



همایش ملی انرژی
دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر
آذر ۱۳۹۴



ارائه یک تابع اشتراکی گشتاور نوین بر پایه ی توابع خطی بهینه به منظور کاهش ریپل گشتاور در موتور سوئیچ رلوکتانس توسط الگوریتم PSO

سینا بارباز اصفهانی^۱، میلاد دولتشاهی^۲

* نویسنده مسئول: dolatshahi@iaukhsh.ac.ir

چکیده

واژه‌های کلیدی

موتور سوئیچ رلوکتانس، ریپل گشتاور، تابع
اشتراکی گشتاور، SRM، PSO

ساختار گسسته‌ی تولید گشتاور در موتور SR موجب ظهور نوسان شدید گشتاور و نویز شدید صوتی می‌گردد که این عیب بارز در موتور SR موجب شده تا این موتور در صنعت نادیده گرفته شود. در حالی که راندمان تبدیل انرژی در این ماشین در گستره وسیع از سرعت بالاتر از موتورهای القایی متداول استفاده شده در صنایع می‌باشد. توابع اشتراکی گشتاور متداول مانند فرم خطی آن دارای سادگی در پیاده سازی و محدودیت در محدوده عملکرد سرعت می‌باشد. در این مقاله با تقسیم تابع اشتراکی گشتاور خطی به دو شیب و تعیین مقدار بهینه این شیب‌ها توسط الگوریتم PSO نوسان گشتاور موتور به‌طور محسوسی کاهش خواهد یافت. همچنین با استفاده از این تابع اشتراکی پیشنهادی می‌توان با افزایش بازده و حفظ انرژی محدوده عملکردی سرعت موتور را افزایش داد.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی خمینی شهر

۲. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی خمینی شهر

۱- مقدمه

از دلایل اصلی وجود رپل گشتاور در SRM منحنی مشخصه مغناطیسی غیر خطی و تولید گسسته ی گشتاور می باشد. در موتورهای الکتریکی متداول و پر کاربرد نظیر موتورهای DC و آسنکرون که با اتصال مستقیم به منبع تغذیه می توان در حالت ماندگار رپلی بدون نوسان دریافت کرد اما در SRM بدون کنترل گشتاور امکان استفاده از این موتور به علت نوسان شدید در شافت موتور وجود ندارد. لذا استفاده از سیستم کنترل درایو در این موتور ضروری می نماید. روش های کنترل و کاهش رپل در SRM به سه دسته اصلی تقسیم می شوند که گروه اول مربوط به روش های کنترل زوایای خاموشی و روشنی فازها، گروه دوم مربوط به کنترل جریان اعمالی به هر فاز موتور و گروه سوم مبتنی بر روش های ابتکاری و یا کنترل های پیشرفته می باشد. کاهش رپل با استفاده از توابع اشتراکی خطی گشتاور متداول یکی از روش های کارآمد در این زمینه می باشد که در دسته ی سوم روش های کنترل گشتاور قرار می گیرد. توابع اشتراکی گشتاور معمول و متداولی که مورد استفاده قرار می گیرند عبارتند از توابع اشتراکی گشتاور خطی - مکعبی و کسینوسی.

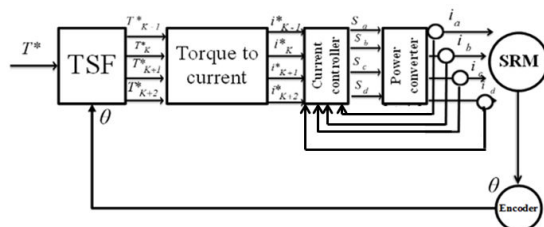
در مرجع [۱] یک روش اصلاحی پیشنهاد شده است که در این روش خطای گشتاور فاز به فاز بعدی اضافه می گردد. این کار موجب توسعه ی ناحیه ی بدون رپل گشتاور می شود.

در مرجع [۲] دو تابع اشتراکی گشتاور بهبود یافته به منظور کاهش رپل گشتاور ارائه شده است. جهت بهبود طراحی

موتور با هدف کاهش رپل روش هایی در [۳] و [۴] ارائه گردیده که تضمین کننده افزایش بازده و کاهش تلفات در این ناحیه می باشد. در [۴] بیان شده که بهینه سازی پروفیل جریان فاز می توان به نسبت گشتاور بر جریان فاز بالاتری دست یافت.

۲- توابع اشتراکی گشتاور

یکی از روش هایی که برای کنترل و کاهش رپل گشتاور در SRM می توان به کار برد روش کنترل با توابع اشتراکی گشتاور می باشد. تابع اشتراکی گشتاور (TSF) بیان می کند که مقدار گشتاور تولیدی هر فاز در ناحیه کموتاسیونی چنان تعیین شود که جمع گشتاور تولیدی در این ناحیه برابر با مقدار مطلوب گردد. جانمایی TSF در سیستم درایو SRM در شکل (۱) مشهود می باشد.



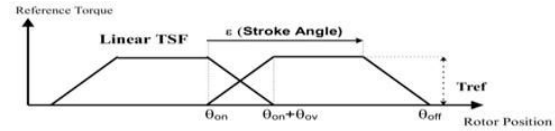
شکل ۱- سیستم درایو موتور SRM و جانمایی TSF در این

سیستم

بخش اصلی کنترل گشتاور در این سیستم تابع اشتراکی گشتاور می باشد. TSF تابعی از زوایای خاموشی و روشنی و میزان گشتاور مطلوب می باشد. یک TSF به ازای مقادیر مختلف از زوایای موتور دارای مقادیر متفاوت می باشد. این توابع در جایی کاربرد دارند که گشتاور تولیدی فازها مثبت باشند.

۳- توابع اشتراکی گشتاور متداول

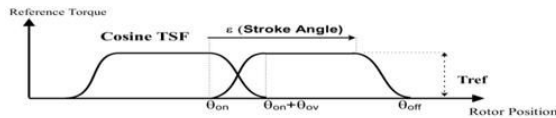
یکی از توابع اشتراکی گشتاور و پر کاربرد و متعارف TSF خطی باشد.



شکل ۲- تابع اشتراکی گشتاور خطی

شکل نموداری آن به صورت شکل ۲ می باشد

رابطه ی این تابع به صورت رابطه (۱) می باشد [۱].



شکل ۴- تابع اشتراکی گشتاور کسینوسی

4- الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات (PSO)

این الگوریتم اولین بار توسط آقایان ابرهه و کندی مطرح شد. PSO یک الگوریتم جستجو مبتنی بر جمعیت می باشد که رفتار ذرات هجومی نظیر پرندگان و ماهی ها را به صورت ریاضی مدل می کند. این الگوریتم با ایجاد یک جمعیت اولیه تصادفی شروع به کار می کند و پس از آن هر ذره با توجه به بهترین موقعیت شخصی و گروهی به دنبال جواب و یا مکان بهینه می گردد. این رفتار برای حرکت به سمت بهترین جواب از طریق روابط (۴) و (۵) انجام می گیرد.

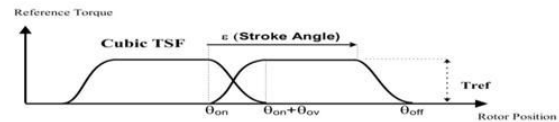
$$v_j^i[t+1] = wv_j^i[t] + c_1r_1(x_j^{i,best}[t] - x_j^i[t]) + c_2r_2(x_j^{g,best}[t] - x_j^i[t]) \quad (4)$$

$$x_j^i[t+1] = x_j^i[t] + v_j^i[t+1] \quad (5)$$

$$T_{ph}^* = T_{ref} \cdot f_{Linear} \quad (1)$$

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

TSF خطی به این مفهوم است که تولید گشتاور در فازهای واردشونده و خارج شونده در ناحیه کموتاسیونی به صورت خطی تغییر کند. دیگر تابع اشتراکی گشتاور از نوع Cubic می باشد. شکل این تابع به صورت شکل می باشد و رابطه آن به صورت رابطه (۲) می باشد.



شکل ۳- تابع اشتراکی گشتاور cubic

$$T_{ph}^* = T_{ref} \cdot f_{cubic} \quad (2)$$

۵- تابع اشتراکی گشتاور خطی پیشنهادی

با توجه به اینکه شیب اندوکتانس در حدود زوایای غیر هم محوری کم می باشد امکان گشتاورسازی در حدود این ناحیه کم می باشد. لذا می تواند در نواحی کموتاسیونی با تقسیم تابع اشتراکی گشتاور به دوشیب مختلف انعطاف پذیری این تابع را افزایش داد. این کار منجر به انطباق پذیری بیشتر گشتاور فاز مرجع با گشتاور واقعی فاز موتور می شود. شیب بهینه سکشن های تابع اشتراکی گشتاور خطی پیشنهادی توسط الگوریتم PSO تعیین می گردد. تابع هدفی که الگوریتم PSO وظیفه کمینه سازی آن به جهت تعیین شیب بهینه تابع اشتراکی گشتاور بر عهده دارد، تابع فاکتور ریل گشتاور می باشد که در رابطه ی (۶) آورده شده است

$$\%TRF = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \times 100 \quad (6)$$

الف - تابع اشتراکی خطی گشتاور دو شیب

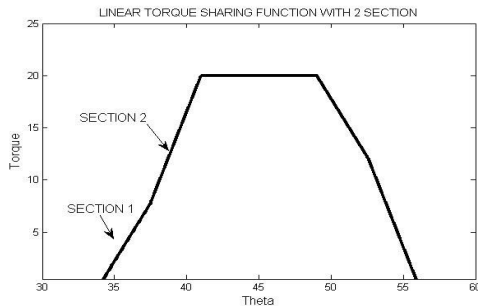
در نواحی کموتاسیونی بین دو فاز واردشونده و خارج شونده با تقسیم TSF خطی به دو شیب، تابع اشتراکی خطی گشتاور دو شیب تشکیل می شود. رابطه تابع مذکور به صورت رابطه (۷) می باشد.

$$T_{TSF_1} = \frac{2K}{\theta_{ov}} \quad (7)$$

$$T_{TSF_2} = k + \left(\frac{2(1-k)}{\theta_{ov}} \right) (\theta - \theta_{on} - \theta_{ov/2})$$

$$\begin{cases} T_{rise_1} = T_{ref} \times T_{TSF_1} & \theta_{on} \leq \theta \leq \theta_{on} + \frac{\theta_{ov}}{2} \\ T_{rise_2} = T_{ref} \times T_{TSF_2} & \theta_{on} + \frac{\theta_{ov}}{2} \leq \theta \leq \theta_{on} + \theta_{ov} \\ T = T_{ref} & \theta_{on} + \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_{off} - \theta_{ov} \\ T_{fall_1} = T_{ref} \times (1 - T_{TSF_1}) & \theta_{off} - \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_{off} - \frac{\theta_{ov}}{2} \\ T_{fall_2} = T_{ref} \times (1 - T_{TSF_2}) & \theta_{off} - \frac{\theta_{ov}}{2} \leq \theta \leq \theta_{off} \end{cases}$$

با استفاده از این تابع مقادیر و قله ی ایجاد شده در نمودار گشتاور خروجی موتور تا حدودی دмп خواهد شد و اصطلاحاً ریل گشتاور کاهش خواهد یافت. شکل (۵) نمودار ترسیمی این تابع به ازای زوایای مختلف موتور را نشان می دهد.

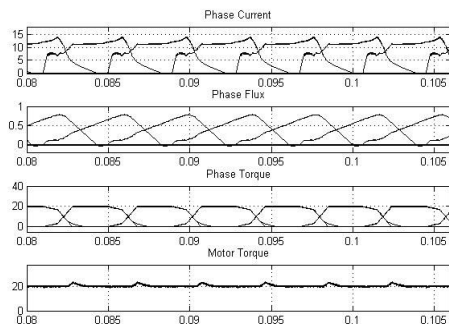


شکل ۵- تابع اشتراکی گشتاور دو شیب

۶- نتایج شبیه سازی

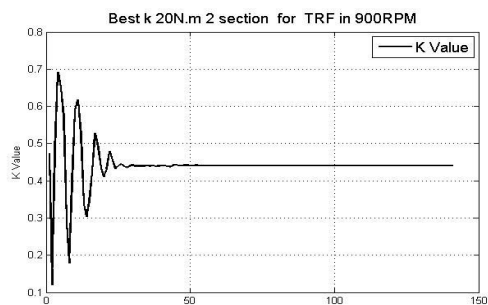
الف- نتایج شبیه سازی کنترل گشتاور با تابع

