

Bezkefové motory

Chudiváni Ján · Elektrotechnika

26.12.2011



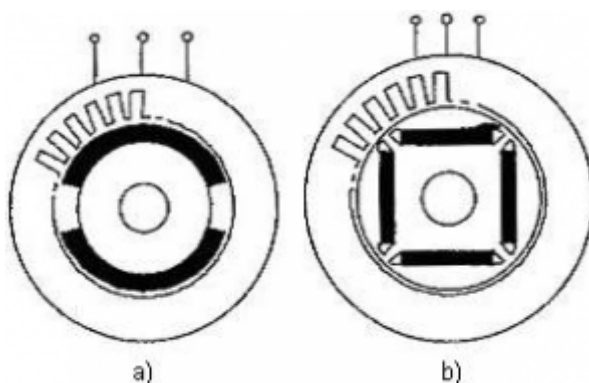
Hlavnou témou príspevku sú bezkefové motory. Zaoberá sa definíciou a rozdelením bezkefových motorov. Popisuje základné rozdiely medzi bezkefovým jednosmerným motorom a bezkefovým synchronným motorom. Popisuje nahradenie funkcie kefy a komutátora mechanickým a elektronickým spínačom. Zobrazuje magnetické polia bezkefového motora.

Úvod

V praxi elektrických pohonov sú dostatočne známe vlastnosti jednosmerných motorov, ako je ich jednoduchosť, univerzálnosť, komutácia a pod. Problémom pri činnosti jednosmerných motorov je komutácia, ktorá spôsobuje opotrebovanie kefy. Dokážeme ju odstrániť vylúčením kefy, čím sa výrazne ovplyvní konštrukcia a činnosť jednosmerných motorov. Z tohto dôvodu bolo potrebné vymyslieť nový typ motorov, v ktorých je komutácia riešená iným spôsobom.

1. Definícia a rozdelenie bezkefových motorov

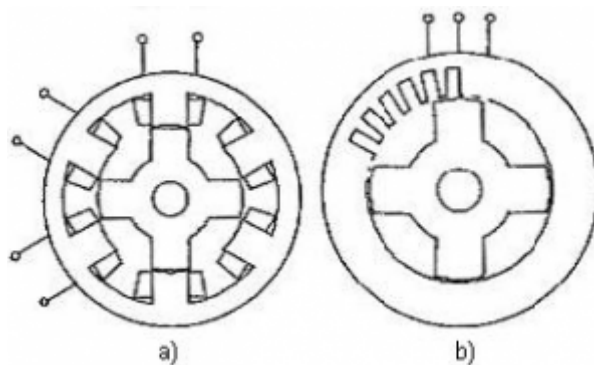
Nahradenie funkcie komutátora a kefy elektronicky spínaným obvodom [1] viedlo ku konštrukcii nového typu motorov s tzv. elektronickou komutáciou, v ktorých je budenie nahradené permanentnými magnetmi a ktoré sa nazývajú bezkefové motory. Pojmom „bezkefový“ možno označiť viac typov strojov. Nie pre všetky však tento pojem znamená dané charakteristické vlastnosti, ktorými by sa odlišovali od ich klasických foriem. Tieto vlastnosti spĺňajú len bezkefový jednosmerný motor (Obr. 1a) a bezkefový synchronný motor (Obr. 1b) [2].



Obr. 1 Bezkefový motor a) jednosmerný, b) synchronný [3]

Obidva typy majú permanentné magnety na rotore a trojfázové vinutie na statore. To je napájané z polovodičového meniča tak, že pomocou snímača polohy dostáva signály na spínanie prúdu k nahradeniu funkcie komutátora a kefy, t. j. udržiavať prúd presne kolmo na smer budiaceho magnetického poľa. To sú ich spoločné črty. To, čím sa líšia je práve to, že bezkefový jednosmerný motor je odvodený z klasického jednosmerného motora, a preto má obdĺžnikový tvar magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere. Bezkefový synchronný motor je odvodený z klasického synchronného stroja, a preto má sínusový tvar magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere.

