

طراحی روتور در موتور سوئیچ رلوکتانس به منظور تولید گشتاور پیوسته به وسیلهی آنالیز اجزای محدود

داود کرمعلیان^(۱) - سید بهروز مجیدی^(۲) - محمدرضا یوسفی نجفآبادی^(۳)*

(۱) کارشناس ارشد - دانشکده مهندسی برق، واحد نجفآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجفآباد، ایران.

(۲) استادیار - دانشکده مهندسی برق، واحد نجفآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجفآباد، ایران.

* مرکز تحقیقات ریز شبکه های هوشمند، واحد نجفآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجفآباد، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۷/۱۸

خلاصه: ویژگی‌های الکتریکی، مکانیکی، قابلیت اطمینان بالا و همچنین سادگی ساخت و نگهداری موتورهای سوئیچ رلوکتانس باعث استفاده‌ی گسترده از این نوع موتور در صنعت شده است. با این حال عمده‌ترین مشکلات این موتور داشتن گشتاور ناپیوسته در برخی از زوایای گردش روتور و عدم راه‌اندازی می‌باشد. در این مقاله به منظور افزایش ناحیه‌ی گشتاور مثبت و از بین بردن ناحیه‌ی بدون گشتاور موسوم به ناحیه‌ی مرده^۱، ساختار جدیدی از روتور ارائه شده است تا علاوه بر اینکه فاصله‌ی هوایی را ثابت نگه دارد، مشکل پیوستگی گشتاور را تحت بارهای بزرگ برطرف نماید. در این روش با ایجاد برش در روتور تحت دو فاکتور مکان و زاویه‌ی برش، اندوکتانس متغیری ایجاد می‌شود که گشتاور تولیدی را به دو بخش مجزا تقسیم‌بندی می‌کند و بازه‌ی تولید گشتاور مثبت بیشتر می‌شود به صورتی که هم‌پوشانی گشتاور مثبت بین دو فاز بوجود می‌آید. به منظور تأیید این ساختار، بهینه‌سازی متغیرهای فوق و مشاهده‌ی خروجی‌های موتور از روش شبیه‌سازی آنالیز اجزای محدود استفاده و ملاحظات ساخت نیز مورد توجه قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: آنالیز اجزای محدود، گشتاور پیوسته، موتور سوئیچ رلوکتانس، ناحیه‌ی مرده.

Rotor Design and Analysis of 4/2 SRMs to Produce Continuous Torque using Finite Element Method

Davood Karamalian⁽¹⁾ _ Behrooz Majidi⁽²⁾ _ Mohammad Reza Yousefi⁽³⁾

(1) MSc - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
Davood.karamalian@gmail.com

(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
bmx@aut.ac.ir

(3) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.
mr.yousefi@ieee.org

Abstract

Electrical and mechanical benefits, simple manufacturing and maintenance of switched reluctance motor make it suitable in industrial and home applications, but the most important drawbacks of switched reluctance motor are discontinuous torque and no self-starting in some rotor positions. In this paper a novel rotor structure is presented and optimized in order to increase positive torque region and eliminate dead-zone in high loads. The torque produced in this proposed SRM is divided into two regions and overlapped in two phases periodically. In order to find the best output character and optimal design, two factors, position and angle of cut edge are optimized. To verify the proposed rotor, torque characteristic, flux path and torque ripple has been analyzed by finite element method and compared with conventional 4/2 SRM. The proposed motor has a continuous torque characteristic.

Index Terms: Switched reluctance motor; Continuous torque; Finite element method; Dead-zone region.

۱- مقدمه

در بسیاری از صنایع امروزی از قبیل لوازم خانگی، فن‌ها، دستگاه‌های پمپ و وکیوم به موتورهایی با سرعت بالا و در عین حال هزینه‌ی پایین ساخت و نگهداری نیاز است که در این راستا موتورهای سوئیچ رلوکتانسی، القایی و مغناطیس دائم، کاربرد بیشتری نسبت به سایر موتورها پیدا کرده‌اند. در موتورهای مغناطیس دائم با استفاده از مواد مغناطیسی در ساختار روتور و استاتور به بهبود عملکرد و راندمان موتور کمک می‌شود اما به دلیل کمبود منابع و گرانی آهنربای دائم و همچنین از بین رفتن یکپارچگی روتور و معایبی که در سرعت‌های بالا بوجود می‌آید، کاربرد این موتورها در صنعت محدود شده‌است [۱].

موتورهای القایی قفسه سنجایی با ساختار ساده و ارزان مناسب برای کاربردهای فوق می‌باشند که از معایب آن می‌توان به عدم گشتاور راه‌اندازی و قابلیت اطمینان پایین اشاره نمود. موتور سوئیچ رلوکتانس نسبت به ساختار موتور القایی دارای گشتاور راه‌اندازی بهتر، عدم وابستگی جهت جریان به جهت چرخش، قابلیت استفاده از حالت ژنراتوری و مهم‌تر از همه عدم وابستگی هر فاز به فاز دیگر می‌باشد که منجر به قابلیت اطمینان بالاتر می‌شود [۲].

