کاهش نوسانات گشتاور و تلفات اهمی در موتور سوئیچ رلوکتانس با در نظر گرفتن اثر اشباع مغناطیسی

میلاد دولتشاهی[۱]، دانشجوی دکتری، سیدمرتضی سقائیان نژاد[۲]، استاد، Jin Woo Ahn [۳]، استاد، مهدی معلم[۴]، استاد
۱، ۲ و ۴- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران
dolatshahi@ec.iut.ac.ir[۱]، saghaian@cc.iut.ac.ir[۲]، moallem@cc.iut.ac.ir[۴]
۳- دانشکده مهندسی مکاترونیک- دانشگاه کیونگ سونگ - بوسان –کره جنوبی– jwahn@ks.ac.kr

چکیده: تولید گشتاور گسسته و اشباع شدید مغناطیسی در موتور سوئیچ رلوکتانس سبب کاهش گستره کاربردهای صنعتی و افزایش نوسانات نامطلوب در گشتاور این موتور شده است. در این مقاله روشی برای تعیین شکل موج جریان فازهای مجاور در بازه کموتاسیون بین فازها با در نظر گرفتن اثر اشباع مغناطیسی هسته پیشنهاد شده که تضمین کننده کم‌ترین میزان تلفات اهمی ماشین است. در این روش مسیرهای گشتاور ثابت برای هر موقعیت روتور در صفحه مختصات جریان فازهای وارد و خارج شونده در کموتاسیون ترسیم شده و نقاط برخورد آن‌ها با منحنی دایره‌ای تلفات اهمی با کم‌ترین شعاع، انتخاب می‌شوند. بر این اساس، مسیر حاصل شده از نقاط مماس مذکور تضمین کننده تلفات کموتاسیون بهینه و کاهش نوسانات گشتاور خواهد بود. به منظور پیاده‌سازی روش ارائه شده، از نتایج حاصل شده توسط آزمایش‌های عملی منحنی‌های گشتاور و شار بر حسب جریان فاز و موقعیت روتور استخراج شده و در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در نهایت برای سرعت‌های بالا یک الگوریتم اصلاحی بر اساس قوانین منطقی ساده معرفی شده تا محدوده سرعت عملکرد بدون نوسانات گشتاور افزایش یابد. نتایج مطالعات بر روی موتور چهارفاز ۴ کیلووات نشان‌دهنده اعتبار روش ارائه شده خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: موتور سوئیچ رلوکتانس، کاهش نوسانات گشتاور، تلفات اهمی، اشباع مغناطیسی

Copper Loss and Torque Ripple Reduction in Switched Reluctance Motor Considering Magnetic Saturation Effects

M. Dolatshahi[1], S. M. Saghaian Nezhad[2], J. Woo. Ahn[3], M. Moallem[4]
1, 2&4- Faculty of Electrical and Computer Engineering- Isfahan Technology University- Isfahan- Iran
3- Faculty of Mechatronic- Qiung San University- Poosan- South Korea

Abstract: Discrete torque generation mechanism and inherently nonlinear magnetic characterization of switched reluctance motors lead to unacceptable torque ripple and reduce the variety of applications in industry. In this paper, a phase current profiling technique and torque sharing function are proposed considering magnetic saturation effects as well as minimizing power loss during the commutation area between the adjacent phases. Constant torque trajectories are considered in incoming and outgoing phase currents plane based on nonlinear *T-i-theta* curves which are obtained from experimental measurements. Optimum points on constant torque trajectories are selected based on improving drive efficiency and minimizing copper loss in each rotor position. In order to implement the proposed method, experimental measurements were undertaken to obtain the motor operational characterizations. A modification scheme based on logical rules will be introduced to enhance maximum speed with torque free operation. Experimental and simulation results on four phase, 4Kw 8/6 SRM, validate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Switched Reluctance Motor, Torque Ripple Reduction, Copper Loss, Magnetic Saturation.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۷/۹
تاریخ اصلاح مقاله: ۹۲/۱۰/۱۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۲

نام نویسنده‌ی مسئول : میلاد دولتشاهی
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران–اصفهان– بلوار دانشگاه صنعتی اصفهان– دانشگاه صنعتی اصفهان – دانشکده- مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

ماشین‌های الکتریکی ابزاری جهت تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی و بالعکس هستند. موتور سوئیچ رلوکتانس یکی از قدیمی‌ترین موتورهای الکتریکی است که قدمت آن به بیش از ۱۵۰ سال پیش می‌رسد. نام‌گذاری این ماشین بر اساس عملکرد فیزیکی آن و بر مبنای سوئیچ‌شدن رلوکتانس‌های متغیر است. به عبارت دیگر از دید مدار معادل مغناطیسی ماشین سوئیچ رلوکتانس یک مدار مغناطیسی غیرخطی و متغیر با مکان (زمان) و جریان است. ساختار این ماشین بسیار قابل اطمینان، مقاوم و متشکل از استاتور و روتور قطب برجسته است[۱]. عملکرد پیوسته این ماشین بر سوئیچ‌شدن مدارات مغناطیسی پی‌درپی استوار است. کاربرد این موتور در صنعت با وجود قدمت آن بسیار محدود بوده و عملکرد غیرخطی و عدم وجود مدل‌های دقیق تحلیلی برای آن از جمله موانع گسترش کاربردهای این موتور می‌باشد. نوسانات گسسته گشتاور تولیدی در این موتور و بهره‌برداری در ناحیه اشباع مغناطیسی سبب شده تا ارتعاشات مکانیکی و صوتی در مقایسه با اکثر موتورهای الکتریکی قابل ملاحظه باشد[۲]. به منظور کاهش نوسانات گشتاور تحقیقات بسیاری در دهه‌های اخیر صورت گرفته [۲۱-۳] که طیف وسیعی از طراحی ماشین و تحلیل میدان‌های الکترومغناطیسی [۳ و ۴] تا استفاده از روش‌های کنترلی و مبدل‌های پیشنهادی مختلف را شامل می‌شود. استفاده از روش‌های کنترلی و الگوریتم‌های مختلف سوئیچ‌زنی به دلیل امکان استفاده در موتورهای موجود و متداول از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از این روش‌ها موسوم به تابع اشتراکی گشتاور بوده (Torque Sharing Functions) که در آن گشتاور مرجع هر فاز به گونه‌ای در بازه کموتاسیون بین دو فاز مجاور تعیین می‌شود تا گشتاور برآیند کل موتور پیوسته ثابت باقی بماند. کنترل مستقیم لحظه‌ای گشتاور (Direct Instanteneous Torque Control) نیز یکی دیگر از روش‌های مورد استفاده در کنترل و کاهش نوسانات گشتاور است. عیب عمده این روش قوانین کنترلی پیچیده و نیاز به تقسیم‌بندی نواحی هدایت هر فاز به زیر نواحی‌ها و دشواری در پیاده‌سازی عملی آن است. برخی از توابع اشتراکی گشتاور متداول مانند توابع خطی، کسینوسی، مکعبی و نمایی در مراجع معرفی و مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. علاوه بر کاهش نوسانات گشتاور توابع هدف دیگری نیز می‌تواند مبنای مقایسه بین توابع اشتراکی گشتاور باشد. برخی از موارد مهم، کاهش تلفات اهمی در بازه کموتاسیون و یا کاهش پیک یا مقدار موثر جریان هر فاز و کاهش ولتاژ مورد نیاز فاز می‌تواند باشد. این در حالی است که برخی از توابع هدف اشاره شده در فوق می‌توانند در تضاد با یکدیگر باشند. به عنوان نمونه کاهش تلفات اهمی افزایش سرعت کموتاسیون را نتیجه می‌دهد که برای تحقق آن نیاز به ولتاژ فاز بزرگ‌تری است. در مرجع [۹] خانواده‌ای از توابع اشتراکی گشتاور معرفی شده که بسته به اهمیت تابع هدف کاهش تلفات و یا عملکرد در سرعت‌های بالا یکی از توابع اشتراکی گشتاور مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مرجع محدودیت در نظر گرفته‌شده مدل خطی ماشین سوئیچ رلوکتانس است. به عبارت دیگر روش ارائه شده در موتورهای صنعتی که عمدتاً در شرایط گشتاور نزدیک به نامی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند کارایی با راندمان مناسبی نخواهد داشت، زیرا موتور سوئیچ رلوکتانس برخلاف موتورهای القایی تحت شرایطی دارای راندمان بالا است که سیکل مغناطیسی آن وارد ناحیه اشباع شود. در [۶] توابع اشتراکی گشتاور متعادل شده حول زاویه θ_c^i معرفی شده که در آن زاویه θ_c^i مکانی است که گشتاور تولیدی در فازهای مجاور به ازای جریان‌های یکسان با یکدیگر برابر هستند. در مراجع [۱۱ و ۱۲] تغییر از θ_c^i به سمت θ_c^λ با افزایش سرعت موتور به‌عنوان روشی جهت بهبود عملکرد تابع اشتراکی گشتاور در سرعت‌های بالا معرفی شده است. کنترل زاویه روشنی و خاموشی هدایت هر فاز یکی دیگر از روش‌های کاهش نوسانات گشتاور است [۱۳]. در مرجع [۱۴] از یک رابطه تحلیلی با در نظر گرفتن عدم وابستگی اندوکتانس هر فاز در حوالی موقعیت عدم هم‌محوری به جریان فاز استفاده شده و زاویه روشنی مناسب برحسب ولتاژ فاز و سرعت مورد نظر محاسبه می‌شود. در مرجع [۸] از یک تابع اشتراکی گشتاور منطقی به‌گونه‌ای استفاده شده که گشتاور تولیدی فاز خارج شونده در بازه کموتاسیون به‌سرعت به سمت صفر هدایت شده و در عوض گشتاور کل موتور توسط فاز وارد شونده تامین می‌شود. عیب عمده این روش پیک شدید جریان در فاز وارد شونده به دلیل عدم پتانسیل تولید گشتاور در این ناحیه (حوالی موقعیت عدم هم‌محوری) و هم‌چنین اعمال ولتاژ بزرگ به‌منظور تامین گشتاور موتور است. بدیهی است که در این حالت راندمان موتور به دلیل افزایش تلفات مسی کاهش می‌یابد.

