

ICEMG 2020-XXXXXX

ارائه روشی جدید به منظور کاهش همزمان خطای شار و گشتاور در روش کنترل مستقیم گشتاور برای موتورهای القایی

محمد رضا نیکزاد

استادیار، دانشگاه لرستان، خرم آباد، Nikzad@ut.ac.ir

چکیده

امروزه روش کنترل مستقیم گشتاور به عنوان یکی از روش‌های بالغ و کارآمد جهت کنترل موتورهای الکتریکی شناخته می‌شود. ولی در این روش بدلیل اعمال فقط یک بردار ولتاژ در طی دوره کنترلی، خطای شار استاتور و گشتاور و در نتیجه ریپل شار و گشتاور بیش از روش‌های رایج دیگر نظیر روش کنترل برداری است. یک راهکار مناسب جهت کاهش خطای شار استاتور و گشتاور در روش کنترل مستقیم گشتاور، تنظیم مدت زمان اعمال بردار فعال یا به عبارتی کنترل سیکل وظیفه آن در طی یک دوره کنترلی و تزریق بردار ولتاژ صفر به همراه آن است. روش‌های مختلفی به منظور تعیین مناسب سیکل وظیفه بردار فعال ارائه شده است، ولی در همه آنها معیار تعیین سیکل وظیفه فقط کاهش خطای گشتاور است. در این مقاله روش جدیدی برای کنترل مستقیم گشتاور موتور القایی ارائه شده است که در آن سیکل وظیفه مناسب بردار فعال به نحوی تعیین می‌شود که علاوه بر کاهش خطای گشتاور بتوان شار استاتور را نیز کنترل کرد. همچنین از مزایای روش پیشنهادی می‌توان به فرکانس کلیدزنی ثابت اشاره کرد که خود از برتری‌های این روش نسبت به روش کنترل مستقیم گشتاور مرسوم محسوب است. در انتها روش پیشنهادی در دو حالت پایدار و گذار مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد و با دو روش مرسوم کنترل گشتاور مستقیم و کنترل سیکل وظیفه مقایسه می‌شود.

واژه‌های کلیدی

موتور القایی، کنترل محرکه‌های الکتریکی، کنترل مستقیم گشتاور، کنترل سیکل وظیفه.

مقدمه

کنترل دقیق و نرم و سریع از اهداف کلیدی سیستم کنترل محرکه موتورهای الکتریکی و بطور خاص در اینجا موتورهای القایی محسوب می‌شود. بدین منظور در دهه ۱۹۷۰ میلادی روش کنترل برداری تطبیق میدان مطرح شد [۱]. پس از آن نیز در اواسط دهه ۱۹۸۰

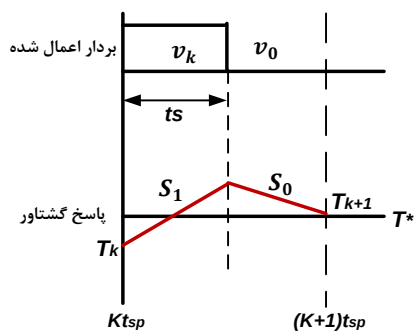
میلادی روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC^1) توسط آقایان تاکاهاشی و ناگوچی مطرح شد [۲] و توانست مورد توجه قرار گیرد. در روش DTC دو مولفه شار استاتور و گشتاور الکتریکی موتور توسط دو کنترلر هیستریزس بطور مستقل کنترل می‌شوند. در این روش از یک جدول کلیدزنی استفاده می‌شود تا بتوان از طریق آن از بین هشت بردار قابل ایجاد توسط اینورتر دو سطحی (شش بردار فعال و دو بردار صفر) بهترین بردار را به منظور کاهش خطای شار استاتور و گشتاور انتخاب کرد.

در مقایسه با روش کنترل برداری، روش کنترل مستقیم گشتاور دارای ساختاری ساده تر، پاسخ گشتاور سریعتر و همچنین وابستگی کمتر به پارامترهای موتور است. اما روش DTC مرسوم دارای معایبی نیز می‌باشد که می‌توان به مواردی نظیر فرکانس کلیدزنی متغیر بدلیل وجود کنترلرهای هیستریزس، ریپل بالای گشتاور و شار به دلیل محدود بودن تعداد بردارهای ولتاژ اینورتر و همچنین نیاز به نرخ بالای نمونه برداری بدلیل دیجیتال بودن سیستم کنترلی اشاره کرد [۳]. طی بیش از سه دهه گذشته راهکارهای مختلفی جهت رفع معایب روش DTC ارائه شده است.