موتورهای سوئیچ رلوکتانسی به دلیل ساختار ساده، یکپارچگی، قابلیت استفاده در سرعت‌های بالا، عدم وجود سیم‌بندی و آهنربا روی روتور، سادگی ساخت و نگهداری و ارزان بودن مبدل و راه‌انداز آن در موارد فوق کاربرد بیشتری یافته اند [۳].

در موتورهای الکتریکی تلفات هسته شامل تلفات فوکو و هیستریزس، رابطه‌ی مستقیم با فرکانس تغذیه دارد و افزایش فرکانس در موتورها در میدان ثابت باعث افزایش تلفات موتور و کاهش راندمان می‌شود، از طرفی به دلیل اینکه در سرعت ثابت فرکانس منبع تغذیه رابطه‌ی مستقیمی با تعداد قطب‌های روتور دارد، به منظور حداقل کردن تلفات هسته سعی می‌شود موتور با حداقل تعداد قطب‌های روتور و استاتور استفاده شود [۴].

از عوامل مؤثر دیگر بر اندازه‌ی گشتاور و هزینه‌ی موتور، تعداد فازهای موتور است. تعداد فاز موتور به دلیل نیاز به ادوات کلیدزنی رابطه‌ی مستقیمی با هزینه دارد، بنابراین همواره سعی بر این است در کاربردهایی که هزینه فاکتور اصلی است از حداقل تعداد فاز بهره برده شود، اما در موتورهای سوئیچ رلوکتانسی بدلیل سیکل وظیفه‌ی 50° در حالت تک‌فازی و کاهش چشم‌گیر راندمان از موتور دو فاز که علاوه بر سادگی مبدل و کاهش هزینه از سیکل وظیفه‌ی کامل برخوردار است استفاده می‌شود، بنابراین به منظور حداقل کردن تلفات و همچنین کاهش هزینه در صنایع سرعت بالا با هزینه‌ی حداقل و در عین حال پر تنش از موتور $4/2$ سوئیچ رلوکتانس دارای دو فاز بهره برده می‌شود که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود [۵]، [۶].

موتور $4/2$ سوئیچ رلوکتانسی دو فاز، ضمن ویژگی‌های فوق دارای دو عیب اساسی از جمله عدم تولید گشتاور پیوسته در برخی از مکان‌های روتور و ریپل گشتاور زیاد می‌باشد. در این مقاله، با بهره‌گیری از مفاهیم پایه در طراحی موتورهای الکتریکی و همچنین ارائه‌ی ساختار جدید

برای روتور به تولید گشتاور پیوسته پرداخته می‌شود. موتور پیشنهادی با ساختار جدید علاوه بر ویژگی‌های فوق از قبیل سادگی، استحکام مکانیکی و هزینه‌ی پایین با حداقل فرکانس و تلفات هسته کار می‌کند و در عین حال قادر به تأمین گشتاور در هر زاویه‌ای از روتور بدون استفاده از آهنربا و یا سیم‌بندی کمکی است. قابل ذکر است دو فاز بودن موتور سوئیچ رلوکتانسی نباید با سیستم‌های دو فاز برق اشتباه شود و منظور از دو فاز بودن آن است که استاتور حاوی دو فاز سیم‌بندی می‌باشد که میتوان با یک منبع و عملیات سوئیچینگ آن را تغذیه نمود [۷].

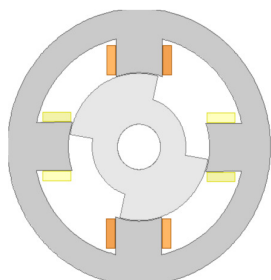
۲- موتور سوئیچ رلوکتانس با ۴ قطب در استاتور و ۲ قطب در روتور

در این بخش به اصول عملکرد، نحوه‌ی راه‌اندازی و مشخصه‌ی خروجی موتور سوئیچ رلوکتانس پرداخته می‌شود.

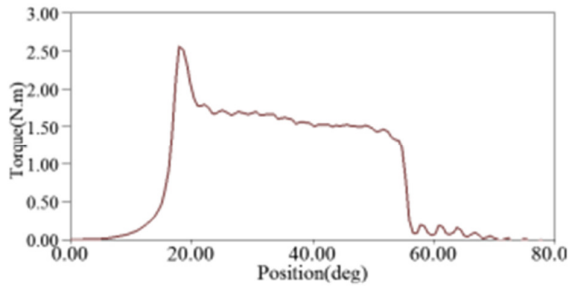
۲-۱- اصول عملکرد

شکل (۱) موتور سوئیچ رلوکتانس دو فاز با ۴ قطب در استاتور و ۲ قطب در روتور ($4/2$) را نشان می‌دهد که به صورت قطری تحریک و دارای سیم‌بندی سری است و رابطه‌ی گشتاور آن در جریان ثابت به صورت رابطه‌ی (۱) بیان می‌شود [۷]. با توجه به رابطه‌ی (۱)، گشتاور موتور به توان دوم جریان و مشتق اندوکتانس وابسته است و مستقل از علامت جریان می‌باشد که این امر باعث کاهش ادوات کلیدزنی و سادگی مبدل موتور سوئیچ رلوکتانس می‌شود. به طور کلی در تحریک موتور، زمانی که روتور در آستانه‌ی هم‌پوشانی با قطب استاتور قرار می‌گیرد، مبدل سوئیچ خورده و فاز زیر روتور شروع به تحریک می‌کند و چون شار تولیدی برای بسته شدن تمایل به مسیر دارای حداقل رلوکتانس را دارد، موتور به سمت هم‌پوشانی با فاز استاتور حرکت کرده تا به حالت هم‌پوشانی کامل برسد، سپس مدار تحریک با عمل سوئیچینگ و عوض کردن فاز این پروسه را تکرار می‌کند. به دلیل همین سوئیچینگ پی در پی و حداقل شدن رلوکتانس طی هر تحریک، این موتورها به سوئیچ رلوکتانس معروف هستند [۸].

