

**LUT Energia, sähkötekniikka
Säätö- ja digitaalitekniikan laboratorio
BL40A0200 Säätötekniikan perusteet A**

HARJOITUSTYÖ:

TASAVIRTAMOOTTORIN NOPEUSSÄÄTÖ

TYÖOHJE

Lappeenranta 10.2.2014

**Jussi Tamminen
Huone 6416
email. jussi.k.tamminen@lut.fi**

1 Johdanto

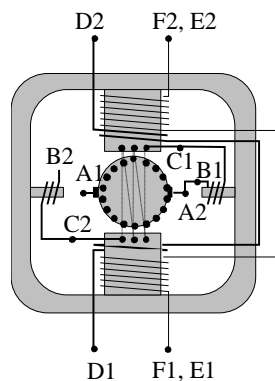
Tasavirtamoottorilla on erinomaiset pyörimisnopeuden säätöominaisuudet. Siksi sitä on perinteisesti käytetty mekaanisen energian käyttösovellutuksissa, joissa moottorin pyörimisnopeuden muuttamismahdollisuuksille asetetaan suuria vaatimuksia. Tällaisia esimerkkejä löytyy runsaasti paperi- ja selluteollisuudessa sekä metalliteollisuudessa. Myös liikkuvissa laitteissa, joissa syöttöjännite on esimerkiksi akuista saatavaa tasajännitettä, tasavirtamoottorit ovat käytännöllisiä. Esimerkkinä autoissa käytettävät moottorit kuten lasinpyyhkimien moottori ja kaappojen yms. automaattisesti avautuvat ovikoneistot.

Viime vuosina vaihtovirtaservokäytöt ovat lisääntyneet tasavirtamoottoreiden kustannuksella, mutta ne pitävät edelleen pintansa alhaisen hankintahintansa ja erinomaisten käyttöominaisuuksiensa vuoksi. Haittapuolena tasavirtakoneissa on lähinnä huollon tarve, kun hiiliharjat kuluvat.

2 Tasavirtamoottorin malli

2.1 Käämitykset

Tasavirtamoottorin toiminta perustuu pääasiassa kahden käämityksen, pyörivän ankkurikäämin ja paikallaan pysyvän magnetointikäämityksen yhteistoimintaan. Kelvollisesti toimiakseen moottori tarvitsee myös useita muitakin käämityksiä. Tasavirtamoottorin käämitykset nähdään kuvassa 1.



Kuva 1. Tasavirtakoneen käämitykset. A1-A2 ankkurikäämitys, B1-B2 kääntönapakäämitys, C1-C2 kääntönapa- ja kompensointikäämitys, D1-D2 Sarjakäämitys, E1-E2 sivuvirtakäämitys ja F1-F2 vierasmagnetointikäämitys. (J. Pyrhönen. Pyörivän sähkökoneen suunnittelu. Opetusmoniste EN C-70. Lappeenranta, 1998.)

Tasasähkökoneen magnetointikäämitykset sijaitsevat koneen staattorissa. Magnetointikäämityksillä synnytetään koneeseen magneettikenttä. Tässä työssä magnetointivirta saadaan ulkoisesta lähteestä, jolloin on kyseessä vierasmagnetoitu kone, kuvan käämitys F1-F2. Magnetointi voidaan myös toteuttaa sivuvirtakäämityksillä (E1-E2), jolloin käämitys on kytketty ankkurikäämin kanssa rinnan tai sarjakäämityksillä (D1-D2), jolloin käämitys on kytketty ankkurikäämityksen kanssa sarjaan. Edelliset voidaan myös yhdistää kompaundikäämitykseksi. Magnetointiin voidaan käyttää myös kestopagneetteja.

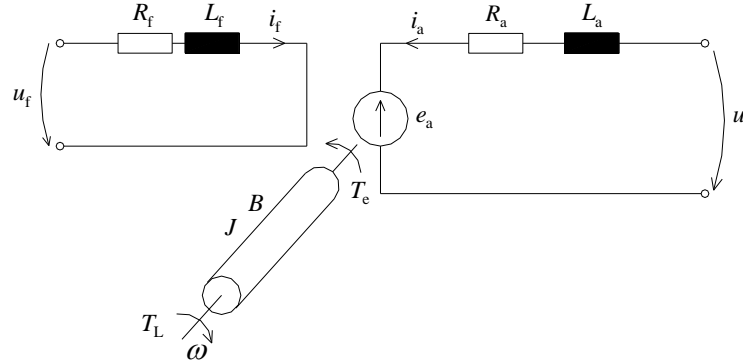
Ankkurikäämitys (A1-A2) on tasasähkökoneen roottorissa. Sen tehtävänä on koneen varsinainen tehonsyöttö. Roottorin pyöriessä magnetointikäämityksen aiheuttamassa magneettikentässä ankkurikäämitykseen indusoituu sähkömotorinen jännite. Indusoituva jännite on vaihtojännitettä. Koska moottoria syöttävä jännite on tasajännitettä, on se vaihtosuunnattava. Toimenpidettä kutsutaan kommutoinniksi ja se tapahtuu kommutaattorin ja hiiliharjojen avulla.