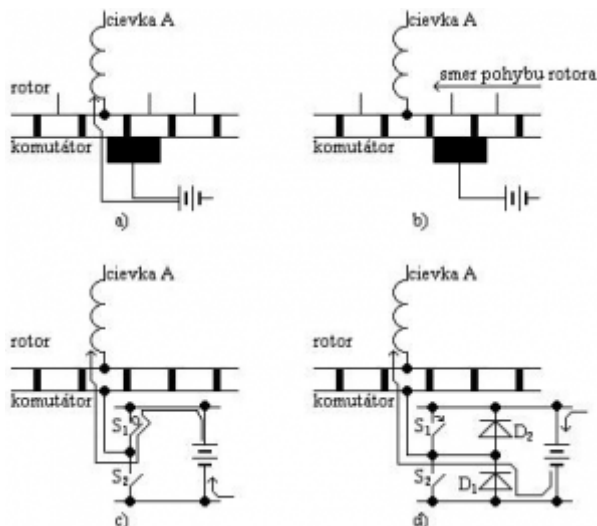
Právoplatný názov „bezkefový“ (z angl. brushless) treba preto spájať len s týmito dvoma typmi motorov. Ostatné typy strojov, ktoré vo svojom konštrukčnom usporiadaní a princípe činnosti nepotrebujú a nemajú kefy, majú svoje iné, priliehavé mená a preto sa fakt, že sú bez kefy, v názve nezdôrazňuje. Samostatnou kategóriou elektronicky komutovaných bezkefových motorov sú krokové motory (Obr. 2a) alebo spínané reluktančné motory. Oba motory spĺňajú podmienku, že neobsahujú kefy a sú napájané z polovodičového meniča. Na Obr. 2b je znázornený reluktančný synchronný motor, ktorý je tiež bezkefový. Môže však pracovať na sieti konštantného napätia a frekvencie, aj pri napájaní z meniča [2].



Obr. 2 Bezkefový motor a) krokový motor alebo spínaný reluktančný motor, b) reluktančný synchronný motor [3]

2. Princíp činnosti bezkefových motorov

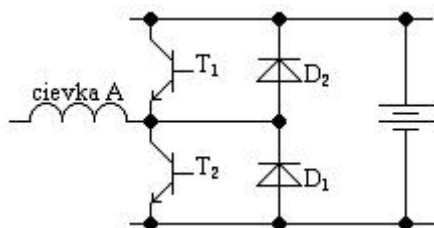
Na Obr. 3 vidíme, že funkciu jednej lamely komutátora s kefou možno nahradiť funkciou dvoch spínačov S1 a S2 (Obr. 3a, c). Ak sa kefa s kladnou polaritou dotýka lamely, na ktorú je pripojená cievka A (Obr. 3a) znamená to, že spínač S1 na Obr. 3c má byť zopnutý a spínač S2 rozopnutý. Ak sa lamela s cievkou A dotýka kefy so zápornou polaritou, znamená to, že spínač S1 je rozopnutý a spínač S2 je zapnutý. Ak sa kefa nedotýka lamely spojennej s cievkou A (Obr. 3b) znamená to, že spínače S1 a S2 sú rozopnuté. Na obmedzenie iskrenia pri rozpínaní spínačov S1 a S2 sa môžu použiť diódy D1 a D2 (Obr. 3d).



Obr. 3 Nahradenie funkcie kefy a komutátora mechanickým spínačom

Na Obr. 4 sú mechanické spínače S1 a S2 nahradené elektronickým spínačom (tranzistormi T1 a T2). Vidíme, že na nahradenie každej lamely potrebujeme štyri polovodičové prvky, a síce dva tranzistory a dve diódy. To je minimálny možný počet (len teoreticky), pretože ďalšie takéto polovodičové ventily treba spájať sériovo a paralelne tak, aby boli správne prúdovo a napäťovo dimenzované. Ďalšie logické prvky sú potrebné na to, aby spracovali signál od snímača polohy.

Skutočný počet lamiel klasického jednosmerného stroja je veľmi vysoký, aby dokázal vytvoriť hladký moment. Daná štruktúra elektricky komutovaného bezkefového jednosmerného motora s veľkým množstvom polovodičových prvkov by bola z cenového aj priestorového hľadiska neúnosná. Preto sa používa princíp najmenšieho možného počtu lamiel, s ktorými jednosmerný motor môže pracovať a to je tri. Preto bezkefový jednosmerný motor má na statore len tri cievky, t. j. tri fázy vinutia.



