

Sähköstaattinen sähkökone
Electrostatic electrical machine

Matias Tiihonen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Matias Tiihonen
Sähköstaattinen sähkökone

2021

Kandidaatintyö.

27 s.

Tarkastaja: TkT Lasse Laurila

Työssä on tarkoituksena selvittää sähköstaattisten sähkökoneiden toimintaperiaatetta, historiaa sekä yleisimpiä tämän päivän käyttökohteita ja sovelluksia. Lisäksi vertaillaan sähköstaattisten sähkökoneiden ominaisuuksia sähkömagneettisten sähkökoneiden ominaisuuksiin. Selvitystä varten tietoa aiheesta etsitään siihen liittyvien tutkimuksien raporteista, patenteista ja tekniikan alan uutisista. Työtä voidaan hyödyntää tiedonlähteenä myöhemmin esimerkiksi opetusmateriaalia tehdessä.

Sähköstaattiset sähkökoneet toimivat sähkömagneettisen induktion hyödyntämisen sijaan erimerkkisten sähkövarausten välille syntyviä sähköstaattisia työntö- ja vetovoimia hyödyntämällä. Niiden huomattavimpia hyviä puolia ovat rakenteen yksinkertaisuus, keveys sekä pienen kokoluokan sovelluksissa muihin moottorityyppeihin verrattuna suuri teho massaan nähden. Kilogrammojen kokoluokassa taas eräessä tutkimuskäyttöön rakennetussa sähköstaattisessa sähkömoottorissa on saatu aikaan 7,5 kV jännitteellä suurimmillaan 0,7 Nm suuruinen vääntömomentti. Tämä saavutettiin moottorilla, jonka massa oli noin 6,92 kg.

Työssä selvisi, ettei sähköstaattisia sähkökoneita ole tällä hetkellä juuri lainkaan sarjatuotannossa. Niitä käytetään lähinnä osana mikrosysteemejä sekä todella harvoin muihin sovelluksiin. Sähköstaattiset moottorit vaativat huomattavan suuria jännitteitä toimiakseen sähkömagneettisiin moottoreihin verrattuna ja tuottavat vähemmän vääntömomenttia. Yksi yritys on pyrkinyt tuomaan mikrosysteemeistä tuttuja moottoreita suurempaa moottoriaan markkinoille, mutta vielä siitäkään ei ole julkaistu konkreettisia lukuja, kuten vääntömomenttia.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
Electrical Engineering

Matias Tiihonen

Electrostatic electrical machine

2021

Bachelor's Thesis.

27 p.

Examiner: D. Sc. Lasse Laurila

The purpose of this thesis is to find out the operating principle, history and the most common applications and ways to use of electrostatic electrical machines today. In addition, the properties of electrostatic electrical machines are compared with the properties of electromagnetic electrical machines. For the study, information on the topic is sought in related research reports, patents and technology news. Thesis can be utilized as a source of information later, for example when making teaching materials.

Instead of utilizing electromagnetic induction, electrostatic electrical machines operate by utilizing the electrostatic repulsion and traction forces generated between different electrical charges. Their most notable advantages are the simplicity of the structure, the lightness and, in small size applications, the high power in relation to mass compared to other engine types. In the size class of kilograms, on the other hand, an electrostatic motor have been built for research use that produced a maximum torque of 0.7 Nm at a voltage of 7.5 kV. This was achieved with an engine with a mass of about 6.92 kg.

Thesis revealed that there are currently almost no electrostatic electrical machines in mass production. They are mainly used as part of microelectromechanical systems as well as in really few other applications. Electrostatic motors require remarkably high voltages to operate compared to electromagnetic motors and still produce less torque. One company has tried to bring its motor, which is larger than those motors familiar from microelectromechanical systems, to market, but concrete figures about them such as torque have not yet been published.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1. Johdanto.....	6
2. Sähköstaattisten sähkökoneiden kehityshistoriaa.....	7
2.1 Ensimmäisiä hankaussähköön perustuvia malleja.....	7
2.2 Influenssikoneiden ensimmäisiä versioita.....	8
2.3 Kehitys kohti nykypäivää.....	8
3. Sähköstaattisten moottorien ja generaattorien ominaisuuksia.....	9
3.1 Toimintaperiaate.....	9
3.2 Erilaisia rakenteita.....	12
3.3 Mallinnettavuus.....	14
3.4 Vahvuudet sähkömagneettisiin koneisiin verrattuna.....	17
3.5 Heikkoudet sähkömagneettisiin koneisiin verrattuna.....	18
4. Sähköstaattiset sähkökoneet tänä päivänä.....	20
4.1 Tämän päivän käyttökohteet ja sovellukset.....	20
4.2 Tulevaisuudennäkymät.....	21
4.3 Ympäristöystävällisyys verrattuna sähkömagneettisiin sähkökoneisiin.....	22
5. Yhteenveto.....	23
Lähteet.....	24

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

DC	tasavirta
DLP	Digital Light Processing
EMF	Electromotive force (suom. sähkömotorinen voima)
MEMS	Microelectromechanical systems (suom. mikrosysteemit)
VISE-moottori	influenssi-tahtimoottori

A	pinta-ala
C	kapasitanssi
d	paksuus
D	sähkövuon tiheys
E	sähkökenttä
h	korkeus
I	sähkövirta
Q	sähkövaraus
R	resistanssi
t	aika
S	elastanssi (engl. elastance)
V	jännite
w	leveys
x	pituus
Φ	sähkövuo
ϵ	permittiivisyys
ε	sähkömotorinen voima
θ	tasokulma
ω	kulmanopeus

Alaindeksit

0	tyhjiö
e	sähköinen
E	sähkökenttä
EMF	sähkömotorinen voima
fd	sähkökenttä d-akselilla
fq	sähkökenttä q-akselilla
md	keskinäiskapasitanssi d-akselilla
mq	keskinäiskapasitanssi q-akselilla
r	roottori
s	staattori
sd	staattori d-akselilla
sq	staattori q-akselilla
va	väliaine

1. JOHDANTO

Tänä päivänä yleisimmin käytetyt sähkökoneet, eli moottorit ja generaattorit, ovat sähkömagneettisia sähkökoneita (Ortmeyer, 2018, 12). Näiden koneiden toiminta perustuu sähkömagneettisten ilmiöiden hyödyntämiseen ja siksi niiden rakentamiseen vaaditaan ferromagneettisia aineita (Ortmeyer, 2018, 12). Olemassa on kuitenkin myös sähköstaattisia koneita, jotka eivät tarvitse magneettikenttiä lainkaan toimiakseen. Nämä koneet toimivat positiivisten sekä negatiivisten varauksien välille muodostuvien veto- ja työntövoimien avulla (Ge & Ludois, 2016). Näiden koneiden toimintaperiaate on tunnettu jopa pidempään kuin sähkömagneettisten (Uhlenhuth, 2017), mutta niitä ei ole koskaan hyödynnetty samassa mittakaavassa.

Sähköstaattisia sähkökoneita on erilaisia. Tässä työssä keskitytään muutamiin erityyppisiin pyöriviin sähköstaattisiin generaattoreihin ja moottoreihin. Näitä moottorityyppejä ovat mm. harmoninen sähköstaattinen moottori, erilaiset sähköstaattiset mikromoottorit sekä viime vuosina vielä kehitteillä ollut influenssi-tahtimoottori (engl. voltage-induction synchronous motor) eli niin sanottu VISE-moottori.

Tässä työssä pyritään selvittämään muun muassa se, että miten nämä pyörivät sähköstaattiset generaattorit ja moottorit toimivat, kuinka niiden kehitys on alun perin alkanut ja sitten edennyt tähän päivään asti, millaisia sovelluksia niillä on, millainen niiden valmistettavuus on, kuinka taloudellisia ne voisivat olla ja millaisia niiden ominaisuudet ovat muihin sähkökonetyyppeihin verrattuna. Työ on kirjallisuuskatsaus, eli se tehdään jo aiheesta olemassa olevien tietolähteiden pohjalta. Lopuksi vielä pyritään karkeasti arvioimaan, kuinka ympäristöystävällisiä sähköstaattiset sähkökoneet ovat tuottaa ja käyttää ja soveltuisivatko ne kenties joihinkin niille aivan uusiin käyttökohteisiin.

Työn tarkoituksena on kerätä tietoa sähköstaattisista sähkökoneista, sillä aiemmin sitä ei ole suomen kielellä kovinkaan monipuolisesti ollut saatavissa. Tietoa etsitään tutkimusraporteista, patenteista, tekniikan alan uutisista ja varsinkin historiatietoa myös kirjoista. Työ on myöhemmin hyödynnettävissä esimerkiksi opetuskäyttöön tehtävien materiaalien tiedonlähteenä.

2. SÄHKÖSTAATTISTEN SÄHKÖKONEIDEN KEHITYSHISTORIAA

Sähköstaattisten sähkökoneiden kehitys on alkanut melko varhaisessa vaiheessa. Jo 1700-luvun puolessa välissä Benjamin Franklin kehitti koneen, jolla sähkön avulla saatiin aikaan mekaanista pyörivää liikettä (Uhlenhuth, 2017). Moottorit tuottivat hyvin pieniä vääntömomenteja, joten niille ei juurikaan keksitty käytännön tehtäviä.

