

بررسی و مدلسازی اثرات پدیده کوپلاژ متقابل فازها در موتور SR6/4 توسط تحلیل FE دوبعدی

محسن فرشاد

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد گروه مهندسی برق و کامپیوتر - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

جواد فیض

استادیار گروه مهندسی برق و کامپیوتر - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

کارو لوکس

قطب کنترل و پردازش هوشمند گروه برق و کامپیوتر دانشگاه تهران
پژوهشکده سیستمهای هوشمند مرکز تحقیقات فیزیک نظری و ریاضیات

حسن غفوری فرد

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه امیر کبیر
پژوهشکده سیستمهای هوشمند مرکز تحقیقات فیزیک نظری و ریاضیات

(تاریخ دریافت ۸۱/۵/۵، تاریخ تصویب ۸۲/۱۱/۱۸)

چکیده

در این مقاله، اثرات پدیده کوپلاژ متقابل فازها بر رفتار یک موتور SR6/4 مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به ضعف توانایی مدل‌های اندوکتانسی در مواجهه با ماهیت غیرخطی مکانی و مغناطیسی موتور SR، اقدام به توسعه یک مدل تحلیلی غیرخطی شار برای موتور SR6/4 با تحریک همزمان دوفاز گردیده است که دربرگیرنده اثرات پدیده کوپلاژ متقابل فازهاست. اطلاعات شار مورد استفاده در توسعه مدل، از طریق تحلیل FE دوبعدی بدست آمده‌اند. این اطلاعات گویای اهمیت پدیده کوپلاژ متقابل فازها، بخصوص در سطوح بالای جریان فازهاست. از ویژگیهای ارزشمند مدل شار توسعه‌یافته، تشابه عملکردی آن با یک شبکه عصبی پیشخور است که پیشاپیش تضمین‌کننده توانایی بالای تطبیق مدل با مشخصه‌های واقعی شار موتور است. نتایج شبیه‌سازی گویای این نکته هستند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل FE، شبکه عصبی پیشخور، کوپلاژ متقابل، موتور SR

مقدمه

برای یافتن یک رابطه تحلیلی (در قالب: فرمول بسته و یا سریهای فوریه با جملات محدود) برای توصیف مشخصه شار فاز ([۳،۴،۸،۱۱،۱۳،۱۴،۱۹،۲۰]) یا اندوکتانس فاز ([۶،۹،۱۰،۱۲،۱۷،۲۱]) برحسب متغیرهای موقعیت زاویه‌ای روتور و جریان فاز بوده است و در ضمن، جهت توسعه و تست مدل‌های مختلف مورد اشاره، از داده‌های اندازه‌گیری و یا نتایج تحلیل FE استفاده شده است. اکثر مدل‌های ارائه شده وابسته به موتور هستند و لازم است پارامترهای موتور از روی داده‌های اندازه‌گیری و یا نتایج تحلیل FE موتور تعیین گردند. البته در دهه اخیر تلاشهایی نیز در جهت توسعه مدل‌های پارامتری مستقل از موتور انجام گرفته است [۱۳،۱۴]. گرچه در عمده مدل‌های

در میان حوزه‌های مختلف تحقیقاتی موتور SR، حوزه مدلسازی بدلائل متعددی از جمله: کمک به فاز طراحی، نیاز به در دست داشتن مدلی حتی‌المقدور دقیق برای طرحهای کنترل کلاسیک، پیش‌بینی عملکرد و کارایی موتور در وضعیت‌های کاری مختلف و ایجاد قدرت تصمیم‌گیری در برخورد با شرایط غیرمعمول احتمالی، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. در همین راستا مدل‌های مختلف off-line و on line برای موتور SR ارائه گردیده‌اند [۳،۴،۸،۱۱،۱۳،۱۴،۱۹،۲۰]. در [۱۵] عمده کارهای فوق مورد اشاره قرار گرفته و چند کار دیگر بطور مختصر مرور شده‌اند. وجه مشترک عمده این مدل‌ها، جستجو

اندازه‌گیری و یا نتایج تحلیل FE (شامل اطلاعات شار نواحی مختلف موتور)، تعیین شوند. چون این فرآیند تطبیق در نهایت منتهی به حل یک دستگاه معادلات خطی میشود، پس عمل تطبیق مدل از سرعت بالایی برخوردار است.

۲- توسعه مدل‌های تحلیلی برای کمیت‌های مختلف مغناطیسی موتور به سراسری کار مقاله حاضر نیست.

۳- با توجه به ماهیت غیرخطی رفتار موتور (ناشی از شکل خاص قطب‌های روتور و استاتور، پدیده اشباع و ...) طبیعی است که برای افزایش دقت، نیاز به جزئی‌سازی هرچه بیشتر در مدل (از طریق تعبیه المان‌های رلوکتانسی متنوع در قسمت‌های مختلف موتور) میباشد. در مقاله حاضر از اطلاعات شار (تنها در محل قطب استاتور) برای توسعه مدل شار استفاده شده است و با توجه به کافی بودن اطلاعات شار برای توصیف کامل رفتار موتور طبیعی است که نگرانی فوق مربوط به مدل‌های گسترده رلوکتانسی بی‌مورد خواهد بود. در این تحقیق، توسعه یک مدل تحلیلی غیرخطی شار برای موتور SR6/4 با تحریک همزمان دوفاز، با استفاده از نتایج تحلیل FE دوبعدی، مورد مطالعه قرار گرفته است و ثابت شده است که تحت این شرایط اثر کوپلاژ قابل‌ملاحظه است. ساختار مقاله بدین شرح است: در بخش لزوم توسعه، انگیزش تحقیق انجام‌گرفته تبیین میشود. در بخش اعمال تحلیل، مراحل مختلف انجام تحلیل FE دوبعدی، جهت استخراج مشخصه‌های مغناطیسی مربوط به تحریک همزمان دوفاز موتور، ارائه و نتایج حاصل در بخش نتایج حاصل از تحلیل آورده شده‌اند. در بخش توجیه تاثیر کوپلاژ نحوه رفتار مشخصه‌های استخراج شده توجیه میشود. در بخش مدلسازی رفتار، مدلسازی رفتار موتور متأثر از پدیده کوپلاژ متقابل فازها، با توسعه روابط تحلیلی ملهم از عملکرد و توانایی شبکه عصبی پیشخور انجام میشود. نتایج شبیه‌سازی، که نشان‌دهنده توانایی مدل شار پیشنهادی هستند، در بخش نتایج شبیه‌سازی آورده شده‌اند و بالاخره مقاله با نتیجه‌گیری خاتمه می‌یابد.

لزوم توسعه مدل‌های متأثر از پدیده کوپلاژ متقابل فازها

بخش قابل‌توجهی از تحقیقات انجام شده بر روی موتور SR، به حوزه مدلسازی موتور SR مربوط است

ارائه شده برای موتور SR، از پدیده کوپلاژ متقابل بین فازها به استناد کوچک بودن آن (بدلیل وجود فاصله کافی بین سیم‌پیچی فازها) صرفنظر شده است با اینحال در مواردی این پدیده مورد توجه محققین قرار گرفته است [۲، ۵، ۱۰، ۱۸].

در کار ارائه شده توسط Arkadan و Kielgas [۱۰]، یک مدل فضای حالت اندوکتانسی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری و نیز نتایج تحلیل FE ارائه شده تا پارامترهای اندوکتانس خودی و متقابل فازها بدست آورده شوند. ضعف‌های زیر را در مورد این کار میتوان برشمرد:

۱- مدل اندوکتانسی در مواجهه با ماهیت غیرخطی مکانی و مغناطیسی موتور SR قطعاً به توانایی مدل‌های شار نیست. ضمناً در این مدل اندوکتانسی از وابستگی پارامتر اندوکتانس به جریان فازهای موتور (ناشی از پدیده اشباع) صرفنظر شده است.

۲- هیچگونه توجیهی در مورد نحوه تغییرات اندوکتانس متقابل بدست آمده (از طریق اندازه‌گیری و یا تحلیل FE) ارائه نشده است و تنها از سری فوریه با جملات محدود برای توصیف پارامترهای اندوکتانسی خودی و متقابل استفاده شده است.