Obr. 4 Nahradenie funkcie kefy a komutátora elektronickým spínačom [2]

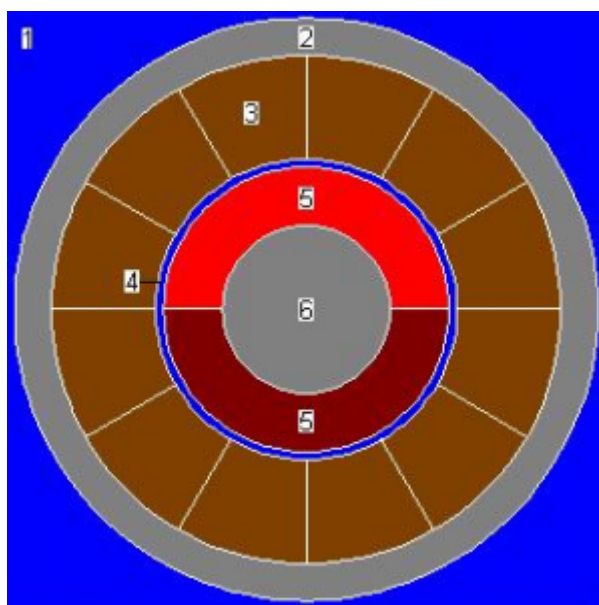
3. Magnetické polia bezkefového motora

Magnetické polia sú riešené pomocou programu Finite Element Method Magnetics (FEMM) v bezkefovom jednosmernom motore. FEMM je súbor programov na riešenie statických a nízkofrekvenčných magnetických polí. Tieto programy obvykle riešia problémy v dvojrozmernom a v osovo súmernom prostredí. FEMM sa skladá z troch základných častí a to:

- Preprocessor (geometrické zostrojenie; definovanie materiálových vlastností a okrajových podmienok - Dirichletova, Neumannova a Robinova okrajová podmienka),
- Solver (výpočet rovníc na získanie hodnôt magnetického poľa),
- Postprocessor (grafická časť, ktorá zobrazuje výsledné magnetické polia) [4].

Bezkefový motor je nakreslený v preprocessore programu FEMM tak, aby bolo vidieť vonkajší priemer statora, vonkajší priemer kostry, vnútorný priemer statora (kostry), vonkajší priemer rotora, priemer hriadeľa, permanentné magnety a vzduchovú medzeru. Ako je vidieť z Obr. 5 ku každej časti motora je priradený materiál: bod 1 predstavuje okolie motora (vzduch), jarmo statora 2 je zo železa, satorové vinutie 3 je z medi, vzduchová medzera 4 sa nachádza medzi satorovým vinutím 3 a permanentným magnetom samárium-kobalt (SmCo) 5 a jarmo rotora 6 je z ocele.

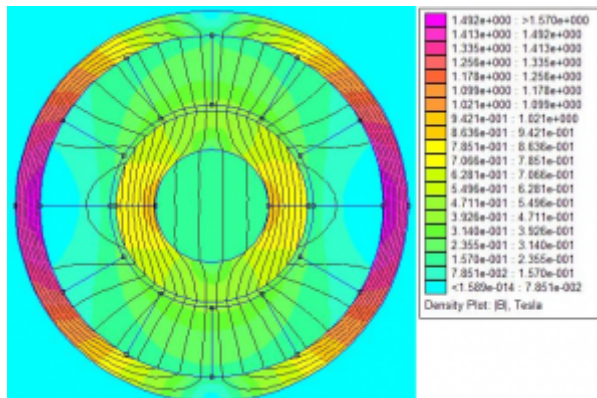
Permanentné magnety SmCo sú zložené zo železa, niklu, kobaltu a zo vzácnych zemín. Remanentnú magnetickú indukciu B_r majú horšiu ako permanentné magnety Alnico, ale ich koercitívna sila H_c je vyššia ako u feritov. Ich výhodou je vysoký energetický súčin $BH_{\max} = (40 - 200) \text{ kJ/m}^3$, vysoká koercitívna sila $H_c = (400 - 720) \text{ kA/m}$ a lineárna demagnetizačná charakteristika. Nevýhodou SmCo je, že Sm je málo (vyššia cena), vyžadujú si starostlivé zaobchádzanie, ochranu pred prachom a nečistotami [5].



Obr. 5 Rez bezkefového motora (1 - vzduch, 2 - železo, 3 - meď, 4 - vzduch, 5 - permanentný magnet SmCo, 6 - oceľ)

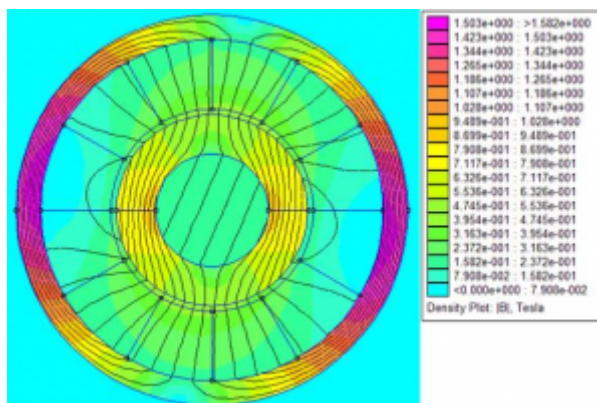
V Preprocessore je k hornému a dolnému okraju zadaná Dirichletova okrajová podmienka, ktorá hovorí, že siločiar magnetickeho poľa neprechádzajú hranicou riešení. Po spustení časti Solver sa nakreslený rez bezkefového motora rozdelí na veľa trojuholníkov, čo je veľmi dôležité pri riešení metódou konečných prvkov. Potom urobí výpočty založené na metóde konečných prvkov. Po ukončení výpočtov grafická časť Postprocessor zobrazí výsledné magneticke polia.