اشتراکی خطی گشتاور دو شیب



الف

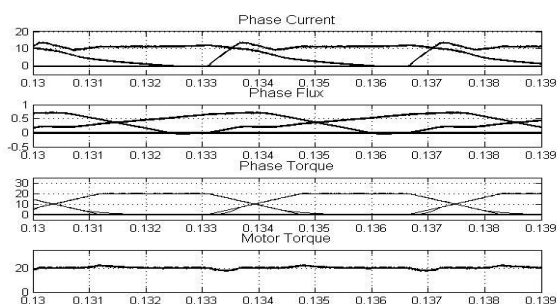
ارائه یک تابع اشتراکی گشتاور نوین بر پایه ی توابع خطی بهینه به منظور کاهش ریل گشتاور در موتور سوئیچ رلوکتانس توسط الگوریتم PSO



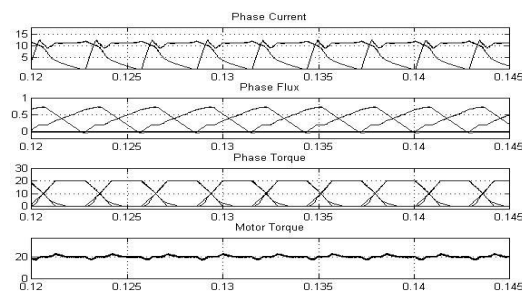
شکل ۹- نمودار تغییرات بهترین جواب (مقدار K) در هر تکرار الگوریتم PSO برای تابع هدف فاکتور ریل گشتاور برای TSF با دو شیب در سرعت ۹۰۰ دور بر دقیقه

شکل (۹) نمایشگر روند جستجوی ذرات با هدف قرار گیری در بهترین مکان می باشد. در شکل بهترین مکانی که یک ذره در بین همه ی ذرات در تکرار n ام توانسته است که پیدا کند نمایش داده می شود. مشاهده می شود که در حدود تکرار ۴۰ ام به بعد در همه ی تکرارها مکانی که بهترین ذره در بین همه ی ذرات توانسته است که در آن قرار گیرد یکسان می باشد و این بدین معناست که الگوریتم در حدود تکرار ۴۰ ام به همگرایی رسیده است.

ب- نتایج شبیه سازی کنترل گشتاور با تابع اشتراکی خطی گشتاور متداول



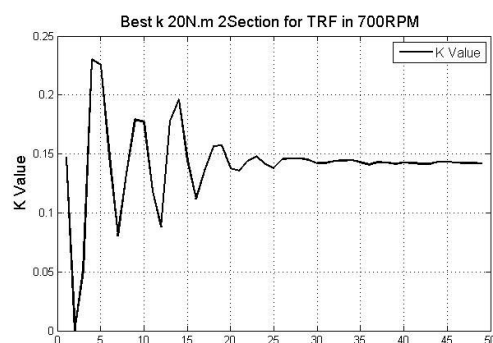
الف



ب

شکل ۷- نمایش شار، جریان ، گشتاور فاز و گشتاور موتور با استفاده از تابع اشتراکی گشتاور خطی دو شیب الف ۶۰۰ دور بر دقیقه (ب) ۹۰۰ دور بر دقیقه

شکل ۷ نشان می دهد که با افزایش سرعت میزان نیروی ضد محرکه (BEMF) که تابعی از سرعت می باشد افزایش می یابد و این افزایش موجب انحراف گشتاور واقعی موتور از میزان مرجع می گردد که این انحراف نیز خود باعث ظهور ریل در گشتاور در خروجی موتور می شود.



شکل ۸- نمودار تغییرات بهترین جواب (مقدار K) در هر تکرار الگوریتم PSO برای تابع هدف فاکتور ریل گشتاور برای TSF با دو شیب در سرعت ۷۰۰ دور بر دقیقه

شکل (۸) نمایشگر بهینه ترین مقدار ی است که الگوریتم توانسته است در بین همه ی ذرات در هر تکرار پیدا کند. در واقع این نمودار مقدار ذره ای که توانسته در تکرار n ام کمترین مقدار را برای تابع هدف ایجاد کند را نمایش می دهد. در این نمودار مشاهده می شود که در نهایت بهترین مکانی یکی از ۱۶ ذره در آن قرار گرفته در حدود ۰.۱۶۱ می باشد.

