

کاهش ریبیل گشتاور در موتورهای سوئیچ رلوکتانس با بهره‌گیری از منطق فازی جهت کنترل دینامیکی پارامترهای تابع توزیع گشتاور در سرعت‌های پایین

حسن مرادی چشمه‌بیگی و احسان نوری

موتور را محدود کرده است ریبیل گشتاور و نویز صوتی هست که ناشی از مکانیزم تولید گشتاور ناپیوسته در این موتور می‌باشد. در سال‌های اخیر موتورهای سوئیچ رلوکتانس با پیشرفت ادوات الکترونیک قدرت به صورت عمده در کاربردهای صنعتی و سرعت بالا مورد توجه محققان قرار گرفته است [۱] و [۲]. یکی از عمده دلایل ایجاد ریبیل گشتاور، غیر خطی بودن عملکرد موتور و مکانیزم گسسته تولید گشتاور در این موتور می‌باشد به طوری که گشتاور خروجی به صورت حاصل جمع گشتاور تولیدی توسط هر فاز این موتور است که هر کدام به صورت مستقل کنترل می‌شوند. بیشترین ریبیل گشتاور در این موتورها مربوط به ناحیه کموتاسیون است که گشتاور تولیدی از یک فاز به فاز دیگر منتقل می‌شود. برای استفاده از این نوع موتورها با کارایی بالا، نیازمند حرکتی نرم و بدون ریبیل گشتاور هستیم. به صورت کلی تحقیقات انجام‌شده در زمینه کاهش ریبیل گشتاور به دو دسته کلی تقسیم می‌شود [۳] تا [۱۳]:

الف) کاهش ریبیل گشتاور با تغییر و بهبود ساختار فیزیکی موتور، شامل طول قوس قطب روتور و استاتور و ...

ب) بهبود روش‌های کنترلی در درایوکردن موتور شامل کنترل پارامترهای ولتاژ تغذیه، زوایای روشن و خاموش کردن کلیدها، کنترل پروفیل جریان که به صورت کلی به صورت روش‌های هوش مصنوعی، خودتنظیم و تحلیلی قابل دسته‌بندی می‌باشند.

در [۱] دسته‌ای از توابع توزیع گشتاور معرفی شده‌اند که علاوه بر در نظر گرفتن ریبیل گشتاور، میزان تلفات مسی نیز در نظر گرفته شده است. عیب روش پیشنهادی در این مقاله بهره‌گیری از مدل خطی موتور سوئیچ رلوکتانس می‌باشد. در [۲] شکل موج جریان فازها در زمان کموتاسیون با لحاظ کردن کاهش تلفات اهمی معین شده که موجب کاهش ریبیل گشتاور نیز می‌شود. در [۳] زاویه روشن شدن بهینه سوئیچ‌ها بر حسب ولتاژ فاز و سرعت موتور با توجه به یک رابطه تحلیلی محاسبه می‌شود. در این مرجع از مدل غیر خطی موتور استفاده شده است. در [۴] چهار تابع توزیع گشتاور متداول تحلیل شده و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک جهت کاهش تلفات مسی و ریبیل گشتاور، زاویه روشنی و هم‌پوشانی بهینه شده است. در [۵] بدون تغییر در زاویه روشنی، خاموشی و هم‌پوشانی، ریبیل گشتاور به گونه‌ای کاهش یافته که خطای گشتاور در هر فاز در ناحیه کموتاسیون به گشتاور مرجع فاز مجاور اضافه شده است، طوری که گشتاور برآیند در این ناحیه ثابت باقی بماند.

در [۶] و [۷] از روش تابع توزیع گشتاور برای بهبود ریبیل گشتاور در موتور سوئیچ رلوکتانسی استفاده شده که در [۷] از تکنیک تابع توزیع گشتاور به صورت offline برای کاهش ریبیل گشتاور بهره گرفته شده است. در [۸] یک مدار راه‌انداز بر مبنای تکنیک TSF به صورت online به منظور کاهش ریبیل گشتاور در سرعت‌های ارائه‌شده است. یک روش

چکیده: در موتورهای سوئیچ رلوکتانس نقطه کار در ناحیه اشباع و رفتار غیر خطی سبب شده علاوه بر ناحیه کموتاسیون در ناحیه غیر کموتاسیون نیز ریبیل گشتاور ایجاد گردد. در این تحقیق جهت کاهش ریبیل گشتاور در سرعت‌های پایین، در ناحیه غیر کموتاسیون به جای تزریق یک جریان ثابت از تزریق یک جریان متغیر بر حسب موقعیت روتور بهره گرفته شده و جهت کاهش ریبیل گشتاور در ناحیه کموتاسیون از روش تابع توزیع گشتاور اصلاح‌شده استفاده گردیده است. از آنجا که در روش تابع توزیع گشتاور با افزایش سرعت موتور به علت کاهش مدت زمان کموتاسیون و خاصیت سلفی سیم‌پیچ‌های استاتور، جریان موتور نمی‌تواند در این زمان کوتاه از جریان مرجع پیروی کند، لذا با بهره‌گیری از یک کنترل‌کننده فازی جهت اصلاح تابع توزیع گشتاور بهره گرفته شده است. در روش تابع توزیع گشتاور اصلاح‌شده، با فیدبک از سرعت موتور و اعمال به یک کنترل‌کننده فازی، بر حسب میزان سرعت، زاویه هم‌پوشانی اصلاح‌شده به گونه‌ای که با افزایش زاویه هم‌پوشانی مدت زمان کموتاسیون افزایش داده شده و شیب تغییرات جریان مرجع کندتر شده که موجب می‌شود جریان واقعی موتور بتواند در این زمان بیشتر خود را با جریان مرجع تطبیق دهد و از به وجود آمدن ریبیل گشتاور جلوگیری نماید. در روش پیشنهادی سرعت موتور، خطای گشتاور و مشتق خطای گشتاور به عنوان ورودی به کنترل‌کننده فازی می‌باشند که زاویه روشنی و زاویه هم‌پوشانی بین فازها به صورت تابعی از سرعت موتور تغییر کرده و گشتاور مرجع فاز مجاور نیز به صورت تابعی از خطای گشتاور و مشتق خطای گشتاور اصلاح می‌شود. در این روش تابع توزیع گشتاور به صورت دینامیکی و لحظه‌ای اصلاح می‌گردد. در پایان نتایج شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار متلب-سیمولینک با استفاده از مدل یک موتور سه‌فاز سوئیچ رلوکتانسی ۶ به ۴ برای رنج سرعت ۰ تا ۱۵۰۰ دور بر دقیقه ارائه شده که صحت الگوریتم پیشنهادی را تأیید می‌نماید.

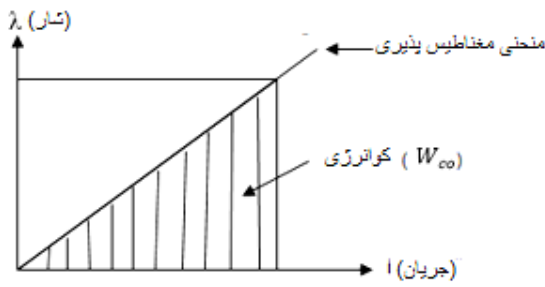
کلیدواژه: موتور سوئیچ رلوکتانس، کاهش ریبیل گشتاور، تابع توزیع گشتاور، منطق فازی، زاویه روشنی.

۱- مقدمه

موتورهای سوئیچ رلوکتانس از ساختاری ساده و مقاوم، هزینه ساخت پایین و قابلیت کار در سرعت‌های بالا و محیط‌های گرم و پر گرد و غبار برخوردار هستند. یکی از مشکلاتی که به طور اساسی به کارگیری این

این مقاله در تاریخ ۹ آذر ماه ۱۳۹۵ دریافت و در تاریخ ۱۰ آذر ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد و حاصل مطالعات و تحقیقات آزمایشگاهی پایان‌نامه کارشناسی ارشد تحت همین عنوان در دانشگاه رازی است.

حسن مرادی چشمه‌بیگی، استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، (email: ha.moradi@razi.ac.ir).
احسان نوری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، (email: ehsannouri2015@gmail.com).



شکل ۳: منحنی مغناطیس‌شوندگی SRM.

که در (۲) شار پیوندی هر فاز می‌باشد. رابطه اندوکتانس که به صورت تابعی از جریان و موقعیت موتور می‌باشد باعث غیر خطی بودن عملکرد موتور می‌شود و اگر فرض را بر خطی بودن موتور بگیریم، با ساده‌سازی، رابطه گشتاور تولیدی برای هر فاز به صورت (۳) تا (۶) به دست می‌آید

$$W_{co} = \int \lambda di \quad (3)$$

که در رابطه فوق W_{co} بیانگر کو انرژی می‌باشد که به صورت سطح زیر منحنی مغناطیس‌شوندگی که در شکل ۳ نشان داده شده تعریف می‌شود

$$T(i, \theta) = \frac{\partial W_{co}}{\partial \theta} \quad (4)$$

$$T(i, \theta) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (5)$$

و گشتاور کل برابر مجموع گشتاور تولیدی هر فاز می‌باشد

$$T_{total} = \sum_{n=1}^m T_n(i, \theta) \quad (6)$$

در واقع (۵) اصول تولید گشتاور در این موتور را نشان می‌دهد. جهت عملکرد در ناحیه موتوری باید در ناحیه‌ای که شیب اندوکتانس مثبت است به فاز مربوط جریان اعمال گردد و قبل از این که شیب اندوکتانس منفی شود باید جریان فاز قطع گردد تا گشتاور منفی ایجاد نشود. سپس برای ادامه حرکت باید جریان به فاز مجاور که دارای شیب مثبت اندوکتانس است اعمال گردد. به عنوان مثال برای یک موتور سوئیچ رلوکتانس ۴/۶ نمونه سیکل کاری هر ۹۰ درجه مکانیکی یک بار تکرار می‌شود.

