

کنترل بهبودیافته سرعت موتور سوئیچ‌شونده رلوکتانسی با استفاده از هدایت پیوسته جریان در سرعت بالا

حسن خان‌بابایی گردشی^۱، کارشناس ارشد؛ حسین ترکمن^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران - hkhanbabaie@yahoo.com

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران - h_torkaman@sbu.ac.ir

چکیده: محرکه‌های سرعت بالای سوئیچ‌شونده رلوکتانسی به علت داشتن ساختار ساده، ارزان و عملکرد مناسب در سرعت‌های بسیار بالا جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف از جمله دمنده‌ها، سانتریفیوژها و ماشین‌های تراش کاری پیدا کرده‌اند. یکی از مشکلاتی که تمامی محرکه‌ها از جمله محرکه موتور سوئیچ‌شونده رلوکتانسی با آن مواجه است کاهش توانایی تولید گشتاور در سرعت بالا است. تاکنون روش‌های مختلفی برای فائق آمدن بر این مشکل ارائه شده است. برخی روش‌ها به طراحی موتور و برخی دیگر به طراحی روش‌های کنترلی پرداخته‌اند. در این مقاله یک روش جدید برای کنترل موتور سوئیچ‌شونده رلوکتانسی در سرعت بالا ارائه شده است که از هر دو حالت هدایت ناپیوسته و هدایت پیوسته جریان بهره می‌گیرد. این روش با داشتن چهار پارامتر کنترلی، توانایی کنترل گشتاور موتور در ناحیه هدایت پیوسته را دارد. برای راستی آزمایی روش، از شبیه‌سازی نرم‌افزاری استفاده شده است و نتایج به صورت مبسوط تحلیل شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: محرکه‌های الکتریکی، محرکه پرسرعت، موتور سوئیچ‌شونده رلوکتانسی، کنترل گشتاور، کنترل سرعت.

Improved Control of Switched Reluctance Motor at High Speeds using Continuous Conduction Mode

H. Khanbabaie Gardeshi¹, MSc; H. Torkaman², Assistant Professor

1- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, Email: hkhanbabaie@yahoo.com

2- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, Email: h_torkaman@sbu.ac.ir

Abstract: High speed switched reluctance drives have found a good place in multifarious industries such as blowers, centrifuges and turning machines, because of their simple and robust structure, and appropriate operating at very high speeds. Losing the capability of high torque production at high speeds is one of the main problems that high speed drives deal with. Different methods have already been proposed to overcome this obstacle. Some of them have paid their attention to motor design and some other to control design. In this paper a novel method has proposed to control of high speed switched reluctance motor using both continuous and discontinuous conduction modes. Having four control parameters, This new method can control the machine torque in continuous conduction mode. To verify the effectiveness of the method, simulation using software were implemented.

Keywords: Electric drives, high speed drives, switched reluctance motor, torque control, speed control.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۳۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۲۱ و ۱۳۹۵/۰۲/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۰۵

نام نویسنده مسئول: حسین ترکمن

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - بلوار وفادار شرقی - دانشگاه شهید بهشتی - دانشکده مهندسی برق.

راهنمای اختصارات

Switched Reluctance Motor	SRM
Discontinuous Conduction Mode	DCM
Continuous Conduction Mode	CCM
Direct Instantaneous Torque Control	DITC
Torque Sharing Function	TSF
در عملکرد تک پالس برابر با زاویه هدایت سوئیچ فاز و در روش پیشنهادی مقاله برابر است با طول دوره‌ای که جریان مرجع برابر با I_{ref-U} است.	θ_{dwell}
در عملکرد تک پالس برابر با زاویه روشن شدن سوئیچ فاز و در روش پیشنهادی مقاله برابر است با زاویه‌ای که در آن جریان مرجع از I_{ref-L} به I_{ref-U} تغییر می‌کند.	θ_{on}
سطح پایین جریان مرجع در روش پیشنهادی مقاله	I_{ref-L}
سطح بالای جریان مرجع در روش پیشنهادی مقاله	I_{ref-U}
درصد ریپل گشتاور	$\Delta T\%$

۱- مقدمه

محرکه‌های پرسرعت در صنایع مختلف جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. از جمله کاربردهای این محرکه‌ها می‌توان به دمنده‌ها، کمپرسورها، پمپ‌ها و ماشین‌های تراشکاری اشاره کرد [۱-۳]. همچنین، از محرکه‌های پرسرعت به‌طور وسیعی در سانتریفیوژها و استارتر هواپیما استفاده می‌شود [۴]. استفاده از محرکه‌های پرسرعت موجب کاهش اندازه سیستم و افزایش بازده می‌شود [۲، ۴، ۵]. انواع مختلف ماشین‌های الکتریکی از جمله موتور DC مغناطیس دائم (BLDC)، موتور سوئیچ‌شونده رلوکتانسی (SRM) و موتور القایی برای استفاده در این محرکه‌ها مورد تحقیق و توسعه قرار گرفته‌اند [۲]. در این میان، موتورهای SR به دلیل مزایایی که دارند مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. موتور SR دارای استاتور و روتور قطب برجسته است و روتور آن به صورت یکپارچه از ورقه‌های فولادی تشکیل شده است [۶]. با داشتن ساختار ساده و محکم، این ماشین توانایی عملکرد در سرعت‌های بسیار بالا را دارا است و دارای هزینه ساخت کم و قابلیت اطمینان بالاست [۲، ۷، ۸].

یک مبدل الکترونیک قدرت سیم‌پیچی‌های متمرکز قرار گرفته شده روی استاتور را به صورت سنکرون با موقعیت روتور تحریک می‌کند تا گشتاور رلوکتانسی مثبت پدید آید [۹].

با وجود همه مزایایی که ذکر شد، گشتاور تولیدی موتور SR در سرعت‌های بالا دارای ریپل بسیاری است که موجب تلفات مکانیکی و نویز صوتی می‌شود [۷، ۱۰]. روش‌هایی که در سرعت پایین برای کاهش ریپل گشتاور به کار گرفته می‌شوند، در سرعت بالا قابل اجرا نیستند. با افزایش سرعت موتور SR توانایی تولید جریان در فازهای موتور کاهش می‌یابد و به همین دلیل کنترل شکل موج جریان جهت تولید گشتاور یکنواخت ممکن نیست. در این حالت موتور وارد ناحیه عملکرد تک پالس

می‌شود. همچنین، در سرعت‌های بالا، با کاهش محسوس ماکزیمم جریان ماشین به دلیل ولتاژ القایی حرکتی زیاد، توانایی تولید گشتاور به شدت کاهش می‌یابد. به طوری که با دو برابر شدن سرعت روتور، نیروی الکتریکی تبدیل شده به مکانیکی در یک سیکل به ربع مقدار اولیه کاهش می‌یابد. به همین دلیل، روش‌هایی برای افزایش جریان و گشتاور ماشین در سرعت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد.

یکی از تدبیرهایی که برای افزایش گشتاور ماشین در سرعت‌های بالا استفاده می‌شود، پیش انداختن زاویه روشن شدن فازها است. همچنین، برخی مراجع برای افزایش جریان ماشین در سرعت بالا از عملکرد ماشین SR در ناحیه هدایت پیوسته (CCM) استفاده کرده‌اند [۱۱-۱۶]. با این روش جریان فاز ماشین دیگر به صفر نمی‌رسد و به صورت پیوسته جاری خواهد بود. این امر با استفاده از افزایش طول دوره هدایت فازها صورت می‌پذیرد.

در این مقاله یک روش کنترلی جدید با استفاده از چهار پارامتر کنترلی پیشنهاد شده است که با تنظیم پارامترهای آن می‌توان موتور را به دو حالت DCM و CCM در سرعت بالا برد. همچنین، در این روش جدید، حالت جدیدی از عملکرد موتور SR معرفی می‌شود و آن هدایت CCM در $\theta_{dwell} < 180^\circ$ است. در روش‌های مرسوم برای بردن موتور SR به حالت CCM زاویه هدایت فاز باید بیشتر از نصف یک دوره الکتریکی (360°) باشد. همچنین، روش پیشنهادی با داشتن دو پارامتر کنترلی در حالت CCM مرسوم، قادر به کنترل گشتاور در این حالت می‌باشد. این روش به سادگی قابل اجرا است و پیچیدگی‌های روش‌های قبلی را ندارد.