شکل (۲) مدار تحریک دو فاز موتور سوئیچ رلوکتانس را نشان می‌دهد که در کاربرد سرعت متغیر با توجه به مکان روتور و در سرعت ثابت طی بازه‌ی زمانی مشخص عملیات کلید زنی در کلیدهای $pcs1$ و $pcs2$ انجام می‌دهد و به صورت متناوب هر فاز در زاویه‌ای مشخص مورد تحریک قرار می‌گیرد [۹].



شکل (۱): موتور $4/2$ سوئیچ رلوکتانس
Fig. (1): 4/2 switched reluctance motor



شکل (۴): مشخصه‌ی گشتاور بر حسب مکان روتور
Fig. (4): Characteristic of torque-rotor position

به منظور رفع این مشکل و ایجاد گشتاور پیوسته و هم‌پوشانی بین دو فاز، در مقالات قبلی از روش‌های کلی ذیل استفاده شده‌است:

۲-۳- گشتاور پیوسته بوسیله‌ی طراحی کمان روتور و استاتور

مطابق شکل (۳) ناحیه‌ی مرده به اندازه‌ی θ_0 به وجود آمده است که برای هم‌پوشانی کامل بین دو فاز باید مقدار آن حداکثر مساوی صفر باشد، بنابراین می‌توان گفت:

$$\theta_{rp} = \frac{2\pi}{P_r} \quad (2)$$

$$\theta_{rs} = \left(\frac{2\pi}{q.P_r}\right) \quad (3)$$

$$q = \frac{P_s}{2} \quad (4)$$

که در آن θ_{rp} زاویه‌ی کمان روتور و θ_{rs} تغییر زاویه‌ی بین دو فاز متوالی استاتور و q تعداد فاز موتور می‌باشد بنابراین:

$$\theta_0 = \theta_{rs} + \theta_1 - \theta_2 \rightarrow \theta_{rs} - (\theta_2 - \theta_1) \leq 0 \quad (5)$$

بنابراین حداقل هم‌پوشانی در مقدار مرزی صفر رخ می‌دهد و داریم:

$$\theta_2 - \theta_1 = \theta_{rs} \rightarrow \frac{\theta_{rp}}{q} = \frac{4\pi}{P_s.P_r} \quad (6)$$

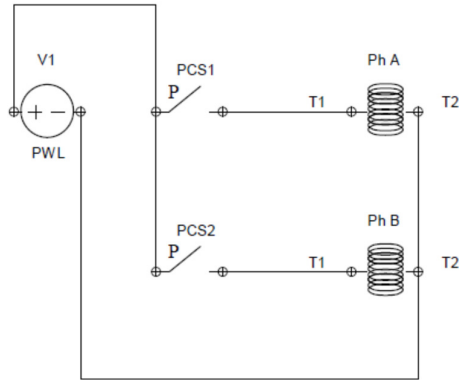
بنابر شکل (۳) اختلاف مقادیر θ_1 و θ_2 برابر زاویه‌ی کمان استاتور می‌باشد بنابراین:

$$\beta_{s \min} = \frac{4\pi}{P_r.P_s} | P_s = 4, P_r = 2 \rightarrow \beta_s = 90 \quad (7)$$

که در آن $\beta_{s \min}$ برابر حداقل کمان استاتور برای هم‌پوشانی می‌باشد که در موتور ۴/۲ سوئیچ رلوکتانسی به دلیل ۴ قطب در استاتور امکان‌پذیر نمی‌باشد.

۲-۴- گشتاور پیوسته به وسیله‌ی تحریک هم‌زمان دو فاز

این روش به دلیل تولید گشتاور پایین در ناحیه‌ی مرده برای کاربردهایی با بار کم مثل فن‌های خانگی قابل استفاده است. در این روش با تحریک هم‌زمان هر دو فاز و در نظر گرفتن اندوکتانس متقابل بین دو فاز می‌توان در ناحیه‌ی مرده گشتاور مثبت تولید کرد اما این گشتاور به دلیل کوچک بودن اندوکتانس متقابل تنها برای بارهای کوچک قابل بهره‌برداری می‌باشد [۱۱]، [۱۲].