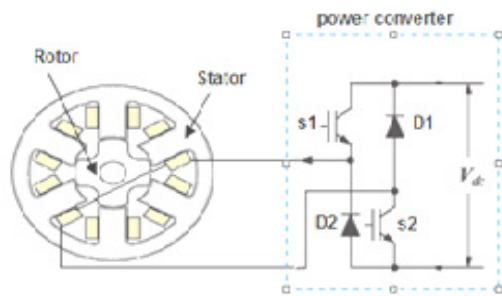
۳- الگوریتم پیشنهادی

در این مقاله جهت کاهش ریپل گشتاور در ناحیه غیر کموتاسیون به جای تزریق یک جریان ثابت از تزریق یک جریان متغیر بر حسب موقعیت روتور بهره گرفته شده و جهت کاهش ریپل گشتاور در ناحیه کموتاسیون از روش تابع توزیع گشتاور اصلاح شده استفاده گردیده است.

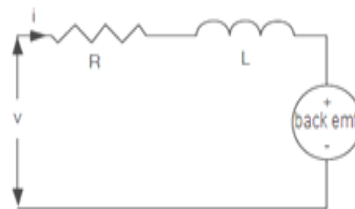
۳-۱ روش کنترلی پیشنهادی جهت کاهش ریپل گشتاور در ناحیه غیر از کموتاسیون

با توجه به این که مدل به کار گرفته شده یک مدل واقعی با در نظر گرفتن اثرات اشباع و توزیع می‌باشد، در ناحیه غیر از کموتاسیون نیز ریپل گشتاور خواهد بود. در واقع اگر مدل خطی شده موتور سوئیچ رلوکتانس در نظر گرفته شود برای درایو موتور اطلاع از منحنی تغییرات اندوکتانس بر حسب موقعیت موتور برای هر فاز نیاز خواهد بود که به صورت خلاصه در ادامه بیان می‌شود.

منحنی شکل ۴ اندوکتانس بر حسب موقعیت برای یک فاز موتور SR می‌باشد که برای یک موتور نمونه ۶/۴ سه فاز برای دو فاز دیگر هر کدام



شکل ۱: شماتیک موتور سوئیچ رلوکتانس ۴/۶ به همراه مدار درایو.



شکل ۲: مدار معادل یک فاز موتور سوئیچ رلوکتانس.

هوشمند با بهره‌گیری از یک کنترلر فازی برای کنترل زوایای تحریک موتور سوئیچ رلوکتانس به صورت خودتنظیم در [۱۰] معرفی شده است. در [۱۱] از یک کنترلر مقاوم با استفاده از تابع Lyapunov برای راه‌اندازی و کنترل موتور سوئیچ رلوکتانس استفاده شده است. در [۱۲] و [۱۳] با کنترل دو پارامتر جریان و گشتاور برای کاهش و کنترل ریپل گشتاور استفاده شده است.

در این مقاله از مدل غیر خطی موتور سوئیچ رلوکتانس بهره گرفته شده که علاوه بر ناحیه کموتاسیون در ناحیه غیر کموتاسیون نیز دارای ریپل گشتاور است. جهت کاهش ریپل گشتاور این موتور از همه پارامترهای کنترلی تابع توزیع گشتاور یعنی زاویه روشنی، زاویه هم‌پوشانی و گشتاور مرجع فاز مجاور با استفاده از منطق فازی استفاده شده است. این مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی شده است: بخش دوم شامل اصول کار موتور سوئیچ رلوکتانس و اصول تولید گشتاور ارائه شده است. بخش سوم انواع تابع توزیع گشتاور متداول توصیف شده و بخش چهارم تابع توزیع گشتاور اصلاح شده با استفاده از منطق فازی ارائه گردیده است. بخش پنجم نتایج شبیه‌سازی و بخش ششم شامل جمع‌بندی می‌باشد.

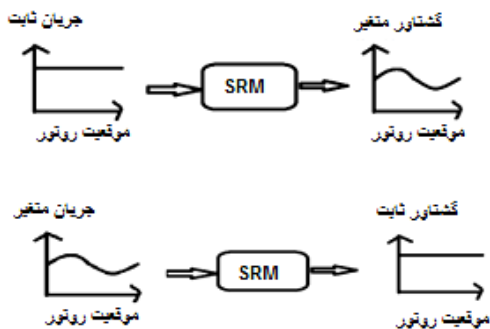
۲- اصول تولید گشتاور در موتور سوئیچ رلوکتانس

موتور سوئیچ رلوکتانس (SRM) دارای ساختاری با قطب‌های برجسته در روتور و استاتور است که روتور بدون سیم‌پیچی و استاتور با سیم‌پیچی متمرکز می‌باشد. شکل ۱ موتور سوئیچ رلوکتانس سه‌فاز ۴/۶ که دارای ۴ قطب بر روی روتور و ۶ قطب بر روی استاتور می‌باشد به همراه مدار درایو مربوط و شکل ۲ مدار معادل یک فاز موتور سوئیچ رلوکتانس را نشان می‌دهد.

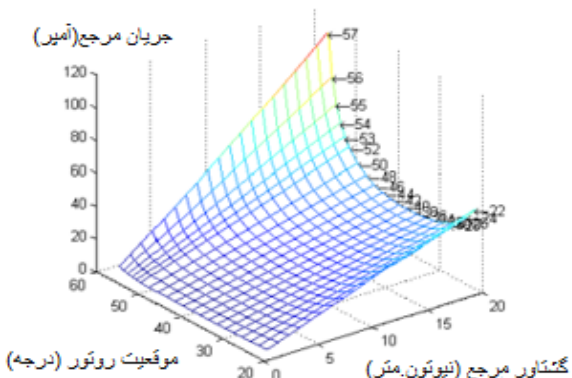
R مقاومت معادل هر فاز و L اندوکتانس معادل هر فاز می‌باشد که به جریان و موقعیت موتور بستگی دارد. معادله ولتاژ برای فاز n ام موتور سوئیچ رلوکتانس به صورت (۱) و (۲) بیان می‌گردد [۱۴]

$$V_n = R_s i_n + \frac{d\lambda_n(\theta_r, i)}{dt} \quad (1)$$

$$V_n = R_s i_n + L(\theta_r, i) \frac{di_n}{dt} + \frac{dL(\theta_r, i)}{d\theta_r} \omega_r i_n \quad (2)$$



شکل ۶: راه حل پیشنهادی جهت کاهش ریپل گشتاور در ناحیه غیر کموتاسیون.



شکل ۷: نمایش سه‌بعدی بلوک Lookup Table.

بر ناحیه کموتاسیون یعنی ناحیه‌ای که فاز بعدی عهده‌دار تولید گشتاور مورد نیاز می‌شود و فاز تحریک‌شده قبلی خاموش می‌شود، در نواحی غیر کموتاسیون نیز دارای ریپل گشتاور می‌باشد (شکل ۵-ب).

همان طور که قبلاً اشاره شد در مدل خطی‌شده موتورهای سوئیچ رلوکتانس ریپل گشتاور تنها در ناحیه کموتاسیون یا سوئیچ‌شدن فازها اتفاق می‌افتد اما با توجه به این که مدل مورد استفاده در شکل ۵ واقعی می‌باشد (اثرات تزویج و اشباع در نظر گرفته شده) ریپل گشتاور در تمام نواحی درایو موتور محسوس می‌باشد. در اینجا با دادن یک جریان ثابت به فاز موتور یک گشتاور با ریپل زیاد در خروجی به دست آمد. در این ناحیه راه حل پیشنهادی مطابق شکل ۶ بدین گونه است که برای به دست آوردن یک گشتاور ثابت، یک جریان مرجع متغیر نسبت به زاویه روتور به فازها اعمال می‌گردد.

جهت عملی‌نمودن راه حل پیشنهادی از یک جدول ارجاع^۱ سه‌بعدی گشتاور-جریان-زاویه روتور $(T-i-\theta)$ طبق شکل ۷ استفاده شده است. در بلوک Lookup Table دو ورودی گشتاور مرجع و زاویه روتور به عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شود و متناسب با آن در هر موقعیت موتور جریان مرجع متناسب تولید می‌گردد و گشتاور مطلوب به دست می‌آید. باید توجه داشت که داده‌های جدول ارجاع با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است (Off-Line Test).

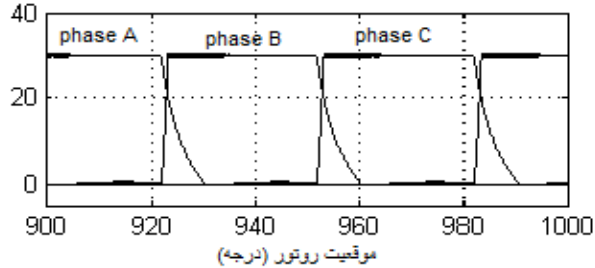
شکل ۸ نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی روش پیشنهادی و با به کارگیری جدول ارجاع سه‌بعدی گشتاور-جریان-زاویه روتور $(T-i-\theta)$ را نشان می‌دهد. در این روش با تحریک فازهای موتور با یک جریان مرجع متغیر نسبت به زاویه روتور (شکل ۸-الف) مشکل ریپل گشتاور در ناحیه غیر کموتاسیون تا حد قابل قبولی مرتفع گردیده است اما همچنان مشکل ریپل گشتاور در ناحیه کموتاسیون مشهود می‌باشد (شکل ۸-ب) که روش تابع توزیع گشتاور اصلاح‌شده پیشنهاد می‌شود.

