

# توسعه یک روش خطی سازی پسخوری برای کنترل سرعت موتور سوئیچ رلوکتانس

محسن فرشاد<sup>i</sup>؛ کارو لوکس<sup>ii</sup>؛ بابک اعرابی<sup>iii</sup>؛ و حسن غفوری فرد<sup>iv</sup>

## چکیده

ریپل گشتاور قابل ملاحظه موتور سوئیچ رلوکتانس (switched reluctance or SR) از عوامل اصلی محدود کننده حوزه کاربرد آنست که تلاش جدی را در حوزه کنترل آن طلب می کند. مشخصه بارز روش خطی سازی پسخوری، انتقال سیستم اصلی غیرخطی به یک سیستم ثانویه خطی با استفاده از یک تبدیل مختصات مناسب و سپس کاربرد سراسر روشهای متداول حوزه کنترل خطی است. از این منظر و در صورت حصول سیستم خطی معادل موتور، علاوه بر دستیابی به هدف اصلی کنترل (یعنی رگولاسیون سرعت)، کنترل قابل قبولی بر روی ریپل گشتاور و دیگر اهداف ثانویه فراهم خواهد شد. در این مقاله، با الهام از ساختار متداول کنترل سرعت موتور SR، قالبی جدید و در عین حال ساده برای تحقق روش خطی ساز پسخوری پیشنهاد گردیده است که علاوه بر رفع ضعفهای کاربردهای قبلی آن (شامل: نیاز به اطلاع از مدل دقیق موتور، لزوم انجام ساده سازیهای متعدد محدود کننده حوزه کاربرد، و حجم محاسبات بالا)، از قوام قابل ملاحظه ای در قبال نامعینی و تغییرات پارامتر، در عین حفظ بهینگی رفتار، برخوردار است. نتایج شبیه سازی گویای قوام قابل توجه و نیز موفقیت کنترل کننده سرعت پیشنهادی در ردیابی مطلوب سرعت و کنترل قابل قبول ریپل گشتاور است.

## کلمات کلیدی

ریپل گشتاور، خطی سازی پسخوری، کنترل غیرخطی، مدل‌های تحریک تکفاز، موتور SR

## *Development of a Feedback Linearization Method to Speed Control of Switched Reluctance Motor*

M. Farshad; C. Lucas; B. Araabi; H. Ghafoori-Fard;

### ABSTRACT

Considerable torque ripples of switched reluctance motor (SRM) is one of fundamental reasons, which restricts its application domain and consequently, invokes serious effort in its control domain. A striking feature of feedback linearization method is to transfer the original nonlinear system to a secondary linear system by means of a suitable coordinates' transformation, and then directly apply the usual methods of linear control domain. Accordingly, if the transformed linear system of SRM obtained, in addition to access to original control objective (namely, speed regulation), admissible control on torque ripple and the other secondary objectives will be achieve. In this paper, considering the usual speed control structure of SRM, a new and yet simple structure is proposed for realization of feedback linearization method that in addition to resolving the weakness of its pervious applications (including: need to have an exact model of motor, need to apply various simplifications that restrict application domain, and high volume of computation), has considerable robustness to parameter variation and uncertainty, and yet operate near

<sup>i</sup> دانشجوی دکتری کنترل گروه برق و کامپیوتر دانشکده فنی دانشگاه تهران: [moh\\_farshad@yahoo.com](mailto:moh_farshad@yahoo.com)

<sup>ii</sup> استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشکده فنی دانشگاه تهران: [lucas@ipm.ir](mailto:lucas@ipm.ir)

<sup>iii</sup> دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشکده فنی دانشگاه تهران: [araabi@ut.ac.ir](mailto:araabi@ut.ac.ir)

<sup>iv</sup> دانشیار گروه برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی امیرکبیر.



optimal. Simulation results show that the proposed speed controller has considerable robustness and is successful in desirable speed tracking and control of torque ripple.

### KEYWORDS

Feedback linearizing, nonlinear control, one-phase excitation models, SR motor, torque ripple.

### ۱- مقدمه

علیرغم مزایای عدیده، مهمترین عیب و جدی ترین محدود کننده حوزه کاربرد گسترده موتور SR، رپل گشتاور تولیدی قابل ملاحظه آن است که تلاش جدی در حوزه کنترل آن را طلب می کند. از طرف دیگر، بعلت ماهیت بشدت غیرخطی موتور SR، کارایی روشهای حوزه کنترل خطی از جمله کنترل کننده متداول PID، بویژه در یک محدوده وسیع کاربرد، قطعاً ضعیف بوده و بنظر تنها روشهای کنترل غیرخطی چاره ساز خواهند بود.

روش کنترلی خطی سازی پسخوری از جمله روشهای حوزه کنترل غیرخطی است که در دو دهه اخیر مورد توجه ویژه محققین حوزه کنترل موتور SR قرار گرفته است [۱]-[۴]. مشخصه بارز این روش، انتقال سیستم اصلی غیرخطی به یک سیستم خطی ساده با استفاده از تبدیل مختصات مناسب در فضای ورودی - خروجی یا ورودی - حالت و سپس کاربرد راحت و سراسر روشهای حوزه کنترل خطی است. از این منظر و در صورت حصول سیستم خطی معادل، ضمن دستیابی به هدف اصلی کنترل (رگولاسیون موقعیت / سرعت)، کنترل قابل قبولی بر روی رپل گشتاور و حتی دیگر مشخصه های عملکردی (اهداف ثانویه) موتور فراهم خواهد شد. ضعف عمده این روش، نیاز به اطلاع از مدل دقیق سیستم و در واقع قوام کم نسبت به نامعینی و تغییرات پارامتر سیستم تحت کنترل است. البته با کاربرد ایده های موجود در حوزه های کنترل تطبیقی و مقاوم، بویژه نظریه پایداری لیاپانف، می توان تا حد زیادی بر مشکل فوق غلبه کرد هرچند اینکار، بویژه برای موتور SR با ماهیت بشدت غیرخطی مکانی - مغناطیسی آن، معمولاً مستلزم اعمال فرضیات ساده سازی متعددی است که می تواند باعث دور شدن از رفتار بهینه شود. در مرجع [۵] روش خطی سازی پسخوری به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

وجه اشتراک تمام کاربردهای قبلی روش خطی سازی پسخوری در حوزه کنترل موتور SR [۱]-[۴]، تعبیه نقش بلوکهای کموتاتور / رگولاتور در دل ساختار کنترل کننده های سرعت / موقعیت پیشنهادی است که بنوبه خود تبعات (ضعفهای) زیر را بدنبال دارد:

۱- اینکار به قیمت ساده سازیهای متعددی تمام می شود که از جمله مهمترین آنها، نادیده انگاشتن اثر کوپلاژ و حتی در بعضی موارد اثر اشباع است؛ هرچند با تعبیر نامعینی از کاستیهای ناشی از ساده سازیهای فوق در مدل موتور و با استمداد از ایده های مطرح در حوزه های کنترل تطبیقی و مقاوم (بویژه نظریه پایداری لیاپانف)، می توان همگرایی و ردیابی قابل قبول سیستم حلقه بسته را علیرغم وجود نامعینی و تغییرات پارامتر تضمین کرد. در هر حال دقت شود که این تضمین همگرایی به قیمت افت کیفی پاسخ و دور شدن از وضعیت بهینگی خواهد بود چرا که لازمه تحقق و عملیاتی کردن ایده های تطبیقی / مقاوم، بدلیل طبیعت بشدت غیرخطی مکانی - مغناطیسی موتور، اعمال پاره ای فرضیات ساده سازی (از جمله: فرض عملکرد در ناحیه خطی، ساده سازیهای بیش از حد در مشخصه های عملکردی موتور و غیره) است.

