

Vili Jalonen

AKSIAALIVUOMOOTTORIT JA NIIDEN SOVELLUSKOHTEET

TIIVISTELMÄ

Vili Jalonen: Aksiaalivuomootorit ja niiden sovelluskohteet
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan TkK-tutkinto-ohjelma
7/2019

Aksiaalivuomoottori on erään tyyppinen sähkömoottori, jonka rakenne poikkeaa perinteisestä radiaalivuomoottorista. Aksiaalivuomootorit ovat useimmiten joko kestopagneitoituja tahtikoneita tai harjattomia DC-koneita. Kummankin konetyypin roottori on toteutettu kestopagneetein ja kummankin staattoriin syötetään vaihtojännitettä.

Aksiaalivuomoottorissa roottorin sekä staattorin synnyttämät magneettivuot ovat koneen akselin suuntaiset eli aksiaaliset, kun taas radiaalivuomoottorissa vuot ovat koneen piirin suuntaiset eli radiaaliset. Muutoin näiden eri konetyyppien toiminta ei poikkea toisistaan juurikaan. Aksiaalivuomoottorissa on monia etuja verrattuna radiaalivuomoottoriin, suurimpana etuna niiden suurempi tehotehiys. Suuremman tehotehiyden vuoksi aksiaalivuomoottori soveltuu paremmin käytettäväksi kohteisiin, joissa moottorille ei ole paljoa tilaa. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi sähköautot ja hissit.

Avainsanat: aksiaalivuomoottori, radiaalivuomoottori, sähköauto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SÄHKÖKONEEN PERUSTEET	2
2.1 Pyörivien sähkökoneiden jaottelu	2
2.2 DC-moottorit	4
2.3 AC-moottorit ja niiden toiminta	5
2.3.1 AC-moottorin pyörimisnopeus	5
2.3.2 AC-moottorin vääntömomentti	6
2.4 Kestomagnetoidut tahtikoneet	6
2.4.1 Tahtikoneen toiminta	7
2.4.2 Kestomagnetointi	9
2.5 AC-moottoreiden ohjaus	11
3. AKSIAALIVUOMOOTTORIT	14
3.1 Aksiaalivuokoneiden rakenteet	14
3.2 Aksiaalivuokoneiden toiminta	16
3.3 Aksiaalivuokoneiden ja radiaalivuokoneiden vertailu	18
4. AKSIAALIVUOMOOTTOREIDEN SOVELLUSKOHTEET	20
4.1 Sähköautot	20
4.2 Hissit	22
4.3 Aksiaalivuomoottori laivan propulsiojärjestelmissä	24
4.4 Aksiaalivuokoneiden muita sovelluskohteita	26
5. YHTEENVETO	27
LÄHTEET	28

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen vuoksi useat valtiot ovat suunnitelleet uusien polttomoottoriautojen kieltämistä tulevaisuudessa. Samaan aikaan monet autonvalmistajat ovat kertoneet suunnitelmistaan keskittyä tulevaisuudesta ainoastaan sähköautojen kehitykseen sekä aikeistaan lopettaa polttomoottoriautojen valmistuksen. Tällä hetkellä suurimmat ongelmat sähköautojen suhteen ovat niiden liian korkea hinta keskivertokuluttajalle sekä liian lyhyt ajomatka yhdellä latauksella. Näitä ongelmia pyritään ratkaisemaan muun muassa auton akuston sekä moottorin kehityksellä.

Tässä työssä käsitellään aksiaalivuomootoria, jonka rakenne poikkeaa perinteisestä radiaalivuomoottorista, sekä niiden sovelluskohteita, joista yksi tärkeimmistä on sähköautot. Työssä perehdytään aksiaalivuomoottorin rakenteeseen ja toimintaan sekä tutustaan myös erityyppisiin aksiaalivuokoneisiin. Aksiaalivuomoottorin toimintaa verrataan perinteiseen radiaalivuomoottoriin ja kerrotaan sen hyviä ja huonoja puolia. Työssä perehdytään tarkemmin aksiaalivuomoottorin käyttökohteisiin ja näistä etenkin juuri sen käyttöön sähköautoissa. Työn tavoitteena on antaa lukijalle kuva, miten aksiaalivuomoottoria voidaan käyttää korvaamaan polttomoottoreita ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi.

Työssä perehdytään ensin yleisesti sähkökoneiden toimintaan ja näistä etenkin tahtikoneiden toimintaan ja rakenteeseen. Samassa luvussa kerrotaan myös kestmagnetoiduista tahtikoneista sekä moottoreiden nopeuden ohjauksesta. Tämän jälkeen kerrotaan tarkemmin aksiaalivuomoottorista ja sen toiminnasta sekä rakenteesta. Aksiaalivuomoottoria verrataan perinteisempään radiaalivuokoneeseen ja kerrotaan, mitä etuja niiden käytössä on tietyissä käyttökohteissa. Viimeisessä luvussa tarkastellaan minkälaisissa kohteissa aksiaalivuomoottoreita nykyään käytetään, ja miksi ne soveltuvat hyvin juuri näihin kohteisiin.

2. SÄHKÖKONEEN PERUSTEET

Nimitystä sähkökone käytetään sähkömoottoreista, generaattoreista sekä muuntajista. Sähkömoottori muuttaa sähköistä energiaa mekaaniseksi energiaksi ja generaattori mekaanista energiaa sähköiseksi. Näitä laitteita kutsutaan pyöriviksi sähkökoneiksi. Muuntaja taas muuttaa vaihtojännitteen suuruutta. Tässä työssä tutustutaan tarkemmin pyöriviin sähkökoneisiin ja niiden toimintaan ja näistä edelleen sähkömoottoreihin. [1]

Tässä luvussa keskitytään lähinnä perinteisempien radiaalivuokoneiden toimintaan. Radiaalivuokoneet ovat huomattavasti enemmän käytetty konetyyppi, joten tutustutaan ensin lyhyesti niiden toimintaan. Tämän jälkeen voidaan tutustua tarkemmin aksiaalivuokoneen toimintaan ja verrata tätä radiaalivuokoneeseen. Nimensä mukaisesti näissä radiaalivuokoneissa magneettivuo ylittää ilmvälin radiaalisesti eli koneen säteen suuntaisesti. Aksiaalivuokoneissa taas magneettivuo ylittää ilmvälin aksiaalisesti eli akselin suuntaisesti.

Periaatteessa millä tahansa radiaalivuokoneella voisi olla vastaavanlainen aksiaalivuokone. Käytännön sovelluskohteissa kuitenkin aksiaalivuokoneet ovat pääasiassa harjallisia tai harjattomia DC-koneita, tahtikoneita tai oikosulkukoneita. [2] Työssä keskitytään pääasiassa harjattomiin DC-koneisiin sekä kestopagnetoiuihin tahtikoneisiin.

2.1 Pyörivien sähkökoneiden jaottelu

Pyörivät sähkökoneet voidaan jaotella esimerkiksi niiden toimintatavan tai rakenteen perusteella. Kuvassa 1 on esitetty eräs jaottelutapa, jossa koneet on jaoteltu niiden rakenteen perusteella.

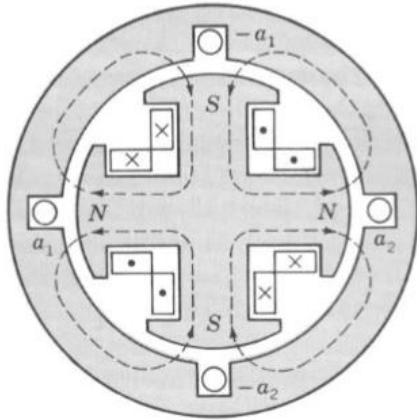


Kuva 1. Pyörivien sähkökoneiden jaottelu

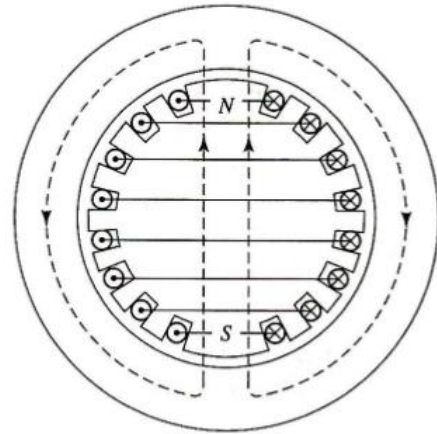
Pyörivät sähkökoneet voidaan jakaa kahteen eri konetyyppiin sen perusteella, toimivatko ne tasavirralla (DC-koneet) vai vaihtovirralla (AC-koneet). DC-koneet voidaan jakaa rakenteensa perusteella harjallisiin koneisiin sekä harjattomiin koneisiin. AC-koneet taas voidaan jakaa toimintansa perusteella tahtikoneisiin sekä epätahtikoneisiin. Näiden kahden konetyypin suurimpana erona on, että tahtikoneen pyörimisnopeus riippuu ainoastaan siitä, mikä on koneeseen kytketyn jännitteen taajuus, kun taas epätahtikoneen pyörimisnopeuteen vaikuttaa jännitteen taajuuden lisäksi myös koneen kuorman suuruus.

Tahtikoneet voidaan jaotella edelleen sen perusteella, miten niiden roottorin magnetointi on toteutettu. Roottorin magnetointitavat ovat sähköinen magnetointi sekä kestmagnetointi. Sähköisesti magnetoiduissa koneissa roottorin magnetointi toteutetaan erillisellä magnetointilaitteistolla, jolloin magnetointiin tarvittava virta otetaan sähköverkosta, johon kone on kytketty. Tällöin magnetointivirta lisää aina jonkin verran koneen häviöitä. Kestomagnetoiduissa tahtikoneissa taas roottorin navat on valmistettu kestmagneeteista, jolloin erillistä roottorin magnetointia ei tarvita. Tällöin roottorin magnetoinnista ei aiheudu ylimääräisiä häviöitä koneeseen, mutta koneen valmistus on kalliimpaa. [1]

Tahtikoneet voidaan jaotella myös niiden rakenteen perusteella avonapaisiin ja umpinapaisiin tahtikoneisiin. Avonapaisessa koneessa roottorin magnetointi tapahtuu erillisissä napakengissä. Umpinapaisessa koneessa taas roottorin magnetointikämmet on jaettu usealle eri uralle eikä roottorissa ole selvästi havaittavia magnetointinapoja. [1] Kuvissa 2 ja 3 on esitetty periaatekuvat umpinapaisen ja avonapaisen tahtikoneen roottoreista. Sekä avonapainen että umpinapainen tahtikone voivat olla joko kestmagnetoituja tai sähköisesti magnetoituja.



