



DROONIEN SÄHKÖKÄYTÖT

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2023

Tekijä: Juho Puska

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Lasse Laurila

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Juho Puska

Droonien sähkökäytöt

Koulutusohjelmasi ja tutkielmasi: Sähkötekniikan kandidaatintyö

2023

31 sivua, 14 kuvaa

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Lasse Laurila

Avainsanat: drooni, sähkökäyttö, BLDC, PMSM, FOC, DTC

Droonit ovat alkaneet yleistymään ja niitä pystytään käyttämään niin sotilaallisissa kuin siviilikäytöissä. Suuri siviilikäyttöisistä drooneista toimii sähkömoottorilla, vaikka droonien akut eivät vielä mahdollista yhtä pitkää lentoaikaa kuin polttomoottorikäyttöisillä drooneilla. Tämä työ on kirjallisuuskatsaus droonien sähkökäyttöihin. Sähkökäytöt tarkoittavat moottoria ja sitä pyörittävää tehoelektroniikkaa. Työssä tarkastellaan, mitä kaikkea löytyy droonin potkurin ja akun väliltä, sekä miten moottoreita ohjataan ja minkälaisia säätömetodeja käytetään.

Sähkömoottoristen droonien moottorit ovat pääasiassa harjattomia moottoreita, mutta harjallisiakin käytetään. Harjattomien etu on pitkä käyttöikä sekä korkea hyötysuhde, mutta niiden ohjaaminen on haastavaa ja ne tarvitsevat erillisen nopeussäätimen. Harjattomista moottoreista droonit käyttävät harjattomia tasavirtamoottoreita ja kestopagneettitahtimoottoreita. Niiden ero on se, että harjaton tasavirtamoottori tuottaa puolisuunnikkaan muotoista vastasähkömotorista voimaa ja kestopagneettitahtimoottori sinimuotoista. Kestopagneettitahtimoottorilla on myös hieman parempi hyötysuhde. Harjattomat moottorit käyttävät nopeussäätimissä vaihtosuuntaajaa, joka luo kolmivaihevirtaa. Vaihtosuuntaaja saa kytkentäsignaalinsa mikroprosessoreista, jotka käyttävät erilaisia säätömetodeja. Harjattomien moottorien säätömetodeina drooneissa käytetään paljon vektorisäätöä ja suoraa vääntömomenttisäätöä. Vektorisäädöllä droonin moottoreihin saadaan mahdollisimman suuri vääntömomentti ja suoralla vääntömomenttisäädöllä saadaan nopein vasteaika vääntömomentin muutoksille, joka on hyödyllistä esimerkiksi nopeissa liikkeissä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Juho Puska

Electric drives of drones

Bachelor's thesis

2023

31 pages, 14 figures

Examiner: Associate professor Lasse Laurila

Keywords: drone, electrical drive, BLDC, PMSM, FOC, DTC

Drones have started to become more common, and they can be used in both military and civilian applications. Many civilian-powered drones are powered by an electric motor, although the drones' batteries do not yet allow for as long a flight time as combustion engine-powered drones. This work is a literature review on the electric drives of drones. Electric drive means the motor and the power electronics that run it. The work examines what is found between the drone's propeller and the battery, as well as how the motors are controlled and what kind of control methods are used.

The motors of electric drones are mainly brushless motors, but brushed ones are also used. The advantage of brushless is a long service life and high efficiency but controlling them is challenging and they need a separate speed controller. Regarding brushless motors, drones use brushless DC motors and permanent magnet synchronous motors. The difference between them is that a brushless DC motor produces a trapezoidal counter electromotive force, and a permanent magnet synchronous motor produces a sinusoidal one. The permanent magnet synchronous motor also has a slightly better efficiency. Brushless motors use an inverter in the speed controls, which creates a three-phase current. The inverter receives its switching signals from microprocessors that use different control methods. A lot of vector control and direct torque control are used as control methods for brushless motors in drones. With vector control, the drone's motors get the highest possible torque, and with direct torque control, you get the fastest response time to torque changes, which is useful for example in fast movements.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO (mahdollinen, ei relevantti kaikissa töissä)

Roomalaiset

P	teho	[W]
R	resistanssi	[Ω]
u	jännite	[V]
i	virta	[A]
p	napaparimäärä	
f	taajuus	[Hz]
e	vastasähkömotorinen voima	[V]

Kreikkalaiset

ψ	magneettivuo	[Wb]
ω	pyörimisnopeus	[rad/s]
θ	roottorin magneettivuon kulma	[rad]

Alaindeksit

s	staattori	
r	roottori	
d	suora	
q	kohtisuora	
e	sähkömagneettinen	
a, b, c	moottorin vaiheet	
ref	referenssiarvo	
α	alfavektori	
β	beetavektori	

Lyhenteet

UAV	Miehittämätön ilma-alus (unmanned aerial vehicle)
BLDCM	Harjaton tasavirtamoottori (brushless DC motor)
PMSM	Kestomagneettitahtimoottori (permanent magnet synchronous motor)
PWM	Pulssileveysmodulaatio (pulse width modulation)
PAM	Pulssiampplitudimodulaatio (pulse amplitude modulation)
BDCM	Harjallinen tasavirtamoottori (brushed DC motor)
RPM	Kierrosta minuutissa (revolutions per minute)
CEMF	Vastäsähkömotorinen voima (counter-electromotive force)
DTC	Suora vääntömomenttisäätö (direct torque control)
FOC	Vektorisäätö (field-oriented control)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	2
1.1	Tutkimuskysymykset, rajaukset ja työn rakenne	2
2	Droonien käyttö ja rakenne	3
2.1	Droonien käyttö.....	4
2.2	Droonien rakenne	4
2.2.1	Sähkömoottorikäyttöinen drooni	5
2.2.2	Polttomoottorikäyttöinen ja hybrididrooni	6
3	Moottorityypit ja potkurit	6
3.1	BLDCM.....	6
3.2	PMSM	9
3.3	BDCM.....	9
3.4	Potkuri.....	10
4	Moottorien ohjaus.....	11
4.1	Lennonohjain.....	12
4.2	Vaihtosuuntaaja.....	13
4.2.1	Nopeuden havaitseminen	14
4.2.2	BLDCM:n vaihtosuuntaajan ohjaus.....	15
4.2.3	PMSM:n vaihtosuuntaajan ohjaus	16
4.3	DTC.....	17
4.4	FOC	18
4.5	BDCM:n nopeusohjaus	20
5	Sähkökäyttöjen haasteita	20
6	Johtopäätökset	21
	Lähteet	23

1 Johdanto

Droonit ovat miehittämättömiä ja kauko-ohjattuja ilma-aluksia. Ne ovat alkaneet yleistyä niin siviili- kuin sotilaskäytössä ja niitä nähdään yhä enemmän niin tavaroiden kuljetuksessa kuin taistelutehtävissä. Droonien ohjaaminen on edelleen haastavaa ja niiden merkityksen kasvaessa on tärkeä tutkia niiden rakennetta ja sähkökäyttöjärjestelmiä. Drooneista löytyy jo paljon tietoa niiden yleisyyden vuoksi. Tässä työssä on tarkoitus tutkia droonien sähkökäyttöä, eli mitä kaikkia osia löytyy drooneista jännitelähteen ja potkurin väliltä ja kuinka sähköinen energia muuttuu mekaaniseksi energiaksi. Sähkökäytöt tarkoittavat sähkömoottoria sekä ohjaavaa tehoelektroniikkaa. Myös säätömetodit kuuluvat sähkökäyttöihin. (Aalto-yliopisto 2018)

Droonien nykyisiä käyttökohteita ovat niin siviilikäyttökohteet kuten tavaroiden kuljettaminen ja sotilaalliset käyttökohteet kuten tiedustelu. Drooneissa käytetään erilaisia moottoreita sen käyttökohteen mukaan. Sotilaskäyttöiset droonit käyttävät monesti polttomoottoria suuren kokonsa takia, mutta siviilikäyttöiset useasti sähkömoottoria, mutta myös polttomoottorikäyttöisessä droonissa voi olla sähkökäyttöjä. Sähkökäyttöihin kuuluu drooneissa esimerkiksi: sähköinen nopeussäädin, lennonohjain, jännitelähde, moottori ja potkuri. (Kardasz ym. 2016)

Aikaisemmat tutkimukset yleensä ovat keskittyneet vain tietyn tyyppiseen drooniin tai yhden moottorin toimivuuteen. Sen takia tässä työssä kootaan aiempien tutkimusten tuloksia sähkömoottoreista ja droonien sähkökäytöistä yhdeksi kirjallisuuskatsaukseksi. Työhön etsitään tietoa pääasiassa tutkimuksista, kirjoista sekä valmistajien sivuilta. Myös verkkoartikkeleja käytetään.

1.1 Tutkimuskysymykset, rajaukset ja työn rakenne

Työn tutkimuskysymykset ovat:

- Mitkä ovat eri runkoisten ja kokoisten droonien käyttötarkoitukset?
- Mitä ja minkä tyyppisiä moottoreita pääasiassa käytetään ja miksi?
- Minkälaiset sähkökäytöt ovat sähkömoottorisilla drooneilla?

-Miten drooneja ohjataan, sekä minkälaisia säätömetodeja käytetään?

Työssä keskitytään etenkin sähköisiin drooneihin ja niiden sähkökäyttöihin. Muita drooneihin liittyviä aiheita sivuutetaan, kuten energialähteitä, runkojen rakenteita ja käyttötarkoituksia. Työ on rajattu sähkömoottorilla lentäviin drooneihin. Sähkömoottorikäyttöisissä drooneissa otetaan eniten huomioon harjattomia moottoreita käyttävät dronit, koska ne ovat huomattavasti yleisempiä kuin harjallista moottoria käyttävät dronit. Työn toisessa luvussa kerrotaan erityyppisten droonien käyttötarkoituksista ja rakenteista. Kolmannessa syvennyttään droonien moottoreihin ja potkureihin. Neljännessä droonien ohjaukseen ja viidennessä luvussa kerrotaan droonien sähkökäyttöjen haasteista. Lopuksi on yhteenveto ja johtopäätökset.