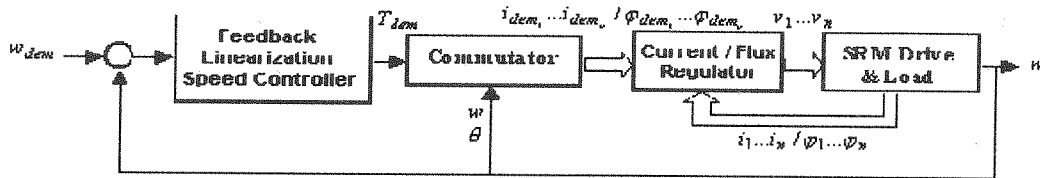
۲- علیرغم ساده سازیهای معمول بکار رفته، حجم محاسبات عمدتاً بالا است.

۳- تعبیه شرایط، محدودیتها و بویژه اهداف ثانویه (از جمله: کنترل رپل گشتاور و راندمان)، در قالب کنترل کننده های فوق براحتی میسر نیست.

۴- امروزه اهمیت بلوکهای کموتاتور / رگولاتور، بویژه در افزایش کیفیت ردیابی و نیز تأمین اهداف ثانویه مورد نظر حوزه کاربرد، امری بدیهی و پذیرفته شده است.

در این مقاله، با الهام از ساختار متداول کنترل سرعت موتور SR مندرج در شکل (۱)، قالبی جدید و در عین حال ساده برای تحقق روش کنترل خطی ساز پسخوری پیشنهاد گردیده است که علاوه بر رفع عیوب کاربردهای قبلی [۱]-[۴]، از قوام قابل ملاحظه ای در قبال نامعینی و تغییرات پارامتر، در عین حفظ بهینگی رفتار، برخوردار است. با استناد به مدل غیرخطی شبه - عصبی شار تکفاز پیشنهادی مان [۶]، مدل کامل دینامیکی موتور نمونه SR6/4 مورد بررسی (معرفی شده در بخش [۲-۲]) با لحاظ اثر اشباع توسعه و در بخش شبیه سازی (جهت تست کارایی کنترل کننده توسعه یافته) مورد استفاده قرار گرفته است. از جهت کنترل بهتر رپل گشتاور تولیدی، افزایش راندمان و کمینه سازی ماکزیمم ولتاژ تغذیه مورد نیاز در سرعتهای بالا (اهداف ثانویه)، کموتاتور ارائه شده در [۷]

مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین از رگولاتور شار ارائه



شکل (۱): نمودار بلوکی سیستم کنترل سرعت موتور SR با رگولاتور جریان / شار حلقه داخلی

جدول (۱): مشخصات الکتریکی - هندسی موتور SR6/4 مورد بررسی

مقدار پارامتر	پارامتر الکتریکی - هندسی	مقدار پارامتر	پارامتر الکتریکی - هندسی
۳/۴۵	شعاع خارجی یوغ روتور (برحسب سانتیمتر)	۵/۵	قدرت نامی (برحسب اسب بخار)
۸/۵	شعاع خارجی استاتور (برحسب سانتیمتر)	۲۰۰۰	سرعت نامی (برحسب دور بر دقیقه)
۶/۹۵	شعاع داخلی یوغ استاتور (برحسب سانتیمتر)	۵۱۰	ولتاژ تغذیه DC (برحسب ولت)
۳۸	طول زاویه ای کمان قطب استاتور (برحسب درجه)	۲۰	جریان اسمی فاز موتور (برحسب آمپر)
۴۶	طول زاویه ای کمان قطب روتور (برحسب درجه)	۶	تعداد قطبهای استاتور
۵۴	تعداد دور سیم پیچی در هر قطب استاتور	۴	تعداد قطبهای روتور
۱۳/۵	گشتاور بار نامی (برحسب نیوتن-متر)	۱/۹	شعاع محور موتور (برحسب سانتیمتر)
۰/۰۰۵	ممان اینرسی معادل موتور و بار نامی (برحسب $kg \cdot m^2$ )	۴/۵	شعاع موثر روتور (برحسب سانتیمتر)
۰/۰۰۴	ضریب اصطکاک ویسکوز (برحسب $N \cdot m \cdot sec / rad$ )	۱۴/۸	طول روتور (برحسب سانتیمتر)
۰/۵	مقاومت سیم پیچ فاز (برحسب اهم)	۰/۰۲	طول فاصله هوایی (برحسب سانتیمتر)

هسته اصلی مدل‌های متنوع دینامیکی موتور SR، مدل‌های استاتیکی شار / اندوکتانس هستند. در همین راستا و بدلیل اهمیت و جذابیت حوزه مدلسازی، در چند دهه اخیر مدل‌های مختلفی برای موتور SR در حوزه تحریک تکفاز توسعه یافته اند [۱۱] - [۲۲] که وجه اشتراک عمده آنها، توسعه یک رابطه تحلیلی جهت توصیف مشخصه‌های استاتیکی شار / اندوکتانس فاز موتور است. در مرجع [۲۳] عمده مدل‌های فوق مرور و از زوایای مختلف، نقاط ضعف و قوت آنها مورد مقایسه قرار گرفته است. در این تحقیق، بدلیل برتری مدل‌های شار نسبت به مدل‌های اندوکتانسی در مواجهه با ماهیت بشدت غیرخطی مکانی - مغناطیسی موتور SR، از مدل استاتیکی شار به عنوان هسته اصلی مدل دینامیکی فضای حالت موتور (مورد استفاده در بخش شبیه سازی) استفاده شده است. توضیح کامل خواص و روند توسعه مدل تحلیلی شبه - عصبی شار مورد استفاده در کار قبلی مان [۶] آمده است. از جمله ویژگی‌های ارزشمند مدل شار فوق عبارتند از:

- ۱- خواص تحلیلی بالا.
- ۲- شباهت عملکردی با یک شبکه عصبی پیشخور دولایه. با توجه به قدرت تقریب بالای شبکه عصبی پیشخور [۲۴]، این شباهت پیشاپیش تضمین کننده توانایی بالای مدل شار توسعه یافته در تطابق با مشخصه های واقعی شار است. از طرف دیگر، وجود این شباهت، مجموعه ای غنی

شده در [۸]، بدلیل خواص دینامیکی بهتر نسبت به رگولاتورهای متداول جریان، در حلقه داخلی شکل (۱) استفاده شده است.

