Mr Nikola Terzija,
kapetan I klase, dipl. inž.
Dr Drago Ban,
dipl. inž.

Elektronički komutirani motor kao element suvremenog elektromotornog pogona

Uvod

Od suvremenih elektromotornih pogona se zahtijeva: visoka pouzdanost, dobre statičke, dinamičke i energetske karakteristike, kompaktnost konstrukcije, mali gabariti, fleksibilnost, te minimalno održavanje uz brzu identifikaciju i otklanjanje kvarova. U specifičnim područjima primjene, kao što su: avijacija, robotika, numerički upravljanje alatni strojevi, linije fleksibilne automatizacije, periferne jedinice računarskih i informacijskih sustava, uređaji za snimanje i reprodukciju slike i tona, medicinski uređaji, transportna tehnika, svemirska i ratna tehnika, te drugi tehnički složeni sustavi, sve više se primjenjuju i usavršavaju slijedeći pogoni [1, 2, 3, 4, 5]:

- elektromotorni pogon s kaveznim frekvencijski reguliranim asinhronim motorom (vektorska regulacija);
- elektromotorni pogon s koračnim mikroprocesorski upravljanim motorom;
- elektromotorni pogon s elektronički komutiranim motorom.

Sve tri navedene vrste elektromotornih pogona (EMP) karakterizirane su time što su izvedene s beskontaktnim motorima (bez kliznih mehaničkih kontakata i četkica). To im je najveća pred-

nost pred inače dobro poznatim i mnogo korištenim istosmjernim motorom. Mehanički kolektor klasičnog istosmjernog stroja je sklop gotovo svih ograničenja primjene (pouzdanosti, brzine, veličine, održavanja, ...). Elektronički komutirani motor je kombinacija izmjeničnog električnog stroja i elektroničkog uređaja za prespajanje svitaka (elektronički kolektor) s neophodnim elementima za upravljanje i zaštitu. Takvom kombinacijom istovremeno se mogu iskoristiti dobre karakteristike izmjeničnih (visoka pouzdanost) i istosmjernih (energetske i regulacijske) motora. Ideja o gradnji elektronički komutiranog motora (EKM) potječe iz tridesetih godina ovog stoljeća, a njena aktualizacija nakon pojave tranzistora i tiristora (šezdesetih godina). Razvoj i primjena te klase elektromotora ubrzan je zahvaljujući pronalasku i proizvodnji vrlo kvalitetnih trajnih magneta. U području automatiziranih pogona, nevelikih snaga, EKM počinje u novije vrijeme zauzimati sve značajnije mjesto. Literatura o elektronički komutiranim motorima je vrlo obimna (na stranim jezicima) i nije uvijek lako dostupna. Namjera nam je da u ovom članku dademo osnovni prikaz specifičnosti ovog, u našoj literaturi i praksi malo poznatog motora, bez pretenzija da to bude detaljno i sveobuhvatno.

Struktura elektronički komutiranog motora i konstrukcione karakteristike

Elektronički komutirani motor je jedinstvena cjelina elektromehaničkog pretvarača s ugrađenim davačem položaja rotora i energetskog pretvarača s potrebnom elektronikom za upravljanje nadzor i zaštitu. Principijelna blok-shema EKM prikazana je na slici 1.

Sl. 1 Principijelna blok-shema EKM

Elektromehanički pretvarač je višefazni (najčešće trofazni) stroj s uzbudom na rotoru. Uzbuda se najčešće izvodi vrlo kvalitetnim trajnim magnetima, što stroj čini vrlo kompaktnim s odličnim masogabaritnim pokazateljima. Jedna tipična izvedba EKM šire namjene, domaće proizvodnje, prikazana je fotografijom na slici 2. Motor je proizvodnje »RADE KONČAR« iz Zagreba,

tip EKM90M-6, moment mirovanja je 10 Nm, a nazivna brzina vrtnje 4000 min⁻¹.

Sl. 2 Elektronički komutirani motor proizvodnje »RADE KONČAR«

Davač položaja rotora (DPR) je konstrukcijski dio elektromehaničkog pretvarača, a s energetskim pretvaračem je povezan preko elektronike za upravljanje. DPR se najčešće izvodi s Hallovim elementima ili optoelektroničkim elementima. Često je u istoj cjelini s DPR smješten i davač brzine. Shematski prikaz strukture jednog tipičnog energetskog pretvarača za trofazni EKM dat je na slici 3.