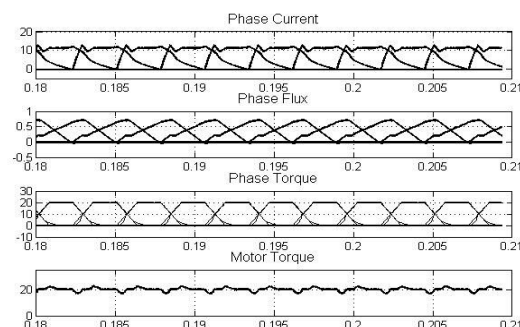
ارائه یک تابع اشتراکی گشتاور نوین بر پایه ی توابع خطی بهینه به منظور کاهش رپل گشتاور در موتور سوئیچ رلوکتانس توسط الگوریتم PSO

دور بر دقیقه افزایش می یابد و در سرعت های بالاتر موتور دچار ناپایداری می گردد.

جدول ۲-مقادیر زوایای خاموشی و روشنی و درصد فاکتور رپل گشتاور موتور SR در سرعت های متفاوت برای تابع اشتراکی گشتاور دو شیب بهینه شده با الگوریتم PSO

ω (RPM)	θ_{on} (Degree)	θ_{off} (Degree)
300	34	56
500	34	56
700	34	56
900	34	56
1100	34	56
1300	34	56

در رابطه ی ولتاژی موتور SR جمله ای وجود دارد که با نام نیروی ضد محرکه شناخته می شود. این رابطه تابعی از سرعت موتور می باشد که هر چه با افزایش و کاهش سرعت موتور این جمله نیز تغییر خواهد کرد. لذا همانطور که در جدول (۱) مشاهده می شود با افزایش سرعت موتور رپل گشتاور نیز افزایش می یابد. در جدول (۲) مشاهده می شود که استفاده از این تابع اشتراکی گشتاور نوین برای کنترل رپل گشتاور در موتور SR موجب کاهش رپل گشتاور شده و محدوده سرعت عملیاتی موتور از ۹۰۰ دور بر دقیقه به ۱۳۰۰ دور بر دقیقه افزایش می یابد.



ب

شکل ۷- نمایش شار، جریان، گشتاور فاز و گشتاور موتور با استفاده از تابع اشتراکی گشتاور خطی متداول الف ۷۰۰ دور بر دقیقه (ب) ۹۰۰ دور بر دقیقه

ج-مقایسه آماری رفتار موتور SR در حالت کنترل با دو تابع اشتراکی گشتاور خطی متداول و پیشنهادی

جدول ۱-مقادیر زوایای خاموشی و روشنی و درصد فاکتور رپل گشتاور در سرعت های متفاوت برای حالت کنترل موتور با تابع اشتراکی گشتاور خطی متداول

ω (RPM)	θ_{on} (Degree)	θ_{off} (Degree)
300	34	56
500	34	56
700	34	56
900	34	56
1100	34	56
1300	34	56

لازم به ذکر است که در حالت کنترل موتور SR با تابع اشتراکی گشتاور خطی متداول سرعت موتور تنها تا ۹۰۰

DrivesPowerElectronics,Ho, S.L. IEEE Transactions on (Volume:24 , Issue: 9), Sept. 2009

[3] Y. K. Choi, H.S. Yoon, C. S. Koh, "Pole-shaped optimization of a switched reluctance motor for torque ripple reduction", IEEE Trans. Magn., vol. 43, no. 4, pp. 1797-1800, Apr.2007.

[4] S. I. Nebeta, I. E. Chabu, L. Lebensztajn, D. A. P. Correa, W. M.Dasilva, K. Hameyer, "Mitigation of the torque ripple of aswitched reluctance motor throughaultiobjectiveoptimization",IEEE Trans. Magn., vol. 44, no. 6, pp. 1018-1021, Jun. 2008.

[5] R. S. Wallace, D.G. Taylor, "A balanced commutator for switched reluctance motors to reduce torque ripple", IEEE Trans. Power Electron., vol. 7, no. 4, pp. 617-626, Oct. 1992.