1. Lookup Table



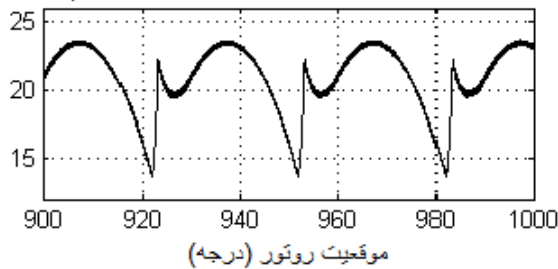
شکل ۴: منحنی تغییرات اندوکتانس بر حسب موقعیت روتور.

جریان (آمپر)



(الف)

گشتاور (نیوتون.متر)



(ب)

شکل ۵: (الف) موج جریان ثابت اعمال‌شده به موتور SR و (ب) گشتاور تولیدی منتج از جریان ثابت.

به اندازه ۳۰ درجه مکانیکی شیفت مکانی دارند. با توجه به شکل ۴ زوایای $\theta_1 - \theta_2$ به این صورت تعریف می‌شوند: ناحیه $\theta_1 - \theta_2$ از زمانی که لبه قطب روتور و استاتور روبه‌روی هم قرار می‌گیرند شروع می‌شود و تا زمانی که قطب روتور کاملاً زیر استاتور قرار بگیرد ادامه دارد که در این ناحیه شیب اندوکتانس مثبت است. در ناحیه $\theta_3 - \theta_4$ قطب‌های استاتور و روتور کاملاً زیر هم قرار دارند و اندوکتانس مقدار ثابتی دارد و دارای شیب صفر می‌باشد که به ناحیه هم‌محوری کامل معروف می‌باشد. ناحیه $\theta_5 - \theta_6$ از زمانی که قطب روتور می‌خواهد از زیر قطب استاتور خارج شود شروع شده و تا زمانی که قطب روتور کاملاً از زیر استاتور خارج شده ادامه دارد. در ناحیه $\theta_7 - \theta_8$ قطب روتور کاملاً از زیر استاتور خارج شده و به ناحیه غیر هم‌محوری معروف است.

حال جهت عملکرد در ناحیه موتوری و تولید گشتاور مثبت باید شیب اندوکتانس مثبت باشد و به فاز مربوط جریان اعمال گردد. با توجه به رابطه گشتاور تولیدی برای موتور سوئیچ رلوکتانس (رابطه ۵) در ناحیه $\theta_1 - \theta_2$ شیب اندوکتانس مثبت و مقدار ثابتی است و اگر در این ناحیه جریان ثابتی به فاز مربوط اعمال گردد باید گشتاور ثابتی در خروجی حاصل شود. اما با توجه به این که مدل مورد نظر مدلی غیر خطی است در این ناحیه نیز ریپل گشتاور مشاهده می‌گردد. شکل ۵ نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی برای گشتاور خروجی با دادن یک جریان ثابت به هر فاز (شکل ۵-الف) در ناحیه مذکور ارائه شده است. همان طور که در نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مشاهده می‌شود گشتاور خروجی علاوه

$$f_{Expon} = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{(\theta - \theta_{on})^r}{\theta_{ov}}\right) \\ \exp\left(-\frac{(\theta_{off} - \theta_{ov} - \theta)^r}{\theta_{ov}}\right) \end{cases} \Rightarrow \quad (9)$$

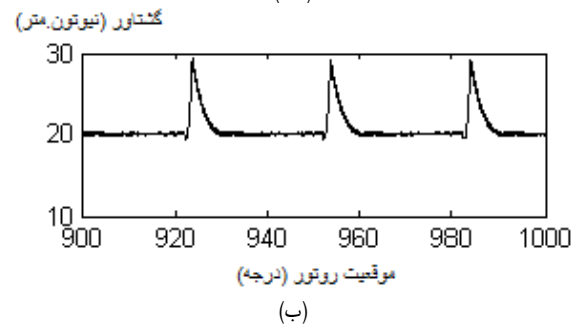
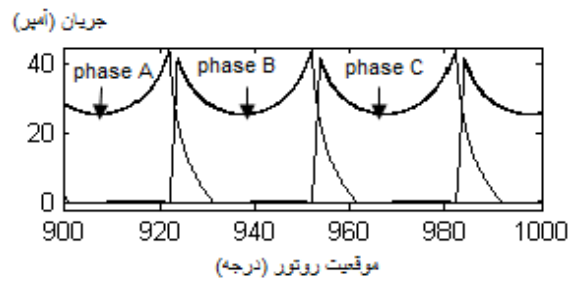
$$\begin{cases} \theta_{on} \leq \theta \leq \theta_{on} + \theta_{ov} \\ \theta_{on} + \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_{off} - \theta_{ov} \\ \theta_{off} - \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_{off} \end{cases}$$

$$f_{sinous} = \begin{cases} \sin^r\left(\frac{\pi}{2} \frac{\theta - \theta_{on}}{\theta_{ov}}\right) \\ \sin^r\left(\frac{\pi}{2} \frac{\theta_{off} - \theta}{\theta_{ov}}\right) \end{cases} \Rightarrow \quad (10)$$

$$\begin{cases} \theta_{on} \leq \theta \leq \theta_{on} + \theta_{ov} \\ \theta_{on} + \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_{off} - \theta_{ov} \\ \theta_{off} - \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_{off} \end{cases}$$

در روابط فوق θ_{ov} ، θ_{off} و θ_{on} به ترتیب زوایای همپوشانی بین فازهای مجاور، زاویه خاموشی و زاویه روشنی هر فاز می‌باشد. لازم به ذکر است در این روش در لحظه کموتاسیون گشتاور تولیدی فاز فعال و فازی که آماده روشن شدن است کنترل می‌شوند و متناسب با گشتاور تولیدی هر فاز در هر موقعیت موتور، جریان مرجع متناسب با آن با استفاده از جدول ارجاع سه بعدی $T-i-\theta$ محاسبه شده و بعد از مقایسه با جریان موتور از رله هیستریزس عبور داده می‌شود تا جریان در مقدار مرجع ثابت شود. در واقع در زمانی که دندان روتور در وضعیت همپوشانی قرار دارد، فازی که قبلاً وظیفه تولید کل گشتاور مورد انتظار را داشته به یکی از صورت‌های خطی، نمایی، سینوسی یا مکعبی گشتاورش کاهش پیدا کرده و همچنین گشتاور فاز مجاور به صورت هم‌زمان با کاهش گشتاور فاز قبلی افزایش خواهد داشت. بعد از اتمام، زاویه همپوشانی وظیفه تولید کل گشتاور مورد نظر را بر عهده می‌گیرد و فاز قبلی خاموش می‌شود. توجه شود که در تمام نقاط همپوشانی جمع گشتاور تولیدی هر دو فاز برابر گشتاور مورد انتظار می‌باشد. از جمله مشکلات روش کنترلی تابع توزیع گشتاور این است که با افزایش سرعت موتور، مدت زمان جهت عمل کموتاسیون بین فازها کاهش پیدا می‌کند که با توجه به خاصیت سلفی که سیم‌پیچ‌های هر فاز دارند جریان هر فاز نمی‌تواند در این مدت زمان کوتاه از جریان مرجع پیروی کند. در نتیجه به صورت ناخواسته دنباله جریان منجر به تولید ریپل گشتاور می‌شود که این موضوع سبب می‌گردد تابع توزیع گشتاور نیاز به یک اصلاح داشته باشد.

تابع توزیع گشتاور شامل سه پارامتر کنترلی (۱) زاویه روشنی، (۲) زاویه همپوشانی بین فازها و (۳) گشتاور مرجع می‌باشد که قابل کنترل هستند. همان‌طور که در شکل‌های ۹ تا ۱۳ مشاهده می‌گردد در واقع هرچه زاویه همپوشانی بیشتر شود شیب تغییرات جریان کمتر شده و به نوعی زمان لازم جهت عمل کموتاسیون فازها افزایش یافته است که موجب می‌شود جریان کمتر از مقدار مرجع انحراف پیدا کند. ولی این افزایش زاویه همپوشانی دارای محدودیت‌هایی از جمله (۱۱) و ورود به ناحیه تولید گشتاور منفی است که باید از آن جلوگیری کنیم



شکل ۸: الف) شکل موج جریان متغیر اعمال شده به موتور و ب) گشتاور تولیدی منتج از جریان متغیر.