۳- جهت محقق‌سازی مدل که شامل اثر کوپلاژ متقابل فازها نیز هست از تحریک تک‌فاز استفاده شده و در نهایت ناچیز بودن اثر کوپلاژ متقابل در توصیف رفتار موتور نتیجه گرفته شده است که این امر بدون تست نیز قابل پیش‌بینی بود. در واقع تحریک همزمان دوفاز و چندفاز با سطوح جریان قابل‌ملاحظه فازها است که اثر کوپلاژ متقابل فازها را روشن می‌سازد.

در [۲، ۵، ۱۸] نیز با استناد به مدل‌های الکتریکی معادل مدارهای مغناطیسی و با تجزیه پارامتر رلوکتانس مغناطیسی در بخش‌های مختلف استاتور، روتور و فاصله هوایی، مدل‌های الکتریکی-مغناطیسی معادل مشبکی از موتور بدست آمده‌اند که اثر کوپلاژ متقابل فازها با استفاده از المان‌های رلوکتانسی مناسب تعبیه شده در فواصل هوایی بین فازها در آنها لحاظ شده است. نقاط قوت و ضعف کارهای فوق بشرح زیر است:

۱- قبل از کاربرد مدل لازم است که مقادیر کلیه پارامترهای رلوکتانسی مدل از طریق تطبیق آن با داده‌های

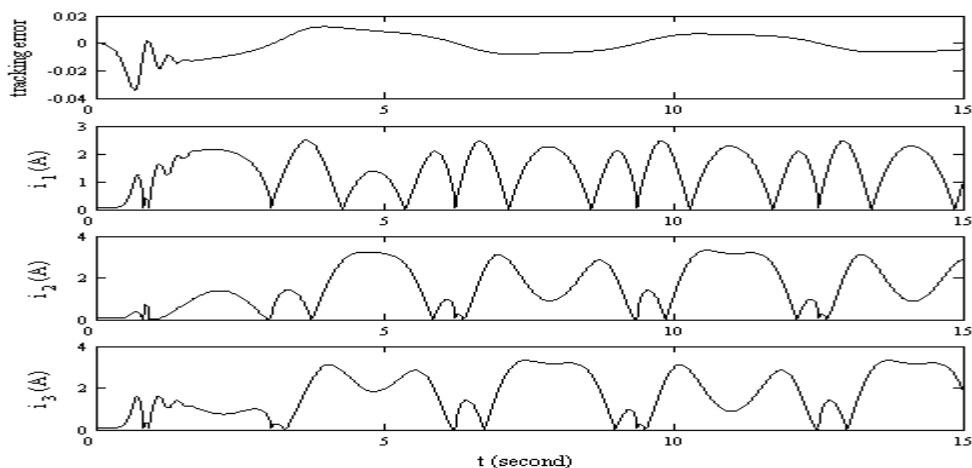
پسخوری برای کنترل موتور پله‌ای PM استفاده شده است. در [۲۲]، با استفاده از نظریه پایداری لیاپانوف، یک طرح کنترل مقاوم تطبیقی برای کنترل موتورهای پله‌ای PM و VR ارائه گردیده است. در موارد مزبور، عملکرد کنترل‌کننده توسعه‌یافته محدود به حوزه‌ای خاص (بطور مثال تحریک تک‌فاز) نبوده است و البته بدیهی است که اعتبار کار صورت گرفته به اعتبار مدل مورد استناد موتور بستگی خواهد داشت. نمونه‌ای از نتایج اجرای کنترل‌کننده مقاوم توسعه‌یافته در [۲۲]، جهت ردیابی سیگنال فرمان $y_{ref} = \frac{\pi}{2} \sin(t)(1 - e^{-0.1t^2})$ توسط موتور پله‌ای VR سه‌فاز، در شکل (۱) نشان داده شده است. از نکات قابل تعمق در شکل (۱)، عبور همزمان جریان زیاد از فازهاست. در هر حال، بدلیل نقصان مدل ناشی از عدم احتساب اثر کوپلاژ متقابل فازها، کارایی طرح کنترلی توسعه‌یافته دقیق نخواهد بود.

[۲۱-۱۴-۱۷-۸-۶-۲]. طبیعت غیرخطی مکانی و مغناطیسی موتور باعث پیچیدگی و جذابیت طراحی، مدلسازی و کنترل آن میگردد. دلایل متعدد اهمیت مبحث مدلسازی و توسعه مدل‌های تحلیلی و حتی غیرتحلیلی در مقدمه مقاله بیان شد. بجز موارد محدودی [۲، ۵، ۱۰، ۱۸]، در مدل‌سازیهای موتور SR از احتساب اثرات پدیده کوپلاژ متقابل فازها صرف‌نظر شده است. بدلیل متعدد، به حساب آوردن اثر کوپلاژ متقابل بین فازها بر رفتار موتور ضرورت دارد:

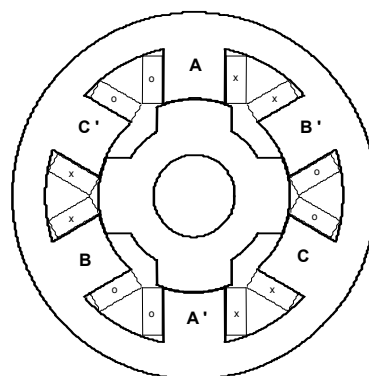
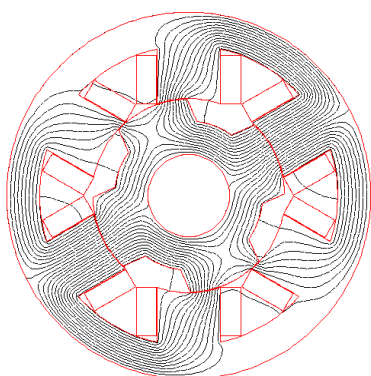
- ۱- داشتن مدل کاملتری از سیستم.
- ۲- قابل‌ملاحظه بودن اثرات پدیده کوپلاژ متقابل فازها، علی‌الخصوص در جریانهای زیاد فازها و به هنگام تحریک همزمان فازها. بدلیل عملکرد مدارهای کانورتی با مسیر برگشت انرژی ذخیره شده در سیم‌پیچ، این مورد در حوالی نقاط کلیدزنی فازها اهمیت بیشتری پیدا میکند.
- ۳- محدود نساختن عملکرد طرحهای کنترلی به حوزه‌های خاص بدلیل نقصان مدل. در [۷، ۱۶] از روش خطی‌سازی

جدول ۱: مشخصات هندسی / مغناطیسی موتور SR6/4 مورد بررسی.

۳/۴۵cm	شعاع خارجی یوغ روتور (R_r)	۵/۵ hp	قدرت نامی (P_n)
۸/۵cm	شعاع خارجی استاتور ($R_{s ext}$)	rpm ۳۰۰۰	سرعت نامی (N_n)
۶/۹۵cm	شعاع داخلی یوغ استاتور ($R_{s yoke}$)	۵۱۰ volt	ولتاژ تغذیه DC
۳۸°	طول زاویه‌ای کمان قطب استاتور (β_s)	amper ۲۰	جریان اسمی فاز موتور (I_n)
۴۶°	طول زاویه‌ای کمان قطب روتور (β_r)	۶	تعداد قطبهای استاتور (N_s)
۵۴	تعداد دور سیم‌پیچی در هر قطب استاتور (N)	۴	تعداد قطبهای روتور (N_r)
۱۳/۵N*m	گشتاور بار نامی (T_{ln})	۱/۹ cm	شعاع محور موتور (R_{sh})
۰/۰۰۵ kgm ²	ممان اینرسی معادل موتور و بار نامی (J_n)	۴/۵ cm	شعاع موثر روتور (R_{rg})
N*m*sec/rad ۰/۰۰۴	ضریب اصطکاک ویسکوز (B)	۱/۸ cm ۱۴	طول روتور (L_{stk})
۰/۵ohm	مقاومت سیم‌پیچ فاز (R)	۱/۰۳ cm ۰	طول فاصله هوایی (G)



