

LTY

Sähkötekniikan osasto

0804510000 Sähkökäyttöjen seminaari

19.11.2003

SEMINAARITYÖ

Harjaton tasavirtamoottori

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET.....	2
1 JOHDANTO.....	3
2 MIKSI KORVATA HARJALLINEN DC-MOOTTORI?.....	3
2.1 Tasavirtamoottorin historia.....	3
2.2 Hiiliharjallinen vastaan harjaton DC-moottori	4
3 HARJATON TASAVIRTAMOOTTORI.....	6
3.1 Rakenne	6
3.2 Vääntömomentin tuotto	8
3.3 Moottorin kommutointi.....	11
3.4 Vertailu kestoplaneettamoottoriin	12
4 MOOTTORIN OHJAUS	13
4.1 Sääntötekniset ratkaisut	14
4.2 Tehoelektroninen ohjaus.....	17
5 YHTEENVETO	19
LÄHDELUETTELO	20

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

ψ_{δ}	ilmavälikäävivuo
θ	roottorin kulman muutos
τ_m	mekaaninen aikavakio
ω, ω_0	kulmataajuus, nimelliskulmataajuus
a, b	moottorin parametrit
B_{δ}	magneettivuontiheys ilmavälissä
e_a	indusoitunut sähkömotorinen jännite
i	indeksi
I_a	ankkuripiirin virta
J	hitausmomentti
k	ankkurivakio
K_E	moottorin sähköinen vakio
K_T	moottorin vääntömomenttivakio
l	kestomagneettien pituus roottorin kehällä
N	käämikierrosten lukumäärä
P	moottorin tuottama mekaaninen tai sähköinen teho
r	asetusarvo
r_1	staattorin sisähalkaisija
R_a	ankkuripiirin resistanssi
T, T_0, T_e	hetkellinen, nimellinen ja sähköinen vääntömomentti
U	syöttöjännite
W	häiriö tai kuormitus
X, \dot{X}	tilamuuttuja, tilamuuttujan derivaatta
Z, \dot{Z}	erosuure, erosuureen derivaatta

1 JOHDANTO

Perinteisen hiiliharjallisen vierasmagnetoidun tasavirtamoottorin säätötekniset ominaisuudet ovat erinomaiset. Varsinkin ennen elektroniikka-alan huimaa kasvukehitystä, oli kyseinen moottorityyppi erittäin suosittu erilaisissa tarkan vääntömomentin-, pyörimisnopeuden- tai paikansäädön sovellusalueilla. Ongelmana on kuitenkin mekaanisen kommutaattorin aiheuttama huollontarve.

Tehoelektroniikan komponenttien ja magneettisten materiaalien kehityksen johdosta voitiin jo aiemmin suunniteltua harjatonta tasavirtamoottoria hyödyntää yhä laajemmilla tehoalueilla. Nykyisin jopa yli 300 kW:n tehoihin valmistettavien moottoreiden hyvinä puolina on helppo säädettävyys, roottorin pienet häviöt, pienempi rakenne, sekä huoltovapaus verrattuna perinteiseen tasavirtamoottoriin.

Rakenteellisesta samankaltaisuudestaan huolimatta, kestromagneettitahtikoneisiin verrattuna, on käsiteltävä konetyyppi kuitenkin selvästi tasavirtakone, joka osoitetaan tarkasteltaessa vääntömomentin muodostumista moottorissa. Erona vaihtovirtamoottoreihin on pyrkimys ilmapäiviuon suorakaiteisuuteen samoin kuin syötettävän staattorivirranksin. Tällöin vääntömomentti on ideaalisessa tapauksessa tasainen, kuten osoitetaan moottorin kommutoinnin yhteydessä.

Lisäksi on käsitelty kahden esimerkin avulla uusien säätötekniikoiden sovellettavuutta moottorin vaatimaan säätöön. Myös tehoelektroniikan avulla säädettyä ohjausjännitettä on hieman käsitelty.

2 MIKSI KORVATA HARJALLINEN DC-MOOTTORI?

2.1 Tasavirtamoottorin historia

Harjallisen tasavirtamoottorin kehitti jo vuonna 1856 saksalainen Werner von Siemens. Tietävästi ensimmäisen kerran pyörimisnopeuden säätöä ankkurijännitteen avulla hyödynnettiin 1930-luvun alussa ns. Ward-Leonard-järjestelmässä, jossa generaattorina toimiva tasavirtakone tuotti varsinaiselle moottorille, joka myöskin oli tasavirtakone, ankkurijännitteen. Generaattorin antamaa jännitettä ohjattiin muuttamalla magnetointia säätövas-

tuksen avulla. Kyseistä järjestelmää hyödynnettiin laajasti monilla teollisuuden aloilla aina 1960-luvun lopulle asti, kunnes tehoelektroniikan kehityksen johdosta voitiin tyristorien avulla tasasuunnata verkkojännite halutuksi tasajännitteeksi.

Harjattomien tasavirtamoottoreiden aikakausi alkoi suunnilleen samoihin aikoihin, kun tyristoritekniikka valtasi alaa. Sovellusten vaatimat lähtökohdat olivat samat kuin nykyisinkin harjattomilta tasavirtamoottoreilta vaadittavat, tarkoituksena oli tehdä moottori, jolla on hyvä vääntömomentti ja nopea vaste ohjeelle. Moottoria sovellettiin mm. kasettinauhureissa, robotiikassa ja lentokoneissa, joissa harjallista kommutointia haittaa muuttuva ilmantiheys. Moottorityyppiä ei kuitenkaan vielä tuolloin voitu hyödyntää juuri lainkaan teollisuuden parissa, sillä moottorista saatavat tehot olivat vielä hyvin alhaiset. Kuitenkin 80-luvulla tapahtuneen kehityksen ansiosta, niin kestopagneeteissa kuin tehoelektroniikasakin, ovat mahdollistaneet harjattomien tasavirtamoottoreiden käyttämisen yhä laajemmilla sovellusalueilla nousseiden käyttötehojen ansiosta. [1]

2.2 Hiiliharjallinen vastaan harjaton DC-moottori

Harjakommutoidun tasavirtamoottorin paras kilpailuvaltti on sen pyörimisnopeuden ja vääntömomentin erinomainen säädettävyys. Jos äkilliset muutokset ohjeessa jätetään huomiotta, on DC-moottorin pyörimisnopeus suoraan verrannollinen ankkurijännitteeseen. Vastaavasti moottorin vääntömomentti on suoraan verrannollinen ankkuripiirin virtaan. Etenkin täysin kompensoidun tasavirtamoottorin tapauksessa nämä pitävät hyvin paikkansa. Muissa tasavirtamoottorityypeissä tulee vääntömomentin säädössä ongelmaksi ankkurireaktio eli ankkurivirran ankkurikäämiin synnyttämä käämivuo, joka muuttaa ilmavälivuon suuntaa. Tällöin vääntömomentin tuotto ei enää ole paras mahdollinen, koska ankkurivirta ja ilmavälivuo eivät enää ole kohtisuorassa toisiaan vastaan.

