

کنترل سرعت موتور القایی با استفاده از روش کنترل پیش‌بین گشتاور

افشین گلدانی^۱، علی رضانی ورکانی^۲

۱- کارشناس ارشد الکترونیک، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)

۲- عضو هیئت علمی دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)

Afshin_Goldani@yahoo.com

چکیده: مدل کنترل پیش‌بین با تکیه بر مدل پویای روندها، اغلب مدل‌های خطی هستند که توسط شناسایی سیستم به دست می‌آیند. استفاده از مدل کنترل پیش‌بین گشتاور واقعی است که اجازه می‌دهد تا بازه زمانی جاری با نگر داشتن زمان‌های آینده در محاسبه، بهینه‌سازی شود. در این مقاله عملکرد گذرای روش کنترل پیش‌بین گشتاور بر اساس کنترل پسماند غیرخطی، در برابر روش کنترل مستقیم گشتاور ارائه شده است. سپس مقایسه‌ای از نظر اعوجاج گشتاور و شار برای روش کنترل پیش‌بین گشتاور و روش کنترل مستقیم گشتاور درایو سه‌فاز موتور القایی ارائه شده است. در کنترل پیش‌بین، اهداف کنترلی به عنوان یک تابع هزینه تعریف شده است که برای داشتن انعطاف‌پذیری بیشتر، به حداقل می‌رسد و در نتیجه پیچیدگی محاسبات در مقایسه با طرح کنترل مستقیم گشتاور کمتر شده است. نتایج شبیه‌سازی کنترل پیش‌بین گشتاور و کنترل مستقیم گشتاور در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب بررسی و مقایسه شده‌اند. این مقایسه با اعتبار امکان‌سنجی کنترل پیش‌بین گشتاور و برجسته نمودن برخی از مسائل مهم مربوط به اجرای آن، بررسی می‌شود.

واژگان کلیدی: راه‌انداز، موتور القایی، کنترل پیش‌بین گشتاور.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۷/۰۲/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۷/۰۸/۱۳

۱- مقدمه

روش کنترل مستقیم گشتاور^۱ یک کنترل بر اساس هیستریزس غیرخطی است که برای برنامه‌های کاربردی راه‌اندازهای الکتریکی با قدرت‌های متوسط و زیاد استفاده می‌شود. این روش پاسخ گشتاور بسیار سریع و کنترل انعطاف‌پذیر در یک موتور القایی را ارائه می‌دهد [۱-۲].

مدل کنترل پیش‌بین^۲ یک روش پیشرفته کنترل فرآیند است که در صنایع فرآیندی، در کارخانه‌های شیمیایی و پالایشگاه‌های نفت از سال ۱۹۸۰ مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین در سال‌های اخیر در مدل تعادل سیستم قدرت از آن استفاده می‌شود.

مدل کنترل پیش‌بین با تکیه بر مدل پویای روندها، اغلب مدل‌های خطی‌ای هستند که توسط شناسایی سیستم به‌دست می‌آیند. استفاده از مدل کنترل پیش‌بین واقعیتی است که اجازه می‌دهد تا بازه زمانی جاری با نگاه‌داشتن زمان‌های آینده در محاسبه، بهینه‌سازی شود [۳-۴].

این روش با بهینه‌سازی افق زمانی محدود به‌دست می‌آید و در بازه زمانی جاری اجرا می‌شود. مدل کنترل پیش‌بین یک کنترل دیجیتال است که توانایی پیش‌بینی حوادث آینده را دارد و بر اساس تکرار بهینه‌سازی در دوره‌های محدود مدل دستگاه، اقدامات کنترلی را انجام می‌دهد. در زمان t ، حالت فعلی دستگاه نمونه‌برداری شده و یک استراتژی کنترل حداقل هزینه^۳ (از طریق یک الگوریتم به حداقل رساندن عددی) برای افق زمانی نسبتاً کوتاه محاسبه می‌شود [۴].

در ادامه یک مطالعه مقایسه‌ای بین روش‌های کنترل مستقیم گشتاور و کنترل پیش‌بین گشتاور^۴ در راه‌انداز موتور القایی سه‌فاز انجام شده و سپس موج‌دار شدن شار، اعوجاج گشتاور و همچنین پاسخ دینامیکی در این روش‌ها بررسی گردیده است.

۲- کنترل مستقیم گشتاور

در این بخش یک راه‌انداز کنترل مستقیم گشتاور شرح داده شده است، که علاوه بر کنترل گشتاور، شار کنترل شده، شار استاتور است. اگر بردار پیوندی شار استاتور در جهت رو به جلو شتاب بگیرد گشتاور الکترومغناطیسی مثبت تولید می‌شود.