2.1 Ensimmäisiä hankaussähköön perustuvia malleja

Staattista sähköä ovat tutkineet jo muinaiset kreikkalaiset. Jo noin 640-546 ennen ajanlaskun alkua huomattiin, että kun silkillä hangataan meripihkaa, niin meripihka alkaa vetää puoleensa pieniä ja kevyitä asioita. 1600-luvun lopulla taas saksalainen German Otto van Guericke keksi laitteen, jossa oli halkaisijaltaan noin kahdeksantoista tuuman, eli noin 46 cm, pituinen rikkipallo. Tämä pallo oli kiinnitettynä koneessa puiseen akseliin ja sitä hangattiin käsin. Tämä johti siihen, että pallo varautui ja veti puoleensa pieniä ja keveitä kappaleita. Koneen avulla pystyttiin tutkimaan sähköstaattisia ilmiöitä. Vuonna 1675 konetta paranneltiin, kun Sir Isaac Newton keksi vaihtaa käytetyn rikkipallon lasipalloon. (Lemay, 2008, 61.)

1700-luvun alussa englantilainen Francis Hauksbee havaitsi, että tyhjentämällä lasipallon ilmasta ja hankaamalla sitä pyörivää hiomakiveä muistuttavalla laitteella hän sai pallon hohtamaan valoa. Tämä valo oli riittävän kirkas lukuvaloksi. Hauksbee myös keksi käyttää Guericken koneessa lasipallon sijaan lasista putkea. (Lemay, 2008, 61-62.)

Skotlantilainen Andrew Gordon rakensi 1740-luvulla koneen, joka hän nimesi sähköisesi pyörteeksi. Tämä kone koostui metallista tehdystä tähden kaltaisesta pyörästä, jonka kauimmaisimmat pisteet koskettivat pyörän pyöriessä sähköisesti varattuja johtimia. Kun varattu johdin kosketti pyörän pisteitä yksi kerrallaan, niin tapahtui sähkönpurkaus, jonka voimalla pyörä jatkoi pyörimistään, kunnes seuraava piste saavutti johtimen ja sama toistui uudestaan. Tätä konetta monet pitävät ensimmäisenä sähköstaattisena sähkömoottorina, vaikka sen aikaansaamat voimat ovat niin pieniä, että pyörä juuri ja juuri jaksaa pyöriä ilman kuormia. Pienen vääntömomenttinsa takia koneelle ei löytynyt hyödyllisiä käyttökohteita. (McInally, 2011, 115.)

Benjamin Franklin oli yksi sähköstaattisia ilmiöitä tutkinut henkilö 1700-luvulla. Hän kehitti vuonna 1748 laitteen, jota kutsui sähköpyöräksi. Tämä oli laite, jossa oli positiivisesti ja negatiivisesti varatut Leidenin pullot, eli eräänlaiset yksinkertaiset kondensaattorit, joiden välissä oli pyörivä roottori. Tämä roottori koostui keskellä olevasta puisesta navasta, johon oli liitetty useita lasisia eristeenä toimivia tankoja. Näiden tangoissa oli messinkiset päät. Kun pyörälle annettiin aluksi vauhtia, niin se pyöri Franklinin mukaan noin 12-15 RPM pyörimisnopeudella. Tätäkin konetta voidaan pitää eräänä varhaisimmista sähköstaattisista moottoreista ja se jaksoikin pyöriä noin sadan Espanjan dollarin kolikoista muodostetun kuorman kanssa, eli sen aikaansaama vääntömomentti oli luultavasti suurempi kuin A. Gordonin koneen. (Franklin & Collinson, 1751, 28-29.)

2.2 Influenssikoneiden ensimmäisiä versioita

Modernimmat sähköstaattiset sähkökoneet hyödyntävät toiminnassaan sähköstaattista induktiota, eli influenssia, ensimmäisien koneiden hyödyntämän kitkaan perustuvan tribosähköisen ilmiön sijaan. Alessandro Voltan vuonna 1775 julkistama elektrofori (engl. electrophorus) oli laite, joka koostui metallisesta levystä, dielektrisestä aineesta valmistetusta levystä ja toisesta metallisesta levystä, joka sijoitettiin dielektrisen levyn alle (Pancaldi, 2005, 73).

Elektroforia käytettäessä pidettiin kiinni ylempään metalliseen levyyn kiinnitetystä eristävästä materiaalista tehdystä kahvasta ja toisella kädellä hangattiin dielektristä levyä. Tämän jälkeen metallilevy laskettiin dielektrisen levyn päälle. Kun kosketaan ylempään ja alimpaan metallilevyyn eri sormilla, niin sähkövarauksesta syntyy kipinä. Volta ei ollut kuitenkaan keksinyt koneen toimintaperiaatetta, vaan Johan Carl Wilcke ja Franz Ulrich Theodosius Aepinus olivat jo muutamia vuosia ennen Voltaa keksineet vastaavanlaiset laitteet (Pancaldi, 2005, 73-75.)

2.3 Kehitys kohti nykypäivää

Hans C. Oersted huomasi vuonna 1820, että sähkövirralla on vaikutusta kompassin toimintaan. Tämä johti päätelmään siitä, että sähkö- ja magneettikenttä liittyvät toisiinsa. Brittiläinen Michael Faraday kehitti sähkömagneettisen koneen jo vuonna 1821. Koneessa oli elohopeassa kelluva magneetti, joka pääsi pyörimään. Magneetti pyöri paikoilleen kiinnitetyn johtimen ympäri. Tämä johdin taas oli kiinnitetty toiseen johtimeen, joka pääsi pyörimään paikallaan olevan magneetin ympärillä. Kun laitteeseen kytkettiin jännitelähde, pyörimään pääsevät osat pyörivät, jolloin tajuttiin, että sähkömagneettisten kenttien avulla voidaan saada aikaan jatkuvaa liikettä. (Bowers, 2004.)

Lopulta vuonna 1828 englantilainen Peter Barlow kehitti niin sanotun Barlowin pyörän, jonka toiminta pohjautuu tasavirran avulla aikaansaadun Lorentzin voiman aikaansaaman magneettikentän tuottamaan voimaan, joka sai pyörän pyörimään (Maroto et al. 2000). Tätä voidaan pitää yhtenä ensimmäisistä sähkömagneettisista moottoreista, vaikka Barlowin pyörää ei ollut suunniteltu yleiseen käyttöön, vaan havainnollistamaan sähkömagneettisen moottorin toimintaa (Maroto et al. 2000). Barlowin pyörää Barlowin keksinnön jälkeen sähkömagneettisia koneita on tutkittu ja kehitetty paljon ja nykyään ne ovatkin yleisimmin käytettyjä sähkökoneita.

3. SÄHKÖSTAATTISTEN MOOTTORIEN JA GENERAATTORIEN OMINAISUUKSIA

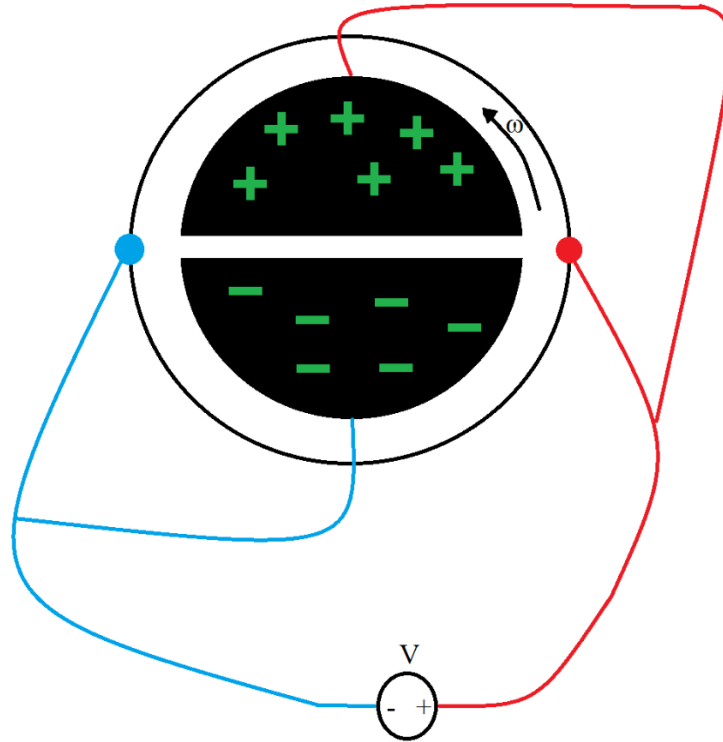
Sähköstaattiset moottorit ja generaattorit ovat toiminnalliselta idealtaan yksinkertaisia, mutta niiden käytännön toteutus ei aina sitä ole. Niiden toiminta perustuu positiivisten ja negatiivisten sähkövarausten välille muodostuvien sähköisten vetovoimien hyödyntämiseen pyörivän moottorin tapauksessa vääntömomentin tuottamiseen (Dadkhah et al. 2014).

Sähköstaattisten koneiden ominaisuuksia on hankalaa suoraan vertailla sähkömagneettisten koneiden ominaisuuksiin, sillä kuluttajamarkkinoilla ei ainakaan tällä hetkellä ole sellaisia saatavilla. Esimerkiksi suoria ja luotettavia teho- ja vääntömomenttivertailuja ei voida tästä syystä tehdä, vaan vertailuissa joudutaan tyytymään tutkijoiden rakentamien prototyypin pohjalta saatuihin tietoihin.