Sl. 3 Tipična struktura energetskog pretvarača trofaznog EKM

Iz strukture prikazane na slici 3 mogu se istaknuti osnovni sklopovi koji čine tzv. elektronički kolektor (komutator) i pojednostaviti prikaz osnovne fizikalne slike rada takvog stroja. Davač (indikator) položaja polova rotora, elektronika za upravljanje elementima za prespajanje i elementi za prespajanje namota armatura (statora) čine tzv. elektronički komutator. Na slici 3 su elementi prespajanja (prekidači), tranzistori T_1 do T_6 , a A, B i C fazni namoti motora. Istosmjerni napon za rad motora može biti bilo koji odgovarajući izvor, a princip prikazan na slici 3 podrazumijeva dobivanje tog napona iz poluvodičkog ispravljača. Običaj je da se prikazani uređaj naziva energetskim pretvaračem, koji se priključuje na izmjeničnu mrežu, a ima konstantan napon istosmjernog međukruga. Radi se, dakle, o indirektnom pretvaraču. Zahitjevani oblik i iznos izlaznog napona pretvarača postiže se pulsno-širinskom modulacijom u samom invertoru. Otpornik i tranzistor u istosmjernom međukrugu omogućuju kočne režime rada EKM. Po principu rada EKM je sinhroni motor. Odgovarajuće upravljanim faznim strujama statora postiže se okretno magnetsko polje, koje s uzbuđenim poljem rotora stvara okretni moment. Brzina vrtnje rotora mora biti u čvrstoj vezi s brzinom okretnog polja (u sinhronizmu) u svim režimima rada. Frekvencija struja statora određena je trenutnom brzinom vrtnje rotora. Korištenjem signala s DPR može se prisilno održavati željeni prostorni kutni pomak između uzbuđenog i armaturnog toka (tzv. kut opterećenja sinhronog stroja) bez obzira na teret motora. Poželjno je da kut između tokova iznosi 90° električnih, kako bi razvijeni moment EKM bio maksimalan. Ovako organiziranim napajanjem mogu se postići vanjske karakteristike EKM slične karakteristikama uzbuđenog istosmjernog motora.

Za EKM, prikazan na slici 3, struja istovremeno prolazi kroz dvije serij-

ski vezane faze, tj. istovremeno vodi jedan gornji tranzistor invertora (T_1 , T_3 , T_5) i jedan donji (T_2 , T_4 , T_6). Početak i kraj vođenja struje pojedine faze određen je položajem rotora, tako da srednji kut između armaturnog i uzbuđenog toka bude 90° električnih. Nakon zakreta rotora za određeni kut (što registrira DPR) prestaje voditi jedna faza, a počinje voditi druga, tj. struja se prekapča (komutira) s jedne na drugu fazu. Taj kut se naziva međukomutacioni period (α_k) i za trofazni EKM iznosi 60° električnih. To znači da za jednu punu električnu periodu (zakret rotora za 360° električnih) treba obaviti šest komutacija struja. Dovoljno je, dakle, da i DPR odredi položaj rotora u šest diskretnih tačaka kako bi se u elektronici za upravljanje moglo definirati šest mogućih različitih stanja tranzistora invertora, tj. definirati sklopne funkcije invertora. Ako bi se htio postići konstantan moment na međukomutacionom periodu, valni oblik struja trebao bi odgovarati prostornoj raspodjeli magnetske indukcije u zračnom rasporu. Za konstantnu indukciju unutar $2/3$ punog koraka idealni oblik struja faza prikazan je na slici 4.

Približno takav (pravokutni) oblik može se postići pravokutnim oblikom napona, pa su na istoj slici upisana stanja tranzistora invertora sa slike 3 u pojedinim međukomutacionim periodima, kojima se obezbijeduje takav oblik napona. Tada je pravilnije govoriti o pravokutnoj modulaciji napona, a ne struja. Tačniji pravokutni oblik struja (sl. 4) postiže se pulsno-širinskom modulacijom napona pomoću histereznog regulatora struje [2, 6]. Zbog induktiviteta namota ne mogu se postići skokovite promjene struja (za vrijeme komutacije), što dovodi do pojave valovitosti razvijenog momenta [7, 8]. Valovitost momenta ne mora dovesti i do bitnijih pulzacija brzine EKM, što je za njegovu upotrebu važno. Zbog jednostavne realizacije približno pravokutnog oblika

struja histerezni regulator se primjenjuje i za ostale raspodjele magnetske indukcije, računajući pri tome na po-

ni motor bez četkica, elektronički motor, ventilni motor, samosinhronizirajući izmjenični motor, itd.

