

## کنترل زاویه روشنی با استفاده از توابع اشتراکی گشتاور اصلاح شده به منظور کاهش ریبیل گشتاور در موتورهای سوئیچ رلوکتانس

مهرداد دریانوش<sup>(۱)</sup> - میلاد دولتشاهی<sup>(۲)</sup> - جواد پورآباده<sup>(۳)</sup>

(۱) کارشناس ارشد - گروه برق، دانشکده برق، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، ایران

(۲) استادیار - گروه برق، دانشکده برق، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، ایران

(۳) استادیار - گروه برق-قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۹/۲۹

**خلاصه:** در سالهای اخیر گرایش به موتور سوئیچ رلوکتانس به منظور استفاده در کاربردهای صنعتی افزایش پیدا کرده است. از این رو تحقیقات گسترده‌ای بر روی کنترل سرعت و گشتاور این موتور صورت گرفته است. این موتور دارای ساختاری ساده و مقاوم بوده و دارای هزینه ساخت پایین و مقرون به صرفه می‌باشد و در عین حال از چگالی توان بالا، قابلیت کار در سرعت‌های بسیار زیاد و در محیط‌های نامناسب (گرم و پرگرد و غبار) قابلیت اطمینان، کنترل پذیری و بازدهی بالایی برخوردار است. از طرف دیگر تولید گشتاور گسسته و اشباع شدید مغناطیسی هسته در این موتور سبب کاهش گستره کاربردهای صنعتی و افزایش نوسانات نامطلوب در گشتاور این موتور شده است. در این مقاله، از روش اصلاحی مبتنی بر قوانین منطقی و بر اساس کنترل توابع اشتراکی گشتاور استفاده شده است. همچنین با تخمین منحنی اندوکتانس در همسایگی موقعیت عدم هم محوری و بر اساس حل تحلیلی معادله ولتاژ فاز، زاویه روشنی بهینه برای هدایت هر فاز استخراج شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها بر روی یک موتور سوئیچ رلوکتانس چهار فاز و مقایسه آن با روشهای پیشین نشان از صحت و برتری روش پیشنهادی ارائه شده خواهد داشت.

**کلمات کلیدی:** موتور سوئیچ رلوکتانس، کاهش ریبیل گشتاور، کنترل زاویه روشنی.

## Turn-on Angle Control Using Modified Torque Sharing Function for Torque Ripple Reduction in Switched Reluctance Motors

Mehrdad Daryanush<sup>(1)</sup> - Milad Dowlatshahi<sup>(2)</sup> - Javad Pourabadeh<sup>(3)</sup>

(1) MSc. - Department of Electrical Engineering, khomeynishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeynishahr, Esfahan, Iran  
mdaryanush@yahoo.com

(2) Assistant Proffesor - Department of Electrical Engineering, khomeynishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeynishahr, Esfahan, Iran  
dolatshahi@ec.iut.ac.ir

(3) Assistant Proffesor - Department of Electrical Engineering Esfahan University of Technology, Esfahan, Iran  
pourabadeh@iaukhsh.ac.ir

In the recent years, the use of switched reluctance motors (SRM) in industrial applications has been increased. In this regard, a large amount of research studies have been conducted on controlling the speed and torque of the aforementioned motors. These motors not only have a simple and stable structure, but also production cost is low. In addition, these motors take advantage of great power, the ability to work in high speeds and inadequate environments (hot and dusty), reliability, control-ability, and high efficiency. However, discrete torque production of SRM along with enormous magnetic saturation in their cores reduces the variety of their industrial applications and also causes the inappropriate torque ripples. In this paper, a modified logical-rule-based method is proposed which employs the technique of controlling torque sharing function. Moreover, the optimized turn-on angle for conducting each phase is achieved by estimating the inductance curve in the vicinity of unaligned position and based on an analytical solution. Simulation results on a four-phase switched reluctance motor and a comparison with the conventional methods indicates validity and effectiveness of the proposed modified method.

**Index Terms:** Switched reluctance motor, torque ripple reduction, turn-on angle control.

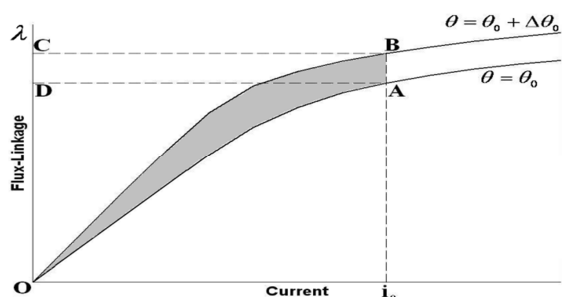
نویسنده مسئول: مهرداد دریانوش، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، mdaryanush@yahoo.com

## ۱- مقدمه

موتور سوئیچ رلوکتانس<sup>۱</sup> (SRM) یکی از قدیمی‌ترین موتورهای الکتریکی است که قدمت آن به بیش از صد و پنجاه سال پیش می‌رسد. نامگذاری این ماشین بر اساس عملکرد فیزیکی آن و بر مبنای سوئیچ شدن رلوکتانس‌های متغیر است. SRM به واسطه مقاوم بودن و قابلیت اطمینان بالا و ساختار مکانیکی ساده آن مورد استقبال قرار گرفته است [۲۰،۱]. این ماشین دارای چگالی گشتاور بالایی است و این خاصیت توأم با خطاپذیری آن است. در طول ۲۵ سال گذشته ماشین‌های رلوکتانسی مجدداً مورد توجه محققین قرار گرفته است. این علاقه‌مندی مجدد به طور عمده بر روی موتور سوئیچ رلوکتانس متمرکز بوده است. متمرکز بودن سیم‌بندی استاتور در این ماشین مانع استفاده از تحلیل سینوسی و تکنیکهای کنترلی مدرن می‌گردد. همچنین برجستگی موجود بر روی روتور و استاتور و سیم‌بندی متمرکز منجر به ضربات شدید گشتاور و نویز صوتی می‌گردد. لذا اغلب تحقیقات جاری بر روی SRM به کاهش ریپل گشتاور و مسائل نویز مربوط می‌شود. کاربرد این موتور در صنعت با وجود قدمت آن بسیار محدود بوده و عملکرد غیرخطی مغناطیسی و عدم وجود مدل‌های دقیق تحلیلی برای آن از جمله موانع گسترش کاربردهای این موتور می‌باشد [۳]. ریپل گشتاور تولیدی در این موتور یکی از مهمترین معایب این موتورها به خصوص در کاربردهایی از نوع گشتاور ثابت است. این ریپل گشتاور از طبیعت غیرخطی گشتاور- جریان- زاویه ( $T-i-\theta$ ) و مکانیزم گسسته تولید گشتاور در موتورهای سوئیچ رلوکتانس حاصل می‌شود. کاهش ریپل گشتاور به خصوص در لحظات کموتاسیون اهمیت بیشتری دارد. در این زمان گشتاور تولیدی از یک فاز فعال به فاز فعال دیگری منتقل می‌شود [۴]. یکی از روشهای کنترلی مرسوم، تابع اشتراکی گشتاور<sup>۲</sup> بوده که در آن توابع اشتراکی به عنوان گشتاور مرجع فازها در نظر گرفته می‌شود. گشتاور مرجع هر فاز به گونه‌ای در بازه کموتاسیون بین دو فاز مجاور تعیین می‌شود تا گشتاور برآیند کل موتور پیوسته ثابت باقی بماند. توابع اشتراکی گشتاور متداول عبارتند از: خطی، کسینوسی، مکعبی و نمایی که در مراجع معرفی و مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

در توابع اشتراکی گشتاور علاوه بر کاهش ریپل گشتاور توابع هدف دیگری همچون کاهش تلفات اهمی در بازه کموتاسیون و یا کاهش پیک یا مقدار موثر جریان هر فاز و کاهش ولتاژ مورد نیاز می‌تواند مبنای مقایسه بین توابع اشتراکی گشتاور باشد. در مرجع [۴] خانواده‌ای از توابع اشتراکی گشتاور معرفی شده که بسته به اهمیت تابع هدف کاهش تلفات و یا عملکرد مناسب در سرعت‌های بالا یکی از توابع اشتراکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مرجع محدودیت در نظر گرفته شده مدل خطی ماشین سوئیچ رلوکتانس است. به عبارت دیگر روش ارائه شده در موتورهای صنعتی که عمدتاً در شرایط گشتاور نامی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند کارایی با راندمان مناسبی نخواهد