در این مقاله، مسیرهای گشتاور ثابت در صفحه مختصات جریان فازهای وارد و خارج شونده با در نظر گرفتن مدل غیرخطی ماشین در نظر گرفته شده و سپس نقاط بهینه از نظر توان تلفاتی موتور بر روی این مسیرها تعیین می‌شوند. با در نظر گرفتن این نقاط به‌عنوان جریان‌های مرجع فازهای وارد و خارج شونده تابع اشتراکی گشتاور بهینه حاصل خواهد شد. سپس به‌منظور تسهیل پیاده‌سازی شبیه-سازی و عملی روش پیشنهادی، تابع جریان مرجع بر اساس گشتاور مورد نظر و موقعیت روتور استخراج خواهد شد. در نهایت یک روش اصلاحی برای افزایش قابلیت استفاده از تابع اشتراکی گشتاور پیشنهادی در سرعت‌های بالا معرفی شده و نتایج شبیه‌سازی‌ها به‌منظور بررسی صحت عملکرد آن آورده شده است.

۲- تولید گشتاور در موتور سوئیچ رلوکتانس

ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس متداول از استاتور و روتور قطب برجسته و بدون سیم‌بندی یا آهن‌ربای مغناطیس دائم در روتور شکل گرفته‌اند. بر این اساس سیم‌بندی قطب‌های استاتور از نوع متمرکز بوده و تشکیل گشتاور بر مبنای کاهش رلوکتانس فاصله هوایی مابین

قطب‌های استاتور و روتور می‌باشد. در این موتور تبدیل انرژی از انرژی ذخیره‌شده مغناطیسی به انرژی مکانیکی رابطه تنگاتنگی با جریان اعمالی به فاز سیم‌پیچ فاز استاتور و موقعیت روتور دارد. در صورتی که قطب‌های روتور و استاتور رو به روی یکدیگر باشند موقعیت روتور را هم‌محوری کامل و در صورت وجود بیشینه فاصله هوایی بین آن‌ها موقعیت روتور عدم هم‌محوری کامل ذکر می‌شود. میزان گشتاور تولیدی هر فاز برحسب موقعیت روتور θ و جریان فاز i_k به‌طور کلی از رابطه زیر قابل حصول است:

$$T_{e,k} = \frac{\partial \int \lambda_k(i_k,\theta) di_k}{\partial \theta} \qquad k = 1,2,\ldots,m \tag{۱}$$

که در آن m تعداد فازهای موتور مورد نظر می‌باشد. به دلیل ساختار به‌شدت اشباع شونده مغناطیسی هسته، در این نوع موتور امکان بیان رابطه‌ای ساده بین شار پیوندی هسته و جریان فاز مطابق با آن چه در بقیه انواع ماشین‌های جریان متناوب وجود دارد نیست. در مرجع [۱۶] رابطه (۲) برای بیان مدل‌سازی ارتباط شار با جریان و موقعیت روتور معرفی شده است:

$$\lambda_k(i_k,\theta) = \lambda_s\left(1 - e^{-i_k \cdot f_k(\theta)}\right) \tag{۲}$$

که در رابطه فوق مقدار λ_s بیشینه شار پیوندی تولیدی هر فاز در موقعیت هم‌محوری کامل و $f_k(\theta)$ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$f_k(\theta) = a_0 + a_1 \cos(N_r(\theta - 2\pi(k-1)/N_s)) + \ldots \\ \ldots + a_n \cos(n.N_r(\theta - 2\pi(k-1)/N_s)) \tag{۳}$$

در رابطه فوق N_r و N_s به ترتیب تعداد قطب‌های روتور و استاتور هستند. با در نظر گرفتن روابط (۲) و (۳) و انتگرال‌گیری از رابطه (۱) گشتاور تولیدی در هر فاز از رابطه غیرخطی زیر حاصل می‌شود:

$$T_{e,k}(i_k,\theta) = \frac{\lambda_s}{f_k^2(\theta)} \cdot \frac{\partial f_k(\theta)}{\partial \theta}\left[1 - (1 + i_k f_k(\theta)) e^{-i_k \cdot f_k(\theta)}\right] \tag{۴}$$

همان گونه که از رابطه (۴) مشاهده می‌شود در نظر گرفتن مدل اشباع مغناطیسی هسته منجر به رابطه‌ای پیچیده برای محاسبه گشتاور تولیدی هر فاز خواهد شد. از این رو در بسیاری از مراجع از رابطه (۵) به‌عنوان شار پیوندی تولیدی هر فاز استفاده شده که به مدل خطی مغناطیسی هسته مرسوم است.

$$\lambda_k(i_k,\theta) = L_k(\theta) i_k \tag{۵}$$

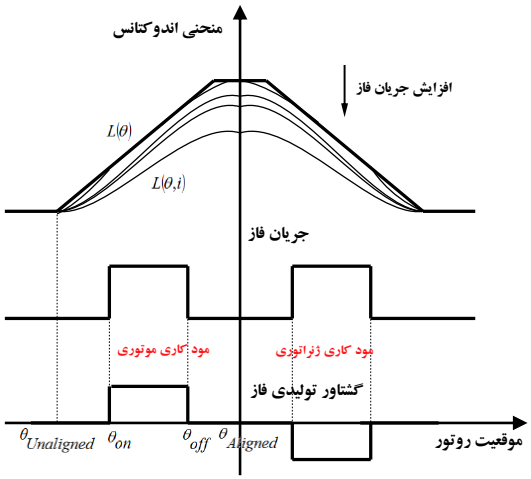
با در نظر گرفتن رابطه فوق گشتاور رلوکتانسی برای هر فاز ماشین به‌صورت زیر به دست می‌آید.

$$T_{e,k}(i_k,\theta) = \frac{1}{2} \frac{\partial L_k(\theta)}{\partial \theta} . i_k^2 \tag{۶}$$

معادله ولتاژ هر فاز به‌صورت کلی در رابطه (۷) آورده شده است.

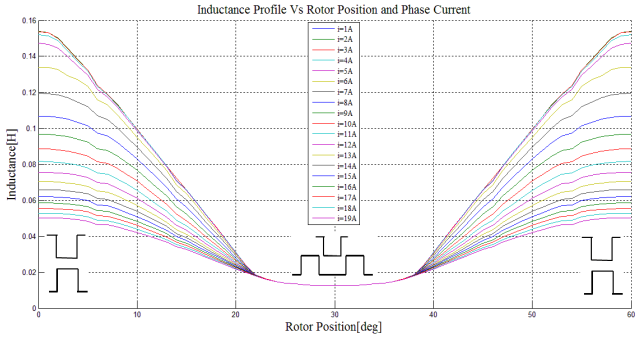
$$U_k = R.i_k + \frac{d\lambda_k(i_k,\theta)}{dt} \tag{۷}$$

بر اساس رابطه (۶) گشتاور تولیدی در هر فاز زمانی مثبت است که شیب منحنی اندوکتانس مثبت و در شیب منفی اندوکتانس گشتاور تولیدی منفی خواهد بود. شکل (۱) اصول عملکرد ماشین سوئیچ رلوکتانس را در نواحی کار مختلف نمایش می‌دهد.



شکل (۱): اصول تولید گشتاور در هر فاز ماشین سوئیچ رلوکتانس

در شکل فوق ملاحظه می‌شود که در مدل غیرخطی اندوکتانس با افزایش جریان دامنه اندوکتانس هر فاز کاهش یافته ولی در مدل خطی اندوکتانس تنها تابع موقعیت روتور خواهد بود. عدم در نظر گرفتن مدل اشباع مغناطیسی موجب پیدایش خطا در محاسبه گشتاور تولیدی هر فاز خواهد شد. شکل (۲) منحنی اندوکتانس اندازه‌گیری شده فاز یک موتور چهارفاز ۴ کیلووات را نمایش می‌دهد. اطلاعات نامی ماشین مورد نظر در پیوست (۱) آمده است.