Huonoja puolia harjakommutoiduissa tasavirtamoottoreissa ovat niiden valmistuskustannukset, huollontarve, rajoittunut pyörimisnopeus, suuri hitausmassa ja RFI. Suurin osa ongelmista muodostuu nimenomaan kommutoinnista. Vaikka kommutaattori on mekaanisesti hyvin yksinkertainen, on sen valmistaminen massatuotannossa suhteellisen hidasta etenkin, kun otetaan huomioon roottorin käämityksen liittäminen kommutaattoriin. Lisäksi hiiliharjojen ja kommutaattorin mekaaninen kuluminen vaativat tiheämpää huollontarvetta kuin

esimerkiksi vastaava oikosulkumoottori. Harjakommutoidun tasavirtamoottorin suurimmilla pyörimisnopeuksillakaan ei voida kilpailla muiden sähkömoottorityyppien kanssa. Pyörimisnopeutta rajoittaa hiiliharjojen ja kommutaattorin rakojen välinen kipinöinti, sekä hiiliharjojen irtoaminen kommutaattorin pinnasta, jolloin luonnollisesti myöskin kipinöintiä ilmenee. Tämä voi pahimmillaan aiheuttaa kommutaattorin rikkoutumisen. Kipinöinti aiheuttaa myös korkeataajuisia sähkömagneettisia häiriöitä, joita esim. tietokoneen kiintolevyjen ohjauksessa ei voida sallia. Kipinöintivaarasta johtuen ei kyseistä moottorityyppiä voida myöskään käyttää räjähdysvaarallisissa tiloissa. Roottorin metallisesta rakenteesta johtuva suuri hitausmomentti ei myöskään ole suotavaa esimerkiksi servosäädetyissä sovelluksissa. Tosin tulee huomata, että lähinnä vain reluktanssimoottoreilla ja harjattomilla tasavirtamoottoreilla voidaan saavuttaa merkittävästi pienempi roottorin hitausmomentti, käytettäessä muovisia tai muita keveitä rakenteita. On kuitenkin muistettava, ettei roottorin hitausmomentti ole ainoa vaikuttava tekijä määritettäessä moottorin mekaanista aikavakiota. Mekaaniselle aikavakiolle tasavirtamoottorin tapauksessa saadaan

$$\tau_m = \frac{JR_a}{K_e K_T}, \quad (1)$$

missä J on roottorin hitausmomentti, R_a on ankkuriin resistanssi, K_E on moottorin rakenteesta johtuva sähkövakio ja K_T on moottorin vääntömomenttivakio. Lisäksi on myös huomattava kuormituksen vaikutukset aikavakioon. Myös kommutaattorin ja hiiliharjojen hankauksesta aiheutuva kitkahäviö voi olla etenkin hyvin pienissä teholuokissa merkittävä moottorin kuormittaja. Lisäksi kommutaattori hiiliharjoineen vie suhteellisen paljon tilaa, eikä roottorin, joka omaa vääntömomentin tuottamiseen tarvittavan käämityksen, jäähdyttäminen ole aina helposti toteutettavissa.

Harjattomissa tasavirtamoottoreissa pyörimisnopeus ja vääntömomentti on säädettävissä samoin periaattein kuin harjallisenkin moottorin. Etuna harjattomalla moottorilla on tietenkin mekaanisen kommutoinnin puuttuminen, jolloin vältytään jo osasta edellä mainituista ongelmista. Myös mahdollinen nopeustakaisinkytkentä voidaan toteuttaa moottorin sisäpuolella esimerkiksi riittävän tiheäjakoisen enkooderin avulla. Lisäksi harjaton tasavirtamoottori on helppo valmistaa hermeettisesti tiiviiksi. Myös tällä moottorityypillä on suuret

pyörimisnopeudet ongelmallisia. Kestomagneeteille tulee tehdä erilliset kiinnitykset, jotta ne kestäisivät roottorissa kiinni ja lisäksi kentänheikennyksessä moottorin käämitysten virtoja on ohjattava niin, että magneettien muodostama vuo pienenee ilmavälissä. Aiemmin tämä oli ongelmallista magneettien mahdollisen demagnetoitumisen vuoksi, mutta nykyiset magneettimateriaalit ovat kehittyneet tälläkin osa-alueella, joten kentänheikennys on mahdollista toteuttaa. [2], [3]

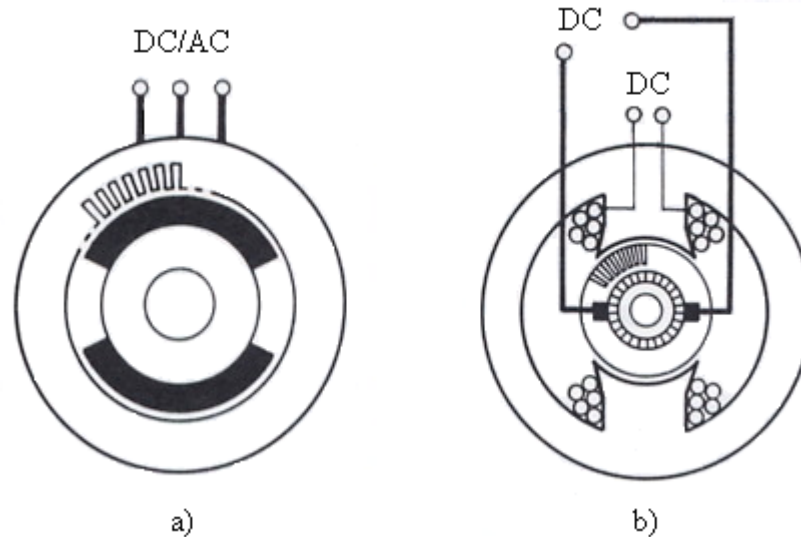
3 HARJATON TASAVIRTAMOOTTORI

Tänä päivänä on mahdollista saada harjaton tasavirtamoottori muutaman sadan watin tehoista aina 300 kW:n tehoihin asti. Tämä on antanut teollisuudelle mahdollisuuden korvata hiiliharjalliset tasavirtakäytöt harjattomilla. Harjattomat DC-käytöt kilpailevat myös induktiomootoreiden kanssa samoista käyttömahdollisuuksista. Tasavirtakäytön huomattavana etuna on, kuten jo aiemminkin on mainittu, sen helppo ja hyvä ohjattavuus. Sen järkevä tehoalue kilpailtaessa induktiomootorin kanssa on alle 1015 kW. Tarkkaa raja-aluetta ei ole olemassa, mutta yli 10 kW:n tehoilla induktiomootorin hyötysuhde paranee, kun vastaavasti samalla kestopagneettien hinta heikentää huomattavasti tasavirtakäytön investoinnin kannattavuutta. 1-10 kW:n tehoalueella harjattomalla tasavirtamoottorilla on kuitenkin induktiomootoriin verrattuna parempi hyötysuhde ja vääntömomentin tuotto. Lisäksi roottorin tehohäviöt ovat huomattavasti pienemmät virrallisten johtimien puuttuessa, mikä näkyy parempana jäähdytettävyytenä ja riippuen hieman roottorin materiaalista, myös hitausmomentti voidaan saada pienemmäksi. Näiden yhteisvaikutuksesta voidaan myös moottorin kokoa pienentää.