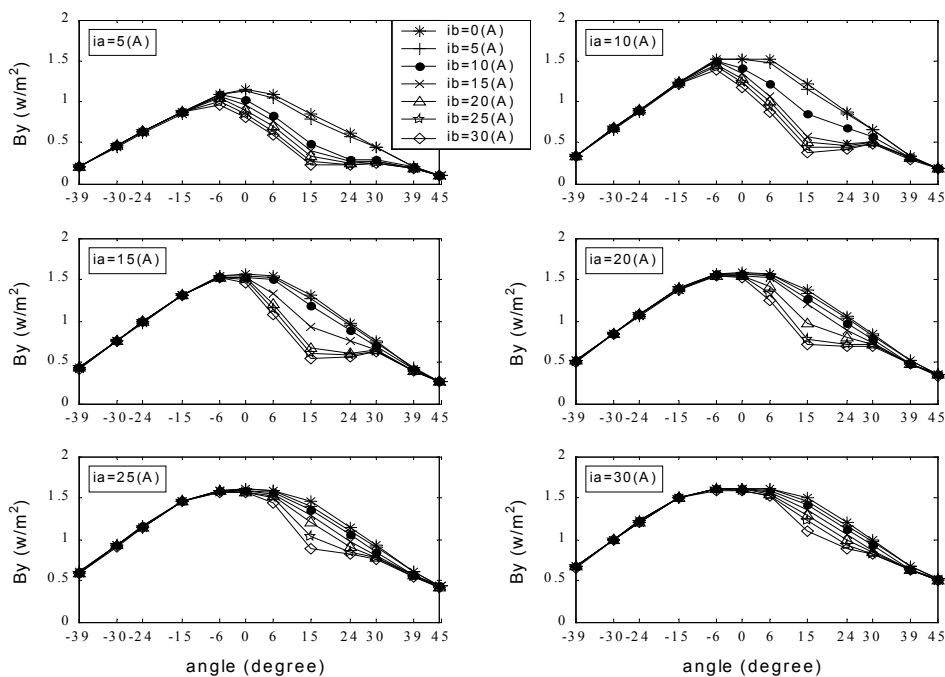
شکل ۱: نمونه‌ای از نتایج اجرای کنترل‌کننده مقاوم تطبیقی توسعه یافته در [۲۲].



شکل ۳: یک نمونه از نتایج تحلیل FE دوبعدی موتور SR6/4 مورد

شکل ۲: نمای دوبعدی موتور SR6/4 مورد بررسی.

بررسی بازای $i_a = 20^A$ ، $i_b = 20^A$ و $\theta = 24^\circ$

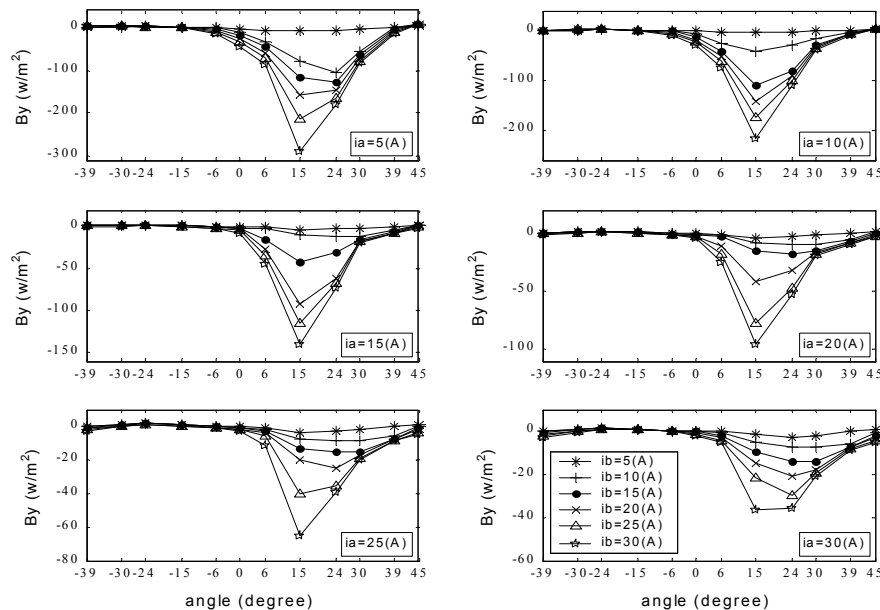


شکل ۴: تغییرات $B_y(\theta)$ در قطب فاز A استاتور.

در محدوده [۰، ۳۰] و با گامهای جریان ۵ آمپری انتخاب شده‌اند. بدین ترتیب در هر موقعیت روتور، جمعاً ۴۹ نقطه، متناظر با ترکیبات ممکنه جریان فازهای i_a و i_b از مجموعه {۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰} برداشت میگردد. همچنین از آنجا که طول گام قطب روتور موتور SR6/4 مورد بررسی برابر با ۹۰ ($360/N_r =$) درجه است لذا سطوح موردنظر زاویه روتور از مجموعه {۰، ۳۹، ۴۵، ۳۰، ۲۴، ۱۵، ۶، ۰، ۶، ۱۵، ۲۴، ۳۰، ۳۹، ۴۵} درجه انتخاب شده‌اند تا طول گام روتور در فواصل مناسب و کافی پوشش داده شود. در خصوص سطوح انتخابی θ لازم بذکر است که در تحریک همزمان دوفاز، بر خلاف تحریک تکفاز، وضعیت مقارنی در محدوده یک طول گام روتور وجود ندارد و لذا کل محدوده فوق در تحلیل FE مدنظر قرار گرفته است. برای مش‌بندی از المانهای درجه دوم چهارضلعی، با ۸ گره (یک گره در هر راس و یک گره در وسط هر ضلع)، با طول ضلع متوسط ۰/۲cm استفاده شده است. با توجه به ابعاد موتور، این مش‌بندی (وجود تعداد المان کافی در بخشهای مختلف موتور و بویژه در قطبهای استاتور جهت تضمین دقت محاسبه شار) کافی است. همچنین برای افزایش دقت اطلاعات استخراجی گشتاور، با کاربرد تکنیک "refine meshing" حول لبه بیرونی روتور، جزئیات مش‌بندی در فضای اطراف روتور، افزایش داده شده است.

اعمال تحلیل FE دوبعدی بر موتور SR6/4

نمونه مورد استفاده در این تحقیق، یک موتور SR6/4 سه‌فاز است که با توجه به امکان‌سنجی توسعه خط تولید داخلی، طی پروژه "طراحی، ساخت و کنترل هوشمند موتور SR" طراحی شده است [۲۳] و نمونه ساخته شده آن در آزمایشگاه کنترل گروه برق و کامپیوتر دانشگاه تهران موجود و مورد آزمایش قرار گرفته است [۲۴].
دوبعدی موتور فوق در شکل (۲) نشان داده شده است که در آن فازهای موتور (C, B, A) و قطبهای استاتور متناظرشان، و نیز جهت سیم‌پیچی فازها مشخص شده‌اند. سیم‌پیچی هر فاز استاتور مستقر در دو قطب مقابل هم استاتور است که با یکدیگر سری هستند. مشخصات هندسی/مغناطیسی موتور فوق در جدول (۱) داده شده‌اند. از نرم‌افزار ANSYS جهت تحلیل FE استفاده شده است. بدلیل وجود تقارن طولی موتور و پرهیز از صرف زمان طولانی، تحلیل FE دوبعدی مورد توجه قرار گرفته است. یک نمونه از نتایج تحلیل FE دوبعدی یا خروجی نرم‌افزار ANSYS (شامل خطوط شار یا هم‌پتانسیل مغناطیسی) به‌ازای مقادیر داده شده است. حال رفتار موتور با تحریک همزمان دو فاز مجاور (فازهای A و B) بررسی میشود. با توجه به مقدار جریان اسمی فازهای موتور، سطوح جریان فازهای i_a و i_b



شکل ۵: درصد خطای نسبی $B_y(\theta)$ در قطب فاز A استاتور.