با این حال، بردار شار استاتور را می‌توان با استفاده از بردار فضایی مناسب ولتاژ استاتور، که توسط اینورتر منبع ولتاژ تولید شده تنظیم نمود و کنترل گشتاور الکترومغناطیسی با استفاده از ولتاژ استاتور به‌دست می‌آید. به این دلیل، به‌طوری که ذکر شد این نوع از کنترل معمولاً به عنوان کنترل گشتاور مستقیم نامیده می‌شود [۵].

$$T_e = \frac{3}{2} P \frac{L_m}{L_s L_r} |\bar{\Psi}_s| |\bar{\Psi}_r| \sin \lambda \quad (1)$$

در رابطه (۱)، λ زاویه بین بردارهای فضایی شار پیوندی استاتور و روتور است، $\lambda = \rho_s - \rho_r$. ثابت زمانی روتور یک ماشین القایی قفس سنجابی استاندارد، بزرگ است. بنابراین شار پیوندی روتور در مقایسه با شار پیوندی استاتور به آرامی تغییر می‌کند و می‌توان آن را ثابت فرض نمود. اگر شار پیوندی استاتور ثابت فرض شده باشد، این نیز از معادله ولتاژ روتور ماشین القایی حاصل می‌شود. با این حال، اگر شار پیوندی روتور و استاتور ثابت فرض شوند، از معادله (۱) گشتاور الکترومغناطیسی حاصل می‌شود که می‌تواند به سرعت با تغییر λ در جهت مورد نیاز، تغییر نماید. این ماهیت کنترل مستقیم گشتاور است. با این حال، زاویه λ به راحتی می‌تواند با تعویض بردار فضایی مناسب ولتاژ استاتور تغییر نماید. ساختار کنترل مستقیم گشتاور در شکل (۱) نشان داده شده است [۵].

۳- کنترل پیش‌بین گشتاور

کنترل پیش‌بین کلاس گسترده‌ای از کنترل‌کننده‌ها است که در برنامه‌های اخیر مبدل‌های قدرت استفاده می‌شود. مشخصه اصلی کنترل پیش‌بین، استفاده از یک مدل سیستم برای پیش‌بینی رفتار آینده متغیرهای کنترل شده می‌باشد. این اطلاعات توسط یک کنترل‌کننده با توجه به معیار بهینه‌سازی از پیش تعریف شده برای به‌دست آوردن تحریک مطلوب، استفاده می‌شود. روش‌های مختلف کنترل پیش‌بین عبارتند از: کنترل ساکن، کنترل هیستریزس، کنترل مبتنی بر مسیر و الگوی کنترل پیشگویانه [۶-۷].

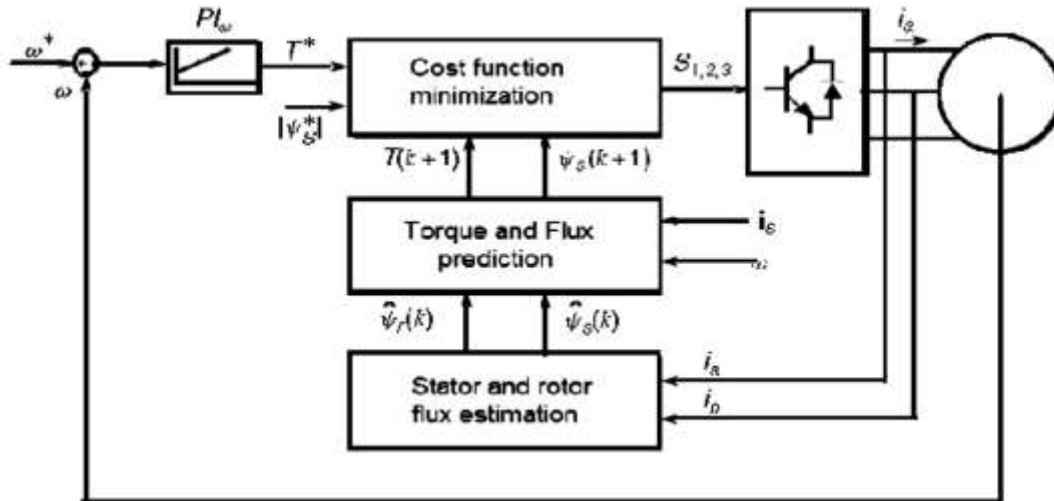
معیار بهینه‌سازی در کنترل پیش‌بین مبتنی بر هیستریزس، حفظ متغیر کنترل شده در محدوده منطقه هیستریزس است، در حالی که در کنترل مبتنی بر مسیر متغیر کنترل شده مجبور به دنبال کردن یک مسیر از پیش تعریف شده است.