Kuva 2. Avonapainen tahtikone [1]



Kuva 3. Umpinapainen tahtikone [1]

Kuten kuvista voidaan havaita, avonapaisessa tahtikoneessa on selvästi havaittavissa roottorin navat, kun taas umpinapaisessa koneessa näitä ei voida tarkkaan havaita. Kuvissa on myös hahmoteltu katkoviivoin roottoreiden aiheuttamia magneettivoita. Kuvassa 2 kyseessä on nelinapainen roottori ja kuvassa 3 kaksinapainen roottori.

2.2 DC-moottorit

Tasavirtamoottorit eli DC-moottorit käyttävät toiminnassaan tasavirtaa. Ne voidaan jakaa harjallisiin tai harjattomiin tasavirtamoottoreihin riippuen niiden rakenteesta. Harjallisessa DC-moottorissa itse moottorille syötetään tasajännitettä, ja kommutaattorilla tasajännite muutetaan vaihtojännitteeksi. Kommutaattori on eräänlainen mekaaninen vaihtosuuntain ja sen toiminta perustuu siihen, että roottorin pyöriä virtajohtimia hankaavat esimerkiksi hiilestä valmistetut harjat. Tällöin roottorin käämiin johtuu vaihteleva sähkövirta. Staattoriin taas muodostetaan magneettiset navat joko sähköisellä magnetoinnilla tai kestopagneeteilla. Staattorissa siis on vakio magneettivuoto. Vaihteleva sähkövirta roottorissa aiheuttaa taas vaihtelevan magneettivuonon. Syötettäessä virtaa roottoriin, alkaa roottori pyörimään magneettisten voimien ansiosta.

Harjattomassa DC-moottorissa ei ole kommutaattoria, vaan jännite muutetaan vaihtojännitteeksi erillisellä taajuusmuuttajalla. Näin ollen itse moottorille syötettävä jännite on vaihtojännitettä. Muunnetulla vaihtojännitteellä luodaan moottorin staattorille vaihteleva magneettivuoto. Roottorille taas muodostetaan magneettiset navat joko sähköisesti tai kestopagneetilla. Harjaton DC-moottori ei siis varsinaisesti toimikaan tasavirralla, vaan on itseasiassa vaihtovirralla toimiva tahtimoottori [3].

2.3 AC-moottorit ja niiden toiminta

Kuten jo aiemmin mainittiin vaihtosähkömoottorit eli AC-moottorit toimivat vaihtovirralla. Niissä koneen staattoriin syötetään tietyn taajuista, yleensä kolmivaiheista jännitettä, joka synnyttää staattoriin samalla taajuudella pyörivän magneettivuon. Moottorin tyypistä riippuen, roottoriin synnytetään magneettivuo joko sähköisesti tai kestopagneeteilla. Kuvan 1 mukaisesti AC-moottorit voidaan jakaa tahti- ja epätahtimoottoreihin. Tahti- ja epätahtimoottorit eroavat toisistaan rakenteellisesti, ja niiden toiminta poikkeaa toisistaan melkoisesti.

2.3.1 AC-moottorin pyörimisnopeus

Vaihtosähkömoottorin pyörimisnopeuteen vaikuttavat koneen ominaisuudet sekä konetta syöttävän sähköverkon taajuus. Moottorin tahtinopeus voidaan laskea kaavasta:

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

missä n_s on koneen tahtinopeus, f on moottoria syöttävän jännitteen taajuus ja p on moottorin napapariluku. Napapariluku kertoo, kuinka monta magneettista napaa moottorin roottorissa on. [1] Jos esimerkiksi moottorissa on kaksi magneettista napaa, kuten kuvan kolme umpinapaisessa tahtikoneessa, moottorin napapariluku on 1.

Pyörimisnopeus voidaan ilmoittaa myös kulmanopeutena ω , joka voidaan laskea kaavalla:

$$\omega = 2\pi n, \quad (2)$$

missä n on moottorin pyörimisnopeus. [1]

Kaavalla (1) saadaan suoraan laskettua tahtimoottorin pyörimisnopeus, sillä tahtimoottori pyörii pysyvässä tilassa keskimäärin tahtinopeudellaan. Epätahtimoottorin pyörimisnopeuden laskennassa taas tulee ottaa huomioon moottorin jättämä s . Epätahtimoottori pyörii aina jättämän verran hitaammin kuin tahtinopeus. Jättämän suuruus voidaan laskea seuraavasti:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}, \quad (3)$$

missä s on moottorin jättämä, n_s on moottorin tahtinopeus ja n on moottorin todellinen nopeus. Jättämä siis kertoo sen, kuinka paljon tahtinopeuttaan hitaammin epätahtimoottori pyörii eli mikä on sen todellinen pyörimisnopeus. [1] Työssä keskitytään

kuitenkin tahtikoneisiin, joilla jättämä on pysyvässä tilassa keskimäärin 0, eli niiden pyörimisnopeus on keskimäärin sama kuin niiden tahtinopeus.

Kaavasta (1) havaitaan, että AC-moottoreiden pyörimisnopeus riippuu ainoastaan jännitteen taajuudesta, moottorin napapariluvusta sekä epätahtikoneen tapauksessa jättämästä. Jos siis moottorin nopeutta halutaan kontrolloida, näitä on pystyttävä muuttamaan moottorin käytön aikana. Moottoreiden nopeuden säädöstä kerrotaan enemmän luvussa 2.5.

2.3.2 AC-moottorin vääntömomentti

Pyörimisnopeuden lisäksi toinen tarkasteltava moottorin ominaisuus on sen tuottama vääntömomentti. AC-moottorin sähköinen vääntömomentti T_{em} voidaan laskea kaavalla:

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega}, \quad (4)$$

missä P_{em} on moottorin sähkömagneettinen teho ja ω moottorin kulmanopeus. Moottorin sähkömagneettinen teho saadaan, kun verkosta otetusta pätötehosta vähennetään moottorissa tapahtuvat sähkömagneettiset häviöt. Edelleen sähkömagneettisesta tehosta saadaan akselille välittyvä pätöteho, kun siitä vähennetään mekaaniset hankaushäviöt. Lopullinen moottorin akselille välittyvä pätöteho P_2 voidaan laskea moottorin hyötysuhteen avulla:

$$P_2 = \eta P_1 \quad (5)$$

missä P_1 on moottorin verkosta ottama pätöteho ja η on moottorin hyötysuhde. Hyötysuhde ottaa huomioon moottorissa tapahtuvat sähköiset ja mekaaniset häviöt. [1] Hyötysuhdetta käytetään hyödyksi vertaillen erilaisia koneita ja konetyyppejä, ja esimerkiksi saman tyyppisten radiaalivuokoneiden ja aksiaalivuokoneiden hyötysuhteet saattavat poiketa toisistaan suuresti.

2.4 Kestomagnetoidut tahtikoneet

Kuten jo aiemmin mainittiin, AC-koneet voidaan jakaa tahtikoneisiin sekä epätahtikoneisiin. Tahtikoneet taas voidaan jakaa avonapaisiin sekä umpinapaisiin tahtikoneisiin, tai niiden roottorin magnetoinnin perusteella sähköisesti magnetoituihin ja kestopagnetoituihin tahtikoneisiin. Tässä alaluvussa tarkastellaan ensin tahtikoneiden rakennetta sekä toimintaa, minkä jälkeen tarkastellaan tarkemmin juuri kestopagnetoituja tahtikoneita.

2.4.1 Tahtikoneen toiminta

Tahtikone koostuu pyörivästä roottorista sekä paikallaan pysyvistä staattorista. Staattori on toteutettu kolmivaiheisella käämityksellä, johon moottorin tapauksessa syötetään kolmivaiheista vaihtovirtaa ja johon generaattorin tapauksessa indusoituu kolmivaiheinen vaihtojännite. Roottorin rakenne taas voi vaihdella koneen tyyppin mukaan. Kuten jo aiemmin mainittiin, roottori voi olla avonapainen tai umpinapainen. Roottorin magnetointi voi myös olla toteutettu joko sähköisesti tai kestopagneetein. Perustoimintaperiaatteen kannalta ei ole suurta vaikutusta, minkä tyyppinen roottori koneessa on. Tarkemmassa tarkastelussa roottorin rakenteella on kuitenkin merkitystä, kuten esimerkiksi magneettivoiden tarkkojen suuntien määrittämisessä sekä moottorin tuottamaan pätöteho ja verkosta ottaman tai verkkoon syöttämän loistehon suuruuden määrittämisessä [1].

Aiemmin kuvassa 2 esitettiin umpinapaisen tahtimoottorin periaatekuva. Kuvassa 4 on esitetty umpinapainen tahtikone, ja kuvasta voidaan havaita, ettei umpinapaisessa roottorissa ole selkeästi nähtävissä magneettisia napoja.

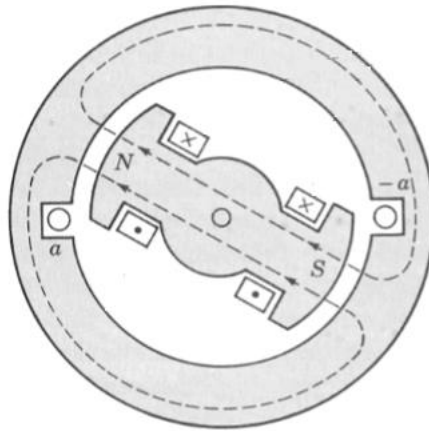


Kuva 4. Umpinapainen tahtikone [4]

Kuvassa tahtimoottori on leikattu auki yhdestä sivustaan. Kuvasta voidaan havaita moottorin sisäistä rakennetta, kuten sen roottori, staattori sekä akseli.