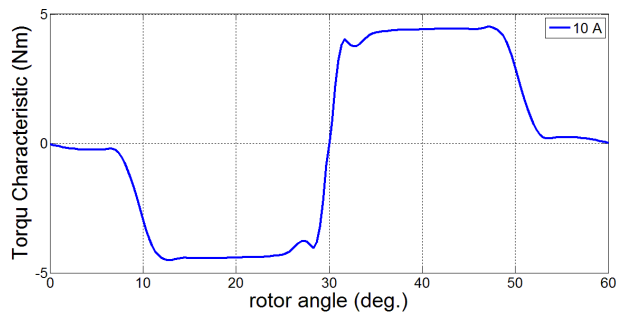
لازم به توضیح است که معمولاً در سرعت‌های بالا برای کاهش فرکانس کلیدزنی از موتور با تعداد قطب کم استفاده می‌شود [۱۷]؛ اما موتورهای با تعداد قطب کم در سرعت‌های پایین توانایی کمی برای تولید گشتاور یکنواخت و بدون ریپل دارند؛ بنابراین در این مقاله ساختار $8/6$ SR انتخاب شده است تا بتواند در سرعت‌های پایین با روش‌های کنترلی موجود گشتاور یکنواخت ایجاد کند و همچنین با استفاده از روش پیشنهادی بتواند در سرعت‌های بالا نیز کار کند.

این مقاله در چهار بخش دیگر ادامه می‌یابد. در بخش دوم به بررسی مشکلات کنترل سرعت بالا و تدبیرهای تولید گشتاور بیشتر پرداخته می‌شود. در بخش سوم، روش پیشنهادی به صورت کامل شرح داده شده است.

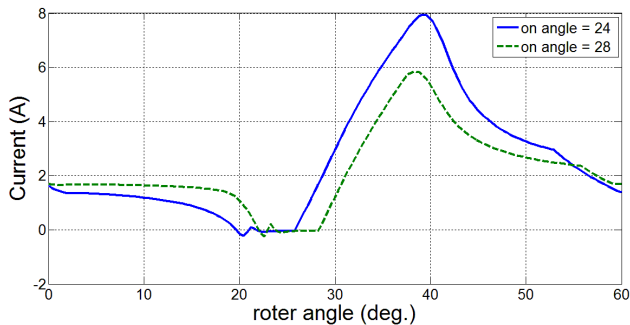
برای راستی آزمایی روش پیشنهادی، این روش مورد شبیه‌سازی نرم‌افزاری قرار گرفته است که در بخش چهارم به آن پرداخته شده است. سرانجام، نتیجه‌گیری و جمع‌بندی مطالب در بخش پنجم ارائه شده است.

۲- محدودیت‌های کنترل سرعت بالا و تدبیرهای رفع آن

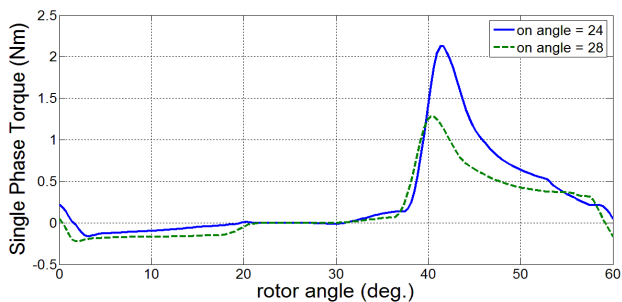
در سرعت‌های پایین از روش‌های متفاوتی از جمله DITC و TSF برای ایجاد گشتاور بدون ریپل استفاده می‌شود [۱۸، ۱۹]؛ اما استفاده از این



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱: (الف) گشتاور ماشین به ازای جریان ثابت، (ب) جریان ماشین به ازای دو مقدار زاویه روشن شدن، (ج) گشتاور متناظر با جریان‌های قسمت (ب).

اکثر مراجعی که تاکنون در زمینه CCM تحقیق کرده‌اند تنها به تحلیل این حالت پرداخته‌اند و روشی برای کنترل موتور SR در این حالت ارائه نکرده‌اند. در [۱۳] برای کنترل گشتاور ماشین در یک سرعت خاص در حالت CCM به کنترل مقدار مؤثر جریان با تنظیم θ_{dwell} پرداخته شده است. طبق آنچه نویسنده اظهار می‌دارد یکی از مشکلات این روش نیاز به محاسبه مقدار مؤثر جریان در طول یک سیکل الکتریکی است که باعث پیچیده شدن کنترل می‌شود.

در شکل ۲ مقدار جریان و گشتاور برای دو حالت مختلف DCM و CCM نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مقدار ماکزیمم جریان در حالت CCM بیشتر از حالت DCM است و به همین دلیل گشتاور بیشتر تولید می‌کند.

بررسی دقیق‌تر این حالت که یکی از حالت‌های روش پیشنهادی است در بخش چهارم صورت گرفته است.

روش‌ها در سرعت‌های بالا امکان‌پذیر نیست، زیرا با افزایش سرعت روتور، ولتاژ القایی حرکتی در سیم‌پیچ استاتور افزایش می‌یابد و این امر مانعی در جهت تولید جریان کافی در فاز موتور و کنترل شکل موج آن می‌شود. در سرعت بالا از روش تک پالس برای تحریک موتور استفاده می‌شود [۲۰].

برای فائق آمدن به مشکل تولید جریان در سرعت‌های بالا، دو تدبیر اساسی اندیشیده شده است. در ادامه به بررسی دقیق‌تر این دو روش پرداخته می‌شود.

۲-۱- پیش انداختن زاویه روشن شدن فازها

یکی از روش‌های مرسوم پیش انداختن زاویه روشن شدن فازها (theta advancing) است. بدین صورت که با افزایش سرعت ماشین، فازهای استاتور زودتر از زاویه مربوط به حالت غیرهمراستایی (unaligned) برق‌دار می‌شوند تا زمان کافی برای تولید جریان مناسب را داشته باشند. در این روش طول دوره هدایت فازها ثابت می‌ماند. در قسمت الف از شکل ۱ منحنی گشتاور تولیدی یک ماشین SR در جریان ۱۰ آمپر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که ماشین در نیمی از یک دوره الکتریکی گشتاور منفی و در نیمه دیگر گشتاور مثبت تولید می‌کند. محور افقی نشان‌دهنده زاویه روتور است که در طول یک دوره الکتریکی رسم شده است. موتور مذکور یک موتور SR 8/6 است؛ بنابراین یک دوره الکتریکی آن برابر با ۶۰ درجه مکانیکی است.

در قسمت ب از شکل ۱ منحنی جریان‌ها در دو زاویه روشنی مختلف به همراه گشتاور مربوطه در قسمت ج در سرعت ۶۰۰۰ rpm نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با پیش انداختن زاویه روشن شدن فاز، مقدار جریان ماشین و گشتاور تولیدی آن افزایش می‌یابد. بررسی بیشتر این روش در شبیه‌سازی روش پیشنهادی در بخش چهارم صورت پذیرفته است.

۲-۲- روش هدایت پیوسته جریان (CCM)

در سال‌های اخیر برای مواجهه با مشکل کاهش گشتاور و جریان در سرعت بالا، حالتی از عملکرد موتور پیشنهاد شده است که در آن جریان فازهای موتور به صورت پیوسته جاری می‌شود [۱۱]. البته شمار مراجع مذکور نسبت به سایر پژوهش‌ها بسیار کم است و تحلیل بیشتر در این زمینه مورد نیاز است. در حالت CCM مرسوم زاویه هدایت فاز به بیشتر از 180° افزایش می‌یابد تا جریان ماشین افزایش یابد [۱۴، ۱۲]. در این صورت جریان انتهای سیکل بیشتر از ابتدای آن خواهد بود؛ بنابراین اگر در ابتدای دوره الکتریکی جریان فاز صفر باشد، در انتهای آن بیشتر از صفر خواهد بود [۱۵]. در نتیجه جریان فاز موتور به صورت پیوسته ادامه خواهد یافت و به صفر نخواهد رسید. برای جلوگیری از افزایش پیوسته جریان ماشین، یک کنترل‌کننده جریان باید وجود داشته باشد تا از افزایش جریان بیش از یک حد مشخص جلوگیری کند [۱۳].

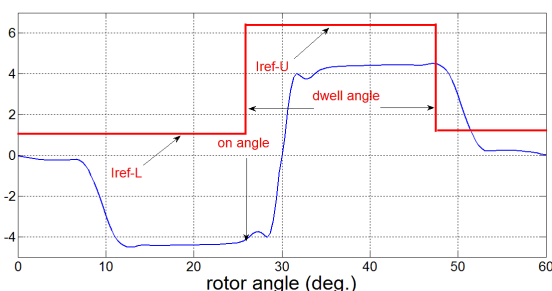
۳- روش پیشنهادی

همان‌طور که در بخش‌های قبلی بیان شد، دو راه‌حل اساسی که برای افزایش جریان و گشتاور در سرعت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد عبارتند از: ۱- پیش انداختن زاویه روشن شدن فاز و ۲- عملکرد در ناحیه CCM.