ساختار ادامه مقاله بدین شرح است: در بخش [۲-۳]، پارامترهای الکتریکی - هندسی موتور نمونه SR6/4 مورد استفاده در بخش شبیه سازی معرفی گردیده اند. همچنین روابط الکترومغناطیسی حاکم بر موتور SR در حوزه تحریک تکفاز مختصراً مرور و مدل دینامیکی مورد استفاده آن در شبیه سازیها (در قالب یک مدل فضای حالت مستند بر اطلاعات شار) توصیف گردیده است. در بخش [۳-۳]، روند طراحی کنترل کننده خطی سازی پسخوری موتور SR تشریح و نتایج شبیه سازی آن در بخش [۳-۴] ارائه گردیده اند و بالاخره مقاله با ارائه نتیجه گیری در بخش [۳-۵] خاتمه می یابد.

## ۲- مدل دینامیکی تحریک تکفاز موتور SR

موتور نمونه مورد استفاده در این تحقیق، یک موتور SR6/4 سه فاز است که با توجه به امکان سنجی توسعه خط تولید داخلی، طی پروژه طراحی، ساخت و کنترل هوشمند موتور SR طراحی [۹] و نمونه ساخته شده آن در آزمایشگاه کنترل گروه مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران موجود و مورد آزمایش قرار گرفته است [۱۰]. پارامترهای الکتریکی - هندسی موتور فوق در جدول (۱) داده شده اند.

از الگوریتمهای آموزشی / بهینه سازی شبکه های عصبی را جهت آموزش مدل شار توسعه یافته فراهم می سازد.  
 ۳- مدل شار پیشنهادی و رویکرد مورد استفاده در توسعه آن را می توان براحتی و تنها با اندکی تغییرات به حوزه طرحهای تحریک چندفاز موتور SR تعمیم داد [۲۵].

### ۱-۲- مرور مختصر روابط الکترومغناطیسی موتور SR

با استناد به اطلاعات شار در قالب یک رابطه تحلیلی و حتی یک جدول (برحسب متغیرهای جریان تحریک و زاویه روتور)، روابط الکترومغناطیسی حاکم بر موتور بصورت زیر خواهند بود. معادله ولتاژ فاز نوعی  $i_j$  از موتور عبارت است از

$$v_j = R_j \cdot i_j + \frac{d}{dt} \lambda_j(i_j, \theta) + \frac{d}{dt} \lambda_j^l \quad (1)$$

که در آن  $v_j$  ولتاژ اعمالی،  $i_j$  جریان عبوری،  $R_j$  مقاومت،  $\lambda_j$  شار پیوندی، و بالاخره  $\lambda_j^l$  شار ناشی از فاز  $j$  است که بعلاوه ناچیز بودن، بصورت ساده زیر توصیف می شود

$$\lambda_j^l = L_j^l \cdot i_j \quad (2)$$

که در آن  $L_j^l$  اندوکتانس ناشی از فاز  $j$  بوده که معمولاً ثابت و قابل صرفنظر کردن است. با اعمال قاعده مشتقگیری زنجیره ای به (۱) خواهیم داشت

$$v_j = R_j \cdot i_j + \frac{\partial \lambda_j(i_j, \theta)}{\partial i_j} \cdot \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial \lambda_j(i_j, \theta)}{\partial \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} + L_j^l \cdot \frac{di_j}{dt} \quad (3)$$

که در آن، ضرایب جملات دوم و سوم کمیتهای آشنای اندوکتانس افزایشی  $L_{mc_j}$  و ضریب ولتاژ سرعتی  $C_{w_j}$  فاز  $j$  است هستند که بصورت زیر تعریف می شوند

$$L_{mc_j}(i_j, \theta) = \frac{\partial \lambda_j(i_j, \theta)}{\partial i_j}, \quad C_{w_j}(i_j, \theta) = \frac{\partial \lambda_j(i_j, \theta)}{\partial \theta} \quad (4)$$

همچنین معادله گشتاور تولیدی عبارتست از

$$T_j(i_j, \theta) = \left( \frac{\partial W_j'(i_j, \theta)}{\partial \theta} \right)_{i_j = cte}, \quad W_j'(i_j, \theta) = \int_0^{i_j} \lambda_j(i, \theta) di \quad (5)$$

که در آن،  $T_j$  و  $W_j'$  بترتیب گشتاور تولیدی و کوانرژی مربوط به فاز  $j$  است. حال با بازنویسی (۳) برحسب متغیرهای حالت جریان فازها و با افزودن معادلات مکانیکی حاکم بر موتور، مدل دینامیکی فضای حالت موتور مبتنی بر اطلاعات شار بصورت زیر خواهد بود

$$\frac{di_j}{dt} = \frac{1}{L_{mc_j}(i_j, \theta) + L_j^l} \cdot (v_j - R_j \cdot i_j - C_{w_j}(i_j, \theta) \cdot w) \quad (6)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = w, \quad \frac{dw}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (T(\theta, i_j / j = 1, 2, \dots, p) - T_l - B \cdot w)$$

که در آن  $p$  تعداد کل فازهای موتور،  $B$  ضریب اصطکاک

ویسکوز معادل موتور و بار،  $J$  ممان اینرسی معادل موتور و بار،  $T_l$  گشتاور بار و  $T(\theta, i_j / j = 1, 2, \dots, p)$  گشتاور کل تولیدی موتور متأثر از تمام فازهاست که با صرفنظر از اثر کوپلاژ متقابل و لذا برقراری اصل جمع آثار، برابر با مجموع گشتاور تولیدی تک تک فازها خواهد بود  $(T = \sum_{j=1}^p T_j(i_j, \theta))$ .

### ۳- توسعه کنترل کننده سرعت موتور SR مبتنی بر

#### روش خطی سازی پسخوری

اساس رویکرد خطی سازی ورودی - خروجی، انجام مشتقگیریهای متوالی از رابطه توصیف کننده متغیر خروجی تا ظهور متغیر ورودی است. آنگاه با تعریف مناسب ورودی برحسب یک ورودی جدید و بعضی جملات غیرخطی موجود، سعی در حذف جملات غیرخطی مزاحم موجود و نهایتاً انتقال به یک سیستم خطی معادل می شود که با انواع روشهای متداول حوزه کنترل خطی براحتی قابل کنترل است. در هر حال بدیهی است که انتخاب مناسب متغیرهای ورودی / خروجی کنترلی، تأثیر بسزایی بر میزان ثمربخشی و کارایی رویکرد فوق خواهد داشت.