V programe FEMM je stav naprázdno charakterizovaný nulovým prúdom (medené vinutie statora je nahradené vzduchom), ktorý prechádza cez satorové vinutie 3. Permanentný magnet 5 je orientovaný v 90° uhle. Rozloženie magnetickeho poľa je znázornené na Obr. 6.



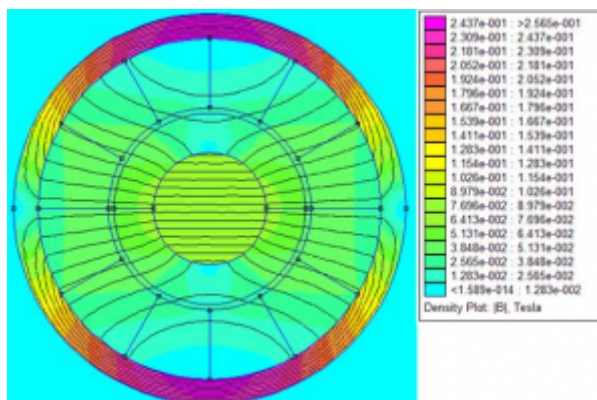
Obr. 6 Mapa magnetického poľa v stave naprázdno

V zaťaženom stave je permanentný magnet 5 tiež orientovaný v 90° uhle. Vrchné štyri drážky satorového vinutia 3 sú zaťažené prúdom o veľkosti $+0,2 \text{ A/mm}^2$ (kladné znamienko). Štyri drážky nachádzajúce sa v strede satorového vinutia 3 sú charakterizované nulovým prúdom (medené vinutie je nahradené vzduchom). Spodné štyri drážky satorového vinutia 3 sú zaťažené prúdom o veľkosti $-0,2 \text{ A/mm}^2$ (záporné znamienko). Výsledné rozloženie magnetického poľa je znázornené na Obr. 7.



Obr. 7 Mapa magnetického poľa v zaťaženom stave

Jediný rozdiel pri reakcii kotvy v porovnaní so zaťažením stavom je, že permanentný magnet 5 nahradený vzduchom. Na Obr. 8 je vidieť rozloženie magnetického poľa, ktoré je deformované reakciou kotvy.



Obr. 8 Mapa magnetického poľa pre reakciu kotvy

Záver

V príspevku boli prezentované bezkefové motory, ktoré neobsahujú komutátor a kefy,

čím sa dokáže odstrániť nežiaduce iskrenie počas komutácie. Komutátor a kefy sú nahradené elektronickým spínačom a na budenie používajú permanentné magnety. Preto môže byť cena týchto motorov vyššia v porovnaní s klasickými motormi. Výsledkom riešenia bezkefového motora v programe FEMM je rozloženie magnetických polí pre stav naprázdno, zaťažný stav a pre reakciu kotvy.

Tieto výsledky sú závislé na veľkosti prúdu, ktorý prechádza statorovým vinutím a použitým permanentným magnetom. Remanentná magnetická indukcia, koerčitívna sila, maximálny energetický súčin a pod. sú vlastnosti permanentných magnetov, ktoré ovplyvňujú rozloženie magnetického pola a prevádzku bezkefových motorov.

Literatúra

1. KENJO, T.: Electric Motors and their Control. Oxford University Press, 1991.
2. HRABOVCOVÁ, V. et al.: Moderné elektrické stroje. 1. vyd. Žilina: EDIS - vydavateľstvo ŽU, 2001. ISBN 80-7100-809-5, s. 217-223.
3. MILLER, T. J. E.: Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives. Oxford Science Publication, 1989.
4. MEEKER, D.: Finite Element Method Magnetics. User's manual. Version 3.1, 2002, 4 s.
5. CHEE-MUN ONG: Dynamic Simulation of Electric Machinery. Using Matlab/Simulink. Prentice Hall PTR. New Jersey 07458, 1998. 41 s.

Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave
