

بهبود عملکرد درایو موتور القایی قفس سنجابی دو سیم‌پیچه در محدوده سرعت‌های پایین به منظور افزایش بهره‌وری توان در مبدل الکترونیک قدرت

حجت مویدی راد^۱ ، دانشجوی دکتری و محمدعلی شمسی نژاد^۲ ، دانشیار

۱- دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران
hojatrad@birjand.ac.ir

۲- دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران
mshamsi@birjand.ac.ir

چکیده: موتور القایی قفس سنجابی با تحریک دوگانه، یک موتور القایی بدون جاروبک و تک قابه است که دو سیم‌پیچ سه فاز متعادل با تعداد قطب ناابرابر داشته که هر دو بر روی استاتور نصب می‌شوند. در این موتور سیم‌پیچ‌های استاتور از طریق دو اینسورتر سه فاز مستقل تغذیه می‌شوند. هدف اصلی این مقاله کاهش تلفات توان واحدهای اینورتر درایو موتور القایی قفس سنجانی دو سیم‌پیچه در سرعت‌های پایین است. این هدف از طریق حفظ کارکرد استاندارد موتور در سرعت‌های پایین از طریق کاربرد ایده‌ی جبران شار روتور در سیستم کنترلی درایو آن حاصل می‌شود. در این مقاله با بکارگیری این ایده، مشکل تخمین شار در سرعت‌های پایین حل می‌شود و برخلاف روش مرسوم، نسبت دو فرکانسی که برای تغذیه‌ی ماشین بکار می‌روند برابر نسبت تعداد قطب‌ها خواهد بود. لذا تلفات توان مبدل‌های الکترونیک قدرت بکار رفته مقدار قابل توجهی کاهش خواهد یافت. روش پیشنهادی، در محیط سیمولینک نرم افزار متلب شبیه‌سازی شده است که نتایج شبیه‌سازی شده مؤید ادعاهای ارائه شده هستند.

کلمات کلیدی: جبران شار، درایو موتور القایی، دو سیم‌پیچه، کنترل برداری.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۱۱

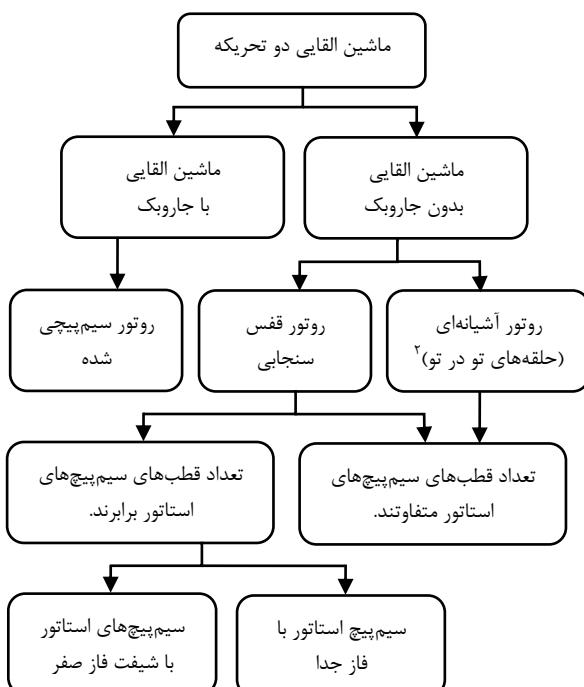
نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمد علی شمسی نژاد

نشانی نویسنده مسئول: ایران - بیرجند- دانشگاه بیرجند- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

يك اينورتر، می توان به موتور انتقال داد. DSWIM دارای ساختار قفس سنجابی استاندارد است. دو سیم پیچ سه فاز استاتور این موتور از طریق دو اینورتر سه فاز به شبکه اتصال می یابند. هیچ اتصال الکتریکی داخلی بین دو سیم پیچ استاتور وجود ندارد. تعداد قطب متفاوت سیم پیچ های استاتور در این موتور باعث شده است مشکل گردش جریان های هارمونیکی در ماشین های القایی دو تحریکه رفع شود. رفتار DSWIM شبیه دو ماشین القایی سه فاز مستقل می باشد که دارای محور روتور مشترک می باشند [5].

معمولًا قطب های استاتور آن به نسبت ۱ به ۳ انتخاب می شوند (مانند نسبت ۲۶ و نیز ۱۲:۴). البته هر ترکیبی از تعداد قطب های نابرابر نیز می تواند انتخاب شود. اما برای بهره برداری بهتر از ماده مغناطیسی و دوری از اشباع و نیز کاهش تلفات استاتور این نسبت پیشنهاد می شود [5]. مد کاری استاندارد DSWIM به این صورت است که نسبت دو فرکانسی که برای تغذیه ماشین بکار می روند برابر نسبت تعداد قطبها است. دو میدان گردان حاصل، بصورت همزمان گردش می کنند. بهره وری مناسب از این موتور با این مد کاری حاصل می شود. شرط لازم برای اینکه موتور دارای حداکثر نسبت گشتاور بر آمپر باشد، این است که موتور در مد استاندارش کار کند [6]. سیم پیچ های استاتور از طریق یک لینک DC مشترک و توسط اینورترهای ولتاژ تغذیه می شوند. شکل (۲) یک نمایش شماتیک ساده از درایو DSWIM را نشان می دهد.



شکل (۱): طبقه بندی ماشین های القایی با دو سیم پیچ تحریک بر اساس نوع روتور و سیم پیچ های استاتور.

ماشین های القایی AC و مخصوصاً نوع قفس سنجابی آن رایج ترین ماشین مورد استفاده در سیستم های محرک AC با سرعت قابل تنظیم (متغیر) می باشند. ماشین های الکتریکی القایی کاربردهای زیادی در صنعت دارند. مانند: استفاده در پمپ ها، فن ها، کمپرسورها، نوردهای سیمان، بالابر های معدن، نیروی محرکه کشته ها و وسایل نقلیه [1]. امروزه بیش از ۹۰ درصد موتورهای استفاده شده در صنعت، القایی هستند که با بهینه سازی روش استفاده از آنها، می توان درصد قابل توجه ای در انرژی الکتریکی مصرفی آنها، صرفه جویی به عمل آورد [2]. با توجه به جذابیت عملکرد موتور القایی و پر کاربرد بودن آن، محققین در سال های اخیر با اضافه کردن یک سیم پیچ سه فاز متعادل دیگر بر روی استاتور آن، ویژگی های این موتور را بهبود بخشیده اند. در واقع موتور القایی با تغذیه (تحریک) دو گانه، یک موتور القایی بدون جاروبک و تک قابه است که دو سیم پیچ سه فاز متعادل داشته و هر دوی آنها بر روی استاتور نصب می شوند. از نظر وجود عدم وجود جاروبک، ماشین القایی دو تحریکه را می توان به دو دسته هی ماشین القایی جاروبک دار و بدون جاروبک تقسیم بندی کرد. در حالت جاروبک دار، روتور آن سیم پیچی شده است و سرهای سیم پیچی توسط حلقه های لغزان^۱ که بر روی محرک روتور قرار گرفته اند بیرون آورده می شوند و توسط جاروبک ها در دسترس اند. موتورهای القایی دو تحریکه هی بدون جاروبک، بطور معمول دارای دو نوع ساختار روتور قفس سنجابی و روتور آشیانه‌ای^۲ می باشند. این نوع روتورها از استحکام بالای نسبت به مدل روتور سیم پیچی شده برخوردار هستند. در نوع روتور قفس سنجابی برای تغذیه موتور معقولًا از دو اینورتر سه فاز استفاده می شود که هر یک بطور مستقل به شبکه متصل می شوند. درایو این نوع از ماشین ها قادر به کنترل ماشین در محدوده وسیعی از سرعتهای کاری می باشد. بطور کلی ماشین های دو تحریکه را می توان بر اساس نوع سیم بندی استاتور و نوع روتور بکار رفته در آن، بصورت چارت شکل (۱) تقسیم بندی کرد.

ماشین القایی دو تحریکه با روتور آشیانه‌ای، معروف به ماشین های دو تحریکه بدون جاروبک^۳ می باشد. این ماشین ها نیز از دو سیم پیچ استاتور مجزا تشکیل یافته اند. یک سیم پیچ استاتور مستقیماً به شبکه وصل می شود و سیم پیچ قدرت نام دارد. سیم پیچ دیگر توسط یک اینورتر سه فاز به شبکه متصل می شود و سیم پیچ کنترل نام دارد. محدوده سرعتی آن کم است و برای درایوهای با کاربرد محدوده سرعتی کم، مناسب می باشد. این نوع از ماشین ها در حالت ژنراتوری کاربرد زیادی دارند [3,4].