³ Cost Minimizing Control Strategy

⁴ Predictive Torque Control (PTC)

¹ Direct Torque Control (DTC)

² Model Predictive Control (MPC)



شکل (۲) بلوک دیاگرام کنترل پیش‌بینی گشتاور [۱۰].

متغیرهای کنترل اختصاص داده شود، این عامل مطابق با نسبت بین بزرگی گشتاور نامی T_{nom} و شار استاتور نامی $\bar{\Psi}_{snom}$ است.

۷- نتایج شبیه‌سازی

رفتار کنترل پیش‌بین گشتاور و کنترل مستقیم گشتاور با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز متلب و با پارامترهای نشان داده شده در جدول (۱) شبیه‌سازی شده است. الگوریتم کنترل با زمان نمونه‌برداری $40\mu s$ اجرا شده است. شکل‌های (۳) و (۴) جریان حالت پایداری برای هر دو استراتژی کنترل، وقتی که موتور با سرعت نامی 300 رادیان بر ثانیه و با گشتاور بار کامل (5 نیوتن‌متر) کار می‌کند، را نشان می‌دهند. جریان در کنترل پیش‌بین گشتاور اعوجاج کمی ($THD = 4\%$) نسبت به کنترل مستقیم گشتاور ($THD = 6.2\%$) دارد. شکل‌های (۵) الی (۱۰) نشان‌دهنده رفتار گشتاور، سرعت و شار در اثر بار 5 نیوتن‌متری است. این نتایج نشان می‌دهد که کنترل پیش‌بین گشتاور در مقایسه با کنترل مستقیم گشتاور، در حالت پایدار نسبت به حالت گذرا، عمل کرد بهتری دارد.

جدول (۱) مشخصات موتور القایی.

مشخصات	مقدار
R_s	2.65Ω
R_r	2Ω
L_s	301.4 mH
L_r	306.5 mH
L_m	291.1 mH
P	2
J	$0.0055 \text{ Kg m}^2/\text{s}$
T_{nom}	5 Nm

با استفاده از بسط اویلر در معادله (۹)، شار استاتور پیش‌بینی شده در لحظه $K+1$ به صورت رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$\bar{\Psi}_s(k+1) = \bar{\Psi}_s(k) + T_s \cdot \bar{V}_s(k) - R_s \cdot T_s \cdot \bar{I}_s(k) \quad (10)$$

معادله پویای ولتاژ استاتور موتور القایی قفس سنجابی به صورت رابطه (۱۱) است [۹]:

$$\bar{V}_s = R_\sigma \bar{I}_s + L_\sigma \frac{d\bar{I}_s}{dt} + k_r \cdot \left(j\omega - \frac{1}{\tau_r} \right) \cdot \bar{\Psi}_r \quad (11)$$

که در آن $L_\sigma = \sigma L_s$ اندوکتانس نشتی و $R_\sigma = R_s + k_r^2$ و R_r مقاومت کل هستند. با استفاده از بسط اویلر در معادله (۱۱)، جریان استاتور پیش‌بینی شده در لحظه $K+1$ به دست آمده است:

$$\bar{I}_s(k+1) = \left(1 - \frac{T_s}{\tau_\sigma} \right) \cdot \bar{I}_s(k) + \frac{T_s}{\tau_\sigma + T_s} \cdot \left\{ \frac{1}{R_\sigma} \cdot \left(\left(\frac{k_r}{\tau_r} - jk_r \cdot \omega \right) \cdot \bar{\Psi}_r(k) + \bar{V}_s(k) \right) \right\} \quad (12)$$

با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۲) گشتاور الکترومغناطیسی پیش‌بینی شده در لحظه $K+1$ به دست آمده است [۱۱]:

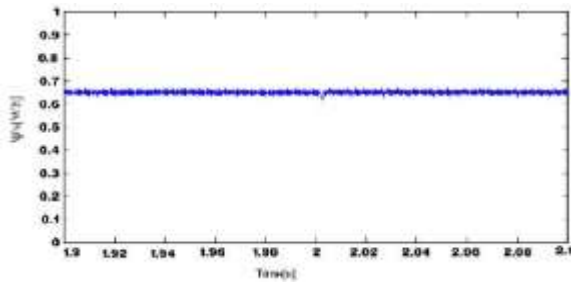
$$\bar{T}_s(k+1) = \frac{3}{2} P \cdot \text{Im} \{ \bar{\Psi}_s(k+1) \cdot \bar{I}_s(k+1) \} \quad (13)$$

