

طراحی موتور جریان مستقیم بدون جاروبک دو فاز به روش اجزای محدود و بررسی اثر ساختار شیارهای استاتور بر روی عملکرد موتور

مهرداد جعفر بلند^(۱) - عبدالامیر نکوبین^(۲)

(۱) دانشیار - دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(۲) مربی - عضو باشگاه پژوهشگران و نخبگان جوان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد

تاریخ دریافت: بهار ۱۳۹۳ تاریخ پذیرش: زمستان ۱۳۹۳

خلاصه: هدف این مقاله طراحی موتور جریان مستقیم بدون جاروبک مغناطیس دایم دو فاز و بررسی اثر ساختار شیارها بر روی عملکرد موتور برای تعیین بهترین ساختار می‌باشد. در ابتدا با استفاده از نرم افزار کامپیوتری RMxpert موتور جریان مستقیم بدون جاروبک با شیارهای متفاوت طراحی شده و نتایج هر کدام از طراحی‌ها در حالت بار کامل ارایه شده است، سپس برای مقایسه روش عددی و روش تحلیلی در شبیه‌سازی، موتور جریان مستقیم بدون جاروبک در شرایط متفاوت با استفاده از نرم افزار Maxwell3D طراحی و به روش اجزای محدود مورد تحلیل الکترومغناطیسی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که با تغییر ساختار شیارهای استاتور راندمان و عملکرد موتور تغییر قابل توجهی یافته است. بنابراین با انتخاب صحیح ساختار شیارهای استاتور می‌توان به عملکرد مطلوب موتور دست یافت.

کلمات کلیدی: موتور بدون جاروبک، روش اجزای محدود، ساختار شیارها.

Designing a Two-Phase BLDC Motor and Finite-Element Analysis of Stator Slots Structure Effects on the Motor Operation

Mehrdad Jafarboland⁽¹⁾ - Abdolamir Nekoubin⁽²⁾

(1) Associate Professor - Department of Electrical Engineering, Maleke-Ashtar University
j_mehrdad405@hotmail.com

(2) Instructor - Young Researchers and Elite Club, Najafabad Branch, Islamic Azad University
nekoubin@yahoo.com

Designing a two-phase brushless direct current motor (BLDC) and analyzing effects of stator slots structure on the motor operation are main objectives of this paper. At first BLDC motor with three different structures for stator slots is designed by using RMxpert software and efficiency of BLDC motor for different structures in full-load condition has been presented, then the BLDC motor in different conditions by using Maxwell 3D software is designed and with finite element method is analyzed electromagnetically. The results of simulations show that by varying stator slots structure efficiency and operation of motor have changed significantly therefore with correct choosing of stator slots structure intersted operation can be found.

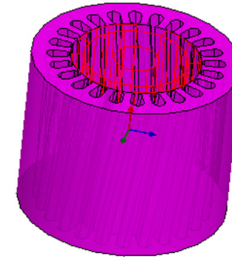
Index Terms: Stator slots, simulation, BLDC motor.

۱- مقدمه

در موتور جریان مستقیم بدون جاروبک ترکیب کموتاتور و جاروبکها برای فراهم کردن جریان در سیم پیچی آرمیچر حذف می‌شوند و به جای آن از یک کنترل کننده الکترونیکی مانند حس کننده‌های اثر هال برای تعیین موقعیت رتور و ارسال سیگنالهای کنترلی برای کلیدهای اینورتر استفاده می‌شود [۱-۲]. موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک نه تنها به خاطر راندمان مناسب بلکه به خاطر عدم نیاز آنها به نگهداری زیاد، مورد توجه قرار گرفته‌اند. دو نوع ساختار فیزیکی برای موتور بدون جاروبک وجود دارد:

۱. ساختار دیسکی، ۲. ساختار استوانه‌ای. طبق [۳] توپولوژی موتورهای استوانه‌ای می‌توانند به صورت زیر دسته‌بندی شوند:
- الف) موتور استوانه‌ای رتور داخلی
- ب) موتور استوانه‌ای رتور خارجی

روش طراحی و تحلیل یک موتور بدون جاروبک برای استفاده در صنایع فضایی در [۱] توضیح داده شده و با انتخاب بهینه تعداد جفت



شکل (۱): موتور جریان مستقیم بدون جاروبک مغناطیس دایم طراحی شده با نرم افزار Maxwell

Fig. (1): Brushless DC motor designed with Maxwell

موضوع مورد مطالعه در این مقاله موتور استوانه‌ای رتور داخلی بدون جاروبک دو فاز است شکل (۱). موتور جریان مستقیم با سیم پیچ دو فاز در جاهایی که به گشتاور بالا و هموار در ابعاد کوچک نیاز باشد به کار می‌رود. و برای کاربردهایی نظیر صندلی چرخ دار مناسب می‌باشند.