داشت. موتور سوئیچ رلوکتانس بر خلاف موتورهای القایی تحت شرایطی دارای راندمان بالاست که سیکل مغناطیسی آن وارد ناحیه اشباع شود. همچنین در سالهای گذشته تعداد زیادی از روشهای بهینه‌سازی زاویه روشنی و زاویه خاموشی ارائه شده است که به منظور کاهش ریپل گشتاور در موتورهای سوئیچ رلوکتانس ارائه شده است. این روش‌ها به طور عمده قابل دسته‌بندی به صورت هوش مصنوعی، خود تنظیم و روشهای تحلیلی است. به حداکثر رساندن نسبت گشتاور به جریان در همه نقاط کار در مرجع [۵] بر اساس شبکه‌های عصبی انجام شده است. در این مرجع جریان مرجع و سرعت به عنوان ورودی‌ها و زاویه روشنی و زاویه خاموشی به عنوان خروجی‌ها قرار می‌گیرند. در مرجع [۶] زاویه روشنی و زاویه خاموشی توسط یک کنترل کننده فازی تطبیقی بهینه‌سازی می‌شود. روش خود تنظیم نیز به طور گسترده‌ای مورد بحث قرار گرفته است. در مرجع [۷] کنترل زاویه روشنی و خاموشی هدایت هر فاز یکی دیگر از روشهای کاهش ریپل گشتاور است. در مرجع [۸] پس از ارزیابی چهار تابع اشتراکی گشتاور به کمک دو تابع هدف افزایش سرعت و کاهش تلفات مسی به منظور حداقل رساندن ریپل گشتاور از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی زوایای روشنی و همپوشانی استفاده شده است. در مرجع [۹] یک روش برای تعیین شکل موج جریان فازهای مجاور در بازه کموتاسیون بین فازها با در نظر گرفتن اشباع مغناطیسی هسته پیشنهاد شده که تضمین‌کننده کمترین میزان تلفات اهمی ماشین است و نقاط برخورد آنها با منحنی دایره‌ای تلفات اهمی با کمترین شعاع، انتخاب می‌شوند. بر این اساس، مسیر حاصل شده از نقاط مذکور تضمین‌کننده تلفات کموتاسیون بهینه و کاهش ریپل گشتاور خواهد بود. در مرجع [۱۰] از یک رابطه تحلیلی با در نظر گرفتن عدم وابستگی اندوکتانس هر فاز در همسایگی موقعیت عدم هم‌محوری به جریان فاز استفاده شده و زاویه روشنی مناسبی بر حسب ولتاژ فاز و سرعت مورد نظر محاسبه می‌شود. در این مرجع برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس در همسایگی موقعیت عدم هم‌محوری زاویه روشنی بهینه از مدل غیر خطی و معادله الکتریکی ولتاژ اعمالی به فاز SRM به جای مدل خطی به دست می‌آید. طبق روش اصلاحی مرجع [۱۱] بدون تغییر در زاویه روشنی ریپل گشتاور در سرعت‌های بالا کاهش یافته است. در این مرجع خطای گشتاور برای هر فاز در ناحیه کموتاسیون به مرجع گشتاور فاز دیگر اضافه شده به طوری که گشتاور حاصل در این ناحیه ثابت باقی بماند. در این مقاله، با کاهش زاویه روشنی و با قرار گرفتن در همسایگی موقعیت عدم هم‌محوری و با فرض اینکه در این ناحیه اندوکتانس فقط تابعی از موقعیت روتور است زاویه هدایت فاز کنترل می‌شود. در مقالات و تحقیقات گذشته زاویه روشنی تا جایی به عقب کشیده می‌شود که ریپل گشتاور به مقدار مطلوب کاهش یابد در حالی که راندمان درایو مورد توجه قرار نگرفته است. ولی در این مقاله با کاهش زاویه روشنی به سمت زاویه عدم هم‌محوری و با تلفیق روش



شکل (۲): تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی  
Fig. (2): Electrical to mechanical energy conversion

معادله ولتاژ هر فاز به صورت کلی در رابطه (۳) آورده شده است.

$$V = Ri + \frac{\partial \lambda(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (3)$$

بر اساس رابطه (۲) گشتاور تولیدی در هر فاز زمانی که شیب منحنی اندوکتانس مثبت است، مقدارش مثبت و در شیب منفی اندوکتانس گشتاور تولیدی منفی خواهد بود. در مدل غیرخطی اندوکتانس، با افزایش جریان دامنه اندوکتانس هر فاز کاهش یافته ولی در مدل خطی، اندوکتانس تنها تابع موقعیت روتور خواهد بود.

در مود کاری موتوری جریان در هر فاز از همسایگی موقعیت عدم هم‌محوری و در جائیکه شیب اندوکتانس مثبت است شروع به هدایت کرده و قبل از هم محور شدن قطبهای استاتور و روتور به مقدار صفر کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل (۳) 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 همسایگی موقعیت‌های هم محوری و عدم هم محوری شیب اندوکتانس ناچیز بوده و در نتیجه پتانسیل تولید گشتاور در آن کم می‌باشد. به عبارت دیگر، اعمال ولتاژ در نزدیکی موقعیت عدم هم محوری بدلیل 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 [۹].

### ۳- توابع اشتراکی گشتاور (TSFs)

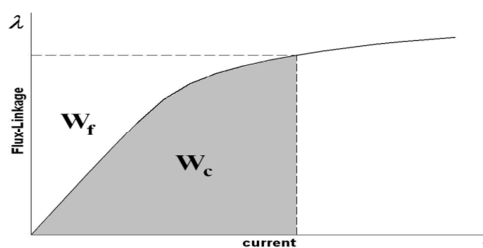
به منظور حداقل رساندن ریپل گشتاور در موتورهای سوئیچ رلوکتانس یکی از روشهای موثر استفاده از توابع اشتراکی گشتاور (TSFs) می‌باشد. در این روش گشتاور مرجع به توابع گشتاور مرجع متناسب با هر یک از فازها تجزیه شده به طوری که مجموع گشتاورهای مرجع هر فاز با گشتاور مورد نظر ثابت باقی بماند، بر این اساس جریان مرجع برای حلقه کنترل جریان در هر فاز تعیین می‌گردد [۱۲]. در این روش، هدایت جریان در هر فاز به دو ناحیه هدایت تکفاز و ناحیه کموتاسیون فازهای مجاور تقسیم‌بندی می‌شود. در ناحیه کموتاسیون دو فاز وارد شونده و خارج شونده همزمان فعال است.

الگوریتم اصلاحی مرجع [۱۱] منجر به عملکرد مطلوب موتور و سیستم درایو نسبت به روشهای متداول شده است.

### ۲- تولید گشتاور در موتور سوئیچ رلوکتانس

موتورهای سوئیچ رلوکتانس دارای قطبهای برجسته بر روی روتور و استاتور می‌باشند و سیم‌پیچ‌ها معمولاً بر روی استاتور قرار دارد و روتور بدون سیم‌بندی و آهنربای مغناطیس دائم می‌باشد. تولید گشتاور در موتور سوئیچ رلوکتانس بر مبنای اصل حداقل رلوکتانس در مدارهای مغناطیسی صورت می‌گیرد. در یک مدار مغناطیسی، بخش متحرک همواره به گونه‌ای حرکت می‌کند که رلوکتانس مسیر شار سیم‌پیچی تحریک شده را حداقل کند. در این موتور تبدیل انرژی ذخیره شده مغناطیسی به انرژی مکانیکی رابطه تنگاتنگی با جریان اعمالی به سیم‌پیچ فاز استاتور و موقعیت روتور دارد. شکل (۱) انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی و کو- انرژی را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۲) گشتاور لحظه‌ای تولیدی توسط موتور در جریان  $i_0$  و زاویه  $\theta_0$  برابر حاصل تقسیم تغییرات جزئی کار مکانیکی  $\Delta W_m$  بر جابجایی جزئی موقعیت روتور  $\Delta \theta$  است. در این شکل مساحت سطح ABCD برابر انرژی الکتریکی دریافتی از منبع تغذیه در حین چرخش روتور از  $\theta = \theta_0$  تا  $\theta = \theta_0 + \Delta \theta_0$  و مساحت سطح OAB برابر کار مکانیکی انجام شده طی این جابجایی است.