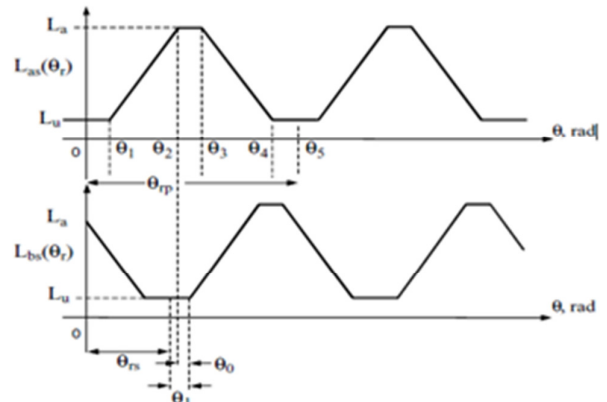
شکل (۲): مدل دو فاز موتور سوئیچ رلوکتانس [۹]
Fig. (2): Converter of 2-phase switched reluctance motor

$$W_{fld} = \frac{1}{2} Li^2 \rightarrow T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d(\theta)} \quad (1)$$

رابطه (۱) W_{fld} انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی، T_e گشتاور تولیدی، i جریان فاز استاتور و L اندوکتانس دیده شده در مسیر شار می‌باشد.

شکل (۳) مشخصه‌ی اندوکتانس استاتور هر فاز بر حسب زاویه‌ی روتور را نشان می‌دهد و طبق رابطه‌ی (۱) گشتاور تولیدی تنها در محدوده‌ای مثبت است که منحنی $L-\theta$ دارای شیب مثبت و یا به عبارت دیگر $\frac{dL(\theta)}{d(\theta)} > 0$ باشد. در منحنی گشتاور بر حسب θ نواحی خالی از

گشتاور به وجود می‌آید که به ناحیه‌ی مرده معروف است. وجود این ناحیه باعث به وجود آمدن ریپل گشتاور زیاد، عدم راه‌اندازی مطلوب و عدم تولید گشتاور مثبت در کل ناحیه‌ی عملکردی موتور می‌شود.



شکل (۳): مشخصه‌ی اندوکتانس استاتور هر فاز بر حسب زاویه‌ی گردش موتور [۱۰]
Fig. (3): Characteristic of stator per phase inductance vs rotor position of motor

۲-۲- مشخصه‌ی گشتاور موتور معمول

شکل (۴) مشخصه‌ی گشتاور بر حسب زاویه‌ی گردش موتور معمول را نشان می‌دهد. زاویه‌ی تحت پوشش گشتاور مثبت حدود ۵۸ درجه می‌باشد که توانایی ایجاد گشتاور پیوسته تحت تمامی زوایای گردش روتور را ندارد و ناحیه‌ی مرده‌ی بدون گشتاور حدود ۳۲ درجه را در هر تحریک به وجود می‌آورد.

۳- ورقه‌های استیل استفاده شده در هر دو موتور یکسان و از نوع ورقه‌های M12-24G انتخاب شده‌است.

با توجه به مفروضات فوق پارامترهای قطر موتور D ، طول موثر موتور L ، ضخامت هسته^۳ b_{sy} ، ضخامت روتور^۴ b_{ry} و طول فاصله هوایی l_g از روابط (۸) تا (۱۱) قابل محاسبه است. همچنین در رابطه‌ی (۱۲) گشتاور بر حسب پارامترهای طراحی موتور بیان شده‌است [۱۶]، [۱۰].

$$T = \left(\frac{\pi}{2} B_{av.ac}\right) D^2 L \quad (۸)$$

$$w_{sp} = D \times \sin\left(\frac{\beta_s}{2}\right) \quad (۹)$$

$$0.5w_{sp} < b_{sy} < w_{sp} \quad (۱۰)$$

$$0.5w_{sp} < b_{ry} < 0.75w_{sp} \quad (۱۱)$$

$$T_e = \left[\frac{1}{8} k_i \mu_0\right] \left[\frac{N_{ph}^2 DL}{l_g}\right] i^2 \quad (۱۲)$$

که B_{av} چگالی شار میانگین بر حسب تسلا T و به عنوان بارگذاری ویژه‌ی مغناطیسی^۵ شناخته می‌شود، ac بارگذاری ویژه‌ی الکتریکی^۶ و بر حسب متر/آمپرهادی که هر دو با توجه به توان موتور و سرعت مطابق جداول طراحی محاسبه می‌شوند [16]. w_{sp} عرض قطب استاتور^۷ و μ_0 ثابت نفوذپذیری خلا^۸ و N_{ph} تعداد دور سیم پیچی در هر فاز^۹ موتور می‌باشند. جدول (۱) مشخصات کلی موتور پیشنهادی را نشان می‌دهد.

جدول (۱): ابعاد موتور پیشنهادی

Table. (1): Dimension of proposed motor

اندازه	اجزای موتور
۸۲ میلیمتر	قطر خارجی استاتور
۸ میلیمتر	ضخامت یوق
۱۱ میلیمتر	ارتفاع قطب استاتور
۰/۱۷ میلیمتر	فاصله هوایی
۴۰ میلیمتر	عمق موتور ^{۱۰}
۵۴ درجه	کمان استاتور
۱۰۵ درجه	کمان روتور
۱۳/۵ میلیمتر	قطر شافت
۱۱۰ دور	تعداد دور هر کلاف ^{۱۱}

دارای دو قسمت می‌باشد که قسمت A زاویه‌ای برابر با $\theta_{dead-zone} = 90 - \theta_c$ دارد و گشتاور تولیدی آن برابر $T_{e1} | \theta_{dead-zone}$ می‌باشد و قسمت B نیز طبق اصول پایه‌ی موتور به اندازه‌ی θ_c گشتاور مثبت T_{e2} تولید می‌کند.