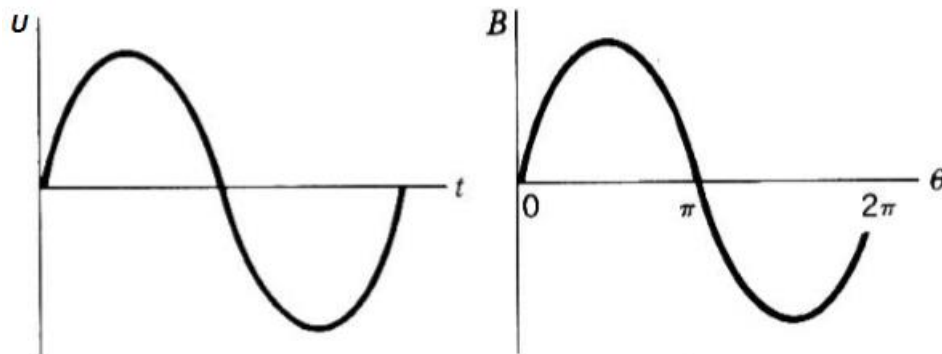
Toimiessaan moottorina tahtikoneen staattoriin syötetään kolmivaiheista vaihtojännitettä. Käämeihin syötetty vaihtojännite synnyttää sinimuotoisesti vaihtelevan magneettivuon. Roottoriin taas synnytetään vakiomagneettivojo joko sähköisesti tasavirralla tai kestopagneeteilla. Muodostuneiden magneettivoiden vaikutuksesta moottorin akseli alkaa pyöriä kaavan (1) nopeudella ja sen akselin vääntömomentti ja pätöteho saadaan selville kaavoilla (4) ja (5).

Kuvassa 5 on esitetty kaksinapaisen avonapaisen tahtikoneen periaatekuva. Kuvassa on selkeyden vuoksi esitetty staattorissa ainoastaan yksi vaihe.



Kuva 5. Kaksinapainen avonapainen tahtikone [1, muokattu]

Kuvassa katkoviivat kuvaavat roottorin magneettisten napojen synnyttämän magneettivuon. Voidaan havaita, että magneettivuo on nyt koneen piirin suuntainen eli radiaalinen. Staattorikäämi on sijoitettu staattorin vastakkaisille puolille. Käämeissä kulkeva virta synnyttää vastakkaisille puolille vastakkaisen suuntaiset sinimuotoisesti muuttuvat magneettivuot. Muodostuvien sähkömagneettisten voimien vuoksi roottori alkaa pyöriä samassa tahdissa staattorin magneettivuon kanssa. [2] Kuvassa 6 on esitetty millaisen magneettivuon tiheyden B staattoriin syötetty jännite U aiheuttaa.



Kuva 6. Käämin jännite ja ilmavälin magneettivuontiheys [1, muokattu]

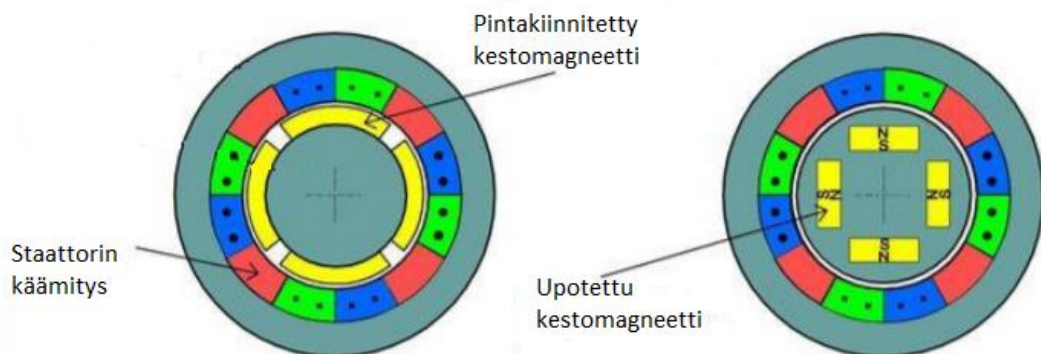
Jännitteen U vaikuttaessa staattorin käämiin ilmaväliin syntyy magneettivuon tiheys B . Roottori kokee kuvan mukaisen magneettivuon ja kaksinapaisen roottorin tapauksessa pyörähtää 2π radiaania eli yhden kierroksen. Nelinapaisen roottorin tapauksessa taas magneettivuo pyörii jälleen 2π radiaania, mutta nyt roottori pyörii vain π radiaania eli puolikkaan kierroksen. Tämä voidaan todeta kaavasta (1), josta huomataan, että koneen napapariluvun kasvaessa, moottorin pyörimisnopeus pienenee.

2.4.2 Kestomagnetointi

Kestomagneetteja voidaan käyttää harjallisten DC-koneiden staattorin magnetoinnissa sekä tahtikoneiden roottoreiden magnetoinnissa. Kestomagnetoinnilla voidaan tahtikoneen tapauksessa saavuttaa monia hyötyjä sähköisesti magnetoituun tahtikoneeseen verrattuna, mutta joissain käyttökohteissa kestopagnetoinnista voi olla myös haittaa.

Kestomagneetti on ferromagneettinen aine, johon on ulkoisella magnetoinnilla synnytetty remanenssivuontiheys. Yleisimpiä käytettyjä materiaaleja kestopagneetteina ovat neodyymi-rauta-boori (NdFeB), samarium-koboltti (SmCo), ferriitit sekä alumiini-nikkeli-koboltti (AlNiCo). Kestomagneettien käytön esteenä on ollut se, että useat näistä materiaaleista ovat harvinaisia ja kalliita. [1]

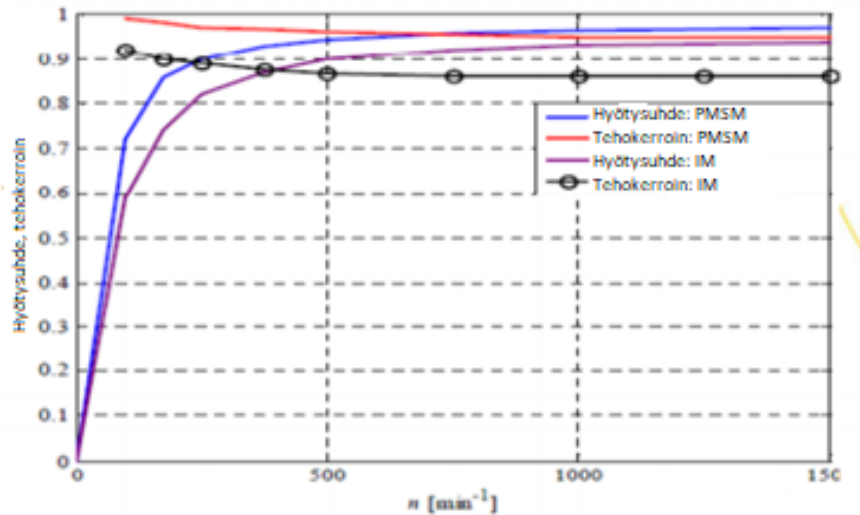
Kestomagnetoidussa tahtikoneessa staattorin rakenne ei poikkea koneesta, jonka roottorinmagnetointi on toteutettu sähköisesti. Roottorin kestopagneetit voidaan kiinnittää joko pintakiinnityksellä tai upottamalla. Kuvassa 7 on esitetty periaatekuvat kummastakin kiinnitystavasta.



Kuva 7. Kestomagnetoidun tahtikoneen roottorin rakenteita [4, muokattu]

Kuvassa vasemmalla roottorin kestopagneetit on pintakiinnitetty. Pintakiinnitettyjen kestopagneettien tilanteessa koneen ominaisuudet vastaavat ideaalitalanteessa umpinapaisen tahtikoneen ominaisuuksia [1]. Kuvassa oikealla taas on esitetty roottorin sisään upottamalla kiinnitetty kestopagneetit. Tämän kaltaisessa tilanteessa koneen ominaisuudet vastaavat avonapaisen tahtikoneen ominaisuuksia [1].

Kestomagnetoidulla tahtikoneella on sähköisesti magnetoituun tahtikoneeseen verrattuna useita hyviä puolia. Roottorin magnetoitua ei tarvitse synnyttää ulkoisesti, minkä takia koneen hyötysuhde paranee, kun roottorille ei tarvitse syöttää erikseen virtaa. Myös koneen huoltotarve vähenee, kun säännöllistä huoltoa vaativat hiiliharjat, joilla magnetoituihin tarvittava virta siirretään roottorille, voidaan jättää pois. [4] Kuvassa 8 on vertailtu kestomagnetoidua tahtikonetta sekä oikosulkukonetta hyötysuhteen ja tehokerroimen osalta pyörimisnopeuden funktiona.



Kuva 8. Kestomagnetoidun ja oikosulkukoneen vertailu [4, muokattu]

Kuvasta voidaan havaita, että kestomagnetoidun tahtikoneen (PMSM) hyötysuhde on noin 5 prosenttiyksikköä parempi kuin oikosulkukoneen (IM). Pääsyy tähän on, ettei roottorissa tapahdu häviöitä. Voidaan myös havaita, että kestomagnetoidussa tahtikoneessa tehokerroin on noin 10 prosenttiyksikköä parempi kuin oikosulkukoneessa.

Kestomagnetoiduilla tahtikoneilla on myös suurempi tehotehokkuus, jolloin pienemmällä koneella voidaan tuottaa suurempi teho verrattuna samankokoiseen sähköisesti magnetoituun koneeseen. Kestomagnetoidu tahtikone toimii myös paremmin pienillä pyörimisnopeuksilla, minkä johdosta vaihteiston tarve vähenee. Kestomagnetoiduun tahtikoneeseen voidaan myös asentaa helpommin useampia napoja kuin sähköisesti magnetoituun tahtikoneeseen, jolloin moottorin tuottama vääntömomentti kasvaa, vaikka koneen koko ei kasva merkittävästi. [4] Myös koneen jäähdytyksestä tulee helpompaa, kun roottorissa ei synny lämpöhäviöitä [1].

Kestomagneettien käytössä tahtikoneissa on myös haittoja. Koneen käydessä nimellisaika nopeammalla pyörimisnopeudella roottorin magneettivuota tulisi heikentää. Kuitenkin kestomagneettien tapauksessa tämä on haastavaa, jolloin joudutaan käyttämään muita metodeja, jotta vältetään ongelmia. Kestomagneetit ovat myös harvinaisia ja kalliita, sekä niitä valmistavat vain muutamat maat maailmassa. Tämän

vuoksi kestmagnetoidut tahtikoneet ovat esimerkiksi oikosulkukoneita noin 20-25 %:a kalliimpia. [4] Lisäksi käytettäessä tahtikoneita generaattorina, etenkin suuritehoisten tahtikoneiden tapauksessa on tärkeää kontrolloida koneen loistehoa ja samalla koneeseen kytketyn verkon tehokerrointa. Normaalisti tämä onnistuu juuri roottorin magnetointia muuttamalla, mutta kestmagneettien tapauksessa tämä ei onnistu. Siksi etenkin juuri suuritehoisissa generaattoreina toimivissa tahtikoneissa ei ole järkevää käyttää kestmagneetteja. Kestomagnetoitujen moottoreiden kohdalla tätä ongelmaa ei ole, sillä niille syötetään jännite useimmiten taajuusmuuttajalla, jolloin niiden loistehoa pystytään säätämään.