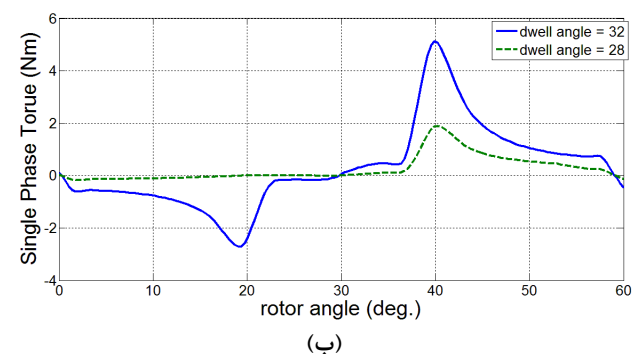
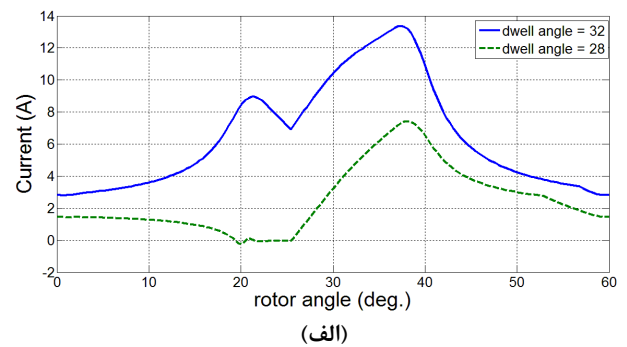
برای بهره‌گیری از هر دو روش CCM و theta advancing روش جدیدی در این مقاله پیشنهاد شده است که با تنظیم چهار پارامتر کنترلی قادر به اجرای هر دو روش فوق است. همچنین، روش پیشنهادی قادر است که موتور را در زاویه $\theta_{dwell} < 180^\circ$ به حالت CCM ببرد.

که بیان شد، مقدار مرجع جریان برای کنترل‌کننده هیستریزس در یک دوره تناوب دارای دو مقدار است. اگر مقدار I_{ref-L} برابر با صفر و مقدار I_{ref-U} برابر با ماکزیمم جریان مجاز فاز داده شود و همچنین $\theta_{dwell} < 180^\circ$ باشد، با تنظیم θ_{on} زاویه روشن شدن فازها پیش انداخته می‌شود یعنی همان theta advancing رخ می‌دهد. اگر با همین شرایط مقدار θ_{dwell} بیشتر از 180° قرار داده شود موتور به ناحیه CCM می‌رود. روش پیشنهادی یک ناحیه جدید از عملکرد موتور را ممکن می‌سازد و آن عملکرد هدایت پیوسته در $\theta_{dwell} < 180^\circ$ است. بدین‌صورت که میزان I_{ref-L} بالاتر از صفر تنظیم می‌شود درحالی‌که θ_{dwell} کمتر از 180° باقی می‌ماند. نکته قابل‌توجه اینجاست که برخلاف حالت CCM مرسوم که کنترلی روی میزان مینیمم جریان ندارد و فقط در بعضی حالات به کنترل ماکزیمم جریان می‌پردازد، در روش پیشنهادی میزان مینیمم جریان قابل‌کنترل است؛ بنابراین، با داشتن دو پارامتر کنترلی I_{ref-L} و I_{ref-U} سیستم کنترلی قادر است که گشتاور را در ناحیه CCM مرسوم و همچنین CCM جدید کنترل کند. همچنین با داشتن این چهار پارامتر کنترلی و امکان کنترل موتور در سه حالت DCM، CCM مرسوم و CCM جدید می‌توان به بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی بر اساس توابع هدف دلخواه پرداخت. از جمله مزیت‌های روش پیشنهادی این است که برخلاف روش CCM مرسوم، نقاط مینیمم و ماکزیمم شکل موج جریان را کنترل می‌کند و بدین ترتیب با کنترل شکل موج جریان قادر است که به کاهش ریبیل گشتاور بپردازد.

بلوک دیاگرام روش پیشنهادی در شکل ۴ نشان داده شده است. در ابتدا سرعت مرجع با سرعت مکانیکی اندازه‌گیری شده مقایسه می‌شود. سپس، مقدار خطای سرعت با استفاده از کنترل‌کننده PI مقدار گشتاور مرجع را می‌سازد. با استفاده از مقدار گشتاور مرجع، بهینه‌ترین پارامترهای کنترلی که قبلاً محاسبه شده و در یک جدول ذخیره شده‌اند؛ انتخاب می‌شوند. بلوک تولید پالس مبدل با داشتن پارامترهای کنترلی و همچنین زاویه روتور و مقدار جریان‌های چهار فاز به تولید پالس برای کلیدهای مبدل می‌پردازد.



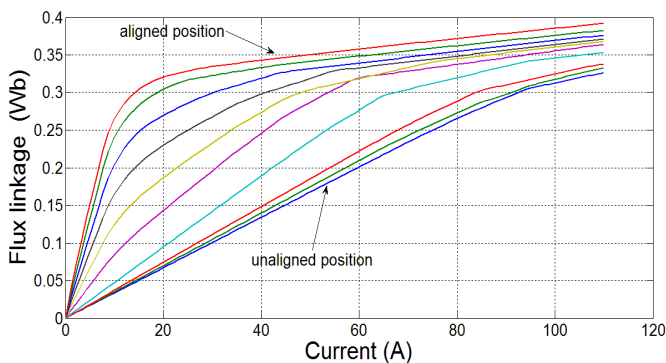
شکل ۳: منحنی مرجع جریان به‌همراه پارامترهای کنترلی در روش پیشنهادی



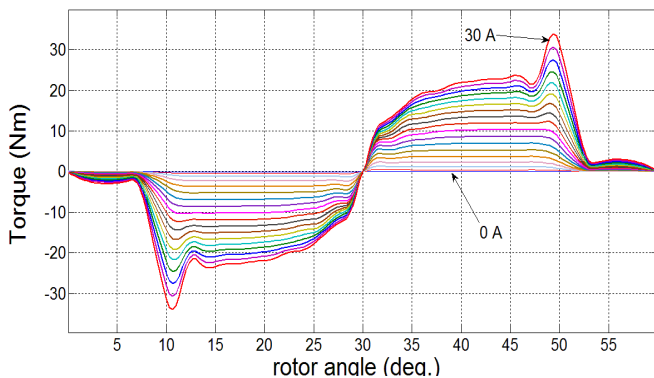
شکل ۲: (الف) جریان ماشین به‌ازای دو مقدار زاویه هدایت، (ب) گشتاور متناظر با جریان‌های قسمت (الف).

روش پیشنهادی از یک مرجع جریان دوسطحی برای فاز موتور استفاده می‌کند. این مرجع جریان در یک دوره الکتریکی دارای دو سطح بالا I_{ref-U} و پایین I_{ref-L} است. زاویه تغییر مرجع جریان از سطح پایین به سطح بالا برابر با θ_{on} و طول دوره سطح بالا به اندازه θ_{dwell} است. در مابقی یک دوره الکتریکی جریان مرجع در سطح پایین قرار دارد. کنترل موتور به‌وسیله کنترل چهار پارامتر θ_{on} ، θ_{dwell} ، I_{ref-U} و I_{ref-L} انجام می‌شود. شکل موج جریان مرجع پیشنهادی به‌همراه سایر پارامترهای کنترلی در شکل ۳ نشان داده شده است. برای مشخص کردن ناحیه گشتاور منفی و گشتاور مثبت، مقدار گشتاور تولیدی ماشین در یک جریان ثابت نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. کنترل جریان با استفاده از یک کنترل‌کننده هیستریزس صورت می‌گیرد. همان‌طور

نشان‌دهنده گشتاور تولیدی یک فاز ماشین است و جریان فاز به‌عنوان یک پارامتر در نظر گرفته شده است.



شکل ۵: منحنی‌های مغناطیسی به‌دست‌آمده از تحلیل المان محدود



شکل ۶: منحنی‌های گشتاور تولیدی موتور به‌ازای جریان‌های مختلف

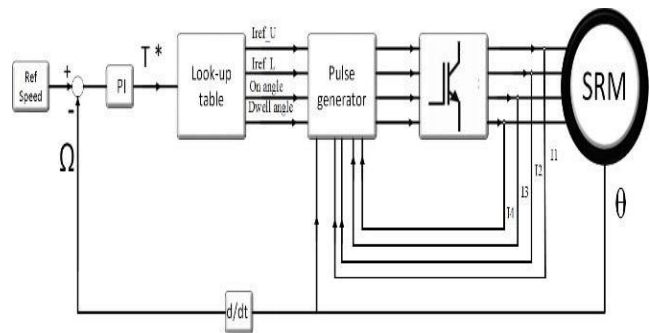
روش پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده است و در بازه تقریباً وسیعی از تغییرات چهار پارامتر کنترلی θ_{on} ، θ_{dwell} ، I_{ref-U} و I_{ref-L} مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. در این مجموعه شبیه‌سازی پارامتر θ_{on} از ۱۴ درجه تا ۲۸ درجه با گام یک درجه تغییر کرده است. θ_{dwell} از ۲۵ درجه تا ۳۵ درجه با گام یک درجه افزایش یافته است. لازم به یادآوری است که زاویه‌های فوق زاویه مکانیکی روتور هستند. I_{ref-L} با پله‌های ۰/۵ آمپر از صفر تا ۵ آمپر تغییر کرده است و I_{ref-U} از ۱۲ آمپر تا ۳۰ آمپر با پله‌های ۱ آمپر افزایش یافته است. با توجه به بازه تغییرات چهار پارامتر کنترلی، بیش از ۳۰۰۰۰ نقطه کار مختلف مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. در تمامی شبیه‌سازی‌ها سرعت روتور برابر با ۶۰۰۰ rpm است.