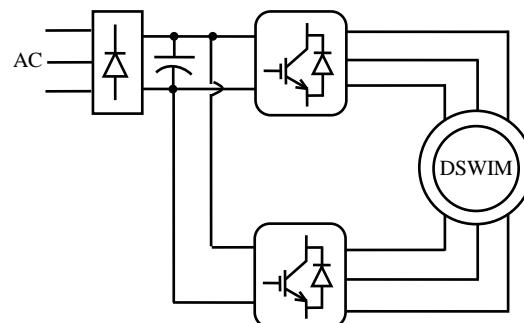
ماشین مورد مطالعه در مقاله‌ی پیش رو، موتور القایی قفس سنجابی دو تحریکه با تعداد قطب های نابرابر سیم پیچ های استاتور (DSWIM)^۴ است. این موتور توسط لیپو و همکارانش در [5] ارائه شده است. این موتور قابلیت اطمینان بالای دارد و قدرت را با بیش از

پاسخ حالت دائمی درایو منتهی شده است. ولی با این مدل، در حل مشکل درایو برای سرعت‌های پایین توفیقی حاصل نشده است. درایو DSWIM در مدل کاری استانداردش و بر اساس روش‌های معمول کنترلی، قادر به ردیابی مناسب سرعت‌های پایین نمی‌باشد. یکی از خصوصیات DSWIM این است که دو سیم‌پیچ مجزای استاتور دارد. تاکنون محققین از این ویژگی سخت افزاری موتور DSWIM برای حل مشکل معمول کنترل سرعت در محدوده‌های سرعت‌های پایین بهره گرفته‌اند. در روش ارائه شده در [5] یکی از سیم‌پیچ‌ها را با فرکانس ثابت دلخواه (معمولًا ۰/۰۵ پریونیت) و سیم‌پیچ دیگر را بصورت متغیر تحریک می‌کنند. فرکانس تحریک سیم‌پیچ اول به گونه‌ای تنظیم می‌شود که اگر فرکانس، زیر فرکانس ثابت دلخواه شد آن را به مقدار ثابت ۰/۰۵ پریونیت می‌رساند. یعنی سیم‌پیچ دوم برخلاف سیم‌پیچ اول با توجه به سرعت و گشتاور درخواستی قادر به تولید گشتاور مثبت و منفی می‌باشد. لذا با تحریک اجباری سیم‌پیچ اول در یک فرکانس ثابت دلخواه، دو میدان گردان حاصل از سیم‌پیچ‌ها بصورت غیر همزمان گردش می‌کنند و موتور از مدل کاری استانداردش خارج می‌شود، اما مشکل ردیابی درایو برای سرعت‌های پایین حل می‌شود.

روش‌های کنترل برداری ارائه شده در [11,12] بر اساس روش پایه‌ی ارائه شده در [5] می‌باشند که گشتاور تولیدی توسط دو سیم‌پیچ استاتور، به گونه‌ای بین آنها تقسیم می‌شود که سیم‌پیچ اول و یا دومی قادر به تولید گشتاور منفی یا مثبت در سرعت‌های پایین باشد. روش کنترلی مرسوم باعث از دست رفتن مدیریت بهینه‌ی انرژی در سرعت‌های پایین DSWIM می‌شود. بهره‌وری مناسب از این موتور زمانی حاصل می‌شود که موتور در مدل کاری استانداردش کار کند [6]. در [16]، برای بهبود پاسخ زمانی و حل مشکل تخمین شار روتور درایو موتور القایی سه فاز در محدوده سرعت‌های پایین، از یک جبران‌ساز شار روتور، استفاده شده است. که بخوبی مشکل تخمین شار روتور در سرعت‌های پایین را بر طرف کرده است. هدف اصلی این مقاله کاهش تلفات توان واحدهای اینورتر درایو DSWIM در سرعت‌های پایین است. این هدف از طریق حفظ کارکرد استاندارد موتور در سرعت‌های پایین از طریق کاربرد ایده‌ی جبران شار روتور در سیستم کنترلی درایو آن حاصل می‌شود. ساختار ادامه‌ی مقاله بدین شرح است: مدل موتور القایی قفس سنجابی دو سیم‌پیچه در بخش ۲ ارائه شده است. کنترل برداری پیشنهادی برای درایو DSWIM در بخش ۳ و مدل استفاده شده برای جبران شار روتور در بخش ۴ تشریح گردیده است. در بخش ۵، نتایج شبیه‌سازی ارائه و بالاخره مقاله با ارائه نتیجه‌گیری در بخش ۶، خاتمه می‌یابد.

۲- مدل موتور القایی قفس سنجابی دو سیم‌پیچه

معادلات $d-q$ ولتاژ ماشین القایی دو تحریکه با تعداد قطب نابرابر در قالب فرم مختلط بصورت معادلات (۱) و (۲) بیان می‌شوند [5].



شکل (۲): نمایش شماتیکی درایو DSWIM

تنظیم سرعت در موتور القایی، یکی از مهم‌ترین نیازها در صنعت و اتomasیون کارخانه‌ها می‌باشد. کنترل سرعت موتورهای القایی دو تحریکه به علت ساختار چند متغیره و غیرخطی آن پیچیده می‌باشد. با توسعه و پیشرفت تجهیزات الکترونیک قدرت، اجرای روش‌های پیشرفته‌ی کنترل، امکان پذیر شده است.

رفتار DSWIM شبیه دو موتور القایی سه فاز مستقل می‌باشد. لذا روش‌های کنترل سرعت موتور القایی سه فاز، برای آن نیز صادق است [5,6]. از روش‌های کنترل درایو موتور القایی می‌توان به روش‌های کنترل عددی [5,7]، کنترل مستقیم گشتاور [10-8] و کنترل برداری [11-18] اشاره کرد. متداول‌ترین روش کنترل سرعت در موتورهای القایی، کنترل برداری است [15,14]. کنترل برداری، یکی از قدرتمندترین روش‌های کنترل درایو موتور القایی است که از دقت بالایی برخوردار می‌باشد و نسبت به روش‌های عددی، به پارامترهای موتور وابستگی کمتری دارد [17]. این روش کنترلی وابسته به تخمین شار است [16]. در این روش برخلاف روش کنترل عددی، می‌توان شار و گشتاور را بطور مجزا کنترل کرد. در این روش، اندازه و فاز توانان کنترل می‌شوند. گشتاور و شار فاصله هواپی توابعی از ولتاژ و فرکانس هستند. این وابستگی علت اصلی کند بودن پاسخ موتورهای القایی است. با روش کنترل برداری می‌توان کند بودن پاسخ را بهبود داد.

در روش کنترل برداری برای محدوده سرعت‌های پایین، به دلیل قابل ملاحظه بودن افت ولتاژ بر روی مقاومت استاتور نسبت به ولتاژ ورودی، تخمین شار با حساسیت بالا و خطأ همراه خواهد شد که عملکرد درایو را مختل می‌کند. لذا در سرعت‌های پایین سطح مناسب شار روتور اهمیت زیادی دارد. مدل کنترل تطبیقی بر اساس تابع گشتاور در [19] ارائه شده است که در سرعت‌های پایین، به علت افت ولتاژ بر روی مقاومت استاتور، نمی‌توان از آن استفاده کرد. در [20] برای سرعت‌های بالا به علت وجود مقدار بزرگ نیروی محرکه‌ی الکتریکی، شار به سمت اشباع می‌رود و نمی‌توان از درایو برای سرعت‌های بالا استفاده کرد. در [21] برای بطرف کردن مشکل کنترل سرعت موتور در محدوده‌های سرعت پایین از تخمین مقاومت استاتور استفاده شده است. در [22] از روش‌های هوش مصنوعی برای بهبود عملکرد درایو کنترل سرعت موتور القایی استفاده شده، که به بهبود

$$\begin{aligned} T_e &= T_{e1} + T_{e2} = \frac{3}{2} \frac{P_1}{2} \operatorname{Im}(\lambda_{qds1} i_{dqsi}^*) \\ &\quad + \frac{3}{2} \frac{P_2}{2} \operatorname{Im}(\lambda_{qds2} i_{dqsi}^*) \end{aligned} \quad (9)$$

سرعت‌های الکتریکی ω_{r1} و ω_{r2} بر حسب سرعت مکانیکی روتور (۱۰) نیز بصورت رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) تعریف می‌شوند [۱۲].

$$\omega_{r1} = \frac{P_1}{2} \omega_r \quad (10)$$

$$\omega_{r2} = \frac{P_2}{2} \omega_r \quad (11)$$

شار پیوندی فاصله هوایی بصورت معادله (۱۲) بیان می‌شود:

$$\lambda_{qdmi} = L_{mi} i_{qdsi} + L_{mi} i_{qdri} \quad (12)$$

جربان‌ها با جایگذاری معادلات (۴) و (۵) در (۱۲) حذف می‌شوند. لذا شار پیوندی فاصله هوایی هر سیم‌پیچ استاتور را می‌توان بصورت معادله‌های (۱۳) و (۱۴) بر حسب شار پیوندی روتور و استاتور در راستای محورهای d و q بیان کرد.

$$\lambda_{dm1} = \frac{L_{lri} L_{mi}}{D_i} \lambda_{dsi} + \frac{L_{lsi} L_{mi}}{D_i} \lambda_{dri} \quad (13)$$

$$\lambda_{qm1} = \frac{L_{lri} L_{mi}}{D_i} \lambda_{qsi} + \frac{L_{lsi} L_{mi}}{D_i} \lambda_{qri} \quad (14)$$

شار پیوندی فاصله هوایی کل در راستای محورهای d و q به ترتیب به صورت معادله‌های (۱۵) و (۱۶) بیان می‌شوند.

$$\begin{aligned} \lambda_{dm} &= \frac{L_{lri} L_{m1}}{D_1} \lambda_{ds1} + \frac{L_{lsi} L_{m1}}{D_1} \lambda_{dr1} \\ &\quad + \frac{L_{lr2} L_{m2}}{D_2} \lambda_{ds2} + \frac{L_{ls2} L_{m2}}{D_2} \lambda_{dr2} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{qm} &= \frac{L_{lri} L_{m1}}{D_1} \lambda_{qs1} + \frac{L_{lsi} L_{m1}}{D_1} \lambda_{qr1} \\ &\quad + \frac{L_{lr2} L_{m2}}{D_2} \lambda_{qs2} + \frac{L_{ls2} L_{m2}}{D_2} \lambda_{qr2} \end{aligned} \quad (16)$$

معادله‌ی مکانیکی ماشین نیز بصورت معادله (۱۷) بیان می‌شود.

$$V_{qdsi} = r_{si} i_{qdsi} + \rho \lambda_{qdsi} - j \omega \lambda_{qdsi} \quad (11)$$

$$V_{qdri} = r_{ri} i_{qdri} + \rho \lambda_{qdri} - j(\omega - \omega_{ri}) \lambda_{qdri} = 0 \quad (2)$$

که در آن مقدار اندیس i برای بیان متغیرهای سیم‌پیچ استاتور xyz برابر ۱ و برای بیان متغیرهای مربوط به سیم‌پیچ استاتور λ_{qdsi} و λ_{qdri} برابر ۲ است. ω سرعت چرخش قاب مرجع مشترک 5 ، ω_{ri} سرعت الکتریکی روتور، V_{qds} ، V_{qdr} و λ_{qds} به ترتیب ولتاژها، جریان‌ها و شارهای پیوندی استاتور و روتور در محورهای d و q و r_s نیز به ترتیب مقاومت‌های استاتور و روتور و $\rho = d/dt$ می‌باشد. معادلات شارهای پیوندی بر حسب جریان‌ها طبق معادله (۳) بیان می‌شوند [۲۳].