شکل (۱): نمایش انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی و کو- انرژی

Fig. (1): The schematic of the stored energy and co-energy in magnetic field

در صورت چشم پوشی از اشباع و فرض  $L(\theta) \times i$   $-$  کو- انرژی با انرژی ذخیره شده در میدان برابر خواهد بود. لذا در هر موقعیت روتور خواهیم داشت:

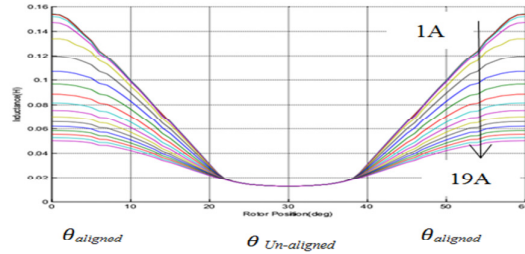
$$W_f(\theta, i) = W'(\theta, i) = \frac{1}{2} L(\theta) i^2 \quad (1)$$

در این حالت می‌توان گشتاور لحظه‌ای ماشین را با استفاده از رابطه زیر به سادگی به دست آورد:

$$T = \frac{\partial W'}{\partial \theta} \Big|_{i=\text{const.}} = \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{2} L(\theta) i^2 \right) \Big|_{i=\text{const.}} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (2)$$

رابطه اخیر نشان می‌دهد که موتوری یا ژنراتوری بودن گشتاور مستقل از جهت جریان است.

طبق رابطه فوق  $T$  گشتاور تولیدی توسط یک فاز،  $i$  جریان فاز،  $\theta$  موقعیت روتور و  $W'$  کو- انرژی می‌باشد.



شکل (۳): منحنی اندوکتانس اندازه‌گیری شده برای ماشین نمونه از موقعیت عدم هم محوری تا هم محوری کامل [۱۱]  
Fig. (3): Measured inductance between unaligned to aligned position for a 4 phase 8/6 SRM [11]

از یک الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی در زوایای روشنی و همپوشانی مختلف در گشتاور مورد نظر به منظور حداقل رساندن ریپل گشتاور استفاده شده است. در مرجع [۴] خانواده‌ای از توابع اشتراکی معرفی شده که بسته به هدف کاهش تلفات و یا عملکرد در سرعت‌های بالا یکی از توابع اشتراکی گشتاور مورد استفاده قرار می‌گیرد.

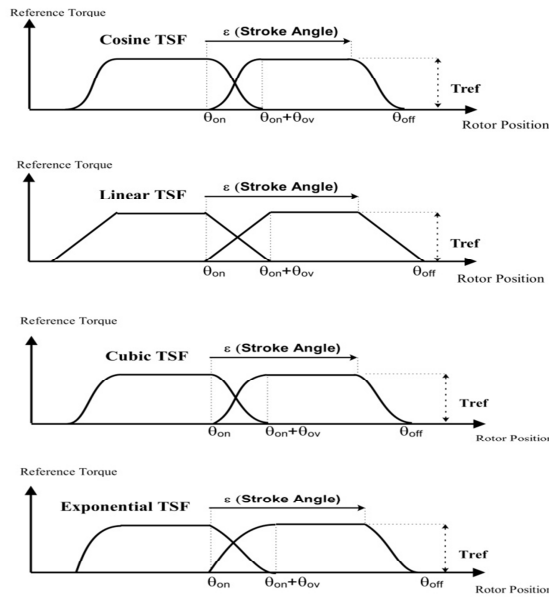
$$T_{ph}^* = T_{ref} \cdot f_{Linear} \quad (4)$$

$$f_{Linear} = \begin{cases} \frac{(\theta - \theta_{on})}{\theta_{ov}} & \theta_{on} \leq \theta \leq \theta_{on} + \theta_{ov} \\ 1 & \theta_{on} + \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_{off} - \theta_{ov} \\ \frac{(\theta_{off} - \theta)}{\theta_{ov}} & \theta_{off} - \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_{off} \end{cases}$$

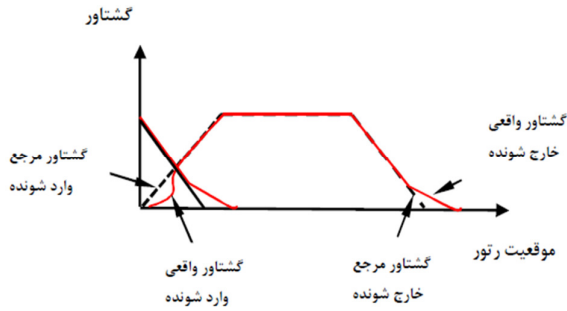
$$T_{ph}^* = T_{ref} \cdot f_{cosine} \quad (5)$$

$$f_{cosine} = \begin{cases} \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{\theta - \theta_{on}}{\theta_{ov}}\right)\right) & \theta_{on} \leq \theta \leq \theta_{on} + \theta_{ov} \\ 1 & \theta_{on} + \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_{off} - \theta_{ov} \\ \sin^2\left(\frac{\theta_{off} - \theta}{\theta_{ov}}\right) & \theta_{off} - \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_{off} \end{cases}$$

معیار بهینه‌سازی در توابع اشتراکی گشتاور مربوط به اهداف ثانویه می‌باشد که نظیر کاهش تلفات مسی، بالا بردن راندمان درایو، کاهش تلفات ناشی از کموتاسیون بین فازها و همچنین قابلیت عملکرد مطلوب در کاهش ریپل گشتاور در محدوده سرعت‌های متوسط و بالا می‌باشد. شکل (۴) توابع اشتراکی گشتاور متداول خطی [۱۳]، کسینوسی [۱۴]، مکعبی [۱۵] و نمایی [۱۲] را نشان می‌دهد، که از روابط (۴) تا (۷) حاصل می‌شوند. انتخاب زوایای روشنی و بازه کموتاسیون فازها تاثیر چشمگیری در عملکرد روش کنترلی بر مبنای توابع اشتراکی گشتاور دارد. به عبارت دیگر در صورتیکه هدف، کاهش ریپل گشتاور در شرایط بار نامی و سرعت پایه موتور باشد زوایای روشنی و خاموشی باید به گونه‌ای تغییر کند تا فرصت لازم برای کموتاسیون بین فازها با توجه به افزایش منبع ضد محرکه داخلی موتور با سرعت و محدود بودن ولتاژ تحریک فاز وجود داشته باشد. در مرجع [۸] نشان داده شده است که برای گشتاور مرجع داده شده، زاویه روشنی و زاویه همپوشانی اثرات قابل توجهی بر محدوده سرعت قابل کنترل، سرعت ماکزیمم، تلفات مسی و راندمان دارد. در این مرجع



شکل (۴): توابع اشتراکی گشتاور متداول  
Fig. (4): Conventional torque sharing function



شکل (۶): گشتاور واقعی و گشتاور مرجع نمادین برای TSF خطی [۱۱]  
Fig. (6): Typical actual and reference torques for a linear TSF [11]

در این شکل اثر ورودی اشاره به کمبود تولید گشتاور در فاز ورودی به خاطر پایین بودن مقدار شیب اندوکتانس و گشتاور تولید شده نزدیک موقعیت عدم هم محوری رتور می‌باشد. به طور مشابه اثر خروجی اشاره به تولید گشتاور اضافی به وسیله فاز خارج‌شونده به دلیل اندوکتانس بالا نزدیک به موقعیت هم محوری رتور می‌باشد. شکل (۶) گشتاور واقعی و گشتاور مرجع را به صورت نمادین برای TSF خطی نشان می‌دهد [۱۱].

روش اصلاحی پیشنهاد شده در مرجع [۱۱] به وسیله قوانین منطقی نشان داده شده در جدول (۱) ارائه شده است.  $T_{k+1}^*$  و  $T_k^*$  گشتاورهای مرجع اصلاح شده برای فازهای وارد شونده و خارج شونده هستند که در شکل (۶) نشان داده شده است. خطای گشتاور فاز وارد شونده و خارج شونده به وسیله روابط (۸) و (۹) بیان می‌شود.

$$\Delta T_k = T_{k,TSF} - T_k \quad (8)$$

$$\Delta T_{k+1} = T_{k+1,TSF} - T_{k+1} \quad (9)$$

که در آن  $T_{k+1,TSF}$  و  $T_{k,TSF}$  گشتاورهای مرجع فازهای خارج و وارد شونده بدون اصلاح می‌باشند که از روابط (۴) تا (۷) محاسبه می‌شود.