نتایج حاصل از تحلیل FE دوبعدی

مؤلفه‌های عمودی چگالی شار (B_y) در قطب فاز A استاتور برحسب θ در شکل (۴) نشان داده شده‌اند که شامل شش گراف، متناظر با سطوح مختلف انتخابی جریان فاز A است. اولین منحنی هر گراف (متناظر با $i_b = 0$)، همان منحنی معمول چگالی شار تحریک تکفاز، بدون اثر کوپلاژ متقابل فازها است که بطور متقارن در محدوده یک طول گام روتور توزیع شده است. سایر منحنی‌ها (متناظر با $i_b \neq 0$)، مربوط به تحریک همزمان دوفاز مجاور موتور و با احتساب اثر کوپلاژ متقابل فازهاست. با کنکاش در شکل فوق، ویژگیهای بارز زیر نمود می‌یابند:

ویژگی ۱: افت بیشتر منحنی $B_y(\theta)$ و به بیان دیگر، افزایش اختلاف بین مشخصه رفتاری موتور در تحریک تکفاز و دوفاز، با افزایش سطح جریان فاز B مشاهده میشود. با توجه به طبیعت غیر خطی موتور SR، این ارتباط غیرخطی است.

ویژگی ۲: افت کمتر منحنی $B_y(\theta)$ و به بیان دیگر، اختلاف کمتر بین مشخصه رفتاری موتور در تحریک تکفاز و دوفاز، با افزایش سطح جریان فاز A مشاهده میشود. این ارتباط نیز غیرخطی است.

ویژگی ۳: کاهش سطح منحنی $B_y(\theta)$ با افزایش سطح جریان فاز B نشان‌دهنده علامت منفی اندوکتانس متقابل فازهای A و B است و این با نتایج [۱۰] تطابق دارد.

ویژگی ۴: از نکات قابل‌توجه در شکل (۴) و گرافهای مختلف آن، اینست که اختلاف بین مشخصه‌های رفتاری تحریک تکفاز و تحریک همزمان دوفاز در بخش منفی محدوده گام روتور (محدوده عملکرد موتوری) تقریباً ناچیز است در حالیکه این اختلاف در بخش مثبت محدوده گام روتور (محدوده عملکرد ژنراتوری) چشمگیر است. این امر توجه ساده‌ای دارد که در بخش بعدی به آن اشاره خواهد شد.

اطلاعات مربوط به درصد اختلاف نسبی بین مشخصه‌های رفتاری تحریک تکفاز (منحنیهای $B_y(\theta)$ متناظر با $i_b = 0$) در شکل (۴) و دوفاز (منحنیهای $B_y(\theta)$ متناظر با $i_b \neq 0$) در شکل (۴) در شکل (۵) نشان داده شده‌اند. مطابق شکل مزبور، خطای نسبی پیش‌بینی رفتار موتور با تحریک همزمان دوفاز، توسط مشخصه‌های

مغناطیسی تحریک تکفاز که در آن اثر کوپلاژ متقابل فازها صرف‌نظر شده است قابل چشم‌پوشی نیست. بویژه بازای جریان زیاد فازها، این امر در پیش‌بینی رفتار موتور اهمیت بیشتری دارد.

در موتورهای SR، مشخصه چگالی شار به تنهایی برای توصیف رفتار دینامیکی موتور کفایت میکند و سایر مشخصه‌ها، از جمله گشتاور تولیدی موتور را میتوان از آن بدست آورد. بدین لحاظ، تنها استناد به مشخصه چگالی شار جهت درک اهمیت اثر پدیده کوپلاژ متقابل فازها، کافی است.

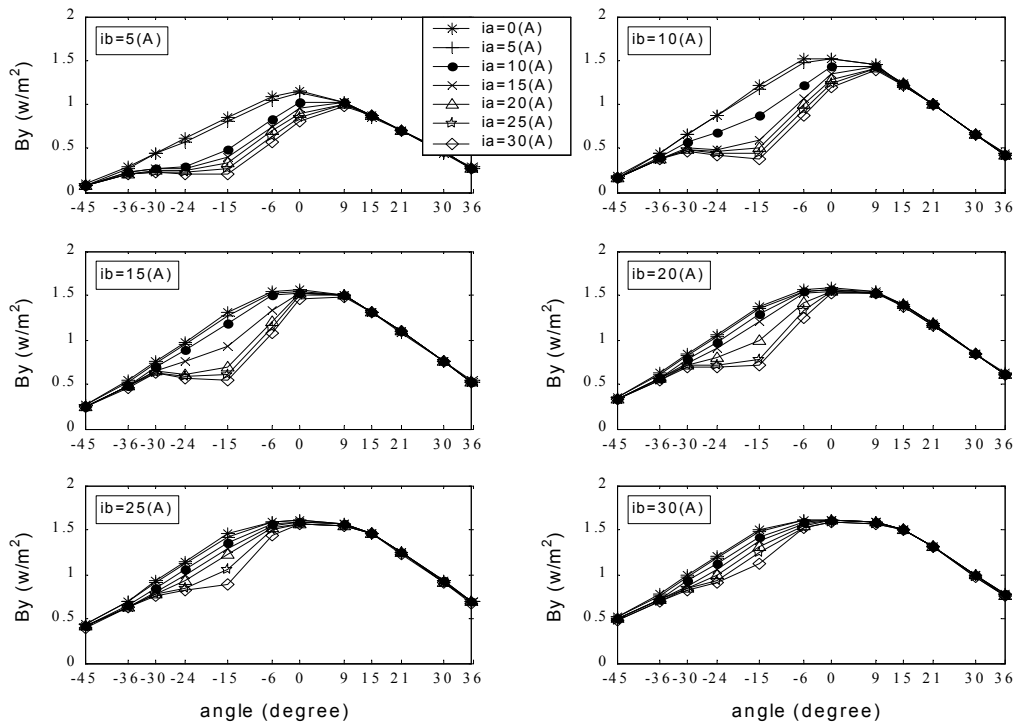
مؤلفه عمودی چگالی شار در محل قطب فاز B استاتور و درصد خطای نسبی آن نیز رفتاری کاملاً مشابه فاز A دارد، با این تفاوت که در اینجا افت منحنی چگالی شار در محدوده عملکرد موتوری فاز اتفاق می‌افتد. مؤلفه عمودی چگالی شار در محل قطب فاز B استاتور در شکل (۶) آورده شده است.

شکل (۷) گشتاور تولیدی موتور را نشان میدهد که در آن، هفت گراف نخستین مربوط به تحریک همزمان دوفاز A و B بوده و آخرین گراف معرف مجموع مشخصه‌های گشتاور فازهای A و B در تحریک تکفاز (با کاربرد ایده جمع آثار) است. از شکل فوق و با مقایسه آخرین گراف با سایر گرافها، پیداست که اثر کوپلاژ متقابل فازها بر رفتار موتور، بخصوص در جریانهای زیاد، قابل چشم‌پوشی نیست. به بیان دیگر، اصل جمع آثار برقرار نبوده و نمیتوان رفتار موتور در تحریک دوفاز را با تکیه بر تنها مشخصه‌های تحریک تکفاز پیش‌بینی نمود.