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qdsi} \\ \lambda_{qdri} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{si} & L_{mi} \\ L_{mi} & L_{ri} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{qdsi} \\ i_{qdri} \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در آن L_s و L_r به ترتیب اندوکتانس‌های استاتور و روتور و اندوکتانس مغناطیس کننده است. با توجه به معادله (۳)، معادلات جربان بر حسب شارهای پیوندی بصورت رابطه‌های (۴) و (۵) بیان می‌شوند.

$$i_{qdsi} = \frac{L_{ri}}{D_i} \lambda_{qdri} - \frac{L_{mi}}{D_i} \lambda_{qdsi} \quad (4)$$

$$i_{qdri} = \frac{L_{si}}{D_i} \lambda_{qdsi} - \frac{L_{mi}}{D_i} \lambda_{qdri} \quad (5)$$

که در آن $D_i = L_{si} L_{ri} - L_{mi}^2$ است. با جایگذاری معادلات (۴) و (۵) در معادلات (۱) و (۲)، معادلات (۶) و (۷) را خواهیم داشت.

$$V_{qdsi} = \frac{r_{si} L_{ri}}{D_i} \lambda_{qdsi} - \frac{r_{si} L_{mi}}{D_i} \lambda_{qdri} + p \lambda_{qdsi} - j \omega \lambda_{qdsi} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{r_{ri} L_{si}}{D_i} \lambda_{qdri} - \frac{r_{ri} L_{mi}}{D_i} \lambda_{qdsi} + p \lambda_{qdri} \\ &\quad - j(\omega - \omega_{ri}) \lambda_{qdri} \end{aligned} \quad (7)$$

گشتاور الکترومغناطیسی (۷) برای هر سیم‌پیچ استاتور بصورت معادله (۸) بیان می‌شود.

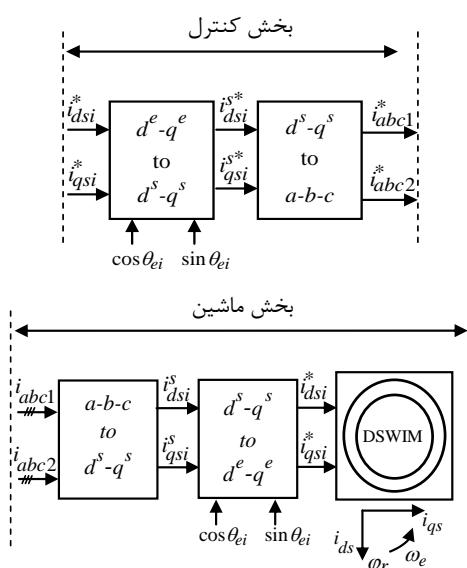
$$T_{ei} = \frac{3}{2} \frac{P_i}{2} \operatorname{Im}(\lambda_{qdsi} i_{qdsi}^*) \quad (8)$$

که در آن P_i تعداد قطب‌های سیم‌پیچ‌های abc و xyz است. گشتاور الکترومغناطیسی کل (T_e) در DSWIM برابر مجموع گشتاورهای تولیدی هر دو سیم‌پیچ استاتور می‌باشد که برای آن رابطه‌ی (۹) را خواهیم داشت [۵].

۳- کنترل برداری پیشنهادی موتور القایی قفس

سنجابی دو سیم پیچه

نمایش شماتیکی روش کنترل برداری موتور القایی قفس سنجابی دو سیم پیچه در شکل (۵) نشان داده شده است، که به کمک آن می‌توان ساختار کنترل را بر اساس مدل ماشین تشریح کرد. پارامترهای اصلی کنترل یعنی i_{ds1}^* و i_{qsi}^* ، که مقادیری DC هستند، به کمک سیگنال‌های $\cos\theta_{ei}$ و $\sin\theta_{ei}$ از روی سیگنال شار روتور ساخته می‌شوند. محورهای d^e-q^e و d^s-q^s به صورت فازوری برای موتور القایی در شکل (۶) نشان داده شده‌اند [24]. معادله‌های (۱۸) تا (۲۸) برای تولید سیگنال‌های برگشتی، مورد استفاده قرار گرفته‌اند [24,5].

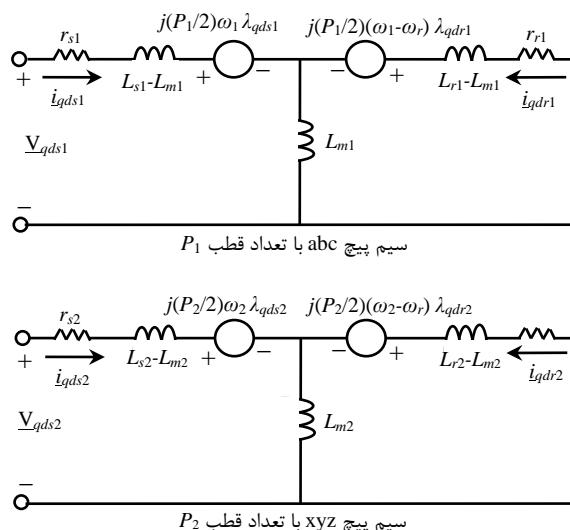


شکل (۵): نمایش شماتیکی کنترل برداری DSWIM

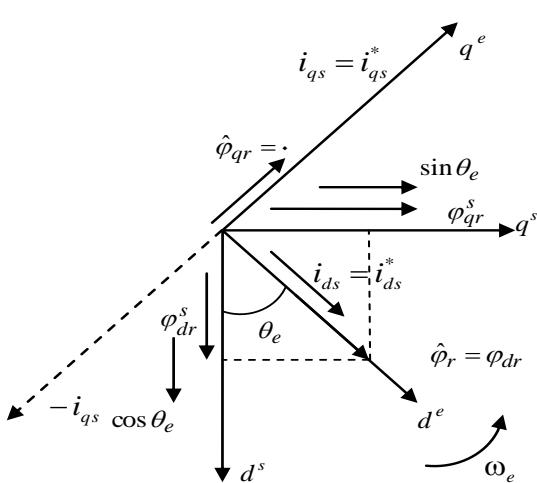
$$p\omega_r = \frac{K_{el}}{J}(\lambda_{dr1}I_{qsl} - \lambda_{qr1}I_{ds1}) + \frac{K_{e2}}{J}(\lambda_{dr2}I_{qsl} - \lambda_{qr2}I_{ds2}) - \frac{T_L}{J} \quad (17)$$

که در آن $K_{e2} = \frac{3P_2}{4} \cdot \frac{L_{m2}}{L_{r2}}$ و $K_{el} = \frac{3P_1}{4} \cdot \frac{L_{m1}}{L_{r1}}$ ضریب اینرسی است.

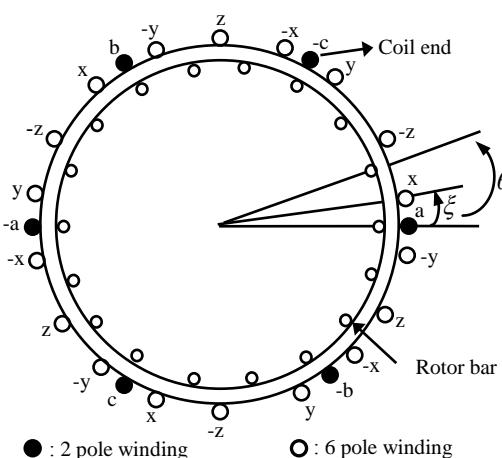
مدار معادل dq -ی DSWIM در شکل (۳) نشان داده شده است [5]. نمایی از توزیع سیم‌پیچی با نسبت قطب $P_1:P_2$ برای DSWIM در شکل (۴) نشان داده شده است [5]. معمولاً ترتیب سیم‌پیچی abc برای سیم‌پیچ استاتور با تعداد قطب کم و xyz برای سیم‌پیچ با تعداد قطب بیشتر بکار می‌رود.