Table (1): The proposed modification method using logical rules [11]

جدول (۱): روش اصلاحی پیشنهاد شده به وسیله قوانین منطقی [۱۱]

شرایط	مرحله	محاسبات گشتاورهای فاز مرجع
$T < T^*$	اول	$T_{k+1}^* = T_{k+1,TSF}$
	دوم	$T_k^* = T_{k,TSF} + \Delta T_k$
$T > T^*$	اول	$T_k^* = T_{k,TSF}$
	دوم	$T_{k+1}^* = T_{k+1,TSF} + \Delta T_k$

$$T_{ph}^* = T_{ref} \cdot f_{cubic} \quad (6)$$

$$f_{cubic} = \begin{cases} \frac{3}{\theta_{ov}^2}(\theta - \theta_{on})^2 - \frac{2}{\theta_{ov}^3}(\theta - \theta_{on})^3 & \theta_{on} \leq \theta \leq \theta_{on} + \theta_{ov} \\ 1 & \theta_{on} + \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_{off} - \theta_{ov} \\ 1 - \frac{3}{\theta_{ov}^2}(\theta - \theta_{off} + \theta_{ov})^2 + \frac{2}{\theta_{ov}^3}(\theta - \theta_{off} + \theta_{ov})^3 & \theta_{off} - \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_{off} \end{cases}$$

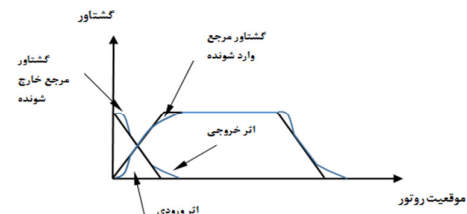
$$T_{ph}^* = T_{ref} \cdot f_{Expon} \quad (7)$$

$$f_{Expon} = \begin{cases} 1 - \text{Exp}\left(-\frac{(\theta - \theta_{on})^2}{\theta_{ov}}\right) & \theta_{on} \leq \theta \leq \theta_{on} + \theta_{ov} \\ 1 & \theta_{on} + \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_{off} - \theta_{ov} \\ \text{Exp}\left(-\frac{(\theta_{off} - \theta_{ov} - \theta)^2}{\theta_{ov}}\right) & \theta_{off} - \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_{off} \end{cases}$$

طبق روابط فوق  $\theta_{on}$  و  $\theta_{ov}$  و  $\theta_{off}$  به ترتیب زوایای روشنی، همپوشانی بین فازهای مجاور و زاویه خاموشی هدایت هر فاز می‌باشد.

#### ۴- روش اصلاحی

در روش اصلاحی ارائه شده در مرجع [۱۱] که مبتنی بر قوانین ساده منطقی به منظور کاهش ریپل گشتاور با افزایش سرعت موتور است، خطای گشتاور برای هر فاز در ناحیه کموتاسیون به مرجع فاز دیگر اضافه شده به طوری که گشتاور حاصل در این ناحیه ثابت باقی بماند. عیب عمده این روش آن است که کنترلی بر روی زاویه روشنی وجود ندارد، به عبارت دیگر کنترل زاویه روشنی به طور همزمان با روشهای اصلاحی ارائه شده در [۱۱] می‌تواند منجر به افزایش گستره سرعت و کنترل پذیری گشتاور شود. در طرح پیشنهادی در [۱۱] اشباع ولتاژ و مبدل و محدودیت‌های ولتاژی موتور SRM در نظر گرفته می‌شود. به علت قابلیت کم تولید گشتاور در شروع فاز وارد شونده به دلیل شیب اندک منحنی اندوکتانس و محدودیت‌های مبدل ولتاژ در نواحی کموتاسیون کنترل گشتاور مرجع با مشکل مواجه خواهد شد. این ریپل‌ها در گشتاور موتور حاصل شده و در متوسط گشتاور نیز پدیدار می‌شود. به طور مشابه، خطای گشتاور در فاز خارج شونده نیز بر روی گشتاور موتور تاثیر می‌گذارد. در روش اصلاحی مرجع [۱۱] کمبود گشتاور تولید شده در فاز ورودی به وسیله افزایش گشتاور مرجع در فاز خروجی جبران می‌گردد. شکل (۵) مفهوم روش اصلاحی برای یک TSF خطی ساده را نشان می‌دهد.



شکل (۵): مفهوم روش اصلاحی برای یک TSF خطی ساده [۱۱]  
Fig. (5): The concept of proposed modification method for a linear TSF [11]

#### ۴-۱- کنترل زاویه روشنی

زمانی که قطب‌های استاتور و روتور بیشینه فاصله هوایی را از یکدیگر دارند اندوکتانس کمترین مقدار و در موقعیت هم محوری اندوکتانس بیشترین مقدار را خواهد داشت. در شکل (۳) منحنی اندوکتانس واقعی در موقعیت‌های مختلف روتور با اعمال جریان‌های مختلف روتور نشان داده شده است، در این شکل با شروع همپوشانی قطب‌های روتور و استاتور، اندوکتانس به صورت تابعی از موقعیت روتور و تغییرات جریان تغییر می‌کند. نزدیک کردن زاویه روشنی  $\theta_{on}$  به زاویه عدم هم محوری  $\theta_u$  به منظور تامین جریان مرجع با افزایش سرعت در جایی که شیب اندوکتانس ناچیز است منجر به افزایش پیک جریان در شروع هدایت فاز می‌شود که این امر باعث کاهش راندمان و افزایش تلفات مسی در فواصل کموتاسیون می‌شود. همچنین تنظیم زاویه خاموشی با تغییرات سرعت سبب عدم ورود دنباله جریان در فاز خارج شونده به ناحیه گشتاور منفی خواهد شد. در سرعت‌های بالا در همسایگی موقعیت‌های هم محوری که مقدار اندوکتانس زیاد است به علت ولتاژ ضد محرکه (BEMF) بالا، جریان فاز استاتور توانایی لازم برای رسیدن به مقدار صفر را ندارد. به دلیل کاهش ولتاژ موثر دو سر فاز در این حالت دنباله جریان فاز خارج شونده از ناحیه کموتاسیون وارد ناحیه گشتاور منفی شده و سبب کاهش راندمان سیستم درایو خواهد شد. عدم تنظیم زاویه خاموشی به علت ادامه یافتن بعد از هم محوری جریان در ناحیه بعد از هم محوری منجر به تولید گشتاور منفی شده به همین علت بازدهی موتورهای سوئیچ رلوکتانس در سرعت‌های بالا می‌تواند شدیداً افت کند. در همسایگی موقعیت عدم هم محوری، اندوکتانس تخمینی طبق رابطه (۱۰) می‌تواند فقط تابعی از موقعیت روتور در نظر گرفته شود.

$$L = ae^{(\theta-b)/c} \quad (10)$$

که در آن،  $L$  اندوکتانس،  $\theta$  موقعیت رتور و  $a$  و  $b$  و  $c$  پارامترهایی هستند که از طریق برازش منحنی تعیین می‌شود و مقادیر آنها به ترتیب برابر با  $0.0088$ ،  $-1/1$ ،  $9/66$  برای موتور مورد آزمایش در این مقاله و مشابه با موتور مورد آزمایش مرجع [۱۱] در نظر گرفته می‌شود. در مرجع [۱۰] زاویه روشنی بهینه با در نظر گرفتن رابطه (۱۰) به صورت رابطه تحلیلی (۱۱) بیان شده است. در این رابطه از مدل غیرخطی اندوکتانس و با صرفنظر کردن از اثر جریان بر اندازه اندوکتانس در همسایگی موقعیت عدم هم محوری استفاده شده است.

$$\theta_{on}^i = \theta_c^i - c \ln \left( 1 + \frac{a \omega \cdot i}{c v_s} e^{\frac{(b-\theta_c^i)}{c}} \right) \quad (11)$$

که در آن  $\theta_c^i$ ، موقعیتی است که گشتاورهای تولیدی فازهای وارد و خارج شونده به ازای جریان‌های فاز یکسان با یکدیگر برابر شده و هر یک از فازها نصف گشتاور مرجع را تولید می‌کند. با مشتق‌گیری از

رابطه (۱۰) مقدار  $\frac{dL}{d\theta}$  و رابطه گشتاور موتور سوئیچ رلوکتانس به ترتیب به صورت روابط (۱۲) و (۱۳) حاصل می‌گردد.

$$\frac{dL}{d\theta} = \frac{1}{c} ae^{(\theta-b)/c} \quad (12)$$

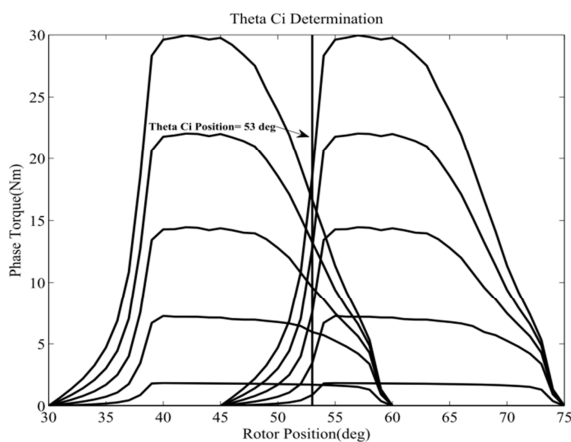
$$T_{ref} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{c} ae^{(\theta-b)/c} \right) i_{ref}^2 \quad (13)$$