2 Droonien käyttö ja rakenne

Drooneja on eri kokoisia ja niiden käyttö määräytyy koon mukaan. Tässä luvussa tarkastellaan droonien rakennetta yleisesti ja niiden käyttökohteita. Kuvassa 2.1 on yleinen droonin rakenne, eli neljä potkuria yhdistettynä X:n muotoiseen runkoon. Tässä työssä pääasiassa keskitytään tähän droonin runkotyyppiin.



Kuva 2.1 Nelikopterinen drooni. (Kuva: Hossain 2022)

2.1 Droonien käyttö

Droonien ohjaamiseen käytetään kauko-ohjausta ja automaattista ohjausta. Drooneille löytyy lukuisia eri käyttötarkoituksia rakenteen mukaan. Suuret droonit ovat monesti polttomoottorilla toimivia ja niitä käytetään useasti sotilaallisissa tehtävissä niiden kantokyvyn ja pitkän lentokantaman takia. Suurille drooneille löytyy myös siviilikäyttöisiä tarkoituksia kuten valvontatehtävät pitkällä matkaväleillä. Mikrodrooneille kuten 10 cm pituiselle Black Hornetilla löytyy myös käyttöä vakoilussa rakennuksien sisällä pienen kokonsa vuoksi. Pienemmät droonit ovat yleisemmin siviilikäyttöisiä. Niille yleinen käyttökohde on esimerkiksi vapaa-ajan lennättäminen. Muita käyttökohteita ovat mm. kuvaaminen, kuljetus, mittaaminen/tutkimus, kilpailu ja pelastustehtävät. Kuvaamiseen käytetään korkeaan resoluution pystyviä kamerallisia drooneja. Pelastustehtäviin käytetyt droonit voivat esimerkiksi etsiä kadonneita ihmisiä ja myös pudottaa tarvikkeita. Yksi droonien yleistyneimmistä käyttökohteista on tavaran kuljetus, koska ilmateitse kuljettaminen mahdollistaa nopeamman reitin kuin maassa. (Hossain 2022)

2.2 Droonien rakenne

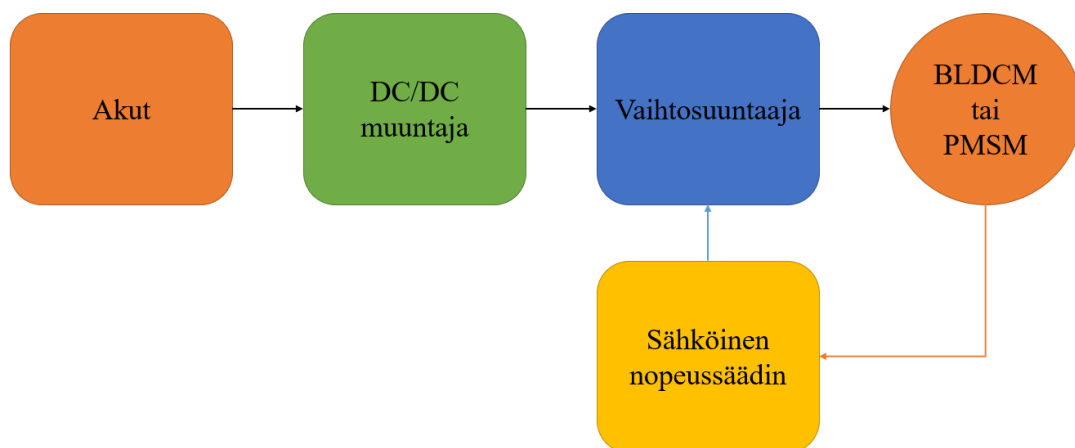
Drooneilla on käyttötarkoituksen mukaan erilaisia runkoja ja erimäärä potkureita. Yleisimpiä ovat neljällä kopterilla lentävät, mutta myös helikopterin muotoisia drooneja löytyy, jotka lentävät kahdella kopterilla (yksi edessä ja yksi takana). Potkurien lisäämisellä voidaan parantaa droonin lennon tasaisuutta, mutta se lyhentää lentoaikaa. Drooneja voi myös valmistaa käyttäen siivekkeitä ja yhtä potkuria koneen nokassa, jolloin droonin lentoaikaa voidaan huomattavasti pidentää vajaasta tunnista useaan kymmeneen tuntiin siipien luoman nosteen takia. Lentoaika riippuu myös moottorien määrän lisäksi droonin moottorityypistä (sähkö- vai polttomoottori) ja akkujen tai polttoainetankin koosta. (Hossain 2022)

Nelikopterisessa X-runkoisessa droonissa joka toinen kopteri pyörii myötäpäivään ja joka toinen vastapäivään. Droonin ohjaaminen on mahdollista muuttamalla eri kopterien pyörimisnopeutta, jolla voidaan kääntää droonia niin pysty- kuin vaakasuunnassa. (Prakosa 2019)

2.2.1 Sähkömoottorikäyttöinen droni

Etenkin sähkömoottorikäyttöiset dronit ovat tämän työn pääaihe. Ne ovat suositumpia kuin muut dronityypit korkean hyötysuhteen ja ohjauksen tarkkuuden vuoksi. Niiden pääasiallinen energianlähde on akut. Lentoajanlisäämiseksi myös superkondensaattoreita voidaan käyttää energiansäilöntään, sekä on suunniteltu aurinkopaneelien asentamista drooneihin. Kyseinen dronityyppi kuitenkin käyttää yleensä energialähteenä litiumpolymeeriakkuja, joka mahdollistaa lentoajan noin puoleentoista tuntiin. Niissä on myös korkea hyötysuhde ja korkea teho verrattuna muihin akkutyyppihin. (Joshi ym. 2022) Litiumpolymeeriakkujen syöttövirta on tavanomaisesti 10 A-20 A. (Mongensen 2016)

Kuvassa 2.2 on yksinkertainen harjatonta moottoria käyttävän dronin sähkökäyttö. Akkujen jännite pienennetään aluksi sähkömoottorien käyttöjännitteeseen DC/DC-muuntajassa. Dronissa voi olla useita energialähteitä, jotka muunnetaan omissa DC/DC-muuntajissa yleiseen jännitetasoon. Sen jälkeen jännite syötetään vaihtosuuntaajaan, jolla pyöritetään moottoria. Vaihtosuuntaajaa ohjaa sähköinen nopeussäädin, joka saa tietoa moottorin nopeudesta erilaisilla antureilla. (Joshi ym. 2022)



Kuva 2.2 Yksinkertaistettu harjattoman moottorin muuntaja. Mustat nuolet ovat tehon kulkuun, punainen nuoli on moottorista tuleva tieto ja vihreä nuoli on ohjaussignaali.

2.2.2 Polttomoottorikäyttöinen ja hybrididrooni

Droonien polttomoottori käyttää polttoaineena, vetyä, bensiiniä tai metaania. Polttoaineessa on koreampi energiatiheys verrattuna sähkömoottorikäyttöisten droonien paristoihin, mutta ne tarvitsevat myös sähkömoottorin käynnistyäkseen. Tämän takia on luotu hybrididrooni, jossa molempien droonityyppien hyviä puolia on yhdistelty. (Joshi ym. 2022) Hybrididroonissa on nimensä mukaan polttomoottori ja sähkökäyttö. Siinä voi olla rinnankytkettynä tai sarjankytkettynä polttomoottori ja sähkökäyttö. Rinnankytkentä tarkoittaa sitä, että moottoria voi joko ajaa polttomoottorista tai sähkömoottorista. Sarjankytkennässä polttomoottori pyörittää generaattoria, joka luo sähköä potkuria pyörittävään sähkömoottoriin. (Zhang ym. 2021)

3 Moottorityypit ja potkurit

Tässä luvussa tarkastellaan erilaisia sähkömoottorityyppejä drooneissa. Moottorin on tarkoitus pyörittää droonissa potkuria ja luoda tarvittava noste lentoon. Droonissa voi olla useita moottoreita sen rakenteen mukaan. Sähkömoottorillisissa drooneissa ylivoimaisesti yleisin moottorityyppi on harjaton tasavirtamoottori eli BLDCM sen korkean kestävyuden ja hyötysuhteen takia. Droonien moottoreiden tulee myös olla kevyitä, mutta niiden koot vaihtelevat droonin koon mukaan. Moottoreita ohjataan sähkökäytöllä, jolla pystytään ohjaamaan lentoa ja nopeutta. (Pond 2021) Harjattoman tahtimoottorin pyörimisnopeus saadaan yhtälöstä 3.1, josta nähdään, että nopeus on verrannollinen jännitteen syöttötaajuuteen (f) sekä napaparien määrään (p). (Mongensen 2016)

$$N_{rpm} = \frac{f * 60s}{p} \quad (3.1)$$

3.1 BLDCM

BLDCM on kestopagneeteilla toimiva tahtimoottori (eli roottori pyörii samaan tahtiin virran taajuuden kanssa), joka toimii taajuusmuuttajan luomalla vaihtojännitteellä. BLDCM:ssa staattorin keloihin luodaan magneettikenttä, jota kestopagneeteilla magnetoitu roottori