با توجه به هدف اولیه مد نظر یعنی رگولاسیون سرعت، بدیهی و سراسرترین انتخاب برای متغیر کنترلی خروجی (یا ورودی بلوک کنترل کننده سرعت)، سرعت موتور است  $(v = w)$ . در انتخاب متغیر کنترلی ورودی (یا خروجی بلوک کنترل کننده سرعت) نیز معمولاً از خواص فیزیکی سیستم تحت کنترل (موتور) کمک گرفته می شود. در اینجا یک سؤال مهم قابل طرح است: چرا در تمام کاربردهای قبلی [۱]-[۴]، از ولتاژ اعمالی فاز  $j$  به عنوان متغیر کنترلی ورودی استفاده شده است و نه از  $i_j$  و حتی  $T_j$  (یا  $T$ )؛ حال آنکه در اکثر کاربردهای سرعت متغیر موتور SR، خروجی بلوک کنترل کننده سرعت از جنس گشتاور (و در موارد محدود از جنس جریان) است؟ لازم بذکر است که اینکار تبعات (هزینه های) متعددی را بدنبال دارد که در بخش مقدمه بدان اشاره شد.

### ۳-۱- پیشنهاد یک ساختار جدید برای کنترل کننده

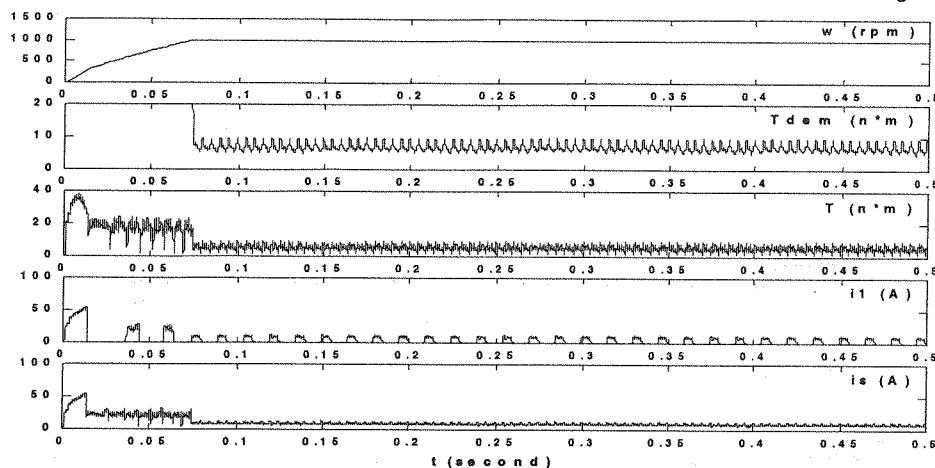
#### خطی سازی پسخوری

اگر در ساده ترین انتخاب ممکن و مطابق با الگوی متداول کنترل سرعت موتور مندرج در شکل (۱)، از گشتاور کل تولیدی موتور  $T$  به عنوان متغیر کنترلی ورودی استفاده کنیم با توجه به معادله تعادل گشتاور تولیدی موتور مندرج در (۶) خواهیم داشت

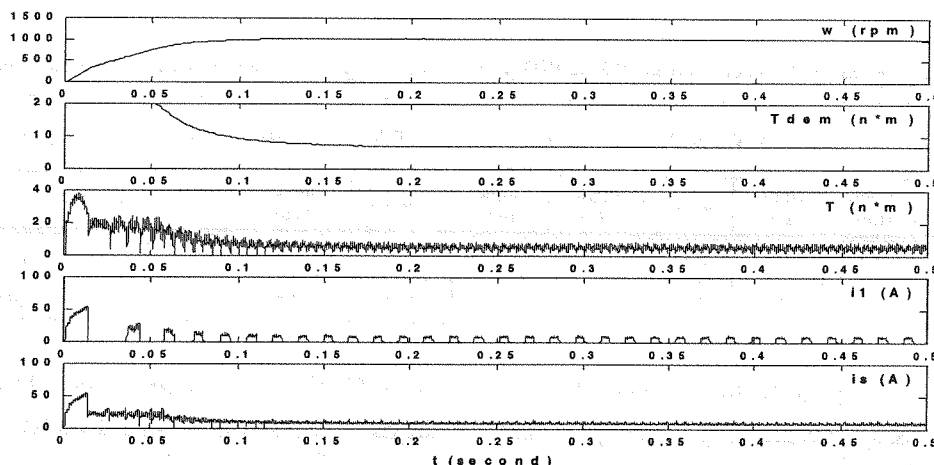
$$\dot{y} = \dot{w} = \frac{1}{J} \cdot (T - T_l - B \cdot w) = \frac{1}{J} \cdot (u - T_l - B \cdot y) \quad (7)$$

شکل فوق، عدم صفر شدن خطای ماندگار و نیز تشابه رفتاری بین سیستم حلقه بسته شکل (۱) و سیستم خطی شده (۱۱) است که هر دو مورد قابل انتظارند.

دور در دقیقه و همراهی با گشتاور بار ۵ نیوتن - متر در شکل (۲) آورده شده است که به ترتیب شامل اطلاعات: سرعت  $w$ ، گشتاور درخواستی  $T_{dem}$ ، گشتاور تولیدی  $T$ ، جریان یک فاز نمونه  $i_1$ ، و جریان منبع تغذیه  $i_s$  است. از موارد قابل توجه در



شکل (۳): نتایج شبیه سازی مربوط به کاربرد کنترل کننده سرعت خطی ساز پسخوری پیشنهادی با ضرایب  $k_1 = 2000$  و  $k_2 = 0$ ، برای ردیابی فرمان سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه و همراهی با گشتاور بار ۵ نیوتن - متر



شکل (۴): نتایج شبیه سازی مربوط به اعمال کنترل کننده سرعت خطی ساز پسخوری پیشنهادی با ضرایب  $k_1 = 50$  و  $k_2 = 100$ ، برای ردیابی فرمان سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه و همراهی با گشتاور بار ۵ نیوتن - متر

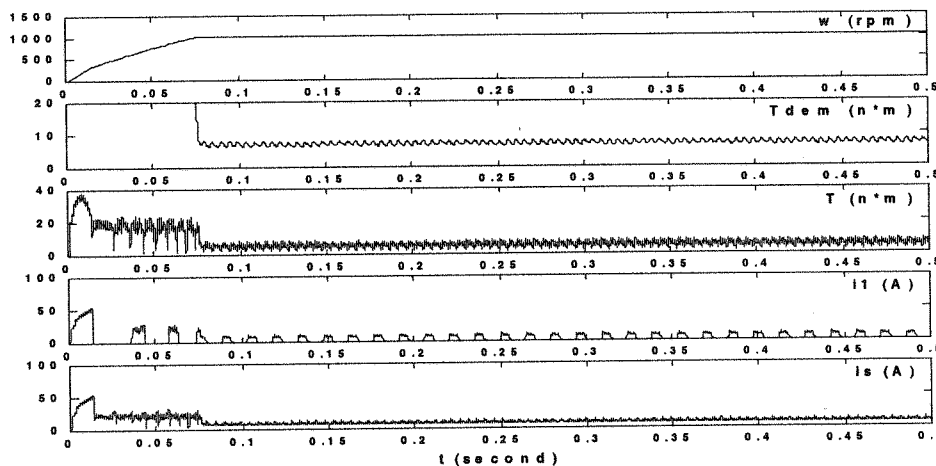
توجه خطای ماندگار و افزایش سرعت ردیابی، در مقایسه با نتایج اجرای قبلی شکل (۲) شده است ولی در مقابل رپیل قابل توجهی را، بویژه در متغیرهای گشتاور درخواستی / تولیدی شاهد هستیم. رفتار سیستم حلقه بسته شکل (۱) نیز کماکان مشابه رفتار سیستم خطی شده (۱۱) و از مرتبه اول است.