شکل (۳): مدار معادل dq -ی DSWIM



شکل (۶): نمایش برداری مؤلفه‌های d^s-q^s و d^e-q^e [24]



شکل (۴): توزیع سیم‌پیچی در DSWIM

$$\sin \theta_{ei} = \varphi_{qri}^s / \varphi_{ri}$$
(۲۶)

$$\varphi_{dsi}^s = \int (v_{dsi}^s - R_{si} i_{dsi}^s) dt$$
(۲۷)

$$\varphi_{dri}^s = L_{mi} i_{dsi}^s + L_{ri} i_{dri}^s$$
(۲۸)

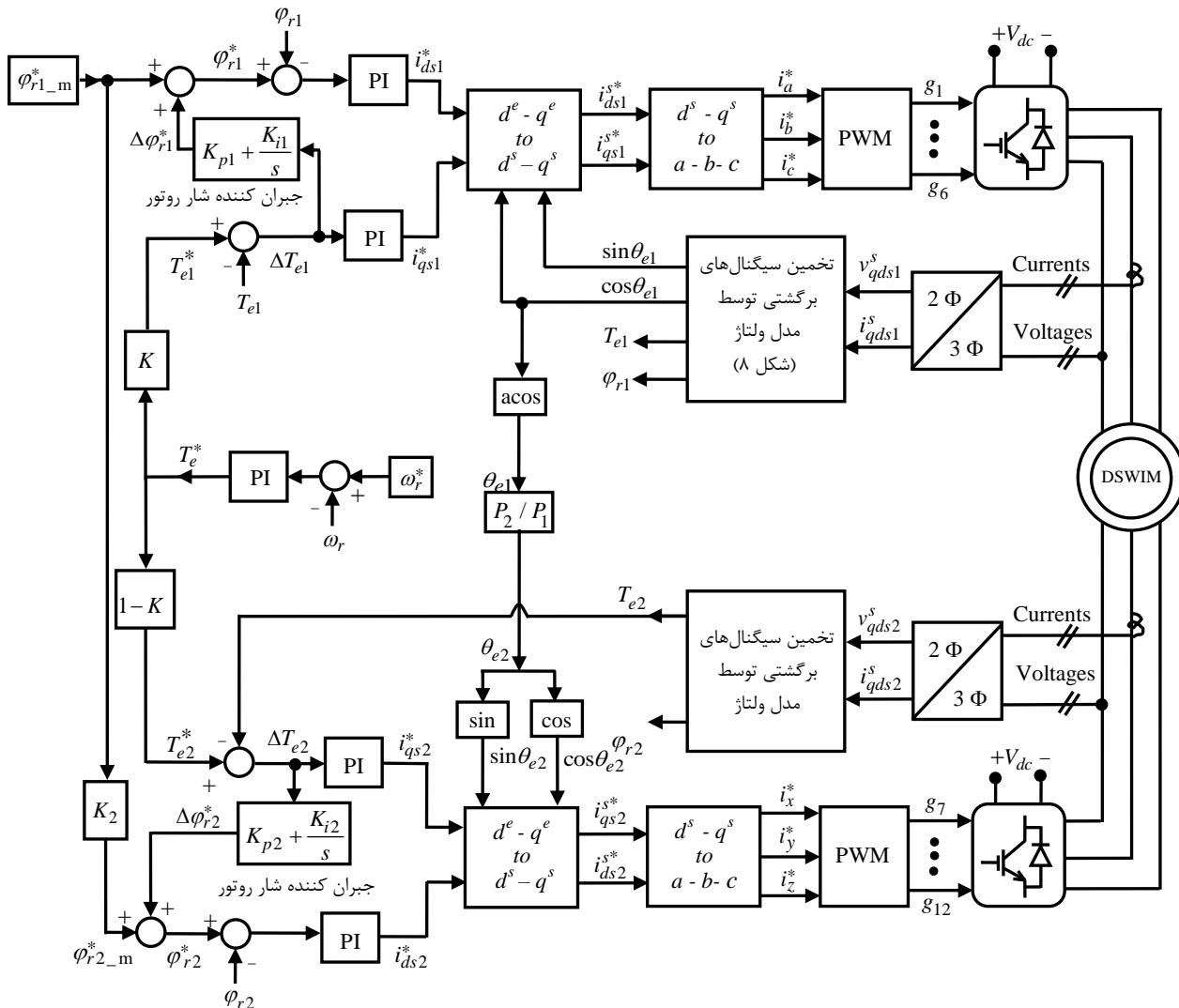
$$\varphi_{qsi}^s = \int (v_{qsi}^s - R_{si} i_{qsi}^s) dt$$
(۲۹)

$$\varphi_{qri}^s = L_{mi} i_{qsi}^s + L_{ri} i_{qri}^s$$
(۳۰)

$$\varphi_{qdm}^s = \varphi_{qdsi}^s - L_{lsi} i_{qdsi}^s$$
(۳۱)

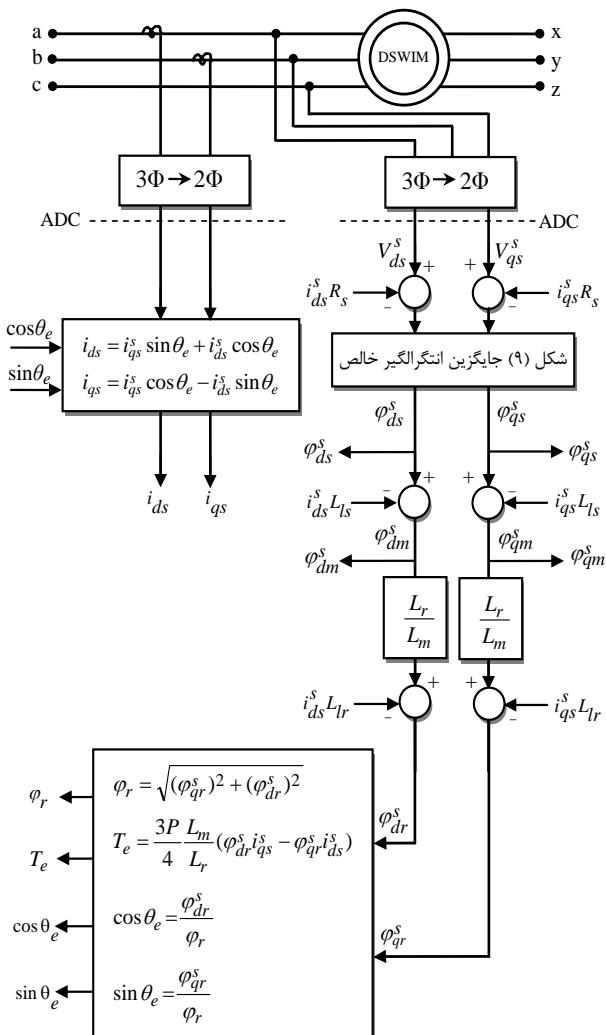
که φ_{qri}^s و φ_{dri}^s به ترتیب شارهای استاتور و روتور در محورهای مستقیم و متعامد، L_{lsi} اندوکتانس نشتی استاتور، L_{tri} اندوکتانس نشتی روتور و نیز φ_{qmi}^s و φ_{dmi}^s به ترتیب شارهای فاصله هواپی در محورهای مستقیم و متعامد هستند.

نمایش شماتیکی درایو پیشنهادی کنترل سرعت موتور القابی در شکل (۷) نشان داده شده است. که در آن K ضریب تقسیم گشتاور و K_2 هم ضریب شار می‌باشد. اساس روش کنترل بر پایه‌ی کنترل برداری مستقیم مدل ولتاژ است.

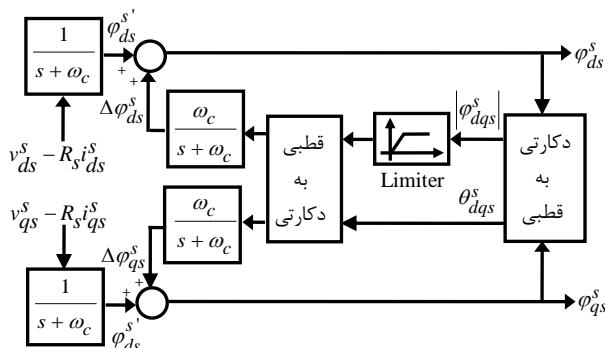


شکل (۷): نمایش شماتیکی درایو کنترل سرعت پیشنهادی DSWIM

به صورت $|T_{e1}| + |T_{e2}| = T_e$ و برای روش مرسوم به صورت $|T_{e1}| + |T_{e2}| \neq T_{e1} + T_{e2} = T_e$ می‌باشد.



شکل (۸): نمایش شماتیکی تخمین سیگنال‌های برگشتی مدل ولتاژ برای سیم پیچ درایو abc در درایو DSWIM



شکل (۹): نمایش شماتیکی الگوریتم پیشنهادی [25] برای حل مشکل آفست DC در درایو DSWIM

۱-۳-۱- تخمین سیگنال‌های برگشتی توسط مدل ولتاژ
 سیگنال‌های بردار واحد در روش کنترل برداری مستقیم مدل ولتاژ، از روی شار روتور تخمین زده می‌شوند. شارهای روتور طبق معادله‌های (۲۱) و (۲۲) با استفاده از شارهای فاصله هوایی (ϕ_{dm}^s و ϕ_{qm}^s) تخمین زده می‌شوند. همان‌طور که در نمایش شماتیکی شکل (۸) نشان داده شده است، شارهای فاصله هوایی را می‌توان از روی مقادیر ولتاژ و جریان فازها تخمین زد. جریان‌های استاتور موتور مستقیماً از طریق حسگرهای جریان، اندازه‌گیری می‌شوند. با توجه به نمایش شماتیکی شکل (۸)، شار روتور، گشتوار الکترومغناطیسی، سیگنال‌های شباهه شکل (۸) تخمین زده می‌شوند.

۴- مدل مورد استفاده برای جبران شار روتور

روش کنترل برداری مستقیم، وابسته به تخمین بردارهای واحد و شار روتور است. شار روتور تخمینی، متناسب با اختلاف بین ولتاژ استاتور و افت ولتاژ ببروی مقاومت استاتور است. در سرعت‌های بالا $V_s \geq R_s i_s$ است و لذا شار روتور به تغییرات این افت ولتاژ بر روی مقاومت استاتور در مقایسه با ولتاژ ورودی استاتور، قابل ملاحظه است. لذا تخمین شار روتور دشوار است و به صورت پایدار کنترل نمی‌شود ($\phi_{ri} \neq \hat{\phi}_{ri}$). لذا عملکرد کنترلهای سیستم کنترلی درایو با مشکل مواجه می‌شوند. شار کم منجر به تولید گشتوار کم خواهد شد و موتور قادر به تأمین گشتوار درخواستی نیست. اگر خطای گشتوار همیشه وجود داشته باشد ($\Delta T_e \neq 0$)، مقدار گشتوار واقعی همیشه از گشتوار مرجع کمتر خواهد بود. برای جبران این تغییرات، از یک جبران کننده شار روتور استفاده می‌شود [۱۶]. در این جبران کننده، شار روتور تحت مؤلفه‌ی دیگری که خطای گشتوار است، توسط یک کنترل کننده جبران می‌شود. در واقع هدف اصلی در درایو کنترل سرعت $\rightarrow 0$ و از آنجا $\Delta \omega_e \rightarrow 0$ است. برای سرعت‌های پایین، $\phi_{ri} \neq \hat{\phi}_{ri}$ است. برای جبران شار مرجع اصلی ($\phi_{ri_m}^*$) از مؤلفه‌ی ϕ_{ri}^* استفاده می‌شود. این مؤلفه توسعه جبران کننده شار تولید می‌شود و شار مرجع اصلی را بصورت $\phi_{ri} = \phi_{ri_m}^* + \Delta \phi_{ri}$ تنظیم می‌کند.