در ادامه کارایی روش پیشنهادی در حالت‌های مختلف کاری مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۱- عملکرد روش پیشنهادی در حالت‌های کاری مختلف

در این بخش، عملکرد موتور سوئیچ‌شونده رلوکتانسی در سه حالت مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

همان‌طور که بیان شد، پارامترهای کنترلی بهینه به‌ازای هر گشتاور از قبل محاسبه شده و به‌صورت یک جدول در کنترل‌کننده قرار می‌گیرند. برای محاسبه پارامترهای بهینه، عملکرد روش پیشنهادی به سه حالت تقسیم شده است و در هر حالت به‌صورت مبسوط مورد تحلیل قرار گرفته است. تأثیر پارامترهای کنترلی بر گشتاور موتور و ریپل آن در هر بخش بررسی شده است. با استفاده از نتایج تحلیل بخش ۴-۱، نقاط کاری بهینه در بخش ۴-۲ انتخاب خواهند شد.



شکل ۴: بلوک دیاگرام روش پیشنهادی

۴-۲ شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این بخش مراحل شبیه‌سازی نرم‌افزاری روش پیشنهادی به‌همراه نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تحلیل آن‌ها ارائه شده است. برای این‌که شبیه‌سازی انجام‌شده تا حد ممکن به حالت واقعی نزدیک باشد، ابتدا موتور SR با ابعاد مشخص در نرم‌افزار MAXWELL مدل شده است تا مشخصات مغناطیسی آن به‌دست آید. مشخصات موتور SR مدل شده در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول ۱: پارامترهای طراحی موتور SR

اندازه	پارامتر	اندازه	پارامتر
۸	تعداد قطب استاتور	۱۴۳ mm	قطر خارجی استاتور
۶	تعداد قطب روتور	۷۷ mm	قطر خارجی روتور
۱۷	کمان قطب استاتور	۰/۵ mm	فاصله هوایی
۱۹/۴	کمان قطب روتور	۱۱۰ mm	طول ماشین
۶۵	تعداد دور بر قطب	۲۳mm	قطر شفت
۴	تعداد فاز	۱۰۰۷	ولتاژ تغذیه
نیم‌پل	نوع مبدل	۳۰A	جریان مجاز
نامتقارن			

با استفاده از تحلیل المان محدود در نرم‌افزار MAXWELL منحنی‌های مغناطیسی ماشین در زاویه‌های مختلف روتور به‌دست می‌آید. این دسته منحنی‌ها در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. این منحنی‌ها در قالب یک ماتریس به بلوک مدل موتور SR در نرم‌افزار MATLAB داده می‌شود. منحنی‌های گشتاور تولیدی موتور در شکل ۶ نشان داده شده است. محور افقی نشان‌دهنده زاویه روتور و محور عمودی

۴-۱-۱- حالت اول: عملکرد در حالت CCM مرسوم

($\theta_{dwell} > 180^\circ$) و حالت Theta advancing

همان طور که قبلاً بیان شد، در سرعت‌های بالا در عملکرد تک پالس زاویه روشن شدن فازها پیش انداخته می‌شود تا جریان مناسب در فاز ماشین ایجاد شود. همچنین، در روش‌های مرسوم با افزایش θ_{dwell} موتور به حالت CCM برده می‌شود. در روش پیشنهادی اگر $I_{ref-L} = 0^A$ و $I_{ref-U} = 30^A$ قرار گیرد؛ با تغییر دو پارامتر θ_{dwell} و θ_{on} موتور در دو حالت توصیف شده در بالا عمل می‌کند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در این دو حالت در ادامه مورد تحلیل قرار گرفته است.

شکل ۷ نمودار پارامتری مقدار ماکزیمم جریان فاز را به‌زای تغییرات دو پارامتر θ_{dwell} و θ_{on} نشان می‌دهد. در این نمودار منحنی‌های جریان ثابت رسم شده‌اند و مقدار ماکزیمم جریان روی هر منحنی نوشته شده است. همان طور که مشاهده می‌شود در یک θ_{dwell} ثابت با پیش انداختن زاویه روشن شدن فازها ماکزیمم جریان فاز افزایش می‌یابد. برای مثال به‌زای کاهش زاویه روشن شدن فاز از 28° به 14° درجه ماکزیمم جریان موتور از $7/2$ آمپر به $13/4$ آمپر افزایش می‌یابد. همچنین در یک θ_{on} ثابت، با افزایش زاویه هدایت فازها، مقدار ماکزیمم جریان فاز تغییر می‌کند. این تغییر به‌زای $31^\circ < \theta_{dwell}$ بسیار ناچیز است اما به‌زای $31^\circ > \theta_{dwell}$ افزایش چشمگیری در جریان فاز مشاهده می‌شود. نقطه $\theta_{dwell} = 31^\circ$ مرز ورود به حالت CCM است. در این حالت جریان فاز به‌صورت پیوسته جاری می‌شود و دیگر به صفر نمی‌رسد. برای مثال، به‌زای $20^\circ = \theta_{on}$ با افزایش θ_{dwell} از 31° درجه به 32° درجه ماکزیمم جریان فاز از $10/37$ آمپر به $16/5$ آمپر افزایش می‌یابد.

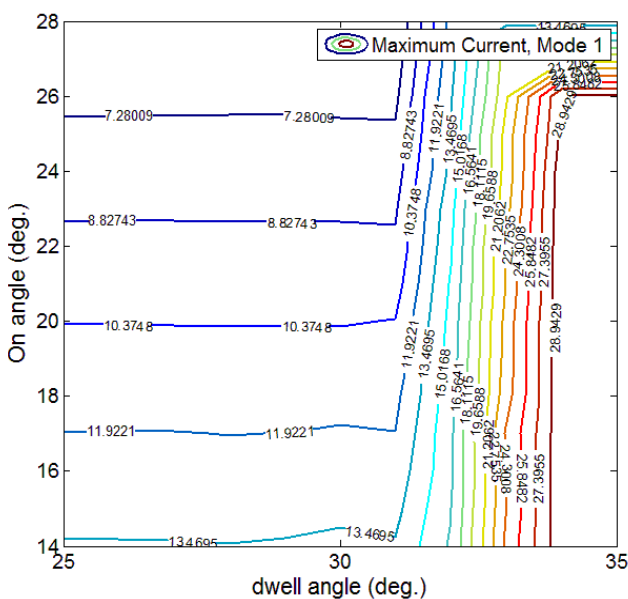
مشاهده می‌شود که وقتی موتور به حالت CCM می‌رود منحنی‌های جریان ثابت عمودی هستند، این یعنی ماکزیمم جریان در این حالت تقریباً مستقل از θ_{on} است و تنها به θ_{dwell} بستگی دارد. نکته دیگری که مشهود است این است که مقداری θ_{dwell} که مرز بین DCM و CCM است به θ_{on} بستگی ندارد و برابر مقدار ثابت 31° درجه است. در شکل ۸ منحنی‌های گشتاور ثابت ماشین به‌زای تغییرات پارامترهای θ_{dwell} و θ_{on} نشان داده شده است. همچنین، منحنی سه‌بعدی گشتاور نیز در شکل ۹ رسم شده‌اند تا بهتر قابل تحلیل باشند. مشاهده می‌شود که با پیش انداختن زاویه روشن شدن فاز در یک مقدار ثابت θ_{dwell} گشتاور تولیدی ماشین افزایش می‌یابد. همچنین به‌زای افزایش θ_{dwell} در یک θ_{on} خاص گشتاور ماشین افزایش می‌یابد. همانند آنچه برای منحنی ماکزیمم جریان اتفاق افتاد با افزایش θ_{dwell} تا 31° درجه میزان گشتاور با شیب کمی افزایش می‌یابد اما به‌زای $31^\circ > \theta_{dwell}$ گشتاور ماشین با شیب زیادی افزایش می‌یابد و دلیل این

امر ورود به ناحیه CCM است. همچنین مشاهده می‌شود که بیشترین تأثیر افزایش گشتاور ناشی از ورود به CCM به‌زای مقادیر کم θ_{on} اتفاق می‌افتد. مشهود است که اگر θ_{dwell} به بیشتر از 34° درجه افزایش یابد گشتاور ماشین شروع به کاهش می‌کند. این امر در منحنی‌های گشتاور ثابت به‌خوبی قابل مشاهده است زیرا که این منحنی‌ها در نزدیکی خط $34^\circ = \theta_{dwell}$ نسبت به این خط متقارن هستند. یکی از پارامترهای مهمی که باید در نظر گرفته شود درصد ریبیل گشتاور است. این درصد به‌صورت زیر به‌دست می‌آید [۲۱]:

$$\Delta T \% = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{mean}} \quad (1)$$

در معادله (۱) T_{min} ، T_{max} و T_{mean} به‌ترتیب برابر با مقدار حداقل، مقدار حداکثر و مقدار میانگین گشتاور تولیدی موتور هستند. نمودار سه‌بعدی تغییرات درصد ریبیل گشتاور در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که هم با پیش انداختن زاویه روشن شدن فاز و هم با افزایش θ_{dwell} میزان درصد ریبیل افزایش می‌یابد. این افزایش ریبیل زمانی که ماشین وارد ناحیه CCM می‌شود محسوس‌تر است.