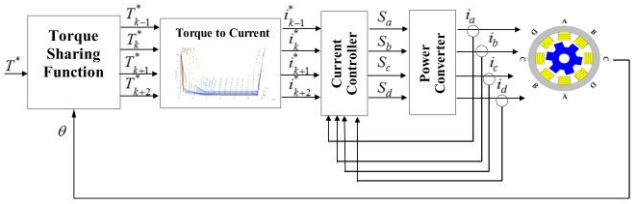
شکل (۲): منحنی اندوکتانس اندازه‌گیری شده برای ماشین نمونه از موقعیت عدم هم‌محوری تا هم‌محوری کامل

در مود کاری موتوری جریان در هر فاز از حوالی موقعیت عدم هم‌محوری و در جایی که شیب اندوکتانس مثبت است شروع به هدایت کرده و قبل از هم‌محور شدن قطب‌های استاتور و روتور به مقدار صفر کاهش می‌یابد. همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است زمانی که قطب‌های استاتور و روتور بیشینه فاصله هوایی را از یکدیگر داشته باشند اندوکتانس کم‌ترین مقدار و در موقعیت هم محوری، اندوکتانس بیش‌ترین مقدار را خواهد داشت. در حوالی

موقعیت‌های هم‌محوری و عدم هم‌محوری شیب اندوکتانس ناچیز بوده و در نتیجه پتانسیل تولید گشتاور در آن کم می‌باشد. به عبارت دیگر، اعمال ولتاژ در نزدیکی موقعیت عدم هم‌محوری به دلیل کم بودن مقدار اندوکتانس فاز منجر به افزایش شدید جریان و تلفات اهمی خواهد شد در حالی که تولید گشتاور چندانی نیز در این نواحی در پی نخواهد داشت.

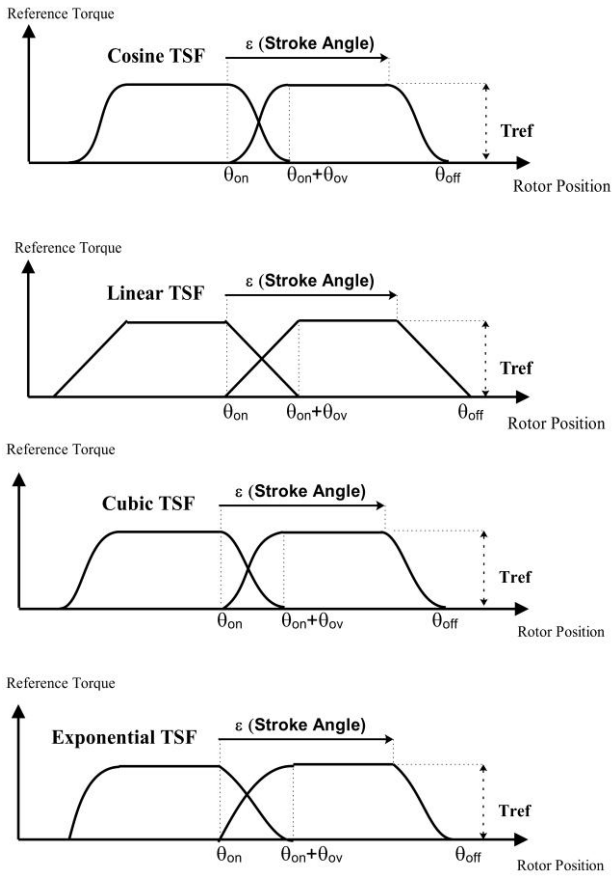
۳- توابع اشتراکی گشتاور (TSFs)

یکی از روش‌های مورد توجه و نوین در کنترل گشتاور و کاهش نوسانات ناشی از کموتاسیون فازها روشی موسوم به تابع تبادلی گشتاور (TSF) است. در این روش گشتاور مرجع به توابع گشتاور مرجع متناسب با هر یک از فازها تجزیه شده به‌طوری که مجموع گشتاورهای مرجع هر فاز برابر با گشتاور مورد نظر ثابت باقی بماند. بر این اساس جریان مرجع برای حلقه کنترل جریان در هر فاز تعیین می‌گردد. شکل زیر بلوک دیاگرام کلی کنترل گشتاور موتور سوئیچ رلوکتانس را توسط توابع اشتراکی گشتاور نمایش می‌دهد:



شکل (۳): نمایش بلوکی کنترل گشتاور توسط توابع اشتراکی گشتاور

در مراجع از توابع گوناگون به‌منظور استخراج گشتاور مرجع برای فازهای وارد شونده و خارج شونده استفاده شده است. اصطلاح وارد شونده به فازی گفته می‌شود که در حال تحریک شدن است و خارج شونده متناظر با فازی است که از مدار خارج شده و بی‌برق می‌گردد. در این روش، هدایت جریان در هر فاز به دو ناحیه هدایت تک‌فاز و ناحیه کموتاسیون فازهای مجاور تقسیم‌بندی می‌شود. در مرجع [۵] از یک تابع نمایی معرفی شده به‌منظور بیان گشتاور مرجع فاز وارد شونده در بازه کموتاسیون استفاده شده است. در این مرجع منحنی مغناطیسی موتور به‌صورت خطی تقریب زده شده و عملکرد موتور تنها در سرعت ثابت بررسی شده است. در مرجع [۱۸] از تابع اشتراکی خطی در مقایسه با حالت نمایی استفاده شده است. در این مرجع نشان داده شده که استفاده از تابع اشتراکی خطی منجر به کاهش پیک جریان فاز شده اما زاویه هم‌پوشانی بین فازها را افزایش می‌دهد. این امر منجر به افزایش تلفات اهمی ناشی از کموتاسیون بین فازها خواهد شد. مرجع [۱۹] تابع اشتراکی سینوسی را معرفی کرده که کارآیی آن نسبت به خطی در کاهش نوسانات گشتاور بالاتر است. شکل زیر توابع اشتراکی متداول گشتاور را نمایش می‌دهد.



شکل (۴): توابع اشتراکی گشتاور متداول کسینوسی، خطی، مکعبی و نمایی به ترتیب از بالا به پایین

گشتاورهای مرجع فازها برای توابع اشتراکی گشتاور متداول نمایش داده شده در شکل (۴) از روابط زیر حاصل می‌شوند [۲۱]:

$$T_{Ph}^{*} = T_{ref} \cdot f_{Linear}$$
$$f_{Linear} = \begin{cases} \dfrac{(\theta-\theta_{on})}{\theta_{ov}} & \theta_{on} \le \theta \le \theta_{on}+\theta_{ov} \\ 1 & \theta_{on}+\theta_{ov} \le \theta \le \theta_{off}-\theta_{ov} \\ \dfrac{(\theta_{off}-\theta)}{\theta_{ov}} & \theta_{off}-\theta_{ov} \le \theta \le \theta_{off} \end{cases} \quad (۸)$$

$$T_{Ph}^{*} = T_{ref} \cdot f_{Cosine}$$
$$f_{Cosine} = \begin{cases} Sin^2\left(\dfrac{\pi}{2}\left(\dfrac{\theta-\theta_{on}}{\theta_{ov}}\right)\right) & \theta_{on} \le \theta \le \theta_{on}+\theta_{ov} \\ 1 & \theta_{on}+\theta_{ov} \le \theta \le \theta_{off}-\theta_{ov} \\ Sin^2\left(\dfrac{(\theta_{off}-\theta)}{\theta_{ov}}\right) & \theta_{off}-\theta_{ov} \le \theta \le \theta_{off} \end{cases} \quad (۹)$$

$$T_{Ph}^{*} = T_{ref} \cdot f_{Cubic}$$
$$f_{Cubic} = \begin{cases} \dfrac{3}{\theta_{ov}^2}(\theta-\theta_{on})^2 - \dfrac{2}{\theta_{ov}^3}(\theta-\theta_{on})^3 & \theta_{on} \le \theta \le \theta_{on}+\theta_{ov} \\ 1 & \theta_{on}+\theta_{ov} \le \theta \le \theta_{off}-\theta_{ov} \\ 1-\dfrac{3}{\theta_{ov}^2}(\theta-\theta_{off}+\theta_{ov})^2 - \dfrac{2}{\theta_{ov}^3}(\theta-\theta_{off}+\theta_{ov})^3 & \theta_{off}-\theta_{ov} \le \theta \le \theta_{off} \end{cases} \quad (۱۰)$$

$$T_{Ph}^{*} = T_{ref} \cdot f_{Expon}$$

$$f_{Expon} = \begin{cases} 1 - Exp\left(-\dfrac{(\theta-\theta_{on})^2}{\theta_{ov}}\right) & \theta_{on} \le \theta \le \theta_{on}+\theta_{ov} \\ 1 & \theta_{on}+\theta_{ov} \le \theta \le \theta_{off}-\theta_{ov} \\ Exp\left(-\dfrac{(\theta_{off}-\theta_{ov}-\theta)^2}{\theta_{ov}}\right) & \theta_{off}-\theta_{ov} \le \theta \le \theta_{off} \end{cases} \quad (۱۱)$$

که در روابط فوق θ_{on} و θ_{ov} و θ_{off} به ترتیب زوایای روشنی، هم‌پوشانی بین فازهای مجاور و زاویه خاموشی هدایت هر فاز می‌باشند. به‌منظور مقایسه کمی عملکرد هر یک از روش‌های کنترل گشتاور شاخص ضریب نوسانات گشتاور به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$T.R\% = \frac{T_{Max} - T_{Min}}{T_{ave}} * 100 \quad (۱۲)$$