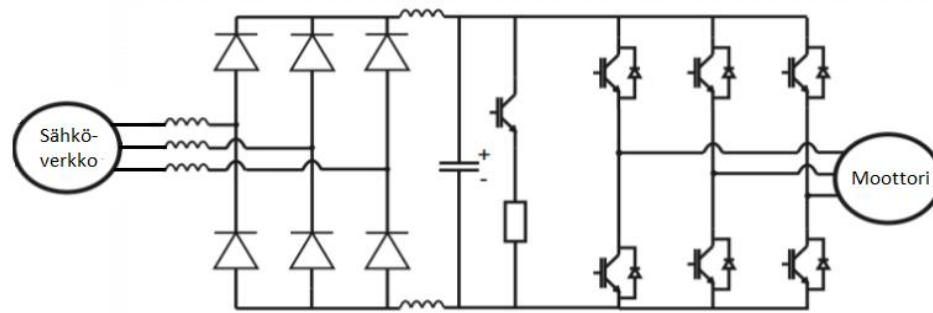
2.5 AC-moottoreiden ohjaus

Kuten luvussa 2.3.1 kaavasta (1) havaitaan, AC-moottorin pyörimisnopeus määräytyy moottorin napapariluvun sekä jännitteen taajuuden mukaan. Vaihteiston avulla pystytään muuttamaan akselin pyörimisnopeus kuormalle sopivaksi, mutta moottorin pyörimisnopeus pysyy silti samana. Lisäksi vaihteisto aiheuttaa aina jonkin verran tehohäviöitä.

Moottorin napapariluku määräytyy moottorin valmistuksen yhteydessä eikä sitä pystytä käytön aikana muuttamaan. Suoraan sähköverkkoon kytkettynä myöskään jännitteen taajuuteen ei pystytä vaikuttamaan. Aikaisemmin kuormalle välittyvää pyörimisnopeutta muutettiin vaihteistolla, mutta nykyään kuitenkin jännitteen taajuutta kyetään muokkaamaan erillisillä taajuusmuuttajilla, jolloin vaihteistolle ei ole enää tarvetta. Taajuusmuuttaja kytketään sähköverkon ja moottorin väliin ja sen avulla pystytään syöttämään moottorille juuri oikean taajuista jännitettä tarvittavan pyörimisnopeuden mukaan.

Taajuusmuuttaja on tehoelektronikkalaite, jolla muutetaan vaihtojännitteen taajuutta. Taajuusmuuttajien nopea kehitys viime vuosikymmeninä on mahdollistanut AC-moottoreiden käytön nopeuden säätöä vaativissa kohteissa ja samalla vähentänyt enemmän huoltoa vaativien DC-moottoreiden käyttöä. Ennen taajuusmuuttajia tarkkaa nopeuden säätöä vaativissa kohteissa kyettiin käyttämään ainoastaan DC-moottoreita niiden yksinkertaisen säädön vuoksi.

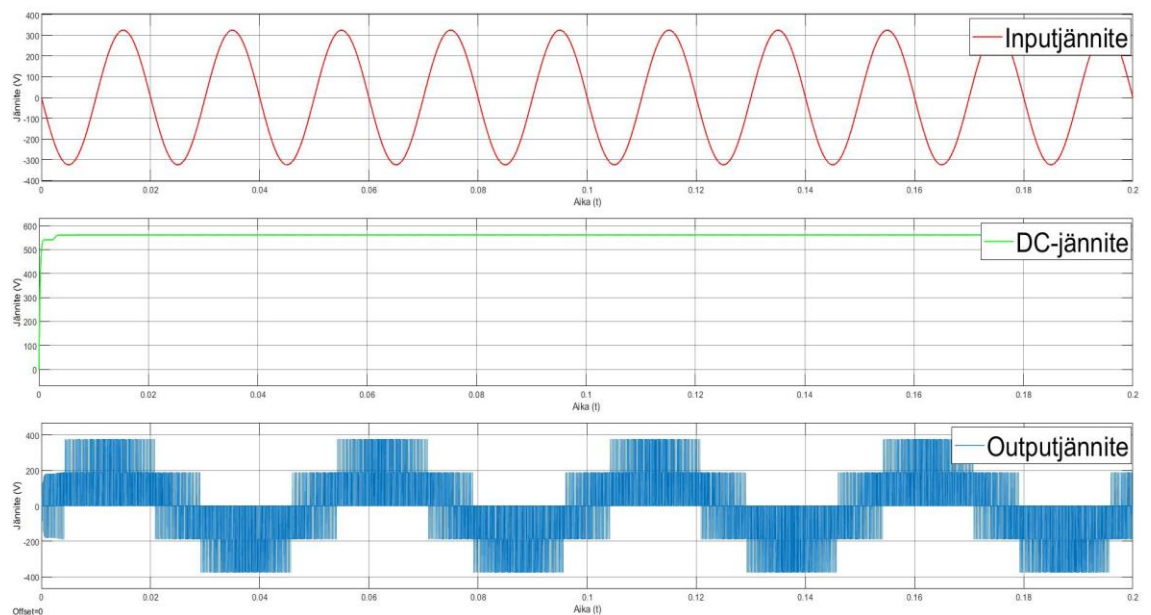
AC-moottorin erään tyyppisen taajuusmuuttajan topologia on kuvattu kuvassa 9.



Kuva 9. Taajuusmuuttajan topologia [4, muokattu]

Taajuusmuuttaja koostuu useasta eri ”osasta”. Vasemmalta oikealle tarkastellessa osat ovat, L-suodatin, tasasuuntain, DC-suodatin, jarrutuksessa syntyneen energiaa purkava vastus sekä invertteri.

Taajuusmuuttaja ottaa verkosta tietyn taajuista vaihtojännitettä, tasasuuntaa sen tasajännitteeksi ja muuttaa sen takasin tarvittavan taajuiseksi vaihtojännitteeksi. Kuvassa 10 on esitetty kuvan 9 mukaisen taajuusmuuttajan kuvaajat input-, DC- ja outputjännitteille. Kuvassa inputjännitteen taajuus on 50 Hz kuten Suomen sähköverkossa, outputjännitteen taajuuden arvoksi on asetettu 20 Hz.



Kuva 10. Taajuusmuuttajan input-, DC- ja outputjännite

Kuvasta voidaan havaita, että taajuusmuuttaja ottaa verkosta 50 Hz:n taajuista sinimuotoista jännitettä ja syöttää moottorille 20 Hz:n taajuudella vaihtelevaa jännitettä. Outputjännite ei ole sinimuotoista, mutta moottori kokee sen 20 Hz:n taajuudella vaihtelevana vaihtojännitteenä ja toimii samoin kuin jännitteen ollessa sinimuotoista. Kun

moottoria syötetään tasajännitteellä eli kyseessä on harjaton tasavirtamoottori, tarvitaan ainoastaan invertteri. Tällöin invertterille syötetään suoraan tasajännitettä ja invertteri muuttaa jännitteen tarvittavan taajuiseksi vaihtojännitteeksi.

3. AKSIAALIVUOMOOTTORIT

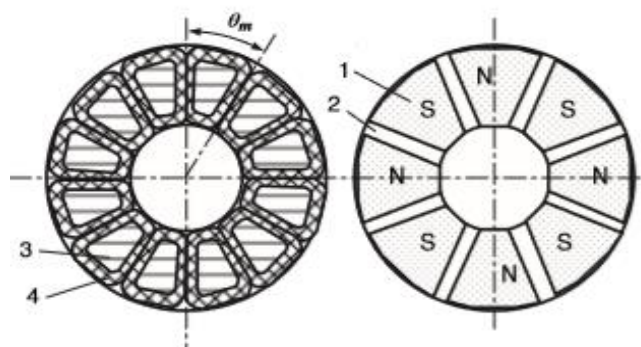
Tässä luvussa käsitellään aksiaalivuokoneiden rakenteita ja niiden toimintaa. Tarkastelussa keskitytään kestmagnetoitujen tahtikoneiden tarkasteluun, sillä kyseinen konetyyppi on useimmiten käytetty aksiaalivuomootoreissa. Kestomagnetoiduista aksiaalivuokoneista käytetään lyhennettä AFPM-koneet [2].

Vaikka nykyään suurin osa käytössä olevista sähkökoneista on radiaalivuokoneita, ensimmäiset kehitetyt sähkökoneet olivat aksiaalivuokoneita. Muun muassa Michael Faraday kehitti aksiaalivuokoneita jo vuonna 1831. Kuitenkin pian radiaalivuokoneen ensimmäisten patenttien jälkeen, ne alkoivat hallita markkinoita. Syitä tähän oli pääasiassa magneettisten materiaalien huono laatu, mikä vaikeutti niiden käyttöä, ja näin ollen myös kestmagnetoitujen aksiaalivuokoneiden kehitystä. [2] Kuitenkin nykyään etenkin sähköautojen yleistyessä, aksiaalivuokoneiden käyttö ja tutkimus on lisääntynyt.

3.1 Aksiaalivuokoneiden rakenteet

Aksiaalivuokoneissa kuten muissakin pyörivissä koneissa staattori pysyy paikoillaan ja roottori pyörii. AFPM-koneissa roottori on toteutettu kestmagnetoinnilla ja staattoriin tuotetaan vaihtuva magneettivuo kolmivaiheisella vaihtovirralla.

Tarkastellaan seuraavaksi tarkemmin staattorin ja roottorin rakenteita. Kuvassa 11 on esitetty aksiaalivuokoneen staattorin ja roottorin periaatekuvat.



Kuva 11. Aksiaalivuokoneen staattori ja roottori [2]

Kuvassa staattorin ja roottorin osat on numeroitu seuraavasti: 1. kestmagneetti, 2. roottorikiekko, 3. staattorin napa, 4. staattorin käämitys. Roottori koostuu kahdeksasta navasta eli sen napapariluku on 4. Staattori taas koostuu 12 käämistä. Aksiaalivuokoneen tyypistä riippumatta roottorin rakenne on aina samanlainen,

ainoastaan napojen määrä vaihtelee. Staattorin rakenne voi vaihdella jonkin verran tyypistä riippuen. Aksiaalivuokoneessa voi olla tyypistä riippuen yksi roottori ja yksi staattori, kaksi staattoria ja yksi roottori tai päinvastoin, tai useita roottoreita ja staattoreita. [2]

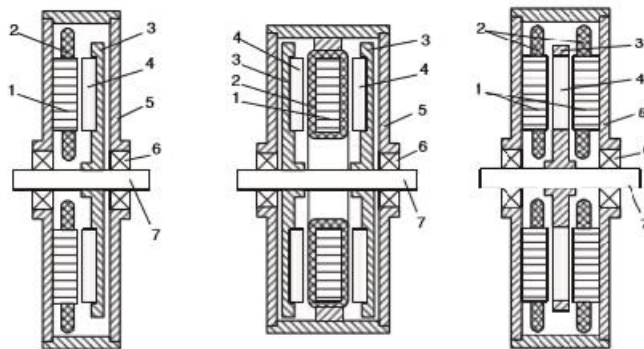
Kuvassa 12 on esitetty erään tyypiset staattorin käämi sekä roottorin kestmagneetti.



Kuva 12. Staattorin käämi sekä roottorin kestmagneetti [6]

Käämit sekä kestmagneetit kiinnitetään rinnakkain kuvan 10 mukaisesti. Kuvassa staattorin käämi koostuu rautasydäimestä sekä itse käämityksestä. Käämijohdin on kierretty magneettisen metallin ympärille, mikä vahvistaa käämin synnyttämää magneettivuota.

Aksiaalivuokoneet voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan. Single-sided, double-sided- ja multidisc AFPM -koneet. Double-sided -AFPM -koneet voidaan vielä jakaa roottorikeskeisiin ja staattorikeskeisiin koneisiin. Lisäksi kaikissa AFPM-koneissa staattorin rakenne voi olla uritettu, uraton tai avonapainen. Kuvassa 13 tarkastellaan eri tyypisiä AFPM-rakenteita. [2]



Kuva 13. Vasemmalla single-sided uritettu AFPM-kone, keskellä double-sided uraton AFPM-kone, joka on staattorikeskeinen ja oikealla roottorikeskeinen uritettu double-sided AFPM-kone [2, muokattu]

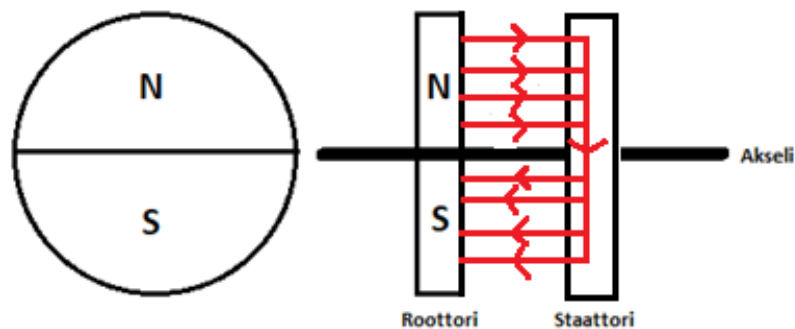
Kuvassa aksiaalivuokoneen osat on numeroitu: 1. staattorin rautasydän, 2. staattorikäänitys, 3. roottori, 4. roottorin kestmagneetti, 5. koneen runko, 6. laakerit, 7. akseli [2]. Kuvassa vasemmalla on esitetty single-sided AFPM-kone. Siinä toisella puolen konetta on kestmagnetoitu roottori ja toisella puolen sähköisesti magnetoitu staattori. Roottorin kestmagneettinavat muodostavat vakio magneettivuon ja staattorin käämit muodostavat vaihtelevan magneettivuon. Näiden välisten sähkömagneettisten voimien johdosta roottori alkaa pyöriä.

Keskellä kuvassa taas on staattorikeskeinen double-sided AFPM-kone. Siinä staattori on keskellä kahden kestmagnetoidun roottorin välissä. Oikealla puolen kuvassa taas on roottorikeskeinen double-sided AFPM-kone. Tässä kestmagnetoitu roottori on kahden staattorin välissä.

3.2 Aksiaalivuokoneiden toiminta

Tarkastellaan seuraavaksi kestmagnetoitujen aksiaalivuokoneen toimintaperiaatetta. Tarkastellaan ensin millaisen magneettivuon kestmagnetoitu roottori aiheuttaa. Seuraavaksi tarkastellaan millaisen magneettivuon staattorin käämeihin syötetty jännite aiheuttaa. Lopuksi kerrotaan miten aksiaalivuokone toimii toimiessaan moottorina.

Kuten aiemmin mainittiin, aksiaalivuokoneen roottori koostuu kestmagneeteista. Seuraavaksi tarkastellaan millaisen magneettikentän kaksinapainen kestmagnetoitu roottori synnyttää. Kuvassa 14 on esitetty kyseisen roottorin periaatekuva sekä sen synnyttämä magneettivuon.



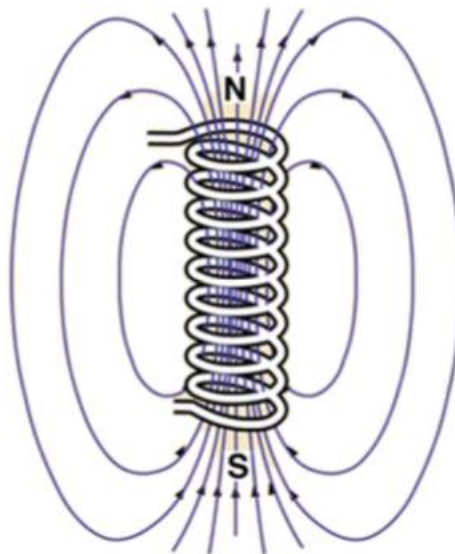
Kuva 14. Kaksinapainen aksiaalivuokoneen roottori ja sen aiheuttama magneettivuon

Kuvassa vasemmalla on kuvattu kaksinapainen kestmagnetoidun aksiaalivuokoneen roottori akselin suunnasta katsottuna. Oikealla taas on hahmoteltu millaisen magneettivuon kyseinen roottori aiheuttaa staattorille. Kuvasta voidaan havaita, että nyt roottorin magneettiset navat synnyttävät akselin suuntaisen eli aksiaalisen magneettivuon, kun taas radiaalivuokoneen tapauksessa magneettivuon havaittiin olevan radiaalinen. Kuvassa roottorin ja staattorin välimatka on liioitellun suuri,

käytännön moottoreissa roottorin ja staattorin väli on korkeintaan muutamia millimetrejä, useimmiten ei näinkään suuri.

Aksiaalivuokoneessa staattori on toteutettu käämeihin kuten radiaalivuokoneessakin. Myös aksiaalivuokoneen tapauksessa, kun käämeihin johdetaan sähkövirtaa, syntyy jännitteen taajuuden mukaan vaihteleva magneettivuoto.

Aiemmin kuvassa 12 on kuvattu aksiaalivuokoneen staattorin yksi käämi. Käämissä kulkeva sähkövirta muodostaa 90 asteen kulmassa virran kulkusuuntaan olevan magneettivuon. Kuvassa 15 on hahmoteltu yksittäisen käämin synnyttämää magneettivuota.



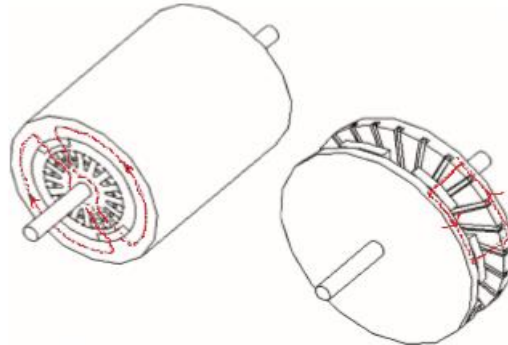
Kuva 15. Käämin synnyttämä magneettivuoto [5]

Kuvasta havaitaan, että käämissä kulkeva virta aiheuttaa nyt alhaalta ylös suuntaavan magneettivuon. Virran kulkiessa myös magneettivuon suunta vaihtuu. Aksiaalivuokoneessa käämit on aseteltu siten, että syntyvä magneettivuoto on akselin suuntainen eli aksiaalinen. Käämeihin syötetään sinimuotoisesti vaihtelevaa jännitettä, jolloin magneettivuon tiheys B muuttuu myös sinimuotoisesti kuvan 6 mukaisesti.

Nyt siis syötettäessä staattorin käämeihin vaihtojännitettä käämin läpi kulkeva virta muodostaa magneettivuon, joka on akselin suuntainen. Magneettivuoto muuttuu samalla taajuudella kuin jännite. Roottorin kestopagneettien muodostama magneettivuoto taas pysyy vakiona. Magneettisten voimien vuoksi roottori alkaa pyöriä samaan tahtiin kuin staattorille syötetty jännite. Aksiaalivuomoottori toimii siis täysin samalla periaatteella kuin radiaalivuomoottori, mutta siinä magneettivuotot ovat akselin suuntaiset, eivätkä säteen suuntaiset kuten radiaalivuokoneella.

3.3 Aksiaalivuokoneiden ja radiaalivuokoneiden vertailu

Tarkastellaan vielä lyhyesti aksiaalivuokoneen (AFPM) sekä radiaalivuokoneen (RFPM) eroja. Kuvassa 16 on esitetty radiaalivuokoneen ja aksiaalivuokoneen topologiat.