طبق معادله‌های (۱۸) و (۱۹)، شار در سیستم کنترلی درایو DSWIM بطور مستقیم با انگرالگیری از نیروی حرکتی الکتریکی حاصل می‌شود. انگرالگیر خالص مشکل آفست DC را به همراه دارد که برای حل این مشکل از الگوریتم رائمه شده در [25] استفاده می‌شود. این الگوریتم در شکل (۹) نشان داده شده است. برای $T_e > 0$ ، گشتوار تولیدی در سیم‌پیچ‌های استاتور xyz و برای روش پیشنهادی

متوسط تلفات توان کلیدزنی کل نیز طبق رابطه‌ی (۳۶) بدست می‌آید.

$$P_{sw_ave}(k) = \frac{1}{T_{sw}} E_{sw}(k) \quad (36)$$

تلفات توان کل از مجموع تلفات هدایتی و کلیدزنی طبق رابطه‌ی (۳۷) بدست می‌آید.

$$P_{ave_loss}(k) = P_{sw_ave}(k) + P_{cond_ave}(k) \quad (37)$$

منحنی‌هایی بصورت گرافی مشابه شکل (۱۰) در برگه‌ی داده‌های اینورترها وجود دارد که بر اساس آنها می‌توان اطلاعات مربوط به تلفات انرژی را از آنها استخراج کرد. جریان‌های IGBT و دیود بر اساس وضعیت روشن و یا خاموش بودن کلیدها طبق رابطه‌های (۳۸) و (۳۹) تعیین می‌شوند [28].

$$\begin{bmatrix} i_{T1} \\ i_{T2} \\ i_{T3} \\ i_{T4} \\ i_{T5} \\ i_{T6} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (1+\text{sign})S_1 & 0 & 0 \\ 0 & (1+\text{sign})S_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1+\text{sign})S_3 \\ (1-\text{sign})S_4 & 0 & 0 \\ 0 & (1-\text{sign})S_5 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\text{sign})S_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$\begin{bmatrix} i_{D1} \\ i_{D2} \\ i_{D3} \\ i_{D4} \\ i_{D5} \\ i_{D6} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (1-\text{sign})S_1 & 0 & 0 \\ 0 & (1-\text{sign})S_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\text{sign})S_3 \\ (1+\text{sign})S_4 & 0 & 0 \\ 0 & (1+\text{sign})S_5 & 0 \\ 0 & 0 & (1+\text{sign})S_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (39)$$

که i شماره‌ی کلیدها ($i = 1, 2, \dots, 6$) و T_i و D_i به ترتیب دیود معکوس موازی i ام و نیز i am IGBT و نیز i am کلید i am می‌باشدند. اگر کلید روشن باشد مقدار i برابر یک و اگر خاموش باشد مقدار آن برابر صفر است. نمایش شماتیکی جریان‌ها در یک اینورتر سه فاز بصورت شکل (۱۱) نشان داده شده است.

۶- نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی در محیط نرم افزار متلب و بر روی یک DSWIM با مشخصات ذکر شده در جدول (۱) که در پیوست (الف) آمده است، انجام گرفته است [6]. مشخصات استفاده شده برای IGBT/Diode با استفاده از اطلاعات SKM40GD123D IGBT استخراج شده است.

۵- تلفات توان در واحد اینورتر

اینورترها نقش اساسی جهت کنترل توان در سیستم‌های الکتریکی مانند درایو های صنعتی دارند [۲۶]. در سرعت‌های پایین تلفات هسته موتور چشم‌گیر نمی‌باشد [27]. لذا به حداقل رساندن تلفات توان واحد اینورتر با حداقل هزینه، جهت افزایش بهره‌وری بیشتر انرژی، اهمیت می‌یابد.

ترانزیستورهای با گیت عایق شده^۹ پرکاربردترین عنصر در واحد اینورتر محركه‌های الکتریکی هستند. قابلیت اطمینان IGBT‌ها به مدیریت حرارت عناصر بکار رفته در آن وابسته است. لذا توجه به تلفات توان واحد اینورتر، اهمیت بالایی در افزایش راندمان کاری و قابلیت اطمینان آن دارد.

تلفات IGBT/Diode شامل دو بخش تلفات IGBT و دیود است. که هر بخش از تلفات توان، شامل تلفات کلیدزنی (P_{sw}) و تلفات هدایتی (P_C) می‌باشد که تلفات کلیدزنی شامل تلفات روشن و خاموش شدن کلید است. تلفات انرژی هدایتی برای IGBT و دیود به ترتیب بصورت رابطه‌های (۲۹) و (۳۱) تعریف می‌شوند [28].

$$E_{CT_loss}(k) = \int_{T_{on}(k)} V_{ce}(t).i_c(t).dt \quad (29)$$

$$V_{ce}(t) = f(i_c(k), T_j(k)) \quad (30)$$

$$E_{CD_loss}(k) = \int_{T_{on}(k)} V_D(t).i_D(t).dt \quad (31)$$

که ترتیب تلفات انرژی هدایتی E_{CD_loss} و E_{CT_loss} دیود، V_{ce} ولتاژ اشباع مستقیم^{۱۰}، V_D ولتاژ آستانه هدایت، i_c جریان کلکتور، k شماره کلید و $T_{on}(k)$ دوره‌ی تناوب زمان روشن بودن کلید است. تلفات انرژی کلیدزنی IGBT نیز بصورت تابعی از جریان و دما، به صورت رابطه‌های (۳۲) و (۳۳) تعریف می‌شوند.

$$E_{sw_on}(k) = f_{sw-on}(i_c(k), T_j(k)) \quad (32)$$

$$E_{sw_off}(k) = f_{sw-off}(i_c(k), T_j(k)) \quad (33)$$

که T_j دمای پیوندی است. تلفات انرژی کلیدزنی کل، طبق رابطه‌ی (۳۴) بیان می‌شود.

$$E_{sw}(k) = f_{sw-on}(k) + f_{sw-off}(k) \quad (34)$$

تلفات کلیدزنی دیود بر اساس انرژی بازگشتی^{۱۱} (E_{rr}) بصورت رابطه‌ی (۳۵) بیان می‌شود [29].

$$E_{rr}(k) = f(i_c(k), T_j(k)) \quad (35)$$

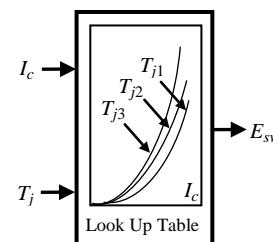
مربوط به فاز a و x به ترتیب در شکل‌های (۱۲-ث) و (۱۳-ث) نشان داده شده است. شکل‌های (۱۲-ت) و (۱۳-ت) به ترتیب مؤلفه‌های q و d شار روتور سیم پیچ abc روی محورهای d^q و نیز مقدار شار روتور را نشان می‌دهند.

جهت مقایسه‌ی سیستم کنترلی درایو پیشنهادی DSWIM با روش مرسوم آن در سرعت‌های پایین، نتایج مربوط به شبیه‌سازی روش مرسوم کنترلی در ادامه آمده است. در روش مرسوم برای سرعت‌های پایین معمولاً سیم پیچ اول یا دوم با یک فرکانس ثابت تحریک می‌شود و بر اساس فرمان سرعت و گشتاور درخواستی تحریک سیم پیچ دوم تعیین می‌شود. با توجه به اینکه سیم پیچ اول تحت تحریک ثابتی کار می‌کند لذا سیم پیچ دوم قادر است در دو مدار کاری موتوری یا زیراتوری کار کند. به عبارتی بایستی مجموع جبری گشتاور تولیدی توسط دو سیم پیچ xyz برای گشتاور درخواستی باشد. در شبیه‌سازی انجام شده برای روش مرسوم تحریک سیم پیچ اول ثابت در نظر گرفته می‌شود.

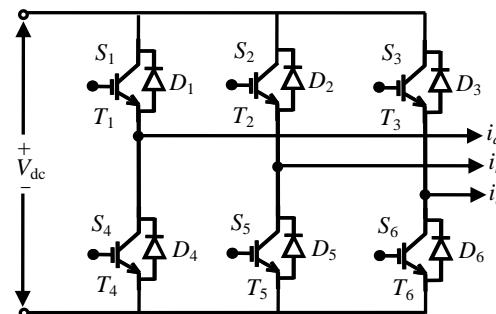
شکل‌های (۱۴) و (۱۵) رفتار سیستم کنترلی مرسوم درایو DSWIM پیشنهادی را به ترتیب در پاسخ به فرمان‌های سرعت ۱ N.m/s ۸ rad/s و سرعت ۲ N.m/s ۰/۵ rad/s با گشتاور ۰/۵ rad می‌نمایند. سیستم کنترلی درایو، سرعت‌های مرجع را در حالت ماندگار بخوبی ردیابی کرده است.