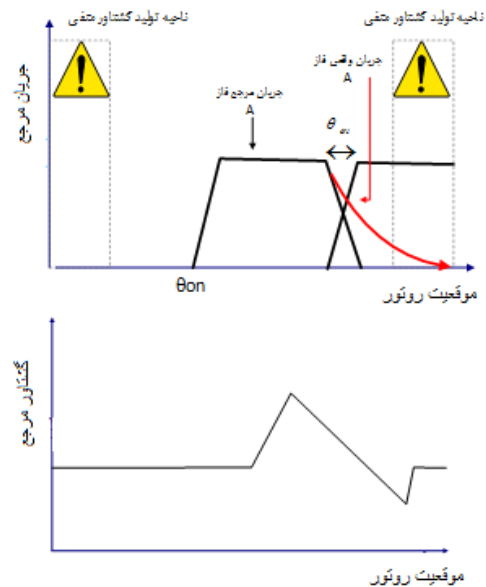
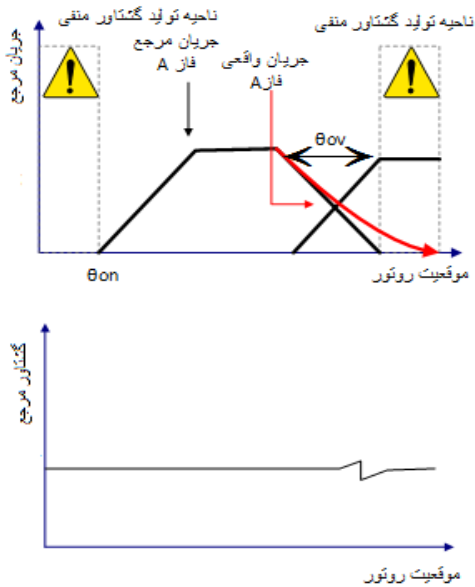
۲-۳ روش کنترلی پیشنهادی جهت کاهش ریپل گشتاور در ناحیه کموتاسیون با استفاده از توابع توزیع گشتاور مرسوم

به منظور حداقل‌رساندن ریپل گشتاور در موتورهای سوئیچ رلوکتانس یکی از روش‌های مؤثر، استفاده از توابع توزیع گشتاور (TSFs) می‌باشد [۶] تا [۸]. در این روش در ناحیه کموتاسیون گشتاور مرجع متناسب با هر یک از فازها تحلیل شده به طوری که مجموع گشتاورهای مرجع هر فاز با گشتاور مورد نظر برابر باشد. بر این اساس جریان مرجع برای حلقه کنترل جریان در هر فاز تعیین می‌گردد. 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 واردشونده و خارج‌شونده هم‌زمان فعال است. توابع توزیع گشتاور متداول شامل خطی- سینوسی- مکعبی و نمایی می‌باشد که از (۷) تا (۱۰) حاصل می‌شود [۲]

$$f_{linear} = \begin{cases} \frac{\theta - \theta_{on}}{\theta_{ov}} \\ 1 \\ \frac{\theta_{off} - \theta}{\theta_{ov}} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \theta_{on} \leq \theta \leq \theta_{on} + \theta_{ov} \\ \theta_{on} + \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_{off} - \theta_{ov} \\ \theta_{off} - \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_{off} \end{cases} \quad (7)$$

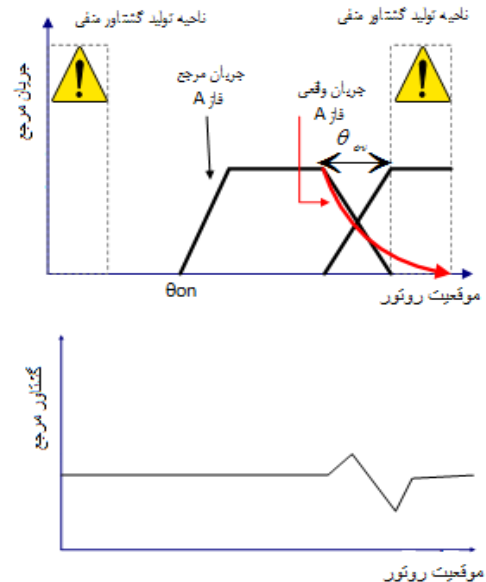
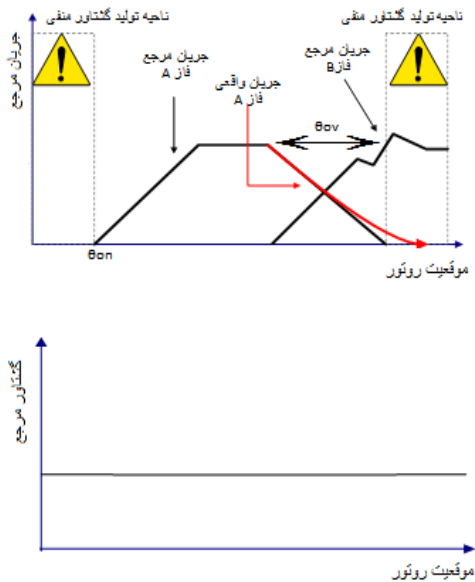
$$f_{cubic} = \begin{cases} \frac{3}{\theta_{ov}^r} (\theta - \theta_{on})^r - \frac{2}{\theta_{ov}^r} (\theta - \theta_{on})^r \\ 1 \\ 1 - \frac{3}{\theta_{ov}^r} (\theta - \theta_{off} + \theta_{ov})^r + \frac{2}{\theta_{ov}^r} (\theta - \theta_{off} + \theta_{ov})^r \end{cases} \quad (8)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \theta_{on} \leq \theta \leq \theta_{on} + \theta_{ov} \\ \theta_{on} + \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_{off} - \theta_{ov} \\ \theta_{off} - \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_{off} \end{cases}$$



شکل ۹: زاویه روشنی، هم‌پوشانی و گشتاور مرجع فاز مجاور ثابت است.

شکل ۱۰: زاویه روشنی و گشتاور مرجع فاز مجاور ثابت و زاویه هم‌پوشانی متغیر است.



شکل ۱۱: زاویه روشنی و گشتاور مرجع فاز مجاور متغیر است.

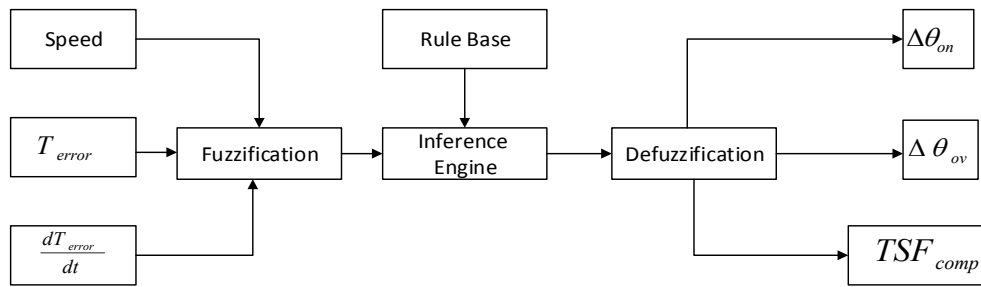
شکل ۱۲: زاویه روشنی، هم‌پوشانی متغیر و گشتاور مرجع فاز مجاور ثابت است.

$$\theta_{ov} \leq \frac{\theta_p}{2} - \theta_{off} \quad (11)$$

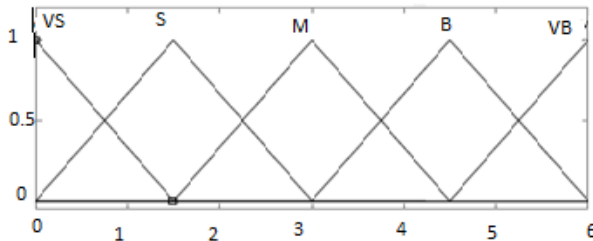
که θ_p دوره تناوب روتور و θ_{off} زاویه خاموشی می‌باشد. همان طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود اگر تنها زاویه روشنی تغییر یابد و با افزایش سرعت، فاز مربوط زودتر روشن شود، در واقع با این کار تابع توزیع گشتاور به عقب شیفت داده و از ورود دنباله جریان به ناحیه تولید گشتاور منفی جلوگیری شده است. اما همچنان مدت زمان لازم جهت عمل کموتاسیون بین فازها هیچ تغییری نکرده و مشکل ریپل گشتاور پابرجا است.

راه حل پیشنهادی همان طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده بدین صورت است که با ترکیب این دو حالت یعنی کنترل زاویه هم‌پوشانی و زاویه روشن شدن به طور هم‌زمان با توجه به این که میزان هدایت هر فاز ۳۰ درجه می‌باشد یعنی $\theta_{on} - \theta_{off} = 30^\circ$ با تغییر زاویه روشنی، زاویه خاموش شدن نیز به صورت خودکار تغییر می‌یابد. با توجه به (۷) قدرت مانور تغییرات زاویه هم‌پوشانی افزایش یافته و از ورود دنباله جریان به ناحیه گشتاور منفی نیز جلوگیری شده که موجب تولید گشتاور با ریپل

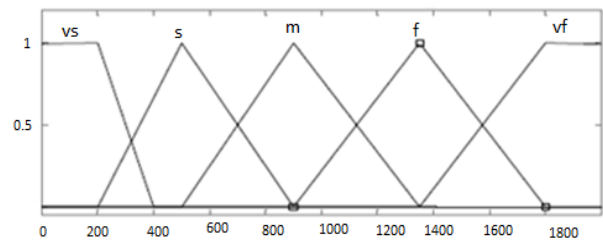
شکل ۱۳: زاویه روشنی و گشتاور مرجع فاز مجاور ثابت و زاویه روشنی متغیر است.



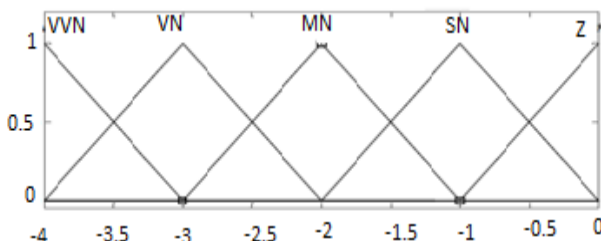
شکل ۱۴: بلوک دیاگرام کنترل کننده فازی.