یک روش کارآمد جهت کاهش ریپل گشتاور در روش DTC ، روش کنترل سیکل وظیفه (DCC^2) است [۴]. در روش DTC مرسوم بردار منتخب توسط جدول کلیدزنی در تمام سیکل کنترلی از طریق اینورتر به موتور اعمال می‌شود. به همین دلیل کنترل دقیقی بر روی شار و گشتاور موتور نخواهد بود. در روش DCC به منظور رفع این مشکل، پس از انتخاب بردار فعال مناسب از طریق جدول کلید زنی مشابه روش DTC ، مقداری بردار ولتاژ صفر به همراه بردار فعال انتخاب شده به منظور کنترل دقیق تر گشتاور اعمال می‌شود. با استفاده روش های فوق، برخلاف روش DTC معمولی، فقط بردار فعال انتخاب شده در کل دوره کلیدزنی به موتور اعمال نمی‌شود، بلکه بخشی از آن به همراه بردار صفر به منظور کاهش ریپل گشتاور اعمال می‌شود.

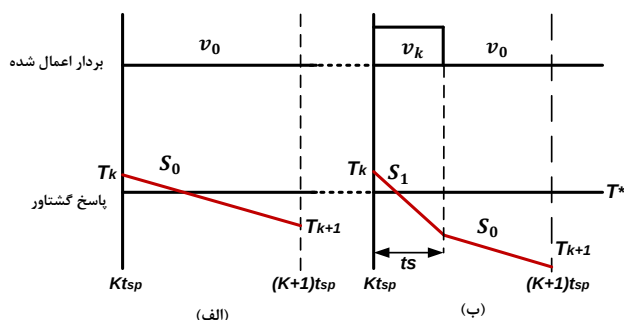
¹ Direct torque control

² Duty cycle control



شکل ۱: تغییرات گشتاور به ازای اعمال بردار فعال به همراه بردار صفر در یک سیکل کنترل

در روش‌های پیشین کنترل سیکل وظیفه بر پایه جدول کلیدزنی انجام می‌گرفت. ولی انتخاب مستقیم بردار فعال مناسب از طریق جدول کلیدزنی همواره صحیح نخواهد بود. به عنوان مثال در شکل ۲ فرض شود در لحظه k گشتاور الکتریکی محاسبه شده T_k بیشتر از مقدار مرجع T^* بوده و سیستم کنترلی در حالت پایدار است. در این صورت می‌توان گفت که پاسخ گشتاور به حالت پایدار رسیده و خطای گشتاور در سیکل‌های قبلی کاهش یافته است. در این وضعیت همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، اگر گشتاور محاسبه شده بیشتر از گشتاور مرجع باشد، با اعمال بردار صفر می‌توان خطای گشتاور را جبران کرد. این در حالی است که به منظور کاهش خطای گشتاور، طبق جدول کلیدزنی، بردار فعالی انتخاب می‌شود که بتواند گشتاور را کاهش دهد. بنابراین به خاطر اینکه خطای گشتاور با اعمال بردار صفر در انتهای دوره کنترلی کمتر از خطای گشتاور با اعمال ترکیبی از بردار فعال و بردار صفر است، کنترلر (جدای از الگوریتم محاسبه سیکل وظیفه) بطور قطع بردار صفر (یا همان بردار فعال با سیکل وظیفه صفر) را به عنوان بردار بهینه انتخاب و از طریق اینورتر به موتور اعمال می‌کند. بنابراین در اینجا انتخاب بردار فعال نتوانست کمکی به کاهش ریبیل گشتاور کند. همانطور که در رابطه (۲) مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت شیب گشتاور ناشی از بردار صفر نیز افزایش می‌یابد. بنابراین خطا و در نتیجه ریبیل گشتاور بیشتر می‌شود. این مشکل، مشکل اساسی تمامی روش‌های قبلی بر پایه تنظیم سیکل وظیفه است که طی دو دهه اخیر ارائه شده‌اند.



شکل ۲: تغییرات گشتاور به ازای اعمال: الف) بردار صفر و ب) بردار فعال در یک سیکل کنترل

روش DCC علیرغم کاهش ریبیل گشتاور نسبت به روش DTC معمولی، دارای دو ایراد اصلی است. اولین ایراد روش DCC آن است که در آن بردار فعال همانند روش DTC بطور مستقیم از طریق جدول کلیدزنی انتخاب می‌شود. این درحالی است که همانطور که در [۵] بیان شده است و در ادامه نیز توضیح داده خواهد شد، با این روش در برخی نقاط کاری بردار مناسب انتخاب نخواهد شد. دوم آنکه در روش‌های DCC پیشین، همواره میزان سیکل وظیفه بردار فعالی به نحوی انتخاب می‌شود که خطای گشتاور کاهش یابد. بنابراین هیچ کنترل دقیقی بر روی میزان خطای شار استاتور وجود ندارد. این مورد باعث می‌شود که نتوان ریبیل شار استاتور را در این روش کنترل کرد. در این مقاله هدف بر آن است تا راهکاری جامع به منظور انتخاب مناسب مدت زمان اعمال بردار فعال با هدف کاهش همزمان خطای شار استاتور و گشتاور در روش DCC ارائه شود.