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \left(\frac{dL_A}{d\theta_{dead-zone}} + \frac{dL_B}{d\theta_c} \right) = T_{e1} + T_{e2} \quad (۱۳)$$

۲-۵- گشتاور پیوسته به وسیله‌ی فاصله هوایی غیر یکنواخت

در این روش با غیریکنواخت کردن فاصله هوایی بین استاتور و روتور به صورت پلکانی اندوکتانس متغیر به وجود می‌آید. این اندوکتانس پلکانی باعث به وجود آمدن گشتاور پیوسته‌ی قابل قبول بین دو فاز خواهد شد، اما به دلیل حساسیت و کوچک بودن اندازه‌ها در فاصله‌ی هوایی و وابستگی شدید گشتاور به فاصله هوایی، مشکلات ساخت و نویز صوتی به وجود می‌آید [۱۳]، [۱۴].

در این مقاله با توجه به روش‌های فوق و معایب آن‌ها ساختار روتور جدید طراحی و بهینه‌سازی شده است که در زیر به آن پرداخته می‌شود.

۳- ساختار موتور پیشنهادی

در این بخش به طراحی مشخصات کلی موتور پیشنهادی به منظور ایجاد گشتاور پیوسته پرداخته شده است.

۳-۱- مشخصات کلی موتور

از آنجا که هر دو موتور برای یک کاربرد طبق استاندارد NEMA24 طراحی و مورد استفاده قرار می‌گیرند، بنابراین به منظور طراحی و مقایسه‌ی موتور پیشنهادی با ساختار جدید با موتور معمول مفروضات زیر بایستی اعمال شود [۱۵]:

- ۱- قطر استاتور، قطر شافت و طول موتور برابر است تا در یک کاربرد و در یک قالب قابل جایگزینی باشند.
- ۲- چگالی شار باید در هر دو موتور مساوی در نظر گرفته شده است و بنابراین ضخامت هسته، تعداد دور سیم‌پیچ و تحریک فازها با هم برابر است.

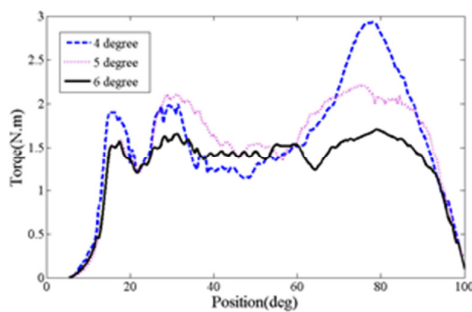
۳-۲- روتور پیشنهادی

مطابق شکل (۴) مشاهده می‌شود که هر فاز موتور سوئیچ رلوکتانس $4/2$ قطب توانایی تولید $\theta_c = 54$ درجه‌ی روتور گشتاور مثبت را دارد و طبق (۷) حداقل زاویه‌ی روتور به منظور تأمین بار در گشتاور مثبت، $90 - \theta_{dead-zone} = 90 - \theta_c$ می‌باشد و لذا باید زاویه‌ی $\theta_{dead-zone} = 90 - \theta_c$ به وسیله ساختار روتور و ایجاد تغییرات مثبت در رلوکتانس موتور جبران شود، بنابراین مطابق شکل (۵) و رابطه‌ی (۱۳) روتور ارائه شده

مطابق شکل (۶) با تغییر در مکان P ریپل و اندازه‌ی گشتاور تغییر می‌کنند، در مختصات‌های نزدیک به مبدا اندازه‌ی گشتاور کمتر و ریپل گشتاور نیز کمتر می‌شود و هرچه مکان Y به قطر خارجی روتور نزدیک شود ریپل و اندازه‌ی گشتاور بیشتر می‌شود بنابراین، بر طبق نمودارهای فوق در موتور پیشنهادی (۳۰ و $۱۳/۵$) به عنوان بهینه ترین مکان ایجاد اندوکتانس متغیر بدست آمده است.

۴-۲- بهینه‌سازی زاویه اندوکتانس متغیر θ

پارامتر بعدی جهت بهینه‌سازی با توجه به شکل (۵) θ_A می‌باشد که از مبدا P شروع و بنابر امکان و سهولت ساخت در بازه‌ی (۳۰ و ۶) قابل تغییر می‌باشد. برای بهینه‌سازی این زاویه در بازه‌ی فوق گام ۱ درجه انتخاب و نمودارهای گشتاور آنها طبق شکل (۷) با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



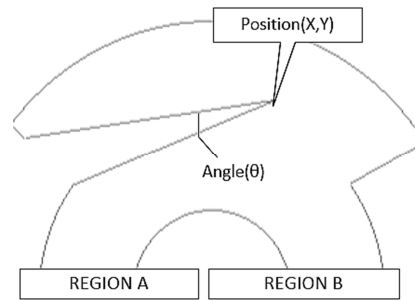
شکل (۷): منحنی گشتاور برحسب تغییرات زاویه‌ی روتور با تغییر در زاویه‌ی تحریک