با داشتن مقدار گشتاور مرجع در فاز وارد شونده، جریان مرجع مورد نیاز در این فاز از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$i_{ref}^i = \sqrt{\frac{2T_{ref,in}}{\left. \frac{dL}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_c^i}}} \quad (14)$$

در رابطه اخیر مقدار،  $T_{ref,in}$  گشتاور مرجع فاز وارد شونده می‌باشد.  $\theta_c^i$  با توجه به تعریف ارائه شده در مرجع [۴] موقعیتی است که گشتاورهای تولیدی فازهای وارد و خارج شونده به ازای جریان‌های فاز یکسان با یکدیگر برابر شده و هر یک از فازها نصف گشتاور مرجع موتور را تولید می‌کند. به عبارت دیگر، قبل از زاویه  $\theta_c^i$  تولید عمده گشتاور توسط فاز خارج شونده و بعد از آن توسط فاز وارد شونده منجر به عملکرد بهینه کنترل گشتاور می‌شود. شکل (۷)،  $\theta_c^i$  را در موتور مورد مطالعه در این مقاله مشخص می‌کند. در این مقاله  $T_{ref,in}$  نصف گشتاور نامی و  $\theta_c^i$  برابر با  $38$  درجه در نظر گرفته شده است.

با جایگذاری رابطه (۱۴) در (۱۱) مقدار زاویه روشنی در سرعت‌های بالا به دست می‌آید. زمانی که سرعت افزایش می‌یابد مقدار زاویه روشنی به سمت زاویه عدم هم محوری کاهش پیدا می‌کند و با اعمال ولتاژ کمتری جریان فاز توانایی تعقیب جریان مرجع را باز می‌یابد. در این حالت خطای حلقه کنترل گشتاور در فاز وارد شونده کاهش می‌یابد.



شکل (۷): تعیین زاویه  $\theta_c^i$  در صفحه گشتاور فاز-موقعیت رتور

Fig. (7): Determining the angle of  $\theta_c^i$  in the phase torque-rotor angle plan

می‌شود. در حالت سوم به کمک روش اصلاحی مرجع [۱۱] علاوه بر اصلاح توابع اشتراکی گشتاور از زاویه روشنی متغیر استفاده می‌شود. در نهایت مقایسه بین حالت‌های مختلف از نظر بهبود ریبیل گشتاور در سرعت‌های بالا انجام خواهد شد. شکل (۹) نتایج شبیه‌سازی موتور سوئیچ رلوکتانس به کمک چهار تابع اشتراکی گشتاور متداول خطی، کسینوسی، مکعبی و نمایی، در سرعت ۱۲۰۰ rpm و گشتاور ۲۰ Nm را نشان می‌دهد. در این حالت مقدار زاویه روشنی ۳۵ درجه و مقدار زاویه خاموشی ۵۴ درجه در نظر گرفته شده است.

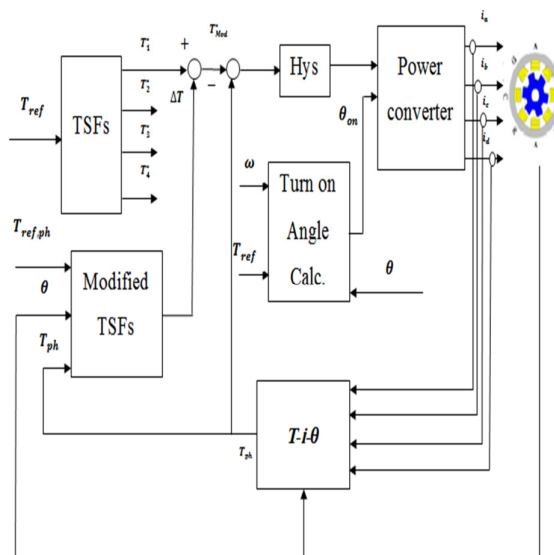
در قسمت‌های (الف) تا (د) شکل (۹) همان طور که مشاهده شد مقدار ریبیل گشتاور در سرعت ۱۲۰۰ rpm به طور چشمگیری محسوس می‌شد. در قسمت‌های (الف) تا (د) شکل (۱۰) با اعمال زاویه روشنی متغیر، تغییرات ریبیل گشتاور مشاهده می‌شود. همان طور که دیده می‌شود ریبیل گشتاور تا حدودی کنترل شده است.

در قسمت‌های (الف) تا (د) شکل (۱۱) نتایج شبیه‌سازی موتور سوئیچ رلوکتانس به کمک روش اصلاحی و کنترل زاویه روشنی در سرعت ۱۲۰۰ rpm و گشتاور ۲۰ Nm نشان داده شده است.

همانطور که دیده شد به کمک روش فوق تا حد زیادی ریبیل گشتاور در سرعت‌های بالا کنترل شد، به منظور مقایسه بیشتر منحنی شکل (۱۲) بیانگر گشتاور متوسط به سرعت موتور در چهار حالت بدون کنترل زاویه روشنی و بدون اصلاح توابع اشتراکی گشتاور، با کنترل زاویه روشنی و بدون اصلاح توابع اشتراکی گشتاور، بدون کنترل زاویه روشنی به همراه اصلاح توابع اشتراکی گشتاور و کنترل زاویه روشنی به همراه روش اصلاحی توابع اشتراکی در تابع اشتراکی خطی با گشتاور ۲۰ Nm می‌باشد.

با کنترل توابع اشتراکی گشتاور بدون تنظیم زاویه روشنی، کمبود گشتاور در فاز وارد شونده توسط جبران در فاز خارج شونده اصلاح می‌شود. این امر منجر به افزایش جریان در فاز خارج شونده تا همسایگی موقعیت هم محوری می‌شود. بدیهی است که به دلیل بالا بودن مقدار اندوکتانس در این ناحیه کاهش جریان به مقدار صفر نسبت به حالت بدون جبران سخت‌تر انجام شده و دنباله جریان وارد ناحیه گشتاور منفی در فاز خارج‌شونده خواهد شد.

این موضوع دلیل اصلی افت گشتاور متوسط با شیب زیاد در منحنی فوق با افزایش سرعت در روش اصلاح شده بدون تنظیم زاویه روشنی خواهد شد. منحنی شکل فوق بیانگر این موضوع است که با کنترل زاویه روشنی به همراه روش اصلاحی در سرعت‌های بالا افت ریبیل گشتاور در مقایسه با سه حالت ذکر شده دیگر بسیار کم بوده و به طور چشمگیری محسوس است که منجر به افزایش راندمان موتور نسبت به سایر روشهای متداول کاهش زاویه روشنی می‌شود.



شکل (۸): بلوک دیاگرام کلی کنترل موتور سوئیچ رلوکتانس

به کمک روش اصلاحی و کنترل زاویه روشنی

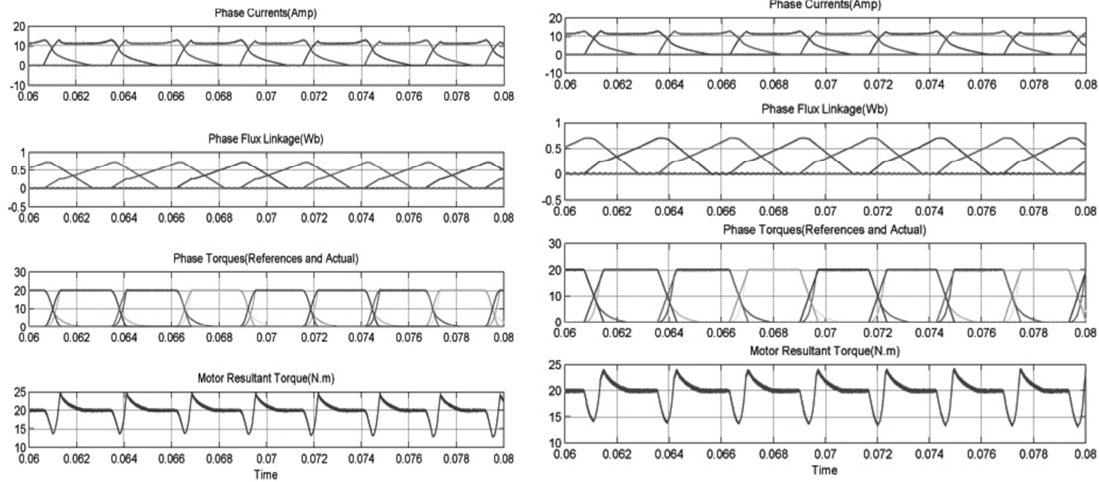
Fig. (8): The overall block diagram of SRM control using the combined proposed modification method and turn on angle control

در مقالات و تحقیقات گذشته زاویه روشنی تا جایی به عقب کشیده می‌شود که خطای گشتاور به مقدار مطلوب برسد ولی هدف از این تحقیق کاهش زاویه روشنی به سمت زاویه عدم هم محوری به نحوی است که تلفیق این روش با الگوریتم اصلاحی ارائه شده در مرجع [۱۱] مقدار ریبیل گشتاور در سرعت‌های بالا کاهش یابد و نهایتاً منجر به عملکرد مطلوب موتور و سیستم درایو نسبت به روشهای متداول کاهش زاویه روشنی شود. بلوک دیاگرام کلی کنترل موتور سوئیچ رلوکتانس به کمک روش اصلاحی و کنترل زاویه روشنی در شکل (۸) نشان داده شده است.