معرفی روش DCC

همانطور که در بالا اشاره شد، در روش DCC با تزریق بردار صفر همراه بردار فعال، دامنه بردار اعمالی به منظور کاهش خطای گشتاور کنترل می‌شود. به عنوان مثال همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، فرض شود در لحظه k گشتاور الکتریکی محاسبه شده T_k کمتر از مقدار مرجع T^* باشد. در اینصورت همانند روش DTC بردار فعال مناسب v_k از طریق جدول کلیدزنی انتخاب شده و به موتور اعمال می‌شود تا گشتاور را افزایش دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود در اینجا برخلاف روش DTC بردار فعال در کل دوره کنترلی اعمال نمی‌شود تا خطای گشتاور زیاد شود. در این روش به منظور به حداقل رساندن خطای گشتاور، بردار فعال فقط در بازه زمانی محدود t_s اعمال شده و در باقی زمان دوره کنترلی بردار ولتاژ صفر اعمال می‌شود تا خطای گشتاور در انتهای دوره کنترلی (لحظه $k+1$) به حداقل برسد.

در شکل ۱، S_0 و S_1 به ترتیب شیب گشتاور ناشی از اعمال بردار فعال و بردار صفر می‌باشند که بصورت زیر محاسبه می‌شوند [۶]:

$$S_0 = 1.5 \left(\frac{P}{2} \right) \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \left[- \left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r} \right) \cdot \text{Im} \left(\bar{\psi}_r^* \cdot \bar{\psi}_s \right) - \omega \cdot \text{Re} \left(\bar{\psi}_r^* \cdot \bar{\psi}_s \right) \right] \quad (1)$$

$$S_1 = S_0 + 1.5 \left(\frac{P}{2} \right) \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \text{Im} \left(\bar{\psi}_r^* \cdot \bar{v}_k \right) \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲)، $\bar{v}_k$ بردار فعال اعمالی و $\bar{\psi}_r$ و $\bar{\psi}_s$ به ترتیب بردارهای شار روتور و شار استاتور می‌باشند. همچنین پارامترهای موتور می‌باشند: $L_s, L_r, L_m, R_s, R_r, J$.

با فرض کوچک بودن دوره کنترلی می‌توان تغییرات مؤلفه‌های روابط فوق را نادیده گرفت و در نتیجه شیب گشتاور ناشی از اعمال ولتاژ ورودی را ثابت فرض کرد. همانطور که در رابطه (۲) مشاهده می‌شود، شیب ناشی از اعمال بردار صفر همواره منفی است ولی مثبت یا منفی بودن شیب ناشی از بردار فعال به بردار ولتاژ اعمالی بستگی خواهد داشت.

با انتخاب بردار ولتاژ فعال مناسب و همچنین تعیین دقیق مدت زمان اعمال آن می‌توان خطای گشتاور را در روش DCC کاهش داد. ولی موضوع قابل اهمیت این است که هنوز کنترلی بر روی اندازه شار استاتور وجود ندارد. در این مقاله سعی شده روشی ارائه شود تا بتوان بطور علاوه بر کاهش خطای گشتاور، شار استاتور را نیز کنترل کرد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