نتایج شبیه سازی سیستم حلقه بسته شکل (۱)، بازای ضرایب  $k_1 = 50$  و  $k_2 = 100$  و با همان شرایط اجرای قبلی، در شکل (۴) آورده شده است. برطبق انتظار، بعلت استفاده مناسب از ضریب  $k_2$  و علیرغم مقدار کم ضریب  $k_1$ ، خطای ماندگار صفر همراه با سرعت و کیفیت مطلوب ردیابی و نیز دامنه کم

دقت در روابط بخش [۳-۱-۸] و بویژه تحلیل ساده پایداری (۱۱) نشان می دهد که بخش حقیقی جفت قطبهای سیستم حلقه بسته خطی شده در  $-k_1/2$  قرار دارد و طبعاً از جهت افزایش سرعت ردیابی و نیز کاهش خطای ماندگار (علیرغم صفر بودن ضریب  $k_2$ ) لازم است از مقادیر بزرگتر  $k_1$  استفاده شود هرچند اینکار به قیمت افزایش تلاش کنترلی (گشتاور درخواستی) و دامنه رپیل آن تمام خواهد شد. نتایج شبیه سازی سیستم حلقه بسته شکل (۱)، بازای ضرایب  $k_1 = 2000$  و  $k_2 = 0$  و با همان شرایط اجرای قبلی، در شکل (۳) آورده شده است. بر طبق انتظار، هرچند افزایش شدید ضریب  $k_1$  باعث کاهش قابل

جهت مقایسه رفتار، نتایج شبیه سازی سیستم حلقه بسته شکل (۱)، مربوط به اعمال کنترل کننده سرعت PID ساختار متغیر توسعه یافته و با شرایط اجرای مشابه، در شکل (۵) آورده شده است. همچنین از جهت مقایسه بهتر، مقادیر کمی شاخصهای متنوع رفتاری کنترل کننده های سرعت خطی ساز

ریپل تأمین گردیده است. هرچند بازای مقادیر انتخابی ضرایب  $k_1$  و  $k_2$ ، رفتار سیستم خطی شده (۱۱) فرامیرا است ولی سیستم حلقه بسته شکل (۱) رفتاری فرامیرا با کمی فراجش دارد که این اختلاف ناشی از عدم تحقق کامل فرآیند خطی سازی است که در بخش [۳-۱-۱] بدان اشاره شد. از



شکل (۵): نتایج شبیه سازی مربوط به اعمال کنترل کننده سرعت PID ساختار متغیر توسعه یافته، برای ردیابی فرمان

سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه و همراهی با گشتاور بار ۵ نیوتن - متر

جدول (۲): مقایسه کمی عملکرد کنترل کننده های خطی ساز پسخوری و PID ساختار متغیر برپایه نتایج مندرج در شکل (۴) و شکل (۵)

شاخص عملکرد ←	سرعت (دور در دقیقه)			گشتاور درخواستی (نیوتن - متر)			گشتاور تولیدی (نیوتن - متر)			فرآیند جوش (%)
	متوسط	ripple (p-p)	ripple (rms)	متوسط	ripple (p-p)	ripple (rms)	متوسط	ripple (p-p)	ripple (rms)	
خطی ساز پسخوری	۱۰۰۰	۱/۸۲	۰/۵۶	۷/۰۷	۰/۱	۰/۰۳	۵/۳۹	۶/۴	۱/۴	۳/۲۶
PID ساختار متغیر	۱۰۰۰	۲/۲	۰/۶۶	۷/۰۹	۱/۸۵	۰/۵۷	۵/۴۲	۶/۵۸	۱/۴۱	۲/۳۵

خطی ساز پسخوری پیشنهادی عبارتند از: ممان اینرسی  $J$ ، گشتاور بار  $T_l$ ، و ضریب اصطکاک ویسکوز  $B$ . از طرف دیگر، شایعترین پارامتر قابل تغییر، گشتاور بار است. در هر حال، با توجه به ساختار ویژه کنترل کننده (استفاده از جمله انتگرالی با ضریب  $k_2$ ) انتظار داریم که مشخصه رفتاری گذرا و ماندگار سیستم حلقه بسته، علیرغم تغییر پارامتر گشتاور بار، چندان از وضعیت بهینه دور نرود.

در ادامه و با فرض عدم اطلاع کنترل کننده خطی ساز پسخوری پیشنهادی از تغییر پارامتر گشتاور بار (مقدار پارامتر گشتاور بار مورد استفاده کنترل کننده کماکان ۵ نیوتن - متر است)، رفتار سیستم حلقه بسته شکل (۱) را در قبال تغییر مقدار پارامتر گشتاور بار از ۵ به ۱ و نیز از ۵ به ۱۰ نیوتن - متر شبیه سازی کرده ایم. تغییرات مورد اشاره از ابتدای فرآیند شبیه سازی اعمال و مقادیر ضرایب  $k_1$  و  $k_2$  کنترل کننده همانند آخرین اجرای قبلی هستند. خلاصه نتایج شبیه سازی

پسخوری و PID ساختار متغیر مندرج در شکل (۴) و شکل (۵)، در جدول (۲) خلاصه گردیده اند که شامل: مقدار متوسط، پیک تا پیک و rms متغیرهای سرعت و گشتاور درخواستی / تولیدی در حالت ماندگار (شاخصهای رفتار ماندگار)، و نیز زمان نشست و درصد فراجش (شاخصهای رفتار گذرا) می باشد. دقت در نتایج جدول (۲) و نیز شکل (۴) و شکل (۵)، نشاندهنده عملکرد مشابه و حتی بهتر کنترل کننده خطی ساز پسخوری پیشنهادی نسبت به کنترل کننده PID ساختار متغیری است که پس از تلاش بسیار و انجام اجراهای متعدد بر روی مدل شبیه سازی شده موتور نمونه SR6/4 مورد بررسی بدست آمده است.