افزایش نسبت گشتاور تولیدی به جریان هر فاز و کاهش تلفات ناشی از کموتاسیون بین فازها و هم‌چنین قابلیت عملکرد مطلوب در کاهش نوسانات گشتاور در محدوده سرعت‌های متوسط و بالا از جمله اهدافی هستند که در طراحی توابع اشتراکی گشتاور و هم‌چنین مقایسه بین آن‌ها حائز اهمیت می‌باشد. در این میان انتخاب زوایای روشنی و خاموشی بهینه نقش اساسی در بهبود راندمان موتور خواهد داشت. به عبارت دیگر، در صورتی که هدف کنترل نوسانات گشتاور در شرایط بار نامی و سرعت پایه موتور باشد زوایای روشنی و خاموشی باید به‌گونه‌ای تغییر کنند تا فرصت لازم برای کموتاسیون بین فازها با توجه به افزایش منبع جریان داخلی موتور با سرعت و ثابت بودن ولتاژ تحریک فاز وجود داشته باشد. در مرجع [۸] یک تابع اشتراکی گشتاور منطقی پیشنهاد شده که در آن با در نظر گرفتن مدل خطی مغناطیسی برای موتور گشتاور فاز خارج شونده سریعاً به سمت صفر کنترل شده و گشتاور باقیمانده توسط فاز وارد شونده طوری تنظیم می‌شود تا گشتاور برآیند موتور برابر با گشتاور بار ثابت باقی بماند. در این روش در سرعت‌های پایین به دلیل کم بودن دامنه نیروی ضدمحرکه در هر فاز دامنه جریان می‌تواند به‌شدت افزایش یافته و در نزدیکی موقعیت عدم هم‌محوری به دلیل ناچیز بودن پتانسیل تولید گشتاور راندمان موتور به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. در این مقاله، ضمن استفاده از مدل غیرخطی و اشباع شونده مغناطیسی برای هسته، کنترل بر روی جریان فاز به‌گونه‌ای اعمال می‌شود تا تلفات اهمی در بازه کموتاسیون به حداقل ممکن کاهش یابد. این امر موجب افزایش راندمان موتور به‌خصوص در سرعت‌های پایین به دلیل نقش موثرتر تلفات اهمی نسبت به تلفات هسته در سرعت‌های بالا خواهد شد.

۴- تابع اشتراکی گشتاور بهینه پیشنهادی

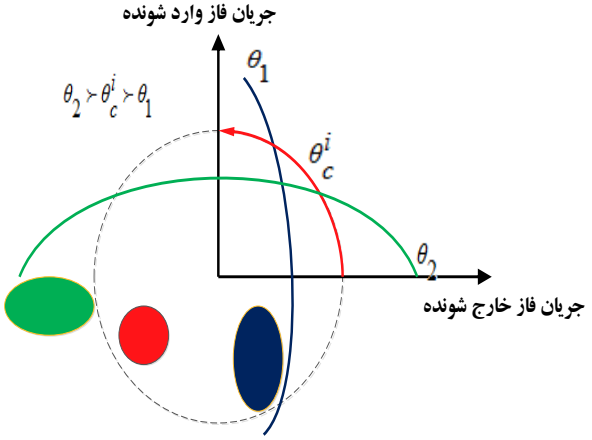
در بخش قبل برخی از توابع اشتراکی گشتاور مبتنی بر توابع تحلیلی خاص بیان شد که در هر یک از مراجع مربوطه نحوه انتخاب زوایای روشنی و خاموشی و روش‌های اصلاحی برای بهبود عملکرد در سرعت‌های بالا مورد توجه قرار گرفته است. اما دسته‌ای دیگر از توابع اشتراکی گشتاور مبتنی بر پارامترهای ساختاری ماشین بوده و برای اهداف بهینه‌سازی خاص مورد توجه قرار می‌گیرند. به بیان دیگر، گشتاورهای مرجع فازهای وارد و خارج شونده بر اساس حل تحلیلی مسئله بهینه‌سازی با تابع هدف کمینه کردن تلفات مسی، کاهش پیک جریان فاز، افزایش حداکثر سرعت با عملکرد بدون ریپل گشتاور یا مجموعه‌ای از اهداف بهینه‌سازی اشاره شده طراحی می‌شوند. در این راستا در نظر گرفتن مدل ماشین به‌صورت خطی یا اشباع شونده و یا در نظر گرفتن ناحیه گشتاور منفی و امکان پیاده‌سازی عملی از جمله پارامترهای موثر بر کارآیی هر یک از روش‌های ارائه شده در مراجع خواهد بود. به‌منظور بیان مفهوم روش پیشنهادی در ابتدا فرض کنید که گشتاور تولیدی در هر فاز از مدل خطی اندوکتانس حاصل شده و بر طبق معادله (۶) به‌دست آید. در این صورت باید گشتاور برآیند ناشی از فازهای وارد شونده و خارج شونده با گشتاور مرجع برابر باشد [۸].

$$T_{ref} = \frac{I_k^2}{a_k(\theta)} + \frac{I_{k+1}^2}{b_k(\theta)} \quad (۱۳)$$

در رابطه فوق $a_k(\theta)$ و $b_k(\theta)$ از رابطه زیر حاصل می‌شوند:

$$a_k(\theta) = 2\frac{\partial\theta}{\partial L_k(\theta)}$$
$$b_k(\theta) = 2\frac{\partial\theta}{\partial L_{k+1}(\theta)} \quad (۱۴)$$

رابطه (۱۳) نشان‌دهنده معادله یک بیضی به ازای هر زاویه روتور می‌باشد. به عبارت دیگر به ازای هر زاویه روتور در بازه هدایت هر فاز مسیر گشتاور ثابت در صفحه جریان فاز وارد شونده- فاز خارج شونده به‌صورت یک بیضی به دست می‌آید. شکل زیر مسیرهای گشتاور ثابت را به ازای ابتدای هدایت فاز، موقعیت روتور θ_c^i و انتهای هدایت فاز نمایش می‌دهد.



شکل (۵): نمایش مسیرهای گشتاور ثابت به ازای موقعیت‌های مختلف زاویه روتور

در شکل فوق ملاحظه می‌گردد که جهت بیضی‌ها قبل از رسیدن زاویه روتور به θ_c^i در جهت عمودی بوده و پس از آن در جهت افقی در صفحه جریان فازهای وارد و خارج شونده خواهد بود. به‌منظور تحقق تابع هدف کمینه کردن تلفات اهمی ناشی از کموتاسیون رابطه زیر در نظر گرفته خواهد شد. جمله اول در رابطه (۱۵) محدوده عملکرد تک فاز ماشین و جمله دوم مربوط به ناحیه کار کموتاسیون یا هدایت دو فاز مجاور می‌باشد. از رابطه فوق نتیجه می‌شود که به‌منظور کمینه‌کردن تلفات کموتاسیون باید مجموع مجذور جریان‌های دو فاز مجاور کمینه گردد.

$$I_k^2=\frac{1}{\tau}\int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} i_k^2(\theta)d\theta= \frac{1}{\tau}\int_{\theta_{on+\theta_{ov}}}^{\theta_{off-\theta_{ov}}} i_k^2(\theta)d\theta+\frac{1}{\tau}\int_{\theta_{on}}^{\theta_{on+\theta_{ov}}}\left[i_k^2(\theta)+i_k^2(\theta+\varepsilon)\right]d\theta \quad (۱۵)$$

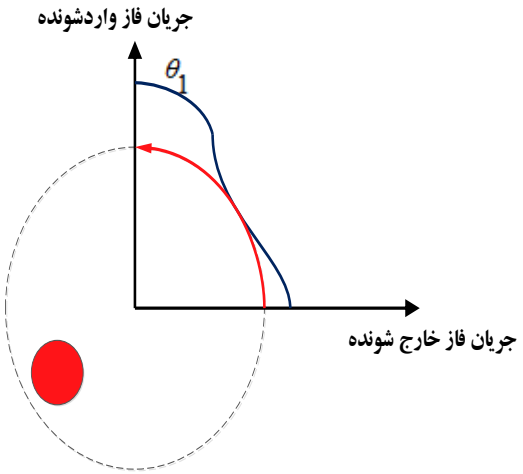
به عبارتی رابطه زیر به‌عنوان تابع هدف مورد نظر برای کمینه کردن تلفات در نظر گرفته شده است.

$$f\left(\theta,T_k^*\right)=i_k^2\left(\theta,T_k^*\right)+i_k^2\left(\theta+\varepsilon,T^*-T_k^*\right) \quad (۱۶)$$