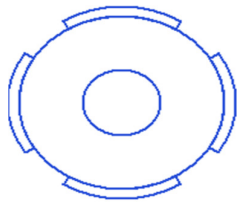
۲- طراحی موتور جریان مستقیم بدون جاروبک دو فاز

یکی از عوامل موثر در عملکرد موتور جریان مستقیم بدون جاروبک دو فاز ساختار شیارهای استاتور می‌باشد. برای بررسی اثر ساختار شیارهای استاتور بر عملکرد موتور ابتدا قسمت رتور در محیط نرم افزار RMXprt طراحی شده و آهنربای دایم بر روی سطح خارجی رتور قرار گرفته است. شکل (۳). سپس استاتور با سه ساختار مختلف برای شیارها شبیه سازی شده است. در موتورهای بدون جاروبک راندمان از رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد:

$$eff = Pin / Pout \quad (1)$$

$$Pout = Pin - (Pfw + Pcu + Pt + Pfe) \quad (2)$$

قطبها و ضخامت آهنربای دایم عملکرد موتور بهبود یافته است. در [۲] یک موتور بدون جاروبک برای کاربرد در صنایع زیر دریایی طراحی و تحلیل شده و سپس با استفاده از روش اجزای محدود موتور تحلیل الکترومغناطیسی شده و مقادیر نامی موتور از جمله حداکثر سرعت، حداکثر گشتاور خروجی، و بازده تعیین شده است. یک موتور بدون جاروبک مغناطیس دایم شار محوری به منظور کاهش گشتاور لغزشی در [۳] ارائه شده که موتور با دو ساختار متفاوت برای هسته استاتور طراحی و تحلیل شده، در یک نوع از ساختارهای ارائه شده گشتاور لغزشی تا نود درصد کاهش یافته است. در [۴] به منظور بهبود عملکرد بدون جاروبک یک نوع جدید از این موتور ارائه شده که دارای دو رتور می‌باشد. این موتور می‌تواند دو گشتاور مشابه و خلاف جهت در هر دو رتور ایجاد کند که باعث بهبود عملکرد موتور خواهد شد. سیم پیچهای استاتور موتور بدون جاروبک قابلیت اتصال به سیستمهای تکفاز و چند فاز را دارند. تاکنون فقط موتورهای تک فاز و سه فاز بررسی شده‌اند و مطالعه دقیقتری بر روی عملکرد موتورهای دو فاز انجام نشده است [۴-۵]. که در اینجا P_{in} توان ورودی به موتور، P_{out} توان خروجی از موتور، P_{fw} تلفات اصطکاک و بادگیری، P_{cu} تلفات مسی، P_t تلفات دیویدا و ترانزیستورها، P_{fe} تلفات آهنی می‌باشد. در جدول (۱) پارامترهای اولیه طراحی موتور بدون جاروبک جریان مستقیم نشان داده شده است.

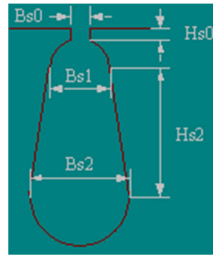


شکل (۲): ساختار رتور موتور DC بدون جاروبک
Fig. (2): Rotor of Brushless DC motor

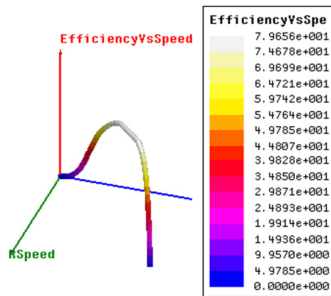
Table (2): Specifications adopted for BLDC motor
جدول (۱): پارامترهای طراحی موتور BLDC