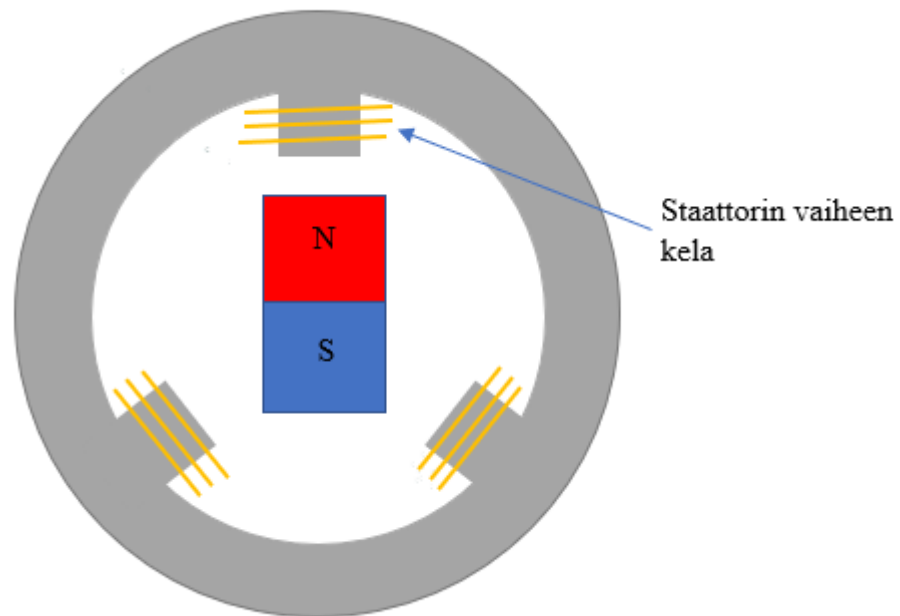
jahtaa luoden pyörivän liikkeen roottoriin. Moottorin vääntömomenttia voi kasvattaa lisäämällä napapareja. (Akin ym. 2011) Kestomagneettimoottoreissa yleisimmät kestopagneettimateriaalit ovat samariumkooltti ja neodyymi. (Joshi ym. 2022)

BLDCM on yleisen moottorityyppi droneissa, koska sen etu on luotettavuus, korkea hyötysuhde ja pitkä elinikä. Se voidaan kytkeä joko tähti- tai kolmiokytkentään droonin käyttötarkoituksen mukaan. BLDCM on samanlainen kestopagneettitahtomoottorin eli PMSM:n kanssa. BLDCM:ssa vastasähkömotorinen voima eli CEMF on puolisuunnikkaan muotoista ja vaiheiden virta on neliömäistä. Tämä johtuu staattorien erimuotoisesta käämityksestä. (Joshi ym. 2022) Kuvassa 3.1 on kaupallinen BLDCM.

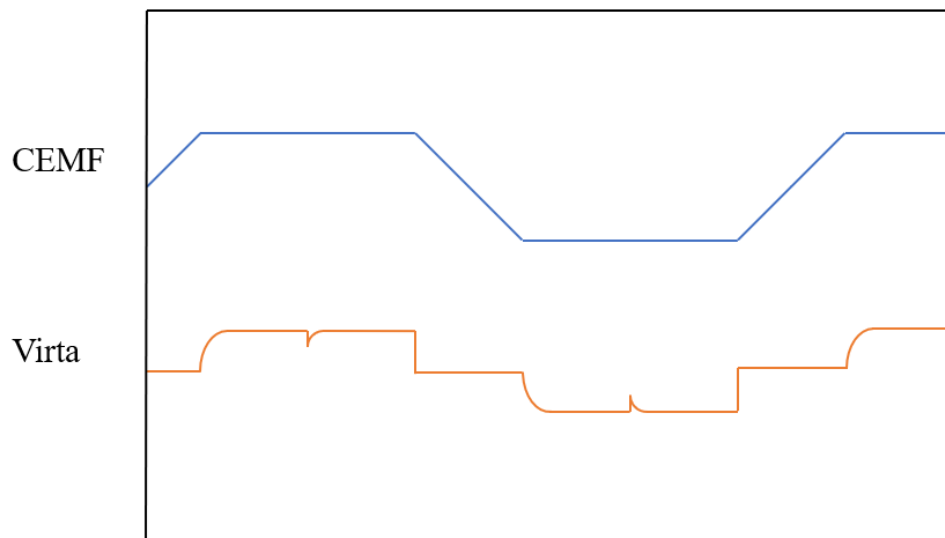


Kuva 3.1 PROPDRIVE:n BLDCM droonille. Suuri osa kaupallisista droonimoottoreita on ”Outrunner”-moottoreita, eli roottori pyörii staattorin ympärillä. (Kuva: HobbyKing.com)

Kuvassa 3.2 on esitetty yksinkertaistettu BLDCM:n rakenne, missä roottori on kuvattu yhdellä kestopagneetilla, jossa on yksi napapari. Kuvassa 3.3 on esitettyä CEMF:n ja virran muodot yhdelle vaiheelle. (Akin ym. 2011)



Kuva 3.2 BLDCM:n rakenne, jossa roottorilla on kestmagneetteja ja staattorilla käämit.



Kuva 3.3 BLDCM:n yhden vaiheen virta ja CEMF.

Kuvasta 3.3 nähdään BLDCM:n heikkous vaikean ohjauksen lisäksi. Moottorin vääntömomentti ei ole tasainen yhden pyörähdyksen aikana, koska moottorin CEMF ja vaiheiden virrat ovat erimuotoisia.

$$T_e = \frac{e_a * i_b + e_b * i_b + e_c * i_c}{\omega_r} \quad (3.2)$$

BLDCM:n vääntömomentin yhtälö on 3.2. (Joshi ym. 2022). Yhtälöstä nähdään, että kun vaihevirta (i) ja CEMF (e) muuttuvat eritahdissa kuvan 3.3 tavoin, niin moottorin vääntömomentti tulee pienentymään.

3.2 PMSM

PMSM on BLDCM:n tavoin tahtimoottori, missä on myös kestopagneeteilla magnetoitu roottori. Niiden ero on se, että PMSM:n CEMF ja vaihevirta on sinimuotoista. (Akin ym. 2011) Myös PMSM:a käytetään drooneissa. Sitä voidaan ajatella kestopagneeteilla magnetoituksi induktiomoottoriksi, mutta siinä ei ole jättämää tai sähköisiä häviöitä roottorissa perinteisen induktiomoottorin tavoin, joka tekee siitä hyötysuhteelta tehokkaamman. Roottori ei myöskään lämpene yhtä paljoa sähköisten häviöiden puutteen vuoksi. PMSM:lla on myös suurempi hyötysuhde (yli 90 % kaikilla tehoilla) BLDCM:in ja induktiomoottoriin verrattuna. Induktio-moottoreilla hyötysuhde on taas alle 90 %:sta yli 90 %:iin tehon mukaan. Toisaalta PMSM:n materiaalit ovat kalliimpia kuin induktiomoottorin kestopagneettien takia. (Sadegh 2018) Induktio-moottoreita ei kuitenkaan käytetä drooneissa niiden painon ja huonon hyötysuhteen takia. (Joshi ym. 2022)

PMSM muistuttaa BLDCM:a ja kuva 3.1 kuvastaa myös PMSM:n rakennetta. Molemmissa on kestopagneeteista tehty roottori. Suurin ero on siinä, että PMSM tarvitsee sinimuotoista virtaa hyvään hyötysuhteeseen, kun taas BLDCM:lle vaiheet käyttävät neliömäistä virtaa. Moottori tarvitsee ohjauksen, jolla pystytään tuottamaan siniaaltoa tarkasti. Tästä tekee vaikean verrattuna BLDCM:n ohjaukseen se, että roottorin paikka ja nopeus pitää selvittää tarkemmin kuin BLDCM:lla. (Koteich ym. 2013)

$$T_e = \frac{3}{2} * p * \Psi * i_{sq} \quad (3.3)$$

PMSM:n vääntömomentin yhtälö on 3.3. (Garcia ym. 2006) Yhtälöstä nähdään, että moottorin vääntömomenttia voi ohjata hallitsemalla virran q-osaa.

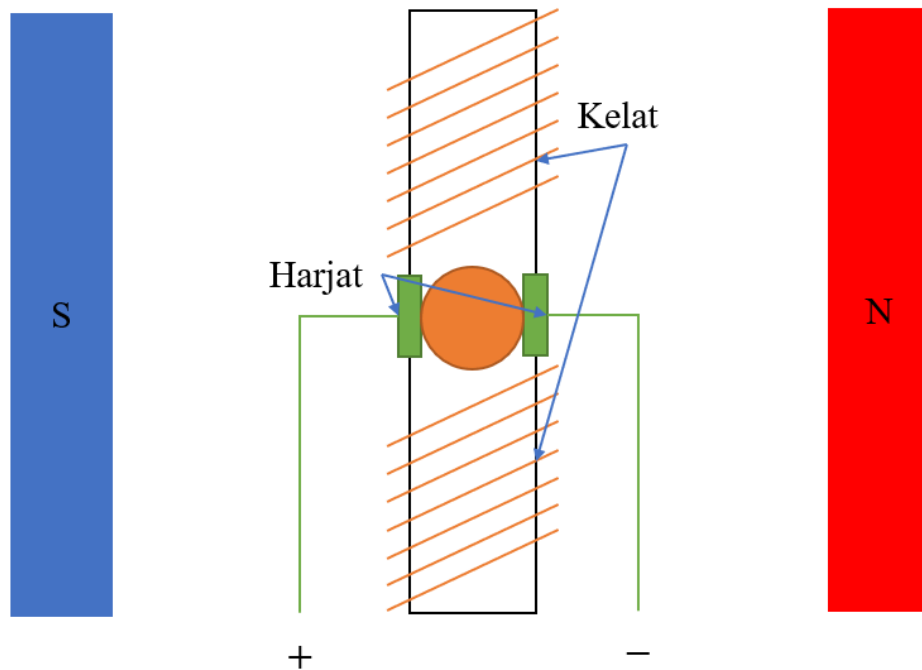
3.3 BDCM

Harjallinen tasavirtamoottori eli BDCM on paljon harvinaisempi BLDCM:in verrattuna. Sitä kuitenkin voi käyttää jossain pienissä drooneissa. Kuvassa 3.4 on kuvattuna BDCM:n

rakenne, jossa magnetointi on tehty kestomagneeteilla. Sen etu on helppo ohjailtavuus ja kytkeminen, koska sille riittää pelkkä jännitesäädin ja tasaiseen nopeuteen pelkkä jännitelähteen kytkentä moottoriin. Myöskään monimutkaista taajuusmuuttajaa ei tarvitse, joka tekee myös kyseisen moottorin käytöstä halvemman. Moottori kuitenkin kärsii jatkuvasti kuluista harjoista, jotka pitää vaihtaa. (OscarLiang 2019)

$$T_e = K * i \quad (3.4)$$

BDCM:n vääntömomentin yhtälö on yhtälössä 3.4. K on moottorin kestomagneettien luoma magneettivuon vakioarvo. (Azizi ym. 2015) Yhtälö nähdään, että moottoria voidaan ohjata pelkästään muuttamalla moottoriin menevää virtaa (i).