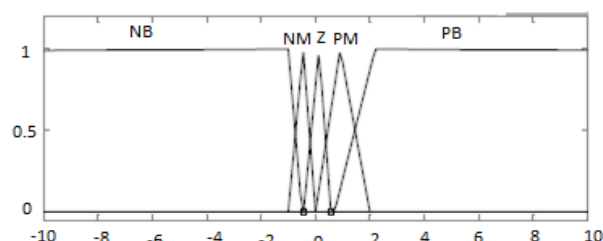
شکل ۱۸: متغیر خروجی "تغییرات زاویه همپوشانی".



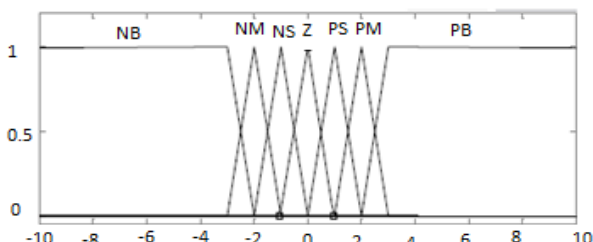
شکل ۱۵: متغیر ورودی "سرعت".



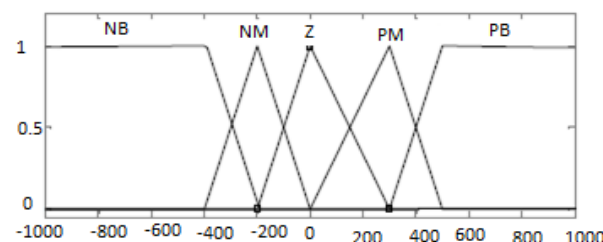
شکل ۱۹: متغیر خروجی "تغییرات زاویه روشنی".



شکل ۱۶: متغیر ورودی "خطای گشتاور".



شکل ۲۰: متغیر خروجی "گشتاور جبران سازی شده".



شکل ۱۷: متغیر ورودی "مشتق خطای گشتاور".

$$\begin{cases} \theta_{ov}^{new} = \theta_{ov}^{initial} + \Delta\theta_{ov} \\ \theta_{on}^{new} = \theta_{on}^{initial} + \Delta\theta_{on} \end{cases} \quad (12)$$

همان طور که در (۱۲) نشان داده شده زاویه روشنی و زاویه همپوشانی شامل یک قسمت ثابت و یک قسمت متغیر است که قسمت متغیر خروجی کنترل کننده فازی می باشد که بر حسب سرعت موتور تغییر می نماید. اصول کار این کنترل کننده در شکل ۱۴ ارائه شده است.

این کنترل کننده فازی دارای سه ورودی شامل سرعت موتور، خطای گشتاور و مشتق خطای گشتاور می باشد. همچنین دارای سه خروجی شامل تغییرات زاویه روشن شدن، تغییرات زاویه همپوشانی و میزان گشتاور اصلاحی می باشد که به صورت یک تابع عضویت ۵ عضوی که به صورت مثلی انتخاب گردیده، نمایش داده شده است (شکل های ۱۵ تا ۲۰). سیستم استنتاج فازی دارای قوانین فازی می باشد که قوانین و مفاهیم اصطلاحات به کار برده شده به صورت جدول ۱ می باشد.

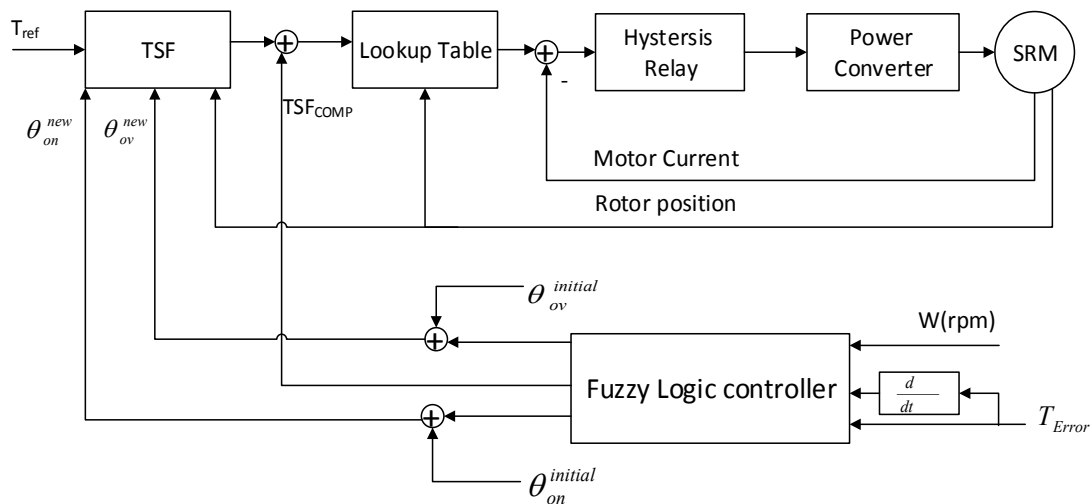
شکل ۲۱ بلوک دیاگرام روش پیشنهاد شده را نشان می دهد. بلوک TSF گشتاور مرجع هر فاز را با توجه به شرایط اولیه ای که برای آن تعریف شده، تولید می کند. کنترل کننده فازی بر حسب میزان سرعت

کمتری می شود.

اگر بخواهیم موتور با ریپل کمتری کار کند تنظیم زاویه روشنی و همپوشانی به تنهایی نمی توانند ریپل گشتاور را به صورت کامل کاهش دهند. لذا همان طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است علاوه بر کنترل زاویه روشنی و همپوشانی، می توان به میزان خطای گشتاور فاز خارج شونده از مقدار مرجع را به فاز واردشونده اضافه کرد تا ریپل گشتاور ناخواسته جبران گردد.

۳-۳ روش پیشنهادی جهت اصلاح دینامیکی و لحظه ای تابع توزیع گشتاور با استفاده از منطق فازی

با استفاده از یک کنترل کننده فازی که سرعت موتور، خطای گشتاور و مشتق خطای گشتاور به عنوان ورودی آن می باشند، زاویه روشنی و زاویه همپوشانی بین فازها در تابع توزیع گشتاور به صورت تابعی از سرعت موتور تغییر می کند. گشتاور مرجع نیز به صورت تابعی از خطای گشتاور و مشتق خطای گشتاور اصلاح می شود و تابع توزیع گشتاور را به صورت دینامیکی و لحظه ای اصلاح می نماید



شکل ۲۱: بلوک دیاگرام روش پیشنهادی جهت کاهش ریپل گشتاور موتور SR.

جدول ۱: قوانین استنتاج فازی.

If speed is "vs" then $\Delta\theta_{ov}$ is "Z" & $\Delta\theta_{on}$ is "z"	
If speed is "S" then $\Delta\theta_{ov}$ is "PS" & $\Delta\theta_{on}$ is "NS"	
If speed is "M" then $\Delta\theta_{ov}$ is "PM" & $\Delta\theta_{on}$ is "NM"	
If speed is "F" then $\Delta\theta_{ov}$ is "PB" & $\Delta\theta_{on}$ is "NB"	
If speed is "VF" then $\Delta\theta_{ov}$ is "PVB" & $\Delta\theta_{on}$ is "NVB"	NVB: منفی خیلی بزرگ
If E is "NB" & CE is "NB" then TSFCOMP is "PB"	NB: منفی بزرگ
If E is "NS" & CE is "NB" then TSFCOMP is "PB"	NM: منفی متوسط
If E is "Z" & CE is "NB" then TSFCOMP is "PM"	NS: منفی کوچک
If E is "PS" & CE is "NB" then TSFCOMP is "PS"	Z: صفر
If E is "PB" & CE is "NB" then TSFCOMP is "Z"	PS: مثبت کوچک
If E is "NB" & CE is "NS" then TSFCOMP is "PB"	PM: مثبت متوسط
If E is "NS" & CE is "NS" then TSFCOMP is "PM"	PB: مثبت بزرگ
If E is "Z" & CE is "NS" then TSFCOMP is "PS"	PVB: مثبت خیلی بزرگ
If E is "PS" & CE is "NS" then TSFCOMP is "Z"	VS: خیلی کم
If E is "PB" & CE is "NS" then TSFCOMP is "NS"	S: کم
If E is "NB" & CE is "Z" then TSFCOMP is "PM"	M: متوسط
If E is "NS" & CE is "Z" then TSFCOMP is "PS"	F: تند
If E is "Z" & CE is "Z" then TSFCOMP is "Z"	VF: خیلی تند
If E is "PS" & CE is "Z" then TSFCOMP is "NS"	E: خطای گشتاور از مقدار مرجع
If E is "PB" & CE is "Z" then TSFCOMP is "NM"	CE: مشتق خطای گشتاور از مقدار مرجع
If E is "NB" & CE is "PS" then TSFCOMP is "PS"	
If E is "NS" & CE is "PS" then TSFCOMP is "Z"	
If E is "Z" & CE is "PS" then TSFCOMP is "NS"	
If E is "PS" & CE is "PS" then TSFCOMP is "NM"	
If E is "PB" & CE is "PS" then TSFCOMP is "NB"	
If E is "NB" & CE is "PB" then TSFCOMP is "Z"	
If E is "NS" & CE is "PB" then TSFCOMP is "NS"	
If E is "Z" & CE is "PB" then TSFCOMP is "NM"	
If E is "PS" & CE is "PB" then TSFCOMP is "NB"	
If E is "PB" & CE is "PB" then TSFCOMP is "NB"	