نام	اندازه	واحد
توان نامی موتور	۰/۵۵	کیلو وات
ولتاژ نامی	۲۲۰	ولت
تعداد قطبها	۴	-
تعداد شیارهای استاتور	۲۴	-
قطر داخلی استاتور	۷۵	میلی متر
قطر خارجی استاتور	۱۲۰	میلی متر
قطر داخلی رتور	۲۶	میلی متر
طول رتور	۶۵	میلی متر
حداکثر ضخامت آهنربا	۳/۵	میلی متر

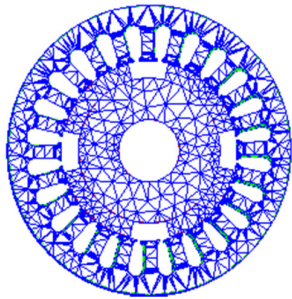
برای تحلیل الکترو مغناطیسی موتور جریان مستقیم بدون جاروبک این موتور در محیط نرم افزار MAXWELL3D طراحی و شبیه سازی شده است. مدل مش گذاری شده موتور در شکل (۵) نشان داده شده است همچنین چگالی شار در نقاط مختلف موتور مطابق شکل (۶) می باشد که رنگ قرمز نشان دهنده بیشترین چگالی شار و رنگ آبی نشان دهنده کمترین چگالی شار می باشد. همان طور که در شکل مشخص بیشترین اندازه چگالی شار در محل دندانها می باشد. اندازه چگالی شار در فاصله هوایی و اندوکتانس نشستی در موتور مطابق جدول (۲) تعیین شده است.



شکل (۳): ساختار شیارهای استاتور در حالت اول
Fig. (3): Slot structure of Brushless DC motor at first state



شکل (۴): راندمان موتور در حالت بار کامل در حالت اول
Fig. (4): Efficiency of Brushless DC motor at first state



شکل (۵): مدل مش گذاری شده موتور برای حالت اول
Fig. (5): Finite element mesh of BLDC at first state

۳- تحلیل موتور بدون جاروبک به روش اجزای محدود

برای بررسی رفتار موتور جریان مستقیم بدون جاروبک به روشهای تحلیلی زیادی وجود دارد که می توان به روش تفاضل محدود (FDM)، روش اجزای محدود (FEM) و روش المان مرزی (BEM) اشاره کرد [۶-۷]. در این مقاله از روش اجزای محدود (FEM) استفاده شده است. میدان مغناطیسی در موتور الکتریکی توسط معادلات ماکسول به صورت زیر بیان می شود [۸ و ۹]:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla \times H = J \quad (5)$$

در معادلات بالا، B چگالی شار میدان مغناطیس، H شدت میدان مغناطیس و J چگالی جریان و E میدان الکتریکی است. معمولاً برای حل معادلات میدان باید آنها را بر حسب بردار پتانسیل A بیان کرد. در این صورت چگالی شار میدان مغناطیس B را می توان بر حسب بردار پتانسیل A به صورت زیر نوشت:

$$B = \nabla \times A \quad (6)$$

همچنین رابطه بین B و H به صورت زیر بیان می شود:

$$H = r \cdot B \quad (7)$$

که $r = \frac{1}{\mu}$ ضریب مقاومت مغناطیس است.

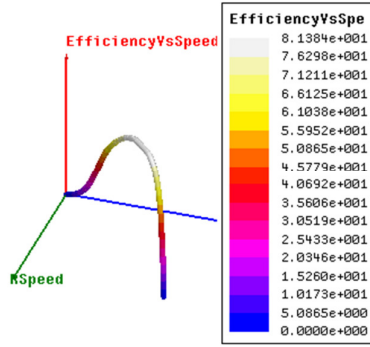
با جایگذاری معادلات (۶) و (۷) در معادله (۵)، معادله اساسی بردار پتانسیل برای میدان مغناطیسی به صورت زیر حاصل می شود:

$$\nabla \times (r \cdot \nabla \times A) = J \quad (8)$$

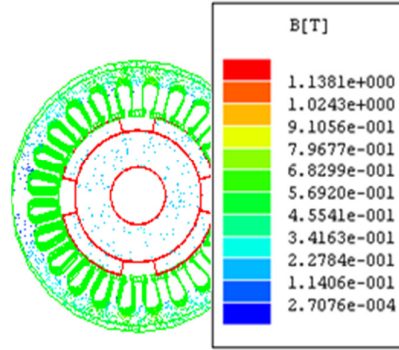
به دلیل اینکه نرم افزار MAXWELL3D توانایی حل معادلات الکترومغناطیسی و معادلات دینامیکی، مکانیکی را دارد، از این نرم افزار برای طراحی و تحلیل مدل مورد نظر استفاده شده است. برای تحلیل مدل در ابتدا سیستم یک مش اولیه از مسئله ایجاد می کند سپس پارامترهای مورد نیاز و تغییرات انرژی نسبت به مرحله قبل را محاسبه می کند. در مرحله بعد تغییرات انرژی را با درصد خطای انرژی مقایسه می کند. اگر تغییرات انرژی کمتر از مقدار درصد خطای تعیین شده باشد فرایند حل میدان پایان می یابد در غیر این صورت سیستم به مرحله بعد می رود و عناصر با بیشترین خطای انرژی پالایش می شود (به عناصر کوچکتر تقسیم شده) و مسئله دوباره حل می شود. سیستم این فرآیند را تا زمانی که شرایط پایان برنامه حاصل شود ادامه می دهد.

۴- شبیه سازی مدل و نتایج :

حالت اول: در این حالت ساختار شیارهای استاتور مانند شکل (۳) می باشد. در این ساختار انتهای شیار به صورت قوسی شکل می باشد. پس از طراحی استاتور با این نوع شیار و شبیه سازی موتور در حالت بار کامل راندمان موتور در حدود ۷۹/۶ درصد می رسد که برای موتور بدون جاروبک مطلوب نمی باشد (شکل (۴)).



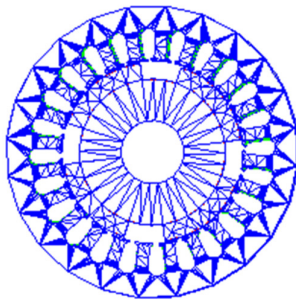
شکل (۸): راندمان موتور در حالت بار کامل برای حالت دوم
Fig. (8): Efficiency of Brushless DC motor at second state



شکل (۶): چگالی شار موتور برای حالت اول
Fig. (6): Flux density of BLDC at first state

در این تحلیل الکترو مغناطیسی موتور جریان مستقیم بدون جاروبک انجام شده است و مدل مش گذاری شده سیستم و چگالی شار موتور به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. از نتایج جدول (۳) مشخص است که چگالی شار در فاصله هوایی افزایش یافته است همچنین اندوکتانس نشی انتها کاهش یافته که باعث بهبود عملکرد موتور خواهد شد.

حالت سوم: در این حالت نسبت به دو ساختار قبلی عمق شیار افزایش یافته همچنین انتهای شیار از حالت قوسی شکل به تخت تبدیل شده است که در شکل (۱۱) نشان داده شده است. راندمان حاصل از شبیه‌سازی موتور در حالت بار کامل با این نوع ساختار مطابق شکل (۱۲) می‌باشد. از نتیجه شبیه‌سازی مشخص است که بازده موتور نسبت به حالت اول در حدود ده درصد افزایش یافته و تقریباً به ۹۰ درصد می‌رسد که برای موتورهای بدون جاروبک مطلوب می‌باشد.

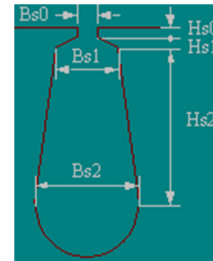


شکل (۹): مدل مش گذاری شده موتور برای حالت دوم
Fig. (9): Finite element mesh of BLDC at first state

جدول (۲): نتایج شبیه سازی موتور به روش اجزای محدود
Table (2): The results of finite element analysis for BLDC motor

نام	اندازه	واحد
چگالی شار فاصله هوایی	0.661027	تسلا
اندوکتانس نشی انتها	0.00381	هانری

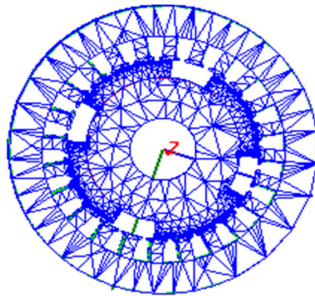
حالت دوم: در این حالت با تغییر ساختار شیارهای استاتور به صورت شکل (۷) و افزایش طول لبه ابتدایی شیار، استاتور را مجدداً با این نوع شیار طراحی شده است. راندمان موتور در حالت بار کامل مطابق شکل (۸) می‌باشد. از شکل مشخص است که با تغییر ساختار شیار بازده موتور در حدود ۲ درصد افزایش یافته است. البته این مقدار بازده نیز برای موتورهای بدون جاروبک مطلوب نمی‌باشد.