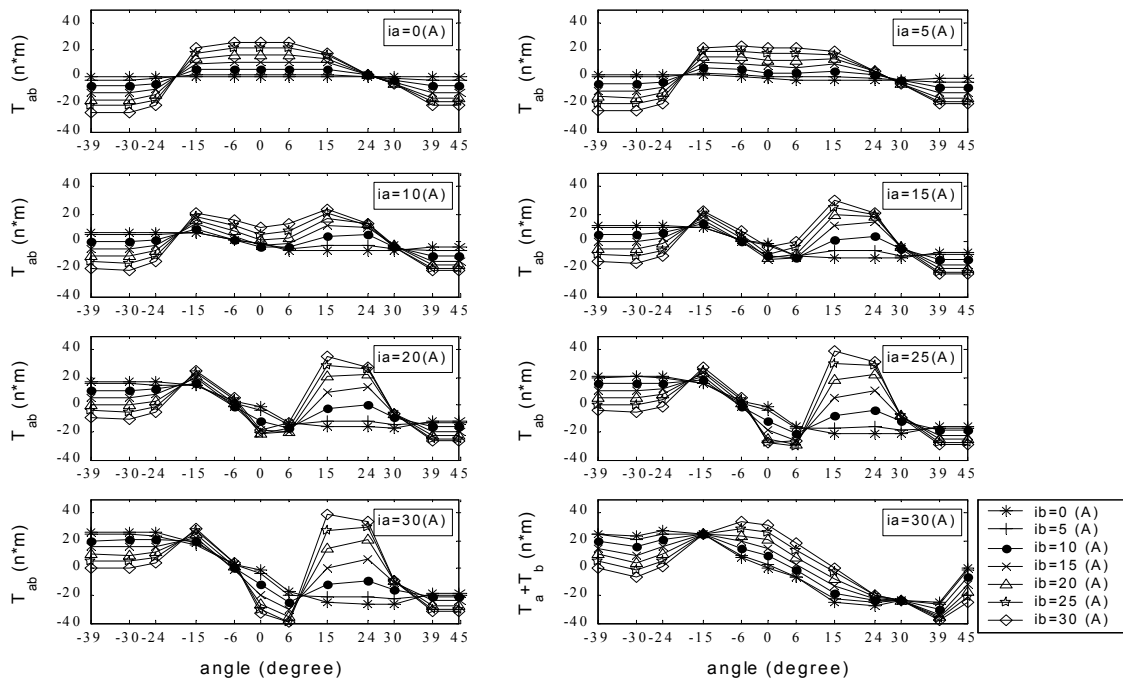
توجیه تأثیر کوپلاژ متقابل فازها در کار موتور

وضعیت و میزان همپوشانی قطبهای روتور و استاتور، نقش تعیین‌کننده‌ای در توجیه تغییرات منحنیهای مختلف مندرج در شکل (۴) و تأثیر کوپلاژ متقابل فازها بر رفتار موتور دارد. شکل (۸) درصد همپوشانی موجود را نشان میدهد.

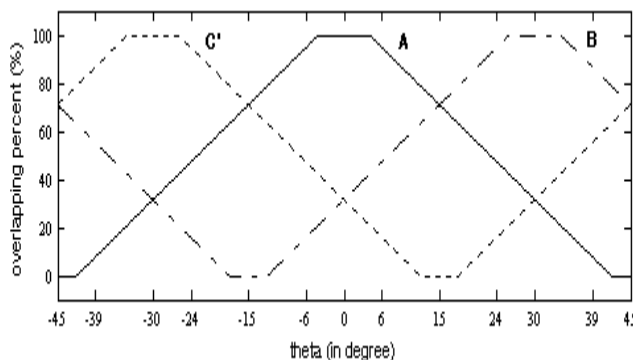
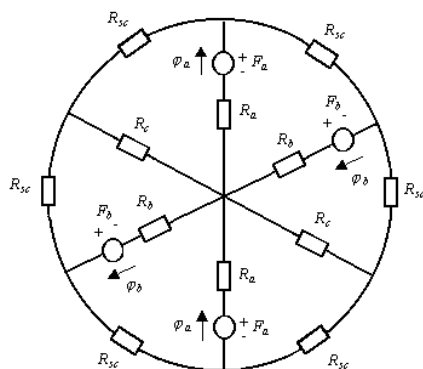
در شکل (۹) یک مدار معادل مغناطیسی ساده از موتور SR6/4 ارائه شده است که در آن از ذکر جزئیات رلوکتانسهای مغناطیسی بخشهای مختلف روتور و استاتور، مشابه [۲،۵،۱۸]، صرف‌نظر شده است.



شکل ۶: تغییرات $B_y(\theta)$ در قطب فاز B استاتور (θ نسبت به فاز B سنجیده شده است).



شکل ۷: تغییرات گشتاور تولیدی موتور.



شکل ۸: درصد همپوشانی قطبهای روتور و قطبهای فازهای A و B و C استاتور در طول یک گام روتور موتور SR6/4 مورد بررسی (θ نسبت به فاز A سنجیده شده است).
شکل ۹: یک مدار معادل مغناطیسی ساده از موتور SR6/4 مورد بررسی.

مغناطیسی حاکم بر آن، واضح است که فاز C، به عنوان یک جزء مداری واسط، نقش مهمی در نحوه تقسیم شار مغناطیسی در قسمت‌های مختلف مدار مغناطیسی و نحوه اندرکنش اجزاء مدار مغناطیسی مرتبط با فازهای تحریکی A و B دارد. پس مهمترین عامل تأثیرگذار بر نحوه تغییرات مشخصه‌های مغناطیسی، میزان همپوشانی قطبهای روتور و استاتور در محل فاز C موتور است. سایر عوامل تأثیرگذار، میزان همپوشانی قطبهای روتور و استاتور در محل فازهای تحریکی A و B و نیز جریان تحریک فازهای فوق هستند که به همراه عامل اصلی، تعیین‌کننده میزان کوپلاژ متقابل فازهاست. بطور مثال، از شکل (۸) دیده میشود که در زاویه روتور $\theta = 15^\circ$ کمترین میزان همپوشانی قطبهای روتور و استاتور در محل فاز C اتفاق می‌افتد و در عین حال، میزان همپوشانی قطبهای روتور و استاتور در محل فازهای تحریکی A و B برابر و قویتر است. بدین لحاظ باید انتظار اثرات کوپلاژ متقابل قابل‌توجهی را در این وضعیت روتور داشت که شکل (۴) مؤید این مسأله است. از طرف دیگر با دور شدن از وضعیت زاویه‌ای فوق (در هر دو جهت)، میزان همپوشانی قطبهای روتور و استاتور در محل فاز C افزایش یافته و لذا باید انتظار کاهش اثرات کوپلاژ متقابل را داشت که مجدداً شکل (۴) مؤید آنست.

مدلسازی رفتار موتور SR6/4 با توجه به اثر کوپلاژ متقابل فازها

مدلهای تحلیلی مختلفی [۲۱-۱۹، ۱۷، ۱۴-۹، ۸، ۴، ۳، ۱۱]، با استفاده از ترکیبات متنوع توابع خطی و

روابط اساسی حاکم بر مدارات مغناطیسی عبارتند از:

$$\sum_i F_i = \sum_i N_i * I_i = \sum_i R_i * \phi_i, \quad \phi_i = B_i * A_i \quad (1)$$

که در آن، F_i نیروی محرکه مغناطیسی در بخش i ام مدار، N_i و I_i به ترتیب تعداد دور و مقدار جریان سیم‌پیچی موجود در بخش i ام مدار، R_i و A_i به ترتیب رلوکتانس مغناطیسی و سطح مقطع بخش i ام مدار، و B_i و ϕ_i به ترتیب چگالی شار و شار مغناطیسی در بخش i ام مدار می‌باشند.

حال با توجه به مقدمات ارائه شده، میتوان موارد زیر را نتیجه‌گیری نمود:

۱- میزان همپوشانی قطبهای روتور و استاتور در محل هر فاز موتور، رابطه معکوس با مقدار رلوکتانس مغناطیسی مربوط به قطب استاتور متناظر آن فاز، و رابطه مستقیم و غیرخطی با چگالی شار و شار مغناطیسی قطب استاتور متناظر آن فاز دارد. به بیان دیگر، شکل (۸) میتواند بیانگر سطح چگالی شار یا شار مغناطیسی قطبهای استاتور متناظر با فازهای مختلف موتور باشد.

۲- هر قدر جریان سیم پیچی یک فاز بیشتر باشد، بدلیل افزایش نیروی محرکه مغناطیسی متناظر آن فاز، سهم آن جریان در تعیین چگالی شار قطب استاتور متناظر آن فاز بیشتر و به همان نسبت، سهم جریان سایر فازها کمتر میشود.

۳- چگالی شار مغناطیسی یک فاز با جاری شدن جریان در فازهای دیگر همواره کاهش خواهد یافت و این بدلیل علامت منفی اندوکتانس متقابل فازهاست.