شکل‌های (۱۴-ب) و (۱۵-ب) پروفایل گشتاور تولیدی توسط سیم پیچ‌های abc و xyz و نیز گشتاور کل تولیدی را که از مجموع این دو گشتاور حاصل می‌شود، نشان می‌دهند. در این حالت‌ها سیم پیچ دوم در مدار زیراتوری کار می‌کند. نسبت گشتاور بر آمپر تولیدی در DSWIM در دو روش پیشنهادی و مرسوم در شکل‌های (۱۶-الف) و (۱۷-الف) نشان داده شده است. روش پیشنهادی از نسبت گشتاور بر آمپر بهتری نسبت به روش مرسوم برخوردار بوده است. همانطور که در [۶] گزارش شده است برای داشتن نسبت گشتاور بر آمپر مناسب در DSWIM، بایستی موتور در مدار کاری استاندارش کار کند. شکل‌های (۱۶-ب) و (۱۷-ب) مجموع کل تلفات توان (شامل هدایتی و کلیدزنی) واحدهای اینورتر را در روش‌های پیشنهادی و مرسوم نشان می‌دهد. روش پیشنهادی در مقایسه با روش مرسوم از کاهش تلفات قابل ملاحظه‌ای برخوردار بوده است.

در هر دو روش پیشنهادی و مرسوم، مجموع جبری گشتاورهای تولیدی برای گشتاور کل می‌باشد و قاعده‌ای گشتاورهای تولیدی درصدی از گشتاور کل هستند. در روش کنترلی پیشنهادی مجموع درصد هر دو گشتاور تولیدی از ۱۰۰ تجاوز نمی‌کند. اما همانطور که در [۵] هم گزارش شده، در روش مرسوم اینگونه نیست. همانطور که در شکل (۱۴-ب) نشان داده شده است، گشتاور کل برابر ۲ N.m/s است، اما سیم پیچ abc با توجه به تحریک ثابت، نزدیک به دو برابر این گشتاور را تولید کرده است. لذا بالا بودن نسبت گشتاور بر آمپر در روش پیشنهادی نسبت به روش مرسوم دور از انتظار نیست.



شکل (۱۰): یک نمونه از منحنی‌های موجود در برگه‌ی داده‌های اینورترها جهت محاسبات تلفات انرژی.



شکل (۱۱): نمایش شماتیکی اینورتر سه فاز.

شبیه‌سازی بر روی دو مدل و در شرایط کاری مختلف بصورت زیر انجام شده است:

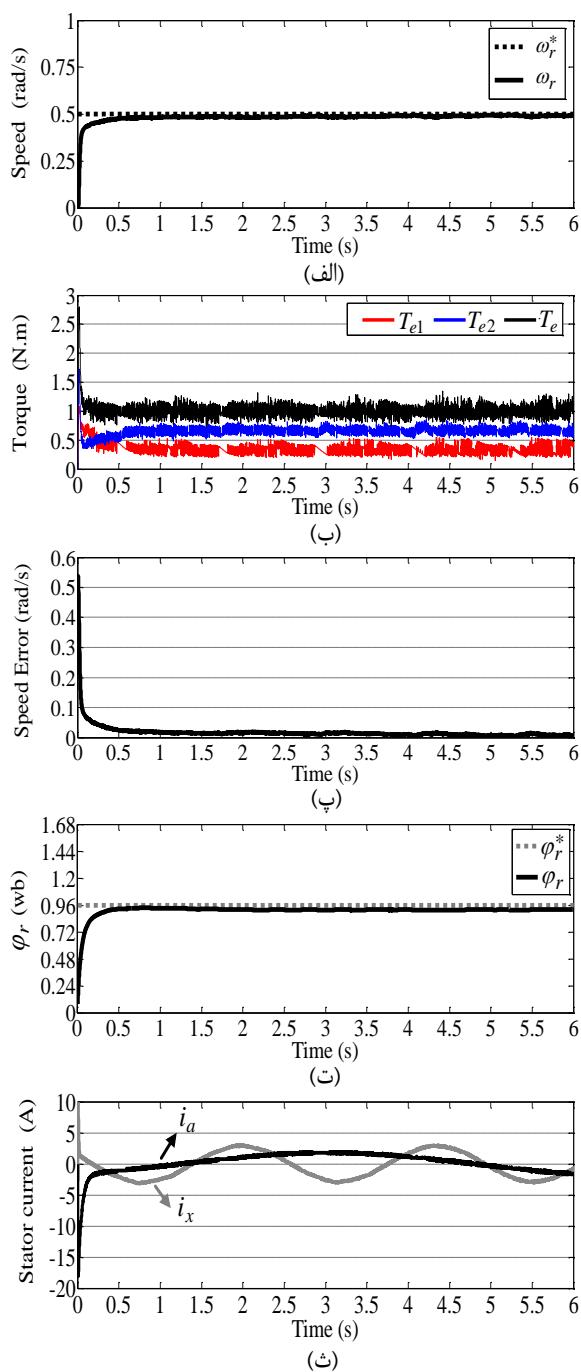
۱- مدل کنترلی پیشنهادی درایو DSWIM مبتنی بر

جبران کننده شار روتور (روش پیشنهادی)

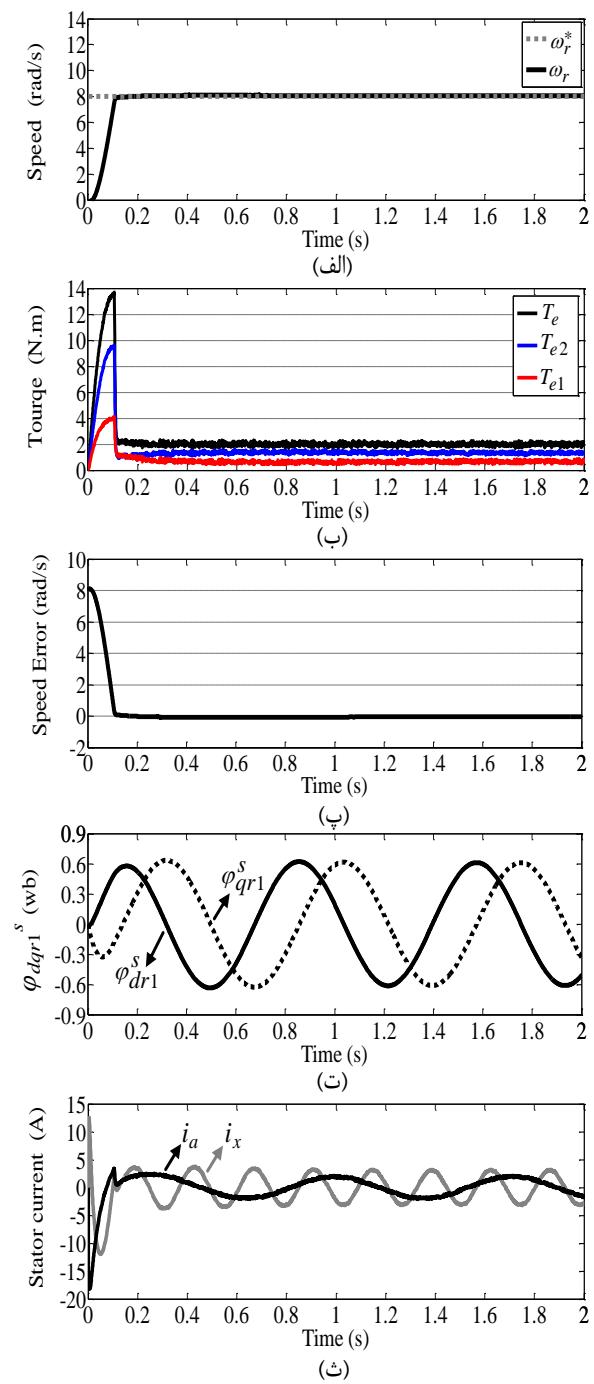
۲- مدل کنترلی مرسوم درایو DSWIM (روش مرسوم)

در این بخش، ابتدا نتایج شبیه‌سازی برای روش پیشنهادی ارائه می‌شود و سپس نتایج شبیه‌سازی برای روش مرسوم نیز نشان داده خواهد شد. در ادامه، مجموع کل تلفات توان کلیدزنی و هدایتی واحدهای اینورتر در درایو DSWIM برای دو روش پیشنهادی و مرسوم در شرایط کاری مختلف، ارائه خواهد شد.

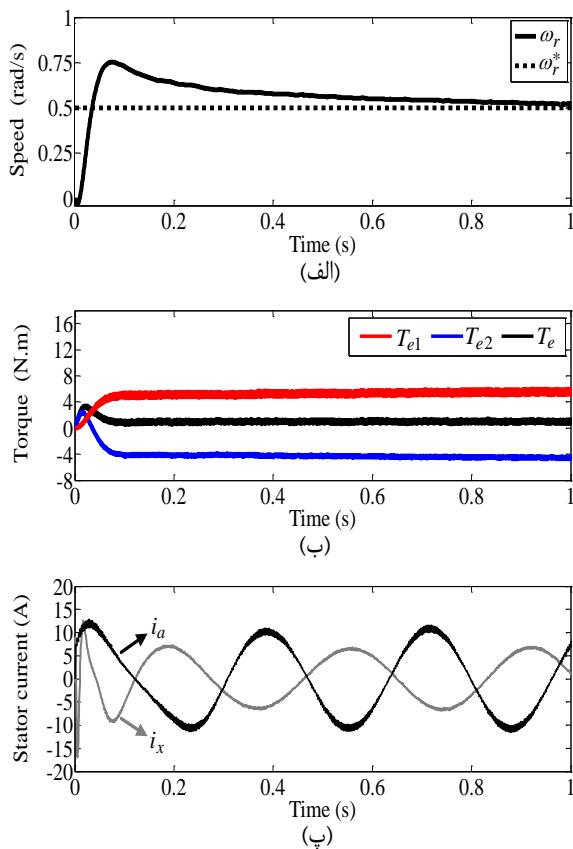
شکل‌های (۱۲) و (۱۳) رفتار سیستم کنترلی درایو DSWIM پیشنهادی را به ترتیب در پاسخ به فرمان‌های سرعت ۸ rad/s ۰/۵ rad/s و سرعت ۲ N.m/s ۰/۵ rad/s با گشتاور ۱ N.m نشان می‌دهند. سیستم کنترلی درایو، سرعت‌های مرجع را در حالت ماندگار بخوبی ردیابی کرده است. شکل‌های (۱۲-ب) و (۱۳-ب) پروفایل گشتاور کل تولیدی را که از مجموع این دو گشتاور حاصل می‌شود، نشان می‌دهند. هر یک از گشتاورهای تولیدی سیم پیچ‌های abc و xyz و نیز گشتاور کل تولیدی را که از گشتاورهای تولیدی سیم پیچ‌های استاندار درصدی از گشتاور کل تولیدی را تشکیل می‌دهند که مجموع درصد آنها از ۱۰۰ تجاوز نمی‌کند. این نکته، ویژگی مهم مد استاندار کاری این موتور می‌باشد. متناسب با گشتاور تولیدی توسط هر یک از سیم پیچ‌ها، جریان‌های