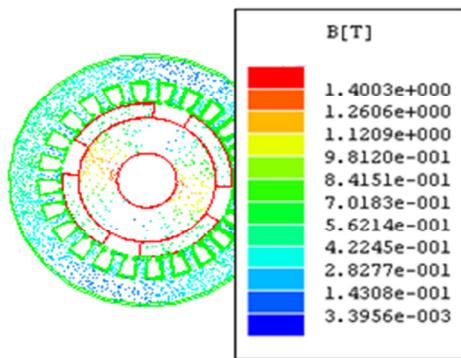
شکل (۷): ساختار شیارهای استاتور در حالت دوم
Fig. (7): Slot structure of Brushless DC motor at second state

سیستم و چگالی شار موتور به ترتیب در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. از نتایج جدول (۴) مشخص است که چگالی شار در فاصله هوایی نسبت به حالت اول به اندازه ۰/۰۳ تسلا افزایش یافته همچنین اندوکتانس نشتی آنها به میزان بیشتری کاهش یافته که باعث بهبود عملکرد موتور می‌شود. از مقایسه ۳ حالت در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی موتور بدون جاروبک به روش تحلیلی مشخص است که تعیین ساختار شیارها نقش مهمی در بهبود و افزایش راندمان در موتور بدون جاروبک دارد. همچنین از مقایسه سه حالت طراحی شده به روش اجزای محدود شده مشخص است که با تغییر ساختار شیارها چگالی شار در فاصله هوایی موتور القائی تغییر یافته است. و بیشترین چگالی شار و کمترین اندوکتانس نشتی در حالت سوم حاصل شده است.

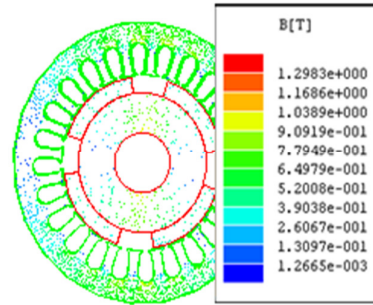
البته برای بهبود بیشتر عملکرد موتور بدون جاروبک پارمترهای دیگری نظیر ساختار، جنس و ضخامت آهنربای دایم استفاده شده بر روی رتور و یا نوع اینورتر مورد استفاده در تغذیه موتور نیز می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.



شکل (۱۳): مدل مش گذاری شده موتور برای حالت سوم
Fig. (13): Finite element mesh of BLDC at third state



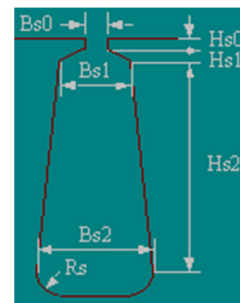
شکل (۱۴): چگالی شار موتور برای حالت سوم
Fig. (14): Flux density of BLDC at third state



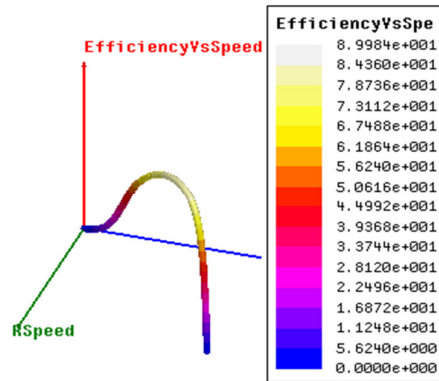
شکل (۱۰): چگالی شار موتور برای حالت دوم
Fig. (10): Flux density of BLDC at second state

جدول (۳): نتایج شبیه‌سازی موتور به روش اجزای محدود
Table (3): The results of finite element analysis for BLDC motor at second state

واحد	اندازه	نام
تسلا	۰/۶۷۵۷۸	چگالی شار فاصله هوایی
هانری	۰/۰۰۲۷۲	اندوکتانس نشتی انتها



شکل (۱۱): ساختار شیارهای استاتور در حالت سوم
Fig. (11): Slot structure of Brushless DC motor at third state