### ۳-۴- بررسی قوام کنترل کننده خطی ساز پسخوری

#### پیشنهادی در قبال تغییرات پارامتر

بر طبق (۸)، تنها اطلاعات لازم جهت تحقق کنترل کننده

گشتاور بار است. به بیان دیگر، کنترل کننده خطی ساز پسخوری پیشنهادی از قوام قابل ملاحظه ای در قبال تغییرات پارامتر، در عین حفظ رفتار نزدیک به بهینه، برخوردار است. تنها مورد برتری کنترل کننده PID ساختار متغیر، مشخصه گذرای بهتر و سریعتر آن بویژه برای حالت کاهش گشتاور بار است. با اینحال، در حوزه کنترل موتور SR، آنچه اهمیت

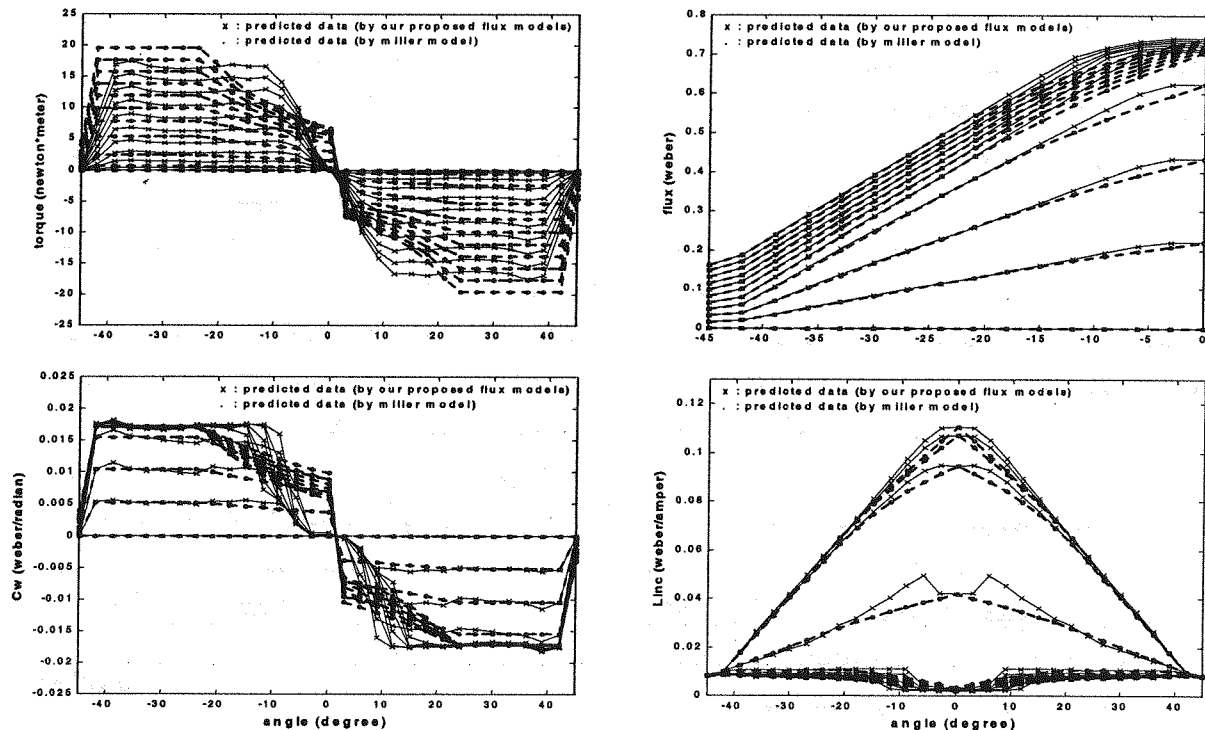
فوق همراه با پاسخ مربوط به کنترل کننده PID ساختار متغیر (که البته از تغییرات مورد نظر پارامتر گشتاور بار مطلع است)، در جدول (۳) آورده شده اند. مطابق اطلاعات جدول فوق، عملکرد کنترل کننده خطی ساز پسخوری پیشنهادی بی اطلاع از تغییرات گشتاور بار، قابل مقایسه و حتی در بعضی موارد بهتر از عملکرد کنترل کننده PID ساختار متغیر مطلع از تغییرات

جدول (۳): مقایسه کمی عملکرد کنترل کننده های خطی ساز پسخوری و PID ساختار متغیر در قبال تغییرات گشتاور بار

شاخص عملکرد ←	سرعت (دور در دقیقه)			گشتاور درخواستی (نیوتن-متر)			گشتاور تولیدی (نیوتن-متر)			زمان نشست	فرا جهش (%)
	متوسط	ripple (p-p)	ripple (rms)	متوسط	ripple (p-p)	ripple (rms)	متوسط	ripple (p-p)	ripple (rms)		
شرایط اجرا ↓	۱۰۰۰	۰/۵۵	۰/۱۶	۲/۲۵	۰/۰۳	۰/۰۱	۱/۴۱	۲/۲	۰/۴۵	۰/۵۱	۱۰/۱۳
تغییر گشتاور بار از ۵ به ۱ نیوتن-متر	۱۰۰۰	۰/۵۶	۰/۱۵	۲/۲	۰/۴۱	۰/۱۱	۱/۴۲	۲/۱۴	۰/۴۶	۰/۰۶	۱/۵۷
تغییر گشتاور بار از ۱۰ نیوتن-متر	۱۰۰۰	۶/۲۱	۱/۹۹	۱۳/۸۸	۰/۳۲	۰/۱	۱۰/۴۲	۱۶/۲۹	۲/۶۳	۰/۲۷	-
تغییر گشتاور بار از ۵ به ۱۰ نیوتن-متر	۱۰۰۰	۷/۷۲	۲/۳۶	۱۴/۳۶	۸/۶۹	۲/۷۸	۱۰/۴۱	۱۹/۲۸	۲/۳۱	۰/۱۱	۴/۴۲

جدول (۴): مقایسه کمی عملکرد مدل شار پیشنهادی ما [۶] و مدل میلر [۱۱] بر پایه نتایج مندرج در شکل (۶)

متوسط قدرمطلق خطای پیش بینی مشخصه های مغناطیسی:				شاخص عملکرد ←
ضریب ولتاژ سرعتی $C_w$ (weber/radian)	اندوکتانس افزایشی $L_{inc}$ (weber/ampere)	گشتاور تولیدی (N*m)	شار (weber)	مدل ↓
۰/۰۷۵۶	۰/۰۰۳۶	۰/۵۲۷۱	۰/۰۰۷۴	مدل شار پیشنهادی ما
۰/۱۲۴۶	۰/۰۰۱۴	۱/۲۰۴۹ (۲/۳۲۰۵)	۰/۰۰۹۴	مدل میلر