۴- نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی یک موتور سوئیچ رلکتانس سه‌فاز ۴/۶ که مشخصات آن در جدول ۲ آمده است به همراه مدار راه‌انداز و کنترل‌کننده مربوط در محیط سیمولینک متلب شبیه‌سازی شده است. جهت مقایسه بین تابع توزیع گشتاور مرسوم و تابع توزیع گشتاور اصلاح‌شده و تأیید صحت ادعاهایی که در روش پیشنهادی در رابطه با تأثیرات تغییر زاویه روشنی، زاویه هم‌پوشانی و گشتاور مرجع فاز مجاور مطرح شد، در این بخش سناریوهای مختلفی ارائه گردیده که به شرح زیر می‌باشد:

موتور میزان تغییرات در زاویه روشنی و هم‌پوشانی بهینه را تولید می‌کند که بعد از جمع‌شدن با شرایط اولیه تعریف‌شده زاویه روشن‌شدن و هم‌پوشانی بهینه تولید می‌شود و به عنوان ورودی به بلوک تابع توزیع گشتاور اعمال می‌گردد. با توجه به این مقادیر تابع توزیع گشتاور بهینه‌تر شده و خروجی تابع توزیع گشتاور با میزان گشتاور جبران‌سازی شده توسط کنترلر فازی جمع می‌شود و سپس گشتاور برآیند به بلوک Lookup Table وارد می‌شود تا به جریان مرجع تبدیل شود و جریان مرجع با جریان موتور مقایسه می‌شود و با استفاده از رله هیستریزس مقدار جریان واقعی موتور روی مقدار مرجع تنظیم می‌شود که موجب تولید گشتاور برآیند با ریپل کمتری در خروجی می‌شود.

جدول ۵: درصد ریپل گشتاور (%TRF)، گشتاور ماکسیمم و گشتاور مینیمم را زمانی که از تابع توزیع گشتاور اصلاح شده با منطق فازی که تنها بر روی زاویه همپوشانی اعمال شده و زاویه روشنی ثابت ($\theta_{on} = 22$) و گشتاور مرجع فاز مجاور بدون تغییر فرض شده است به ازای سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد.

ω (rpm)	۳۰۰	۶۰۰	۹۰۰	۱۲۰۰	۱۵۰۰
T_{REF}	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
T_{max}	۲۰٫۸	۲۱	۲۰٫۳	۲۰٫۲	۲۰٫۲
T_{min}	۱۹٫۷	۱۹٫۴	۱۸٫۵	۱۷٫۴	۱۵٫۶
TRF%	۵٫۵	۸	۹	۱۴	۲۳

جدول ۶: درصد ریپل گشتاور (%TRF)، گشتاور ماکسیمم و گشتاور مینیمم را زمانی که از تابع توزیع گشتاور اصلاح شده با منطق فازی که بر روی زاویه روشنی و همپوشانی اعمال شده و گشتاور مرجع فاز مجاور بدون تغییر فرض شده است به ازای سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد.

ω (rpm)	۳۰۰	۶۰۰	۹۰۰	۱۲۰۰	۱۵۰۰
T_{REF}	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
T_{max}	۲۰٫۹	۲۱٫۵	۲۱٫۶	۲۱٫۳۴	۲۱٫۳۵
T_{min}	۱۹٫۷	۱۹٫۷۶	۱۹٫۷۵	۱۹٫۳۸	۱۹٫۱۸
TRF%	۶	۸٫۷	۹٫۲۵	۹٫۸	۱۰٫۸۵

جدول ۷: درصد ریپل گشتاور (%TRF)، گشتاور ماکسیمم و گشتاور مینیمم را زمانی که از تابع توزیع گشتاور اصلاح شده با منطق فازی که بر روی زاویه روشنی، همپوشانی و گشتاور مرجع فاز مجاور اعمال شده است به ازای سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد.

ω (rpm)	۳۰۰	۶۰۰	۹۰۰	۱۲۰۰	۱۵۰۰
T_{REF}	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
T_{max}	۲۰٫۳	۲۰٫۳۵	۲۰٫۳۶	۲۰٫۳۸	۲۰٫۳۸
T_{min}	۱۹٫۷۳	۱۹٫۷۵	۱۹٫۷۵	۱۹٫۷۲	۱۹٫۷
TRF%	۲٫۸۵	۳	۳٫۰۵	۳٫۳	۳٫۴

$$TRF\% = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{av}} \times 100 \quad (13)$$

همان طور که در جدول ۶ مشخص است زمانی که هر دو پارامتر زاویه روشنی و زاویه همپوشانی توسط کنترل کننده فازی کنترل می‌شود، درصد ریپل گشتاور نسبت به سناریوهای قبل به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. لازم به ذکر است که برای موتور SR در کاربردهایی گشتاور ثابت، این میزان ریپل گشتاور نیز زیاد می‌باشد و ممکن است به شفت موتور و بار آسیب برساند، لذا در ادامه جهت مینیمم کردن ریپل گشتاور راه حل جدیدی ارائه می‌گردد که در ادامه آمده است.

در راه حل پیشنهادی جهت کاهش بیشتر ریپل گشتاور از میزان خطای گشتاور از مقدار مرجع نمونه برداری شده و با استفاده از این سیگنال مشتق آن و اعمال آن به کنترل کننده فازی یک سیگنال جبران سازی تولید می‌شود. در ناحیه کموتاسیون زمانی که جریان فاز خارج شونده از محدوده خود، خارج و موجب تولید گشتاور منفی می‌شود، سیگنال جبران سازی گشتاور فاز وارد شونده را اصلاح نموده به گونه‌ای که این مقدار خطا را جبران نماید تا گشتاور برآیند ثابتی در خروجی حاصل گردد. نتایج شبیه سازی در جدول ۷ ارائه شده است.

منحنی تغییرات گشتاور ماکسیمم و گشتاور مینیمم نسبت به سرعت در حالتی که زاویه روشنی و زاویه همپوشانی توسط کنترل فازی کنترل می‌شوند در شکل‌های ۲۲ و ۲۳ ارائه شده است.

لازم به ذکر است زمانی که تنها زاویه همپوشانی تغییر کند، گشتاور ماکسیمم کاهش می‌یابد ولی در زمانی که افزایش سرعت داریم به مرور

جدول ۲: مشخصات نامی موتور سه فاز SR مورد مطالعه.

پارامتر	مقدار
تعداد قطب استاتور	۶
تعداد قطب روتور	۴
مقاومت هر فاز سیم پیچی استاتور	0.05Ω
اندوکتانس غیر هم محوری (L_{min})	$0.67e^{-3} H$
اندوکتانس هم محوری (L_{max})	$23.6e^{-3} H$
لختی	$0.05 kg.m.s$
اصطکاک	$0.02 n.m.s$

جدول ۳: درصد ریپل گشتاور (%TRF)، گشتاور ماکسیمم و گشتاور مینیمم را زمانی که از تابع توزیع گشتاور مرسوم استفاده می‌شود به ازای سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد.

ω (rpm)	۳۰۰	۶۰۰	۹۰۰	۱۲۰۰	۱۵۰۰
T_{REF}	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
T_{max}	۲۱٫۲	۲۲٫۲	۲۳	۲۳٫۴	۲۳٫۵
T_{min}	۱۹٫۷	۱۹٫۷۵	۱۹٫۷	۱۹٫۲۵	۱۹
TRF%	۷٫۵	۱۲٫۲۵	۱۸٫۷۵	۲۰٫۷۵	۲۲٫۵

جدول ۴: درصد ریپل گشتاور (%TRF)، گشتاور ماکسیمم و گشتاور مینیمم را زمانی که از تابع توزیع گشتاور اصلاح شده با منطق فازی که تنها بر روی زاویه روشنی اعمال شده و زاویه همپوشانی ثابت ($\theta_{ov} = 5$) و گشتاور مرجع فاز مجاور بدون تغییر فرض شده است به ازای سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد.

ω (rpm)	۳۰۰	۶۰۰	۹۰۰	۱۲۰۰	۱۵۰۰
T_{REF}	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
T_{max}	۲۱٫۱	۲۲٫۳	۲۳٫۵	۲۴٫۲	۲۴٫۵
T_{min}	۱۹٫۷	۱۹٫۷	۱۹٫۶	۱۹٫۵	۱۹
TRF%	۷	۱۳	۱۹٫۵	۲۳٫۵	۲۷٫۵

سناریوی ۱) موتور سوئیچ رلوکتانس مورد نظر با تابع توزیع گشتاور خطی معمولی درایو شده و نتایج شبیه سازی در جدول ۳ ارائه شده است.

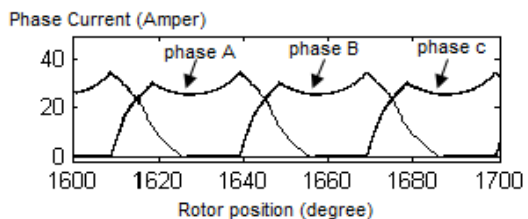
سناریوی ۲) موتور با تابع توزیع گشتاور درایو شده اما زاویه همپوشانی ثابت و برابر با ۵ درجه و گشتاور مرجع فاز مجاور بدون تغییر در نظر گرفته شده است. در این سناریو زاویه روشنی با کنترلر فازی متناسب با سرعت موتور تنظیم شده و نتایج شبیه سازی در جدول ۴ آمده است.