۴- با توجه به مدار معادل مغناطیسی شکل (۹) و روابط

مشکل از یک لایه مخفی (دارای m نرون با توابع فعالیت سیگموئید تک قطبی) و یک لایه خروجی (دارای یک نرون با تابع فعالیت خطی) را تشخیص داد. ضمناً جهت راحتی مقایسه، پارامترهای مدل $(a_{0i}, a_{1i}, a_{2i}, a_{3i})$ بر روی شکل نشان داده شده‌اند.

حال با توجه به اثبات توانایی شبکه عصبی پیشخور در مدل‌سازی رفتار توابع غیرخطی [۱] (به شرط غنی‌بودن ساختار شبکه)، پایه استدلالی مورد اشاره در قسمت قبل معنی می‌یابد. غنی‌بودن ساختاری، به معنی برخورداری شبکه عصبی از حداقل یک لایه مخفی با تعداد مناسب نرون و با توابع فعالیت مناسب (معمولاً سیگموئید) است. لذا پارامتر m در مدل شار پیشنهادی، در ارتباط با غنی‌بودن ساختاری شبکه عصبی پیشخور معادل ارزش خود را نشان می‌دهد.

در پایان این قسمت، ذکر چند نکته ضروری است:

۱- **تنظیم پارامترهای مدل:** جهت تنظیم پارامترهای مدل و به بیان دیگر، آموزش شبکه عصبی پیشخور معادل، گستره‌ای از روشهای آموزش شبکه‌های عصبی بشرح زیر موجودند:

- روشهای مشتقگیری مدل-وابسته: الگوریتم پس‌انتشار خطا (با تکیه بر روشهای جستجوی بهینه: گرادیان نزولی، گرادیان مزدوج، شبه نیوتن، مارکوارت-لونبرگ، و غیره).

- روشهای فارغ از مشتقگیری مدل-آزاد: الگوریتمهای تکاملی و ژنتیکی، و غیره.

۲- **نرمالیزه کردن ورودی-خروجی:** جهت سهولت همگرایی در فاز آموزش، داده‌های آموزشی ورودی-خروجی شبکه‌های عصبی معمولاً نرمالیزه می‌شوند. طبیعی است که در فاز کاربرد و قبل از هرگونه استفاده‌ای از مدل آموزش‌یافته، باید به این مسأله توجه و تمهیدات لازم انجام پذیرد.

۳- **قدرت تعمیم مدل:** از خصوصیات بارز شبکه‌های عصبی، قدرت تعمیم آنهاست بدین معنی که پس از آموزش، شبکه قادر به پیش‌بینی درست و تطابق مناسب با داده‌های آموزش‌نیافته است به شرطی که شبکه به اندازه کافی غنی بوده و نیز مجموعه کافی و کاملی از داده‌های آموزشی در دسترس باشد.

غیرخطی (شامل: نمایی، سینوسی، سیگموئید، کثیرالجمله و غیره) و نیز سریها، برای توصیف رفتار موتور SR در حالت تحریک تک‌فاز ارائه گردیده‌اند. این مدلها با اندکی تغییر می‌توانند نقطه شروع و یا رویکرد مناسبی برای توسعه مدل‌های تحلیلی غیرخطی موتور SR باشند که در آن پدیده کوپلاژ متقابل فازها مدنظر قرار گرفته است.

جهت توسعه مدل تحلیلی غیرخطی موتور SR متأثر از پدیده کوپلاژ متقابل فازها، روش مورد استفاده در [۲۰] بدلیل زیر جهت تعمیم مدنظر قرار گرفته است:

۱- برخورداری از قابلیت انتگرال‌پذیری مدل شار نسبت به جریان فاز، جهت توسعه رابطه تحلیلی برای کوانترژی (با انتگرالگیری از شار نسبت به جریان فاز).

۲- برخورداری از قابلیت مشتق‌پذیری مدل شار نسبت به زاویه روتور، جهت توسعه رابطه تحلیلی برای گشتاور موتور (با مشتقگیری از کوانترژی نسبت به زاویه روتور).

دو قابلیت دیگر مطرح شده در [۲۰] برای مدل شار، یعنی: صفر بودن شیب مدل روی محور تقارن قطب استاتور (جهت تضمین صفر بودن گشتاور تولیدی در وضعیت همراستایی) و نیز وجود تقارن حول محور تقارن قطب استاتور (جهت تضمین تقارن خواص الکترومغناطیسی)، در اینجا مورد استفاده نخواهند بود.

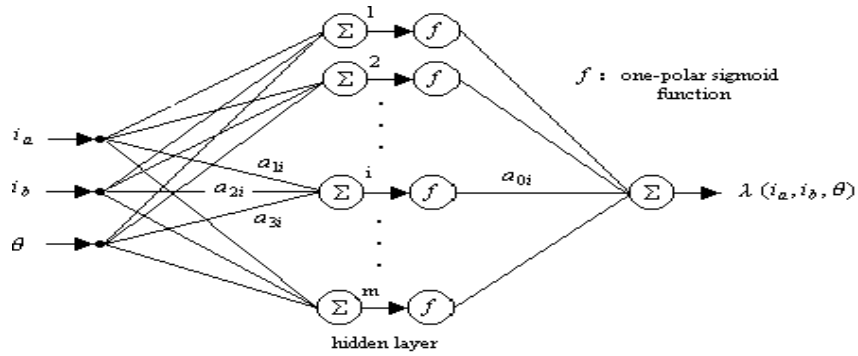
۳- شاید مهمترین دلیل در اتکا به [۲۰]، وجود یک پایه استدلالی ارزشمند و قابل‌دفاع، جهت تضمین توانایی تطبیق مدل شار توسعه‌یافته با مشخصه‌های واقعی شار (مرتبط با تحریکهای تک‌فاز و چندفاز موتور SR) است. این پایه استدلالی با استناد به تشابه عملکردی مدل شار پیشنهادی و شبکه عصبی پیشخور معنی می‌یابد که در ادامه به آن اشاره خواهد شد.

توسعه مدل تحلیلی غیرخطی شار

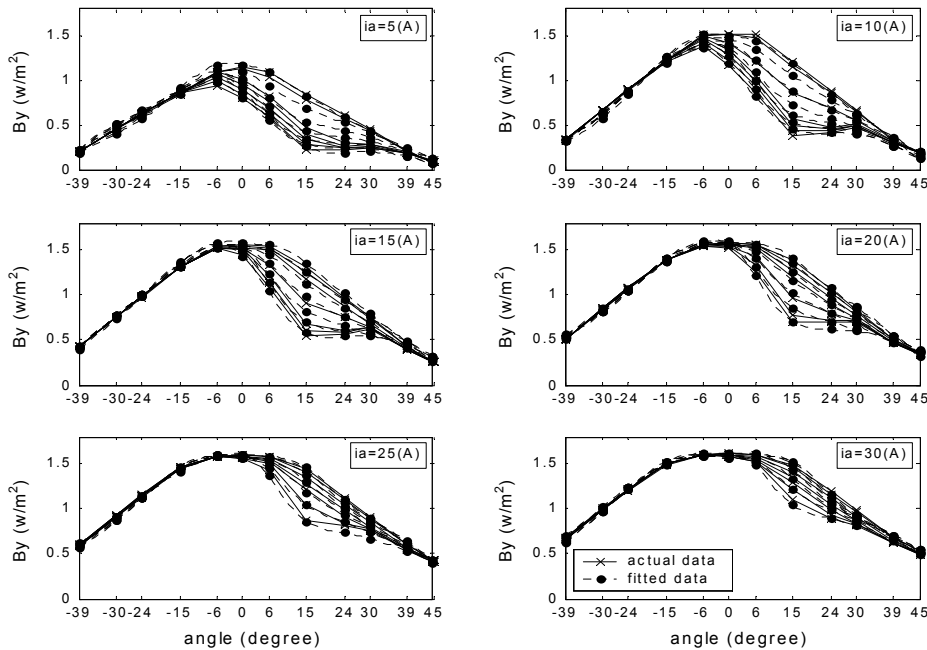
با تعمیم و لحاظ کردن تغییرات اندکی در مدل شار توسعه‌یافته در [۲۰]، مدل پیشنهادی شار برای تحریک همزمان دوفاز بصورت زیر در می‌آید:

$$\lambda(i_a, i_b, \theta) = \sum_{i=1}^m \frac{a_{0i}}{1 + e^{-(a_{1i}i_a + a_{2i}i_b + a_{3i}\theta)}} \quad (2)$$

با کمی دقت میتوان وجود تشابه عملکردی بین مدل شار پیشنهادی و شبکه عصبی پیشخور شکل (۱۰)،



شکل ۱۰: شبکه عصبی پیشخور معادل با مدل شار پیشنهادی مندرج در رابطه (۲).