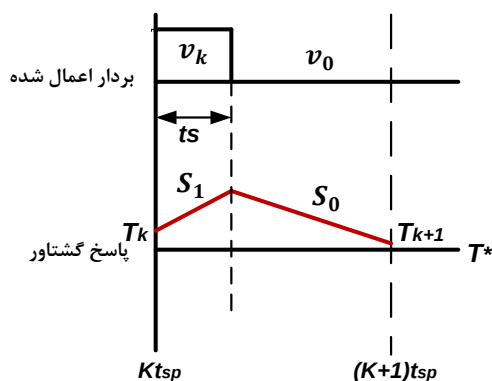
روش پیشنهادی

بلوک دیاگرام کلی روش پیشنهادی در شکل ۴ نشان داده شده است. در این روش ابتدا با استفاده از خطای اولیه شار استاتور و گشتاور، همانند روش ارائه در [۴] که در قسمت قبل بیان شد، بردار فعال مناسب انتخاب می‌شود. سپس مقدار بهینه سیکل وظیفه بردار فعال به منظور حداقل رساندن خطای گشتاور تعیین می‌شود. همچنین حداکثر سیکل وظیفه به منظور نگه داشتن اندازه شار استاتور در محدوده مطلوب تعیین می‌شود. اگر مقدار بهینه سیکل وظیفه کمتر از مقدار حداکثر محاسبه شده باشد، همان مقدار به عنوان مقدار نهایی انتخاب و از طریق اینورتر به موتور اعمال می‌شود. حال اگر مقدار بهینه محاسبه شده بیش از مقدار حداکثر سیکل وظیفه باشد، به منظور نگه داشتن شار استاتور در محدوده مطلوب، مقدار حداکثر به عنوان مقدار نهایی سیکل وظیفه انتخاب و بردار فعال انتخابی بر آن اساس به موتور اعمال می‌شود.

در ادامه به بررسی نحوه محاسبه سیکل وظیفه بر اساس کاهش خطای شار استاتور و گشتاور پرداخته می‌شود.

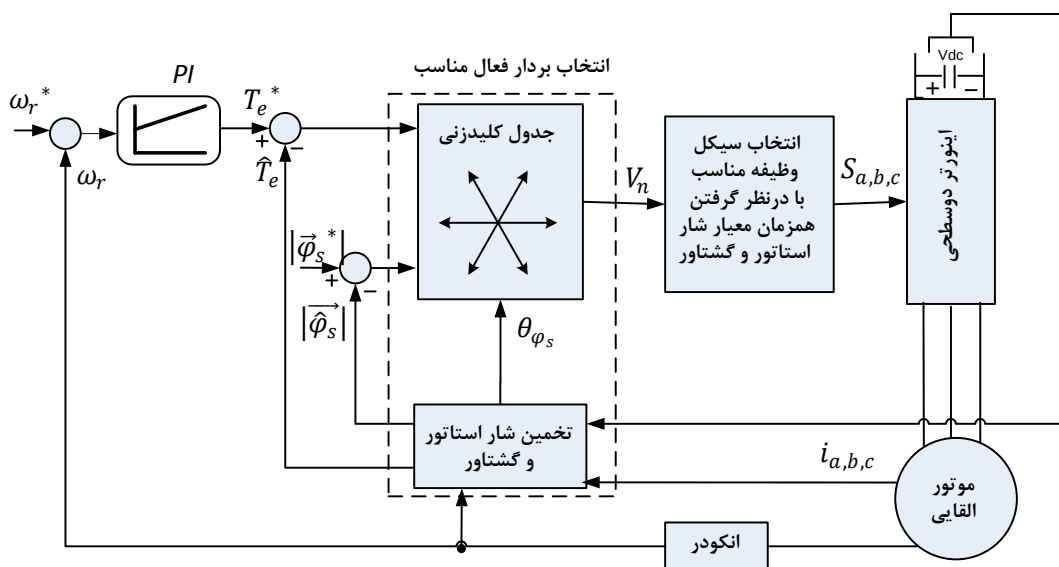
محاسبه سیکل وظیفه با هدف کاهش خطای گشتاور

روش‌های مختلفی جهت محاسبه مدت زمان مناسب اعمال بردار فعال و یا به عبارتی دیگر محاسبه سیکل وظیفه آن به منظور کاهش خطای گشتاور ارائه شده است. از بین این روش‌ها می‌توان به روش حداقل مقدار مؤثر رپل گشتاور در [۶ و ۷]، تنظیم مقدار متوسط گشتاور در

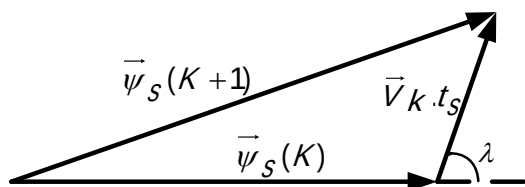


شکل ۳: انتخاب بردار مناسب جهت کاهش خطای گشتاور در روش پیشنهاد شده در [۴]

برای رفع این مشکل در [۴] روشی ارائه شده است تا بتوان بردار فعال را بطور دقیق انتخاب کرد. طبق روش پیشنهاد شده، با استفاده از معادلات درونی ماشین، در ابتدای دوره کنترلی تاثیر اعمال بردار صفر بر گشتاور پیش‌بینی می‌شود. اگر گشتاور پیش‌بینی شده در انتهای پریود کلید زنی باز هم کمتر از گشتاور مرجع باشد، در این حالت همانند سابق بردار ولتاژ فعالی انتخاب می‌شود که گشتاور را کاهش دهد. حال اگر گشتاور پیش‌بینی شده انتهای دوره کنترلی کمتر از گشتاور مرجع باشد (همانند شکل ۳) در این حالت برداری انتخاب می‌شود که گشتاور را افزایش داده تا همزمان هم خطای گشتاور و هم خطای ناشی از اعمال بردار صفر را جبران کند. این موضوع به خوبی در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود در اینجا علیرغم اینکه در لحظه k گشتاور T_k بیشتر از مقدار مرجع T^* است، ولی بدلیل پایین بودن خطای اولیه گشتاور برداری اعمال می‌شود که همزمان خطای گشتاور و تاثیر اعمال بردار صفر را کاهش دهد.