Tasasähkökoneessa on myös muita koneen toimintaan oleellisesti vaikuttavia käämityksiä. Kääntönapakäämitys (B1-B2) tarvitaan, jotta kommutaattori harjoineen kommutoiisi kipinättömästi ja

pysyisi paremmin kunnossa. Kompensointikäämitys (C1-C2) kompensoi ankkurivirran ankkurikenttää. Myös kääntönapakäämitys osallistuu ankkurikentän kompensointiin.

2.2 Toiminta

Kuvassa 2 nähdään vierasmagnetoidun tasavirtamoottorin sijaiskytkentä.



Kuva 2. Vierasmagnetoidun tasavirtakoneen sijaiskytkentä.

Kuten aiemmin jo mainittiin, tasasähkökonetta magnetoidaan staattorista käsin. Vierasmagnetoidun moottorin magnetointijännite u_f on

$$u_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt}, \quad (1)$$

missä R_f on magnetointikäämin resistanssi, L_f on magnetointikäämin induktanssi ja i_f on magnetointivirta. Magnetointivirta muodostaa magneettivuon ϕ_f , joka kulkee roottorin läpi navasta napaan ja palaa takaisin staattorin kehää pitkin. Kun magneettinen kyllästys jätetään huomioon ottamatta, voidaan magneettivuolle kirjoittaa yhtälö

$$\phi_f = k_f i_f, \quad (2)$$

missä k_f on konekohtainen vakio. Magnetointikäämin aikaansaama magneettivuo ϕ_f ja ankkurivirta i_a tuottavat yhdessä moottorin sähköisen vääntömomentin T_e

$$T_e = k_t \phi_f i_a. \quad (3)$$

Kun koneen magnetointi pysyy vakiona, voidaan kirjoittaa

$$k_T = k_t \phi_f. \quad (4)$$

Yhtälöissä (3) ja (4) esiintyvät kertoimet k_t ja k_T ovat moottorin vääntömomenttivatekioita. Roottorin pyöriessä magneettikentässä kulmanopeudella ω ankkurikäämiin muodostuu vastasähkömotorinen voima e_a

$$e_a = k_e \phi_f \omega, \quad (5)$$

missä kerroin k_e on moottorin jännitevakio. Moottorin yhtälöissä koneen pyörimisnopeus ilmoitetaan kulmanopeutena eli kulmataajuutena ω (yksikkö rad/s). Yleensä pyörimisnopeus n kuitenkin ilmoitetaan yksikkönä kierrosta/minuutti (rpm). Kulmataajuuden ω ja pyörimisnopeuden n suhde on

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}. \quad (6)$$

Magnetoinnin pysyessä vakiona yhtälön (5) jännitevakioista k_e ja magneettivuosta saadaan jännitevakio k_E

$$k_E = k_e \phi_f. \quad (7)$$

Ankkurikäänitys on kytketty säädettävään jännitelähteeseen u_a ankkurivirran i_a tuottamiseksi. Ankkurikäänityksen resistanssi on R_a ja induktanssi L_a . Kun otetaan vielä huomioon ankkurikäänitykseen indusoituva sähkömotorinen voima e_a , voidaan ankkurijännitteelle kirjoittaa yhtälö

$$u_a = e_a + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt}. \quad (8)$$

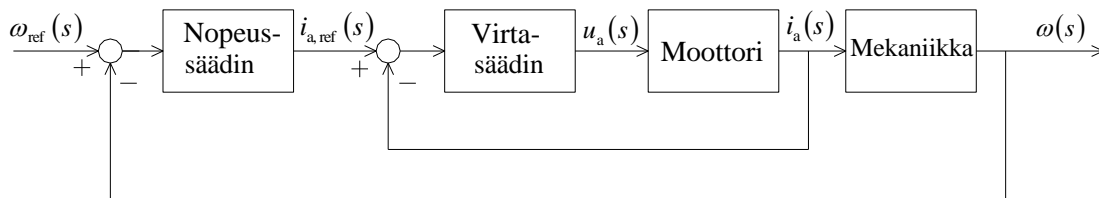
Moottorin liikeyhtälö on

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega}{dt} + B\omega, \quad (9)$$

missä T_L on kuorman vääntömomentti, J on hitausmomentti ja B on pyörimiskitkakerroin.

3 Tasavirtamoottorin säätö

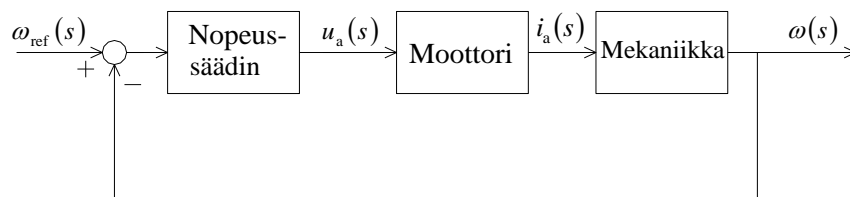
Tasavirtamoottorin säätö toteutetaan yleensä kuvan 3 mukaisesti kaskadisäätönä.