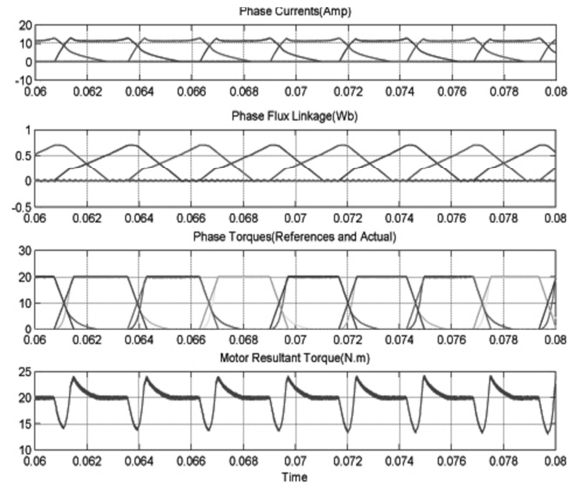
بلوک،  $T-i-\theta$ ، جدول- داده، مربوط به محاسبه گشتاور فاز بر اساس جریان فاز مربوطه و زاویه روتور و  $T_{Mod}^*$  گشتاور مرجع هر فاز پس از اصلاح ذکر شده توسط جدول (۱) است.

## ۵- نتایج شبیه‌سازی‌ها

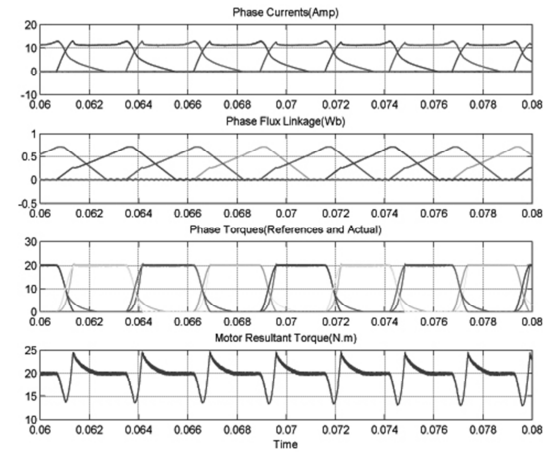
به منظور اعتبارسنجی و مقایسه روش پیشنهادی در کاهش ریبیل گشتاور، یک موتور سوئیچ رلوکتانس چهار فاز، با مشخصات ارائه شده در جدول پیوست مقاله در نظر گرفته شده است. این روش با استفاده از نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است و در سه حالت مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. در حالت اول فقط از توابع اشتراکی گشتاور استفاده شده و زاویه روشنی مقدار ثابتی در نظر گرفته شده است و در حالت دوم علاوه بر توابع اشتراکی گشتاور زاویه روشنی متغیر به منظور کاهش ریبیل گشتاور به موتور سوئیچ رلوکتانس اعمال



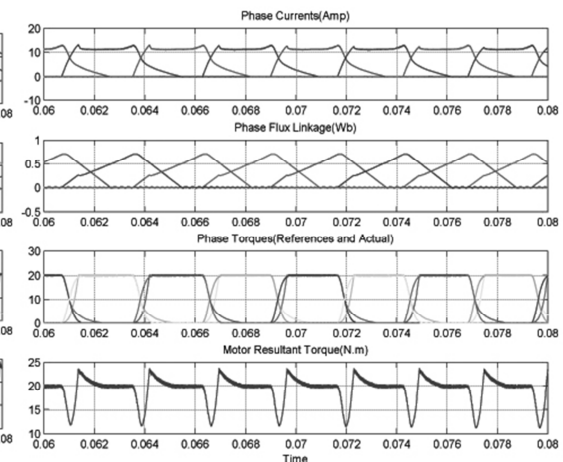
(ب)



(الف)



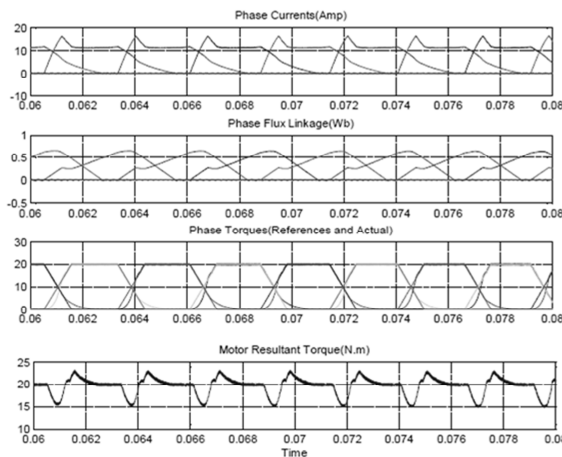
(د)



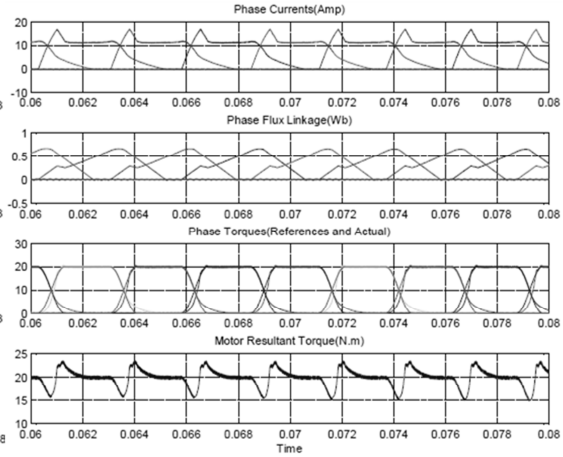
(ج)

شکل (۹): نمایش جریان، شار و گشتاور فاز به همراه گشتاور خروجی SRM در سرعت ۱۲۰۰rpm و گشتاور بار ۲۰Nm بدون روش اصلاحی و کنترل زاویه روشنی و با استفاده از توابع اشتراکی گشتاور (الف خطی ب) کسینوسی ج) مکعبی د) نمایی

Fig. (9): The schematic of currents, flux linkages and phase torques as well as motor resultant torque of SRM in the speed of 1200 rpm and load torque of 20 Nm without proposed modification method and controlling turn-on angle using a) linear b) cosine c) cubic d) exponential TSFs

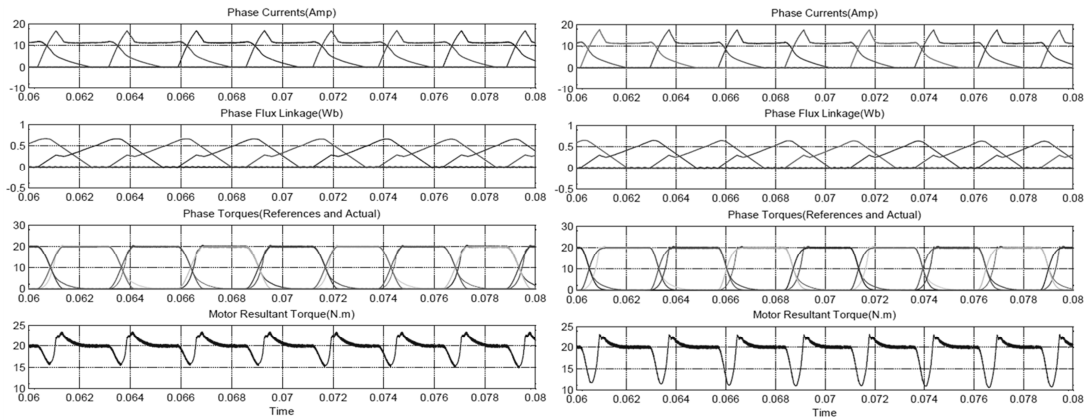


(ب)



