ja esimerkiksi tuulivoimalat tuottavat pyörivää liikettä. Lineaarigeneraattoreiden vaatimaa lineaarista liikettä voidaan hyödyntää esimerkiksi aaltovoimassa, mutta se on vielä hankalaa.

Lineaarigeneraattoreita käytetään jo yhdessä hyvin yksinkertaisessa tapauksessa. Ravistettavissa taskulampuissa on yksinkertainen lineaarigeneraattorin malli. Niissä on kestopagneetti, joka liikkuu käämityksen sisällä, kun taskulamppua ravistetaan. Kestomagneetti luo liikkeessaan muuttuvan magneettikentän, jolloin käämiin indusoituu jännite. Jännite tasasuunnataan ja tuotettu energia varastoidaan kondensaattoriin tai ladattavaan paristoon, joka edelleen syöttää virran lampulle. [33] Varastoitunut energia riittää käyttöön lyhyeksi ajaksi.

Aaltovoimaa voidaan hyödyntää usealla tavalla ja yksi näistä tavoista on lineaarigeneraattori. Aalloissa on valtava määrä energiaa, jota voidaan hyödyntää. Aaltojen energiatiheys suurempi kuin esimerkiksi tuuli- ja aurinkovoimassa. Aaltoenergiaa on myös käytettävissä suhteellisesti pidemmän ajan vuorokaudessa kuin tuuli- tai aurinkovoimassa. Suuri osa asutuksesta ja siten energiankulutuksesta on merien äärellä, joten aaltoenergiaa on hyvin käytettävissä. Kehityksessä on kuitenkin ongelmia. Aalloista saatu jännite on hyvin matalataajuisista ja satunnaisen muotoista ja varsinkin offshore voimaloissa systeemit joutuvat rankkoihin olosuhteisiin. [34] Jos laitteistossa käytetään kestopagneetteja, hyvin suolapitoinen merivesi voi vaurioittaa niitä vaikuttaen niiden magneettisiin ominaisuuksiin [35]. Aaltoenergian lineaarisen liikkeen keräämiseen on useita eri tapoja. Yksi näistä on poijun käyttö. Poiju kelluu meren pinnalla ja liikkuu ylös ja alas aaltojen liikkeen mukana. Kuvassa 11 on esitetty lineaarigeneraattorilla toimivan aaltovoimalan periaate.



**Kuva 11.** Lineaarigeneraattori aaltovoimassa. Muokattu lähteestä [36].

Kuvan 11 systeemissä käytössä on kestopagneeteilla toimiva LSM. Generaattori voi olla putkimainen tai tasomainen. Putkimaisen rakenteen koneet ovat tehokkaampia, mutta tasomaisia rakenteita on helpompi valmistaa. [37] Generaattorin ankkuri liikkuu poijun

mukana aaltojen voimasta. Generaattorin liikutettava osa voisi olla myös magneetti, jolloin ankkuri pysyisi paikallaan. Kuvaan on myös merkitty voimalan toiminnalle merkittäviä suureita. Aaltoihin liittyvistä suureista  $A$  on aallon amplitudi ja  $\omega$  on aaltoliikkeen kulmanopeus. Erityisesti tällaisen systeemin ongelmana on syntyvän jännitteen muoto. Jännite ja virta tulevat suoraan kulkevan aallon parametreista. Myös aaltojen voima vaihtelee suuresti. Systeemin täytyy kestää kaikista voimakkaimmatkin aallot. Systeemi voi joutua ehkä vaikeisiin olosuhteisiin, jolloin koneen rakennetta täytyy vahvistaa. Se taas nostaa koneen massaa suhteessa tuotettuun tehoon. [35]

## 6. YHTEENVETO

Pyörivien sähkökoneiden korvaaminen lineaarikoneilla lineaarisen liikkeen sovelluksissa on järkevää. Työn yhtenä tavoitteena oli tarkastella lineaarikoneiden etuja. Eduiksi saatiin eroon pääseminen kuluista osista voimansiirrosta, jossa syntyy myös tehohäviöitä. Lineaarikoneita ei tarvitse huoltaa niin paljon kuin vastaavia pyörivillä koneilla toimivia systeemejä ja niillä voidaan toteuttaa tarkempaa säätöä. Lineaarikoneiden hyötysuhde on yleisesti pienempi kuin pyörivillä sähkökoneilla. Tämä johtuu lineaarikoneiden rakenteesta, joka aiheuttaa epätasaisuuksia magneettikenttiin. Huonompi hyötysuhde kuitenkin kompensoituu koko systeemin rakenteessa, jolloin koko systeemin hyötysuhde tulee yleensä paremmaksi.