3.1 Rakenne

Perinteisessä tasavirtamoottorissa on ankkurikäänitys roottorissa ja staattorissa joko avonapakäämitys tai kestopagneetit. Tällaisen moottorin periaatteellinen rakenne on esitetty kuvassa 1 b). Vastaavasti kuvasta 1 a) nähdään harjattoman tasavirtamoottorin periaatteellinen rakenne.

Kuten edellä havaittiin, harjattoman tasavirtamoottorin ankkuri on nyt siirretty staattoriin ja roottoriin on kiinnitetty yksi tai useampi kestmagneetti. Koska roottoriin ei enää tarvitse syöttää sähkövirtaa vuon muodostamiseen, voidaan roottorista poistaa kommutaat



Kuva 1. Harjattoman a) ja hiiliharjallisen b) tasavirtamoottorin rakenteet katsottuna roottorin D1-päästä, sekä lisäksi moottorien tarvitsemat käyttöjännitteet. Harjattoman tasavirtamoottorin rakenne on lähes sama kuin tahtimoottorin. [3]

tori, jolloin säästetään huomattavasti roottorin aksiaalisessa pituudessa. Tällöin roottorin värähtely nopeassa paikkasäädössä suurilla vääntömomenteilla on huomattavasti pienempi. Staattorikäänitys on, kuten vaihtovirtamoottoreissakin, usein kolmivaiheinen urakäänitys, mutta myös avonapaisia käänityksiä käytetään. Kuitenkin ensin mainittu on tehokkain käänitystapa, tasaisen vääntömomentin aikaansaamiseksi. Käänitykset voivat lisäksi olla joko keskitetty tai levitetty useamman staattorin uran ympärille. Jälkimmäinen käänitysrakenne edustaa selvästi enemmän perinteistä induktimoottorin käänitystä, mutta tällöin ei saavuteta niin suorakaiteenmuotoista käänimvuota ilmaväliin.

Vielä yhtenä merkittävänä rakenteellisena erona verrattuna perinteiseen tasavirtakoneeseen on roottorin asennon tunnistaminen. Tämä tehdään usein Hall-antureiden avulla, mutta myös optisia menetelmiä tai lähestymiskytkimiä voidaan käyttää. Suurtehoisissa moottoreissa on nykyään käytössä sekä Hall-anturi että enkooderi, joista Hall-anturilla pääsääntöisesti mitataan roottorin asentoa ja enkooderilla pyörimisnopeutta. Hall-anturi ei myös-

kään merkittävästi lisää moottorin lopullista hintaa ja nykyisillä mikropiirien valmistustekniikoilla saadaan roottorin asennon ohjaus toteutettua jo anturissa itsessään.

3.2 Vääntömomentin tuotto

Tarkastellaan seuraavaksi moottorin vääntömomentin muodostumista. Kuvassa 2 a) on esitetty kolmivaiheinen umpinapainen harjaton tasavirtamoottori, jonka käämitykset on kytketty tähteen. Staattori koostuu 12 urasta, joten tällöin yksi napapari koostuu neljästä urasta, jolloin jokainen vaihe koostuu kahdesta sarjaan kytketystä käämityksestä. Tarkastelussa on oletettu kestopagneettien luoman ilmvälivuontiheyden olevan täysin suorakaiteenmuotoinen, samoin kuin virran käyrämuotojen. Myös magneettiipiirien oletetaan olevan ideaaliset eli kyllästymistä vuon kulkiessa staattorissa ei oteta huomioon.

Oletetaan ilmvälivuontiheyden olevan kuvan 2 b) mukaisesti suorakaiteen muotoinen. Tästä johtuen, roottorin pyöriessä, muodostuu käämityksiin a_1A_1 lineaarisesti muuttuva käämivuo, kuten kuvasta 2 c) nähdään. Integroimalla ilmvälivuontiheyden yli saadaan

$$\Psi_{\max} = NB_{\delta}\pi r_1 l, \quad (2)$$

missä N on käämikierrosten lukumäärä, B_{δ} ilmvälivuontiheys, r_1 staattorin sisäpinnan säde ja l on kestopagneetin pituus roottorin pinnalla. Vuon muutos roottorin pyöriessä on

$$\psi(\theta) = \left(1 - \frac{\theta}{\pi/2}\right) \Psi_{\max}, \quad (3)$$

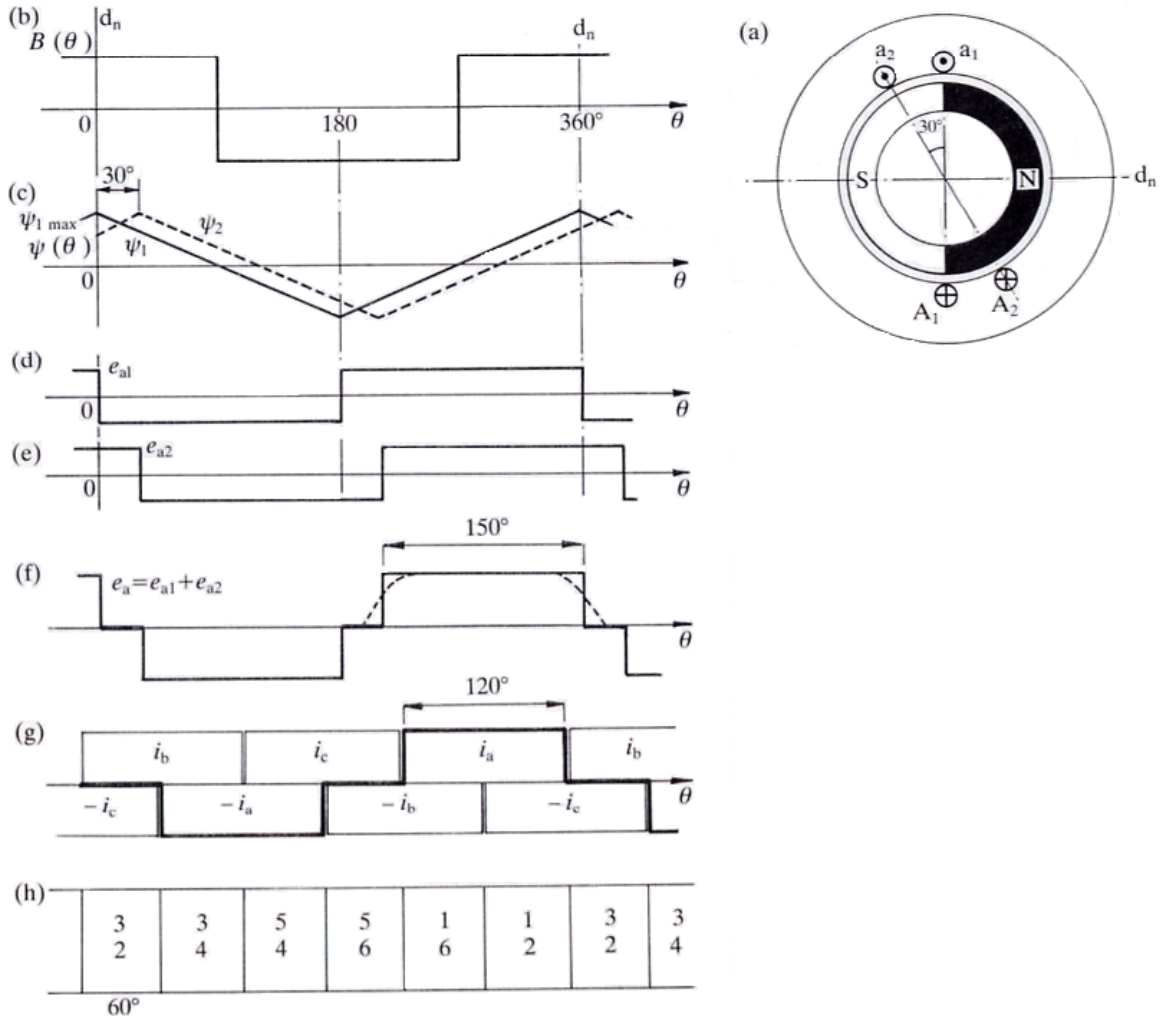
Roottorin pyörimisen aiheuttama vuon muutos indusoi käämitykseen jännitteen