آنچه مشهود است این است که افزایش θ_{dwell} در زمانی که زاویه روشن شدن فاز پیش انداخته نشده است موجب افزایش شدید ریبیل گشتاور می‌شود. دلیل این امر این است که در این حالت گشتاور ماشین به‌صورت نوسانی حول صفر تغییر می‌کند؛ بنابراین، در انتخاب نقطه کار مناسب برای موتور، دوری از این ناحیه ضروری است.

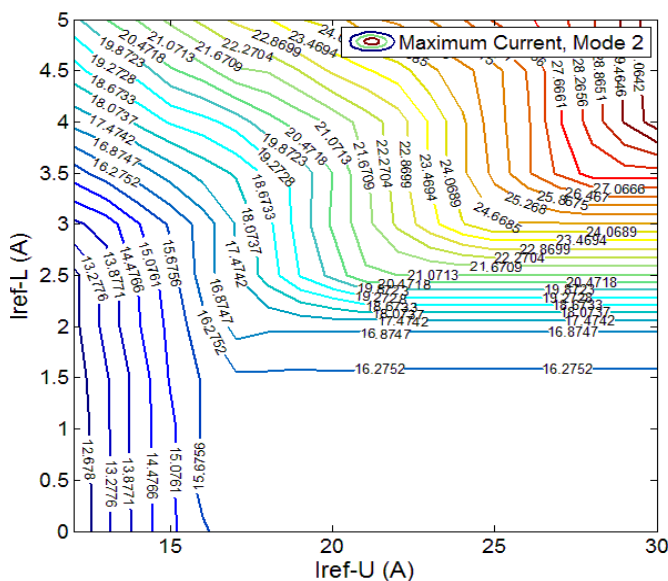


شکل ۷: مقدار ماکزیمم جریان در حالت اول

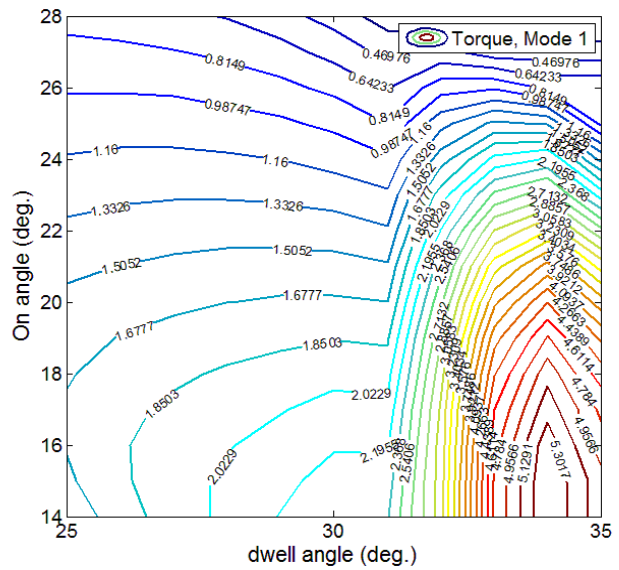
نمودار تغییرات مقدار ماکزیمم جریان در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به ازای $I_{ref-L} = 0$ با افزایش مقدار I_{ref-U} مقدار ماکزیمم جریان تا حدود ۱۶ A افزایش می‌یابد و از آن به بعد ثابت می‌ماند زیرا به خاطر ولتاژ القایی زیاد در سیم پیچی استاتور، منبع ولتاژ تغذیه قادر به افزایش جریان بیش از این مقدار نیست. با افزایش میزان I_{ref-L} ماشین قادر است جریان بیشتری را در فاز خود ایجاد کند و بنابراین گشتاور تولیدی ماشین افزایش می‌یابد.

نمودار دوبعدی و سه بعدی گشتاور تولیدی ماشین به ازای مقادیر مختلف I_{ref-L} و I_{ref-U} در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ رسم شده است. مشاهده می‌شود همانند آنچه در منحنی جریان اتفاق افتاد، به ازای $I_{ref-L} = 0$ با افزایش I_{ref-U} تا حدود ۱۶ آمپر، گشتاور تولیدی ماشین افزایش می‌یابد. به ازای مقادیر بیشتر I_{ref-U} گشتاور ثابت می‌ماند زیرا محرکه قادر به تولید جریان بیشتر در فاز ماشین نیست. با افزایش مقدار I_{ref-L} مشاهده می‌شود که گشتاور تولیدی ماشین افزایش می‌یابد. این بدان معناست که ماکزیمم جریان ماشین از ۱۶ آمپر فراتر می‌رود. همچنین مشاهده می‌شود که از به ازای I_{ref-U} مشخص، با افزایش I_{ref-L} از یک نقطه مشخص به بعد گشتاور ماشین کاهش می‌یابد و در بعضی نقاط وارد ناحیه منفی می‌شود. در انتخاب نقطه کار عملکرد ماشین باید از این ناحیه دوری شود.

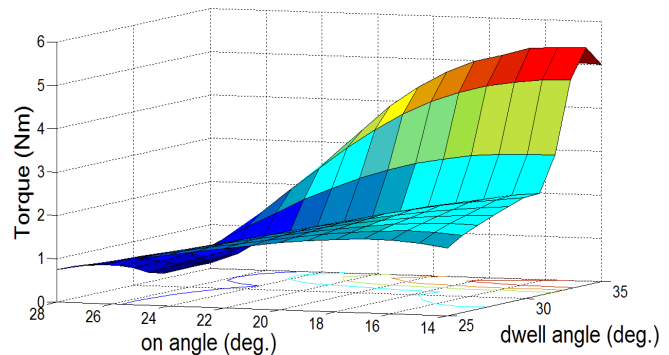
در شکل ۱۴ نمودار سه بعدی تغییرات درصد ریبیل نسبت به دو پارامتر I_{ref-L} و I_{ref-U} مشاهده می‌شود. همان طور که مشهود است در برخی نقاط مقدار $\Delta T\%$ به شدت افزایش می‌یابد. همانند آنچه در حالت قبل بیان شد، در این حالت نیز در نقاطی که درصد ریبیل بسیار زیاد است گشتاور تولیدی ماشین حول صفر نوسان می‌کند. دوری از این نقاط امری ضروری در تعیین پارامترهای کنترلی است.



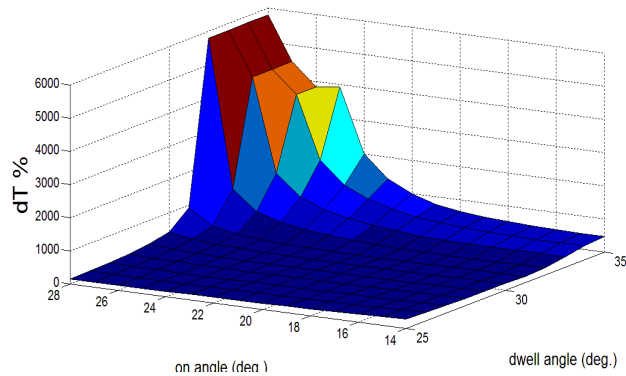
شکل ۱۱: مقدار ماکزیمم جریان در حالت دوم



شکل ۸: مقدار گشتاور تولیدی در حالت اول



شکل ۹: نمودار سه بعدی گشتاور در حالت اول



شکل ۱۰: درصد ریبیل گشتاور در حالت اول

۴-۲- حالت دوم: عملکرد روش پیشنهادی در کنترل گشتاور

در CCM مرسوم ($\theta_{dwell} > 180^\circ$)

موتور به ازای مقادیر پیشنهادی $\theta_{dwell} = 32^\circ$ و $\theta_{on} = 17^\circ$ وارد ناحیه

CCM می‌شود و روش پیشنهادی قادر است با تغییر دو پارامتر I_{ref-L}

و I_{ref-U} به کنترل گشتاور بپردازد.