شکل ۴: بلوک دیاگرام روش کنترلی پیشنهادی



شکل ۵: تاثیر اعمال بردار فعال بر روی شار استاتور

فعال به منظور کاهش شار استاتور اعمال می شود برابر محدوده پایینی شار خواهد بود.

در نتیجه برای تعیین مقدار نهایی طول زمان t_s اگر مقدار محاسبه شده $t_{s(opt)}$ از رابطه (۴) کمتر از مقدار حداکثر مدت زمان $t_{s(max)}$ (محاسبه شده از رابطه (۶)) باشد، زمان t_s را برابر $t_{s(opt)}$ در نظر گرفته می شود. در این حالت همزمان با حداقل کردن گشتاور، شار نیز درون محدوده مطلوب کنترل می شود. حال اگر $t_{s(opt)} > t_{s(max)}$ باشد، مدت زمان اعمال بردار فعال برابر $t_{s(max)}$ در نظر گرفته می شود تا شار را بتوان درون محدوده کنترلی نگه داشت. در این وضعیت علاوه بر کاهش خطای گشتاور، شار نیز در محدوده کنترلی نگه داشته می شود.

نتایج شبیه سازی

در این قسمت روش ارائه شده شبیه سازی شده و عملکرد آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین این روش با روش های مرسوم DCC و DTC مقایسه می شود. شبیه سازی ها در محیط نرم افزار MATLAB انجام پذیرفته است. پارامترهای موتور مورد استفاده در شبیه سازی ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

شبیه سازی ها برای دو وضعیت گذرا و پایدار عملکرد موتور انجام گرفته است. در شبیه سازی ها فرکانس نمونه برداری برای روش DTC برابر ۵۰ میکرو ثانیه و برای دو روش DCC مرسوم و روش پیشنهادی برابر ۱۰۰ میکرو ثانیه انتخاب شده است.

در شکل ۶ نتایج شبیه سازی در حالت پایدار نشان داده شده است. در اینجا عملکرد روش پیشنهادی در سرعت ۱۵۰۰ rpm و بار ۲ N.m با دو روش دیگر مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می شود در اینجا ریزل شار و گشتاور روش پیشنهادی و همچنین THD جریان روش پیشنهادی کمتر از دو روش دیگر است.

جدول ۱: پارامترهای موتور القایی مورد استفاده

DC-bus voltage	520 V
Rated torque	2 Nm
Rated speed	2850 rpm
Rated power	0.75 kW
Number of pole pairs	1
Stator resistance	8.6 Ω
Rotor resistance	6 Ω
Mutual inductance	0.380 H
Stator inductance	0.395 H
Rotor inductance	0.395 H
Flux amplitude reference	0.9 Wb

[۸] و همچنین حداقل خطای گشتاور در [۹] اشاره کرد.

یکی از متداول ترین روش ها، روش حداقل خطای گشتاور است و همانطور که در [۶] اشاره شده است، با محاسبه سیکل وظیفه مناسب از روش حداقل خطا و اعمال متقارن ولتاژ خروجی، حداقل ریزل گشتاور خروجی نیز حاصل می گردد. در شکل ۱ داریم:

$$T_{k+1} = \hat{T}_k + S_1 t_s + S_0 (t_{sp} - t_s) \quad (3)$$

که در آن t_{sp} برابر دوره کنترلی است. بنابراین به منظور کمینه کردن خطای گشتاور می توان طول مدت زمان اعمال بردار فعال را بصورت زیر محاسبه نمود:

$$T_{k+1} = T^* \Rightarrow t_{s(opt)} = \frac{T^* - \hat{T}_k - S_0 t_{sp}}{S_1 - S_0} \quad (4)$$

با استفاده از روش کنترل سیکل وظیفه و اعمال بردار صفر به همراه بردار فعال می توان خطا و همچنین ریزل گشتاور را کاهش داد.