Kuva 3.4 BDCM:n rakenne.

3.4 Potkuri

Droonit käyttävät tarvittavan nosteen luomiseksi potkureita. Potkurit ovat tyypillisesti 2- tai 3-lapaisia ja niiden koko vaihtelee käyttötarkoituksen mukaan. 2-lapaisilla potkureilla on suurempi hyötysuhde ja niillä pystyy lennättämään droonia nopeammin. Nämä ovat suosittuja pienemmissä drooneissa. 3-lapaiset taas pystyvät lennättämään droonia tasaisemmin

ja luomaan suuremman nosteen. Näitä käytetään suuremmissa droneissa, joiden on tarkoitus kantaa suuria kuormia. (Mishra 2021)

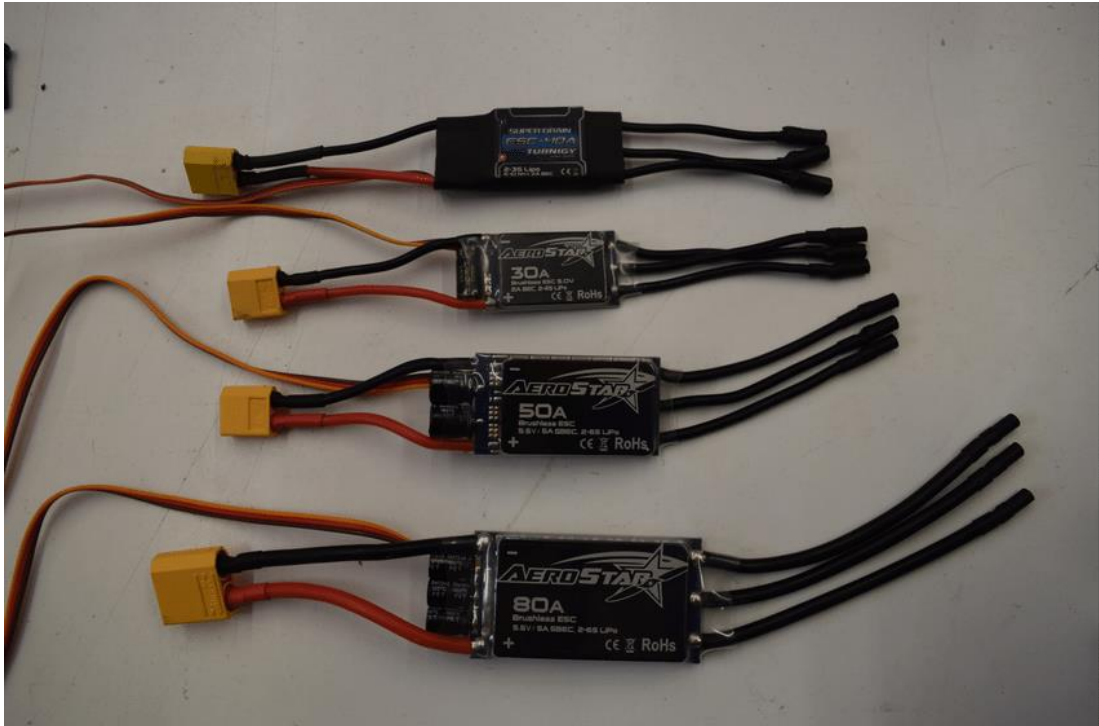
Suurempi potkuri luo suuremman nosteen, mutta lisää massaa ja inertiaa, joka tekee lennon ohjaamisesta haastavampaa. Pienemmällä taas ohjaaminen on helpompaa, mutta pienempien potkurien takia noste on pienempi ja potkureita tulee pyörittää nopeampaa kompensoidakseen nostetta. Tämä kuluttaa enemmän virtaa ja tämän takia esimerkiksi kilpailudroonit, jotka käyttävät 2-lapaisia potkureita pystyvät olemaan ilmassa lyhyempiä aikoja muihin verrattuna. Potkureita pääasiassa pyöritetään suoraan droonin moottorin akselista. (Hell ym. 2018) Droonin potkurit ovat tavanomaisesti suoraan kiinteäkulmaisia eli lapojen kulmaa ei voida muuttaa. (Joshi ym. 2022)

4 Moottorien ohjaus

Tässä luvussa käsitellään sähkökäyttöjen merkittävää osaa eli elektroniikkaa, joka ohjaa moottoria. Tämän luvun aiheet ovat vaihtosuuntaaja ja vaihtosuuntaajan ohjaaminen. Lisäksi käsitellään moottorien ohjaustapoja. Luvussa keskitytään harjattomien moottorien ohjaukseen niiden yleisyyden vuoksi, mutta myös käsitellään harjallisten moottorien ohjaamista.

Drooneissa käytetään moottorille suunnattua sähköistä nopeusohjainta. Sähköiseen nopeusohjaimen syötetään tasavirtajännite esim. litiumpolymeeriakuista. Moottorin nopeutta taas ohjataan syöttämällä pulseja eri pulssisuhteella. (Mongensen 2016) Ohjauksen ja säätömetodien tulee pystyä hallitsemaan droonin kaikkia nopeuksia tasaisesta lennosta nopeisiin liikkeisiin, sekä niiden pitää mahdollistaa nopea vasteaika nopeiden liikkeiden tekemiseksi. Tehokas säätömetodi pystyy myös vähentämään droonin energiankäyttöä ja täten lisäämään lentoaikaa. (Joshi ym. 2022)

Kuvassa 4.1 on drooneissa käytettyjä kaupallisia sähköisiä nopeussäätimiä, joista tulee kolme vaihejohtoa (mustat) ja joihin syötetään tasavirtaa (punainen ja musta). Ohuimmat johdot keskellä ovat ohjauspulssien syöttämiseen.



Kuva 4.1 Eri kokoisia kaupallisia sähköisiä nopeussäätimiä. (Kuva: Gong ym. 2017)

Harjattomilla moottoreilla käytetään vaihtosuuntaajaa, jossa on 6 tai 4 transistoria muuttamassa tasavirtaa vaihtovirraksi. Vaihtosuuntaajan transistorien ohjauselektronikka on sähköinen nopeussäädin. Dronien lennättäminen on tarkkaa, niin nopeussäätimen pitää saada tarvittavaa tietoa moottorin nopeudesta. Moottorin nopeuden voi saada selville Hall-anturilla tai anturittomalla mittaamisella. (Joshi ym. 2022) Niistä enemmän kappaleessa 4.2.1.

4.1 Lennonohjain

Lennonohjain on dronin tärkein komponentti, joka vastaanottaa ohjaukskäskyjä ja hallitsee kaikkia droniin kiinnitettyjä laitteita eli myös sähkökäyttöjä. Se määrää sähköisten nopeussäätimien nopeuden ja hallitsee dronin tasapainoa ja kulkusuuntaa muuttamalla moottorien nopeuksia. (Texas Instruments 2016)

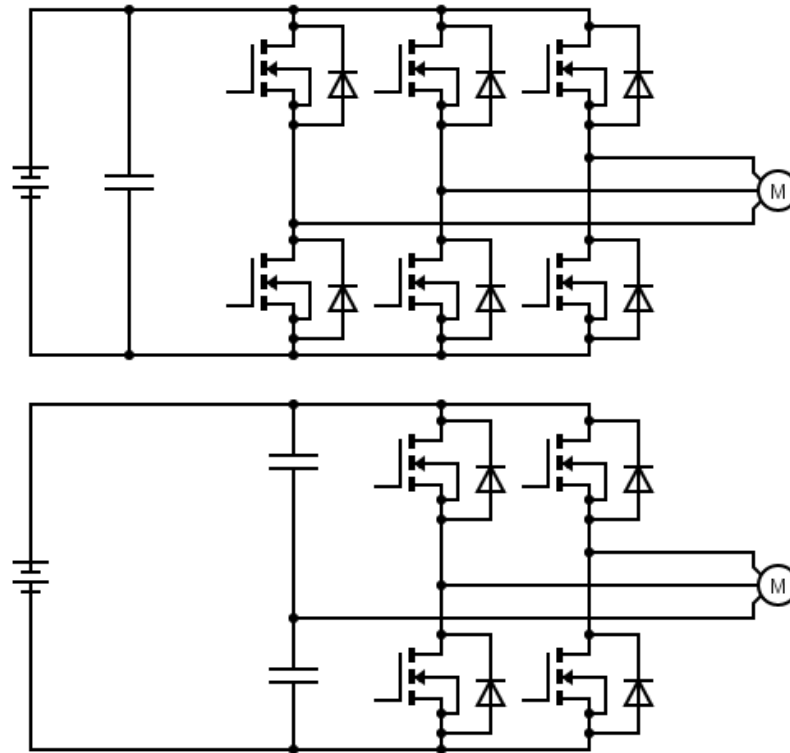
Nelikopterisessa dronissa lennonohjaimen on kiinnitetty neljä sähköistä nopeusohjainta, jotka ovat kiinnitetty moottoreihin. (EEWeb 2021) Lennonohjain saa dataa droniin kiinnitetyistä antureista, joista se pystyy selvittämään mm. dronin korkeuden, sijainnin ja nopeuden. Dronin asennon saa lennonohjain selville siihen rakennetulla gyroskoopilla. Useimilla lennonohjaimilla ei ole riittävää kykyä lennättää droniam itsenäisesti, vaan lennättäminen vaatii ihmisen avun. (Cheng ym. 2018)