$$e_{a1} = -\frac{d\psi}{dt} = -\omega \frac{d\psi}{d\theta}, \quad (4)$$

johon sijoittamalla käämiin vaikuttavan vuon sen hetkinen arvo, saadaan

$$e_{a1} = 2NB_{\delta}l r_1 \omega. \quad (5)$$

Saman vaiheen toiseen käämitykseen indusoituu jännite e_{a2} , joka on yhtä suuri kuin e_{a1} , mutta on 30° jäljessä e_{a1} :tä. Näiden kuvaajat on esitetty kuvassa 2 d) ja e).



Kuva 2. Vääntömomentin muodostaminen ideaalisten käyrämuotojen avulla. a) Moottorin yhden vaiheen muodostuminen kahdesta erillisestä käämityksestä. b) Ilmavälivuontiheyden B_δ käyrämuoto, sekä siitä integroitu käämivuo c), joka indusoi käämityksiin d), e) jännitteen e_{a1} :n ja e_{a2} :n. Koska käämitykset ovat nyt sarjassa, f) muodostuu näistä summa-aalto. g) Ideaaliset vaihevirran arvot ja h) niiden muodostamiseen tarvittavat kytkintilat, kun moottorin käämitys on kytketty tähteen. [3]

Lisäksi, koska käämitykset ovat sarjassa, muodostuva vaihejännite on näiden summa e_a . Summautumisesta muodostuu, kuten kuvasta 2 f) nähdään, askelmaisesti muuttuva jännite. Todellisuudessa muutokset eivät kuitenkaan tapahdu askelmaisesti, vaan muutoksen reuna-alueet pyöristyvät kuvan katkoviivan mukaisesti. Tästä johtuen aaltomuodon tasaisen alu-

een astekulma saattaa pienentyä jopa 30° . Kulmien pyöristyminen johtuu rautapiirien kylästymisestä ja kestopagneettien hajavoista.

Minkä tahansa vaihevirran 120° vaikutusalueella, pätee mekaaniselle ja sähköiselle teholle

$$P = \omega T_e = 2e_a I, \quad (6)$$

missä kerroin kaksi tulee siitä, että vain kaksi vaihetta johtaa yhtäaikaista. Kun yhdistetään tähän yhtälö (5), saadaan

$$T_e = 8NB_\delta l r_1 I. \quad (7)$$

Kun lasketaan sarjassa olevat vastasähkömotoriset jännitteet yhteen eli merkitään $E = 2e_a$, voidaan yhtälöt (5) ja (7) sieventää muotoon

$$E = k\phi\omega \quad (8)$$

$$T_e = k\phi I, \quad (9)$$

missä $k = \frac{4}{\pi}N$ on ankkurivakio ja $\phi = B_\delta r_1 \pi l$ on ilmavälin magneettivuo. Nyt saadaan käyttöjännitteelle yhtälö

$$U = E + RI. \quad (10)$$

Sijoittamalla tähän yhtälöt (5) ja (9), saadaan pyörimisnopeus vääntömomentin ja jännitteen funktiona

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{T}{T_0} \right), \quad (11)$$

missä moottorin nimelliskulmanopeus $\omega_0 = \frac{U}{k\phi}$ ja vääntömomentti nollanopeudella

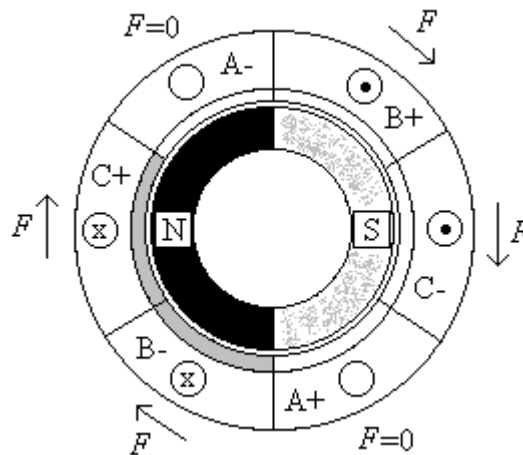
$$T_0 = k\phi I_0.$$

Yhtälöistä (11) ja (9) nähdään, että harjattoman tasavirtamoottorin pyörimisnopeutta voidaan säätää suoraan syöttöjännitteen avulla ja vääntömomenttiin voidaan vaikuttaa ankkurivirran avulla. Molemmat edellä mainituista ovat, kuten harjallisen tasavirtamoottorinkin tapauksessa, suoraan verrannollisia jännitteeseen ja virtaan.

Vaikka esitetty moottori onkin umpinapainen, ei vääntömomentin muodostuminen eroa periaatteellisesti laisinkaan avonapaisesta moottorista. Tietysti avonapaisen käämityksen kanssa tulee ottaa huomioon myös reluktanssivääntömomentti.

3.3 Moottorin kommutointi

Tarkastellaan uudelleen edellisen esimerkin mukaista moottoria, joka on piirretty uudestaan kuvaan 3. Oletetaan nyt, että jokainen vaihe tuottaa suorakulmaisen vuontiheyden ja vaiheiden välissä vuonmuutoksissa ei ole katkoksia.