Sl. 4 Idealizirani valni oblici struja EKM za konstantnu indukciju unutar 2/3 polnog koraka

većanje valovitosti momenta. U elektromotornim pogonima s zahtjevom na veliku stabilnost malih brzina vrtnje (okone), u novije vrijeme se koristi EKM sa sinusnom raspodjelom magnetske indukcije i sinusnom modulacijom struja. Za realizaciju sinusne modulacije struja potrebno je imati DPR koji u puno više tačaka određuje položaj magnetske osi rotora (resolver), pa je i shema upravljanja puno kompliciranija. Tada se, obično, ide na mikroprocesorski upravljan EKM [9].

Ovako prikazana organizacija napajanja, gdje se komutacija struja faza postiže u energetsom pretvaraču na osnovu signala DPR, predstavlja elektroničku komutaciju, po čemu je ovaj motor i dobio ime. U literaturi se sreće još niz različitih naziva, kao: beskoлектorski istosmjerni motor, istosmjer-

Pored elektroničke komutacije, važna je specifičnost EKM i primjena vrlo kvalitetnih trajnih magneta, s kojima se postiže veliki uzbudni tok, uz zanemarljiv utjecaj reakcije armature na iznos tog toka. Za sada se najviše koriste trajni magneti na bazi legura kobalta (Co) s elementima rijetkih zemalja (tzv. magneti R-Co). Najbolje eksploatacione karakteristike postignute su upotrebom samarija (Sm), a iz te grupe se najčešće koristi magnet tipa SmCo5. S takvim su magnetima postignute slijedeće karakteristike [10]:

- remanentna indukcija $B_r = 0,95$ [T];
- koercitivna sila po indukciji $H_{cl} \approx 800$ [kA/m];
- maksimalni energetski produkt $(BH)_{max} \approx 200$ [kJ/m³];
- radna temperatura $T_r \approx 250$ [°C]

Veliku perspektivu pružaju trajni magneti na bazi legure neodij-željezo-bor (NdFeB), kojima je jedini nedostatak niska radna temperatura (100—120° C), dok su im ostale karakteristike bolje od magneta SmCo₅. Prednosti ova dva tipa magneta u odnosu na do skoro često korištene (FERITE i ALNIKO) najbolje se vidi s uporednih dijagrama demagnetizacije (slika 5).

izrađuju površinski lijepljenim trajnim magnetima, na koje se navlači nemagnetna obloga radi mehaničke zaštite.

Elektromehaničke karakteristike EKM

Za analizu statičkih, dinamičkih i regulacionih karakteristika EKM potrebno je napraviti matematički model.

Sl. 5 Karakteristike demagnetizacije nekih trajnih magneta

Zbog velike koercitivne sile (što je rezultat kristalne anizotropije) SmCo₅ i NdFeB magneta, ne postoji opasnost od demagnetiziranja u dinamičkim stanjima EKM, pa oni s tog stanovišta ne unose ograničenja u iznose struja. Utjecaj polja reakcije armature u normalnom pogonu na iznos uzbuđnog toka je neznačajan, pa se može smatrati konstantnim. Permeabilnost ovih trajnih magneta je približna permeabilnosti vakuuma, što znatno smanjuje induktivnost stroja. Da bi se iskoristile sve dobre osobine spomenutih magneta, posebna pažnja se mora posvetiti konstrukciji rotora i optimiranju radne točke magnetskog kruga EKM. Rotori EKM se, najčešće,

Složenost matematičkog modela prvenstveno ovisi o željenoj tačnosti računa. Tako se za brzu ocjenu karakteristika EKM može primijeniti dobar dio poznate teorije za istosmjerni ili sinhroni motor, ovisno o vrsti modulacije napona. Za detaljniju analizu treba uzeti u obzir specifičnosti vezane uz elektroničku komutaciju i raspodjelu magnetske indukcije u zračnom rasporu. Kako se u statičkom režimu EKM elektromagnetsko stanje ponavlja na svakom međukomutacionom periodu (α_k), dovoljno ga je proučiti na jednom. Međutim, i matematički model zasnovan na promatranju elektromagnetskih prilika na jednom međukomutacionom periodu je vrlo slo-