4.2 Vaihtosuuntaaja

PMSM ja BLDCM:n ohjaamiseen tarvitaan vaihtosuuntaaja, koska sähkökäyttöisten droonien jännite tulee akuista. Yleisesti vaihtosuuntaajassa käytetään kuutta transistoria, joilla ohjataan vaihevirtoja. Myös neljää transistoria ja kahta kondensaattoria käyttäviä vaihtosuuntaajia käytetään. Niillä pystyy parantamaan hyötysuhdetta vähentämällä transistorien kytkentähäviöitä, mutta niiden ohjaaminen on haastavampaa kuin kuuden transistorin vaihtosuuntaajan. Vaihtosuuntaajaa ohjataan sähköisen nopeussäätimen luomalla pulssileveysmodulaatiolla, jossa nopeussäädin lähettää vaihtosuuntaajan transistoreihin pulsseja. (Joshi ym. 2022)

Tavanomaisin vaihtosuuntaaja on 6-transistorinen, joita ohjaa 6 ohjaussignaalia. BLDCM:n vaihtosuuntaajassa ainoastaan 2 vaihetta on kerralla päällä ja kolmas vaihe on aukinainen. Aukinaista vaihetta voidaan käyttää moottorin nopeuden arvioimiseen anturoimattomassa nopeuden mittaamisessa. (Štulrajter ym. 2017) PMSM:ssa vaihevirta yritetään pitää sinimuotoisena, jotenka niissä on koko ajan 3 vaihetta samaan aikaan päällä. (Infineon 2019)

Kuvassa 4.2 on kuvattuna neljää ja kuutta transistoria käyttävät vaihtosuuntaajat. Neljää transistoria käyttävässä vaihtosuuntaajassa yhden vaiheen transistorit ovat korvattu kondensaattoreilla, jotka purkautuvat ja latautuvat muiden vaiheiden virtojen mukaan. (Mani ym. 2021)



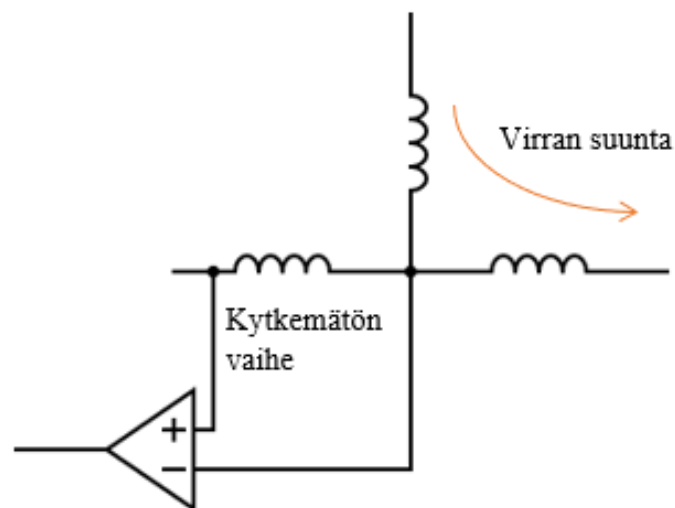
Kuva 4.2. Ylempänä on kuutta transistoria käyttävä vaihtosuuntaaja ja alempana neljää transistoria käyttävä vaihtosuuntaaja.

4.2.1 Nopeuden havaitseminen

Droonin lennättämiseen tasapainoisesti on tärkeitä, että moottorien nopeutta voidaan mitata ja näin hallita niiden nopeutta. Nopeuden ohjaus voi olla joko avoimen silmukan ohjaus, eli ohjain olettaa moottorin pyörivän halutulla tavalla, tai suljetun silmukan ohjaus, eli ohjain saa tiedon moottorin paikasta ja nopeudesta. (EEWeb 2021)

Suljetussa silmukassa nopeuden mittaaminen onnistuu anturilla. Moottorin sijainnin havaitsemiseen käytetään Hall-anturia, missä useita antureita sijoitetaan moottoriin. (Joshi ym. 2022) Hall-antureita voidaan sijoittaa esimerkiksi 3 tasaisesti moottorin ympärille. Anturi havaitsee, kun magneetin pohjoinen napa pyörii anturin ohitse, jolloin anturi syöttää korkeaa jännitettä, ilmoittaen ohjauspiirille moottorin sijainnin. Kun kaikki anturit ilmoittavat tietoa eri kohdissa, saadaan moottorin paikka selville magneettien perusteella. (Andrews ym. 2019)

Pienissä drooneissa voidaan käyttää kevyempää anturoimatonta nopeuden laskemista eli avointa silmukkaa. Siinä nopeus voidaan havaita moottorin luomasta CEMF:sta, koska se on verrannollinen moottorin pyörimisnopeuteen. Tässä tavassa ongelmana on se, että jos moottori ei pyöri, niin mitään jännitettä ei indusoidu, eikä mikrokontrolleri saa tarvittavaa tietoa ohjaukseen. (Davis 2017) Tähän voidaan käyttää kuvan 4.3 mukaista kytkentää. Sitä voidaan käyttää vain moottorin tähtikytkennässä silloin, kun kolmanteen vaiheeseen ei mene virtaa. (Hein 2020) Jos droonin moottorin kaikki vaihetransistorit ovat päällä samaan aikaan, niin edellinen mittaustapa ei toimi. Tässä voidaan käyttää shunttivastusta jokaisessa vaiheessa virran mittaamiseen ja käyttää mikroprosessoria nopeuden laskemiseen. (Infineon 2019)



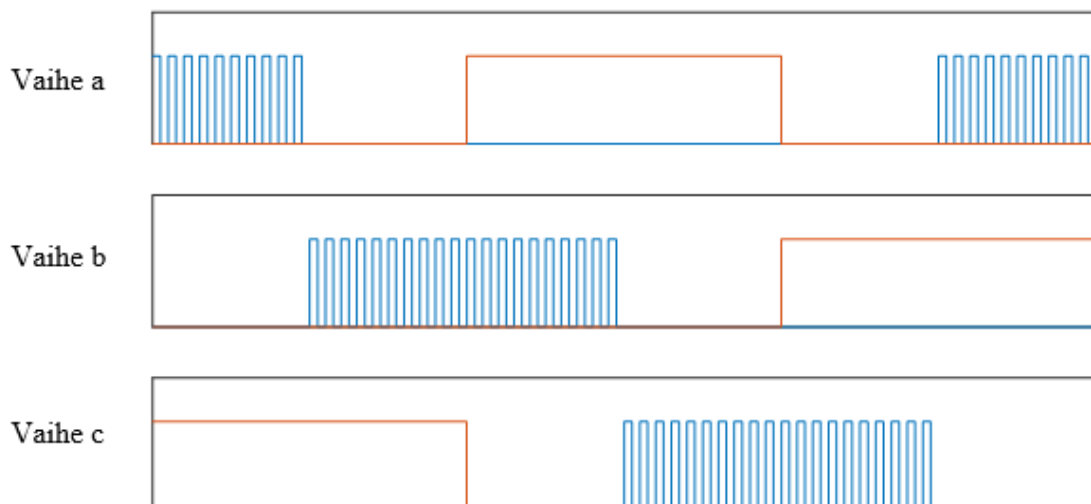
Kuva 4.3. Anturoimaton moottorin nopeuden havaitseminen.