Kuva 3. Tasaisen vääntömomentin muodostus edellyttää ohjainpiiriltä hyvää kommutointia, sillä kahden vaiheen (esim. B ja C) tulee johtaa yhtäaikaaisesti. Tällöin kuvan mukaisin virroin roottori pyörii vastapäivään.

Tasaisen vääntömomentin aikaansaamiseksi tulee vain kahden vaiheen johtaa yhtäaikaaisesti. Kuvan 3 tilanteessa johtavat vaiheet B ja C, jolloin moottori pyörii vastapäivään. Staat-

torin virrallisiin käämityksiin syntyy kuvan mukaiset voimat ja koska staattori ei pysty liikkumaan, pyörii roottori vastakkaiseen suuntaan. Koska A-vaiheen käämitykset eivät nyt tuota käämivuota ilmapäliin, pysyy koko tämän 60°:een siirtymän aikana vääntömomentti jatkuvasti tasaisena, koska ilmapäliivuo säilyy vakiona virrallisten käämitysten alueella. Roottorin siirtymän jälkeen tulee virransyöttö katkaista vaiheessa C ja vastaavasti sitä tulee syöttää vaiheeseen A. Käämitysten virtojen syöttöjärjestys nähdään kuvasta 2 f), kun moottorin vaiheet on kytketty tähteen.

Näin muodostettu vääntömomentti ei ole suurin mahdollinen, mitä moottorista saataisiin. Kuvan 3 tapauksessa suurin vääntömomentti saataisiin, kun vaiheeseen A kytkettäisiin negatiivinen jännite eli samoin kuin kuvassa on kytketty vaihe B. Tämän toteutuksen haittapuolena olisi kuitenkin vääntömomentin tasaisuuden menettäminen, sillä nyt vääntömomentti pienenee väistämättömästi roottorin pyöriessä seuraavat 30°, jonka jälkeen voidaan uusi kommutointi suorittaa. Vääntömomentin käyrämuodon heilahtelu olisi siis kolmioaaltoista 60°:een jaksolla.

Todellisuudessa ei pystytä täysin luomaan suorakaiteenmuotoista ilmapäliivuota johtuen magneettien reuna-alueista, kuten jo aiemmin on mainittu. Jopa erittäin voimakkailla magneeteilla, jotka peittävät koko roottorin edellisen esimerkin tapaan, on n. 10-20° muutosalue. Lisäksi jos roottorissa halutaan käyttää useampaa magneettia, on niiden väliin jätettävä väli, joka luonnollisesti lisää epäideaalisuutta ilmapäliivuossa.

3.4 Vertailu kestopäliittitahtikoneeseen

Kun harjattomassa tasavirtamoottorissa pyritään luomaan roottorin magneettien ja staattorin käämitysten avulla suorakaiteenmuotoinen ilmapäliivuntiheys, pyritään kestopäliittitahtikoneiden tapauksessa muodostamaan ilmapäliivuntiheydestä mahdollisimman sini-aaltomainen. Tähän pyritään niin kestopäliittitahtimoottoreiden vääntömomentti- ja pyörimisnopeussäätö eivät enää ole suoraan verrannollisia staattorivirtaan tai -jännitteeseen. Toisin sanoen moottorin säätö ei ole enää yhtä helposti toteutettavissa kuin harjattoman tasavirtamoottorin tapauksessa.

Vertailtaessa moottorityyppien vääntömomentin tuottoa, voidaan osoittaa, vaihevirtojen tehollisarvojen ollessa yhtä suuret, harjattoman tasavirtamoottorin tuottavan 1,47 kertaa suuremman vääntömomentin. Jos vertaillaan vääntömomentin tuottoa, kun vaihevirtojen huippuarvot ovat yhtä suuret, on harjattoman tasavirtamoottorin etu enää 1,27 kertaa suurempi kuin kestopagneettitahtikoneen. Vertailussa on oletettu magneettien olevan sijoitettu roottorin pinnalle molemmissa tapauksissa, jolloin harjattomalla tasavirtamoottorilla on tietenkin enemmän magneettimateriaalia käytettävissä. Tällöin myös magneettivuon tehollisarvo on suurempi tasavirtamoottorilla. Jos vertailussa oletettaisiin yhtä suuret magneettivuon ja vaihevirtojen tehollisarvot, olisi harjattoman tasavirtamoottorin vääntömomentin tuotto nyt 0,94 kertainen kestopagneettitahtikoneeseen verrattuna.

4 MOOTTORIN OHJAUS

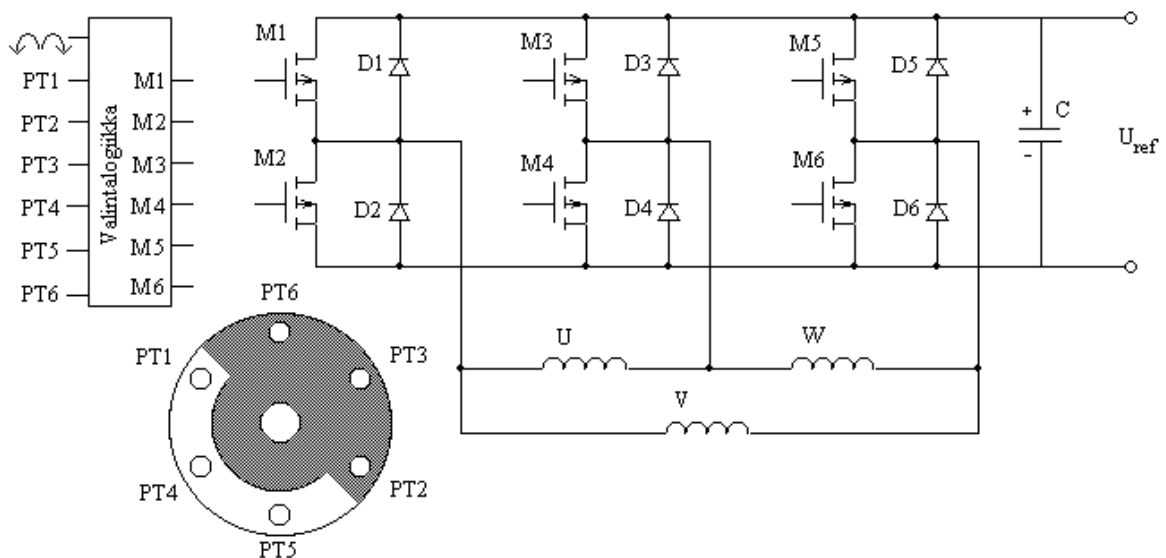
Tarkastellaan seuraavaksi erilaisia tapoja säätää moottorin vääntömomenttia eli toisin sanoen kommutoinnin muodostamista.