žen, pa će u nastavku biti prikazani samo konačni rezultati provedenih proračuna [4]. Računato je s naponom pravokutnog oblika. Radi univerzalnosti prikazivanja karakteristika odabran je jedinični sistem (per-unit sistem). Upotrebljene su slijedeće normirane veličine:

— mehanička kutna brzina rotora $\omega = \Omega/\Omega_0$, gdje je:

Ω — stvarna mehanička kutna brzina rotora;

Ω_0 — kutna brzina rotora u idealnom praznom hodu;

— razvijeni moment $m = M/M_{k\phi}$, gdje je:

M — stvarni razvijeni moment;

$M_{k\phi}$ — moment kratkog spoja (mirovanja);

— napon napajanja $U = U/U_n$, gdje je:

U — stvarni napon napajanja;

U_n — nazivni napon napajanja.

Parametar X_0 definiran je kao:

$$X_0 = \frac{L+M}{R} p\Omega_0 = T_e p\Omega_0, \text{ gdje je:}$$

L — samoinduktivitet jedne faze;

M — međuinduktivitet dviju faza;

R — radni otpor jedne faze;

p — broj pari polova EKM;

T_e — električna vremenska konstanta.

Kao što se vidi, parametar X_0 je sličan električnoj vremenskoj konstanti (u bezdimenzionalnom obliku) i on je karakteristika napravljenog motora, tj. parametar koji slijedi iz konstrukcije motora. Kako se vidi sa slike 6, parametar X_0 ograničava radno područje frekvencija i brzina vrtnje, te određuje oblik i tvrdoću mehaničkih karakteristika i korisnost elektromehaničke pretvorbe energije. Uz zanemariv iznos električne vremenske konstante ($X_0=0$), vanjska karakteristika EKM bila bi linearna. Ū

Sl. 6 Vanjske karakteristike EKM za pravokutnu modulaciju napona i konstantnu indukciju unutar 2/3 polnog koraka

Na slici 6 prikazani su rezultati proračuna [4] vanjskih karakteristika EKM uz različite iznose parametra X_0 , zanemareno trenje a nominalni napon napajanja ($U=1$).

motoru ovakve izvedbe i namjene (visoko kvalitetni trajni magneti) moguće je postići da vremenske konstante budu vrlo male (mali ulančani tok rasipanja u utoru i glavama namota neovisan

o položaju rotora) i nezavisne od veličina struja u namotima (nema zasićenja). Najnovije konstrukcije su takve da se za nazivna pogonska stanja može uzeti $X_0 < 2$, tj. u inženjerskim proračunima pretpostaviti da je vanjska karakteristika linearna, odnosno ekvivalentna karakteristici nezavisno uzbuđenog klasičnog istosmjernog motora.

Sl. 7 Vanjske karakteristike EKM pri različitim naponima

Brzinu vrtnje EKM moguće je regulirati naponom. Regulacija napona vrši se pulsno-širinskim modulacijom u

invertoru. Vanjske karakteristike EKM pri $U \leq 1$ i parametru $X_0 = 1$ prikazane su na slici 7.

Smanjenjem napona smanjuje se nelinearnost vanjskih karakteristika EKM, čime se on još više približava karakteristikama nezavisno uzbuđenog istosmjernog motora.

Dinamičke karakteristike EKM, promatrane kroz zalet, mnogo je složenije matematički opisati. Praktično je nemoguće doći do tačnog analitičkog izraza, jer se brzina mijenja čak na jednom međukomutacionom periodu, a i međukomutacioni periodi različito traju. Iako u ovom članku nećemo detaljnije razmatrati pitanja dinamičkih karakteristika, dinamičke stabilnosti pogona i mogućnosti pojave autokolebanja, može se i unaprijed zaključiti da će parametar X_0 imati presudni utjecaj na dinamiku u cjelini. Primjenom računala moguće je riješiti sistem nelinearnih diferencijalnih jednačbi s promjenljivim početnim uvjetima, kojim se opisuju dinamička stanja EKM [4]. Na slici 8 za ilustraciju su prikazani brzina i moment EKM (pri zaletu) računato za pravokutnu modulaciju napona i sinu-

Sl. 8 Brzina i moment EKM pri zaletu za navedene parametre

snu raspodjelu magnetske indukcije i slijedeće parametre [4]:

- step napona $U=1$;
- električna vremenska konstanta $T_e=0,005$ [s];
- moment tereta $m_t=1$;
- mehanička vremenska konstanta $T_m=0,02$ [s] ($T_m=J\Omega_0/M_{ks}$, gdje je J — ukupni moment inercije na osovini motora).