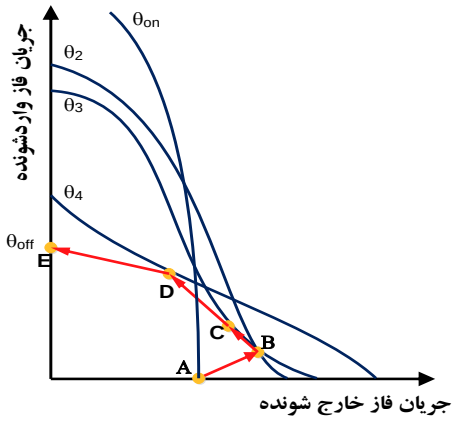
همان گونه که از رابطه فوق بر می‌آید مسیر نشان‌دهنده تلفات کمینه به‌صورت دایره‌ای به مرکز مبدا مختصات در صفحه جریان‌های فازهای وارد و خارج شونده بوده و نقطه برخورد این دوایر با مسیر گشتاور ثابت در هر موقعیت روتور بیان‌کننده جریان‌های فازهای مجاور بهینه برای تامین گشتاور مرجع و با در نظر گرفتن بالاترین نسبت گشتاور به جریان بوده است. با توجه به این که در مدل خطی ذکرشده جهت بیضی‌ها در جهت محورهای مربوط به جریان‌های فازهای وارد و خارج شونده است نقطه مماس بین دایره کمینه تلفات و مسیرهای گشتاور ثابت همواره بر روی محورهای مختصات در صفحه شکل (۵) خواهد بود. به عبارت دیگر جریان مرجع برای فازهای گوناگون به‌صورت پرشی از مقدار صفر به مقدار مرجع و بالعکس خواهد بود. تحقق عملی این روش مستلزم وجود ولتاژ بالا برای هر فاز خواهد بود که در اغلب موارد در مبدل نامتقارن امکان‌پذیر نیست. با در نظر گرفتن معادلات گشتاور تولیدی در هر فاز به‌صورت تابع کاملاً غیرخطی به فرم رابطه زیر ثابت می‌شود که مسیرهای گشتاور ثابت در صفحه جریان‌های فازهای تحت کموتاسیون مسیرهایی شبه‌بیضی بوده و دارای یک نقطه مماس با دایره کمینه تلفات خواهد بود. برای این منظور تابع هدف کمینه‌کردن تلفات مسی را با در نظر گرفتن معادله غیرخطی گشتاور هر فاز و قید زیر در نظر بگیرید.

$$T_{ref}=f\left(\theta,i_k\right)+g\left(\theta,i_{k+1}\right) \quad (۱۷)$$

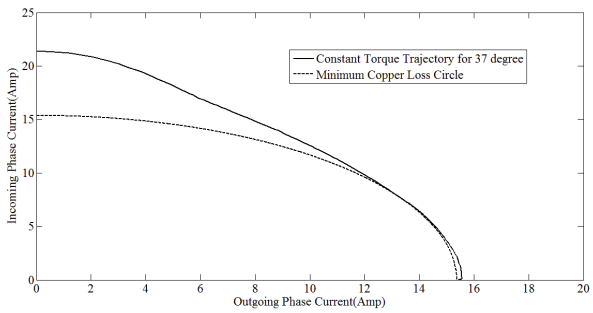
توابع غیرخطی در رابطه فوق بر اساس رابطه (۴) و یا استفاده از جدول داده و برازش منحنی محقق می‌گردد. با در نظر گرفتن این توابع و برای هر موقعیت روتور مسیرهای بهینه و همین طور نقاط برخورد با دایره دارای حداقل شعاع به‌صورت شکل (۶) مشخص می‌گردد. در این شکل ملاحظه می‌شود که مسیرهای بیضی شکل در مدل خطی ماشین تبدیل به مسیرهای شبه بیضی شده و این مسیرها دارای تنها یک نقطه مماس با دوایر متناسب با تلفات کموتاسیون خواهند بود. این روند برای موتور نمونه در نظر گرفته‌شده در این مقاله انجام شده و جریان مرجع برای این موتور در بار ۲۰.m N به‌دست آمده است.



شکل (۶): مسیر گشتاور ثابت و دایره متناسب با حداقل تلفات کموتاسیون

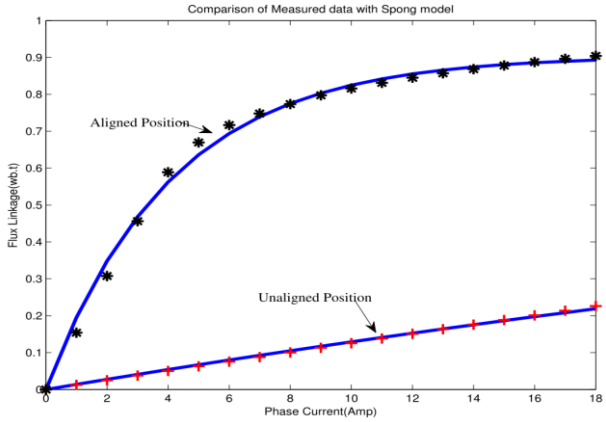


شکل (۷): روند انجام کموتاسیون بر اساس نقطه مماس دایره تلفاتی با مسیرهای گشتاور ثابت



شکل (۸): بیضی گشتاور ثابت و دایره با حداقل شعاع مماس بر آن برای زاویه روتور ۳۷ درجه

شکل(۷) روند انجام کموتاسیون را تحت شرایط حداقل تلفات و شکل(۸) بیضی گشتاور ثابت و دایره حداقل تلفات حاصل‌شده را برای زاویه ۳۷ درجه نمایش می‌دهد. به‌منظور مدل‌سازی گشتاور با در نظر گرفتن اثر اشباع از رابطه (۴) در رابطه (۱۷) استفاده شده است. در این حالت با در نظر گرفتن ۴ جمله اول سری فوریه در رابطه (۳) تقریب مناسبی از منحنی‌های شار و گشتاور موتور مورد مطالعه در این مقاله به دست می‌آید. شکل (۹) مقایسه منحنی‌های شار اندازه‌گیری شده از نتایج آزمون عملی را با مقادیر حاصل از تخمین توسط رابطه (۲) نشان می‌دهد.



شکل (۹): مقایسه منحنی‌های مغناطیسی در دو حالت هم‌محوری و عدم هم‌محوری در حالت اندازه‌گیری و تخمین زده‌شده

جدول (۱) ضرایب چهار جمله اول سری فوریه در نظر گرفته شده را نمایش می‌دهد:

جدول (۱): مقادیر۴ جمله اول سری فوریه در رابطه(۳) برای موتور نمونه

ضرایب سری فوریه	مقادیر
a_0	۰/۰۹۶۲۶
b_0	۰/۱۰۷۴
c_0	۰/۰۳۰۹۶
d_0	۰/۰۰۶۵۳۸

در رابطه (۲) مقدار λ_s برابر با ۰/۹۰۴ در نظر گرفته شده است. توضیح داده شد که توابع جریان حاصل‌شده از الگوریتم پیشنهادی وابسته به مقدار گشتاور مرجع بوده و در واقع مسیر منحنی‌های بیضی‌شکل گشتاور ثابت برای هر گشتاور مرجع با دیگری متفاوت است. لذا جریان مرجع فاز برای هر مقدار گشتاور به‌طور جداگانه باید به دست آید. به‌منظور پیاده‌سازی عملی و تحقق کنترل مورد نظر برای تمام گشتاورها، ابتدا جریان‌ها به‌صورت بسط فوریه از زاویه روتور مطابق با رابطه زیر به‌دست آمده و سپس ضرایب حاصل شده خود به‌صورت توابع چندجمله‌ای از گشتاور مرجع در نظر گرفته شده‌اند.

$$i(T,\theta)=\sum_{n=1}^{8}\left(a_n(T)\cos(n\omega\theta)+b_n(T)\sin(n\omega\theta)\right) \qquad (۱۸)$$

$$\begin{aligned} a_n(T)&=ap_1(n)T^2+ap_2(n)T+ap_3(n)\\ b_n(T)&=bp_1(n)T^2+bp_2(n)T+bp_3(n)\end{aligned} \qquad (۱۹)$$

برای موتور نمونه ذکر شده در این مقاله، الگوریتم پیشنهادی برای گشتاورهای مختلف و به ازای هر ۲Nm جریان‌های مرجع بهینه استخراج شده و سپس بر اساس برازش منحنی جریان با معادله (۱۸) ضرایب a_n و b_n به‌دست آمده است. در نهایت با استفاده از رابطه (۱۹) توابع وابسته به گشتاور مربوط به ضرایب ذکر شده بر اساس گشتاور مرجع حاصل شده است. جدول زیر مقادیر ضرایب مشخص شده برای ماشین مفروض را به‌منظور انجام شبیه‌سازی می‌دهد. در رابطه (۱۸) مقدار w برای موتور چهار فاز برابر با ۰/۲ به‌دست آمده است.