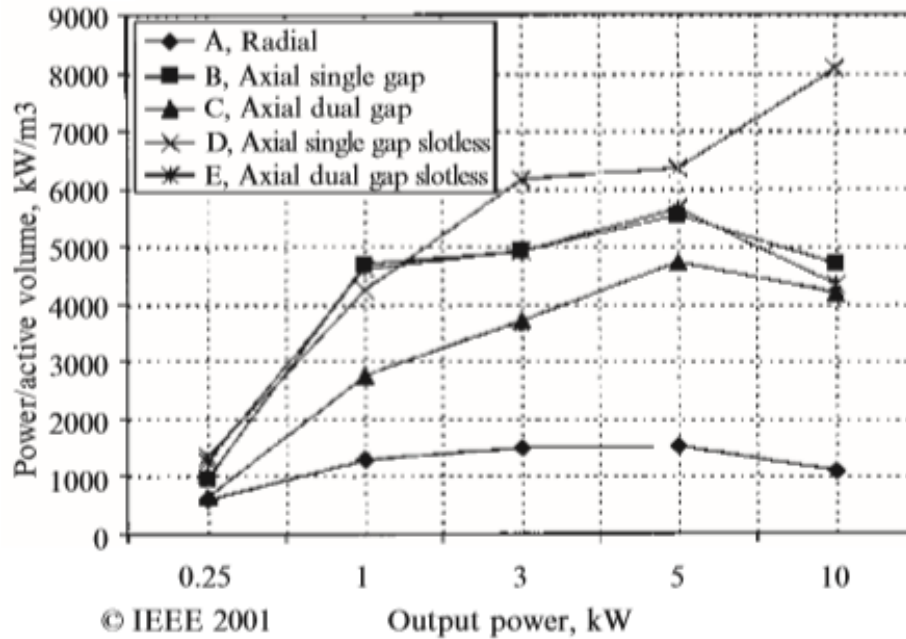
Kuva 16. RFPM vasemmalla ja AFPM oikealla [2, muokattu]

Kuvassa on esitetty punaisin katkoviivoin kestmagnetoidun roottorin aiheuttamat magneettivuot. Voidaan havaita, että radiaalivuokoneessa magneettivuo on säteen suuntainen, kun taas aksiaalivuokoneessa se on akselin suuntainen. Käytännössä kummakin koneen toimintaperiaate on täysin samanlainen, ainoastaan koneiden magneettivoiden suunnat ovat erilaiset. Kuvasta huomataan myös, että radiaalivuokone yleensä on akselin suuntaisesti huomattavasti aksiaalivuokonetta pidempi, kun taas aksiaalivuokone on säteensuuntaisesti radiaalivuokonetta leveämpi.

Aksiaalivuokoneella on radiaalivuokoneeseen verrattuna monia hyviä puolia tiettyjä sovelluskohteita ajatellen. Alla on lueteltu tärkeimpiä näistä: [2]

- Suurempi halkaisija-pituus suhde
- Niiden ilmaväli on tasomainen ja näin ollen sitä on jonkin verran helpompi säätää
- Suurempi tehotiheys eli pystytään tuottamaan suurempi teho kuin vastaavan kokoisella radiaalivuokoneella
- Niiden topologia on ideaalinen suunniteltaessa modulaarisia koneita eli koneita, jotka koostuvat useista samanlaisista moduuleista
- Suurempi halkaisija, jolloin voidaan käyttää useampia napoja
- Suuremman halkaisijan vuoksi myös jäähdytys on helpompaa

Etenkin suurempi tehotiheys on monissa käyttökohteissa tärkeää, jos moottorille on käytettävissä vain vähän tilaa. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi sähköautot sekä konehuoneettomat hissit. Kuvassa 17 on vertailtu radiaalivuomoottorin sekä muutaman erityyppisen aksiaalivuomoottorin tehotiheyksiä.



Kuva 17. Radiaalivuomoottorin (radial) ja eri tyyppisten aksiaalivuomoottoireiden (axial) tehottiheyksiä eritehoisilla moottoreilla [2, muokattu]

Kuvassa on esitetty miten neljän erityyppisen aksiaalivuomoottorin sekä vastaavan radiaalivuomoottorin tehottiheydet muuttuvat moottorin tehon kasvaessa. Kuvasta voidaan havaita, että moottorin tehon kasvaessa aksiaalivuomoottorin tehottiheys kasvaa keskimäärin jopa nelinkertaiseksi radiaalivuomoottoriin verrattuna. Havaitaan myös, että hyvin pienillä tehoilla taas tehottiheyksillä ei ole kovin suuria eroja.

Myös aksiaalivuomoottorin suurempi halkaisija verrattuna radiaalivuomoottoriin on suuri etu aksiaalivuomoottorin hyväksi. Moottoriin voidaan sijoittaa useampia napoja ja näin ollen sitä voidaan käyttää helpommin käyttökohteissa, joissa moottorin pyörimisnopeus on pieni [2]. Vuonna 2002 tehdyssä tutkimuksessa [7] tutkittiin aksiaalivuomoottorin sekä radiaalivuomoottorin ominaisuuksia. Tutkimuksen referenssikohteita olivat pieninopeuksiset käyttökohteet kuten sähköauton in-wheel -tyyppinen moottori sekä tuulivoimalan vaihteeton generaattori. Tutkimuksessa tultiin siihen tulokseen, että on perusteltua käyttää aksiaalivuomoottoireita, kun moottorissa on vähintään 10 napaa ja kun moottorin aksiaalinen pituus on pieni. Tutkimuksen tulos siis tukee aiemmin kerrottua väitettä aksiaalivuomoottoireiden soveltuvuudesta käyttökohteisiin, joissa moottorin pyörimisnopeus on pieni.

4. AKSIAALIVUOMOOTTOREIDEN SOVELLUSKOHTEET

Aksiaalivuomootoreilla on nykyään useita sovelluskohteita. Kuten edellä mainittiin, yksi aksiaalivuomootoreiden eduista perinteisiin radiaalivuomootoreihin verrattuna on niiden suurempi tehotehiheys. Ne siis pystyvät tuottamaan suuremman tehon verrattuna samankokoiseen radiaalivuomootoriin. Etenkin sähköautoissa, joissa auton paino pyritään pitämään mahdollisimman pienenä, on otettu käyttöön aksiaalivuomootoreita. Muita kohteita, joissa moottorin tulee viedä mahdollisimman vähän tilaa, ovat esimerkiksi hissit. Suomalainen yritys Kone Oyj on ollut edellä kävijä aksiaalivuomootoreiden käytössä hissitekologiassa.

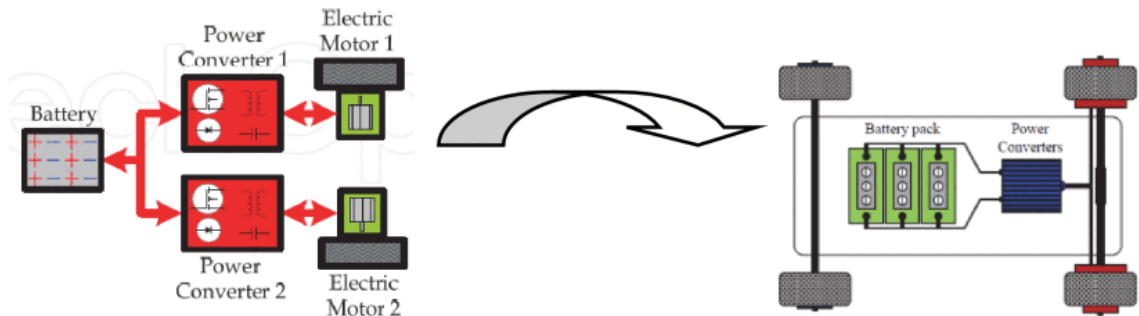
Tässä luvussa tarkastellaan aksiaalivuokoneiden käyttökohteita, joista isoimpana sähköautot. Lisäksi tutustutaan hieman niiden käyttöön hisseissä, merenkulussa sekä muissa pienemmissä käyttökohteissa.

4.1 Sähköautot

Sähköautoihin liittyvien tutkimusten määrä on kasvanut suuresti viime vuosina. Suurimpia syitä tähän ovat ilmastomuutos ja sen aiheuttamat ongelmat sekä huoli öljyvarojen riittävydestä. [8] Aksiaalivuomootorit ovat osoittautuneet erittäin käyttökelpoisiksi ratkaisuiksi sähköautojen moottoreiksi. Niillä on monia hyviä ominaisuuksia verrattuna radiaalivuomootoriin, tärkeimpänä ominaisuutena niiden suurempi tehotehiheys, jolloin moottori vie vähemmän tilaa ja tuo autoon vähemmän lisäpainoa.

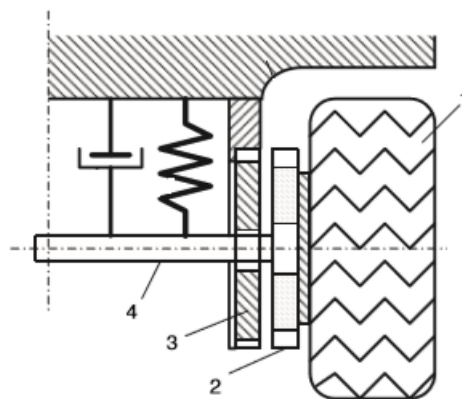
Sähköautot voidaan jakaa kolmeen luokkaan: hybridautot (HEV), täyssähköautot (EV) sekä vetyautot (FCEV) [2]. Hybridautoissa on sekä polttomoottori, että sähkömoottori, joita kumpaakin käytetään halutun mukaisesti. Täyssähköauto taas toimii pelkästään sähkömoottorilla ja moottori saa tarvitsemansa sähköenergian akustostaan. Vetyauto toimii myös ainoastaan sähkömoottorilla, mutta sen moottorin tarvitsema sähköenergia tuotetaan vetykennoilla.

Keskitytään seuraavaksi täyssähköauton toimintaan ja etenkin aksiaalivuomoottorin käyttöön täyssähköautossa. Kuvassa 18 on kuvattu kaksimoottorisen täyssähköauton sähkönsyöttöä.



Kuva 18. Täyssähköauton moottoreiden sähkönsyöttö [8]

Täyssähköautossa auton akustosta syötetään tasajännitettä kahdelle invertterille (Power Converter 1 ja 2). Inverttereillä tasajännite muunnetaan tarvittavan taajuiseksi vaihtojännitteeksi. Vaihtojännitteen taajuus riippuu kaavan (1) mukaisesti siitä, kuinka suuri moottorin pyörimisnopeus halutaan olevan, eli toisin sanoen kuinka nopeasti auton halutaan liikkuvan. Vaihtojännitteet syötetään kahdelle moottorille, joista kumpikin pyörittää yhtä rengasta. Kuvan mukaista tilannetta, jossa rengas on kiinnitetty suoraan moottoriin, moottoria kutustaan napamoottoriksi (in-wheel) [2, 9]. Tällöin jokaisella renkaalla on oma erillinen moottori. Tällöin yksittäisen moottorin teho voi olla pienempi, minkä johdosta myös yksittäisen moottorin koko pienenee. Tämä taas jättää enemmän tilaa esimerkiksi akustolle. [9] Kuvassa 19 on esitetty tarkemmin napamoottorin käyttöä sähköautossa.