Iz oblika momenta (sl. 8) jasno su uočljivi međukomutacioni periodi. Uočljiva je i prilična valovitost momenta. Međutim, odziv brzine je ravnomjeran, a u stacionarnom režimu nema pulzacija brzine, što može bitno utjecati na upotrebu EKM za pogone u kojima je to važno.

Zaključak

Organiziranjem napajanja sinhronog motora s trajnim magnetima na rotoru, u ovisnosti o položaju rotora, stvo-

rena je jedna nova klasa električnih motora. Po principu rada to je sinhroni motor bez obzira na to kako ga nazivaju u literaturi. Uz zadržavanje visoke pouzdanosti (eliminacija mehaničkog kolektora i četkica) dobivaju se vrlo dobre energetske, vanjske i regulacijske karakteristike. U radnom području opterećenja vanjska karakteristika je približno linearna. Moment i struja pokretanja može se podešavati energetskim pretvaračem. Promjena brzine vrtnje svodi se na regulaciju napona napajanja. Primjena vrlo kvalitetnih trajnih magneta na rotoru omogućila je gradnju rotora s malim momentima inercije, što uz mogućnost forsiranja struje u prelaznim režimima omogućava sustav elektromotornog pogona odličnih dinamičkih svojstava. Dalji razvoj EKM orijentiran je na mikroprocesorske sisteme upravljanja sa sinusnom modulacijom napona, čime se može postići miran mehanički hod i pri vrlo malim brzinama vrtnje pogonskog mehanizma.

Literatura:

- [1] Howlett F. James: BRUSHLESS DC MOTORS, International Scientific Industries, Christiansburg, Viringia 24073 Motor Con, mart/1982, str. 594—604.
- [2] Kenjo T., Nagamori S.: PERMANENT-MAGNET AND BRUSHLESS DC MOTORS, Clarendon Pres, Oxford, 1985.
- [3] Ovčeničkov I. E. Lebedjev N. I.: BESKONTAKTNIJE DVIKATELJI POSTOJANOVO TOKA, Nauka, Lenjingrad, 1979.
- [4] Terzija N.: ANALIZA MOTORA S TRAJNIM MAGNETIMA I DAVAČEM POLOŽAJA ROTORA, Magistarski rad, ETF, Zagreb, 1989.
- [5] Ban: D.: DOPRINOS ISTRAŽIVANJU ELEKTROMOTORNJIH POGONA S KORAČNIM MOTORIMA, Doktorska disertacija, ETF, Zagreb, 1987.
- [6] Krause C. P.: ANALISIS OF ELECTRIC MACHINERY, McGraw-Hill Book Company, New York, 1986.
- [7] Demerdash N. A., Nehl T. W., Fouad F. A.: IMPACT OF WINDING INDUCTANCES AND OTHER PARAMETERS ON THE DESIGN PERFORMANCE OF BRUSHLESS DC MOTORS, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, br. 8, avgust/1985, str. 2206—2213.
- [8] Lisac A.: UTICAJ KOMUTACIJE NA RAZVIJENI MOMENT ELEKTRONIČKI KOMUTIRANOG MOTORA, IV Savjetovanje o EMP, Zadar, 1988, str. 335—342.
- [9] Sakmann H. W.: A BRUSHLESS DC MOTOR CONTROLLED BY A MICROPROCESSOR WITH EXAMPLES FOR A THREE-PHASE MOTOR, IEEE Transactions on Industry Electronics, Vol. IE-34, br. 3, avg./1987, str. 339—344.
- [10] Zajec T.: SUVREMENI MATERIJALI ZA PERMANENTNE MAGNETE SASTAVA COBALT-RIJETKE ZEMLJE, Magistarski rad, ETF, Zagreb, 1979.