سناریوی ۳) موتور با تابع توزیع گشتاور درایو شده اما زاویه روشنی ثابت و برابر با ۲۲ درجه و گشتاور مرجع فاز مجاور بدون تغییر در نظر گرفته شده است. در این سناریو زاویه همپوشانی با کنترلر فازی متناسب با سرعت موتور تنظیم شده و نتایج شبیه سازی در جدول ۵ آمده است.

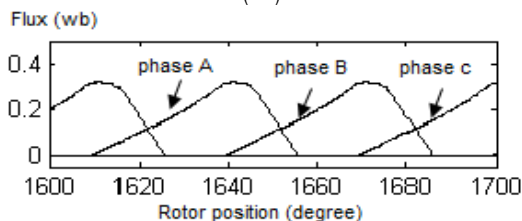
سناریوی ۴) موتور مورد نظر با استفاده از تابع توزیع گشتاور درایو شده و با استفاده از کنترل فازی دو پارامتر زاویه روشنی و زاویه همپوشانی تنظیم شده‌اند. ولی گشتاور مرجع فاز مجاور بدون تغییر در نظر گرفته شده که نتایج شبیه سازی در جدول ۶ آمده است.

سناریوی ۵) موتور مورد نظر با استفاده از تابع توزیع گشتاور درایو شده و با استفاده از کنترل فازی هر سه پارامتر زاویه روشنی، زاویه همپوشانی و گشتاور مرجع فاز مجاور کنترل شده است. نتایج شبیه سازی در جدول ۷ آمده است.

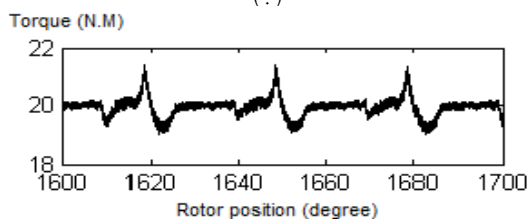
رابطه (۱۳) درصد ریپل گشتاور (%TRF) را نشان می‌دهد. این رابطه بیانگر نسبت تفاضل گشتاور حداکثر و حداقل به گشتاور متوسط می‌باشد



(الف)

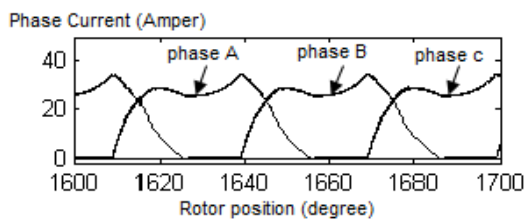


(ب)

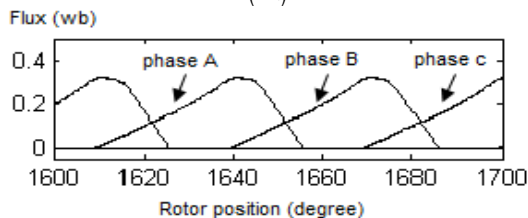


(ج)

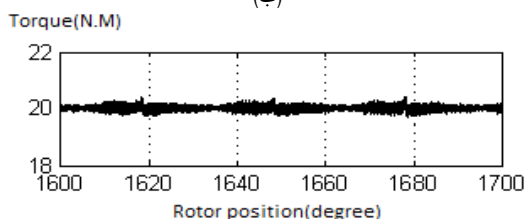
شکل ۲۵: نمایش (الف) جریان، (ب) شار و (ج) گشتاور در سرعت $\omega = 1500$ rpm با استفاده از کنترل زاویه روشنی و هم‌پوشانی تابع توزیع گشتاور با منطق فازی.



(الف)



(ب)

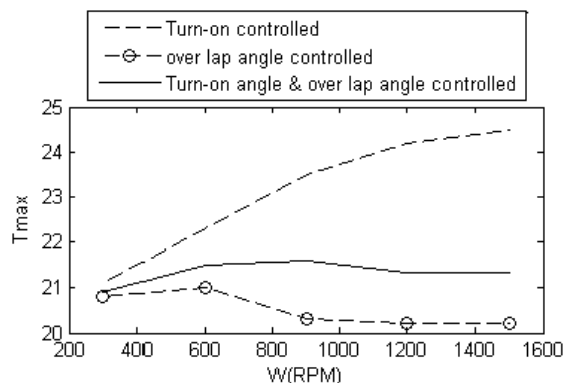


(ج)

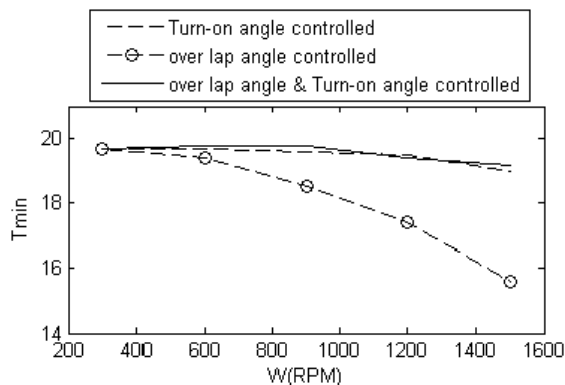
شکل ۲۶: نمایش (الف) جریان، (ب) شار و (ج) گشتاور در سرعت $\omega = 1500$ rpm با استفاده از کنترل زاویه روشنی و هم‌پوشانی و اصلاح گشتاور مرجع فاز مجاور در تابع توزیع گشتاور با منطق فازی.

کاهش یافته و هیچ اصلاحی در رابطه با این زمان نداریم. از طرفی با زودتر روشن کردن، فاز مربوط به ناحیه غیر محوری نزدیک‌تر می‌شود که موجب افزایش گشتاور ماکسیمم می‌گردد. می‌توان از این دو حالت نتیجه گرفت که ترکیب این دو حالت می‌تواند ضعف‌های یکدیگر را پوشش دهند و به ریپل گشتاور کمتری دست یافت.

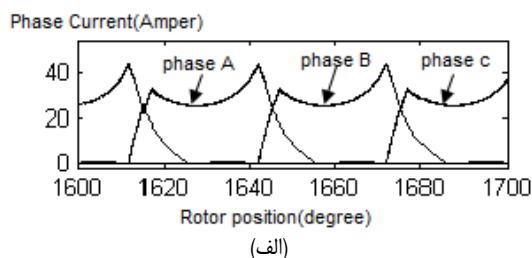
شکل‌های ۲۴، ۲۵ و ۲۶ شکل موج‌های جریان، شار و گشتاور خروجی



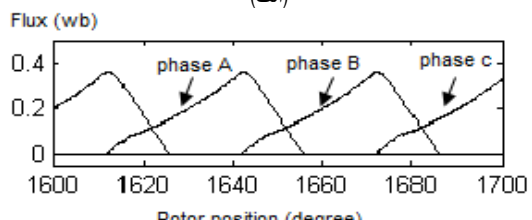
شکل ۲۲: منحنی تغییرات گشتاور ماکسیمم بر حسب سرعت.



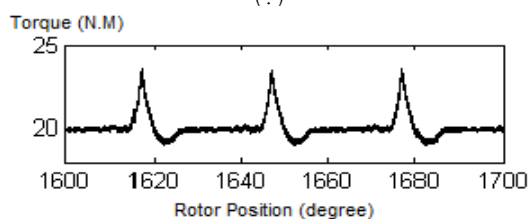
شکل ۲۳: منحنی تغییرات گشتاور مینیمم بر حسب سرعت.



(الف)



(ب)



(ج)

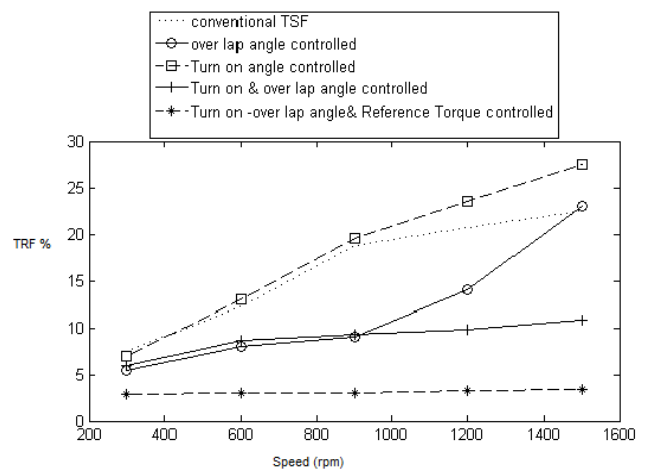
شکل ۲۴: نمایش (الف) جریان، (ب) شار و (ج) گشتاور در سرعت $\omega = 1500$ rpm با استفاده از تابع توزیع گشتاور مرسوم.