Fig. (7): Torque-rotor position characteristic for various values of angle θ

هرچه زاویه‌ی شکاف در روتور بیشتر باشد، مقدار تغییرات رلوکتانس دیده شده بوسیله‌ی قسمت B در روتور بیشتر می‌شود و تغییرات اندوکتانس کوچکتر می‌شود و بنابراین گشتاور تولیدی کوچکتر را در ناحیه‌ی B خواهیم داشت. چون گشتاور A مقدار کوچکتری نسبت به B است، در نتیجه با افزایش کمان، اندازه و ریپل گشتاور کاهش پیدا می‌کند بنابراین، همان‌گونه که از بهینه‌سازی انجام شده مشخص است می‌توان گفت بهترین زاویه شکاف هوایی به منظور ریپل گشتاور حداقل با مبدا P برابر ۶ درجه است.

۵- آنالیز اجزای محدود^{۱۱}

به منظور تأیید پیوستگی گشتاور در ساختار جدید و طبق بهینه‌سازی‌های انجام شده، موتور جدید طراحی و به وسیله روش آنالیز اجزای محدود شبیه‌سازی و مشخصه‌های خروجی آن ارائه شده است. شکل (۸) نشان‌دهنده‌ی ساختار و توزیع میدان موتور با بهینه‌سازی‌های قسمت قبل است و با توجه به این شکل و منحنی اشباع ورقه‌های بکار رفته در موتور که در شکل (۹) نشان داده شده است، حداکثر میدان قابل قبول جهت کارکرد موتور زیر ناحیه‌ی اشباع تقریباً ۱/۸ تسلا است که در ساختار پیشنهادی در لبه‌های برش به وجود آمده در حالت همپوشانی کامل اشباع جزئی به وجود آمده که قابل چشم‌پوشی است.



شکل (۵): روتور پیشنهادی
Fig. (5): Proposed rotor

وجود ناحیه‌ی A و غیریکنواخت‌سازی اندوکتانس آن بوسیله‌ی خالی کردن روتور باعث ایجاد $\frac{dL(\theta)}{d(\theta)}$ متغیر می‌شود و در نتیجه گشتاور

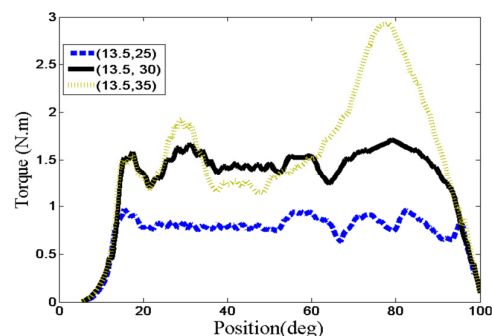
مثبت در این ناحیه بوجود می‌آید، لذا علاوه بر تولید گشتاور در این منطقه، موتور توانایی مشاهده‌ی اندوکتانس متغیر در ناحیه‌ی B را نیز دارد که باعث پیوستگی گشتاور موتور می‌شود.

۴- بهینه‌سازی روتور پیشنهادی

طبق شکل (۵) به منظور بهینه‌سازی شکل روتور در قسمت A ، ایجاد اندوکتانس متغیر بهینه، ریپل گشتاور حداقل و حداکثر هم‌پوشانی، دو پارامتر مختصات مکان ایجاد رلوکتانس متغیر $P(X,Y)$ و زاویه‌ی اندوکتانس متغیر θ_A مورد ارزیابی و بهینه‌سازی قرار می‌گیرند:

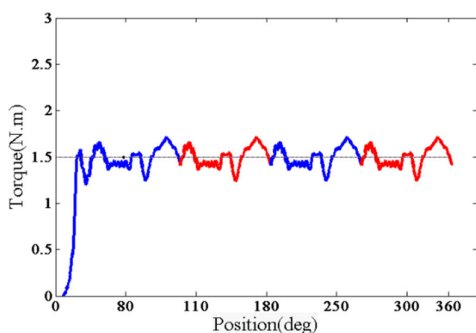
۴-۱- بهینه‌سازی مختصات مکان اندوکتانس متغیر $P(X,Y)$

با توجه به ابعاد موتور و همان‌گونه که در قسمت قبل بیان شد، حداقل کمان ایجاد شده در موتور (REGION A) به منظور تولید گشتاور پیوسته به اندازه‌ی $\theta_{dead-zone}$ است و لذا در مختصات P مقدار X ثابت و برابر ۱۳/۵ در نظر گرفته شده است، اما با توجه به امکان ساخت مکان Y می‌تواند متغیر و در بازه‌ی (۳۵ و ۲۴/۵) تغییر نماید. به منظور یافتن بهترین Y در بازه‌ی فوق نمودارهای گشتاور به ازای گام ۵ میلی‌متر مطابق شکل (۶) با یکدیگر مقایسه می‌شوند.