Harjaton tasavirtamoottori tarvitsee aina roottorin asentotiedon. Vaihtovirtamoottorityypit eivät välttämättä tätä tarvitse, mutta usein esimerkiksi tahtimoottoreiden hyvä säätö edellyttää myös roottorin asentotiedon olemassaoloa. Asentotieto voi olla joko suora takaisinkytkentä esimerkiksi Hall-anturin avulla tai sitten se voidaan estimoida moottorin mallinnuksen avulla. Valitettavasti harjattomien tasavirtamoottoreiden tapauksessa luotettavista moottorimalleista huolimatta, ei takaisinkytkemätöntä moottorimallinnusta ole vielä onnistuttu luotettavasti toteuttamaan. Ongelmana on roottorin asentotieto käynnistyksessä, mutta toisaalta, koska anturi voidaan helposti liittää moottorin sisälle, on se varsin luotettava ja pitkäikäinen toiminnaltaan.

Yksinkertaisin ja halvin tapa moottorin kommutoimiseksi on toteuttaa se valolähteen ja valotransistorien avulla. Siinä roottoriin on kiinnitetty 2/3-ympyrän muodostava levy, joka peittää valolähteeltä aina kaksi valotransistoria kerrallaan. Näin ollen ainoa johtavassa tilassa oleva transistori ohjaa aina virran kyseiselle käämille. Käämin muodostaessa virran, kestopagneetein varustettu roottori kääntyy kohti kyseistä käämitystä, jolloin myös roottorissa oleva levy kääntyy. Roottorin käännettyä riittävästi vaihtuu valotransistorien johtavuus, jolloin seuraava käämitys tuottaa vääntömomenttia. Moottorin säädettävyys ei kärsi

tällaisen ohjauksen johdosta, sillä kuten aiemmin on todettu, pyörimisnopeutta ohjataan käyttöjännitteen avulla. Moottorin vääntömomentin tuotto on kuitenkin huomattavasti heikompi kuin edellisessä esimerkissä, koska nyt johtaa vain yksi käämitys kerrallaan.

Parempi tulos saadaan kuvan 4 mukaisesti. Siinä moottori on kolmivaiheinen, jonka käämitykset on kytketty kolmioon. Valotransistoreita on kuusi, joista yhtäaikaaisesti johtaa kolme eli toisin sanoen valotransistoreita peittävä levy on puolet koko ympyrästä. Tällöin voidaan käyttää kokosiltakonvertteria syöttämään moottoria, joita käytetään myös mm. induktiomootoreiden kanssa. Ohjausalgoritmeiksi riittää kuitenkin huomattavasti yksinkertaisemmat menetelmät ja tähän riittääkin helpoimmillaan vain logiikkapiirit. Periaatteessa näitäkään ei tarvittaisi, sillä varsinainen ohjaus toteutuu jo valotransistorien oikealla ryhmittämisellä, mutta jos halutaan muuttaa pyörimissuuntaa on logiikkaa muutettava.



Kuva 4. Kokosiltakonvertterin kommutoinnin ohjaus optisena toteutuksena. Piirissä tarvitaan myös yksinkertaisia logiikkapiirejä, sillä valotransistorien oikea ryhmittely ei pelkästään riitä, jos moottoria on tarkoitus ajaa molempiin suuntiin.

4.1 Sääte tekniset ratkaisut

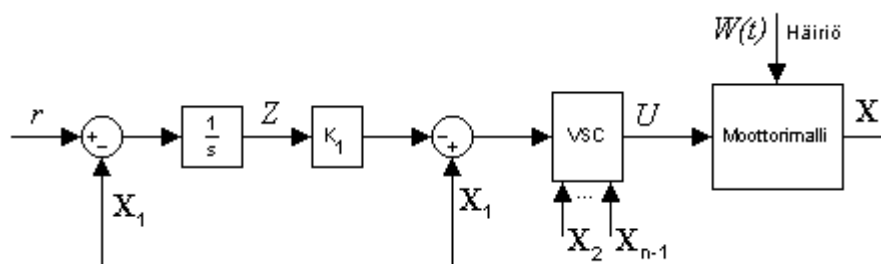
Kuten jo aikaisemmin on todettu, on harjattomassa tasavirtamoottorissa kaksi säädettävää tekijää, pyörimisnopeus ja vääntömomentti. Näistä pyörimisnopeutta säädetään ankkuri-jännitteen avulla ja vääntömomenttia ankkurivirran avulla. Koska harjattoman tasavirtamoottorin eräs sovellusalue on robotiikka, on säädön tarkkuus ratkaisevassa asemassa. Pe-

rinteiset analogiset säätötoteutukset ovat usein PI- tai PID-säätimiä moottorin kaskadimalliin perustuen. Tällöin ei kuitenkaan voida huomioida moottorin epälinearisuuksia, kuten pyörimisnopeuden pulssimaisuus etenkin pienillä pyörimisnopeuksilla tai käämitysten virrat. Lisäksi ongelmia tuottaa parametrien muuttuminen, kuten käämitysten lämpeneminen, vuon kyllästyminen tai kuorman hitausmomentin huomattava muuttuminen. Myöskään vääntömomentti ei ole paras mahdollinen, sillä roottorin vuo ja ankkurivirta eivät ole toisiaan vastaan kohtisuorassa. Tämän takia onkin kehitetty koko joukko uusiin edistyneisiin säätömenetelmiin perustuvia säätimiä, joiden toimintaa seuraavassa ohuesti valotetaan. On kuitenkin muistettava, että harjattoman tasavirtamoottorin alkuperäinen ajatus oli nimenomaan helppo säädettävyyttä, joten tästä joudutaan väistämättä luopumaan.

Eräs robustin säädön toteutustapa on liukuvan moodin säätö. Tämä säätötapa soveltuu erityisesti sovelluksiin, joissa toimilaitteena käytetään juuri tehoelektroniikkaa, sillä säädön edellytyksenä on suuri ohjausvoima ja nopea tilanmuutos. Liukuvan moodin hyviä puolia ovat stabiilius parametrien suhteellisen laajalla muutosalueella, nopea dynaaminen vaste ja tarkkuus. Lisäksi harjattoman tasavirtamoottorin tapauksessa voidaan vääntömomentin muodostamiseen vaadittavat virta ja käämivuo pitää toisiaan vastaan jatkuvasti kohtisuorassa. Valitettavasti ongelmina ovat, kuten usein epälineaarisen säädön tapauksessa, vaikea matemaattinen ratkaisu, johon ei vielä ole saatavilla aikaisempia toteutuksia, sekä mikroprosessorilta vaadittava suuri laskentateho. Myös algoritmien tulee olla tehokkaasti suunniteltuja, sillä teoriassa säädöllä oletetaan olevan äärettömän nopea tilanvaihto. Eräs tapa toteuttaa säädin on esitetty viitteessä [4]. Tämä vaatii roottorin asema-, nopeus- ja kiihtyvyystiedon, jotka ovat kaikki saatavilla Hall-antureiden ja enkooderin avulla. Virran säätö on toteutettu digitaalisella hystereesisäädöllä ja nopeuden sekä paikan säätö on toteutettu liukuvan moodin säätimellä. Säätömenetelmä ei tarvitse kuin riittävän tehokkaan mikroprosessorin, sillä säädin ohjaa suoraan kokosiltakonvertterin tehokomponentteja eli jännitteen tasasuuntaukseen riittää ainoastaan diodisilta ja riittävä suodatus.