3.1 Toimintaperiaate

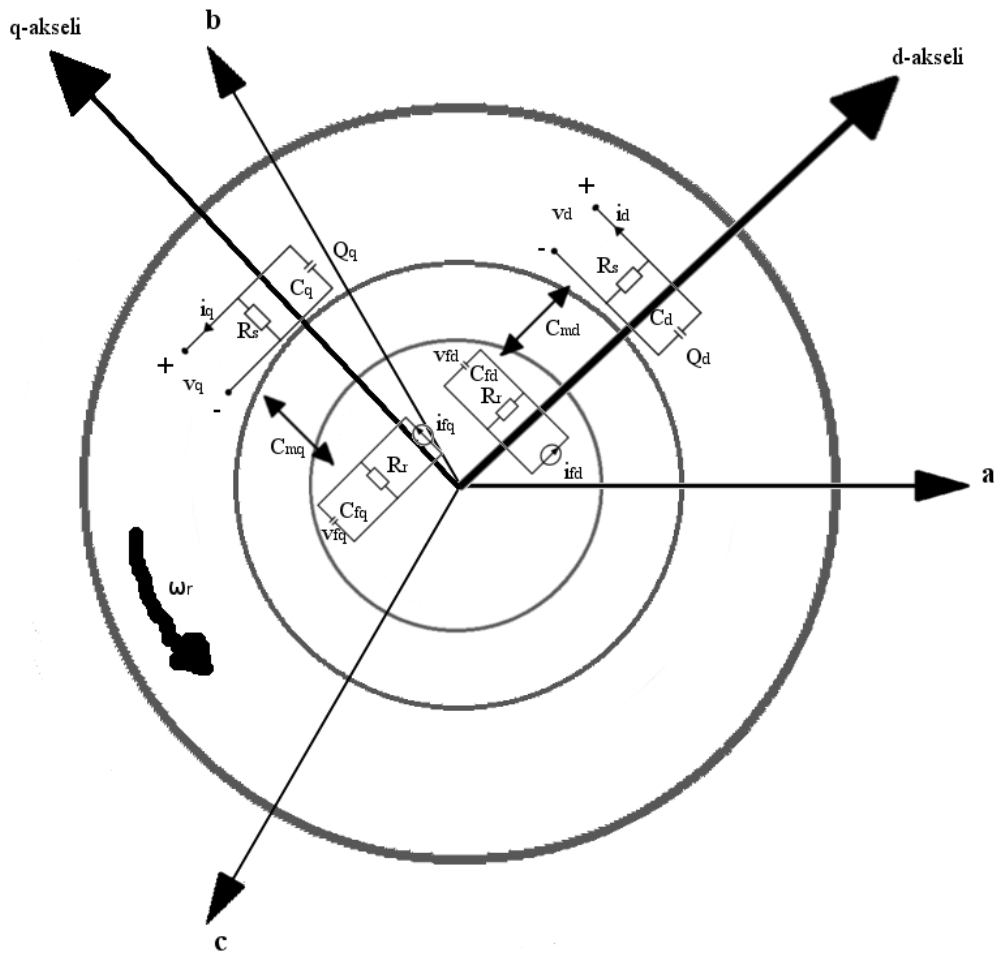
Jotta sähköstaattisten sähkökoneiden toimintaperiaatteen voi hyvin ymmärtää, niin täytyy tietää mikä sähköstaattinen induktio, eli influenssi, on. Lyhyesti selitettynä se on ilmiö, jossa johtavien (monesti metallisten) kappaleiden sisäiset negatiivisesti varautuneet johdinelektronit hylkivät negatiivisesti varattuja kappaleita ja vetävät puoleensa positiivisesti varattuja kappaleita Coulombin lain mukaisella tavalla ja liikkuvat ja järjestäytyvät johtavan kappaleen sisällä sen mukaisesti, mikäli johtava kappale ei ole galvaanisesti yhteydessä muihin kappaleisiin. (Lehto et al. 2012, 120-121.)

Pyörivien sähköstaattisten sähkökoneiden toiminta perustuu siihen, että positiivisesti ja negatiivisesti sähköisesti varautuneiden johtimien välille muodostuu sähköisiä vetovoimia, Coulombin lain mukaisia sähköisiä voimia (Ge & Ludois, 2016). Samoin varautuneet johtimet taas hylkivät toisiaan, eli muodostavat toisiinsa työntövoimia. Moottorissa on paikallaan pysyvä staattori sekä pyörivä roottori. Näistä osista kummassakin on johtimia, joihin joko indusoituu sähköstaattisen induktion avulla tai joihin muulla tavoin saadaan ulkoisesta jännitelähteestä jännitettä. Näin johtimiin saadaan erimerkkisiä sähkövarauksia. Vastakkaisten varauksien välille syntyy sähkökenttiä siinä missä sähkömagneettisissa sähkökoneissa pyritään muodostamaan magneettikenttiä. Kuvassa 3.1 on nähtävillä hyvin yksinkertainen sähkökone staattorin ja roottorin varauksineen. Roottorin tai staattorin varauksien napaisuudet vaihtelevat roottorin pyöriessä, joka mahdollistaa pyörimissuunnan pysymisen moottorissa samana. (Dadkhah et al. 2014; Ge & Ludois, 2016.)



Kuva 3.1. Yksinkertaistus sähköstaattisen moottorin toimintaperiaatteesta. Samanmerkkiset sähkövaraukset hylkivät toisiaan ja erimerkkiset vetävät toisiaan puoleensa, jolloin tarpeeksi suurilla jännitteillä voimat saavat moottorin pyörimään. Kuvassa roottoriin yhdistetyillä johtimilla haetaan sitä, että sen varaukset vaihtavat paikkaansa, kun roottori kääntyy tarpeeksi. Tällöin pyörimissuunta ei vaihdu, vaan pysyy samana. Staattorin ja roottorin välinen etäisyys on liioiteltu kuvan selkeyttämiseksi.

Kuvassa 3.2 on esitetty eräänlainen periaatekuva sähköstaattisen tahtikoneen toiminnasta, jossa on huomioitu keskinäiskapasitanssi. Keskinäiskapasitanssin vaikutukseen d- ja q-akseleilla viitataan alaindekseillä m_d ja m_q . Keskinäiskapasitanssin kautta sähköisiä varauksia siirtyy roottorista staattoriin (Shehadeh et al. 2015). Kuvasta nähdään kuitenkin, että staattisissa sähkökoneissa kapasitanssi, eli sähköstaattisen systeemin sähkövirran varastointikykyä kuvaava suure, jota voidaan kasvattaa mm. erilaisten eristeenä toimivien mahdollisimman korkean permittiivisyyden ja viskositeetin omaavien nesteiden ja staattorin ja moottorin muotoilun avulla, vaikuttaa moottorin ominaisuuksiin (Ge & Ludois, 2016). Sähköstaattisten koneiden kapasitiiviset ominaisuudet ovat suuressa roolissa toiminnan kannalta, kuten induktiiviset ovat sähkömagneettisissa koneissa ja korkea viskositeetti auttaa vähentämään nesteestä aiheutuvia mekaanisia häviöitä. Kuvan d- ja q-akselit kuvaavat vääntömomentin jakoa sähkökentän sekä elastanssin, eli kapasitanssin käänteisarvon, aikaansaamiseksi vääntömomenteiksi.



Kuva 3.2. Yksinkertaistettu kaaviokuva sähköstaattisesta tahtikoneesta d- ja q-akseleille jaettuna (Shehadeh et al. 2015). Kuvan alaindeksit d ja q viittaavat alaindeksihin s_d ja s_q . Kuva on piirretty uudelleen ja samalla sen tekstit on suomennettu.

Sähköstaattisia koneita voisi kuvailla siten, että niiden toiminta perustuu niiden kapasitiivisiin ominaisuuksiin siinä missä sähkömagneettisten koneiden toiminta perustuu induktiivisiin ominaisuuksiin (Tapuchi & Baimel, 2014). Energiaa siis varastoidaan sähkökenttään kuten kondensaattorissa. Mekaanisten sähkömagneettisten koneiden hyödyntäessä Lorentzin voimia sähköstaattiset koneet hyödyntävät Coulombin voimia (Ge & Ludois, 2016).

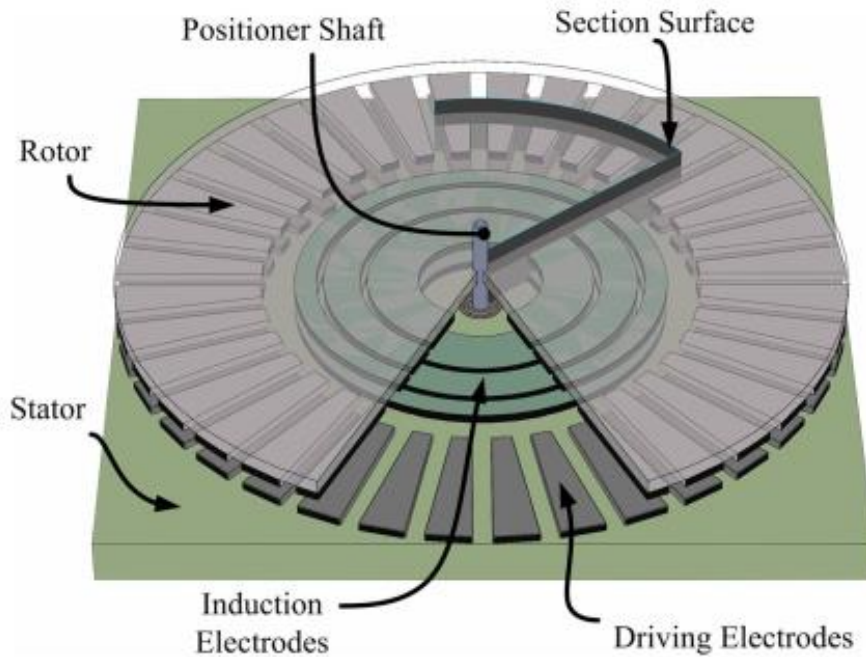
Sähköstaattisissa tahtigeneraattoreissa tarvitaan usein alkuvarauksen synnyttämiseen tasajännitettä mahdollistamaan generaattorin toiminta. Generaattorien toiminta perustuu siihen, että jollakin tavoin, yleensä pyöriviä roottoreita tai pyöriviä hihnoja hankaamalla, siirretään sähkövarauksia haluttuihin paikkoihin. Näiden sähkövarauksien avulla saadaan aikaan korkeita jännitteitä. (Van de Graaff et al. 1933.)