Lineaarikoneita voidaan käyttää monissa sovelluskohteissa riippuen siitä, mitä etua niiltä halutaan. Lyhyen matkan sovelluksissa eduiksi nähdään tarkka säätö ja moniin paikkoihin soveltuva rakenne. Esimerkiksi kameran zoomissa halutaan mahdollisimman pieni rakenne, mutta sen täytyy olla silti hyvin tarkka. Pidemmän matkan sovelluksissa lineaarikoneiden kompakti koko on myös etuna. Tärkeimpänä etuna pitkällä matkalla voidaan kuitenkin pitää magneettista levitaatiota. Tämä voidaan toteuttaa lineaarikoneissa syntyvän normaalivoiman tai erillisten magneettien avulla. Siinä päästään eroon maakosketuksesta, eli monessa tapauksessa kitkasta. Pidemmällä matkalla lineaarikoneita käytetään yleensä erilaisissa kuljetusvälineissä.

Nykypäivän ja tulevaisuuden kasvavaan energiankulutukseen halutaan vaikuttaa monella tavalla, joista eräs on energiatehokkaampien systeemien valmistaminen. Lineaarikoneilla voidaan toteuttaa yhä useammassa tapauksissa perinteisiä menetelmiä energiatehokkaampia ratkaisuja. Lineaarikoneita käytetään jo tänä päivänä paljon, mutta tulevaisuudessa vielä useammassa kohteissa. Niiden hyötysuhteiden paraneminen on mahdollistanut niiden käytön uusissa systeemeissä. Yhä useammassa systeemissä hyödynnetään myös automaatiota, jossa lineaarikoneiden tarkka säädettävyys tulee tarpeeseen.

# LÄHTEET

- [1] P. Anderson, K. Jenkins, A. Moses, H. Stanbury, *Electrical Steels, Volume 2 – Performance and Applications*, Institution of Engineering and Technology, 2019
- [2] N. Ida, *Sensors, Actuators, and Their Interfaces – A Multidisciplinary Introduction (2nd edition)*, Institution of Engineering and Technology, 2020
- [3] I. Boldea, S.A. Nasar, *Linear Motion Electromagnetic Devices*, Taylor & Francis, New York, 2001
- [4] R. Le Doeuff, M.E.H. Zaïm, *Rotating Electric Machines*, Wiley, 2010
- [5] A. Gastli, Improved Field Oriented Control of an LIM Having Joints in its Secondary Conductors, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 17, No. 2, pp. 349-355, 2002
- [6] J. F. Gieras, Z. J. Piech, B. Tomczuk, *Linear Synchronous Motors*, 2nd Edition, CRC Press, 2018
- [7] I. Boldea, *Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs Handbook*, CRC Press, 2017
- [8] J.M.D. Coey, *Magnetism and Magnetic Materials*, Cambridge University Press, 2009
- [9] T. K. Basak, *Electrical Engineering materials*, New academic science, 2012
- [10] A. Chambers, S. D. Kerr, *Power Industry Dictionary*, PennWell, 1996
- [11] E. R. Laithwaite, The goodness of a machine, *Electronics and Power*, 1965
- [12] J. F. Gieras, G. E. Dawson, A. R. Eastham, A New Longitudinal End Effect Factor for Linear Induction Motors, *IEEE Power Engineering Review*, Vol. PER-7, No. 3, pp. 43-44, 1987
- [13] G. Lv, Q. Li, Z. Liu, Y. Fan, G. Li, The analytical calculation of the thrust and normal force and force analyses for linear induction motor, 2008 9th International Conference on Signal Processing, 2008
- [14] J. Duncan, Linear induction motor-equivalent circuit model, *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 130, no. 1, 1983.
- [15] A. Shiri, A. Shoulaie, Design Optimization and Analysis of Single-Sided Linear Induction Motor, Considering All Phenomena, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 27, No. 2, pp. 516-525, 2012
- [16] L. Shi, H. Zhang, K. Wang, Analysis of Forces in Combined Levitation-and-Propulsion SLIM system, 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008
- [17] Z. Deng, I. Boldea, Forces and Parameters of Permanent Magnet Linear Synchronous Machines, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 23, 1987