4.2.2 BLDCM:n vaihtosuuntaajan ohjaus

BLDCM:ssa PWM:lla tehdään puolisuunnikkaan muotoinen CEMF staattoriin. Kuvassa 4.3 on eri vaiheisiin menevät PWM-signaalit. (Mongensen 2016) PWM-signaalit muodostetaan vektoritaulukossa, joka muodostaa ne siihen syötettyjen arvojen perusteella. Niistä lisää tietoa luvuissa DTC ja FOC. (Joshi ym. 2022) Taajuusmuuttajan kuutta transistoria voi ohjata kahdella eri tavalla BLDCM:n tapauksessa. Ensimmäinen on yksinkertaisempi tapa, missä kahta yhden vaiheen transistoria kytetään pulsseissa samaan aikaan päälle ja pois niin, että virran suunta on kuvan 4.3 kaltainen. Tämä ohjaustyyli on tuottaa paljon

virran aaltoilu verrattuna monimutkaisempaan 6-ohjaussignaaliseen ohjaukseen, jossa ylempää vaihetransistoria käynnistetään pulsseissa ja alemmalla puretaan pulssien välissä kuvan 4.4 tavoin. (Akin ym. 2011) Kuvassa on 4.4 sähköinen kierros, joka on 360° , eli jokaiset ylempät transistorit ovat erillään 120° syöttämässä PWM-signaaleja. Tämä ohjaustyyli aiheuttaa vääntömomentin väreilyä joka 60° . (Joshi ym. 2022)

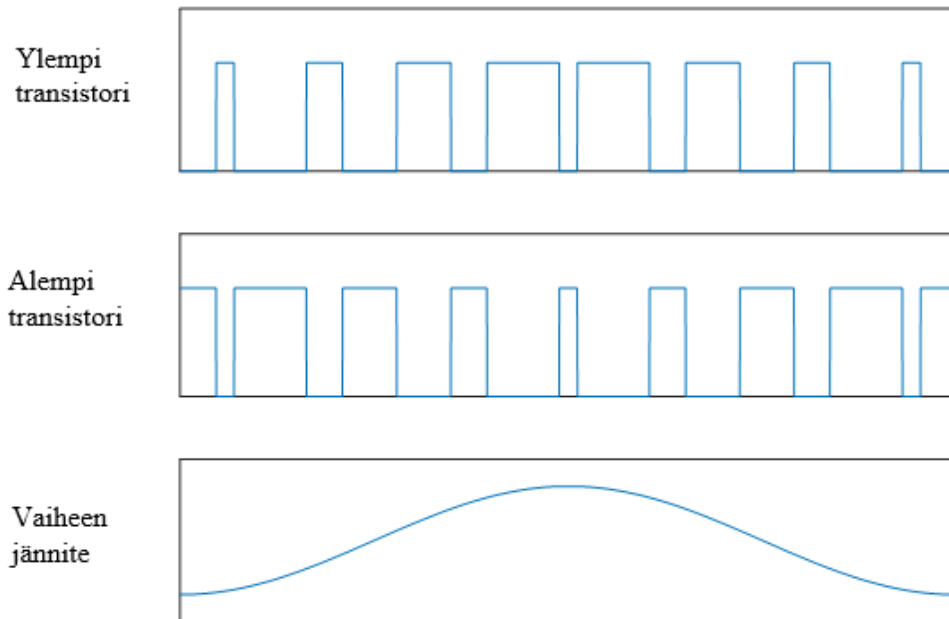
BLDCM:n yksi ohjausmuoto on puolisuunnikasohjaus, missä moottorin CEMF on ideaalisesti puolisuunnikkaan muotoista. Tämän ohjauksen etu on yksinkertainen ohjausalgoritmi sekä ohjaukseen vaativien komponenttien määrän vähyys verrattuna muihin ohjaustyyliin. Tässä tyyliässä on heikompi vääntömomentti kuin esimerkiksi FOC:ssa, koska moottorin staattorin ja roottorin magneettivuot eivät ole kohtisuorassa toisiinsa nähden koko ajan vaan vaihtelevat 60° :sta 120° :een. (Infineon 2019)



Kuva 4.4 PWM-signaalit BLDCM:ssa, siniset signaalit ovat vaiheen ylempät transistorit ja punaiset ovat alemman.

4.2.3 PMSM:n vaihtosuuntaajan ohjaus

PMSM:ssa käytetty vaihtosuuntaaja on komponenteiltaan samanlainen kuin BLDCM:n, mutta transistorien ohjaussignaalit erilaisia, koska PMSM tarvitsee sinimuotoista virtaa. Kuvassa 4.5 näkyy PMSM:n vaihtosuuntaajan yhden vaiheen transistorien ohjaus ja indusoitu jännite. Toiset 2 vaihetta olisi 120° erillään kuvassa olevassa vaiheesta molemmilla puolilla. Kuvassa on myös esitetty yksi sähköinen kierros kuvan 4.4 tavoin. (Mongensen 2016)



Kuva 4.5 PMSM:n yhden vaiheen PWM-ohjaus

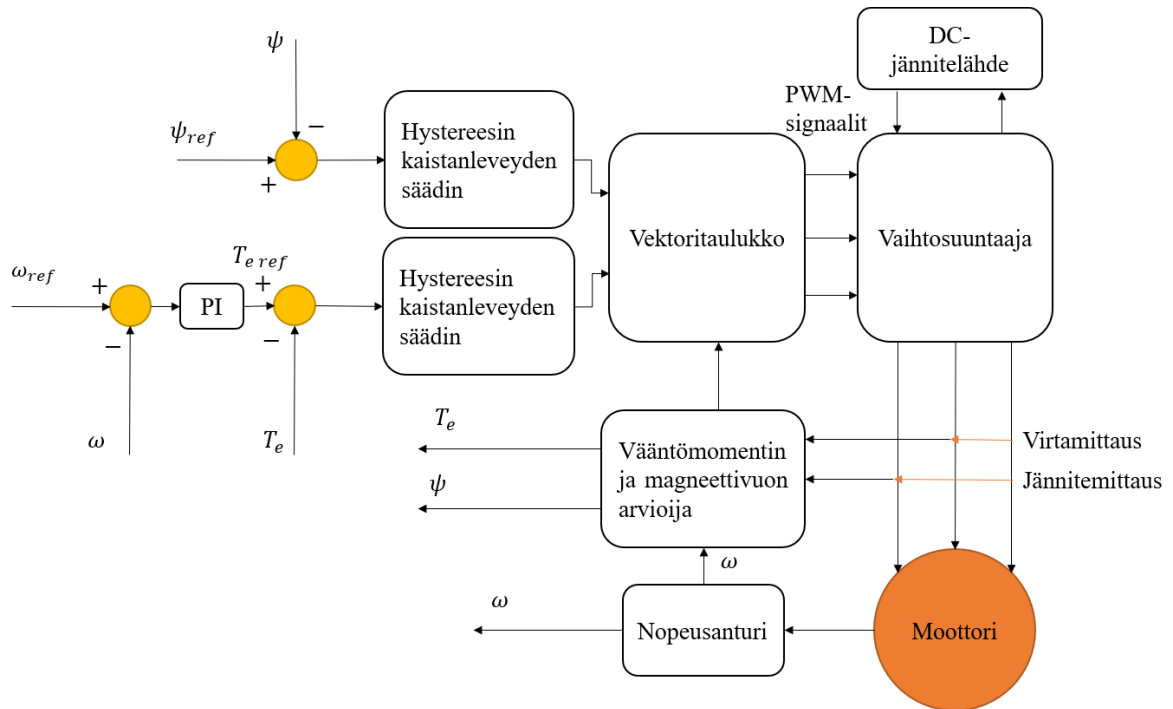
4.3 DTC

Suora vääntömomenttisäätö eli DTC on yleisimpiä säätötapoja BLDCM:ssa ja PMSM:ssa. Siinä on tarkoitus säätää moottorin vääntömomenttia suoraan ja vähentää moottorin vääntömomentin väreilyä (BLDCM:n suurimpia heikkouksia), joka johtuu CEMF:n ja vaiheiden virran erilaisesta aaltomuodosta. Se on parempi ohjaustyyli vektorisäätöön eli FOC:in verrattuna, jos droonin suuntaa pitää vaihtaa nopeasti, koska DTC reagoi nopeammin nopeuden ja vääntömomentin vaihteluun. DTC:ssa hallitaan magneettivuota, vääntömomenttia ja vaihtosuuntaajan transistorien kytkemisnopeuksia. Mitattuja arvoja verrataan moottorin ohjaimen syötettyihin referenssiarvoihin. Mitattu virhe vaikuttaa vaihtosuuntaajan kytkentänopeuteen, joka muuttaa moottorin nopeutta virheen mukaan. (Joshi ym. 2022)

$$u_s = R_s * i_s + \frac{d\psi_s}{dt} \quad (4.1)$$

DTC:n vääntömomentin vaihtamiseen muuttamalla staattorin ja roottorin magneettivuon kulmaa. Sen takia DTC:ssa on hyvin nopea vääntömomentin säätö, koska se voidaan suoraan muuttaa muuttamalla staattorin jännitettä yhtälön 4.1 tavoin. (Garcia ym. 2006)

Kuvassa 4.6 on esitetty DTC:n lohkokaavio, jossa ensimmäiseksi syötetään nopeuden referenssiarvo, joka muutetaan vääntömomentin referenssiarvoksi. Myös magneettivuon referenssiarvo annetaan ohjaimelle. Ennen vaihtosuuntaajaa on vektoritaulukko, jossa määrätään PWM-signaalit siihen syötettyjen arvojen perusteella. (Joshi ym. 2022)



Kuva 4.6. DTC:n lohkokaavio.