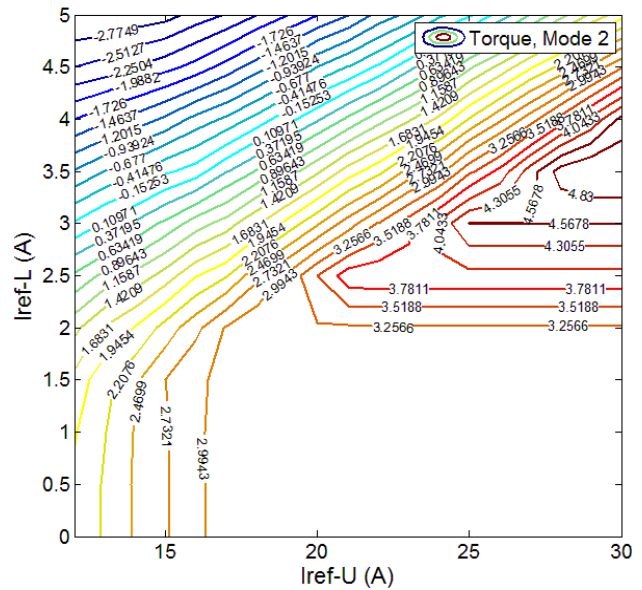
می پذیرد. $\theta_{dwell} < 180^\circ$ است. این امر با انتخاب I_{ref-L} بیشتر از صفر صورت

نتایج حاصل از شبیه سازی روش پیشنهادی به ازای $\theta_{dwell} = 28^\circ$ و $\theta_{on} = 17^\circ$ در ادامه بیان می شود.

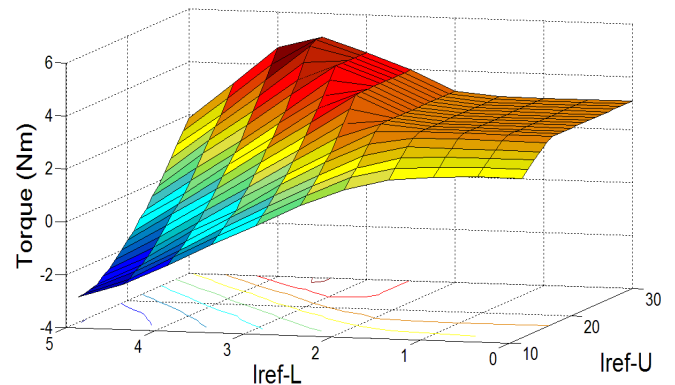
شکل ۱۵ تغییرات ماکزیمم جریان ماشین را به ازای تغییرات دو پارامتر I_{ref-L} و I_{ref-U} نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش مقدار I_{ref-L} میزان ماکزیمم جریان ماشین افزایش می یابد و در واقع ماشین وارد ناحیه CCM می شود.

نمودار دوبعدی و سه بعدی گشتاور تولیدی ماشین در شکل های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است. مشاهده می شود که همانند آنچه در CCM مرسوم اتفاق افتاد، در اینجا نیز با افزایش I_{ref-L} به ازای یک I_{ref-U} ثابت میزان گشتاور ابتدا افزایش داشته و سپس کاهش می یابد. دلیل کاهش گشتاور در مقادیر زیاد I_{ref-L} این است که جریان در ناحیه گشتاور منفی زیاد می شود و بنابراین گشتاور متوسط ماشین کاهش می یابد. در شکل ۱۸ درصد ریپل گشتاور در این حالت نشان داده شده است.

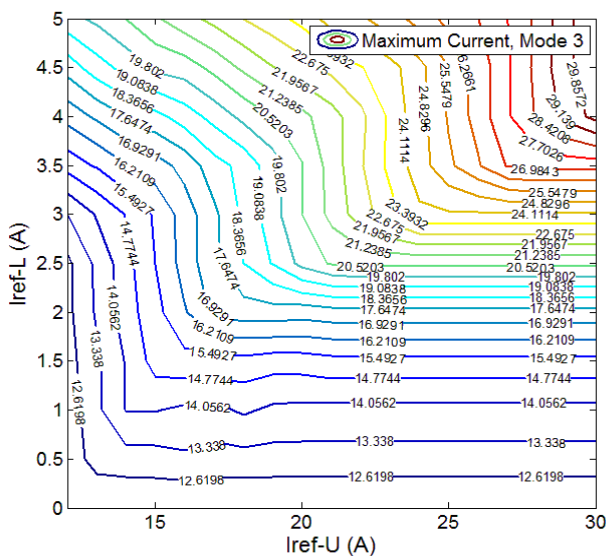
همان طور که از منحنی های گشتاور ثابت مشاهده می شود، برای یک گشتاور خاص مقادیر زیادی از دو پارامتر I_{ref-L} و I_{ref-U} قابل انتخاب است. همچنین با در نظر گرفتن تمامی حالات کاری که تاکنون ذکر شد، نقاط کاری مختلفی می توانند یک گشتاور ثابت را ایجاد کنند. سؤال مهمی که در اینجا مطرح می شود این است که بهترین نقطه کار برای ایجاد یک گشتاور خاص کدام است. در ادامه به بررسی این امر پرداخته می شود.



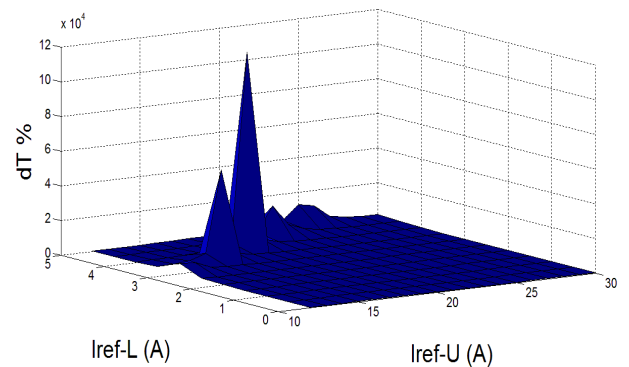
شکل ۱۲: مقدار گشتاور تولیدی در حالت دوم



شکل ۱۳: نمودار سه بعدی گشتاور در حالت دوم



شکل ۱۵: مقدار ماکزیمم جریان در حالت سوم



شکل ۱۴: درصد ریپل گشتاور در حالت دوم

۴-۱-۳ حالت سوم: عملکرد روش پیشنهادی در ناحیه CCM جدید ($\theta_{dwell} < 180^\circ$)

روش پیشنهادی ناحیه ای از عملکرد موتور را ممکن می سازد که تاکنون در هیچ مرجع دیگری بیان نشده است و آن حالت هدایت پیوسته با

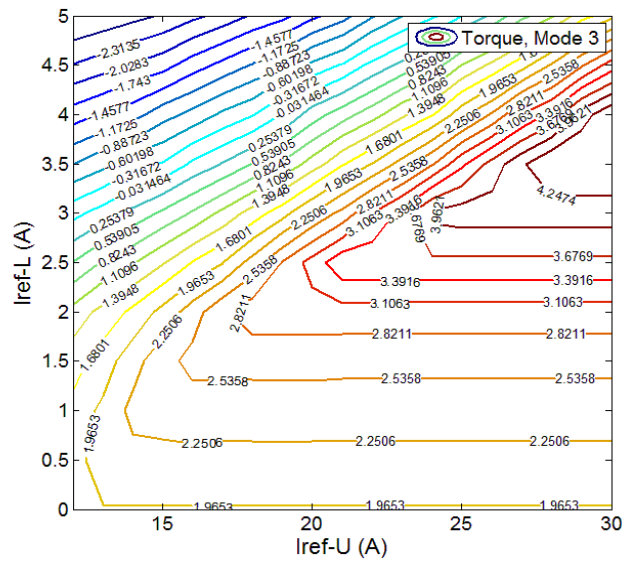
تنها تلفات متغیر تلفات مسی موتور است که با مقدار مؤثر جریان متناسب است. با در نظر گرفتن این دو تابع هدف، به‌ازای گشتاورهای مختلف، بهینه‌ترین نقاط کار انتخاب شده‌اند که در جدول ۲ خلاصه شده‌اند. برای صرفه‌جویی در زمان لازم برای محاسبات باید از روش‌های بهینه‌سازی جهت انتخاب نقاط کار بهینه استفاده شود. در این مقاله، به دلیل این‌که نقاط کاری موتور در گستره وسیعی مورد شبیه‌سازی قرار گرفت، نقاط کار بهینه بر اساس توابع هدف و مقایسه خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی، انتخاب شدند.