شکل (۶): منحنی گشتاور برحسب تغییرات زاویه‌ی روتور با تغییر در مختصات P

Fig. (6): Torque-rotor position characteristic for various values of P coordinate



شکل (۱۰-ب): تغییرات گشتاور در یک دور گردش کامل روتور
Fig. (10-b): Torque characteristic in one revolution of rotor

مطابق شکل (۱۰-ب) که گشتاور موتور را طی یک دور گردش کامل روتور نشان می‌دهد گشتاوری حول ۱/۵ نیوتون‌متر تولید شده است که در مقایسه با روش‌های دیگر دارای ریبیل بهتر و در ضمن هم‌پوشانی کامل می‌باشد. در مشخصه‌ی گشتاور وجود دو ناحیه‌ی A و B که از نظر رلوکتانسی با یکدیگر متفاوت‌اند باعث به وجود آمدن شکل موج و ریبیل نامتقارن در موتور شده است. این ریبیل نامتقارن در حد فاصل تغییر فاز حداکثر است و دلیل آن هم تغییرات شدید رلوکتانس می‌باشد. به منظور کاهش این ریبیل در مطالعات آتی می‌توان از مبدل‌های چند سطحی بهره برد تا ضمن حفظ سادگی ساختار موتور ریبیل بین تغییر دو فاز نیز کم و متقارن گردد.

۶- مزایای موتور ارائه شده

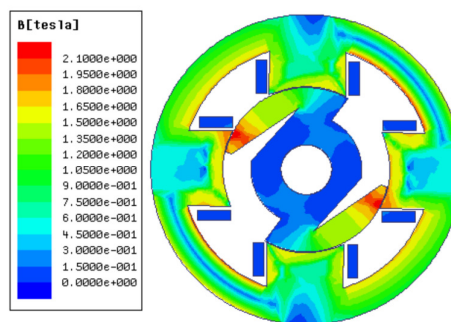
وجود گشتاور پیوسته در موتور باعث کاهش ریبیل موتور در مقایسه با ساختار معمول می‌شود که ریبیل موتور پیشنهادی طبق رابطه‌ی (۱۴) محاسبه می‌شود که در آن T_{max} حداکثر گشتاور و برابر ۱.۷۶ نیوتون‌متر، T_{min} حداقل گشتاور و برابر ۱.۳۹ و T_{avr} گشتاور متوسط و برابر ۱.۵۲ می‌باشد.

$$T_{rip} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avr}} \quad (14)$$

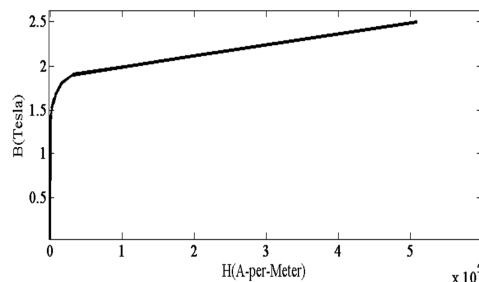
ویژگی دیگر موتور پیشنهادی بر خلاف ساختارهایی که به وسیله‌ی تحریک همزمان دو فاز در ناحیه‌ی مرده گشتاور پیوسته تولید می‌کنند، وجود دو فاز تحریک جدا از نظر الکتریکی است که باعث به وجود آمدن ویژگی‌هایی از قبیل پایداری بیشتر هنگام بروز خطا، عدم توقف موتور در هنگام قطع یک فاز و توانایی استفاده از یک منبع تحریک برای هر دو فاز می‌باشد که این ویژگی‌ها کاربرد موتورهای فوق را در صنایع اتومبیل سازی به عنوان محرک سرعت بالا افزایش می‌دهد.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله با توجه به ویژگی‌های استفاده از موتور سوئیچ رلوکتانس در سرعت‌های بالا و هزینه‌ی پایین، موتور سوئیچ رلوکتانس با ساختار جدید روتور ارائه شد. مطابق مدل شبیه‌سازی شده، ساختار جدید روتور باعث ایجاد اندوکتانس متغیر در فاصله‌ی موسوم به ناحیه‌ی مرده شد که باعث

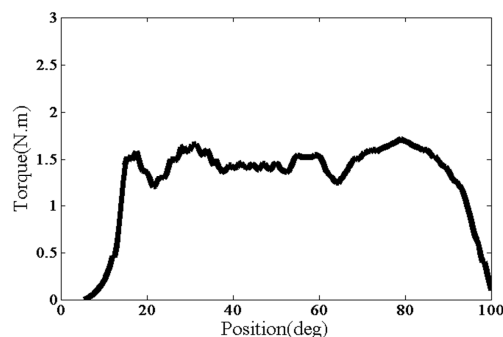


شکل (۸): توزیع میدان موتور پیشنهادی
Fig. (8): Flux distribution of proposed motor



شکل (۹): منحنی اشباع ورقه‌ی M12-24G
Fig. (9): B-H curve of M12-24G

شکل (۱۰-الف) مشخصه‌ی گشتاور برحسب مکان این موتور تحت تحریک یک فاز است، همان‌گونه که مشاهده می‌شود گشتاور مثبت تولیدی تا حدود ۱۱۰ درجه‌ی مکانیکی افزایش یافته و حدود ۱۰ درجه هم با فاز بعدی هم‌پوشانی دارد. برای به دست آوردن مشخصه‌ی کلی موتور تحریک هر دو فاز به صورت متناوب انجام می‌گیرد و شکل موج گشتاور برحسب زمان آن در شکل (۹) نشان داده شده است. در حالت کلی موتور قابلیت بارگذاری تا ۱/۵ نیوتون‌متر را تحت هر زاویه و هر زمان را دارا می‌باشد که این امر در موتور معمول قابل حصول نمی‌باشد.