وارد ناحیه تولید گشتاور منفی می‌شود و گشتاور برآیند به شدت افت می‌کند. همان‌طور که قبلاً ذکر شد افزایش زاویه هم‌پوشانی محدود می‌باشد. اگر تنها زاویه روشنی توسط کنترل فازی کنترل گردد گشتاور مینیمم افزایش می‌یابد و از ورود به ناحیه تولید گشتاور منفی جلوگیری می‌شود. اما مدت زمان لازم جهت عمل کموتاسیون با افزایش سرعت

خاصیت سلفی سیم پیچ‌های استاتور، جریان موتور نمی‌تواند در این زمان کوتاه از جریان مرجع پیروی کند و به صورت ناخواسته دنباله جریان فاز قبلی وارد ناحیه مربوط به فاز بعدی می‌شود که سبب تولید ریبیل گشتاور می‌گردد. در این تحقیق در تابع توزیع گشتاور اصلاح شده، با فیدبک از سرعت موتور و اعمال آن به یک کنترل کننده فازی، بر حسب میزان سرعت کنترل کننده فازی، زاویه هم‌پوشانی را اصلاح نموده به گونه‌ای که با افزایش زاویه هم‌پوشانی مدت زمان کموتاسیون را افزایش داده و شیب تغییرات جریان مرجع را کندتر کرده که موجب می‌شود جریان واقعی موتور بتواند در این زمان بیشتر خود را با جریان مرجع تطبیق دهد و از به وجود آمدن ریبیل گشتاور جلوگیری نماید. روش پیشنهادی در ادامه با مشکل محدودیت افزایش زاویه هم‌پوشانی مواجه گردید به نحوی که جریان مرجع وارد ناحیه تولید گشتاور منفی می‌شود که برای حل این مشکل با کنترل زاویه روشنی فاز مربوط توسط کنترل کننده فازی بر حسب سرعت موتور، در واقع تابع توزیع گشتاور را به سمت عقب شیفت داده که از ورود دنباله جریان به ناحیه‌ای که موجب تولید گشتاور منفی می‌شود جلوگیری کند. حال جهت دستیابی به سرعت ثابت، این دو پارامتر یعنی زاویه روشنی و زاویه هم‌پوشانی به تنهایی کفایت نمی‌کند. لذا علاوه بر دو پارامتر قبلی در ناحیه کموتاسیون از میزان انحراف گشتاور از مقدار مرجع و مشتق خطای گشتاور فیدبک گرفته و آن به کنترل کننده فازی اعمال شده که در این ناحیه گشتاور مرجع فاز مجاور را به گونه‌ای اصلاح می‌کند که گشتاور برآیند ثابتی را در خروجی تولید نماید. در واقع با این کار، تمام پارامترهای تابع توزیع گشتاور کنترل شده که گشتاور خروجی ثابتی حاصل گردد که نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی صحت و برتری روش پیشنهادی را تأیید می‌نماید.

مراجع

- [1] P. Vujcic, "Minimization of torque ripple and copper losses in switched reluctance drive," *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 27, no. 1, pp. 388-389, Jan. 2012.
- [2] M. Dowlatshahi, S. M. Saghaiannejad, J. W. Ahn, and M. Moallem, "Copper loss and torque ripple minimization of switched reluctance motors considering nonlinear and magnetic saturation effects," *J. of Power Electronics*, vol. 14, no. 2, pp. 351-361, Mar. 2014.
- [3] Y. Z. Xu, R. Zhong, S. L. Lu, and L. Chen, "Analytical method to optimize 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.
- [4] X. D. Xue, K. W. E. Cheng, and S. L. Ho, "Optimization and evaluation of torque sharing functions for torque ripple minimization in switched reluctance motor drives," *IEEE Trans. on Power Electron*, vol. 24, no. 9, pp. 2076-2090, Sept. 2009.
- [5] M. Dowlatshahi, S. M. Saghaiannejad, J. W. Ahn, and 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, Dec. 2014.
- [6] Q. Sun, J. Wu, C. Gan, Y. Hu, and J. Si, "OCTSF for torque ripple minimization in SRMs," *IET Power Electron*, vol. 9, no. 14, pp. 2741-2750, Nov. 2016.
- [7] J. Ye, B. Bilgin, and A. Emadi, "An offline torque sharing function for torque ripple reduction in switched reluctance motor drives," *IEEE Trans. Energy Convers*, vol. 30, no. 2, pp. 726-735, Jun. 2015.
- [8] J. Ye, B. Bilgin, and A. Emadi, "An extended-speed low-ripple torque control of switched reluctance motor drives," *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 30, no. 3, pp. 1457-1470, Mar. 2015.
- [9] Y. Hu, C. Gan, W. Cao, et al., "Central-tapped node linked modular fault-tolerance topology for SRM applications," *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 31, no. 2, pp. 1541-1554, Feb. 2016.
- [10] H. Moradi Cheshmehbeigi, S. Yari, A. R. Yari, and E. Afjei, "Self-tuning approach to optimization of excitation angles for switched reluctance motor drives using fuzzy adaptive controller," in *Proc. Conf. 13th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'09*, 10 pp., Barcelona, Spain, 8-10 Sept. 2009.



شکل ۲۷: منحنی تغییرات درصد ریبیل گشتاور بر حسب سرعت.

موتور سوئیچ رلوکتانس را به ترتیب در سه حالت موتور سوئیچ رلوکتانس با تابع توزیع گشتاور مرسوم، با تابع توزیع گشتاور که زاویه روشنی و زاویه هم‌پوشانی آن توسط کنترل کننده فازی کنترل شده‌اند و حالتی که با استفاده از کنترل کننده فازی زاویه روشنی، زاویه هم‌پوشانی و گشتاور مرجع فاز مجاور در تابع توزیع گشتاور اصلاح شده است را در سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه را نشان می‌دهد.

میزان درصد ریبیل گشتاور به ازای سرعت‌های مختلف به صورت نموداری در شکل ۲۷ نشان داده شده که نتایج نشان می‌دهد اگر تنها زاویه روشنی تغییر کنترل شود هیچ بهبودی در نتایج مشاهده نخواهد شد، بلکه نتایج بدتر نیز می‌شوند. چون تابع توزیع گشتاور را به ناحیه غیر هم‌محوری نزدیک‌تر می‌کند و هیچ تغییری در افزایش مدت زمان کموتاسیون نداریم. از طرف دیگر اگر تنها زاویه هم‌پوشانی تغییر یابد نتیجه در ابتدای کار مناسب می‌باشد اما با افزایش سرعت و به دنبال آن افزایش زاویه هم‌پوشانی دنباله جریان وارد ناحیه منفی شده و موجب تولید گشتاور منفی می‌شود و به دنبال آن گشتاور برآیند کاهش و درصد ریبیل گشتاور افزایش می‌یابد. اما اگر هر دو حالت ترکیب شوند، یعنی زاویه روشنی و زاویه هم‌پوشانی، هم‌زمان با کنترل فازی متناسب با سرعت کنترل شوند با توجه به شکل ۲۵-۲۵ ج مشاهده می‌گردد که نتایج به مراتب بهتر می‌باشد. به بهره‌گیری از این موتورها در کاربردهای گشتاور ثابت، همان طور که در شکل ۲۶-۲۶ ج نشان داده شده علاوه بر کنترل زاویه هم‌پوشانی و روشنی اگر گشتاور مرجع فاز مجاور نیز توسط کنترل فازی اصلاح گردد، تقریباً گشتاور ثابتی در خروجی ایجاد می‌گردد و گشتاور برآیند ثابت، حاصل خواهد شد.

۵- نتیجه گیری

موتور سوئیچ رلوکتانس دارای خاصیت غیر خطی و نقطه کار در ناحیه اشباع بوده که موجب شده در تمام نواحی حرکتی موتور ریبیل گشتاور شدیدی تولید گردد. در این تحقیق نواحی کاری به دو ناحیه غیر کموتاسیون (هدایت تک‌فاز) و ناحیه کموتاسیون (هدایت دو‌فاز مجاور) تقسیم شد. در ناحیه غیر کموتاسیون به جای تزریق یک جریان ثابت با تزریق یک جریان متغیر بر حسب موقعیت روتور ریبیل گشتاور در این ناحیه به مقدار قابل قبولی کاهش یافت. در قدم بعدی جهت کاهش ریبیل گشتاور در ناحیه کموتاسیون از تابع توزیع گشتاور استفاده شد که این روش در سرعت‌های پایین کارایی مطلوبی جهت کاهش ریبیل گشتاور دارد اما با افزایش سرعت موتور به علت کاهش مدت زمان کموتاسیون و

حسن مرادی چشمه‌بینگی در سال ۱۳۸۶ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه شهید بهشتی دریافت نمود و پس از آن در همان سال به دوره دکتری مهندسی برق در دانشگاه شهید بهشتی وارد گردید و در سال ۱۳۹۰ موفق به اخذ درجه دکتری در مهندسی برق از دانشگاه مذکور گردید. دکتر مرادی از سال ۱۳۹۱ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه رازی به عنوان عضو هیأت علمی مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند ایده‌های نو در ماشین‌های الکتریکی، مدارات درایو و راه‌انداز ماشین‌های الکتریکی، مبدل‌های الکترونیک قدرت و آنالیز الکترومغناطیس در ماشین‌های الکتریکی می‌باشد.

احسان نوری تحصیلات دوره کارشناسی خود را در رشته مهندسی برق به اتمام رساند و در سال ۱۳۹۵ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه رازی دریافت نمود. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه نامبرده مدارات درایو و راه‌انداز ماشین‌های الکتریکی و مبدل‌های الکترونیک قدرت می‌باشد.

- [11] 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 Trans. on Power Electronics*, vol. 27, no. 2, pp. 555-564, Feb. 2012.
- [12] J. Castro, P. Andrada, and B. Blanque, "Minimization of torque ripple in switched reluctance motor drives using direct instantaneous torque control," in *Proc. Int. Conf. on Renewable Energies and Power Quality*, pp. 1021-1026, Santiago de Compostela, Spain, Mar. 2012.
- [13] R. Gobbi and K. Ramar, "Practical current control techniques for torque ripple minimization in SR motors," in *Proc. 2nd IEEE Int. Conf. on Power and Energy*, vol. 2, pp. 743-748?, Johor Baharu, Malaysia, Dec. 2008.
- [14] R. Krishnan, *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design and Application*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2001.