جدول ۲: نقاط کار بهینه در روش پیشنهادی

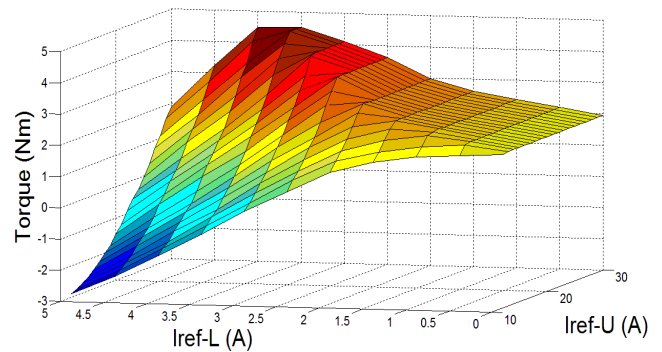
حالت کاری	I _{rms} (A)	ΔT (%)	I _{ref-L}	I _{ref-U}	θ _{on}	θ _{dwell}	T (Nm)
DCM	۲/۵	۱۴۶	۰	۶	۲۸	۲۵	۰/۷۵
DCM	۳/۳۷	۱۷۰	۰	۱۲	۲۵	۲۹	۱
CCM جدید	۳/۶۹	۱۵۸	۰/۵	۹	۲۴	۲۷	۱/۲۵
CCM جدید	۴/۳	۱۶۳	۰/۵	۱۰	۲۲	۲۹	۱/۵
CCM جدید	۴/۸	۱۷۶	۱	۱۱	۲۱	۲۹	۱/۷۵
CCM جدید	۵/۳۸	۱۷۸	۰/۵	۱۲	۱۹	۲۹	۲
CCM مرسوم	۶/۱۷	۱۸۵	۱	۱۳	۱۸	۳۲	۲/۲۵
CCM مرسوم	۶/۸	۱۸۸	۱	۱۴	۲/۵	۳۲	۲/۵
CCM مرسوم	۷/۴۳	۱۹۷	۱/۵	۱۵	۲/۷۵	۳۲	۲/۷۵
CCM مرسوم	۸/۰۹	۲۰۴	۲	۱۷	۱۸	۳۲	۳

مشاهده می‌شود که نقاط بهینه برای پارامترها در گشتاورهای مختلف به صورت منظمی در سه ناحیه قرار گرفته‌اند. به‌ازای گشتاور کمتر و مساوی ۱ Nm بهترین نقطه کاری موتور در ناحیه DCM قرار دارد. برای تولید گشتاور بین ۱ Nm تا ۲ Nm بهینه‌ترین نقاط کاری همگی در ناحیه CCM جدید قرار دارند که برای اولین بار در این مقاله مطرح شده است. با افزایش گشتاور مورد نیاز، بهترین نقاط کاری موتور در ناحیه CCM مرسوم قرار می‌گیرند. در این ناحیه بهینه‌ترین نقاط کار دارای $\theta_{dwell} = 32^\circ$ هستند؛ یعنی بهینه‌ترین عملکرد به‌ازای کمترین θ_{dwell} که ماشین را به CCM می‌برد، صورت می‌پذیرد. نکته دیگری که قابل بیان است این است که به‌ازای کاهش تقاضای گشتاور تولیدی در تمام نواحی میزان θ_{on} افزایش می‌یابد زیرا همان‌طور که قبلاً بیان شد پیش انداختن زاویه روشن شدن فاز گرچه موجب افزایش گشتاور می‌شود اما ریپل گشتاور را افزایش می‌دهد.

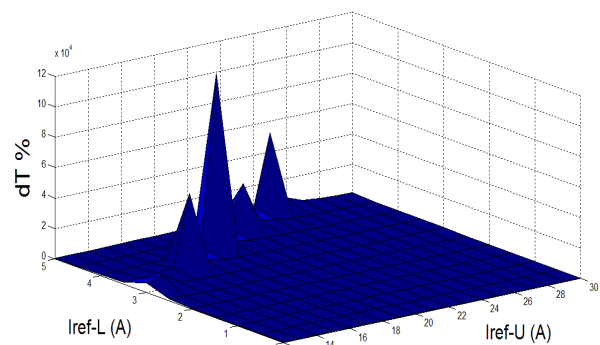
مشخصات محرکه نشان داده شده در شکل ۴ در جدول ۳ خلاصه شده است. در شکل ۱۹ پاسخ دینامیکی محرکه در سرعت ثابت به افزایش گشتاور مورد نیاز از ۲ Nm به ۲/۵ Nm را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود گشتاور مورد نیاز در ثانیه ۴ افزایش می‌یابد. هم‌زمان



شکل ۱۶: مقدار گشتاور تولیدی در حالت سوم



شکل ۱۷: مقدار گشتاور تولیدی در حالت سوم



شکل ۱۸: درصد ریپل گشتاور در حالت سوم

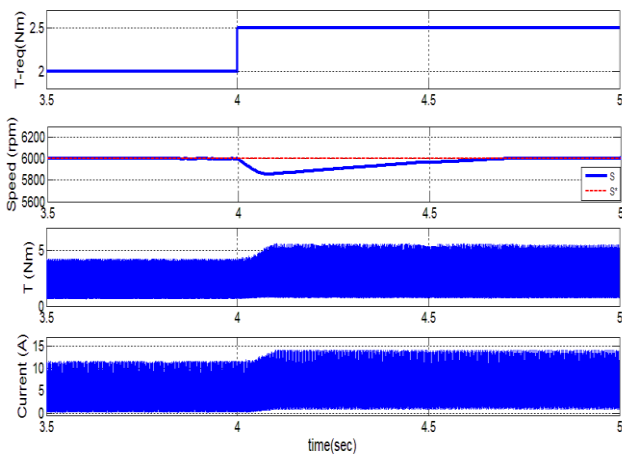
۴-۲- انتخاب نقاط کار بهینه

برای انتخاب بهترین نقطه کار ماشین برای تولید یک گشتاور مشخص باید تابع هدف مشخص شود. در این مقاله دو تابع هدف مورد توجه قرار گرفته است. اولی درصد ریپل گشتاور و دومی مقدار تلفات موتور است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده از تلفات هسته ماشین صرف نظر شده است و بنابراین به دلیل ثابت بودن تلفات مکانیکی ماشین در سرعت ثابت،

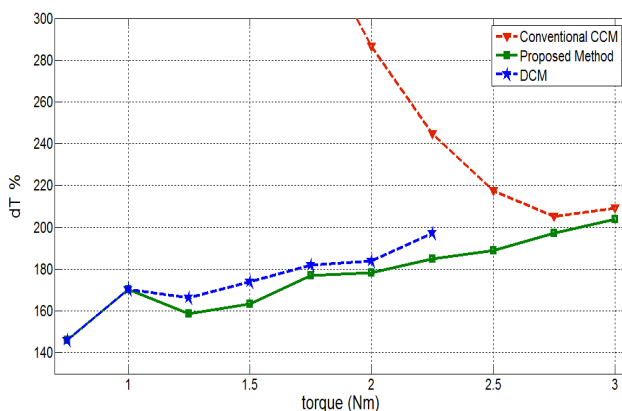
نشان داد که این روش با داشتن چهار پارامتر کنترلی قادر به کنترل موتور در هر دو حالت CCM و DCM است. در انتها، بهینه‌ترین نقاط کاری در هر دو ناحیه DCM و CCM بر اساس دو تابع هدف درصد ریپل گشتاور و تلفات موتور مشخص شد و پاسخ دینامیکی روش به‌ازای تغییر گشتاور بار در سرعت ثابت مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی نشان‌دهنده کارایی روش پیشنهادی در این حالت بود، به‌صورتی که در بعضی نقاط کاری درصد ریپل گشتاور تا میزان ۱۲ درصد کاهش یافت.

جدول ۳: مشخصات محرکه در بلوک دیاگرام روش پیشنهادی

نوع موتور	SRA/۶
ولتاژ منبع تغذیه	۱۰۰V
سرعت مرجع	۶۰۰rpm
نوع مبدل	نیم‌پل نامتقارن
نوع سوئیچ‌ها	IGBT
ولتاژ تغذیه	۱۰۰V
ضرایب کنترل‌کننده	$K_p = 0.18$
	$K_i = 0.56$



شکل ۱۹: پاسخ دینامیکی محرکه با روش پیشنهادی



شکل ۲۰: مقایسه درصد ریپل گشتاور در سه روش مختلف

با آن با انتخاب نقطه کار بهینه جدید، میزان جریان و گشتاور ماشین افزایش می‌یابد تا میزان درخواست را برآورده کند. مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی دارای سرعت پاسخ مناسبی است.

۵- مقایسه و ارزیابی

برای ارزیابی بهتر، روش پیشنهادی با دو روش دیگر مقایسه شده است. دو روش مذکور عبارتند از: ۱- روش پیش انداختن زاویه فاز (DCM) ۲- روش هدایت پیوسته مرسوم. درصد ریپل گشتاور به‌عنوان پارامتر مقایسه در نظر گرفته شده است.