شکل ۱۱: نتایج آموزش شبکه عصبی پیشخور معادل با مدل شار پیشنهادی، جهت پیش‌بینی مشخصه‌های مغناطیسی شار متأثر از کویلاژ متقابل فازها در محل قطب فاز A استاتور موتور SR6/4 مورد بررسی (m=۱۵).

$$W'_a(i_a, i_b, \theta) = \int_0^{i_a} \lambda_a(i, i_b, \theta) di$$

$$W'_b(i_a, i_b, \theta) = \int_0^{i_b} \lambda_b(i_a, i, \theta) di$$

(۴)

که در آن، λ_a و λ_b به ترتیب شارپیوندی کل عبوری از سیم‌پیچ‌های فازهای A و B موتور هستند. با ترکیب روابط (۲) و (۴) و انجام محاسبات انتگرالی لازم داریم:

$$W'_a(i_a, i_b, \theta) = \sum_{i=1}^m \int_0^{i_a} \frac{a_{0i}}{1 + e^{-(a_{1i}i + a_{2i}i_b + a_{3i}\theta)}} di = \sum_{i=1}^m a_{0i} \left[i_a + \frac{\ln(1 + e^{-(a_{1i}i_a + a_{2i}i_b + a_{3i}\theta)}) - \ln(1 + e^{-(a_{2i}i_b + a_{3i}\theta)})}{a_{1i}} \right]$$

(۵)

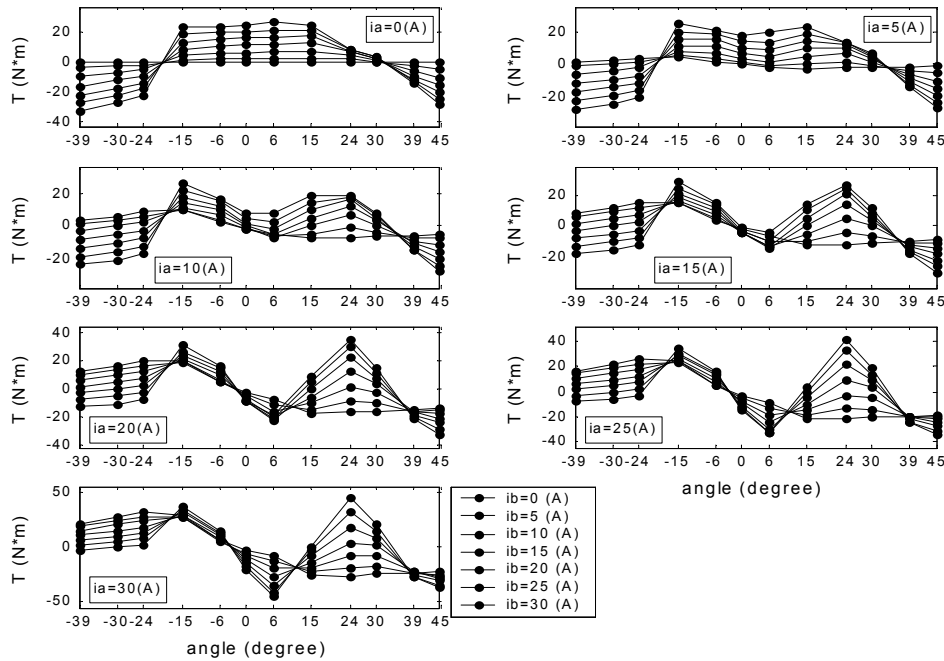
توسعه رابطه تحلیلی غیرخطی گشتاور

با توجه به ویژگی‌های مدل شار پیشنهادی و رابطه (۲)، روند استخراج رابطه تحلیلی گشتاور موتور در حالت تحریک دوفاز بشرح زیر است:

$$T(i_a, i_b, \theta) = \left(\frac{\partial W'_a}{\partial \theta} \right)_{i_a=cte} + \left(\frac{\partial W'_b}{\partial \theta} \right)_{i_b=cte}$$

(۳)

که در آن، T گشتاور تولیدی موتور و W'_a و W'_b نیز به ترتیب کوانرژی مربوط به فازهای تحریکی A و B بوده و بصورت زیر تعریف می‌شوند:



شکل ۱۲: مشخصه گشتاور پیش‌بینی شده توسط رابطه (۷).

مدلسازی مشخصه شار استخراجی از تحلیل FE (شکل ۴)) استفاده میشود. شکل (۴) شامل تغییرات چگالی شار بوده و در ابتدا به اطلاعات معادل شار تبدیل میشود. نتایج آموزش مشخصه شار تحریک دوفاز در قطب فاز A استاتور در شکل (۱۱) آورده شده است. از شکل فوق پیداست که علاوه بر تطبیق مناسب رفتار مدل آموزش یافته با داده‌ها، رفتار مدل در محدوده بین داده‌ها نیز معقول و مطابق با انتظار است و این همان قدرت تعمیم شبکه عصبی است که در قسمتهای قبل بدان اشاره شد.

در شکل (۱۲) اطلاعات پیش‌بینی شده گشتاور موتور که توسط رابطه تحلیلی (۷) بدست آمده‌اند، نشان داده شده است که برای دستیابی به آن، لازم است پارامترهای تطبیقی مدلهای شار فازهای A و B از طریق آموزش شبکه‌های عصبی پیشخور معادل شناسایی گردند. با مقایسه شکلهای (۷) و (۱۲) و نیز با توجه به شکل (۱۱)، توانایی مدل شار پیشنهادی در مدلسازی و پیش‌بینی رفتار مشخصه‌های مختلف تحریک همزمان دوفاز موتور SR، به شرط غنی بودن ساختار مدل و نیز موجود بودن داده‌های کافی، روشن است.

$$W'_b(i_a, i_b, \theta) = \sum_{i=1}^m \int_0^{i_b} \frac{b_{0i}}{1 + e^{-(b_{1i}i_a + b_{2i}i + b_{3i}\theta)}} di = \sum_{i=1}^m b_{0i} [i_b + \frac{\ln(1 + e^{-(b_{1i}i_a + b_{2i}i_b + b_{3i}\theta)}) - \ln(1 + e^{-(b_{1i}i_a + b_{3i}\theta)})}{b_{2i}}] \quad (6)$$

برای پرهیز از اشتباه، پارامترهای مدل کمیتهای W'_a و W'_b به ترتیب با استفاده از حروف a و b تفکیک شده‌اند. حال با ترکیب روابط (۳) و (۵) و (۶) و انجام مشتقگیری لازم داریم:

$$T(i_a, i_b, \theta) = \sum_{i=1}^m \left\{ \frac{a_{0i} a_{3i}}{a_{1i}} \left[\frac{e^{-(a_{2i}i_b + a_{3i}\theta)}}{1 + e^{-(a_{2i}i_b + a_{3i}\theta)}} - \frac{e^{-(a_{1i}i_a + a_{2i}i_b + a_{3i}\theta)}}{1 + e^{-(a_{1i}i_a + a_{2i}i_b + a_{3i}\theta)}} \right] + \frac{b_{0i} b_{3i}}{b_{2i}} \left[\frac{e^{-(b_{1i}i_a + b_{3i}\theta)}}{1 + e^{-(b_{1i}i_a + b_{3i}\theta)}} - \frac{e^{-(b_{1i}i_a + b_{2i}i_b + b_{3i}\theta)}}{1 + e^{-(b_{1i}i_a + b_{2i}i_b + b_{3i}\theta)}} \right] \right\} \quad (7)$$

نتایج شبیه‌سازی

برای نشان دادن توانایی مدل شار پیشنهادی از یک شبکه عصبی پیشخور معادل جهت یادگیری و

نتیجه گیری

تکنولوژی SR، علیرغم برخورداری از سابقه نسبتاً طولانی، در سالهای اخیر و همگام با توسعه حوزه‌های دیجیتال و الکترونیک قدرت، مورد توجه ویژه محققان و صنعتگران قرار گرفته است و در حال حاضر به عنوان رقیب جدی جایگزین تکنولوژیهای متداول تولید الکتروموتور مطرح میباشد. با توجه به این نکته که هیچیک از خطوط تولید الکتروموتورهای ساخت کشور در داخل طراحی نشده‌اند، تحقق تکنولوژی SR به عنوان یک تکنولوژی ملی تولید الکتروموتور، با طراحی کاملاً ایرانی، دور از تصور نخواهد بود.