- [18] Y. Chen, J. X. Jin, H. B. Zhao, Simulation and Analysis the Thrust Force of a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor, 2011 International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, 2011
- [19] I. Boldea, L. N. Tutelea, W. Xu, M. Pucci, Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs: An Overview, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 65, No. 9, pp. 7504-7515, 2018
- [20] J. F. Gieras, Linear Electric Motors in Machining Process, Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems Vol. 2, No. 4, pp. 380-389, 2013
- [21] C. Xu, X. Yu, L. Cheng, Small-Sized Large Travel Nano-Positioning System Based on Tubular Permanent Magnet Synchronous Linear Motor, 2009 9<sup>th</sup> International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2009
- [22] G. Coquery, J. Sebillaud, Airport baggage handling system using U asynchronous linear motors, Dynabag, 2004. Saatavissa (viitattu 20.3.2021): <https://www.dynabag.com/telebag/publication.7.pdf>
- [23] T. Koseki, Applications of Linear Machinery in Public Transport, 2017 11th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, 2017
- [24] T. Koseki, S. Watanabe, T. Miura, T. Mizuma, E. Isobe, Technical Challenges to Realize Energy-Efficient Linear Metros in Japan, 2017 11th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, 2017
- [25] E. Isobe, J. Cho, I. Morihisa, T. Sekizawa, R. Tanaka, Linear Metro Transport Systems for the 21st Century, Hitachi, 1999. Saatavissa (viitattu 21.3.2021): [https://www.hitachi.com/rev/1999/revjun99/r3\\_109.pdf](https://www.hitachi.com/rev/1999/revjun99/r3_109.pdf)
- [26] Y. J. Lee, H. C. Cho, K. S. Lee, J. W. Lee, K. W. Koo, Positioning Control of Linear Motor-Based Container System with Varying Weight, 2008 Second International Conference on Future Generation Communication and Networking Symposia, Vol. 4, 2008
- [27] H. D. Fair, Electromagnetic Launch Science and Technology in the United States Enters a New Era, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 41, No. 1, pp. 158-164, 2005
- [28] T. Bertoncelli, A. Monti, D. Patterson, R. Dougal, Design and Simulation of an Electromagnetic Aircraft Launch System, 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Vol. 3, 2002
- [29] R. Cao, Y. Jin, M. Lu, Z. Zhang, Quantitative Comparison of Linear Flux-Switching Permanent Magnet Motor with Linear Induction Motor for Electromagnetic Launch System, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 65, No. 9, pp. 7569-7578, 2018
- [30] N. Chand, Electromagnetic Aircraft Launch System, Athena Information Solutions PVT. Ltd., 2013
- [31] M. R. Wright, S. B. Kuznetsov, K. J. Kloesel, A Lunar Electromagnetic Launch System for In Situ Resource Utilization, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 39, No. 1, pp. 521-528, 2011

- [32] Maol-taulukot, Otavan kirjapaino Oy, 2013
- [33] J. F. Gieras, A. Kucharski, J. Piechowski, Performance Characteristics of a Shake Flashlight, 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2017
- [34] I. Lopez, J. Andreu, S. Ceballos, I. M. de Alegria, I. Kortabarria, Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment, Renewable & sustainable energy reviews, pp. 413-434, 2013
- [35] F. Herrera, J. Pereda, P. Bravo, F. Rojas, Wave Energy Conversion: Overview and Control of a Permanent Magnet Linear Generator, 2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, 2019
- [36] S. W. Seo, K. H. Shin, M. M. Koo, K. Hong, I. J. Yoon, J. Y. Choi, Experimentally Verifying the Generation Characteristics of a Double-Sided Linear Permanent Magnet Synchronous Generator for Ocean Wave Energy Conversion, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 30, No. 4, 2020
- [37] N. Xin, Modeling and design analysis of a permanent magnet linear synchronous generator, Technical Report UIUC-ESDL-2013-012013, University of Illinois, 2013. Saatavissa (viitattu 5.4.2021): <http://systemdesign.illinois.edu/publications/Niu13a.pdf>
- [38] Z. S. Al-Otaibi, A. G. Jack, On the Design of Oscillating Linear Single Phase Permanent Magnet Motors, Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference, 2006
- [39] X. Chen, H. Jiang, Z. Li, K. Liang, Modelling and Measurement of a Moving Magnet Linear Motor for Linear Compressor, Energies (Basel), Vol. 13 (15), p.403, 2020
- [40] A. Basak, A dc linear motor with sectional armature winding, IEE Colloquium on Stepper Motors and Their Control, 1994
- [41] H. S. Han, D. S. Kim, Magnetic Levitation Maglev Technology and Applications, Springer, Vol. 13, 2016
- [42] R. Hellinger, P. Mnich, Linear Motor-Powered Transportation: History, Present Status, and Future Outlook, Proceedings of the IEEE, Vol. 97, 2009
- [43] L. Yan, The Linear Motor Powered Transportation Development and Application in China, Proceedings of the IEEE, Vol. 97, No. 11, pp. 1872-1880, 2009
- [44] Fenghuang Maglev Line Starts Construction, Hunan Government Website, 2019. Saatavissa (viitattu 10.4.2021): [http://www.enghunan.gov.cn/hneng/News/Local-news/201908/t20190808\\_5411591.html](http://www.enghunan.gov.cn/hneng/News/Local-news/201908/t20190808_5411591.html)
- [45] MULTI, Thyssenkrupp, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.4.2021): <https://multi.thyssenkrupp-elevator.com/>