4.4 FOC

Toinen yleinen dronien moottorien säätötapa on vektorisäätö eli FOC. Siinä on korkein vääntömomentin ja virran suhde sekä pienin vääntömomentin aaltoilu. (Bosso ym. 2020) Toisin kuin BLDCM:n puolisuunnikasohjaus, FOC:ssa käytetään sinimuotoista virtaa moottorin keloissa. Se perustuu moottorin nopeuden ja väännön ohjaamiseen. (EEWeb 2021) Näiden ohjaaminen onnistuu ohjaamalla moottorin suorita (d) ja kohtisuoria (q) komponentteja, missä suorat määräävät moottorin magneettivuon ja kohtisuorat moottorin vääntömomentin. FOC:ssa moottorin keloihin meneviä virtoja hallitaan, jotta roottorin magneettien magneettivuo on kohtisuorassa staattorin magneettivuohon. (Shandle 2015) Kestomagneettiroottori tuottaa oman magneettivuon eli d-komponentit yritetään pitää 0:ssa, jotta q-komponentit saataisiin mahdollisimman suuriksi ja näin vääntömomentti mahdollisimman suureksi. (Garcia ym. 2006)

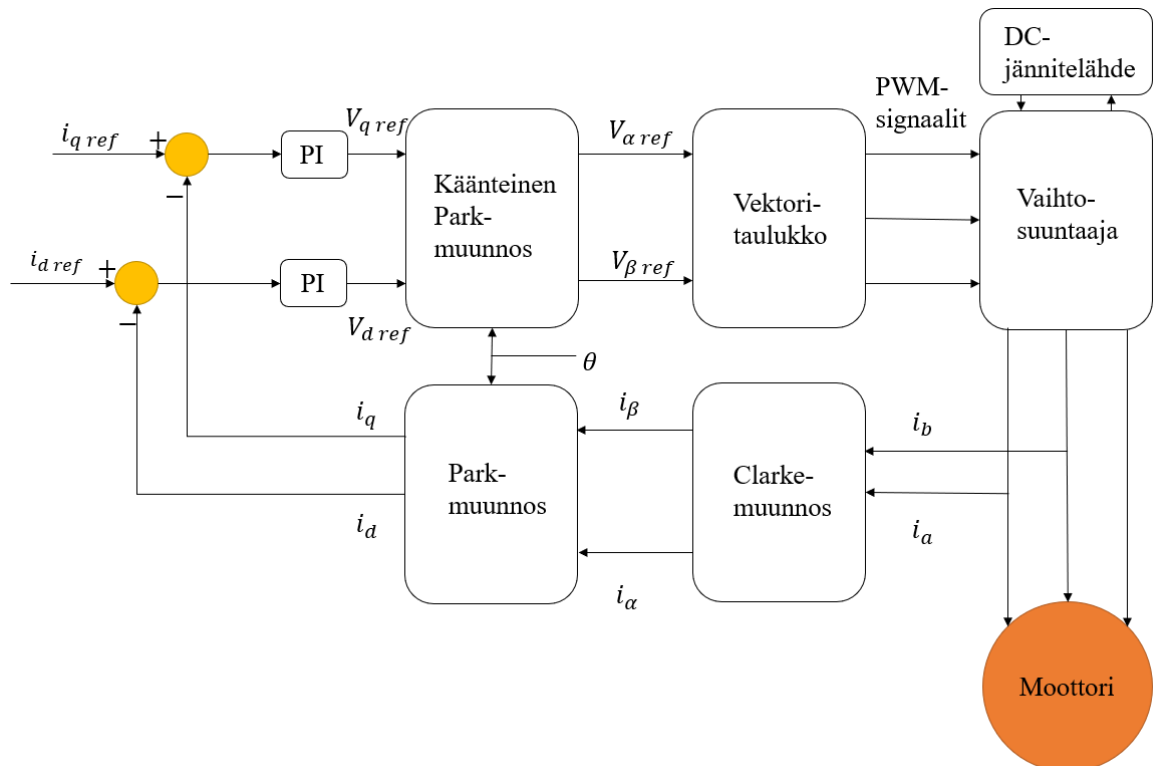
$$i_{\alpha} = i_a \quad (4.2)$$

$$i_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}i_a + \frac{2}{\sqrt{3}}i_b$$

$$i_d = i_{\alpha} * \cos \theta + i_{\beta} * \sin \theta \quad (4.3)$$

$$i_q = -i_{\alpha} * \sin \theta + i_{\beta} * \cos \theta$$

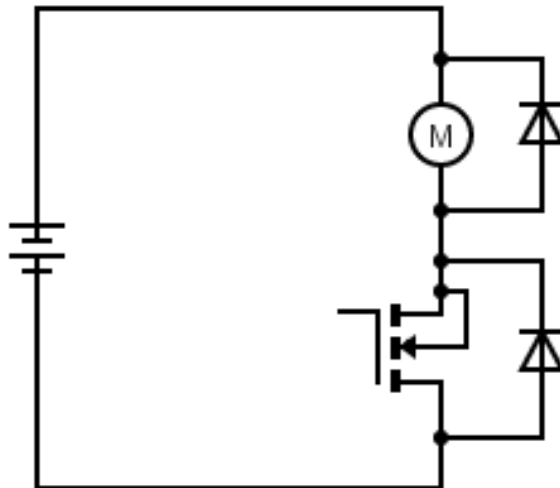
Kuvassa 4.7 näkyy yksinkertaistettu avoimen silmukan FOC. Siinä käytetään Clarke- ja Park-muunnoksia, jossa muunnetaan vaihevirta aluksi Clarke-muunnoksella aikavarianttiin muotoon, jonka jälkeen Park-muunnoksella aikainvarianttiin muotoon. Clarke-muunnoksessa käytetään yhtälöä 4.2, jolla vaihevirit muutetaan alfa- ja beetavektoreiksi, jonka jälkeen yhtälöllä 4.3 eli Park-muunnoksella muunnetaan d- ja q-muotoon, jotka lasketaan roottorin magneettivuon kulman (θ) avulla. (Texas Instruments 1998) Vertaamalla PMSM:n vääntömomentin yhtälö (3.3) ja BDCM:n vääntömomentin (3.4) huomataan, että FOC:n avulla voidaan matkia PMSM:lle BDCM:n yksinkertaisempi vääntömomentin ohjaus.



Kuva 4.7. Yksinkertaistettu FOC.

4.5 BDCM:n nopeusohjaus

BDCM:n pyörimisnopeus on verrannollinen sen yli olevaan jännitteeseen, eli sen nopeutta voi säätää muuttamalla syöttöjännitettä esimerkiksi vastuksen avulla. Tämän ohjaustavan ongelmaksi muodostuu se, että se tuottaa lämpöä ja hukkatehoa. Sen takia on moottorin ohjaaminen PWM:lla on tehokkaampaa. Tässä ohjaustavassa moottorin kanssa sarjaan on kytketty transistori, jota kytketään nopeasti päälle ja pois. Näin saadaan muutettua moottorin keskiarvoista virtaa ja täten moottorin vääntöä ja nopeutta. Kuvassa 4.8 on esitetty PWM-ohjauspiiri, missä transistori on kytketty sarjaan moottorin kanssa. Moottoriin on takaisin-kytkettynä diodi, joka purkaa moottorin kelat, kun transistori aukeaa. (Kedia 2020)



Kuva 4.8 PWM-ohjauspiiri BDCM:lle. (Muokattu kuva: Birks)

5 Sähkökäyttöjen haasteita

Yksi suurimpia haasteita dronin sähkökäyttöille on dronin energialähteet. Nykyiset akut antavat ainoastaan rajallisen (1–2 tunnin) lentoajan ja etenkin litiumakkujen materiaalit ovat kalliita. Akkukäyttöiset dronit eivät pysty myöskään yhtä nopeaan tehovasteeseen polttomoottorikäyttöisten dronien kanssa. Tähän ongelmaan voi käyttää superkondensattoreita,

jotka pystyvät tuottamaan hetkellisesti suuria määriä tehoja. Litiumpolymeeriakkujen energiatiheys on vain noin 300Wh/l (Joshi ym. 2022) verrattuna bensiinin, joka on noin 9000Wh/l. (Wishart 2014) Akkujen määrän kasvattaminen drooneihin on haastavaa, koska se kasvattaa droonin massaa.

Harjattomien moottorien ohjaaminen on haastavaa drooneissa, koska ne vaativat monimutkaisia ohjausmetodeja sekä sähköisiä nopeusohjaimia. Ohjaaminen vaatii paljon laskentatehoa droonilta ja etenkin BLDCM:n tapauksessa puolisuunnikasohjaus tuottaa paljon vääntömomentin väreilyä moottoriin verrattuna PMSM:n sinimuotoiseen ohjaukseen, mutta signaalin tekeminen on haastavampaa vaihtosuuntaajalla. Myös vaihtosuuntaajaan käytettyjen transistorien kytkeminen tuottaa paljon häviötehoa korkeilla taajuuksilla. (Joshi ym. 2022)

6 Johtopäätökset

Tässä työssä tehtiin kirjallisuuskatsaus droonien sähkökäytöistä, joihin sisältyi moottorityypit drooneissa, droonien sähköinen nopeusohjaus ja ohjaustavat. Kuluttajan on mahdollista ostaa droonien lisäksi niiden sähkökäyttöjen osia, mutta harrastelijat voivat haluta rakentaa itse drooninsa alusta asti. Tämän takia on hyvä tutustua droonien sähkökäyttöjen toimintaan. Työssä havaittiin, että BLDCM on kaikista moottorityypeistä yleisin, mutta myös muille moottorityypeille on käyttöä. BLDCM on paras moottorityyppi drooneille, koska siinä on korkeampi hyötysuhde kuin BDCM:lla ja sitä on helpompi ohjata PMSM:iin verrattuna. Droonit kuluttavat paljon energiaa lentäessä, eivätkä ne voi lentää useampaa tuntia. Parhaimmat akut drooneissa ovat litiumpolymeeriakkuja. Suuren virransyöttökäyvyn lisäksi niissä on suuri energiatiheys muihin akkuihin verrattuna. Kuitenkin kaikissa akuissa energiatiheys on paljon pienempi kuin bensiinissä. Moottorien säätömetodeista kaksi säätötapaa olivat suosituimmat: DTC ja FOC, mutta esimerkiksi yhden tutkimuksen (Joshi ym. 2022) mukaan DTC on parempi, koska se on yksinkertaisempi ja pystyy vastaamaan nopeammin vääntömomentin muutoksiin.

Droonien käyttö on lisääntynyt nyt niin siviili- kuin sotilaskäytössä. Etenkin sähkökäyttöiset droonit tulevat lisääntymään kaikissa käytöissä lähitulevaisuudessa, mutta ne eivät tule korvaamaan ainakaan heti polttomoottorillisia drooneja kaikissa tehtävissä energiatheyden

takia. Sähkömoottorillisten droonien käyttöaika voidaan tulevaisuudessa lisätä akkukapasiteettien lisäämisen lisäksi esimerkiksi aurinkopaneeleilla.