شکل ۲۰ مقدار ریپل گشتاور را در سه روش مذکور نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که به‌ازای گشتاورهای کمتر از ۱Nm ریپل گشتاور در روش DCM و روش پیشنهادی با یکدیگر برابر است. به‌ازای گشتاورهای بزرگ‌تر از ۱Nm مقدار ریپل گشتاور در روش پیشنهادی کمتر از روش DCM است. برای مثال، به‌ازای گشتاور ۲/۲۵Nm، درصد ریپل گشتاور در روش DCM برابر با ۱۹۷٪ است ولی در روش پیشنهادی درصد ریپل گشتاور به مقدار ۱۸۵٪ کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود که روش DCM قادر به تولید گشتاور بیشتر از ۲/۲۵Nm نیست. روشن است که به‌ازای گشتاور بزرگ‌تر از این مقدار، ریپل گشتاور در روش پیشنهادی کمتر از روش هدایت پیوسته مرسوم است. برای مثال، جهت تولید گشتاور خروجی برابر با ۲/۵Nm، ریپل گشتاور در روش هدایت پیوسته مرسوم و روش پیشنهادی به ترتیب برابر با ۲۱۷٪ و ۱۸۸٪ است؛ بنابراین، کارایی روش پیشنهادی از لحاظ درصد ریپل گشتاور تصدیق می‌شود.

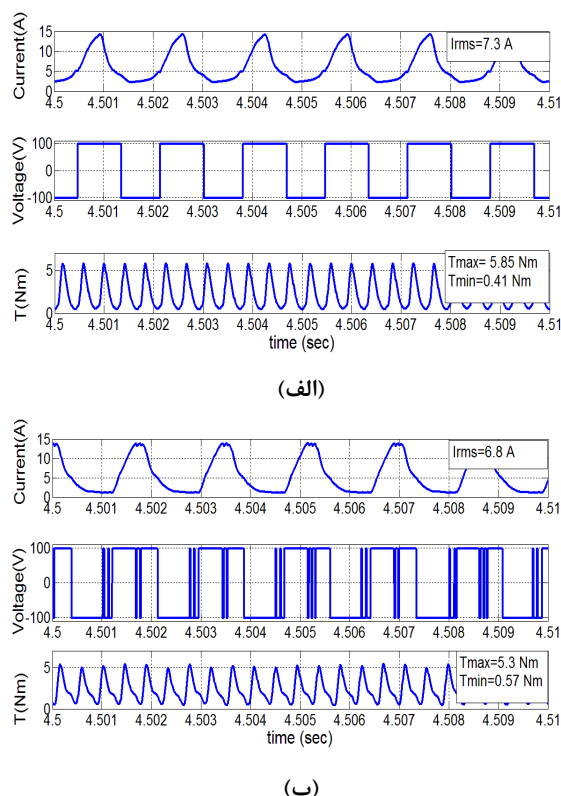
شکل موج‌های مربوط به جریان، ولتاژ اعمالی و گشتاور خروجی مربوط به روش پیشنهادی همراه با شکل موج‌های مربوط به روش هدایت پیوسته مرسوم در شکل ۲۱ نشان داده شده است. مقدار متوسط گشتاور خروجی در هر دو حالت برابر با ۲/۵Nm است. مشاهده می‌شود که با اعمال روش پیشنهادی، میزان ریپل گشتاور و همچنین مقدار مؤثر جریان کاهش پیدا می‌کند. کاهش مقدار مؤثر جریان موجب کاهش تلفات اهمی و افزایش بازده نهایی می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جدید برای کنترل موتور SR ارائه شد. روش جدید دارای قابلیت‌هایی است که در روش‌های قبلی موجود نیست. این روش قادر به کنترل گشتاور موتور SR در ناحیه CCM مرسوم است. همچنین این روش قادر است که ماشین را به‌ازای مقادیر $\theta_{dwell} < 180^\circ$ به حالت CCM ببرد. این حالت که برای اولین بار در این مقاله معرفی شده است در گشتاورهای متوسط دارای کمترین ریپل گشتاور نسبت به حالت‌های دیگر است. شبیه‌سازی نرم‌افزاری برای راستی‌آزمایی روش پیشنهادی به‌کار گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی

- [8] H. J. Brauer, and R. W. De Doncker, "Thermal modeling of a high-speed switched reluctance machine with axial air-gap flow for vacuum cleaners," *Proceedings of the 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, pp. 1-10, 2011.
- [9] Y. Sozer, and D. A. Torrey, "Closed loop control of excitation parameters for high speed switched-reluctance generators," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, pp. 355-362, 2004.
- [10] B. Bilgin, and A. Emadi, "Electric motors in electrified transportation: A step toward achieving a sustainable and highly efficient transportation system," *Power Electronics Magazine, IEEE*, vol. 1, pp. 10-17, 2014.
- [11] P. C. Martin, and P. V. Vladan, "Characteristics of switched reluctance motor operating in continuous and discontinuous conduction mode," *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 10, pp. 47-57, 2013.
- [12] H. Hannoun, M. Hilaret, and C. Marchand, "Design of an SRM speed control strategy for a wide range of operating speeds," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, pp. 2911-2921, 2010.
- [13] H. Hannoun, M. Hilaret, and C. Marchand, "Experimental validation of a switched reluctance machine operating in continuous-conduction mode," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, pp. 1453-1460, 2011.
- [14] M. Rekik, M. Besbes, C. Marchand, B. Multon, S. Loudot, and D. Lhotellier, "High speed range enhancement of switched reluctance motor with continuous mode for automotive applications," *International Conference on Ecologic Vehicles & Renewable Energies*, 2007.
- [15] N. A. Patil, and J. S. Lawler, "Issues in the control of the switched reluctance motor during continuous conduction," *39th North American Symposium in Power*, pp. 534-540, 2007.
- [16] J. S. Lawler, J. M. Bailey, J. W. McKeever, and P. J. Otaduy, "Impact of continuous conduction on the constant power speed range of the switched reluctance motor," *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, pp. 1285-1292, 2005.
- [17] Q. Q. Ma, W. H. Liang, F. J. T. E. Ferreira, D. Q. Bi, and B. M. Ge, "Improved flux linkage method for position sensorless control of high-speed SRM," *International Conference on Electrical Machines*, Berlin, pp. 783-788, 2014.
- [18] L. Dong-Hee, A. So-Yeon, A. Jin-Woo, and K. Jang-Mok, "Modified TSF for the high speed switched reluctance motor," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 655-660, 2011.
- [19] R. Suryadevara, and B. G. Fernandes, "Modified direct instantaneous torque control of switched reluctance motor with high torque per ampere and reduced source current ripple," *Power Electronics Conference*, Hiroshima, pp. 2433-2437, 2014.
- [20] A. Joonseon, W. Sung-Hong, and J. Lee, "The high-speed operation of single phase switched reluctance motor considering magnetic saturation," *Journal of Applied Physics*, vol. 99, pp. 08S103-08S103-3, 2006.

[۲۱] میلاد دولتشاهی، سیدمرتضی سقائیان‌نژاد، Jin Woo Ahn و مهدی معلم، «کاهش نوسانات گشتاور و تلفات اهمی در موتور سوئیچ رلوکتانس با در نظر گرفتن اثر اشباع مغناطیسی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۴، شماره ۲، صفحات ۱۱-۲۱، ۱۳۹۳.



شکل ۲۱: شکل موج جریان، ولتاژ و گشتاور خروجی مربوط به (الف) روش CCM مرسوم و (ب) روش پیشنهادی.

مراجع

- [1] M. D. Bui, S. Schneider, S. Arnaout, and U. Schaefer, "Torque maximization of a high-speed switched reluctance starter in acceleration test," *15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, pp. 1-11, 2013.
- [2] L. Dong-Hee, P. Trung Hieu, and A. Jin-Woo, "Design and operation characteristics of four-two pole high-speed SRM for Torque ripple reduction," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, pp. 3637-3643, 2013.
- [3] D. Wen, and L. Ling, "Design and control of a high-speed switched reluctance machine with conical magnetic bearings for aircraft application," *IET Electric Power Applications*, vol. 7, pp. 179-190, 2013.
- [4] C. Liu, Z. Deng, and L. Xie, "The design of the simple structure-specified controller of magnetic bearings for the high-speed SRM," *IEEE Transactions on Mechatronics*, vol. 20, pp. 1-11, 2014.
- [5] D. Jie, S. Haghbin, D. Yi, C. Bednar, H. Liles, J. Restrepo, et al., "Electromagnetic design considerations for a 50,000 rpm 1kW switched reluctance machine using a flux bridge," *IEEE International Conference on Electric Machines & Drives (IEMDC)*, pp. 325-331, 2013.
- [6] K. Tae-Hyoung, L. Sang-Hun, and A. Jin-Woo, "Design of high speed SR drive system for fuel pump of fuel cell electric vehicle," *IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion (VPPC)*, pp. 594-597, 2012.
- [7] L. Haoding, E. Fairall, B. Bilgin, and A. Emadi, "Performance evaluation of a high-speed high-power switched reluctance motor drive," *IEEE Conference Applied Power Electronics and Exposition (APEC)*, pp. 1337-1342, 2015.