3.2 Erilaisia rakenteita

Sähköstaattiset sähkökoneet ovat toimintaperiaatteeltaan melko yksinkertaisia. Siitä huolimatta niitä voidaan toteuttaa useilla eri tavoilla ja kaikkia tapoja ei tässä työssä käsitellä työn aiheen laajuuden vuoksi.

Harmoninen sähköstaattinen moottori sisältää staattorin ja roottorin, joista toiseen on kiinnitetty johtimia ja toinen on valmistettu jostakin sähköä johtavasta materiaalista. Staattorin ja roottorin väliin pitää myös sijoittaa ohut kerros jotakin eristemateriaalia pitämään huoli siitä, ettei johtava materiaali pääse fyysiseen kosketukseen johtimien kanssa. Näihin johtimiin tuodaan vuorotellen jännitettä, jolloin erimerkkiset sähkövaraukset aiheuttavat veto- ja hylkimisvoimia, jotka saavat aikaan mekaanista pyörimisliikettä. Tämä kone voi olla myös ohuista levyistä rakennettu, jolloin johtimet on sijoitettu tälle levyille. Tällä tavoin moottori saadaan erittäin kompaktiksi. (US 5237234A, 1988.)

Vielä suhteellisen uusi moottorityyppi, kuvassa 3.3 oleva influenssi-tahtimoottori eli niin sanottu VISE-moottori on toiminnaltaan vain hiukan erilainen kuin harmoninen moottori. VISE-moottorissa on käytetty sekä roottorissa että staattorissa sähköstaattisen induktion mahdollistavia johtimia, jolloin roottoriin ei tarvitse erikseen tuoda jännitettä johdinta pitkin, vaan siihen indusoituu jännitettä. Jännite indusoituu staattorin erillisistä induktiojohtimista. Tässä rakenteessa roottoriin ei siis tarvitse erillisiä jännitteellisiä johtimia, jolloin moottorin rakenne on hiukan yksinkertaisempi ja mekaanista rasitusta kestävämpi. Tämän rakenteen etuja ovat kompaktimpi ja kevyempi rakenne sekä suurempi hyötykäyttöön saatava mekaaninen teho kuin ilman induktiojohtimien käyttöä, eli toisin sanoen moottorityypillä on parempi hyötysuhde kuin harmonisella moottorityypillä (Dadkhah et al. 2014.)



Kuva 3.3. Rakennekuva levymäisesti rakennetusta VISE-moottorista. Kuvalla pyritään havainnollistamaan kyseisen moottorin rakennetta sekä sitä, mistä komponenteista se koostuu. (Dadkhah et al. 2014.)

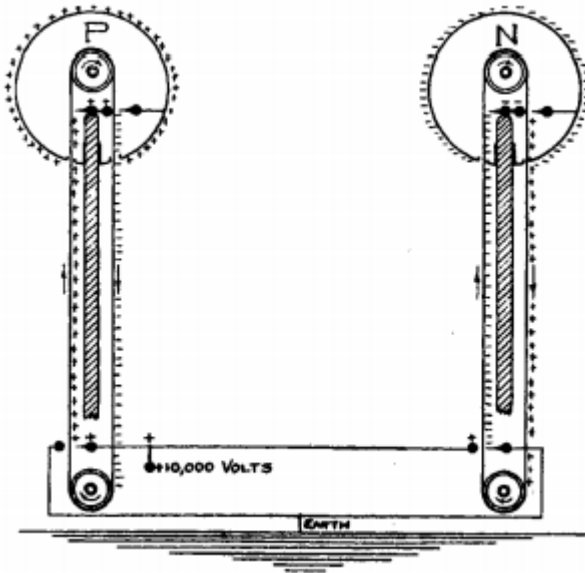
Sähköstaattisia mikromoottoreita on käytössä mikrosysteemeissä (myöhemmin MEMS), eli erilaisissa hyvin pienissä laitteissa, joiden ulkoiset mitat pyörivät mikrometrien kokoluokissa. Muitakin kuin sähköstaattisia mikromoottoreita käytetään, kuten esimerkiksi biologisia sekä sähkömagneettisia mikromoottoreita (Zhang et al. 2005). Nämä laitteet voivat olla mm. sensoreita, kuten esimerkiksi kiihtyvyyssensoreita, robottien osia tai DLP-laitteita, (Digital Light Processing) mutta MEMS-sovelluksissakaan sähköstaattiset koneet eivät ole erityisen laajasti käytössä (Penskiy et al. 2011). Mikromoottorit ovat usein edestakaisin liikkuvia moottoreita sen sijaan että ne pyörisivät. Esimerkiksi videoprojektoreissa käytettävät DLP-laitteet monesti ovatkin yksinkertaisia ja hyvin pieniä sähköstaattisia koneita, joiden tarkoitus on säädellä laitteiden sisällä olevien peilien asentoa (Penskiy et al. 2011).

Sähköstaattiset mikromoottorit toimivat ominaisuuksiensa puolesta hyvin korkean pyörimisnopeuden sovelluksissa, joissa ei tarvita paljoa vääntömomenttia. Tällaisia käyttökohteita ovat esimerkiksi mikrosensorit ja tiedon tallentamiseen tarkoitetut laitteistot, kuten esimerkiksi tietokoneisiin liitettävät massamuistilaitteet. (Zhang et al. 2005.)

Sähköstaattisia generaattoreitakin on erilaisia. Yksi sähköstaattinen generaattorityyppi on Van de Graaffin generaattori, joka on tänäkin päivänä opetuskäytössä monissa kouluissa. Generaattorin rakenne on nähtävissä kuvassa 3.4. Toisin kuin monet muut sähköstaattiset moottorityypit, Van de Graaffin generaattori ei tarvitse ulkoista jännitelähdettä toimiakseen (Van de Graaff et al. 1933).

Van de Graaffin generaattorissa on kaksi tornimaista osaa, joissa kummassakin vertikaalisuuntainen hihna yhdistää kahta hihnapyörää. Ylemmän hihnapyörän ympärillä on ontto metallinen pallo ja

hihnojen välissä on lasiset sauvat kannattelemassa metallipalloa. Metallipallot yhdistetään esimerkiksi harjamaisilla elektrodeilla pyörivään hihnaan. Toinen metallinen pallo varautuu positiiviseksi ja toinen negatiiviseksi. Alempi hihnapyörä on metallinen ja sitä pyöritetään käytettävän voimanlähteen avulla. Hihnat yhdistetään alaosassa samanlaisilla elektrodeilla johtimiin ja näiden positiiviset puolet yhdistetään toisiinsa ja negatiiviset osat maadoitetaan. (Van de Graaff et al. 1933.)



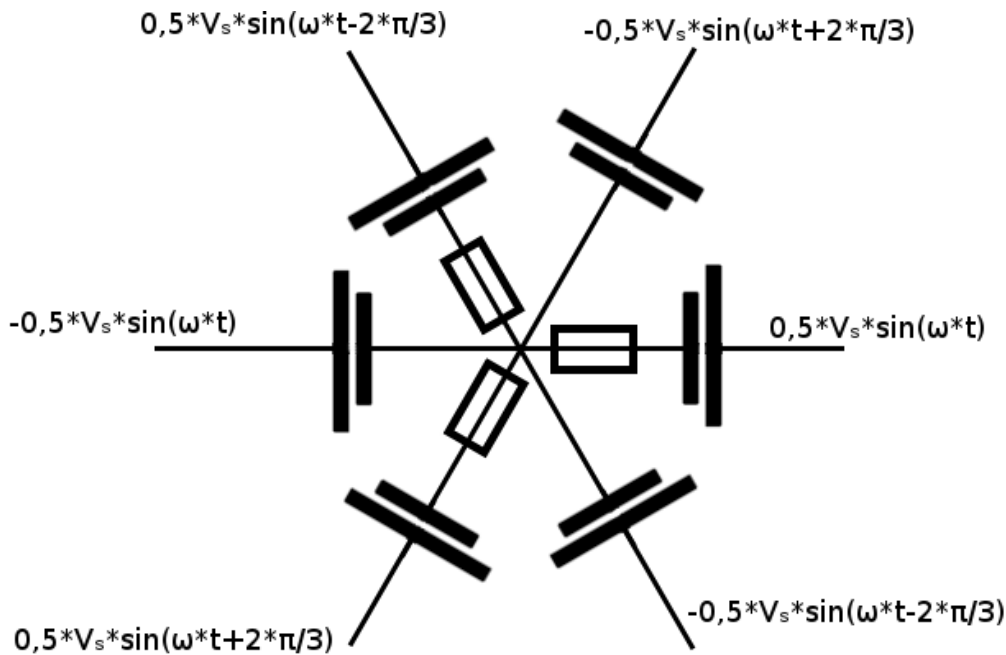
Kuva 3.4. Van de Graaffin generaattorin rakennepiirustus. Generaattori muodostuu kahdesta tornimaisesta rakenteesta, joissa on ylhäällä lasisten sauvojen kannattelemat ontot metallipallot. (Van de Graaff et al. 1933.)

Viime vuosina on ollut tutkimuksen kohteena energiansa värähtelyistä saavat säätökondensaattoreiden ja sähkövirtaa vain yhteen suuntaan ohjaavien diodien avulla toimivat sähköstaattiset generaattorit. Nämä generaattorit tarvitsevat pienen alkujännitteen, joka saadaan aikanaan kasvamaan kapasitanssien muutoksien myötä. Energiansa generaattorit saavat värähtelyiden aikaansaamista kapasitanssien muutoksista säätökondensaattoreissa. Kasvaneisiin sähkövarauksiin kertynyt jännite saadaan hyötykäyttöön generaattorista käyttämällä DC-DC-muuntajaa. (de Queiroz, 2019.)