Droonien sähkökäyttöistä löytyi paljon tietoa artikkeleista ja tutkimuksista. Niiden toiminnan ympärille pystyi etsimään lisää tietoa, kuten ohjausmetodien toiminnasta ja sähkömoottorien rakenteiden erosta. Työssä pyrittiin käyttämään julkaistuja tutkimuksia ja valmistajien sivuja kuten Texas Instruments. Joihinkin aiheisiin kuten BDCM:n sähkökäyttöihin drooneissa löytyi huonosti tutkimuksia, niin niihin ei saanut aina vertaisarvioitua tutkimuksia. Myös tämän takia niihin ei syvennytty paljoa tässä työssä. Jatkotutkimukset on esimerkiksi mittauksia droonin energiankäytöstä eri moottorityypeillä ja nopeuksilla, sekä vertailua FOC:n ja DTC:n energian kulutuksesta ja vasteajoista eri droonin liikkeissä.

Lähteet

- Aalto-yliopisto, 2018, "Sähkökäytöt", <https://www.aalto.fi/fi/sahkotekniikan-ja-automaation-laitos/sahkokaytot>, Viitattu 28.3.2023
- Akin, B., Bhardwaj, M., Warriner, J. 2011, "Trapezoidal Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensors", Texas Instruments, <https://www.ti.com/lit/an/sprabz4/sprabz4.pdf>, Viitattu 27.2.2023
- Andrews, C., Soltero, M., Mesganaw, M., 2019, "Brushless DC Motor Commutation Using Hall-Effect Sensors", Texas Instruments, https://www.ti.com/lit/an/slvaeg3b/slvaeg3b.pdf?ts=1677740709553&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F, Viitattu 10.3.2023
- Azizi, I., Radjeai, H., 2015 "A bidirectional DC-DC converter fed DC motor for electric vehicle application", 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE), [10.1109/INTEE.2015.7416683](https://doi.org/10.1109/INTEE.2015.7416683), Viitattu 28.3.2023
- Birks, D., "Brushed DC Motors and How to Drive Them", Diodes Incorporated, <https://www.diodes.com/design/support/technical-articles/driving-brushed-dc-motors/>, viitattu 17.4.2023
- Bosso, A., Conficoni, C., Raggini, D., Tilli, A., 2020, "A Computational-Effective Field-Oriented Control Strategy for Accurate and Efficient Electric Propulsion of Unmanned Aerial Vehicles", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Volume 26, s. 1501-1511, [10.1109/TMECH.2020.3022379](https://doi.org/10.1109/TMECH.2020.3022379), Viitattu 10.3. 2023
- Cheng, Z., West, R., Einstein, C., 2018 "End-to-end Analysis and Design of a Drone Flight Controller" IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, [10.1109/TCAD.2018.2857399](https://doi.org/10.1109/TCAD.2018.2857399), Viitattu 28.3.2023
- Crescentini, M., Syeda, S., Gibiino, G. 2021, "Hall-Effect Current Sensors: Principles of Operation and Implementation Techniques", IEEE Sensors Journal, Volume 22, [10.1109/JSEN.2021.3119766](https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3119766), Viitattu 27.2.2023

- Davis, N. 2017, "All About BLDC Motor Control: Sensorless Brushless DC Motor Controllers", All About Circuits, <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/sensorless-brushless-dc-blcdc-motor-control/>, Viitattu 27.2.2023
- EWeb, 2021, "Design Fundamentals for Drone Motor Controller", <https://www.eeweb.com/design-fundamentals-for-drone-motor-controller/>, Viitattu 10.3.2023
- Garcia, X., Zigmund, A., Pavlanin, R., Salvatore, L., 2006, "COMPARISON BETWEEN FOC AND DTC STRATEGIES FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS", Teoksessa: Advances in Electrical and Electronic Engineering, VSB-Technical University of Ostrava, s. 76-81
- Gong, A., Verstraete, D., 2017, "Experimental Testing of Electronic Speed Controllers for UAVs", *53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, [10.2514/6.2017-4955](https://doi.org/10.2514/6.2017-4955), Viitattu 29.3.2023
- HobbyKing.com, "PROPDRIVE v2 2836 3000KV Brushless Outrunner Motor", https://hobbyking.com/en_us/propdrive-v2-2836-3000kv-brushless-outrunner-motor.html, viitattu 17.5.2023
- Hein, M., 2020, "Demystifying BLDC motor commutation: Trap, Sine, & FOC", Texas Instruments, https://www.ti.com/lit/ml/slyp711/slyp711.pdf?ts=1678383115276&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F, Viitattu 10.3.2023
- Hell, M., Bolam, R., Vagapov, Y., Anuchin, A. 2018, "Design of a portable drone for educational purposes", 2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED), [10.1109/IWED.2018.8321377](https://doi.org/10.1109/IWED.2018.8321377), Viitattu 27.2.2023
- Hossain, R. 2022, "A Short Review of the Drone Technology", International Journal of Mechatronics and Manufacturing Technology, https://www.researchgate.net/publication/362908663_A_Short_Review_of_the_Drone_Technology, Viitattu 27.2.2023
- Infineon, 2019, "Block commutation vs. FOC in power tool motor control", https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Motor_power_tool_Block_Commutation_vs_FOC-Application-Notes-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d4626eab8fbf016ed37fee474a65, Viitattu 10.3.2023

- Joshi, D., Deb, D., Muyeen, S. 2022, "Comprehensive Review on Electric Propulsion System of Unmanned Aerial Vehicles", *Frontiers*, [10.3389/fenrg.2022.752012](https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.752012), Viitattu 27.2.2023
- Kardasz, P., Dosckocz, J., Hejduk, M., Wiejkut, P., Zarzycki, H. 2016, "Drones and Possibilities of Their Using", *Journal of Civil & Environmental Engineering*, https://www.researchgate.net/publication/305273853_Drones_and_Possibilities_of_Their_Using, Viitattu 26.1.2023
- Kedia, S. 2020, "Controlling Brushed DC Motors Using PWM", *Machine Design*, <https://www.machinedesign.com/materials/article/21125511/controlling-brushed-dc-motors-using-pwm>, Viitattu 27.2.2023
- Koteich, M., Le Moing, T., Janot, A., Defay, F. 2013, "A real-time observer for UAV's brushless motors", 2013 IEEE 11th International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their application to Mechatronics (ECMSM), Toulouse : France (2013), [10.1109/ECMSM.2013.6648964](https://doi.org/10.1109/ECMSM.2013.6648964), Viitattu 27.2.2023
- Mani, P., Mahadevan, S., Johnson, A., Kullan, M., 2021, "An optimized design modelling of PV integrated SEPIC-based four-switch inverter for sensorless PMBLDC motor control", *Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, Volume 63 s. 90-101, <https://doi.org/10.1080/00051144.2021.2008621>, Viitattu 28.3.2023
- Mishra, A. 2021, "2 Blade vs 3 Blade Propeller: Which is Better for your Drone?", *Circuit Digest*, <https://circuitdigest.com/article/2-blade-vs-3-blade-propeller-which-one-is-better-for-your-drone>, Viitattu 27.2.2023
- Mongensen, K. 2016, "Motor-control considerations for electronic speed control in drones", *Texas Instruments Analog Applications Journal*, https://www.ti.com/lit/an/slyt692/slyt692.pdf?ts=1676969728421&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F, Viitattu 27.2.2023
- OscarLiang, 2019, *Brushed Motors vs Brushless Motors for Quadcopter*, <https://oscar-liang.com/brushed-vs-brushless-motor/>, Viitattu 27.2.2023
- Pond, C. 2021, "Drone Motors and ESCs", *ECE Senior Capstone Project*, https://sites.tufts.edu/eeseniorshandbook/files/2021/05/Pond_DroneMotorsAndESCs.pdf, Viitattu 27.2.2023

Prakosa, J., Samokhvalov, D., Ponce, G., Al-Mahturi, F. 2019, “Speed Control of Brushless DC Motor for Quad Copter Drone Ground Test”, 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.cc.lut.fi/document/8656647>, Viitattu 27.2.2023

Shandle, J., 2015, “Field-Oriented Control of Small DC Motors put Drones on a Rising Flight Path”, <https://www.digikey.com/en/articles/field-oriented-control-of-small-dc-motors-put-drones-on-a-rising-flight-path>, Viitattu 10.3.2023

Štulrajter, M., Makyšsn, P., Rafajdus, P., 2017, “Sensorless control of high speed BLDC”, IEEE International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED), [10.1109/SLED.2017.8078454](https://doi.org/10.1109/SLED.2017.8078454), Viitattu 10.3.2023

Texas Instruments, 1998, “Field Orientated Control of 3-Phase AC-Motors”, <https://www.ti.com/lit/ml/bpra073/bpra073.pdf?ts=1680090159418>, Viitattu 29.3.2023

Texas Instruments, 2016, “High-Speed Sensorless-FOC Reference Design for Drone ESCs” https://www.ti.com.cn/lit/ug/tiducf1/tiducf1.pdf?ts=1678196580750&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F, Viitattu 28.3.2023

Vaez-Zadeh, Sadegh, 2018, Control of Permanent Magnet Synchronous Motors, Oxford University Press, Oxford, s. 1-33

Wishart, J., 2014, “Fuel cells vs Batteries in the Automotive Sector”, [10.13140/RG.2.2.24357.70882](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24357.70882), Viitattu 29.3. 2023

Zhang, B., Song, Z., Zhao, F., Liu, C. 2021, “Overview of Propulsion Systems for Unmanned Aerial Vehicles”, Energies, Vol. 15, <https://doi.org/10.3390/en15020455>, Viitattu 27.2.2023