جدول (۲): ضرایب منحنی جریان مرجع برحسب گشتاور مرجع برای موتور نمونه

n	*ap1*	*ap2*	*ap3*	*bp1*	*bp2*	*bp3*
۰	-۰/۰۰۲۱	۰/۳۴۱	۱/۲۷	۰	۰	۰
۱	۰/۰۰۳۰	-۰/۳۱۳۵	۰/۶۳۶۴	۰/۰۰۲۵	-۰/۱۵۹۲	-۲/۲۲
۲	-۰/۰۰۳۴	۰/۰۱۹۴	۰/۵۳۴۱	۰/۰۰۳۰	-۰/۱۷۳	۰/۴۰۵۷
۳	۰/۰۰۳۸	-۰/۰۰۳۰	-۰/۷۹۱۵	-۰/۰۰۲۶	۰/۱۶۵	-۱/۱۰۲
۴	۰/۰۰۵۴	-۰/۱۴۲۲	۰/۵۷۳۶	۰/۰۰۴۳	-۰/۰۰۷۹	-۰/۵۳۴۷
۵	-۰/۰۰۳۴	۰/۱۴۱۷	-۰/۸۵۳۸	-۰/۰۰۷۴	۰/۱۲۳۷	-۰/۳۲۸۱
۶	۰/۰۰۴۱	-۰/۰۰۷۵	-۰/۳۱۱۷	-۰/۰۰۶۵	۰/۱۳۹	-۰/۶۵۶۶
۷	-۰/۰۰۰۹۱	۰/۰۰۲۰	۰/۰۳۱۳۸	۰/۰۰۴۰	-۰/۱۰۹۹	۰/۷۴۸۷
۸	-۰/۰۰۳۵	۰/۰۵۹۵	-۰/۲۶۲۵	-۰/۰۰۲۵	۰/۰۳۳۰	-۰/۰۴۹

نتایج مطالعات توسط روش ارائه شده نشان می‌دهد که جریان حاصل شده و تابع اشتراکی گشتاور متناظر با آن دارای عملکرد مطلوب در سرعت‌های پایین و متوسط می‌باشد. به‌منظور افزایش عملکرد موثر در محدوده سرعت بالاتر از یک روش اصلاحی به صورتی استفاده می‌شود که جبران خطای گشتاور در فاز خارج شونده توسط فاز وارد شونده انجام شده و کمبود گشتاور تولید شده در فاز وارد شونده به مرجع گشتاور در فاز خارج شونده اضافه می‌شود. با در نظر گرفتن رابطه ولتاژ هر فاز به‌صورت زیر، حداکثر تغییرات جریان هر فاز برحسب سرعت، اندازه ولتاژ فاز و زاویه روتور به‌دست خواهد آمد:

$$V\approx\frac{d\lambda}{dt}=\frac{\partial\lambda}{\partial\theta}.\omega+\frac{\partial\lambda}{\partial i}.\frac{\Delta i}{\Delta t}=\frac{\partial L}{\partial\theta}i\omega+L\frac{\Delta i}{\Delta\theta}.\omega \qquad (۲۰)$$

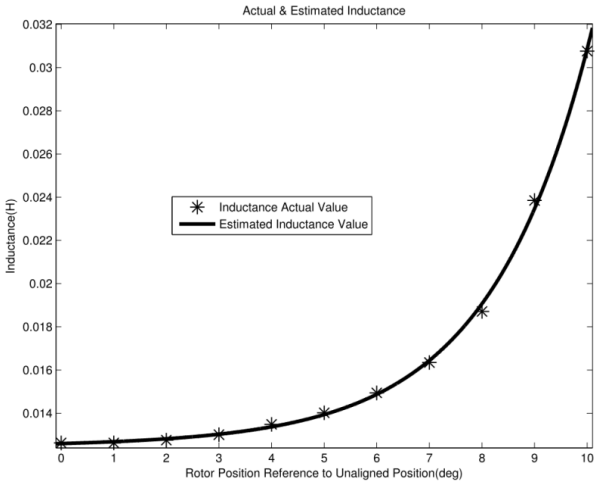
$$\Delta i_{k,\max}(\theta_n)=\left[\frac{V_{dc}}{\omega}-\frac{\partial L}{\partial\theta}(\theta_n)i_k(\theta_n)\right]\left(\frac{\theta_{n+1}-\theta_n}{L(\theta_n)}\right) \quad (۲۱)$$

با در نظر گرفتن رابطه اندوکتانس در حوالی زاویه روشنی هدایت هر فاز به‌صورت رابطه (۲۲)، معادله (۲۱) به‌صورت رابطه (۲۳) نتیجه می‌شود.

$$L(\theta)=ae^{(\theta-b)/c} \quad (۲۲)$$

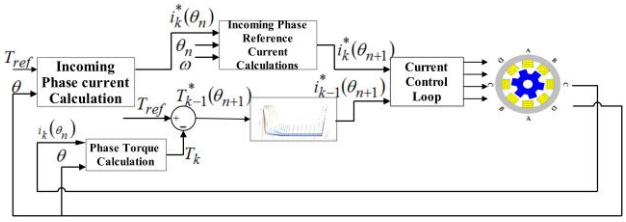
$$\Delta i_{k,\max}(\theta_n)=\left[\frac{V_{dc}}{\omega.ae^{((\theta_n-b)/c)}}-\frac{(\theta_{n+1}-\theta_n)i_k(\theta_n)}{c}\right] \quad (۲۳)$$

در رابطه (۲۲) ضرایب a، b و c به ترتیب برابر با ۰/۰۰۸۴، ۱/۱- و ۹/۶۶ به‌دست آمده است. شکل زیر مقایسه بین اندوکتانس اندازه‌گیری شده را با اندوکتانس تخمین زده شده از رابطه (۲۲) با ضرایب معرفی شده در محدوده ۱۰ درجه نسبت به موقعیت عدم هم‌محوری نمایش می‌دهد.



شکل (۱۰): مقایسه منحنی‌های اندوکتانس فاز در حالت اندازه‌گیری و تخمین زده‌شده در حوالی موقعیت عدم هم‌محوری

بر اساس رابطه (۲۳) حداکثر تغییرات جریان فاز وارد شونده به دلیل محدود بودن ولتاژ مبدل و ولتاژ نامی هر فاز محدود بوده و لذا خطای ایجادشده در حلقه کنترل جریان در این فاز توسط فاز خارج شونده جبران خواهد شد. شکل (۱۱) بلوک دیاگرام روش اصلاحی پیشنهادی را برای کاهش نوسانات گشتاور با افزایش سرعت موتور نمایش می‌دهد.

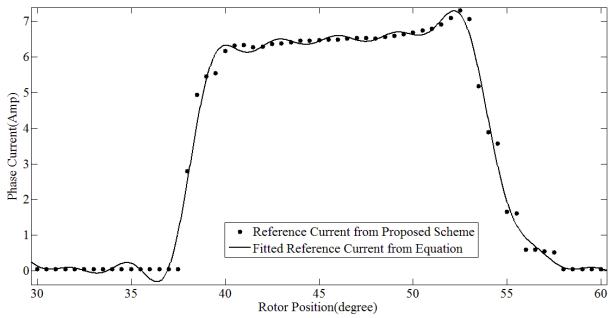


شکل (۱۱): بلوک دیاگرام روش اصلاحی پیشنهادی برای بهبود عملکرد کنترل جریان فاز وارد شونده در سرعت‌های متوسط و بالا

در بلوک دیاگرام فوق، امکان کنترل روی حلقه گشتاور هر فاز به‌صورت جداگانه نیز وجود داشته و در این حالت می‌توان جدول داده گشتاور به جریان را به‌منظور تحقق ساده‌تر پیاده‌سازی حذف نمود.

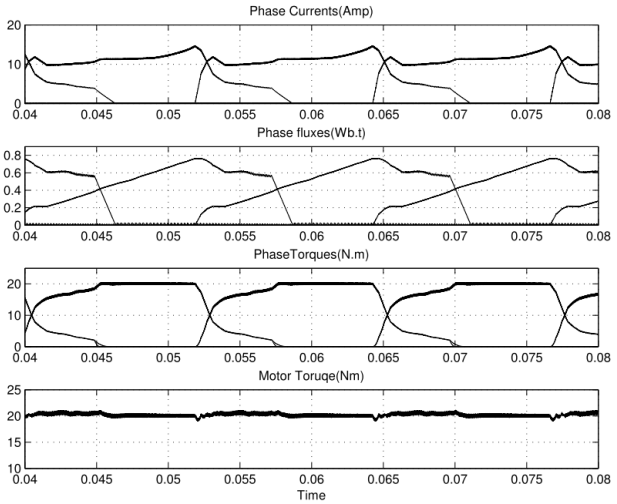
۵- نتایج شبیه‌سازی‌ها

به‌منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی در کاهش نوسانات گشتاور و تلفات اهمی کموتاسیون موتور سوئیچ رلوکتانس ۴ کیلووات با مشخصات ارائه شده در پیوست مقاله در نظر گرفته شده است. مدل معرفی شده در روابط (۲) تا (۴) و ضرایب ارائه شده در شکل (۹) و جدول (۱) برای آن در نظر گرفته شده است. بیضی‌های گشتاور ثابت به ازای گشتاورهای مرجع با میزان افزایش ۲ نیوتن‌متر و نقاط مماس آن‌ها با دوایر حداقل تلفات اهمی کموتاسیون به‌دست آمده و بر اساس رابطه (۱۸) و (۱۹) ضرایب برازش شده حاصل گردیده و در جدول (۲) معرفی شده است. به‌عنوان نمونه شکل (۱۲) جریان مرجع حاصل از نقاط مماس را با جریان به‌دست آمده از رابطه (۱۸) برای گشتاور مرجع ۸ نیوتن‌متر مقایسه می‌کند.