محاسبه سیکل وظیفه با هدف کنترل خطای شار استاتور

در روش DCC، زمانی که در یک سیکل کنترلی بردار صفر به موتور اعمال می شود، اثر آن ناچیز و می تواند نادیده گرفته شود [۶]. بنابراین به منظور محاسبه شار در انتهای سیکل کنترلی می توان فقط تاثیر بردار فعال را در نظر گرفت. شکل ۵ تاثیر اعمال بردار فعال $\vec{V}_k$ در مدت زمان t_s بر روی شار استاتور را نشان می دهد. طبق شکل ۵ دامنه شار استاتور در انتهای دوره کنترلی برابر خواهد بود با:

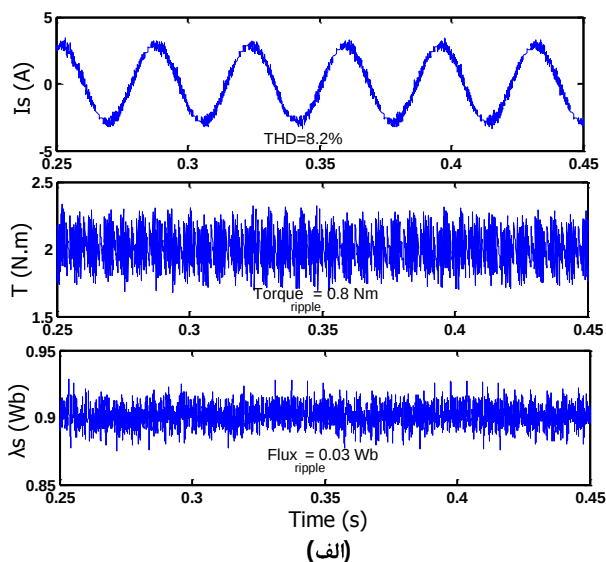
$$\begin{aligned} |\vec{\psi}_s(k+1)|^2 &= |\vec{\psi}_s(k)|^2 + (\|\vec{V}_k\| t_s)^2 \\ &\quad + 2|\vec{\psi}_s(k)| \|\vec{V}_k\| t_s \cos \lambda \end{aligned} \quad (5)$$

که در اینجا $\vec{\psi}_s(k)$ و $\vec{\psi}_s(k+1)$ به ترتیب برابر شار استاتور در لحظه آغاز و انتهای دوره کنترلی می باشند. همچنین λ زاویه بین بردار ولتاژ اعمالی $\vec{V}_k$ و شار استاتور $\vec{\psi}_s(k)$ است.

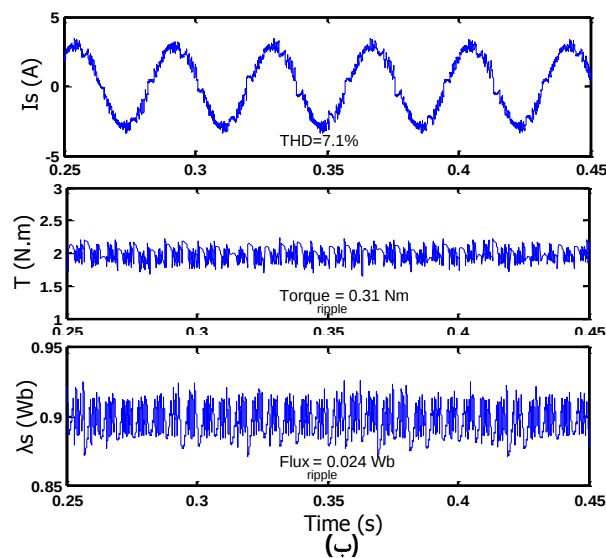
همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود، مقدار دامنه شار استاتور در انتهای دوره کنترلی $(\vec{\psi}_s(k+1))$ می تواند توسط دوره زمانی t_s کنترل شود. بنابراین به منظور نگه داشتن شار در یک محدوده کنترلی زمان t_s می تواند تا مقداری اضافه شود که شار استاتور به مرز حداقل و یا حداکثر محدوده کنترلی (بسته به نوع بردار فعال انتخابی) برسد. بنابراین در یک دوره کنترلی مقدار حداقل و حداکثر سیکل وظیفه توسط محدوده کنترلی بالا و پایین شار استاتور تعیین خواهد شد. بدین منظور با استفاده از رابطه (۵) می توان مدت زمان t_s که در آن شار استاتور به محدوده کنترلی خود می رسد را بصورت زیر محاسبه کرد:

$$\begin{aligned} \vec{\psi}_s(k+1) &= \left| \vec{\psi}_s^* \right| \Rightarrow \\ t_{s(max)} &= \frac{-\left| \vec{\psi}_s(k) \right| \cos \lambda + \sqrt{\left| \vec{\psi}_s^* \right|^2 - \left| \vec{\psi}_s(k) \right|^2 \sin^2 \lambda}}{\|\vec{V}_k\|} \end{aligned} \quad (6)$$