Toinen robustitapa säätää harjatonta tasavirtamoottoria on käyttää integroivasti muuttujia kompensoivaa menetelmää (IVSC, Integral Compensated Variable Structure). Eräs tapa toteuttaa säädin on esitetty viitteessä [5]. Säätäjä on jälleen toteutettu kaskadirakennetta hyödyntäen. Sisempänä säätäjänä on virtasäädin, joka toimii pulssin leveys modulaation

avulla ja ulompana säätimenä toimii IVSC. IVSC on parannettu säätötapa normaalista muuttuva parametrisesta (VSC, Variable Structure Control) säätäjästä. Periaatteessa tavallinen VSC:kin toimisi muuttuvakuormaisessa servosäädetyssä käytössä, mutta tämän stabiiliuden ja etenkin pysyvätilan virheettömyyden takaaminen kaikissa tilanteissa on usein ongelmallista. IVSC:n rakenne on selvitetty kuvassa 5.



Kuva 5. IVSC-säätäjän periaatteellinen rakenne. Integroitu virhe vähennetään mitatusta arvosta, jonka jälkeen tilamuuttujat kerrotaan joko taulukoiduilla tai estimoiduilla moottorin parametreilla.

Säädön matemaattinen kuvaus saadaan yhtälöillä

$$\dot{X} = X_{i+1}; i = 1, \dots, n-1 \quad (12)$$

$$\dot{X}_n = -\sum_{i=1}^n a_i X_i + bU - W(t) \quad (13)$$

$$\dot{Z} = r - X_1 \quad (14)$$

Toisin sanoen takaisinkytkennän olotilasta eli paikkatiedosta vähennetään integroidun virheen arvo. Tästä saadaan paikan tilamuuttujan arvo, joka viedään VSC:hen kuten muutkin tilamuuttujat, jotka on joko mitattu tai laskettu. Seuraavaksi VSC-säädin valitsee oikeat, valmiiksi taulukoidut, parametrit käyttötilanteen mukaan. Nämä kerrotaan tilamuuttujien kanssa ja summataan joko oletetun tai mitatun kuormituksen kanssa, jolloin saadaan uusi ohjaus toimilaitteelle. Tässä tapauksessa uusi ohjesignaali muodostetaan liukuvan moodin säätimellä, jotta systeemin stabiilius varmistetaan. Myös tämä säätömenetelmä ohjaa suoraan konvertterin tehokytkimiä.

4.2 Tehoelektroninen ohjaus

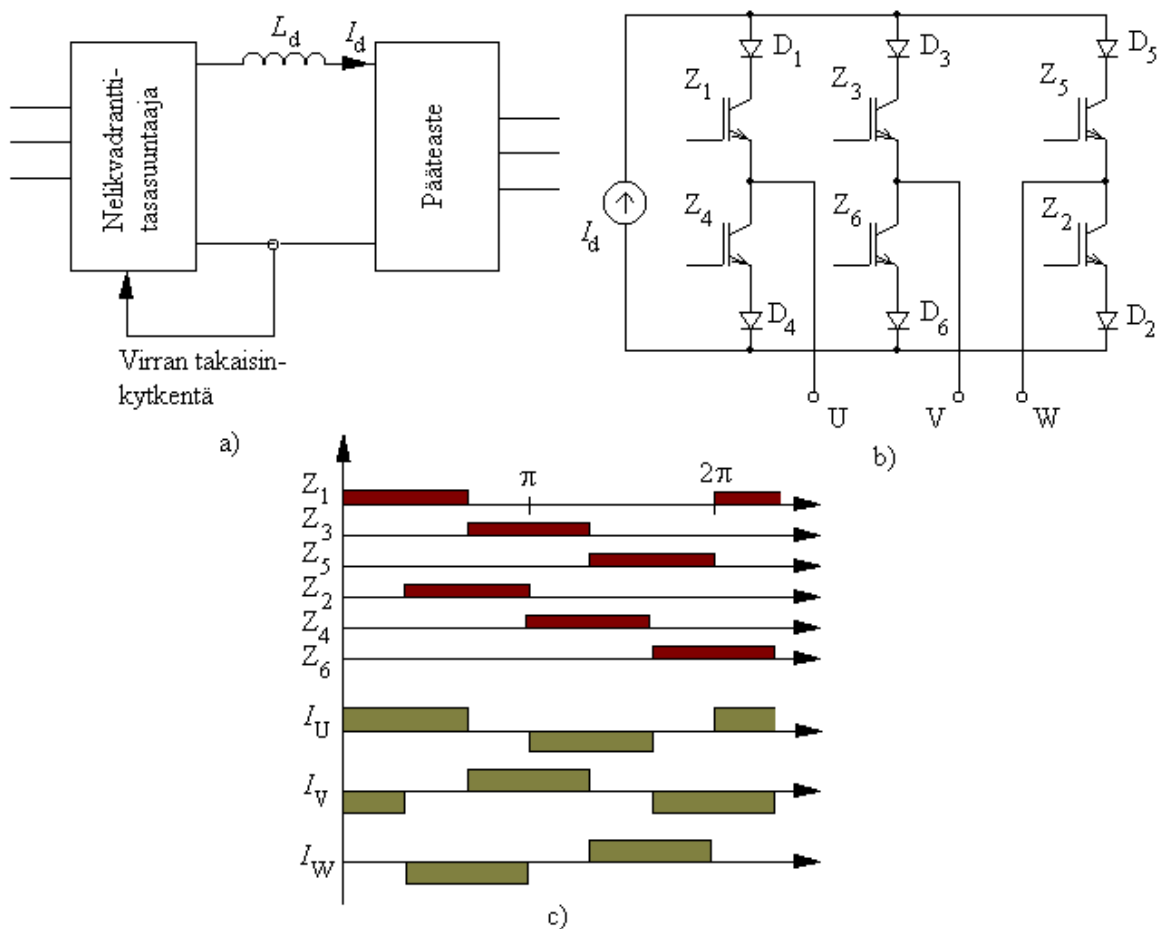
Edellä käsiteltiin säätöteknisesti toteutettuja jännitteen- eli paikan- ja nopeudensäätöjä. Kun edellä vaikutettiin epäsuorasti moottorin käyttöjännitteen alentamiseen, niin tarkastellaan nyt kuinka se voidaan toteuttaa suoraan eli muutetaan transistorien yli vaikuttavaa jännitettä. Toisin sanoen nyt muutetaan kuvassa 4 olevan jännitteen U_{ref} arvoa. Aikaisemmin, kun tehoelektroniikan komponentit eivät olleet yhtä kehittyneitä, tämä säätötapa oli ainoa järkevä toteutus. Tuolloin käytettiin tyristoryoreita tasasuuntaukseen ja samalla voitiin ohjaukskulman avulla määrittää haluttu jänniteohje. Tällöin ei tietenkään saada yhtä nopeaa vastetta säädölle kuin aikaisemmin mainituin tavoin. Myös alhaisten jännitetasojen saavuttamiseksi käytettävä suuri tyristoryorien ohjaukskulma heikentää järjestelmän kokonaishyötysuhdetta.