شکل (۱۲): مقایسه منحنی‌های جریان مرجع به‌دست آمده از نقاط مماس و جریان مرجع برازش شده طبق رابطه (۱۸) برای گشتاور مرجع ۸ نیوتن‌متر

شکل (۱۳) نتایج شبیه‌سازی موتور مورد نظر را برای گشتاور بار ۲۰ نیوتن‌متر در سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه نمایش می‌دهد. به‌منظور بررسی توان تلفاتی هر فاز و مقایسه آن با توابع اشتراکی گشتاور متداول جدول (۳) توان‌های تلفاتی اهمی هر فاز محاسبه شده و برای توابع اشتراکی گشتاور متداول نیز زوایای روشنی و خاموشی معادل با الگوریتم پیشنهادی و برابر با ۳۶/۵ و ۵۸/۵ درجه در نظر گرفته شده است. با افزایش سرعت در گشتاور بار ۲۰ نیوتن‌متر، نیاز به ولتاژ فاز بیش‌تر برای غلبه بر منبع ولتاژ داخلی ناشی از نیروی ضدمحرکه افزایش یافته و به دلیل محدودیت ولتاژ مبدل خطا در حلقه کنترل جریان فاز وارد شونده پدید می‌آید. شکل (۱۴) نتایج شبیه‌سازی را برای سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه نمایش می‌دهد.

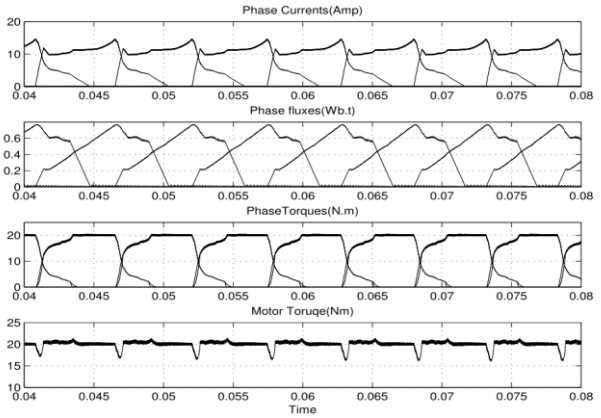


شکل (۱۳): جریان‌های فاز، شار پیوندی فاز، گشتاورهای تولیدی هر فاز و گشتاور برآیند موتور برای بار ۲۰ نیوتن‌متر و سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه

جدول (۳): مقایسه توان‌های تلفاتی فاز برای گشتاور بار ۲۰ نیوتن‌متر

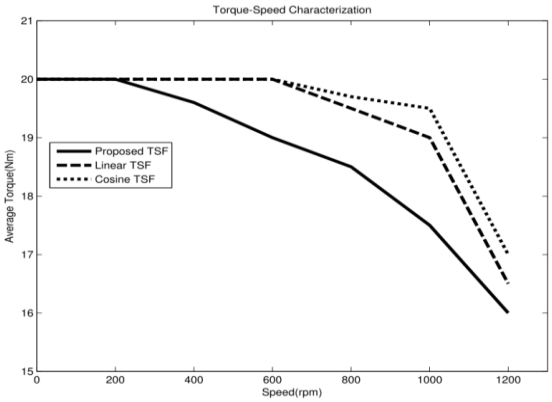
نوع	نمایی	مکعبی	کسینوسی	خطی	پیشنهادی
توان تلفاتی فاز (W)	۲۸/۷	۲۸/۲	۲۸	۲۸/۵	۲۷/۱

در نمودار گشتاور موتور در شکل (۱۴) مشخص است که عدم توانایی دنبال کردن جریان در فاز وارد شونده سبب افت گشتاور و افزایش نوسانات در گشتاور موتور خواهد شد. شکل (۱۵) منحنی گشتاور متوسط- سرعت را در روش پیشنهادی بدون اعمال الگوریتم اصلاحی معرفی شده نمایش داده و با توابع اشتراکی گشتاور خطی و کسینوسی مقایسه می‌کند.

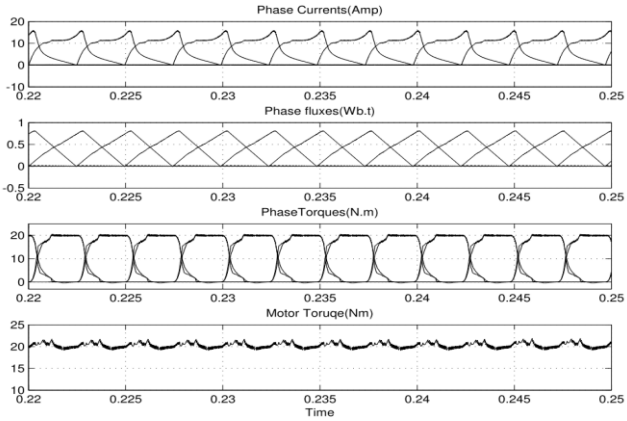


شکل (۱۴): جریان‌های فاز، شار پیوندی فاز، گشتاورهای تولیدی هر فاز و گشتاور برآیند موتور برای بار ۲۰ نیوتن‌متر و سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه

در این شکل ملاحظه می‌شود که روش پیشنهادی تنها در محدوده سرعت پایین دارای عملکرد مطلوب در کاهش نوسانات داشته و بازده این روش در سرعت‌های متوسط و بالا نسبت به توابع اشتراکی گشتاور متداول ضعیف‌تر است. بر این اساس روش اصلاحی معرفی شده مبتنی بر جبران خطای گشتاور فاز وارد شونده توسط فاز خارج شونده اعمال شده و نتایج شبیه‌سازی‌ها در سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه در شکل (۱۶) نشان داده شده است.

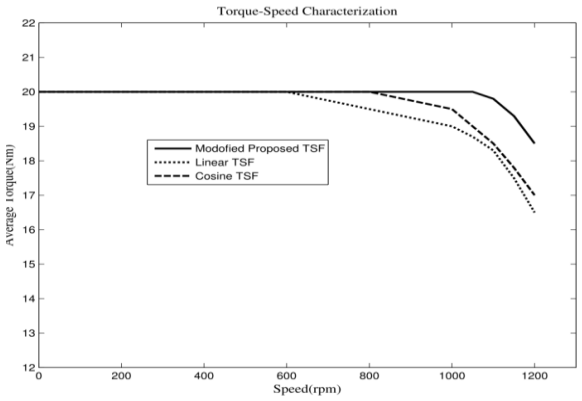


شکل (۱۵): منحنی گشتاور متوسط- سرعت برای روش پیشنهادی و مقایسه آن با توابع اشتراکی گشتاور خطی و کسینوسی

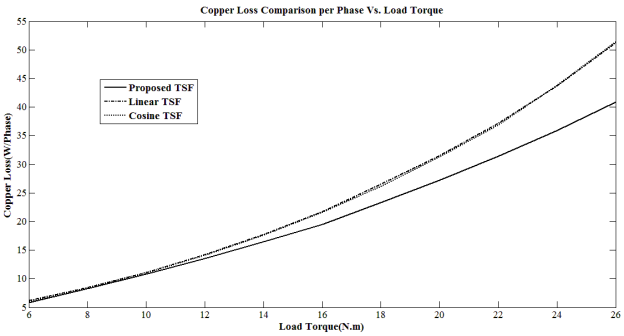


شکل (۱۶): جریان‌های فاز، شار پیوندی فاز، گشتاورهای تولیدی هر فاز و گشتاور برآیند موتور برای بار ۲۰ نیوتن‌متر و سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه با اعمال روش اصلاحی پیشنهادی

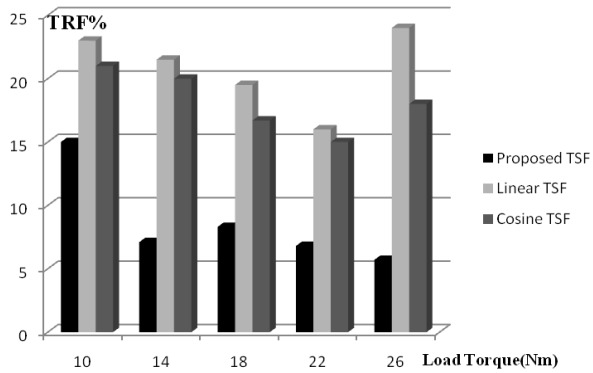
در شکل (۱۶) شاخص نوسانات گشتاور معرفی شده در رابطه (۱۲) برای روش پیشنهادی اصلاح شده ۷/۵ درصد و برای توابع اشتراکی گشتاور خطی و کسینوسی به ترتیب برابر با ۱۸ و ۱۶ درصد اندازه‌گیری شده است. شکل (۱۷) منحنی گشتاور متوسط- سرعت را در شرایط اعمال روش اصلاحی پیشنهادی برای تابع اشتراکی گشتاور معرفی شده و توابع خطی و کسینوسی نشان می‌دهد.