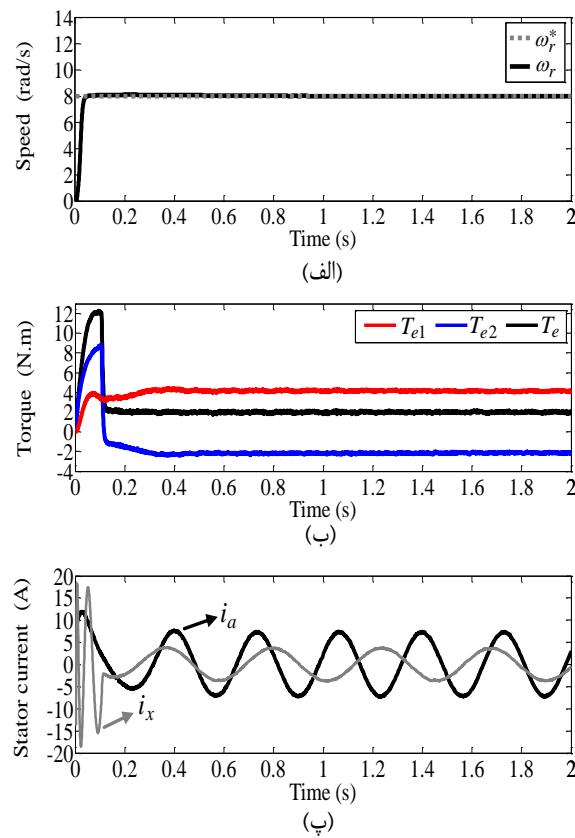
شکل (۱۳): نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی در پاسخ به فرمان سرعت 0.5 rad/s و گشتاور 1 N.m . (الف) پروفایل سرعت روتور، (ب) پروفایل گشتاور، (پ) خطای سرعت، (ت) شار روتور و (ه) جریان فاز a سیم پیچ abc و جریان فاز اول (x) سیم پیچ xyz.



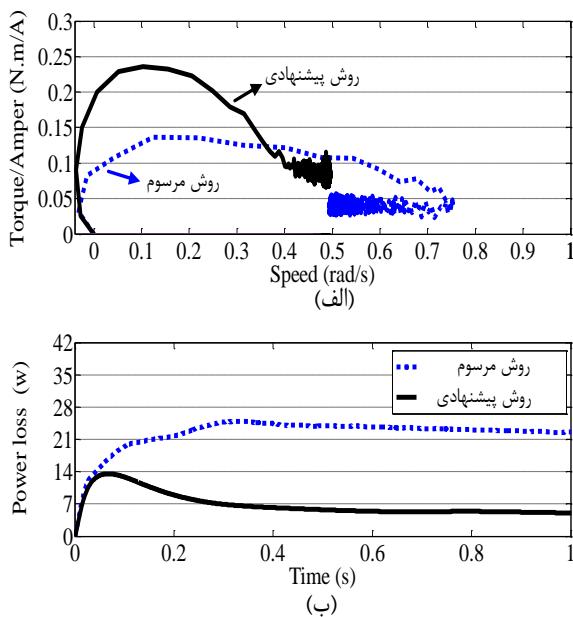
شکل (۱۲): نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی در پاسخ به فرمان سرعت 8 rad/s و گشتاور 2 N.m . (الف) پروفایل سرعت روتور، (ب) پروفایل گشتاور، (پ) خطای سرعت، (ت) مؤلفه‌های d و q شار روتور در سیم پیچ abc روی محورهای d^s - q^s و (ه) جریان فاز a سیم پیچ abc و جریان فاز اول (x) سیم پیچ xyz.



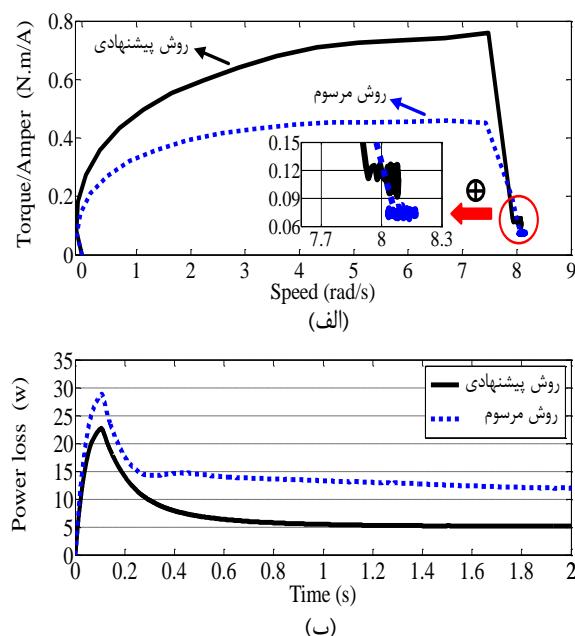
شکل (۱۵): نتایج شبیه‌سازی روش مرسوم در پاسخ به فرمان سرعت ۰/۰ و گشتاور ۲ N.m \wedge rad/s (الف) پروفایل سرعت روتور، ب) پروفایل گشتاور، پ) جریان فاز a سیم پیچ abc و جریان فاز اول (x) سیم پیچ xyz



شکل (۱۴): نتایج شبیه‌سازی روش مرسوم در پاسخ به فرمان سرعت ۸ rad/s \wedge ۰/۰ و گشتاور ۲ N.m (الف) پروفایل سرعت روتور، ب) پروفایل گشتاور، پ) جریان فاز a سیم پیچ abc و جریان فاز اول (x) سیم پیچ xyz



شکل (۱۷): نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی و مرسوم در پاسخ به فرمان سرعت ۰/۰ و گشتاور ۲ N.m \wedge rad/s (الف) نسبت گشتاور بر آمپر و ب) مجموع کل تلفات توان (هدایتی و کلیدزنی) در واحدهای اینورتر.



شکل (۱۶): نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی و مرسوم در پاسخ به فرمان سرعت ۸ rad/s \wedge ۰/۰ و گشتاور ۲ N.m (الف) نسبت گشتاور بر آمپر و ب) مجموع کل تلفات توان (هدایتی و کلیدزنی) در واحدهای اینورتر.

جدول (۲): مقایسه‌ی عددی دو روش پیشنهادی و مرسوم از نظر کاهش مجموع کل تلفات توان کلیدزنی و هدایتی اینورترها و افزایش نسبت گشتاور بر آمپر برای سرعت‌های پایین به ازای گشتاور ۵ N.m.

	۸	۴	۰/۵	۰	(rad/s)
مجموع کل تلفات توان کلیدزنی و هدایتی اینورترها (وات)	۵/۱۸	۵/۲۷	۵/۳۹	۵/۴۲	روش پیشنهادی
	۱۱/۹۹	۱۷/۳۹	۲۳/۸۸	۲۴/۷۷	روش مرسوم
درصد کاهش تلفات توان روش پیشنهادی، نسبت به روش مرسوم	۵۶/۸۰	۶۹/۷۰	۷۷/۴۲	۷۸/۱۲	
	۵۴/۱۲	۷۴/۶۱	۹۸/۶۷	۱۱۲/۷۹	درصد افزایش نسبت گشتاور بر آمپر روش پیشنهادی، نسبت به روش مرسوم

در مدل عملکردی استاندارد این موتور دو میدان گردان حاصل از سیم‌پیچ‌های استاتور، بصورت همزمان گردش می‌کنند. اما برای سرعت‌های پایین در روش مرسوم کنترلی درایو آن، با تحریک ثابت یکی از سیم‌پیچ‌ها، عملًاً این دو میدان بصورت غیر همزمان گردش می‌کنند و موتور از حالت مددکاری استاندارش خارج می‌شود. با بکارگیری ایده‌ی جبران شار روتور در سیستم کنترلی پیشنهادی درایو DSWIM، مشکل تخمین شار در سرعت‌های پایین برطرف شد و موتور در سرعت‌های پایین در مدل استاندارش کار کرد. روش پیشنهادی از نسبت گشتاور بر آمپر بهتری نسبت به روش مرسوم برخوردار بود و نیز کاهش تلفات توان واحدهای اینورتر درایو آن نیز، نسبت به روش کنترلی مرسوم حاصل شد. نتایج شبیه‌سازی مؤید بهبود عملکرد درایو پیشنهادی DSWIM در محدوده‌ی سرعت‌های پایین بودند.