(الف)



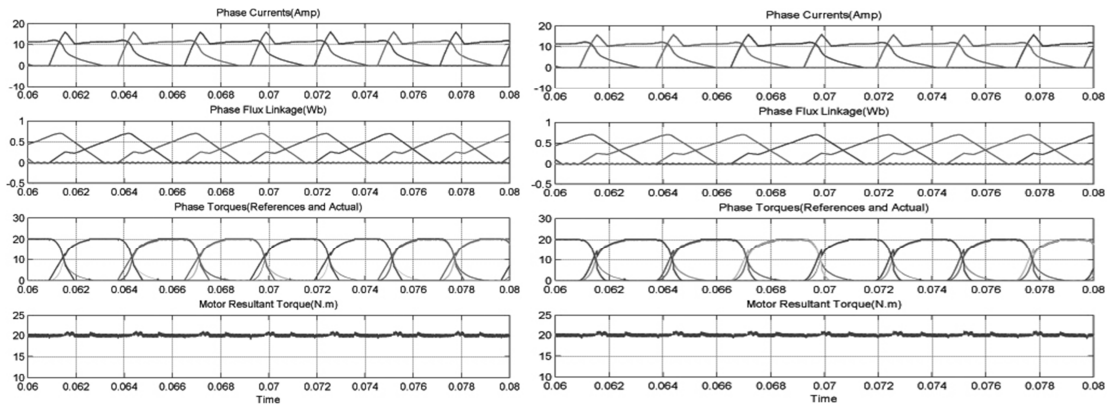


(د)

(ج)

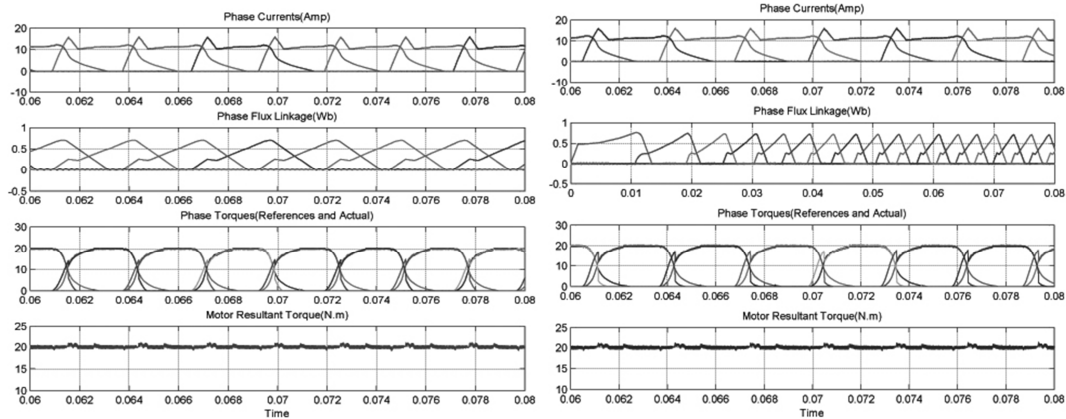
شکل (۱۰): نمایش جریان، شار و گشتاور فاز به همراه گشتاور خروجی SRM در سرعت ۱۲۰۰rpm و گشتاور بار ۲۰Nm به کمک کنترل زاویه روشنی با استفاده از توابع اشتراکی گشتاور (الف خطی ب) کسینوسی ج) مکعبی د) نمایی

Fig. (10): The schematic of currents, flux linkages and phase torques as well as motor resultant torque of SRM in the speed of 1200rpm and load torque of 20Nm using controlling turn-on angle a) linear b) cosine c) cubic d) exponential TSFs



(ب)

(الف)

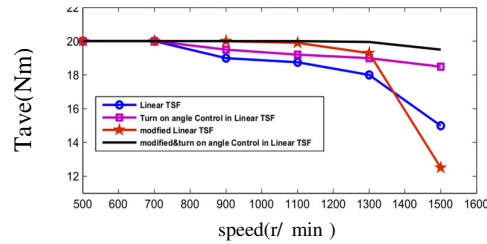


(د)

(ج)

شکل (۱۱): نمایش جریان، شار و گشتاور فاز به همراه گشتاور خروجی SRM در سرعت ۱۲۰۰rpm و گشتاور بار ۲۰Nm به کمک روش اصلاحی و کنترل زاویه روشنی با استفاده از توابع اشتراکی گشتاور (الف خطی ب) کسینوسی ج) مکعبی د) نمایی

Fig. (11): The schematic of currents, flux linkages and phase torques as well as motor resultant torque of SRM in the speed of 1200 rpm and load torque of 20 Nm using proposed modification method and controlling turn-on angle a) linear b) cosine c) cubic d) exponential TSFs



شکل (۱۲): منحنی گشتاور متوسط- سرعت در روش پیشنهادی و مقایسه آن با تابع اشتراکی گشتاور خطی در حالت‌های مختلف در بار ۲۰ Nm  
 Fig. (12): Average torque- speed characteristics of the proposed method and a comparison with linear TSF, in some different cases in the load of 20 Nm

مقادیر پیک جریان فاز در دو حالت بدون روش اصلاحی توابع اشتراکی گشتاور و روش اصلاحی به کمک تابع اشتراکی گشتاور خطی مطابق جدول (۴) مقایسه شده است. در این جدول ملاحظه می‌گردد که در سرعت‌های پایین تا متوسط (بین ۱۰۰ تا ۷۰۰ دور در دقیقه) در روش اصلاحی مقدار پیک جریان کاهش یافته اما با افزایش سرعت به دلیل اینکه خطای گشتاور در فاز وارد شونده افزایش یافته لذا دامنه جریان در فاز خارج شونده افزایش یافته و این خطا توسط فاز خارج شونده در حال جبران است لذا دامنه جریان در فاز خارج شونده افزایش خواهد یافت. در سرعت‌های پایین (کمتر از ۱۰۰ دور در دقیقه) به دلیل عدم وجود خطای گشتاور در حلقه‌های فازهای وارد و خارج شونده و عدم نیاز به اصلاح در توابع اشتراکی گشتاور، بیشینه جریان هر فاز در دو حالت یکسان به دست آمده است.

#### ۶- نتیجه گیری

در این مقاله از توابع اشتراکی گشتاور اصلاح شده برای کاهش ریبیل گشتاور در موتور سوئیچ رلوکتانس (SR) استفاده شد. در روش اصلاحی ابتدا خطای گشتاور در فاز وارد شونده به گشتاور مرجع در فاز خارج شونده اضافه شده و همچنین خطای گشتاور در فاز خارج شونده به عنوان یک مقدار منفی به گشتاور مرجع در فاز وارد شونده اضافه می‌شود که با الگوریتم‌های منطقی ساده و قابل پیاده‌سازی بیان شد. این روش منجر به بهبود ریبیل گشتاور در سرعت‌های متوسط و بالا و همچنین کاهش پیک جریان به ازای گشتاور بار ثابت شد. عیب عمده این روش عدم کنترل زاویه روشنی در آن است. در ادامه روش تحلیلی پیشنهادی برای کنترل زاویه روشنی به منظور کاهش ریبیل گشتاور در برابر افزایش سرعت بیان شد. که در این روش در همسایگی موقعیت عدم هم محوری با تقریب منحنی اندوکتانس و تحلیل رابطه ولتاژ فاز موتور زاویه روشنی بهینه به منظور تعقیب جریان مرجع فاز به دست آمد. لذا در هر لحظه زاویه روشنی متغیر متناسب با سرعت به سیستم کنترل کموتاسیون موتور اعمال می‌شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که خطای حلقه کنترل گشتاور در فاز وارد شونده کاهش می‌یابد و این امر سبب خواهد شد تا گستره سرعت با عملکرد مطلوب در کاهش ریبیل گشتاور نسبت به مراجع و تحقیقات قبلی افزایش یافته و نمودارهای مقایسه‌ای در این خصوص آورده شد.