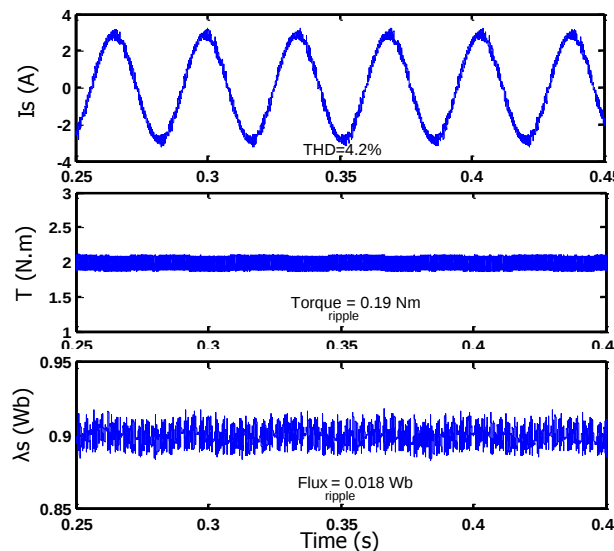
در اینجا $\vec{\psi}_s^*$ در مواقعی که بردار ولتاژ فعال به منظور افزایش شار اعمال می شود، برابر محدوده بالایی شار و در مواقعی که بردار ولتاژ



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶: نتایج شبیه‌سازی در سرعت ۱۵۰۰ rpm و بار ۲ N.m: (الف) روش DTC (ب) مرسوم و (ج) روش پیشنهادی

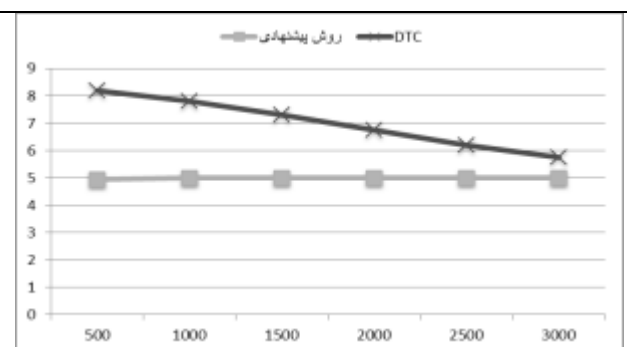
در شکل ۷ فرکانس کلیدزنی اینورتر در روش DTC و روش پیشنهادی به ازای سرعت مختلف و بار نامی ۲ N.m مقایسه شده است. در اینجا فرکانس کلیدزنی با در نظر گرفتن مجموع کموتاسیون تمام سویچ‌ها (هر شش سویچ) تقسیم بر تعداد آنها (۶ برابر) در بازه زمانی ۲ ms محاسبه شده است.

همانطور که انتظار می‌رفت فرکانس کلید زنی در روش DTC به ازای سرعت‌های مختلف متغیر است. ولی در روش پیشنهادی به ازای تمام سرعت‌ها تقریباً ثابت و برابر ۵ kHz است. این موضوع خود به تنهایی یک مزیت بزرگ برای روش پیشنهادی می‌باشد.

در شکل ۸ عملکرد دینامیک حالت گذرا روش پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. در اینجا هنگامی که موتور با سرعت ۱۵۰۰ rpm در حال چرخش است باری معادل ۲ N.m به آن متصل می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی همچون دو روش دیگر گشتاور مرجع را به سرعت دنبال می‌کند. ریبیل کم شار و گشتاور و THD پایین روش پیشنهادی بخوبی در شکل قابل رویت است.