۶- تابع هزینه حداقل شده

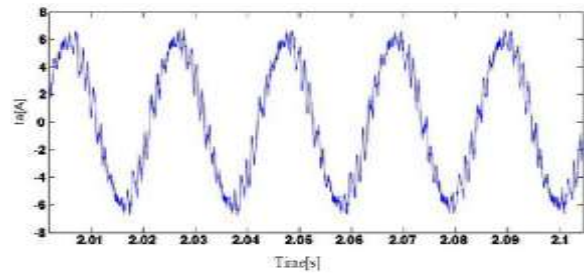
تابع هزینه دارای ساختار رابطه (۱۴) است [۱۲]:

$$g_i = |T(k+1)_i - T^*| + \lambda \cdot \left| \bar{\Psi}_s(k+1)_i - \bar{\Psi}_s^*(k+1)_i \right| \quad (14)$$

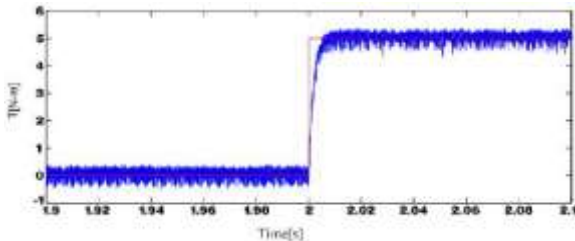
که در آن $\lambda = \frac{T_{nom}}{\bar{\Psi}_{snom}}$ نشان‌دهنده عامل وزن است، که باعث افزایش یا کاهش یافتن نسبی گشتاور در مقابل کنترل شار می‌شود. این تنها پارامتری است که در کنترل پیش‌بین گشتاور تنظیم می‌شود. اگر وزن یکسان برای هر دو



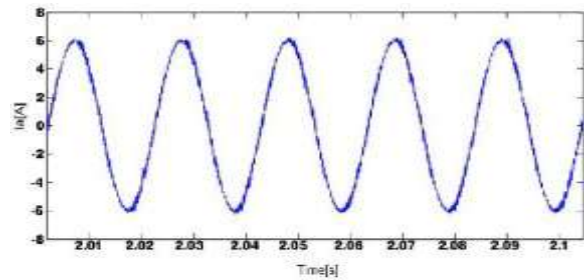
شکل (۸) نتیجه شبیه‌سازی شار در اثر بار در روش PTC.



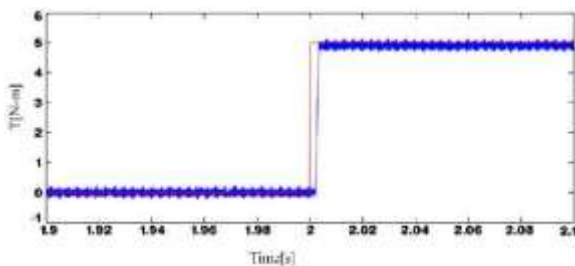
شکل (۳) شبیه‌سازی شکل موج جریان حالت دائمی استاتور در گشتاور بار کامل در روش DTC.



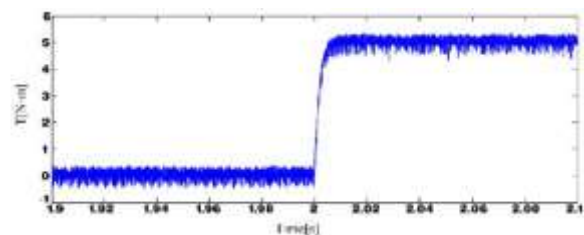
شکل (۹) نتایج شبیه‌سازی پاسخ پله گشتاور در روش DTC.



شکل (۴) شبیه‌سازی شکل موج جریان حالت دائمی استاتور در گشتاور بار کامل در روش PTC.

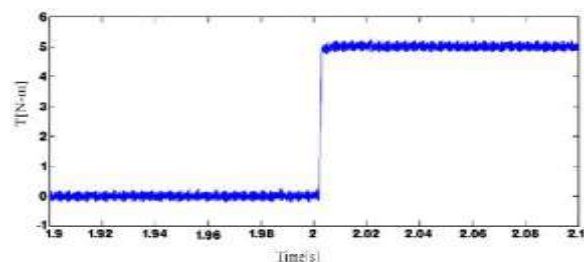


شکل (۱۰) نتایج شبیه‌سازی پاسخ پله گشتاور در روش PTC.