Halvemmissa järjestelmissä ei vielä ole välttämättä järkevää toteuttaa jännitteen säätöä uusilla säätöteknisillä ratkaisuilla, olettaen ettei niitä ole valmiina saatavilla. Helpompi ratkaisu on toteuttaa säätö erillisen hakkuripiirin avulla, jossa esimerkiksi buck-boost-hakkurin avulla ohjataan jännitetasoa. Ongelmana tietysti on, etenkin massatuotteissa, lisääntyvä komponenttien tarve, mutta toisaalta varmasti toimivia ratkaisuja on helposti saatavilla. Myös jännitteentason nostaminen on mahdollista, joka taas ei onnistu normaalilla tasasuuntauskokosilta ratkaisulla.

Kuvan 4 jännitevälipiirillisen kokosiltakonvertterin ohjauksen toteuttaminen pulssinleveysmodulaatiolla (PWM) on, ilman resonanssiipiirien käyttöä, hyvin häviöllinen. Kun moottoria kuormitetaan alle nimellisen vääntömomentin, on jännitettä pienennettävä, jotta moottorin vaiheisiin saadaan haluttu sähkövirta. Virran jatkuvan tasaisuuden takaamiseksi on transistorien tiloja muutettava suurella taajuudella. Kun tämä tehdään DC-välipiirijännitteen vaikuttaessa transistorin yli tai kun transistorin läpi kulkee vielä sähkövirta, on tehohäviöt suuret. Koska kuitenkin nykyiset tehoelektroniikka komponentit kestävätkin hyvin suuriakin rasituksia, ei yleensä ole järkevää lisätä ns. snubber- eli suojauspiirejä transistoreille. On kuitenkin muistettava, että vaikka komponentit kestäisivätkin ns. kovan kytkennän, on niiden jäähdytystä kuitenkin lisättävä. Suojauspiirien käyttäminen ei myöskään paranna järjestelmän hyötysuhdetta, sillä alunperin transistorilla kulunut hukkateho siirtyy suojauspiirin kulutettavaksi. Toisin sanoen, jos halutaan järjestelmälle parempi hyö-

tysuhde ja tämän seurauksena pienempi jäähtymisen tarve, on käytettävä muita menetelmiä moottorin tehon syöttöön.

Yhtenä vaihtoehtona on käyttää kuvan 6 a) ja b) mukaista virtavälipiirillistä invertteriä (CSI). Ohjattaessa pääteasteen transistoreita suorakaiteen muotoisilla pulsseilla kuvan 6 c) mukaisesti, saadaan ideaalisessa tapauksessa juuri halutun muotoiset vaihevirratt. Koska virran amplitudi pysyy välipiirissä vakiona, ei pääteasteen kytkimiä tarvitse kytkeä niin usein kuin jännitevälipiirillisen tapauksessa, jolloin transistorien kytkentähäviöt pienenevät huomattavasti. Virran amplitudi määräytyy tasasuuntaajan jännitteen mukaisesti. Näin ollen pelkkä diodisilta ei ole riittävä vaan esimerkiksi kuusipulssista tyristorisiltaa on käytettävä. Välipiirin virta määritellään moottorin pyörimisnopeuden ja virran takaisinkytkennän avulla. Virtalähteenä toimivan induktanssin L_d suuruus määräytyy moottorin parametrien ja halutun virran väreen suodatuksen perusteella. Usein mitoituksena käytetään kymmenkertaista arvoa staattorin hajainduktanssiin verrattuna, mutta tällöin virtasäätäjän tulee olla riittävän nopeaksi viritetty. Virtavälipiirillisellä invertterillä on helppo estää liian suuret virrat piirissä, mutta vaarana on, suuren induktanssin vuoksi, välipiirivirran katkeaminen. Ongelmaksi muodostuvat myös jännitepiikit moottoria syöttävässä jännitteessä, jotka syntyvät moottorin induktansseissa kommutointien yhteydessä. Ilmiötä voidaan pienentää rajoittamalla virtapulssien nousu- ja laskuaikoja, mutta tällöin menetetään myös tasaisen vääntömomentin vaatimus. [6]



Kuva 6. a) Virtavälipiirillisen invertterin (CSI) periaatteellinen rakenne, sekä b) pääteasteen eräs toteutustapa IGB-transistorein. c) Vaiheiden U, V ja W virrat, kun pääteastetta ohjataan kantiaalto moodissa. [6]

5 YHTEENVETO

Harjattoman tasavirtamoottorin hyvien ja huonojen puolien esittely, sekä vertailu perinteisen hiiliharjallisen tasavirtamoottorin ja induktorimoottorin kanssa on esitelty. Myös syitä, jotka ovat edistäneet harjattoman tasavirtamoottorin yleistymistä teollisuudessa, on kartoitettu. Lisäksi on selvitetty moottorin vääntömomentin ja kommutoinnin muodostumista. Lyhyt katsaus uusien säätötekniikoiden ja valmiiden tehohakkureiden ja inverttereiden sovellettavuudesta moottorin käyttöön on esitelty.

LÄHDELUETTELO

- [1] Applications of Brushless DC Drives in Blow Molding
[verkkojulkaisu] saatavilla: <http://powertecmotors.com/ablowe2.pdf>
- [2] T.Kenjo, S.Nagamori. Permanent-Magnet and Brushless DC Motors. Oxford. Clarendon Press. 1985. s 19-99 . ISBN 0-19-856214-4
- [3] T.J.E.Miller. Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives. Oxford. Clarendon Press. 1989. s 15-85 . ISBN 0-19-859369-4
- [4] Design and Implementation of Microprocessor Based Sliding Mode Controller for Brushless Servomotor
[verkkojulkaisu] saatavilla:
<http://ieeexplore.ieee.org/iel1/2204/3189/00103248.pdf?isNumber=3189prod=IEEE+JNLarnumber=103248arSt=345ared=363arAuthor=Karunadasa%2C+J.P.%3B+Renfrew%2C+A.C.%3B>
- [5] Design of Brushless DC Position Servo Systems Using Integral Variable Structure Approach [verkkojulkaisu] saatavilla:
<http://ieeexplore.ieee.org/iel1/2204/4712/00182926.pdf?isNumber=4712prod=IEEE+JNLarnumber=182926arSt=27ared=34arAuthor=Chern%2C+T.L.%3B+Wu%2C+Y.-C.%3B>
- [6] M. P. Kazmierkowski, R. Krishnan, F. Blaabjerg. Control in Power Electronics: Selected Problems. Kalifornia. Academic Press. 2002. s 40-43. ISBN 0-12-402772-5