Kuva 19. Napamoottori [2, muokattu]

Napamoottorissa auton rengas on kiinnitetty kuvan mukaisesti suoraan moottorin roottoriin. Kuvassa on esitetty auton osat: 1 rengas, 2 roottori, 3 staattori ja 4 akseli [2]. Myös radiaalivuomoottorilla pystyttäisiin toteuttamaan samantyyppisiä

napamoottoriratkaisuja, mutta ne ovat enemmän tilaa vieviä. Suurin syy aksiaalivuomootoreiden käyttöön sähköautoissa onkin niiden verrattain pienempi koko.

4.2 Hissit

Yksi aksiaalivuomootoreiden käyttökohteista on hissitekniologia. Suomalainen yhtiö Kone Oyj on toiminut edelläkävijänä aksiaalivuomootoreiden käytössä hissien moottoreina. Vuonna 1992 Kone esitteli ensimmäisenä vaihteettomat sähkömekaanisilla drive-systeemeillä varustetut moottoritekniologiansa. Moottoreina näissä käytettiin low-speed kestmagnetoituja aksiaalivuomootoreita. Moottorit olivat tyypiltään harjattomia DC-moottoreita. Niissä tilaa vievä konehuone voitiin vaihteiston puuttumisen vuoksi korvata sähkömekaanisella drive-systeemillä. Verrattuna low-speed oikosulkumoottoriin AFPM-koneella saavutettiin jopa kaksinkertainen hyötysuhde ja kolminkertainen tehokerroin. [2] Nykyään Koneen käyttämät moottorit ovat aksiaalivuotahtimoottoreita ja niille syötettävän jännitteen taajuutta muokataan taajuusmuuttajilla [10].

Kuvassa 20 on esitetty Koneen MonoSpace™-tyyppin hisseissä käytetty Eco Disc - aksiaalivuomoottori.



Kuva 20. Kone Oy:n Eco Disc -hissimoottori [1]

Kone Oyj:n MonoSpace™-hissikonsepti on konehuoneeton hissijärjestelmä, jossa moottori on kuvan mukaisesti hissikuilussa kiinnitettynä hissikorin kiskoihin. Tämän lisäksi hissien ohjauselektronikka on upotettu yleensä ylimmän kerroksen seinään hissien oven viereen. Näistä syistä johtuen hisseissä ei tarvita erillistä tilaa vievää konehuonetta.

MonoSpace™ hissejä asennetaankin paljon vanhoihin rakennuksiin, joissa hissille ei ole varattu rakennettaessa ylimääräistä tilaa [11].

Siirtymisen konehuoneettomiin hisseihin on mahdollistanut muun muassa aksiaalivuomootoreiden kehitys. Kuten aiemmin on mainittu, aksiaalivuomoottorin tehotiheys on suurempi, jolloin sen koko on pienempi verrattuna vastaavan tehoiseen radiaalivuomoottoriin. Moottorin koon pienentyessä se pystytään sijoittamaan ahtaisiinkin paikkoihin, kuten juuri hissikuiluihin. Toinen suuri tekijä konehuoneettomuuteen siirryttäessä on ollut taajuusmuuttajien nopea kehitys. Taajuusmuuttaja vie huomattavasti vähemmän tilaa kuin vaihteisto ja on myös energiatehokkaampi vaihtoehto kuin vaihteisto.

Taulukossa 1 on vertailtu erilaisia hissien nostolaiteteknologioita. Vertailussa vertailtiin vaihteistolla varustettua systeemiä ja sähkömekaanisella drive-systeemillä varustettua AFPM-systeemiä.

Taulukko 1. Nostolaiteteknologioiden vertailua [2, muokattu]

	Vaihteistollinen systeemi	Vaihteeton AFPM-systeemi
hissin nopeus (m/s)	1,0	1,0
akselin teho (kW)	5,5	3,7
moottorin nopeus (rpm)	1500	95
moottorin sulakekoko (A)	35	16
vuosittainen energian kulutus (kWh)	6000	3000
systeemin hyötysuhde	0.4	0.6
öljyn tarve (l)	3,5	0
massa (kg)	430	170
melutaso (dB)	70...75	50...55

Taulukosta voidaan havaita, että vaikka hissien nopeus on kummassakin systeemissä sama, AFPM-systeemi vaatii pienemmän tehon akselilleen. Moottoria voidaan myös käyttää huomattavasti pienemmällä kierrosnopeudella, mikä on yksi syy siihen, että AFPM-systeemien aiheuttama melutaso on myös huomattavasti pienempi. Toinen melutasoon vaikuttava on vaihteiston puute, sillä myös vaihteisto aiheuttaa jonkin verran melua. Pienemmän akselitehon vuoksi myös moottorille tarvittava virta pienenee, minkä johdosta AFPM-moottorin sulakekoko on pienempi kuin vaihteellisella systeemillä. Koko nostolaitteen hyötysuhde on AFPM-järjestelmässä kolmasosan parempi ja vuosittainen energian kulutus puolet pienempi kuin vaihteellisella systeemillä. Vaihteettomassa systeemissä tarvetta öljylle ei ole, jolloin huoltokertojen määrä pienenee oleellisesti. Lisäksi vaihteettoman AFPM-systeemin massa on yli puolet pienempi kuin vaihteellisella järjestelmällä. Näiden syiden perusteella vaihteeton AFPM-systeemi onkin hissikäytössä huomattavasti parempi kuin vaihteellinen järjestelmä.

4.3 Aksiaalivuomoottori laivan propulsiojärjestelmissä

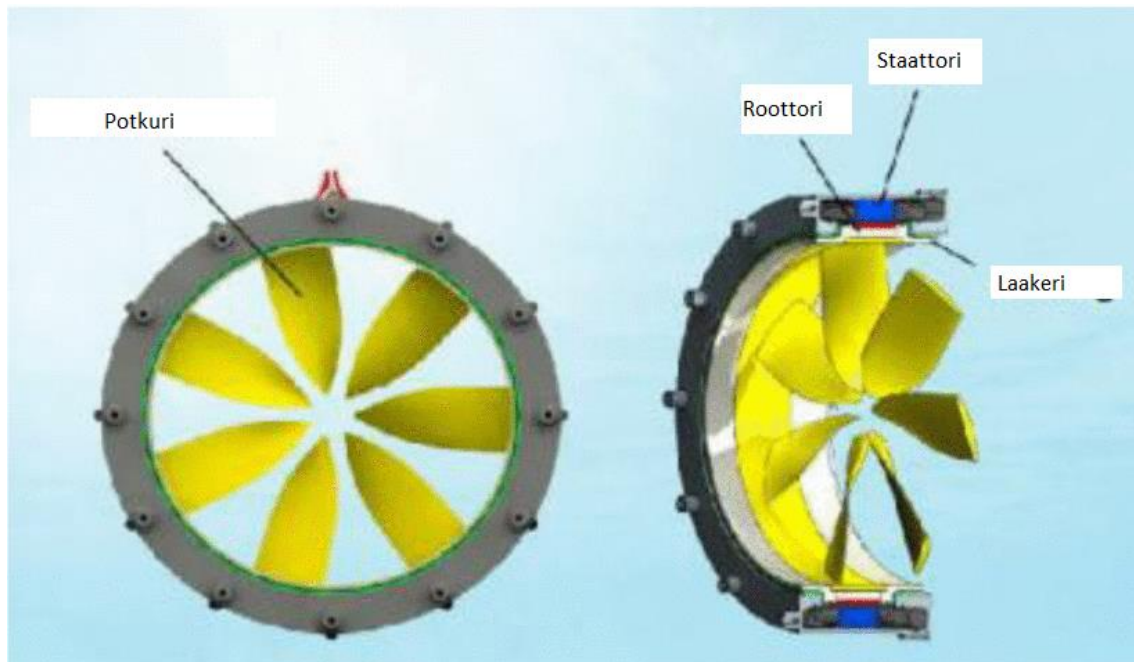
Euroopan ympäristökeskuksen (EYK) artikkelin mukaan, vuoteen 2050 mennessä 17 prosenttia koko maailman hiilidioksidipäästöistä aiheutuu laivaliikenteestä. Hiilidioksidipäästöjen lisäksi laivaliikenne synnyttää myös ilman epäpuhtauksia, kuten rikki- ja typpidioksidipäästöjä, melusaastetta sekä vesistöjen saastumista. [12] Suurin osa näistä haitoista aiheutuu laivan polttomootoreista. Yhtenä mahdollisena keinona vähentää päästöjä on käyttää sähkömoottoria, ja nimenomaan aksiaalivuomoottoria laivan propulsiojärjestelmässä.

Laivan propulsiojärjestelmät eli potkurilaitteistot voidaan jakaa kahteen eri luokkaan: mekaanisiin ja sähköisiin. Näistä tehokkaampi on tutkimusten mukaan juuri sähköinen propulsiojärjestelmä. Sähköisen järjestelmän etuja ovat esimerkiksi parempi kokonaishyötysuhde, pienemmät melu- ja värinä Haitat, laivan hyötykuorman lisääntyminen sekä parempi kontrollointi ja nopeampi ohjaus. [13]

Sähkömoottorien käytössä merenkulun propulsiojärjestelmissä on monia etuja verrattuna tavanomaisempiin dieselmoottoreihin. Alun perin käytettiin pääasiassa tahtikoneita, sillä niitä pystyttiin käyttämään yhdessä luonnollisesti kommutoitujen tyristorisuuntaajien kanssa. Sittemmin suuntaajatekniikoiden kehittyessä on pystytty käyttämään myös muunlaisia moottoreita. Kestomagnetoidun aksiaalivuomoottorin käyttöä tukevat niiden suuri tehotehous, kevyempi paino sekä hyvä suorituskyky. Ne soveltuvat hyvin jopa megawattiluokan moottoreille, jotka pyörittävät laivan propelleja. [14]

2018 joulukuussa julkaistussa artikkelissa kerrotaan uudentyyppisestä sähkömoottorista, rengaskäämitetystä aksiaalivuokoneesta (ring-winding axial flux machine), sekä sen käytöstä merenkulussa. Tällä konetyypillä on monia etuja, kuten luotettavuus, mahdollisuus suuriin vaiheiden ja napojen määrää sekä yksinkertainen rakenne. Tällaiset ominaisuudet ovat tärkeitä juuri merenkulun sovelluskohteissa. [13]

Eräs toteutustapa laivan propulsiojärjestelmälle on kuvassa 21 esitetyn tyyppinen moottori, jossa potkuri on integroitu suoraan moottoriin. Potkuri on kiinnitetty roottoriin moottorin keskelle. [13]



Kuva 21. Vanteeseen kiinnitetty potkuri [13, muokattu]

Kuvan mukaisella moottorilla voidaan jättää pois tilaa vievä ja melua sekä tärinää aiheuttava vaihteisto, jolloin myös laivan massa pienenee. Myös huoltokustannukset pienenevät huoltoa vaativan vaihteiston poistuessa. [13]

Kuvan 21 mukainen aksiaalivuomoottori on käytössä Nordhavn 52 nimisessä aluksessa. Alus on täyden uppoaman alus ja se on suunniteltu kulkemaan pitkiä välimatkoja. Se on 14,7 metriä pitkä ja matkustusnopeus on 5,2 m/s. [13] Alus on esitetty kuvassa 22.