3.3 Mallinnettavuus

Sähköstaattisten koneiden matemaattinen mallinnus on pääperiaatteiltaan samanlaista kuin sähkömagneettisten koneidenkin (Charpentier et al. 1995). Yhtälöt, joiden avulla mallinnus tapahtuu, ovat melko samankaltaisia kuin sähkömagneettisilla koneilla (Ge & Ludois, 2016). Yhtälöistä on nähtävissä se, että sähköstaattisten koneiden ominaisuuksiin vaikuttavat eri asiat kuin sähkömagneettisten koneiden ominaisuuksiin.

Kuvassa 3.5 on nähtävissä kolmivaiheisen ja kaksinapaisen sähköstaattisen moottorin mallinnusta havainnollistava kuva. Staattorin ja roottorin johdinparit muodostavat eri vaiheet, joissa jännite muuttuu likimain sinifunktion tavoin.



Kuva 3.5. Sähköstaattisen kolmivaiheisen ja kaksinapaisen moottorin toimintaa kuvaava piirikaavio ja eri vaiheiden jännitteet ajan t suhteen (Charpentier et al. 1995). Kuva on piirretty uudelleen.

Sähköstaattisten sähkökoneiden ominaisuuksiin vaikuttaa paljon niiden kapasitiiviset ominaisuudet sekä niiden elastanssit. Moottoreiden vääntömomentteja voidaan parantaa mm. muuttamalla väliainetta, jolloin väliaineen suhteellinen permittiivisyys muuttuu, tai staattorin ja roottorin pintoja muuttamalla, jolloin pinta-ala muuttuu. (Ge & Ludois, 2016.)

$$D = \epsilon_0 \epsilon_{va} E \quad (3.1)$$

$$\Phi_E = \int_A D \, dA \quad (3.2)$$

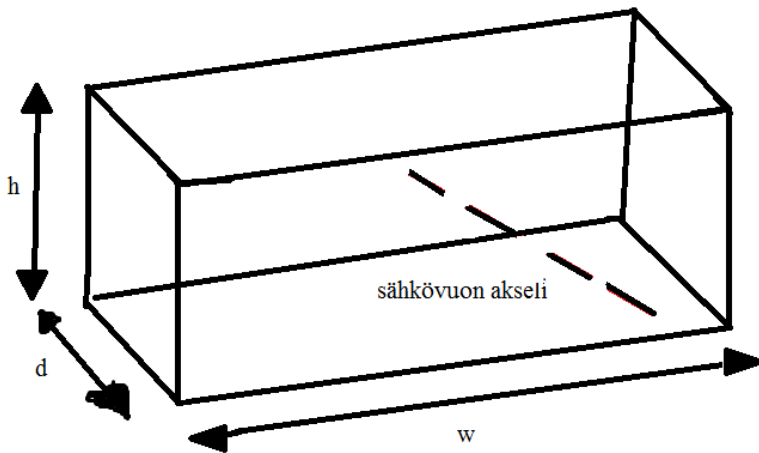
$$S_E = \frac{d}{\epsilon_0 \epsilon_{va} wh} = \frac{1}{C} \quad (3.3)$$

Yhtälön 3.1 (Ge & Ludois, 2016) avulla saadaan laskettua sähkövuon tiheys D väliaineen suhteellisen permittiivisyyden ϵ_{va} , tyhjiön permittiivisyyden ϵ_0 ja sähkökentän voimakkuuden E tulona. Yhtälössä 3.2 (Ge & Ludois, 2016) esiintyy sähkövuon Φ_E yhtälö. Tämä vastaa sähkömagneettisten koneiden magneettivuota. Sähkövuo on yhtälön mukaan sähkövuon tiheyden D integraali pinta-alan A suhteen. Yhtälön 3.3 (Ge & Ludois, 2016) avulla taas voidaan laskea elastanssi S_E , joka on käytännössä kapasitanssin C käänteisluku ja se vastaa sähkömagneettisten koneiden reluktanssin arvoa. Toisaalta elastanssi voidaan myös laskea sähkövuon kulkureitin poikkileikkauksen geometrinen mittojen d , w ja h , sekä tyhjiön permittiivisyyden ϵ_0 ja väliaineen suhteellisen permittiivisyyden ϵ_{va} avulla. Poikkileikkausta ja sen mittoja selventäneen kuvan 3.6 piirros. (Ge & Ludois, 2016.)

$$\varepsilon_{EMF} = \Phi_E S_E \quad (3.4)$$

$$T_e = \frac{1}{2} V^2 \frac{dC}{d\theta} \quad (3.5)$$

Yhtälöllä 3.4 (Ge & Ludois, 2016) saadaan lasketuksi sähkömotorinen voima ε_{EMF} , eli magnetomotorista voimaa vastaava suure. Tämä onnistuu kertomalla yhtälöiden 3.2 ja 3.3 avulla saadut sähkövuon Φ_E ja elastanssin S_E arvot keskenään.



Kuva 3.6. Sähkövuon kulkureitin poikkileikkauksen ja sen geometrinen mittojen havainnollistamiseen piirretty kuva (Ge & Ludois, 2016). Kuva on piirretty uudelleen ja samalla sen teksti on suomennettu.

Yhtälön 3.5 (Ge & Ludois, 2016) avulla voidaan laskea sähköstaattisen moottorin ideaalinen vääntömomentti T_E , johon vaikuttaa jännitteen V neliö sekä kapasitanssin C muutos moottorin pyöriessä eli kapasitanssin derivaattana kulman θ suhteen. (Ge & Ludois, 2016.)

$$C = \frac{\Phi_E}{V} \quad (3.6)$$

Yhtälön 3.6 (Ge & Ludois, 2016) saadaan lasketuksi kapasitanssin C arvo. Kapasitanssi kuvaa systeemin kykyä varastoida sähkövirtaa. Sähköstaattisen moottorin tapauksessa kapasitanssiin vaikuttavat jännitteen V sekä sähkövuon Φ_E suuruudet. (Ge & Ludois, 2016.)

3.4 Vahvuudet sähkömagneettisiin koneisiin verrattuna

Yksi sähköstaattisten koneiden vahvuus on se, että ulkoiset magneettikentät eivät juurikaan vaikuta niiden toimintaan. Sähköstaattiset koneet hyödyntävät sähkökenttiä magneettikenttien sijaan, joten ainakaan heikot ulkoiset magneettikentät eivät haittaa merkittävästi niiden toimintaa (Tapuchi & Baimel, 2014.)

MEMS-sovelluksissa käytetään pyöriviäkin sähköstaattisia mikromoottoreita. Käyttökohteita rajoittaa se, että nämä moottorit vaativat kokoisekseen suuria jännitteitä, jopa kymmenestä voltista sataan volttiin. Tällöin mikromoottorin jännitteensyöttö ei kuitenkaan voi tapahtua tavanomaiselta 5 voltin piirilevyiltä. Näillä mikromoottoreilla voidaan päästä noin 5 pNm ... 67 pNm suuruisiin vääntömomentteihin, riippuen mm. staattorin ja roottorin paksuudesta. (Korvink & Paul, 2005, 785-787.)

Magneettisten osien puuttuminen yksinkertaistaa koneiden rakennetta sekä alentaa myös valmistuskustannuksia, sillä vahvat kestomagneetit ovat kalliita ja koska ne sisältävät usein harvinaisia metalleja, kuten neodyymia, niiden materiaalikustannukset tulevat todennäköisesti kasvamaan tulevaisuudessa entisestään (Nakamura, 2018). Koneiden rakennusaineina muutenkin pystytään käyttämään melko pitkälti alumiinia sekä eri muovilaatuja, mikä tekee koneista vieläkin keveämpiä ja halvempia materiaalikustannuksiltaan, vaikka toisaalta suuremmassa mittaluokassa eristenestettä tarvitaan niin paljon, etteivät koneet välttämättä ole sen pienempiä tilavuudeltaan kuin sähkömagneettiset koneet (Ge & Ludois, 2016).

Moottoreiden sisällä voidaan käyttää joko kaasumaista tai nestemäistä eristeainetta, jolloin voidaan muuttaa väliaineen permittiivisyyttä vaihtamalla väliainetta ja tällä tavoin saada koneesta enemmän vääntömomenttia. Tällä hetkellä käytettävien eristeaineiden permittiivisyys on kuitenkin melko huono, mutta esimerkiksi DuPontin Vertel XF -nesteellä on suhteellinen permittiivisyys 7,1 ja se täyttää monia muitakin koneen vaatimuksia, kuten alhaisen sähkönjohtavuuden eristeenä toimimiseen ja alhaisen viskositeetin, jotta konetta voidaan ajaa suurillakin pyörimisnopeuksilla. Koneiden rakennusaineina pystytään käyttämään melko pitkälti esimerkiksi alumiinia sekä eri muovilaatuja, mikä tekee koneista keveämpiä ja materiaalivalintojen kirjo on laajempi kuin sähkömagneettisilla moottoreilla. (Ge & Ludois, 2016.)

Matalilla pyörimisnopeuksilla sähköstaattisilla moottoreilla saattaa teoriassa olla etulyöntiasema. Niiden käyttäessä suuria jännitteitä ja pieniä virtoja moottorin sisällä olevat johtimet lämpenevät vähemmän, jolloin lämpöhäviöt jäävät pienemmiksi eikä moottori tarvitse erillistä ulkoista jäähditysjärjestelmää matalillakaan kierroksilla ajettaessa niin kuin perinteiset moottorit (C-Motive Technologies, 2020). Sähkömagneettiset moottorit, joiden jäähditysjärjestelmä on järjestetty niin, että pyöritettävässä akselissa on puhallin, joka puhaltaa ilmaa moottorin rungon läpi moottorin

pyöriessä saattavat alhaisilla pyörimisnopeuksilla täysiä vääntömomenteja käytettäessä pidempään kuumentua liikaa ja vaatia pitkäaikaisempaan käyttöön erillistä jäähdytysjärjestelmää (ABB, 2019a). Erillisen järjestelmän käyttö vaatii tietenkin ulkoisen voiman käyttöä, jolloin koko systeemin hyötysuhde kärsii.