شکل (۱۲): راندمان موتور در حالت سوم
Fig. (12): Efficiency of Brushless DC motor at third state

برای بررسی درستی نتایج به دست آمده از این روش موتور با نرم‌افزار MAXWELL3D مجدداً برای حالت سوم طراحی شده تا به روش اجزای محدود بررسی شود. مدل مش گذاری شده

محاسباتی پیشرفته این امکان را به وجود می‌آورد که بتوان رفتار ماشین را به دقت مدل نموده و طرح‌های جدید را نیز به سرعت ارزیابی نمود. در نتایج حاصل از شبیه‌سازی موتور به روش اجزای محدود مشخص است که با تغییر ساختار شیارهای استاتور اندوکتانس نشستی در موتور کاهش و چگالی شار در فاصله هوایی افزایش یافته که باعث کاهش تلفات موتور می‌شود. از شبیه‌سازی موتور در حالت بار کامل مشخص است که انتخاب بهینه ساختار شیارهای استاتور نقش مهمی در افزایش راندمان و بهبود گشتاور موتور جریان مستقیم بدون جاروبک دو فاز خواهد داشت.

جدول (۴): نتایج شبیه سازی موتور به روش اجزای محدود
Table (4): The results of finite element analysis for BLDC motor at third state

نام	اندازه	واحد
چگالی شار فاصله هوایی	0.68077	تسلا
اندوکتانس نشستی انتها	0.00112	هانری

۵- نتایج

در طراحی ماشین‌های الکتریکی می‌بایست مسائل و محدودیتهای الکترو مغناطیسی، حرارت و مکانیکی را مورد بررسی قرار داد. بنابراین رسیدن به یک طراحی قابل قبول تکرارهای محاسباتی زیادی را موجب می‌گردد. استفاده از نرم افزارهای جدید، همچنین بهره‌گیری از روش

References

- [1] R.P. Praveen, M.H. Ravichandran, V.T. Sadasivan Achari, R. Jagathy, "Design and analysis of zero cogging Brushless DC motor for spacecraft applications", Electrical Engineering/Electronics Computer Conference, Vol. 21, pp. 254- 258, 21-22 May 2010.
- [2] D. Shak, N.A.A. Manap, M.S. Ahmad, M.R. Arshad, "Electrically actuated thrusters for autonomous underwater vehicle", Advanced Motion Control, 11th IEEE Int. Workshop, Vol. 32, pp. 619- 624, 21-24 March 2010.
- [3] J.H. Choi, J.H. Kim, D.H. Kim, "Design and parametric analysis of axial flux PM motors with minimized cogging torque", IEEE Trans. on Mag., Vol. 45, pp. 2855 - 2858 19 May 2009.
- [4] F. Zhang, G. Liu, Y. Shen, "Characteristic study on a novel PMSM with opposite-rotation dual rotors", Proc. of Int. Con. on Elec. Mach. and Sys., Vol. 50, No. 5, pp. 920-935 8-11 Oct. 2007.
- [5] G. Peng, "Research on energy conversion control for small-scaled brushless DC wind power system", IEEE Trans. Cont. Sys., Vol. 9, No. 4, pp. 629-636, July 2004.
- [6] F. Zhang, N. Neuberger, E. Nolle, P. Gruenberger, F. Wang, "A new type of induction machine with inner and outer double rotors", IEEE Int. Con. on Power Elec. and Motion Control, Vol. 1, pp. 286-289, Jan. 2004.
- [7] K.T. Chau, Y.B. Li, J.Z. Jiang, S.X. Niu, "Design and control of a PM brushless hybrid generator for wind power application", IEEE Trans. on Mag., Vol. 42, No. 10, pp. 349-356, 6-8 Sept. 2006.
- [8] D. Zhang, K.T. Chau, S. Niu, J.Z. Jiang, "Design and analysis of a double-stator cup-rotor PM integrated-starter-generator", IEEE IAS Annual Meeting, pp. 20-26, Feb. 2006.
- [9] Y. Zhang, K.T. Chau, J.Z. Jiang, D. Zhang, "A finite element analytical method for electromagnetic field analysis of electric machines with free rotation", IEEE Trans. on Mag., Vol. 42, No. 10, pp. 303-309, Jan. 2006.