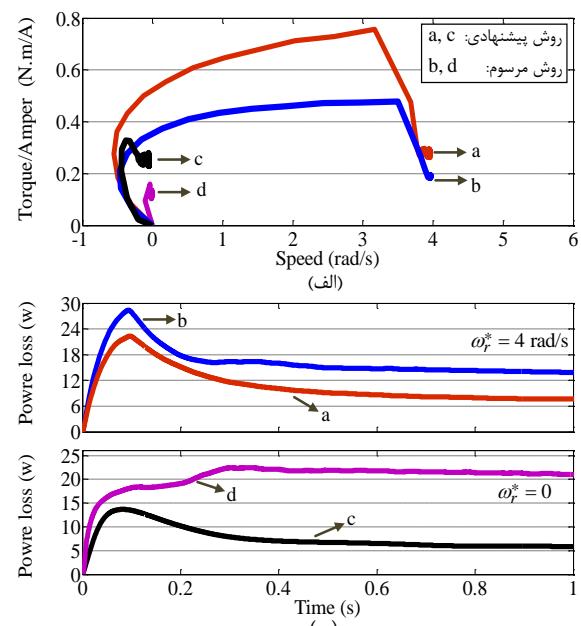
مراجع

- [1] G. K. Singh, "Multi-Phase Induction Machine Drive Research—A Survey", Electric Power Systems Research, vol. 61, no. 2, pp. 139–147, Mar. 2002.
- [2] نجابت خواه، فرزام، حسینی، سید حسین و دانیالی، سعید، "بهسازی مصرف انرژی الکتریکی: چالش‌ها و راهکارها"، مجله کیفیت و بهره‌وری در صنعت برق ایران، صفحه‌ی ۴۵-۳۸، سال ۱، شماره ۱، ۱۳۹۱.
- [3] E. Abdi, M. R. Tatlow, R. A. McMahon, and P. J. Tavner, "Design and Performance Analysis of a 6 MW Medium-Speed Brushless DFIG", in 2nd IET Renewable Power Generation Conference, pp. 1-4, Sep. 2013.
- [4] P. C. Roberts, "A Study of Brushless Doubly-Fed (Induction) Machines", PhD dissertation, University of Cambridge, 2005.
- [5] A. R. Muñoz and T. A. Lipo, "Dual Stator Winding Induction Machine Drive", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 36, no. 5, pp. 1369–1379, Sep./Oct. 2000.
- [6] J. M. Guerrero and O. Ojo, "Total Airgap Flux Minimization in Dual Stator Winding Induction Machines", IEEE Trans. Power Electron., vol. 24, no. 3, pp. 787-795, Mar. 2009.
- [7] R. Ueda, T. Sonoda, M. Ichikawa, and K. Koga, "Stability Analysis in Induction Motor Driven by V/f Controlled General Purpose Inverter", IEEE Transactions on

شکل‌های (۱۸-الف) و (۱۸-ب) به ترتیب بهبود نسبت گشتاور بر آمپر و مجموع کل تلفات توان در واحدهای اینورتر درایو DSWIM را به ازای فرمان‌های سرعت صفر با گشتاور ۳ N.m و سرعت ۴ rad/s با گشتاور ۵ N.m نشان می‌دهند. مجموع قدر مطلق گشتاور تولیدی هر یک از سیم‌پیچ‌های استاتور در روش پیشنهادی کمتر از روش مرسوم است. لذا برتری‌های بهبود نسبت گشتاور بر آمپر و کاهش تلفات توان کل در واحدهای اینورتر برای روش پیشنهادی نسبت به روش مرسوم، دور از انتظار نبود. در روش مرسوم از قابلیت ظرفیت آزاد سخت افزاری موتور و سیستم بخش قدرت درایو (اینورترها) بهره گرفته شده است، که قاعده‌تاً تلفات را به همراه خواهد داشت. از جهت مقایسه‌ی عددی بین دو روش پیشنهادی و روش مرسوم موجود برای سیستم کنترلی درایو DSWIM، جدول (۲) ارائه شده است. در این جدول بهبود روش پیشنهادی نسبت به روش مرسوم از نظر کاهش مجموع تلفات توان کلیدزنی و هدایتی اینورترها و افزایش نسبت گشتاور بر آمپر برای سرعت‌های پایین به ازای گشتاور ثابت ۲ N.m نشان داده شده است. در روش پیشنهادی برای سرعت‌های پایین و صفر، کاهش تلفات قابل ملاحظه‌ای حاصل شده است.

۷- نتیجه‌گیری

هدف این مقاله، ارائه‌ی روشهای مبتنی بر جبران شار روتور جهت کاهش تلفات توان واحد اینورتر در درایو موتور القایی قفس سنجابی با تحریک دوگانه و با تعداد قطب نایاب (DSWIM)، در سرعت‌های پایین است.



شکل (۱۸): نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی و مرسوم در پاسخ به فرمان سرعت صفر با گشتاور ۳ N.m و سرعت ۴ rad/s با گشتاور ۵ N.m (الف) نسبت گشتاور بر آمپر و (ب) مجموع کل تلفات توان هدایتی و کلیدزنی در واحدهای اینورتر.

- Drive*", IEEE Transactions On Industrial Applications, vol. 38, no. 1, pp. 41-47, Feb. 1991.
- [21] H. M. Kojabadi, L. Chang, and R. Doraiswami, "A MRAS-Based Adaptive Pseudoreduced-Order Flux Observer for Sensorless Induction Motor Drives," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, no. 4, pp. 930-176, Jul. 2005.
- [22] A. Dey, B. Singh, B. Dwivedi, and D. Chandra, "Vector Control of Three-Phase Induction Motor Using Artificial Intelligent Technique", ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 4, no. 4, pp. 57-67, Jun. 2009.
- [23] O. Ojo and Z. Wu, "Modeling of a Dual-Stator-Winding Induction Machine Including the Effect of Main Flux Linkage Magnetic Saturation", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, no. 4, pp. 1099-1107, Jul./Aug. 2008.
- [24] B. K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2002.
- [25] J. Hu and B. Wu, "New Integration Algorithms for Estimating Motor Flux over a Wide Speed Range", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 13, no. 5, pp. 969-976, Sep. 1998.
- [۲۶] شادنام زریل. محمد، بابائی. ابراهیم، شوکتی اصل. الیاس، صباغی. مهران، "ارائه یک ساختار جدید برای اینورتر شبه منبع امپدانسی مبتنی بر سلف‌های کلیدزنی شده و ترانسفورماتور"، مجله کیفیت و بهره‌وری در صنعت برق ایران، صفحه ۷۳-۶۴، سال ۸، شماره ۴، پائیز و زمستان ۱۳۹۴.
- [27] D. W. Novotny and T. A. Lipo, "Vector Control and Dynamics of AC Drives", Oxford University Press, 1997.
- [28] Z. Zhou, M. S. Khanniche, P. Igic, S. M. Towers, and P. A. Mawby, "Power Loss Calculation and Thermal Modelling for a Three Phase Inverter Drive System", Journal Electrical Systems, vol. 1, no. 4, pp. 33-46, 2005.
- [29] J. Pou, D. Osorno, J. Zaragoza, S. Ceballos, and C. Jaen, "Power Losses Calculation Methodology to Evaluate Inverter Efficiency in Electrical Vehicles", 7th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics (CPE), pp. 404-408, June 2011.
- [۱۴] موبیدی راد. حجت، شمسی نژاد. محمدعلی و فرشاد. محسن، "ارائه شیوه‌ای جدید برای کنترل عصبی سرعت موتور القایی: مقاوم در قبال تغییرات مقاومت‌های استاتور و روتور و مناسب برای هر دو محدوده سرعت‌های خیلی کم و زیاد"، مجله مهندسی برق و کامپیوتر ایران، صفحه ۱۱۳-۱۰۷، سال ۹، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۰.
- [۱۵] موبیدی راد. حجت، فرشاد. محسن و شمسی نژاد. محمدعلی، "پهلوی پروفایل سرعت در درایو کنترل سرعت موتور القایی با استفاده از ایده‌ای جدید در تولید پالس‌های کلیدزنی مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی"، مجله سیستم‌های هوشمند در مهندسی برق، دانشگاه اصفهان، صفحه ۴۶-۳۵، سال ۲، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۰.
- [۱۶] موبیدی راد. حجت، شمسی نژاد. محمدعلی و فرشاد. محسن، "پهلوی علیک درایو کنترل سرعت موتور القایی در محدوده سرعت‌های پایین و بالا با جبران ساز شار روتور"، مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، صفحه ۶۴-۵۹، سال ۹، شماره ۲، پائیز و زمستان ۱۳۹۱.
- [17] D. G. Holmes, B. P. McGrath, and S. G. Parker, "Current Regulation Strategies for Vector-Controlled Induction Motor Drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 10, pp. 3680-3689, Oct. 2012.
- [18] B. M. Joshi, M. C. Chandorkar, "Vector Control of Two-motor Single-inverter Induction Machine Drives", Electric Power Components and Systems, vol. 42, no. 11, pp. 1158-1171, May 2014.
- [19] R. D. Lorenz and D. B. Lawson, "A Simplified Approach to Continuous On-Line Tuning of Field Oriented Induction Motor Drives", IEEE Transactions On Industrial Applications, vol. 26, no. 3, pp. 420-424, May/Jun. 1990.
- [20] M. P. Kazmierkowski, "A Novel Vector Control Scheme for Transistor PWM Inverter-Fed Induction Motor

پیوست

الف- مشخصات DSWIM

جدول (۱): مشخصات DSWIM

۲ / ۶	نسبت قطبها	۲ hp	توان نامی
۱/۹ Ω	R_{s2}	۲/۴ Ω	R_{s1}
۰.۰۰۹ H	L_{ls2}	۰.۰۰۶ H	L_{ls1}
۰.۵۵ Ω	R_{r2}	۰.۶۱ Ω	R_{r1}
۰.۰۰۹ H	L_{lr2}	۰.۰۰۶ H	L_{lr1}
۰.۰۹۳ H	L_{m2}	۰.۳۳۶ H	L_{m1}
۰/۶	K_2	۰.۲۲۳	K
-	-	۶۰ Hz	f_n

زیرنویس‌ها

^۱ Slip rings

^۲ Nested loop rotor

^۳ Brushless doubly fed machine (BDFM)

^۴ Dual stator winding induction motor (DSWIM)

^۵ Common reference frame

-
- ⁶ Insulated-gate bipolar transistor (IGBT)
 - ⁷ Forward saturation voltage
 - ⁸ Diode recovery energy (E_{rr})
 - ⁹ Datasheet