Sähköstaattiset sähkömoottorit pystyvät jopa paikallaan ollessaan vääntämään nimellisvääntömomenttinsa suuruisella vääntömomentilla pidemmänkin aikaa, sillä häviöt tilanteessa, jossa moottori ei pyöri, ovat sähköstaattisilla sähkökoneilla minimaaliset sähkömagneettisten koneiden häviöihin verrattuna niiden kapasitiivisten ominaisuuksien vuoksi. Lisäksi niissä ei ole magnetoinnista aiheutuvia häviöitä. Killeen ja Ludoisin tutkimuksissa sähköstaattisella tahtimoottorilla saatiin aikaan 8 Nm vääntömomentti, kun moottoria ei päästetty pyörimään. Tällöin tehohäviöiksi laskettiin suunnilleen 5 W. Vastaavanlainen sähkömagneettinen servomoottori sai saman vääntömomentin aikaan samoissa olosuhteissa, mutta häviöt olivat noin 100 W. (Killeen & Ludois, 2020.)

Sähköstaattisten generaattorien avulla saadaan tuotettua huomattavan suuria jännitteitä, jopa kymmeniä kilovoltteja. Vastaaviin jännitteisiin kykenevien sähkömagneettisten generaattorien rakentaminen olisi huomattavasti kalliimpaa ja haasteellisempaa. Näin suurilla jännitteillä generaattorista saatavat virrat kuitenkin jäävät pieniksi, eli joudutaan käyttämään muuntajia. Sähköstaattisissa generaattoreissa ei tapahdu magnetointahäviöitä, vaan häviöt aiheutuvat lähinnä liikkuvien osien kitkavoimista. (Van de Graaff et al. 1933.)

3.5 Heikkoudet sähkömagneettisiin koneisiin verrattuna

Ge ja Ludois (2016) rakensivat tutkimuksiaan varten sähköstaattisen sähkömoottorin, joka tuotti 7,5 kV jännitteellä maksimissaan 0,7 Nm vääntömomentin ja joka painoi 6,92 kg. Tällöin moottori tuotti 0,101 Nm/kg vääntömomentin massaa kohden. ABB:n valmistama IE3-luokan kolmivaiheinen ja kaksinapainen sähkömagneettinen oikosulkumoottori, joka painaa 9 kg, tuottaa nimellisvääntömomentin 1,3 Nm ja maksimissaan 3,25 Nm vääntömomentin (ABB, 2019b). Tällöin vääntömomentti massaa kohden on noin 0,36 Nm/kg, mikä on paljon suurempi kuin Gen ja Ludoisin valmistaman sähköstaattisen moottorin. Tämä on hyvä esimerkki siitä, että sähköstaattiset koneet tarvitsevat erittäin suuria jännitteitä toimiakseen, eivätkä ne ainakaan vielä ole niin hyviä suuremmassa kokoluokassa kuin mitä ne ovat MEMS-sovelluksissa. Toisaalta ABB:n moottori on pitkän ajan kehityksen tulos ja sitä on valmistettu jo pitkään, kun taas Gen ja Ludoisin luomus oli tutkijoiden valmistama prototyyppi. Tämän vuoksi tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia, mutta ne ovat kuitenkin suuntaa antavia.

Yksi ongelmallinen asia sähköstaattisissa koneissa liittyy suureen osaan käytettyjä eristemateriaaleja. Yleisien eristemateriaalien permittiivisyydet ovat liian pieniä, jotta koneista saataisiin suuria vääntömomenteja aikaiseksi (Tapuchi & Baimel, 2014). Lisäksi on pääteltävissä, etteivät ainakaan nestemäiset eristeaineet tai ainakaan niiden lisäaineet ole käyttöikänsä ikuisia, vaan niitä pitäisi uusita tietyin väliajoin kuten voiteluöljyjä polttomoottoreissa tai voitelurasvoja erilaisissa kuormitetuissa

nivelissä. Jos näin on, niin nesteiden uusimisesta voi tulla kuluja niin materiaalien kuin menetetyin toiminta-ajan vuoksi.

Eräänä sähköstaattisten moottorien huonona puolena voidaan pitää sitä, että niitä on tutkittu ja otettu käyttöön oikeissa käytännön sovelluksissa huomattavasti vähemmän kuin sähkömagneettisia moottoreita ja generaattoreita. Tämä voi johtua siitä, että sähköstaattiset moottorit eivät ole yhtä laajasti tunnettuja kuin sähkömagneettiset moottorit ja niille ei välttämättä ole yhtä paljon kysyntää teollisuuden puolelta makrotasolla melko pieniksi jäävien vääntömomenttien vuoksi, jolloin rahoitus voi koitua ongelmaksi tutkimukselle ja kehitykselle jatkoa ajatellen. Mekaanisen vääntömomentin tuottaminen sähköä avulla on yksi sähkömoottorin tärkeimpiä tehtäviä, joten todennäköisesti vain vähän vääntömomenttia tuottavaan isoon moottoriin sijoittaminen ei ole taloudellisesti kovin viisasta.

Sähköstaattisille sähkökoneille ei vielä ole tehty kaupallisia erityisesti niitä ohjaavia laitteistoja (Ge & Ludois, 2016). Toisin sanoen, jos esimerkiksi sähköstaattisen moottorin haluaa ostaa tai rakentaa käyttöä varten, niin todennäköisesti sille täytyy myös suunnitella ja rakentaa jokin sitä ohjaava laite, kuten yleisesti sähkömagneettisten moottorien ohjaukseen käytetty taajuusmuuttaja. Suuret jännitteet voivat vaikeuttaa ohjauslaitteistojen toteutusta, mutta ainakin prototyyppejä sellaisista on jo tehty (Killeen & Ludois, 2020).

Vielä ei ole tehty suurempia tutkimuksia siitä, vaikuttaako sähköstaattisten sähkökoneiden käyttämät sähkökentät negatiivisesti ihmisten terveyteen pitkällä aikavälillä. Yleisesti ottaen sähkökenttien ja magneettikenttien vaikutuksia on tutkittu, mutta täysin varmaa tietoa ei vieläkään ole olemassa siitä, että minkä taajuusalueiden ja kuinka vahvat sähkökentät ovat haitallisia ja jos ovat, niin missä määrin (Kandel et al. 2016). Toisaalta taas siitä on näyttöä, että tarpeeksi vahvoilla sähkömagneettisilla kentillä on ihmiskehossa ainakin mahdollista saada indusoitumaan sähkökenttiä kudoksiin, mutta pitkäaikaisvaikutuksista ei vielä tiedetä paljoa (Kandel et al. 2016).

4. SÄHKÖSTAATTISET SÄHKÖKONEET TÄNÄ PÄIVÄNÄ

Sähköstaattiset sähkökoneet eivät ole kovinkaan laajasti käytössä tänä päivänä. Kuitenkin niitä olisi varsin todennäköisesti mahdollista soveltaa ja ottaa hyötykäyttöön esimerkiksi rannekelloihin, sillä ne tarjoavat kokoonsa nähden paljon vääntöä hyvin pienikokoisissa sovelluksissa. Esimerkiksi sähköstaattiset mikromoottorit voivat tarjota 5 pNm ... 67 pNm suuruisia vääntömomenteja (Korvink & Paul, 2005, 785).

4.1 Tämän päivän käyttökohteet ja sovellukset

Sähköstaattisia sähkökoneita ei tällä hetkellä valmisteta suoraan kuluttajille myytäväksi lainkaan. Tilanteeseen saattaa olla lähivuosina tulossa muutosta, sillä esimerkiksi yhdysvaltalainen yritys C-Motive Technologies väittää kotisivuillaan olevansa ensimmäinen kaupallisiin tarkoituksiin sähköstaattisia moottoreita valmistava yritys ja tarjoaa tuotteestaan kiinnostuneille yrityksille demolaitteita kokeiltavaksi. Yritys ei ole antanut kovin tarkkoja tietoja moottoristaan, mutta kertovat mainosmateriaaleissaan sen suurimman vääntömomentin olevan saatavilla noin 100 ... 2000 rpm kierrosalueella. (C-Motive Technologies, 2020.)

Muutamia käyttökohteita sähköstaattisille koneille kuitenkin on, joissa ei voida käyttää sähkömagneettisia koneita niiden häiriintyessä liikaa ulkoisista magneettikentistä. Näitä käyttökohteita ovat mm. magneettikuvausteknologia, joka häiriintyisi käytettävien koneiden ollessa magneettisia ja samalla itse moottorit saattaisivat lakata toimimasta, ja elektronisuihkutekniikka. (Yamashita, 2007.)

Yhdysvaltalainen keksijä Juergen H. Staudte on kehittänyt pienikokoisen sähköstaattisen sähkömoottorin käytettäväksi rannekelloissa, mihin hänelle on myönnetty patentti vuonna 1971. Tässä koneessa on useita pyöriä kondensaattorilevyjä, joita ohjataan kanttiaallon kaltaisella jännitteellä. Kone on mahdollista saada patentin kuvauksen mukaan pyörimään tasaista nopeutta myös ilman erillistä ohjainpiiriä. (US 3629624A, 1971.)

MEMS-sovelluksissa sähköstaattiset mikrokoneet ovat olleet suuremman tutkimuksen alaisina eri käytännön sovelluksia varten kuin makromaailmassa. Mikromoottorit sopisivat ominaisuuksiensa puolesta hyvin mm. optikkaan liittyvissä järjestelmissä, mikrokokoisissa venttiilien kaltaisissa laitteissa, mikrokokoisissa sensoreissa ja tiedostojen tallennukseen tarkoitetuissa laitteissa (Zhang et al. 2005). Käytäntöön asti nämä lupaavat tekniikat eivät kuitenkaan ole vielä kovin laajasti päässeet (Penskiy et al. 2011).