نتیجه گیری

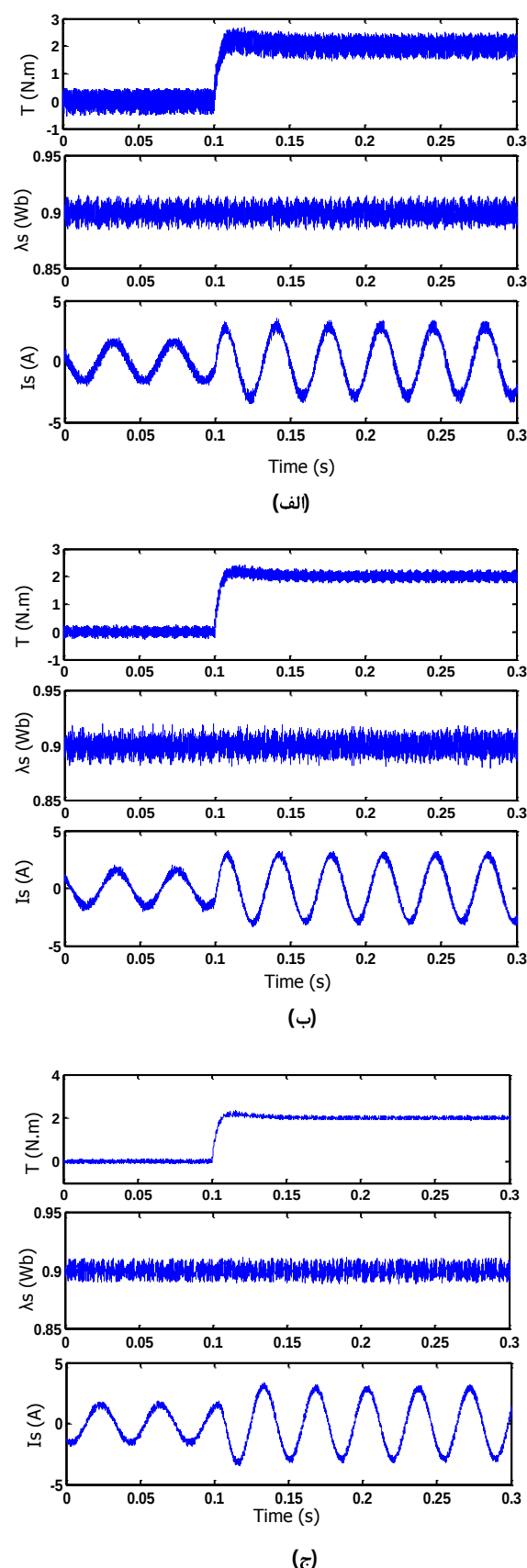
در این مقاله راهکاری جدید به منظور کاهش همزمان خطای شار و گشتاور در روش کنترل مستقیم گشتاور در سیستم محرکه موتور القایی ارائه شد. در روش پیشنهادی بجای اعمال یک بردار فعال در کل دوره کنترلی، بخشی از بردار فعال به همراه بردار ولتاژ صفر اعمال شد. سیکل وظیفه بردار ولتاژ فعال به نحوی تعیین شد که بتوان به‌طور همزمان شار استاتور و گشتاور الکتریکی موتور را کنترل کرد. در انتها روش پیشنهادی با روش‌های مرسوم DTC و DCC مقایسه شد و مشاهده شد این روش دارای ریبیل شار، ریبیل گشتاور و همچنین THD کمتر جریان نسبت به دو روش دیگر است. همچنین مشاهده شد که برخلاف روش DTC، روش پیشنهادی دارای فرکانس کلیدزنی ثابت در تمام سرعت‌ها است.



شکل ۷: مقایسه فرکانس کلیدزنی در سرعت‌های مختلف

مراجع و منابع

- [1] F. Blaschke, "The principle of field-orientation as applied to the transvector closed-loop control system for rotating-field machines," *Siemens Rev.*, vol. 34, p. 217–220, 1972.
- [2] I. Takahashi and T. Noguchi, "A new quick response and high efficiency control strategy for the induction motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 2, no. 1A-22, p. 820–827, Sep./Oct. 1986.
- [3] G. S. Buja and M. P. Kazmierkowski, "Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors-A survey," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 4, pp. 744–757, Aug. 2004.
- [4] M. R. Nikzad, B. Asaei, S. O. Ahmadi, "Discrete duty-cycle-control method for direct torque control of induction motor drives with model predictive solution," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 3, pp. 2317–2329, Mar. 2018.
- [5] J.-K. Kang and S.-K. Sul, "New direct torque control of induction motor for minimum torque ripple and constant switching frequency," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 35, no. 5, pp. 1076–1082, Sep./Oct. 1999.
- [6] K.-K. Shyu, J.-K. Lin, V.-T. Pham, M.-J. Yang, and T.-W. Wang, "Global minimum torque ripple design for direct torque control of induction motor drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 9, pp. 3148–3156, Sep. 2010.
- [7] K.-K. Shyu, J.-K. Lin, V.-T. Pham, M.-J. Yang, and T.-W. Wang, "Global minimum torque ripple design for direct torque control of induction motor drives," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 3148–3156, 2010.
- [8] E. Flach, R. Hoffmann, and P. Mutschler, "Direct mean torque control of an induction motor," in *European Conference on Power Electronics and Applications*, 1997, pp. 3.672–3.677.
- [9] Y. Zhang and J. Zhu, "Direct torque control of permanent magnet synchronous motor with reduced torque ripple and commutation frequency," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 235–248, 2011.



شکل ۸: نتایج شبیه‌سازی در حالت گذرا در سرعت ۱۵۰۰ rpm و اعمال بار پله ۲ N.m: (الف) روش DTC (ب) DCC مرسوم و (ج) روش پیشنهادی