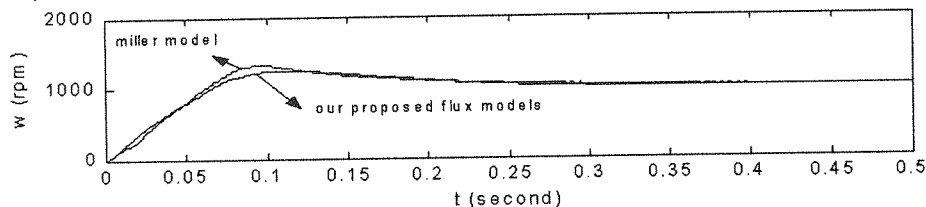
شکل (۶): مقایسه نتایج مدل سازی / پیش بینی مشخصه های مختلف مغناطیسی موتور SR6/4 مورد بررسی توسط مدل های شار

پیشنهادی ما [۶] و مدل میلر [۱۱]

## ۴-۴- بررسی قوام کنترل کننده خطی ساز پسخوری

### پیشنهادی در قبال تغییرات مدل موتور

نتایج کیفی - کمی پیش بینی مشخصه های متنوع مغناطیسی تکفاز موتور SR6/4 مورد بررسی (شامل: شار، گشتاور تولیدی و پارامترهای  $L_{inc}$  و  $C_w$ )، توسط مدل شار توسعه یافته مان [۶] و نیز مدل میلر [۱۱]، در جدول (۴) و شکل (۶) آورده شده است که در آن، تفاوت قابل توجه عملکرد دو



شکل (۷): پاسخ سرعت کنترل کننده خطی ساز پسخوری پیشنهادی در قبال نامعینی (در راستای بررسی حساسیت کنترل کننده به مدل موتور)، برای ردیابی فرمان سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه و همراهی با گشتاور بار ۲ نیوتن - متر

خطی سازی پسخوری از جمله روشهای حوزه کنترل غیرخطی است که مشخصه بارز آن، انتقال سیستم اصلی غیرخطی به یک سیستم ثانویه خطی و سپس استفاده سراسر از روشهای متداول حوزه کنترل خطی است. بدیهی است که در صورت توفیق رویکرد فوق در حصول به سیستم خطی معادل موتور، علاوه بر دستیابی به هدف اصلی کنترل یعنی رگولاسیون سرعت، کنترل قابل قبولی بر روی اهداف ثانویه (از جمله: ریبیل گشتاور) نیز فراهم خواهد شد. ضعف عمده این روش، نیاز به اطلاع از مدل دقیق سیستم تحت کنترل و در واقع قوام کم نسبت به نامعینی و تغییرات پارامتر است که البته با استمداد از ایده های موجود در حوزه های کنترل تطبیقی و مقاوم (و لاجرم افزایش قابل ملاحظه حجم محاسبات مربوطه) تا حد زیادی قابل رفع است هرچند تحقق این امر، بویژه در حوزه کنترل موتور SR (که برخوردار از ماهیتی بشدت غیرخطی است)، قاعدتاً مستلزم اعمال فرضیات ساده سازی متعددی بر روی مشخصه های عملکردی موتور است که بنوبه خود، علاوه بر محدود کردن حوزه کاربرد، عمدتاً باعث دور شدن از رفتار بهینه می گردد [۱]-[۴].

در این مقاله، با استناد به مدل غیرخطی شبه - عصبی شار تکفاز پیشنهادی مان [۶]، مدل کامل دینامیکی موتور نمونه SR6/4 مورد بررسی با لحاظ اثر اشباع توسعه و در فرآیند شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته است. از کموتاتور ارائه شده در [۷]، جهت تأمین بهتر اهداف ثانویه استفاده شده است. همچنین از رگولاتور شار ارائه شده در [۸]، بدلیل خواص دینامیکی بهتر نسبت به رگولاتورهای متداول جریان، در حلقه

بیشتری دارد رفتار ماندگار مطلوب و نیز ریبیل سرعت و بویژه گشتاور کمتر است تا مشخصه گذرا و سرعت پاسخ. در هر حال، با تعبیه یک الگوریتم تخمین پارامتر مناسب در ساختار کنترل کننده، می توان بر این نگرانی کم اهمیت نیز فائق آمد.

مدل، بویژه در حوالی موقعیتهای همراستایی / غیرهمراستایی نمایان است. با تعبیر نامعینی از این تفاوت عملکرد و در صورت کاربرد مدل های فوق در فرآیند شبیه سازی، نوعی می توان قوام کنترل کننده توسعه یافته در قبال نامعینی (حساسیت کنترل کننده به مدل موتور) را بررسی کرد. پاسخ سرعت مربوط به دو مدل فوق، با همان شرایط آخرین اجرای قبلی و گشتاور بار ۲ نیوتن - متر، در شکل (۷) آورده شده است که گویای قوام قابل قبول کنترل کننده خطی ساز پسخوری پیشنهادی در قبال نامعینی (حساسیت کم به مدل موتور) است.

نکته: چنانچه فرآیند خطی سازی کاملاً محقق شود قاعدتاً نباید تفاوتی را در رفتار سیستم حلقه بسته بازای تغییرات موتور و مدل آن شاهد باشیم چرا که در توسعه کنترل کننده پیشنهادی دینامیکهای مدل دخیل نشده اند. در هر حال، بدلیل برشمرده شده در بخش [۲-۱-§]، فرآیند خطی سازی بطور کامل محقق نشده و طبعاً بدلیل تفاوت آشکار رفتاری مدل های فوق، باید انتظار تفاوت رفتار در مشخصه گذرای پاسخ را داشت. ضمناً مطابق شکل (۶)، سطح گشتاور پیش بینی شده توسط مدل میلر همواره بیشتر از مدل شار پیشنهادی خودمان است و این مسأله بصورت فراجش بیشتر در پاسخ مربوط به مدل میلر در شکل (۷) نمود یافته است.

## ۵- نتیجه گیری

علیرغم مزایای متعدد، ریبیل گشتاور تولیدی قابل ملاحظه، محدود کننده جدی حوزه کاربرد موتور SR است. روش کنترلی



ثانویه برای ارزیابی عملکرد کنترل کننده خطی ساز پسخوری پیشنهادی، یک کنترل کننده PID ساختار متغیر مبتنی بر ایده جدول بندی بهره فازی طراحی و توسعه یافته است که با استناد به شاخصهای مختلف عملکردی گذرا و ماندگار، رفتاری نزدیک به بهینه در نقاط کار مختلف انتخابی موتور نمونه SR6/4 مورد بررسی دارد. همچنین از جهت بررسی قوام کنترل کننده پیشنهادی، تغییرات شدید گشتاور بار (اعمال تغییرات پارامتر) و نیز استفاده از مدل‌های متنوع موتور (اعمال نامعینی) مد نظر قرار گرفته اند. نتایج شبیه سازی گویای موفقیت کنترل کننده خطی ساز پسخوری پیشنهادی در ردیابی مطلوب سرعت، کنترل و کاهش مطلوب ریپل گشتاور، و نیز قوام قابل توجه نسبت به تغییرات پارامتر و نامعینی است.