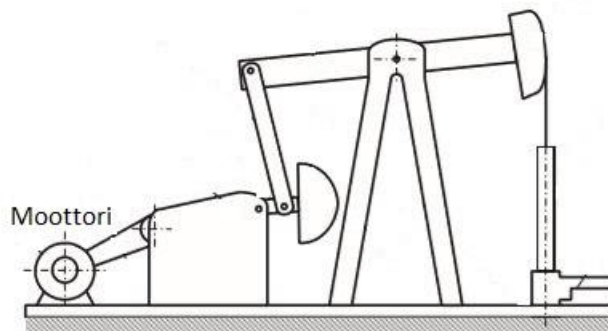
Kuva 22. Nordhavn 52 [13]

4.4 Aksiaalivuokoneiden muita sovelluskohteita

Suurimmat aksiaalivuomootoreiden käyttökohteet ovat edellä mainitut sähköautot, hissit sekä laivan potkurijärjestelmät. Aksiaalivuokoneita käytetään moottoreina myös monissa pienemmissä käyttökohteissa. Tämän lisäksi niitä käytetään myös generaattoreina joissain käyttökohteissa.

Yksi aksiaalivuomootoreiden pienemmistä käyttökohteista ovat lentotukialukset. Sotilasilma-alukset laukaistaan lentotukialusten kansilta liikkeelle ennen kuin niiden omat moottorit pystyvät tuottamaan tarpeeksi suuren työntövoiman lentoonlähtöön. Käytössä on sähkömagneettinen ilma-alusten laukausysteemi (EMALS). Siinä yhdessä lineaarimoottoreiden ja aksiaalivuomootoreiden kanssa tuotetaan ilma-alukselle riittävän suuri kineettinen energia lentoonlähtöä varten. [2]

Toinen pienempi käyttökohde aksiaalivuomootoreille ovat kuvan 23 mukaiset öljypumput.



Kuva 23. Öljypumppu [2, muokattu]

Kuvan mukainen öljypumppu koostuu maanpäällisestä sähkömekaanisesta laitteistosta sekä maanalaisesta mäntäpumpusta. Sähkömoottori liikuttaa raskasta palkkia, joka taas liikuttaa maanalaista mäntäpumpua ylös ja alas. [2]

Aksiaalivuomootoreita käytetään jonkin verran myös tietokoneiden kovalevyissä sekä tärymoottoreina esimerkiksi puhelimissa. Näissä käyttökohteissa moottoreiden koot ovat hyvin pieniä. [2]

Aksiaalivuokoneita käytetään jonkin verran myös generaattoreina sähköntuotannossa. Etenkin hajautetussa sähköntuotannossa pienitehoisissa voimaloissa aksiaalivuokoneita voidaan käyttää, kun taas suuritehoisiin voimalaitoksiin ne eivät sovellu. Niitä voidaan käyttää sekä suuri- että hidasnopeuksissa kohteissa. Yksi esimerkki suuren pyörimisnopeuden käyttökohteesta on polttoainekäyttöiset mikroturbiinit. Tällaiset mikroturbiinit ovat teholtaan korkeintaan muutamia satoja kilowatteja. Hitaan pyörimisnopeuden käyttökohteita taas ovat tuulivoimalat. [2]

5. YHTEENVETO

Sähkökoneet voidaan jakaa useaan eri tyyppiin. Periaatteessa aksiaalivuokone voi olla mitä tahansa näistä konetyypeistä, mutta useimmiten käytetyt konetyypit aksiaalivuokoneissa ovat harjaton DC-kone sekä kestmagneetoitu tahtikone, jotka toimivat täysin samalla periaatteella. Niiden roottorit on toteutettu kestmagneetein ja niiden pyörimisnopeus riippuu syötettävän jännitteen taajuudesta. Useimmissa käyttökohteissa onkin tarpeellista kontrolloida jännitteen taajuutta taajuusmuuttajalla, jotta saadaan moottori pyörimään halutulla nopeudella.

Aksiaalivuomootoreiden rakenne poikkeaa paljon radiaalivuomootoreista. Aksiaalivuomootoreissa roottorin sekä staattorin synnyttämät magneettivuot ovat akselin suuntaiset eli aksiaaliset, kun taas radiaalivuokoneissa vuot ovat piirin suuntaiset eli radiaaliset. Aksiaalivuokoneen sekä radiaalivuokoneen toimintaperiaatteet ovat muutoin samanlaiset, ainoastaan magneettivoiden suunnat ovat erilaiset.

Aksiaalivuokoneilla on monia hyviä puolia verrattuna radiaalivuokoneisiin. Näistä ylivoimaisesti suurin on niiden suurempi tehotiheys, jonka vuoksi ne soveltuvat hyvin käytettäväksi kohteissa, joissa moottorille ei ole paljoa tilaa. Niiden toinen suuri etu radiaalivuokoneeseen verrattuna on niiden suurempi halkaisija, jolloin koneeseen pystytään asentamaan enemmän napoja sekä koneen jäähdytys on helpompaa.

Aksiaalivuomootoreiden tärkeimpiä käyttökohteita ovat sähköautot, hissit sekä laivan propulsiojärjestelmät. Aksiaalivuokoneet sopivat hyvin näihin käyttökohteisiin hyvien ominaisuuksiensa ansiosta. Tärkeimpänä näistä on niiden suuri tehotiheys, jolloin ne vievät vähemmän tilaa kuin vastaavat radiaalivuokoneet. Aksiaalivuomootoreilla on myös monia pienempiä käyttökohteita ja aksiaalivuokoneita käytetään myös hajautetussa energian tuotannossa pienitehoisissa voimaloissa, kuten tuulivoimaloissa. Aksiaalivuomootorit soveltuvat parhaiten käyttökohteisiin, joissa moottorin pyörimisnopeus on pieni.

Työn tavoitteena oli antaa lukijalle kuva, miten aksiaalivuomootoreiden avulla voidaan hillitä ilmastonmuutosta. Työssä kerrottiin, että aksiaalivuomootoreilla voidaan korvata polttomoottorit esimerkiksi autoissa sekä laivan propulsiojärjestelmissä ja näin ollen pyrkiä vähentämään niissä syntyviä päästöjä. Aksiaalivuomootorit ovat näin ollen yksi mahdollinen keino ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi.

LÄHTEET

- [1] J. Bastman, Sähkökoneet-opintomoniste sekä -luentodiat, Sähkökoneet-kurssi, Tampereen teknillinen yliopisto, 2018, 172 s.
- [2] J.F. Gieras, R.J. Wang, M.J. Kamper, Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines, Springer Science + Business Media B.V, 2008, 362 p.
- [3] T. Knuutila, Kestomagnetoidun aksiaalivuokoneen sähkökäytön suunnittelu, Diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 2002, s. 12.
- [4] J. Rekola, Electric Drives -lecture slides, Electric Drives -kurssi, Tampereen yliopisto, 2019, <https://moodle2.tut.fi/course/view.php?id=11320>, viitattu 11.3.2019
- [5] K. Nousiainen, Sähkömagnetiikka-opetusmoniste, Sähkömagnetiikka-kurssi, Tampereen teknillinen yliopisto, 2018
- [6] B. Zhang, T. Seidler, R. Dierken, M. Doppelbauer, Development of a Yokeless and Segmented Armature Axial Flux Machine, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 63, No 4, pp. 2062-2071, 2015, <https://ieeexplore-ieee-org.lib-proxy.tuni.fi/document/7328313>, viitattu 15.3.2019
- [7] A. Cavagnino, M. Lazzari, F. Profumo, A. Tenconi, A comparison between the axial flux and the radial flux structures for PM synchronous motors, IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 38, No. 6, pp.1517-1524, 2002, <https://ieeexplore.ieee.org/document/1058105>, viitattu 18.3.2019
- [8] B. Larbi, M. Hatti, K. Koozi, A. Ghadbane, Design and Investigation of Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine for electric vehicles, IEEE, 2018 International Conference on Communications and Electrical Engineering, 2018, <https://ieeexplore-ieee-org.lib-proxy.tuni.fi/document/8634529>, viitattu 20.3.2019
- [9] J. Joensuu, Katsaus sähköautojen tekniikkaan, opinnäytetyö, Tampereen ammattikorkeakoulu, 2009, <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/8349/Joensuu.Jani.pdf?sequence=2&isAllowed=y>, viitattu 20.3.2019
- [10] S. Kaartinen, Hissin sähkökäytön tarkkuusasetuksen optimointi, opinnäytetyö, Tampereen ammattikorkeakoulu, 2015, https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/90526/Kaartinen_Sami.pdf?sequence=1&isAllowed=y, viitattu 22.3.2019
- [11] KONE Hissit Oy, Kone MonoSpace® hissien peruskorjaukseen, KONE Hissit Oy, https://www.kone.fi/Images/56164_KONE%20MonoSpace%20FURE_tcm36-17963.pdf, viitattu 22.3.2019
- [12] A. Lükewille, Keskiössä lento- ja laivaliikenteen päästöt, Euroopan ympäristökeskus, 2018, <https://www.eea.europa.eu/fi/articles/keskiossa-lento-ja-laivaliikenteen-paastot>, viitattu 10.4.2019
- [13] P. Ojaghlu, A. Vahedi, Specification and Design of Ring Winding Axial Flux Motor for Rim-Driven Thruster of ship Electric Propulsion, IEEE, Transactions on

Vehicular Technology, Vol. 68, No. 2, pp. 1318-1326, 2019, <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/8584102>, viitattu 20.4.2019

- [14] F. Caricchi, F. Crescimbeni, O. Honrati, Modular axial-flux permanent-magnet motor for ship propulsion drives, IEEE, Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, pp. 673-679, 1999, <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/790934>, viitattu 20.4.2019