Kuva 3. Tasavirtamoottorin säädön periaatekuva.

Kaskadisäädössä on useita säätöpiirejä sisäkkäin. Tasavirtamoottorin säädössä ulompi eli pääsäädin säätää moottorin kulmanopeutta ω ja sisempi eli apusäädin ankkurivirtaa i_a . Apusäädin, eli nyt virtasäädin, viritetään huomattavasti pääsädintä nopeammaksi, jolloin ankkurivirran muutokset saadaan korjattua nopeasti eivätkä ne vaikuta merkittävästi mekaniikkaan. Virtasäätäjällä voidaan myös rajoittaa ankkurivirran maksimia ja muutosnopeutta.

Tässä työssä on tarkoituksena perehtyä yksinkertaisen takaisinkytketyn säädön virittämiseen, joten kuvan 3 kaskadisäätöpiiristä jätetään sisempi eli virtasäätösilmukka pois. Nyt moottoria säädetään pelkästään nopeussäätimellä kuvan 4 mukaisesti.



Kuva 4. Tasavirtamoottorin nopeussäätö ilman sisempää virtasäätösilmukkaa.

4 Moottorin parametrit

Harjoitustyössä käytetään vierasmagnetoitua tasavirtamoottoria, jonka magnetointi pidetään vakiona. Moottorin parametrit on koottu taulukkoon 1.

Taulukko 1. Tasavirtamoottorin parametrit.

Nimellinen pyörimisnopeus	n_n	3000 rpm	Hitausmomentti	J	$80 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$
Ankkuripiirin resistanssi	R_a	$2,6 \Omega$	Pyörimiskitkakerroin	B	0
Ankkuripiirin induktanssi	L_a	3 mH	Vääntömomenttivakio	k_T	0,06 Nm/A
			Jännitevakio	k_E	0,38 Vs

5 Harjoitustyön toteutus

Harjoitustyössä suunnitellaan tasavirtamoottorille säätäjä niin, että **systemin vaihevara on riittävä ja jatkuvuustilan virhe askelvasteelle saa olla korkeintaan 1 % nimellinopeudesta.**

1. Muodosta tasavirtamoottorille siirtofunktiot ankkurijännitteestä kulmanopeuteen $\omega(s)/U_a(s)$ ja kuormavääntömomentista kulmanopeuteen $\omega(s)/T_L(s)$. (Toista näistä ei kuitenkaan tarvita jatkossa säätösuunnittelussa.)
2. Tarkastele moottorin stabiiliutta ilman säätäjää Bode-diagrammin avulla. Lisää systeemiin takaisinkytkentä ja tarkastele jatkuvuustilan virhettä. Täyttyvätkö annetut spesifikaatiot?
3. Suunnittele systeemille sovelias säätäjä niin, että annetut spesifikaatiot vaihevarasta ja jatkuvuustilan virheestä täyttyvät. Valitse joko vaiheenjohto- tai vaiheenjättöpiiri ja perustele valintasi. Voit käyttää suunnittelussa Bode- tai juuriuradiagrammia.
4. Muodosta koko systeemille Simulink-malli. Säätäjän voi toteuttaa siirtofunktio-lohkolla, mutta moottori kuvataan simulointidiagrammina siten, että mallissa on vain integrointi-, summain- ja kerroinlohkoja. Moottoria ei siis kuvata Simulinkin valmiilla siirtofunktio- tai tilayhtälölohkoilla! Mallin rakentelussa tarvittavat differentiaaliyhtälöt on esitetty kappaleessa 2.2.
5. Simuloi systeemiä käyttäen nopeusreferenssinä askel-funktiota, joka nousee nopeudesta $n_{\text{ref}} = 1400$ rpm nopeuteen $n_{\text{ref}} = 1500$ rpm (huomaa, että moottorin simulointidiagrammissa käytetään kulmanopeutta ω). Mitataan moottorin nopeus ja sähköinen vääntömomentti. Toistetaan mittaus, kun mukaan lisätään kuorma $T_L = 5 \text{ Nm}$. Toimiiko säätö halutusti?
6. Kommentteja harjoitustyöstä.

Työ tehdään pareittain ja siitä palautetaan raportti, jonka ulkoasu noudattaa soveltuvin osin annettuja diplomityöohjeita. Raportissa tulee näkyä selvästi edellä mainittujen kohtien toteutus. Myös tarpeelliset Matlabin diagrammit, simulink-malli sekä simuloinnista saadut kuvaajat ja niistä tehdyt johtopäätökset on esitettävä. Työ palautetaan Juss Tammiselle perjantaihin 9.5.2014 mennessä.