Kaiken kaikkiaan sähköstaattisia sähkökoneita on käytännössä käytetty todella vähän. Vaikka ne saattaisivatkin soveltua moneen eri käyttökohteeseen, niin monesti muita konetyyppejä on jo kehitetty, joilla saadaan aikaan samoja, ellei jopa parempia tuloksia.

4.2 Tulevaisuudennäkymät

C-Motive Technologiesin edustajan Dan Ludoisin mukaan sähköstaattinen generaattori olisi esimerkiksi tuulivoimalalle erinomainen valinta, sillä se voisi toimia jopa kokonaan ilman erillistä vaihteistoa eli sen voisi kytkeä kiinni suoraan siipien pyörittämään akseliin. Tuuliturbiinin siivekkeet toimivat tehokkaimmillaan hitaammissa pyörimisnopeuksissa kuin missä sähkömagneettisten generaattorien huipputehot saavutetaan. Ludoisin mukaan myös sähköstaattisia moottoreita voitaisiin hyvin käyttää uusissa lentävissä droneissa niiden keveyden vuoksi. (Uhlenhuth, 2017.)

Yksinkertaisimpia sähköstaattisia mikromoottoreita tullaan todennäköisesti näkemään MEMS-sovelluksissa tulevaisuudessa enemmänkin kuin tähän mennessä. Niiden hyvät puolet olisivat hyödyllisiä erityisesti mm. robottien komponenteissa sekä mahdollisesti myös lääkinnällisten tuotteiden ja välineiden valmistuksessa sekä esimerkiksi vaikkapa lääkkeiden jakeluun erikoistuneissa laitteissa (Zhang et al. 2005).

VISE-moottorien avulla on mahdollista tuottaa melko suuria vääntömomenteja niiden kokoon ja massaansa nähden. Niiden rakenne muodostuu ohuista tasoista, mikä mahdollistaa erityisen pienen koon. Rakenteensa ansiosta, VISE-moottori voitaisiin rakentaa ikään kuin useampaan kerrokseen, jolloin siitä voitaisiin saada suurempia vääntömomenteja kuin yhdestä, jolloin sitä jo voitaisiin mahdollisesti hyödyntää teollisuuden hyvin pienen kokoluokan käyttökohteissa. (Dadkhah et al. 2014.)

Mekaaninen pyörimisliike vaatii monesti moottoreissa laakereiden käyttöä. Nämä laakerit ovat ajan mittaan kuluvia osia, joissa tapahtuu kitkan aiheuttamia lämpöhäviöitä. Laakerien valinnalla voidaan vaikuttaa moottorin huoltovälin sekä käyttöiän pituuksiin, kuten sähkömagneettisissakin moottoreissa. On olemassa myös passiivisia magneettilaakereita, jotka eivät tarvitse käytönaikaista voitelua, jotka kestävät erittäin suuria pyörimisnopeuksia ja joilla pyörimishäviöt ovat minimaaliset verrattuna mekaaniseen laakeriin (Pokki, 2019). Tällaisen kestromagneetin avulla toteutetun passiivisen magneettilaakerin käyttö voisi olla hyödyllistä sähköstaattisessa koneessa mm. hyötysuhteen kannalta, sillä koneiden omassa toiminnassa magneettikenttien aiheuttamia häviöitä ei käytännössä ole, vaan häviöt tulevat melko pitkälti mekaanisista rasituksista. Toisaalta magneettilaakeroitu sähköstaattinenkaan sähkökone ei enää ole hyvä valinta ympäristöön, jossa magneettikenttiä ei voida jostakin syystä sallia.

C-Motive Technologiesin verkkosivujen mukaan yrityksen valmistamia sähkökoneita voitaisiin käyttää muun muassa sähkökäyttöisissä kulkuneuvoissa, laivoissa sekä generaattoreina tuulivoimaloissa (C-Motive Technologies, 2020). Sähköstaattisten moottorien ominaisuudet voisivat myös mahdollistaa niiden käytön esimerkiksi autojen pienissä sähköistetyissä osissa, kuten sähköpeileissä tai ajovalojensäätimissä, sillä ne eivät vaadi suuria vääntömomenteja, mutta näiden osien kestävyys on tärkeää.

4.3 Ympäristöystävällisyys verrattuna sähkömagneettisiin sähkökoneisiin

Sähköstaattiset sähkökoneet voisivat mahdollisesti vaatia määrällisesti vähemmän raaka-aineita kuin sähkömagneettiset koneet, varsinkin voimakkaiden magneettien puuttuessa laitteista kokonaan (Ge & Ludois, 2016). Tämän lisäksi materiaalien ei välttämättä tarvitse olla yksiä tiettyjä, niin kuin tällä hetkellä magneettien kohdalla vielä on (Nakamura, 2018), vaan tietyissä osissa moottoria voidaan käyttää jopa muovisia osia (Ge & Ludois, 2016). Tämähän tarkoittaa automaattisesti säästöä raaka-aineiden valmistuksen suhteen, kun materiaaleja voidaan valita suuremmasta materiaalien kirjosta. Myös raaka-aineiden kuljetuksesta aiheutuvien kulujen sekä päästöjen voisi päätellä vähenevän sähkömagneettisiin koneisiin nähden samasta syystä, jos käytetään aikaisemmin käytettyjä materiaaleja kevyempiä ja lähempänä valmistuspaikkaa saatavissa olevia materiaaleja. Vielä ei kuitenkaan voida sanoa, millaisia eristeaineita koneissa pitäisi optimaalisissa tilanteissa käyttää tietyillä tehoilla ja kierrosalueilla tai mitkä niiden vaikutukset ovat tai mitä tapahtuu, jos esimerkiksi tiivisteet pettevät ja kone vuotaa nesteitään tai kaasujaan ulos. Myöskään sähköstaattisten moottorien hyötysuhteesta oikeassa käytössä ei vielä ole varmaa tietoa, joten ei voida vielä tarkkaan ennustaa veisikö niiden käyttöön vaikutus parempaan vai huonompaan suuntaan sähkömagneettisiin moottoreihin verrattuna.

Nykytietämyksen mukaan kolmivaiheisen sähköstaattisen tahtimoottorin roottori on mahdollista saada pyörimään ilman fyysistä kontaktia staattoriin, jos hyödynnetään tietynlaisia induktiojohtimia (Dadkhah et al. 2014). Tällä tavoin moottorin rakennetta voidaan yksinkertaistaa, sillä roottoriin ei tarvitse erikseen viedä jännitettä johtimia tai muita fyysisiä reittejä pitkin. Tällöin moottorin massaa saadaan pienemmäksi, joka tietyissä tapauksissa voi johtaa pienempiin kitkahäviöihin. Lisätutkimuksia tarvitaan, jotta voitaisiin selvittää, voidaanko moottorin hyötysuhdetta parantaa esimerkiksi magneettisten laakereiden avulla.

Sähköstaattisten sähkökoneiden vaatimat sähkömagneettisia koneita suuremmat jännitteet voivat olla sekä hyvä, että huono puoli. Suurilla jännitteillä ja samoilla tehoilla virrat jäävät pienemmiksi, mitä hyödynnetään mm. sähköverkkotekniikassa, sillä pienemmillä virroilla johtimien lämpöhäviöt ovat pienempiä (Vesämäki, 2019). Teollisuushalleissa saattaa olla suurempia jännitteitä saatavana jo ennestään, jolloin ei ole tarvetta muuntaa jännitteitä välillä pienemmäksi. Toisaalta taas, suuret jännitteet voivat aiheuttaa tapaturmia, joten moottorin ympäristön tulee olla hyvin suojattu.

5. YHTEENVETO

Ensimmäiset sähköstaattiset sähkökoneet on kehitetty jo ennen ensimmäisiä sähkömagneettisia sähkökoneita. Sähkömagneettiset sähkökoneet ovat kuitenkin päässeet korvaamaan sähköstaattiset koneet lähes jokaisessa käyttökohteessa ja niitä on tutkittu ja kehitetty enemmän ja pidemmän aikaa. Sähkömagneettisilla koneilla onkin ominaisuuksia, jotka mahdollistavat niiden käytön yleisemmin, kuten huomattavasti suuremmat vääntömomentit. Joka tapauksessa magneetteihin käytettyjen harvinaisten metallien hintojen noustessa (Nakamura, 2018) tullaan jossain vaiheessa todennäköisesti tilanteeseen, että on pakko löytää joko uusia kustannustehokkaampia ja vähintäänkin yhtä hyvät ominaisuudet omaavia materiaaleja magneeteissa käytettäväksi, tai sitten täytyy kehittää moottoreita ja generaattoreita, jotka eivät tarvitse magneetteja.

Työtä tehdessä selvisi, ettei sähköstaattisia sähkökoneita käytetä juuri lainkaan tällä hetkellä eikä niitä ole saatavilla ainakaan kuluttajamarkkinoilla. Tämä hankaloittaa niiden vertailua sähkömagneettisiin koneisiin, sillä konkreettisia lukuaroja esimerkiksi suorituskyvystä ja hyötysuhteesta ei tällöin ole saatavilla. Niiden valmistus voisi olla ainakin valmistukseen käytettävien materiaalien puolesta halvempaa kuin sähkömagneettisten koneiden ja niiden etuna ovatkin mm. vapaammin valittavissa olevat valmistusmateriaalit, toiminnan mahdollisuus myös sähkömagneettisille kentille herkissä ympäristöissä sekä mikrosysteemien kokoluokassa suuret voimat muihin mikromoottoreihin verrattuna. Vaikeuksia taas aiheuttavat huomattavan suuret käyttöjännitteet sekä suuremmissa sovelluksissa pieniksi jäävät vääntömomentit. Myös käyttökustannuksia on vaikea arvioida, kun laitteita ei vielä ole.