شکل (۱۷): منحنی گشتاور متوسط- سرعت برای روش پیشنهادی اصلاح شده و مقایسه آن با توابع اشتراکی گشتاور خطی و کسینوسی



شکل (۱۸): مقایسه تلفات توان هر فاز برای روش پیشنهادی و مقایسه آن با توابع اشتراکی گشتاور خطی و کسینوسی



شکل (۱۹): مقایسه شاخص نوسانات گشتاور تابع اشتراکی گشتاور اصلاحی پیشنهادی با توابع خطی و کسینوسی در سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه

شکل (۱۸) مقایسه تلفات موتور سوئیچ رلوکتانس مورد نظر را برای توابع اشتراکی گشتاور متداول خطی و کسینوسی با تابع معرفی شده و شکل (۱۹) شاخص نوسانات گشتاور در سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه را برای گشتاور بارهای کم تا بار نامی نمایش می‌دهد.

جدول (۴): مقایسه بازده ماشین در سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه توسط توابع اشتراکی گشتاور خطی، کسینوسی و پیشنهادی

گشتاور	درصد گشتاور نامی	تابع خطی	تابع کسینوسی	تابع پیشنهادی
۶	۲۳	۰/۸۳	۰/۸۴	۰/۸۴
۸	۳۱	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۳
۱۰	۳۸	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۸۲
۱۲	۴۶	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۸۲
۱۴	۵۴	۰/۸	۰/۸	۰/۸۱
۱۶	۶۱	۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۸۱
۱۸	۷۰	۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۸
۲۰	۷۷	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۷۹
۲۲	۸۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۸
۲۴	۹۲	۰/۷۴	۰/۷۴	۰/۷۷
۲۶	۱۰۰	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۷

با توجه به اینکه تلفات کل ماشین در سرعت‌های پایین عمدتاً تلفات ناشی از سیم‌پیچ‌ها و از جنس تلفات اهمیک می‌باشد، کاهش تلفات اهمی خصوصاً در موتورهای بزرگ صنعتی می‌تواند منجر به افزایش راندمان درایو موتور تا بیش از ۵٪ شود. برای روشن شدن این مطلب جدول (۴) راندمان موتور را به روش پیشنهادی با توابع اشتراکی گشتاور متداول به ازای تغییرات گشتاور بار موتور در سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه مقایسه می‌کند. در این جدول مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی در کاربردهای با سرعت‌های پایین و گشتاورهای بالا می‌تواند بیش‌ترین کارآیی را داشته باشد. این امر در موتورهای صنعتی بزرگ می‌تواند منجر به افزایش راندمان کلی سیستم درایو ماشین سوئیچ رلوکتانس گردد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تابع اشتراکی گشتاور و جریان فاز مرجع متناظر با آن بر اساس حل مسئله بهینه‌سازی تلفات اهمی در بازه کموتاسیون با در نظر گرفتن حداقل نوسانات گشتاور و مدل غیرخطی مغناطیسی معرفی شد. بر این اساس منحنی‌های شبه بیضی گشتاور ثابت در صفحه مختصات جریان فازهای وارد و خارج شونده ترسیم و نقاط مماس دایره با حداقل شعاع به‌عنوان حداقل تلفات اهمی با منحنی‌های گشتاور ثابت ترسیم شد. مسیرهای حاصل‌شده از نقاط مماس تضمین‌کننده کموتاسیون با حداقل تلفات و با در نظر گرفتن مدل غیرخطی مغناطیسی است. تابع برازش شده برحسب زاویه روتور و گشتاور مرجع برای جریان‌های فاز معرفی گردید. نتایج شبیه‌سازها کاهش تلفات اهمی هر فاز را در سرعت‌های پایین نشان داد. به‌منظور افزایش محدوده عملکرد و کاهش نوسانات گشتاور در سرعت‌های متوسط و بالا روش اصلاحی با الگوریتم‌های ساده و قابل پیاده‌سازی بیان گردید. در بررسی تاثیر خطای گشتاور در حلقه کنترل گشتاور فاز

وارد و خارج شونده مشخص گردید که خطا در فاز وارد شـونده بـیش-ترین تاثیر را بر متوسط و شاخص نوسانات گشتاور خواهد داشـت. لـذا در روش اصلاحی پیشنهادی کمبود گشتاور در فاز وارد شونده به دلیل محدودیت ولتاژ مبدل توسط فاز خارج شونده جبران شـد. بایـد توجـه داشت که فاز خارج شونده در این موقعیت قابلیت تولید گشـتاور را بـه ازای اندکی افزایش جریان خواهد داشت. نتـایج حاصـل شـده صـحت عملکرد و برتـری روش پیشـنهادی را در کـاهش نوسـانات گشـتاور و تلفات کموتاسیون نسبت به توابع اشتراکی گشتاور متداول نشان داد.

پیوست

مقادیر پلاک نامی موتور سوئیچ رلوکتانس مورد مطالعه در این مقاله:

مقدار	عنوان
۴	تعداد فاز
۴kW	توان نامی
۳۸۰V	ولتاژ نامی
۹Amp	جریان نامی
۱۵۰۰rpm	سرعت نامی
۰/۷۵ Ω	مقاومت هر فاز
۲۶Nm	گشتاور نامی

مراجع

[1] S. K. Sahoo, S. Dasgupta, S. K. Panda and J.X. Xu, "A lyapunov function based robust direct torque controller for switched reluctance motor drive system," IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 27, pp. 555-564, Feb. 2012.

[2] R. Krishnan, *Switched Reluctance Motor Drives Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications*, Boca Rotan, FL: CRC Press, 2001.

[3] Y. K. Choi, H. S. Yoon and C. S. Koh, "Pole-shaped optimization of a switched reluctance motor for torque ripple reduction," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, No. 4, pp. 1797-1800, Apr.2007.

[4] S. I. Nebeta, I. E. Chabu, L. Lebensztajn, D. A. P. Correa, W. M. Dasilva and K. Hameyer, "Mitigation of the torque ripple of a switched reluctance motor through a multi objective optimization," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 6, pp. 1018-1021, Jun. 2008.

[5] M. Illic-spong, T. J. E. Miller, S. R. MacMinn and J. S. Thorp, "Instantaneous torque control of electric motor drives," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 2, pp. 55-61, Jan. 1987.

[6] R. S. Wallace and D. G. Taylor, "A balanced commutatorfor switched reluctance motors to reduce torque ripple," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 7, No. 4, pp. 617-626, Oct. 1992.

[7] I. Husain, "Minimization of torque ripples in SRM drives," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, No.1, pp. 28-39, Feb. 2002.

[8] D. H. Lee, J. Liang, Z. G. Lee and J. W. Ahn, "A simple nonlinear logical torque sharing function for low toruqe ripple SR drives," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 8, pp. 3021-3028, Aug. 2009.

[9] V. P. Vujicic, "Minimization of torque ripple and copper losses in switched reluctance drive," IEEE Transctions on Power Electronics, Vol. 27, No. 1, Jan. 2012.

[10] N. H. Fuengwarodsakul, M. Menne, R. B. Inderka and R. W. DeDoncker, "High dynamic four quadrant switched reluctance drive based on DITC," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, No. 5, pp. 1232-1242, Sept. 2005.

[11] P. C. Kjaer, J. J. Gribble and T. J. E. Miller, "High-grade control of switched reluctance machines,", IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol. 33, No. 6, pp. 1585-1593, 1997.

[12] I. Husain, "Minimization of torque ripple in SRM drives," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 1, pp. 28-39, 2002.

[13] Y. Sozer and D. A. Torrey, "Optimal turn-off angle control in the face of automatic turn-on angle control for switched-reluctance motors," IET Electric Power Applications, Vol. 1, No. 3, pp. 395-401, 2007.

[14] Y. Xu, Z. Zhong, R. Chen and L. S. L. Lu, "Analytical method to optimise turn-on angle and turn-off angle for switched reluctance motor drives," IET Electric Power Applications, Vol. 6, No. 9, pp. 593–603, 2012.

[15] D. H. Lee, S. Y. Ahn and J. W. Ahn "A simple negative torque compensation scheme for a high speed switched reluctance motor," Journal of power electronics, Vol. 12, No. 1, pp. 58-66, January 2012.

[16] M. Spong, R. Marino, S. Peresada and D. Taylor, "Feedback linearizing control of switched reluctance motor," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-32, No. 5, pp. 371-379, May 1987.

[17] F. Filicori, C. G. L., Bianco and A. Tonielli, "Modeling and control strategies for a variable reluctance direct-drive motor," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 40, No. 1, pp. 105-115, Feb. 1993.

[18] D. S. Schramm, B. W. Williams and T. C. Green, "Torque ripple reduction of switched reluctance motors by PWM phase current optimal profiling," in Proc. IEEE PESC'92, pp. 857–860, 1992.

[19] I. Husain and M. Ehsani, "Torque ripple minimization in switched reluctance motor drives by PWM current control," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 11, pp. 83–88, Jan. 1996.

[20] R. Mikail, I. Husain, Y. Sozer, M. S. Islam and T. Sebastian, "Torque-ripple minimization of switched reluctance machines through current profiling," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 49, No. 3, May/June 2013.

[21] X. D. Xue, K. W. E. Cheng, J. K. Lin, Z. Zhang, K. F. Luk, T. W. Ng and N. C. Cheung, "Optimal control method of motoring operation for srm drives in electric vehicles," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 59, No. 3, pp. 1191-1204, march 2010.