در این تحقیق، بررسی و مدلسازی اثرات پدیده کوپلاژ متقابل فازها در یک موتور SR6/4 مورد توجه قرار گرفته است.

اطلاعات شار بدست آمده از تحلیل FE دوبعدی، گویای اهمیت پدیده کوپلاژ متقابل فازها، بخصوص در سطوح بالای جریان فازهاست. با توجه به برتری مدل‌های شار نسبت به مدل‌های اندوکتانسی در مواجهه با ماهیت غیرخطی مکانی و مغناطیسی موتور SR، و با استناد به اطلاعات شار بدست آمده از تحلیل FE دوبعدی، یک مدل

تحلیلی غیرخطی شار برای موتور SR6/4 با تحریک همزمان دوفاز توسعه یافته است. رویکرد موردنظر در توسعه مدل شار، تعمیمی از رویکرد استفاده شده در [۲۰] است. از جمله ویژگیهای ارزشمند مدل شار توسعه یافته، خواص تحلیلی آن (برخورداری از قابلیت‌های انتگرال‌پذیری و مشتق‌پذیری نسبت به جریان و زاویه) است که امکان توسعه روابط تحلیلی برای سایر کمیت‌های موردنظر از جمله: گشتاور، اندوکتانسهای خودی و متقابل (در راستای توسعه مدل‌های فضای حالت) را فراهم میسازد. از دیگر ویژگیهای ارزشمند مدل فوق، وجود شباهت میان عملکرد مدل و یک شبکه عصبی پیشخور است. با توجه به توانایی بالای تطبیق شبکه‌های عصبی پیشخور، این شباهت، پیشاپیش تضمین‌کننده توانایی مدل شار توسعه یافته در مدلسازی رفتار موتور است همچنانکه نتایج شبیه‌سازی بر این نکته تأکید دارند. ویژگیهای فوق نشان‌دهنده ارزشمندی و پیشاپیش تضمین‌کننده موفقیت رویکرد انتخابی در این تحقیق، در توسعه سراسر مدل‌های استاتیکی تحریک تکفاز و چندفاز (برای موتور SR6/4 مورد مطالعه و نیز سایر طرح‌های موتور SR) می‌باشند.

مراجع

- 1 - Hornik, K., Stinchcombe, M. and White, H. (1989). "Multilayer feed forward networks are universal approximators." *Neural Networks*, Vol. 2, PP. 303-314.
- 2 - Moreira, J. C. and Lipo, T. A. (1989). "Simulation of a four phase switched reluctance including the effects of mutual coupling." *Electric Machines and Power Systems*, Hemisphere, PP. 2 -2 .
- 3 - Miller, T.J.E. and McGilp, M. (1990). "Nonlinear theory of the switched reluctance motor for rapid computer-aided design." *IEE Proc.*, Vol. 137, Part B, No. 6, Pp. 337-347.
- 4 - Torry, D.A. and Lang, J. H. (1990). "Modelling a nonlinear variable-reluctance motor drive." *IEE Proc.*, Vol. 137, Part B, No. 5, PP. 314-32 .
- 5 - Preston, M. A. and Lyons, J. P. (1991). "A switched reluctance motor model with mutual coupling and multi-phase excitation." *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 2 , No. 6, PP. 542 -542 .
- 6 - Buja, G. S. and Valia, M. I. (1991). "Control characteristics of the SRM drives - Part I: operation in the linear region." *IEEE Trans. on Indu* , Vol. 38, No. 5, PP. 313-32 .
- 7 - Zribi, M. and Chiason, J. (1991). "Position control of a PM stepper motor by exact linearization." *IEEE Trans. on Au* , Vol. 36, No. 5, PP. 62 -62 .

- 8 - Corda, J., Masic, S. and Stephenson, J. M. (1993). "Computation and experimental determination of running torque waveforms in switched reluctance motors." *IEE Proc.*, Vol. 140, No. 6, PP. 387-392.
 - 9 – Buja, G. S. and Valia, M. I. (1994). "Control characteristics of the SRM drives - Part I: operation in the saturated region." *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 41, No. 3, PP. 316-325.
 - 10 – Arkadan, A. A. and Kielgas, B. W. (1994). "Switched reluctance motor drive system dynamic performance prediction and experimental verification." *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 9, No. 1, PP. 36-44.
 - 11 - Mir, S., Husain, I. and Elbuluk, M. E. (1998). "Switched reluctance motor modeling with on-line parameter identification." *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 34, No. 4, PP. 776-783.
 - 12 - Ichinokura, O., Onda, T., Kimura, M., Watanabe, T., Yanada, T. and Guo, H. J. (1998). "Analysis of dynamic characteristics of switched reluctance motor based on SPICE." *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 34, No. 4, PP. 2147-2149.
 - 13 - Radun, A. (1999). "Analytical calculation of the switched reluctance motor's unaligned inductance." *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 35, No. 4, PP. 4473-4481.
 - 14 - Radun, A. (2000). "Analytically computing the flux linked by a switched reluctance motor phase when the stator and rotor poles overlap." *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 36, No. 4, PP. 1996-2003.
 - 15 - Faiz, J., Raddadi, J. and Finch, J. W. (2002). "Spice-based dynamic analysis of a switched reluctance motor with multiple teeth per stator pole." *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 38, No. 4, PP. 1780-1788.
 - 16 – Bodson, M. and Chiasson, J. (1989). "Application of nonlinear control methods to the positioning of a permanent magnet stepper motor." *Proc. Of the 28th Conference on Decision and Control*, PP. 531-532.
 - 17 – Materu, P. and Krishnan, R. (1990). "Analytic prediction of SRM inductance profile and steady-state average torque." *Proc. of IEEE IAS Annual Meeting*, Vol. 1, PP. 214-223.
 - 18 – Davis, R. M. and AI-Bahadly, I. (1990). "Experimental evaluation of mutual inductances in a switched reluctance motor." *IEEE Conference*, PP. 243-248.
 - 19 - Giesselman, M. G. (1996). "Dynamic modeling switched reluctance machines with pspice for windows." *IECEC96, Energy Conversion*, Vol. 1, PP. 98-303.
 - 20 – Chan, W. M. and Weldon, W. F. (1997). "Development of a simple nonlinear switched reluctance motor model using measured flux linkage data and curve fit." *Proc. of IEEE IAS Annual Meeting*, PP. 318-325.
 - 21 - Mahdavi, J., Suresh, G., Fahimi, B. and Ehsani, M. (1997). "Dynamic modeling of nonlinear SRM drive with pspice." *Proc. of 32th IEEE IAS Annual Meeting*, PP. 661-667.
 - 22 – Melkote, H. and Khorrani, F. (1999). "Nonlinear output feedback control for stepper motors: A robust adaptive approach." *Proc. of the 1999 IEEE International Conference on Control Applications*, PP. 755-760.
 - 23 - Farhangi, Sh., Mahboubkhaah, A. and Deihimi, A. (2000). "Dynamical and nonlinear modeling of SR motors with PSPICE." *Proc. of 8th Conference of Iranian Electrical Engineering*, PP. 49-56.
 - 24 - Lucas, C., Modir Shanehchi, M., Asadi, P. and Mellati Rad, P. (2000). "A robust speed controller for switched reluctance motor with nonlinear QFT design approach." *Proc. of 35th IEEE IAS Annual Meeting and World Conference on International Applications of Electrical Energy*, Vol. 3, PP. 1573-1577.
-