در جدول (۲) تغییرات گشتاور متوسط و زاویه روشنی با افزایش سرعت در تابع اشتراکی گشتاور خطی به کمک روش اصلاحی و کنترل زاویه روشنی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت موتور، زاویه روشنی به سمت زاویه عدم هم‌محوری کاهش می‌یابد. در جدول (۲) همچنین مقادیر پیک جریان فاز و درصد ریبیل گشتاور حاصل شده از رابطه (۱۵) به منظور مقایسه کمی نشان داده شده است.

$$TRF \% = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{ave}} * 100 \quad (15)$$

همانطور که از مقادیر این جدول مشخص است مقدار درصد ریبیل گشتاور تا سرعت ۱۳۰۰ دور در دقیقه کمتر یا مساوی ۱۰٪ است و این نشان می‌دهد که مقدار ریبیل گشتاور در مقایسه با حالتی که هیچ کنترل کننده‌ای وجود ندارد بسیار کاهش یافته است. در جدول (۳) با کاهش زاویه روشنی بدون روش اصلاحی در حالتی که در تابع اشتراکی گشتاور خطی هیچ کنترل کننده زاویه‌ای وجود ندارد درصد ریبیل گشتاور در سرعت‌های مختلف در نظر گرفته شده است. در این جدول مشاهده می‌شود که با کاهش زاویه روشنی در تمام سرعت‌ها درصد ریبیل گشتاور کاهش می‌یابد ولی مقدار آن حتی در زوایای روشنی کاهش یافته نیز غیر قابل قبول است. با مقایسه جداول (۲) و (۳) از نظر درصد ریبیل گشتاور مشخص می‌شود که در صورتی که معیار مقایسه به عنوان نمونه، درصد ریبیل گشتاور کمتر از ۳۰ درصد باشد، در حالتی که روش اصلاحی به همراه کنترل زاویه روشنی در تابع اشتراکی گشتاور خطی همزمان به کار رفته باشد در مقایسه با حالتی که روش اصلاحی استفاده نگردد در سرعت یکسان مقدار زاویه روشنی کمتر به عقب کشیده می‌شود. در سرعت‌های ۵۰۰ تا ۸۰۰ دور در دقیقه با توجه به جدول (۲) و (۳) مقدار این مقایسه کمی نیز نشان از برتری روش فوق می‌باشد. به عنوان مثال در سرعت ۸۰۰ دور در دقیقه با توجه به جدول (۳) در درصد ریبیل گشتاور کمتر از ۳۰ درصد زاویه روشنی ۳۱ درجه می‌باشد. در صورتی که مطابق با جدول (۲) این زاویه ۳۳/۷۷ درجه می‌باشد که نشان می‌دهد زاویه روشنی به میزان کمتری عقب کشیده شده است. هرچه زاویه روشنی کمتر کاهش یابد تلفات اهمی ناشی از مقاومت سیم‌پیچی نیز کاهش یافته و این امر منجر به افزایش راندمان درایو خواهد شد. در زاویه روشنی ۳۵ درجه و زاویه خاموشی ۵۴ درجه

Table (2): Average torque and turn-on angle variations with peak phase current and torque ripple factor due to increasing motor speed in the linear TSF using the proposed modification method and turn-on angle control

جدول (۲): تغییرات گشتاور متوسط و زاویه روشنی به همراه مقادیر پیک جریان فاز و درصد ریپل گشتاور با افزایش سرعت در تابع اشتراک گشتاور خطی با استفاده از روش اصلاحی و کنترل زاویه روشنی

$\omega$ (rpm)	500	600	700	800	900	1100	1300	1500	1600
$T_{ave}$ (Nm)	20	20	20	20	20	20	19.96	19.5	17.5
$\theta$ ( deg )	37.96	37.57	34.18	33.37	33.37	32.57	31.82	31.01	30.6
$I_{peak}$ (A)	14.6	15.5	16	16	16	16	16.1	16.14	16
TRF%	7	7	7	7.5	7.5	8.55	10	15	24.4

Table (3): Torque ripple factor variations in the linear TSF with turn on reduction without modification method in different speeds

جدول (۳): تغییرات درصد ریپل گشتاور (TRF%) در تابع اشتراکی گشتاور خطی با کاهش زاویه روشنی بدون روش اصلاحی در سرعت‌های مختلف

$\theta_{on}$ ( deg )	$\omega$ (rpm)	500	600	700	800	900
34		28	28.5	33	39	43
33		22	26	27.5	34	40
32		19.5	23	27	32	37
31		19	23	24.5	29	37

Table (4): A comparison of peak phase current in different speeds for two cases of with and without reference [10] modification method using the linear TSF

جدول (۴): مقایسه پیک جریان فاز در سرعت‌های مختلف در دو حالت بدون روش اصلاحی و روش اصلاحی مرجع [۱۱] به کمک تابع اشتراک گشتاور خطی

$\omega$ (rpm)	10	50	100	300	500	700	900	1100	1300	1500
Peak phase currant(A) (linear TSF)	13	13	14.5	14.55	14.5	14	13	12.85	12.9	10.6
Peak phase currant(A) (Modified linear TSF)	13	13	14.5	14.5	14.5	13.3	13.5	13.8	14.2	23

### پی‌نوشت

1. Switch Reluctance Motor (SRM)
2. Torque Sharing Function (TSF)

### پیوست

#### Nominal characteristics of the studied four phases Switch Reluctance motor

مشخصات نامی موتور چهار فاز SR مورد مطالعه

عنوان	مقدار
تعداد فاز	4
توان نامی	4 kw
ولتاژ نامی	380 v
جریان نامی	9 A
سرعت نامی	1500 rpm
گشتاور نامی	26 Nm

## References

- [1] S.K. Sahoo, S. Dasgupta, S.K. Panda, J.X. Xu, "A Lyapunov function based robust direct torque controller for switched reluctance motor drive system", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 27, pp. 555-564, Feb. 2012.
- [2] S. Saberian-Borojeni, "Fuzzy second order sliding mode speed observer for a synchronous reluctance motor with predictive control", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, Vol. 4, No. 13, pp. 45-52, Winter 2013 (in Persian).
- [3] R. Krishnan, "Switched reluctance motor drives modeling, simulation, analysis, design and applications", Boca Rotan, FL: CRC Press, 2001.
- [4] V.P. Vujicic, "Minimization of torque ripple and copper losses in switched reluctance drive", *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 27, No. 1, pp. 388-399, Jan. 2012.
- [5] B. Fahimi, G. Suresh, J.P. Johnson, M. Ehsani, M. Arefeen, I. Panahi, "Self-tuning control of switched reluctance motors for optimized torque per ampere at all operating points", *Proceeding of the IEEE/APEC*, pp. 778-783, 1998.
- [6] M.M. Beno, N.S. Marimuthu N.A. Singh, "Improving power factor in switched reluctance motor drive system by optimising the switching angles", *Proceeding of the IEEE/TENCON*, pp. 1-5, Hyderabad, Nov. 2008.
- [7] Y. Sozer, 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, May 2007.
- [8] X.D. Xue, K.W.E. Cheng, "Optimization and evaluation of torque-sharing functions for torque ripple minimization in switched reluctance motor drives", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 24, No. 9, pp. 2076-2090, Sep. 2009.
- [9] M. Dowlatshahi, S.M. Saghaiannejad, J.W. Ahn, M. Moallem, "Copper loss and torque-ripple minimization of switched reluctance motors considering nonlinear and magnetic saturation effects", *Journal of Power Electronics*, Vol. 14, No. 2, pp. 351-361, March. 2014.
- [10] Y.Z. Xu, R. Zhong, S.L.Lu.L. Chen, "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, Nov. 2012.
- [11] M. Dowlatshahi, S.M. Saghaiannejad, J.W. Ahn, M. Moallem, "Minimization of torque-ripple in switched reluctance motors over wide speed range", *J Electr Eng Technol*, Vol. 9, No. 2, pp. 478-488, 2014.
- [12] M. Illic-spong, T.J.E. Miller, S.R. MacMinn, J.S. Thorp, "Instantaneous torque control of electric motor drives", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol.2, pp. 55-61, Jan. 1987.
- [13] D.S. Schramm, B.W. Williams, T.C. Green, "Torque ripple reduction of switched reluctance motors by PWM phase current optimal profiling", *Proceeding of the IEEE/PESC*, Vol. 2, pp. 857-860, 1992.
- [14] I. Husain, M. Ehsani, "Torque ripple minimization in switched reluctance drives by PWM current control", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 11, No. 1, pp.83-88, Jan. 1996.
- [15] S.C. Sahoo, J.X. Xu, S.K. Panda, "Determination of current waveforms for torque ripple minimization in switched reluctance motors using iterative learning: An investigation", *IEE Proceeding Electric Power Applications*, Vol. 146, No. 4, pp. 369-377, Jul. 1999.