شکل (۱۰-الف): مشخصه‌ی گشتاور خروجی با تحریک یک فاز در موتور پیشنهادی
Fig. (10-a): Torque characteristic in one phase excitation of proposed motor

ایجاد گشتاور مثبت، پیوستگی و هم‌پوشانی بین گشتاورهای دو فاز موتور گردید. به کمک آنالیز اجزای محدود در نرم‌افزار Maxwell، نحوه‌ی ایجاد این اندوکتانس متغیر برای زوایا و مکان‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نقطه‌ی $P = (۱۳/۵ و ۳۰)$ تحت زاویه‌ی ۶ درجه انتخاب شد که حاصل این تغییر ایجاد گشتاور مثبت پیوسته موتور بدون افت زیاد گشتاور تحت تمامی زوایای روتور می‌باشد. بنابراین، موتور پیشنهادی علاوه بر سادگی و هزینه پایین توانایی تأمین گشتاور نامی را به طور پیوسته دارد.

- پی نوشت
1. Dead zone region
 2. Duty cycle
 3. Stator back iron
 4. Rotor back iron
 5. Specific magnetic loading
 6. Specific electrical loading
 7. Stator pole width
 8. Permeability
 9. Turn per phase
 10. Stack length
 11. Turn per pole
 12. Finite Element Method(FEM)

References

- [1] I. Petrov, J. Pyrhonen, "Performance of low-cost permanent magnet material in PM synchronous machines", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 6, pp. 2131-2139, June 2013.
- [2] F.J.T.E. Ferreira, G. Baoming, A.T.D. Almeida, "Reliability and operation of high-efficiency induction motors", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 52, No. 6, pp. 4628-4637, Nov./Dec. 2016.
- [3] J. Hur, J.W. Reu, B.W. Kim, G.H. Kang, "Vibration reduction of IPM-Type BLDC motor using negative third harmonic elimination method of air-gap flux density", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 47, No. 3, pp. 1300-1309, May/June 2011.
- [4] S. Marinkov, B.D. Jager, "Four-quadrant control of 4/2 switch reluctance machines", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 63, No. 12, pp. 7393-7403, Dec. 2016.
- [5] J.W. Ahan, H.M. Khoi, D.H. Lee, "Design and analysis of high speed 4/2 SRM for an air-blower", Proceeding IEEE/ISIE, pp. 1242-1246, Bari, Italy, July 2010.
- [6] C. Lee, R. Krishnan, "New designs of a two phase E-core switched reluctance machine by optimization the magnetic structure for a specific application: concept, design, and analysis", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 45, No. 5, pp. 1804-1814, Sep./Oct. 2009.
- [7] P.C. Sen, "Principle of electric machines and power electronics", Wiley, Third Edition, 2013.
- [8] N.S. Lobo, E. Swint, R. Krishnan, "M-phase N-segment flux-reversal free stator switched reluctance machines", Proceeding of the IEEE/IAS, pp.1-8, Edmonton, AB, Canada, Oct. 2008.
- [9] S. Prabhu, M. Balai, V. Kamaraj, "Analysis of two phase switched reluctance motor with flux reversal free stator", Proceeding of the IEEE/PEDS, pp. 320-325, Sydney, NSW, Australia, June 2015.
- [10] R. Krishnan, "Switched reluctance motor drives", Boca Raton, FL: CRC Press, 2003.
- [11] P. Bogu, M. Korkosz, A. Powrozek, J. Prokop, "A two phase switched reluctance motor with reduced stator pole arc", Proceeding of the IEEE/EDPE, pp. 312-318, Tatranska Lomnica, Slovakia, Sep. 2015.
- [12] R. Hamdy, J. Fletcher, B.W. Williams, "Bidirectional starting of a symmetrical two phase switch reluctance machine", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 15, No. 2, pp. 211-217, June 2000.
- [13] P.T. Hieu, D.H. Lee, J.W. Ahn, "Design of 2-phase 4/2 SRM for torque ripple reduction", Proceeding of the IEEE/ICEMS, pp. 1-6, Sapporo, Japan, Oct. 2012.
- [14] S.G. Oh, R. Krishnan, "Two phase SRM with flux reversal free stator: concept, design and experimental verification", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 43, No. 5, pp. 1247-1257, Sep./Oct. 2007.
- [15] C. Lee, R. Krishnan, N.S. Lobo, "Novel tow-phase switch reluctance machine using common-pole E-core structure: concept, analysis and experimental verification", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 45, No. 2, pp. 221-226, March/April 2009.
- [16] E.S. Hamdi, "Design of small electrical machines", Wiley, First Edition, 1995.