داخلی کنترل استفاده شده است. با الهام از ساختار متداول کنترل سرعت موتور SR مندرج در شکل (۱)، و از جهت رفع ضعفهای کاربردهای قبلی [۱]-[۴]، طرحی جدید و در عین حال ساده برای تحقق روش خطی ساز پسخوری پیشنهاد شده است که از جمله مزایای آن عبارتند از: عدم اعمال فرضهای ساده سازی محدود کننده حوزه کاربرد به هنگام توسعه کنترل کننده، نیاز به حداقل اطلاعات موتور (شامل: ممان اینرسی، گشتاور بار، و ضریب اصطکاک ویسکوز) جهت پیاده سازی کنترل کننده، حجم کم عملیات پیاده سازی کنترل کننده، برخورداری از ریپل ناچیز در مشخصه گشتاور درخواستی خروجی بلوک کنترل کننده سرعت، و بالاخره امکان استفاده سراسر از طرحهای مناسب کموتاتور / رگولاتور جهت ردیابی مطلوب سرعت و نیز کنترل بهتر اهداف

## ۶- مراجع

*Switched Reluctance Motor with Nonlinear QFT Design Approach*", Proc. of 35<sup>th</sup> IAS Annual Meeting and World Conference on International Applications of Electrical Energy, Vol. 3, PP. 1573-1577, 2000.

T.J.E. Miller and M. McGilp, "Nonlinear Theory of the Switched Reluctance Motor for Rapid Computer-Aided Design", IEE Proc., Vol. 137, Part B, No. 6, PP. 337-347, 1990

D.A. Torry and J.H. Lang, "Modelling a Nonlinear Variable-reluctance Motor Drive", IEE Proc., Vol. 137, Part B, No. 5, PP. 314-326, 1990.

P. Materu and R. Krishnan, "Analytic Prediction of SRM Inductance Profile and Steady-State Average Torque", IAS Annual Meeting, Vol. 1, PP. 214-223, 1990

G. S. Buja and M. I. Valia, "Control Characteristics of the SRM Drives - Part I: Operation in the Linear Region", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 38 No. 5, PP. 313-321, 1991.

J. Corda, S. Masic and J. M. Stephenson, "Computation and Experimental Determination of Running Torque Waveforms in Switched Reluctance Motors", IEE Proc., Vol. 140, No. 6, PP. 387-392, 1993.

G. S. Buja and M. I. Valia, "Control Characteristics of the SRM Drives - Part II: Operation in the Saturated Region", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 41, No. 3, PP. 316-325, 1994

W. M. Chan and W. F. Weldon, "Development of a Simple Nonlinear Switched Reluctance Motor Model Using Measured Flux Linkage Data and Curve Fit", IEEE IAS Annual Meeting, PP. 318-325, 1997

M. Stiebler, and K. Liu, "An analytical model of switched reluctance machines", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14 No. 4, PP. 1100-1107, 1999.

A. Radun, "Analytical Calculation of the Switched Reluctance Motor's Unaligned Inductance", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 35, No. 4, PP. 4473-4481, 1999

A. Radun, "Analytically Computing the Flux Linked by a Switched Reluctance Motor Phase When the Stator and Rotor Poles Overlap", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 36, No. 4, PP. 1996-2003, 2000

M. Ilic-Spong, R. Marino, S. M. Peressada, and D. G. Taylor, "Feedback Linearizing Control of Switched Reluctance Motors", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-32, No. 5, PP. 371-379, 1987. [۱]

L. B. Amor, L.-A. Dessaint, O. Akhrif, and G. Olivier, "Adaptive Input-Output Linearization of a Switched Reluctance Motor for Torque Control", IEEE Proc. of the International Conference on IECON, Vol. 3, PP. 2155-2160, 1993. [۲]

S. K. Panda, and P. K. Dash, "Application of Nonlinear Control to Switched Reluctance Motors: a Feedback Linearization Approach", IEE Proc. of Electrical Power Applications, Vol. 143, No. 5, PP. 371-379, 1996 [۳]

H. Yang, S. K. Panda, Y. C. Liang, "Experimental Investigation of Feedback Linearization Controller for Switched Reluctance Motor", IEEE Proc. of 27 Annual Conference on PESC, Vol. 2, PP. 1804-1810, 1996 [۴]

J.-J. E. Slotine, and W. Li, "Applied Nonlinear Control", Prentice-Hall International Editions, 1991.. [۵]

محسن فرهاد، جواد شکرالهی مغانی، کارو لوکس و حسن غفوری فرد، "توسعه مدل‌های استاتیکی تحریک تکفاز موتور SR6/4 با استفاده از شبکه های عصبی MLP"، ارائه شده به مجله بین المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت، پائیز ۱۳۸۱ [۶]

P.C. Kjaer, J.J. Gribble, and T.J.E. Miller, "High-Grade Control of Switched Reluctance Machines", IEEE Trans on Industry Applications, Vol. 33, No. 6, PP. 1585-1593, 1997 [۷]

P.G. Barrass, and B.C. Mecrow, "Flux and Torque Control of Switched Reluctance Machines", IEE Proc.- Electrical Power Applications, Vol. 145, No. 6, PP. 519-527, 1998 [۸]

Sh. Farhangi, A. Mahboubkhaah, and A. Deihimi, "Dynamical and Nonlinear Modeling of SR Motors with PSPICE", 8<sup>th</sup> Conference of Iranian Electrical Engineering, PP. 49-56, 2000 [۹]

C. Lucas, M. Modir Shanehchi, P. Asadi, and P. Mellati Rad, "A Robust Speed Controller for [۱۰]

- N.J. Nagel, and R.D. Lorenz, "Modeling of a Saturated Switched Reluctance Motor using an Operating Point Analysis and the Unsaturated Torque Equation", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 36, No. 3, PP. 714-722, 2000. [۲۱]
- B.P. Loop, and S.D. Sudhoff, "Switched Reluctance Machine Model using Inverse Inductance Characterization", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 39 No. 3, PP. 743-751, 2003 [۲۲]
- J. Faiz, J. Raddadi, and J.W. Finch, "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, 2002. [۲۳]
- K. Hornik, M. Stinchcombe, and H. White, "Multilayer feedforward networks are universal approximators", Neural Networks, vol. 2, PP.303-314, 1989 [۲۴]
- محسن فرشاد، جواد فیض، کارو لوکس و حسن غفوری فرد، بررسی و مدلسازی اثرات پدیده کوپلاژ متقابل فازها در موتور SR6/4 توسط تحلیل FE دوبعدی، نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران (ویژه مهندسی برق)، جلد ۲۸، شماره ۲، شهریورماه ۱۳۸۳. [۲۵]
- K. J. Astrom, and T. Hagglund, "PID Controllers, 2<sup>nd</sup> Edition", Instrument Society of America, 1995. [۲۶]