Sähköstaattisia sähkökoneita tullaan todennäköisesti käyttämään mikrosysteemeissä jatkossakin niiden yksinkertaisen rakenteen vuoksi (Zhang et al. 2005). Magneettilaakerien käyttö voi joissain käyttökohteissa parantaa hyötysuhdetta. Mahdollisia tulevaisuuden käyttökohteita näille moottoreille ovatkin pieniä vääntömomentteja vaativat tehtävät tilanteissa, joissa moottorille ei ole paljoa tilaa. Esimerkiksi pienien tuulettimien pyörittämiseen tämän kaltainen moottori saattaisi olla hyvä, jos tarpeeksi suuri jännitelähde on käytettävissä. C-Motive Technologiesin toinen perustajajäsen Dan Ludois on sitä mieltä, että sähköstaattisia generaattoreita taas voitaisiin käyttää tulevaisuudessa vaikkapa tuulivoimaloissa (Uhlenhuth, 2017).

Aihe kaipaisi kipeästi lisätutkimuksia ja lisää erilaisia prototyyppejä, joita tutkimuksissa voitaisiin hyödyntää. Esimerkiksi eristeaineita voitaisiin varmasti vielä kehittää niin permittiivisyyden kuin muidenkin ominaisuuksien kannalta lisääaineistusta muuttamalla. Näiden koneiden taloudellinen kannattavuus on myös vielä täysin tuntematon tarjonnan kärsimän puutteen vuoksi. Jos koneita tulee myöhemmin tarjolle, niin niiden avulla voidaan tehdä kannattavuuslaskelmia. Näissä laskelmissa tulisi huomioida ainakin koneen hankintakustannukset, sähkönkulutuksesta aiheutuvat kustannukset, huoltokustannukset ja koneesta saatava hyöty.

LÄHTEET

- ABB. 2019a. ABB Drives: Technical guide No. 7 – Dimensioning of a drive system. [Viitattu 6.1.2021]. Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/0f62d56f5118407ab9c7d99ffce40617/Technical_guide_No_7_3AF_E64362569_RevD_EN.pdf.
- ABB. 2019b. Low Voltage: General Performance IE3 Premium efficiency cast iron motors. [Viitattu 7.1.2021]. Saatavissa: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107991A4928&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- Bowers, B. 2004. Barking up the wrong (electric motor) tree. Proceedings of the IEEE. Vol. 92 (2), 388-392. Saatavissa: <https://doi.org/DOI:10.1109/JPROC.2003.821901>.
- C-Motive Technologies. [Verkkosivusto]. [Viitattu 8.10.2020]. Saatavissa <https://www.c-motive.com/tech/>.
- Charpentier, J. F. & Lefevre, Y. & Sarraute, E. & Trannoy, B. 1995. Synthesis and modelling of an electrostatic induction motor. IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 31 (3), 1404-1407. Saatavissa: <https://doi.org/DOI:10.1109/20.376290>.
- Dadkhah, M. & Hojjat, Y. & Jeon, J. U. & Ghodsi, M. & Modabberifar, M. 2015. Voltage-induction synchronous electrostatic motor. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 77 (1), 145-164. Saatavissa: <https://doi.org/DOI:10.1007/s00170-014-6385-3>.
- de Queiroz, Antonio Carlos M. 2019. Analysis of Electronic Electrostatic Generators. IEEE transactions on circuits and systems II: Express Briefs. Vol. 66 (4), 632-636. Saatavissa: <https://doi.org/DOI:10.1109/TCSII.2018.2865662>.
- Franklin, B & Collinson, P. 1751. Experiments and observations on electricity. St. John's Gate: E. Cave. Saatavissa: <https://doi.org/DOI:10.5479/sil.211644.39088000092304>.
- Ge, Baoyun & Ludois, Daniel C. 2016. Design Concepts for a Fluid-Filled Three-Phase Axial-Peg-Style Electrostatic Rotating Machine Utilizing Variable Elastance. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 52 (3), 2156-2166. Saatavissa: <https://doi.org/DOI:10.1109/TIA.2016.2517075>.
- Kandel, Shaiela & Swanson, John & Kheifets, Leeka. 2016. Health-Economics Analyses Applied to ELF Electric and Magnetic Fields. Risk analysis. Vol. 36 (6), 1277-1286. Saatavissa: <https://doi.org/DOI:10.1111/risa.12551>.

Killeen, Peter & Ludois, Daniel C. 2020. Three-Phase Bidirectional-Flyback Differential-Inverter for Synchronous Electrostatic Machines. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit, Michigan, Yhdysvallat, 11-15.10.2020. Saatavissa: <https://doi.org/DOI:10.1109/ECCE44975.2020.9236257>.

Korvink, Jan & Paul, Oliver. 2005. MEMS, A Practical Guide to Design, Analysis and Applications. Burlington: Elsevier Science. ISBN: 9786612253058.

Lehto, Heikki & Havukainen, Raimo & Maalampi, Jukka & Leskinen, Jaana. 2012. Fysiikka 6: Sähkö. 5. painos. Helsinki: Sanoma Pro. ISBN: 978-952-63-0121-1.

Lemay, J. A. L. 2008. The Life of Benjamin Franklin, Volume 3: Soldier, Scientist, and Politician, 1748-1757. University of Pennsylvania Press. ISBN: 9780812241211.

Maroto, J. A. & de Dios, J. & de las Nieves, F. J. 2000. Evaluation of the Lorentz law by using a Barlow wheel. IEEE Transactions on Education. Vol. 43 (3), 316-320. Saatavissa: <https://doi.org/DOI:10.1109/13.865207>.

McInally, Thomas. 2011. The Sixth Scottish University: The Scots Colleges Abroad: 1575 to 1799. BRILL. ISBN: 978-9004214262.

Nakamura, Hajime. 2018. The current and future status of rare earth permanent magnets. Scripta materialia. Vol. 154, 273-276. Saatavissa: <https://doi.org/DOI:10.1016/j.scriptamat.2017.11.010>.

Ortmeyer, Thomas. 2018. Electromechanical machinery theory and performance. Bristol: IOP Publishing Ltd. ISBN: 978-0-7503-1662-0.

Pancaldi, Giuliano. 2005. Volta: Science and Culture in the Age of Enlightenment. Princeton University Press. ISBN: 978-0-691-12226-7.

Penskiy, I. & Gerratt, A. P. & Bergbreiter, S. 2011. Efficient electrostatic inchworm motors with simple control and high force density. Teoksessa: 2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference. Peking, Kiina, 5-9.6.2011. 2438-2441. Saatavissa: <https://doi.org/DOI:10.1109/TRANSDUCERS.2011.5969660>.

Pokki, Janne. 2019. Passiiviset magneettilaakerit. Kandidaatintyö. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, LUT School of Energy Systems. Lappeenranta. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2019120345402>.

Shehadeh, H. & Favuzza, S. & Sanseverino, E. R. 2015. Electrostatic synchronous generator model of an Inverter-Based Distributed Generators. Teoksessa: 2015 International Conference on

Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). Palermo, Italia, 22-25.11.2015. 885-889. Saatavissa: <https://doi.org/DOI:10.1109/ICRERA.2015.7418537>.

Tapuchi, S. & Baimel, D. 2014. Novel differential linear electrostatic motor with light weight rotor. Teoksessa: 2014 IEEE 28th Convention of Electrical & Electronics Engineers in Israel (IEEEI). Eilat, Israel, 3-5.12.2014. Saatavissa: <https://doi.org/DOI:10.1109/EEEI.2014.7005760>.

Uhlenhuth, Karen. 15.11.2017. Q&A: Wisconsin inventor wants to help electric motors lose weight. [Viitattu 30.9.2020]. Saatavissa <https://energynews.us/2017/11/15/midwest/qa-wisconsin-inventor-wants-to-help-electric-motors-lose-weight/>.

US 3629624A. 1970. Electrostatic motor. Juergen H. Staudte, Yhdysvallat. (Staudte, Juergen H.) US 21598, 23.3.1970. Julk. 21.12.1971.

US 5237234A. 1988. Harmonic electrostatic motor. AT&T Corp, Yhdysvallat. (Jebens, Robert & Ninke, William & Trimmer, William.) US 256667, 13.10.1988. Julk. 17.8.1993.

Van de Graaff, R. J. & Compton, K. T. & Van Atta, L. C. 1933. The Electrostatic Production of High Voltage for Nuclear Investigations. Physical Review. Vol. 43 (3), 149-157. Saatavissa: <https://doi.org/DOI:10.1103/PhysRev.43.149>.

Vesämäki, Niko. 2019. Verkostonlaskentaohjelman valinta säteittäisesti syötettyjen erillislähteellisten sähköverkkojen mallinnukseen. Diplomityö. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, LUT School of Energy Systems. Lappeenranta. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2019112243865>.

Yamashita, N. & Yamamoto, A. & Gondo, M. & Higuchi, T. 2007. Evaluation of an Electrostatic Film Motor Driven by Two-Four-Phase AC Voltage and Electrostatic Induction. Teoksessa: Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Rooma, Italia, 10-14.4.2007. 1572-1577. Saatavissa: <https://doi.org/DOI:10.1109/ROBOT.2007.363548>.

Zhang, W. & Meng, G. & Li, H. 2005. Electrostatic micromotor and its reliability. Microelectronics and reliability. Vol. 45 (7), 1230-1242. Saatavissa: <https://doi.org/DOI:10.1016/j.microrel.2004.12.017>.