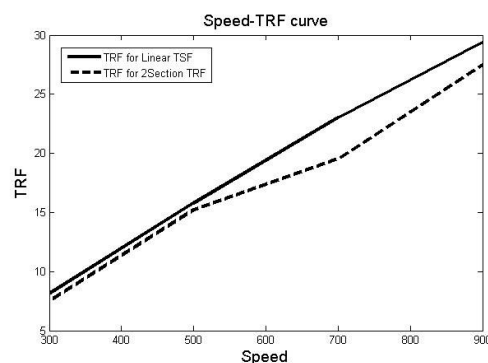
[6] D. S. Schramm, B.W.Williams, and T. C. Green, "Torque ripple reduction of switched reluctance motors by PWM phase current optimal profiling," in *Conf. Rec. IEEE PESC 1992*, vol. 2, pp. 857-860

[7] M.Dowlatshahi, S.M.Saghaiannejad, J.W.Ahn, M.Moallem, "Copper Loss and Torque-Ripple Minimization of Switched Reluctance Motors Considering Nonlinear and Magnetic Saturation Effects", JPE,Vol.14, No.2, pp.351-361, March. 2014.

[8]An Offline Torque Sharing Function for Torque Ripple Reduction in Switched Reluctance Motor Drives,Energy Conversion, IEEE Transactions on (Volume:30 , Issue: 2), Jin Ye ; McMaster Inst. for Automotive Res. & Technol., McMaster Univ., Hamilton, ON, Canada ; Bilgin, B. ; Emadi, A. 15 May 2015

[9]Ahn, J., W., "Torque control method for high-speed switched reluctance motor", Us Patent, Pub. No. US20120104986, 14, May, 2013.

[10]Y.Z.Xu, R.Zhong, S.L.Lu.L.Chen, "Analytical method to optimise turn-on angle andturn-off angle for switched reluctance motor drives", IET Electr. Power Appl., Vol.6, pp.593-603, 2012



شکل ۸- منحنی مقایسه فاکتور ریل گشتاور به ازای کنترل موتور با تابع اشتراکی گشتاور خطی متداول و تابع اشتراکی گشتاور دوشیب

۶- نتیجه گیری :

از آنجایی که شیب اندوکتانس در حدود زاویه ی غیر هم محوری کوچک است امکان گشتاور سازی در این ناحیه نیز کم است. لذا می توان با کوچک در نظر گرفتن شیب تولید گشتاور در حدود زاویه ی غیر هم محوری گشتاور کمتری در این ناحیه تولید کرد و پی از آن با ورود روتور به زاویه هم محوری شیب تولید گشتاور را افزایش داد. با این روش انطباق پذیری گشتاور مرجع فاز و گشتاور واقعی فاز افزایش یافته که نتیجه آن کاهش ریل گشتاور در خروجی موتور خواهد شد. از آنجایی که شیب هر قسمت از تابع اشتراکی گشتاور پیشنهادی نقش تعیین کننده ای در کاهش یا افزایش ریل گشتاور موتور دارد می توان بهینه ترین شیب برای تابع مذکور را توسط الگوریتم PSO تعیین نمود.

۷- مراجع

[1]Dowlatshahi, M. ; Electr. & Comput. Eng. Dept., Isfahan Univ. of Technol.(IUT), Isfahan, Iran ; Nejad, S.M.S. ; Jin-Who Ahn, Torque Ripple Minimization of Switched Reluctance Motor Using Modified Torque Sharing Function, Electrical Engineering (ICEE), 2013 21st Iranian Conference on, 14-16 May 2013

[2] Xue, X.D. ; Dept. of Electr. Eng., Hong Kong Polytech. Univ., Kowloon, China ; Cheng, K.W.E. ; , Optimization and Evaluation of Torque-Sharing Functions for Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor

ارائه یک تابع اشتراکی گشتاور نوین بر پایه ی توابع خطی بهینه به منظور کاهش ریزل گشتاور در موتور سوئیچ رلوکتانس توسط
الگوریتم PSO

ارائه یک تابع اشتراکی گشتاور نوین بر پایه ی توابع خطی بهینه به منظور کاهش ریزل گشتاور در موتور سوئیچ رلوکتانس توسط
الگوریتم PSO