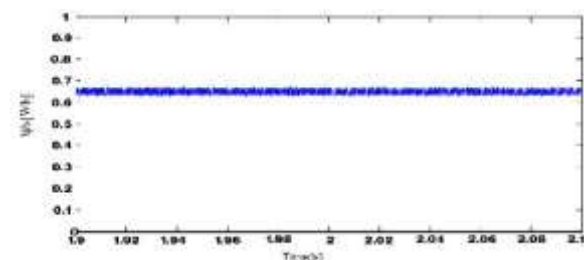


شکل (۵) نتیجه شبیه‌سازی گشتاور در اثر بار در روش DTC.

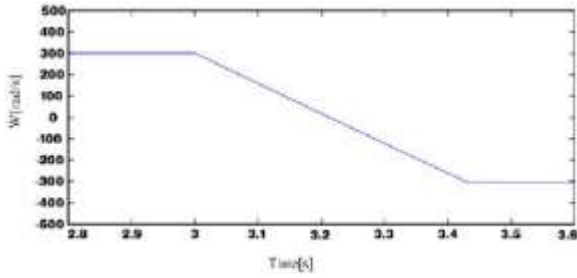
تحت حالت پایدار موج‌دار شدن در گشتاور و شار در کنترل پیش‌بین گشتاور کمتر است، و تحت حالت گذار پاسخ سریع است. شکل‌های (۹) و (۱۰) رفتار دینامیکی گشتاور را نشان می‌دهند. وقتی که ماشین در مقدار نامی شرایط شار عمل می‌کند، یک مرحله ورودی ۵ نیوتن‌متری ارائه شده است. با توجه به عدم وجود کنترل جریان داخلی، پاسخ گذرای بسیار سریع گشتاور در کنترل پیش‌بین گشتاور به‌دست آمده است. شکل‌های (۱۱) الی (۱۴) نشان‌دهنده شکل موج سرعت و گشتاور در طول ردیابی سرعت مرجع هستند. پاسخ به‌دست آمده در حالی است که سرعت مرجع از ۲۸۰ رادیان بر ثانیه تا ۳۰۰ رادیان بر ثانیه متغیر می‌باشد. از نتایج روشن است که کنترل پیش‌بین گشتاور نسبت به کنترل مستقیم گشتاور یک واکنش سرعت خوب می‌دهد. شکل‌های (۱۵) الی (۲۰) نتایج شبیه‌سازی شکل موج‌های سرعت، گشتاور و جریان استاتور در طول عملیات سرعت معکوس را نشان می‌دهند.



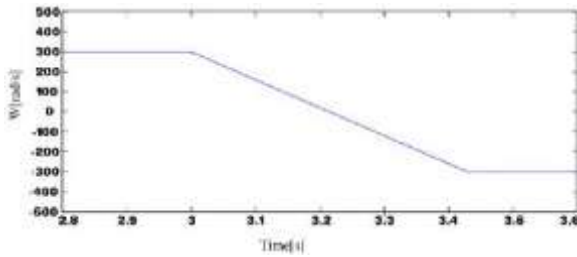
شکل (۶) نتیجه شبیه‌سازی گشتاور در اثر بار در روش PTC.



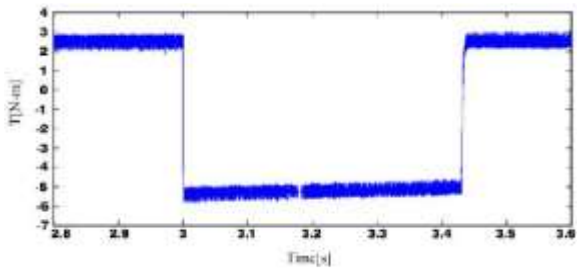
شکل (۷) نتیجه شبیه‌سازی شار در اثر بار در روش DTC.



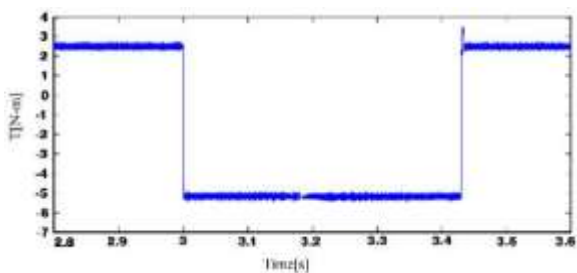
شکل (۱۵) نتایج شبیه‌سازی حاصل از سرعت، در طول عملیات سرعت معکوس در روش DTC.



شکل (۱۶) نتایج شبیه‌سازی حاصل از سرعت، در طول عملیات سرعت معکوس در روش PTC.

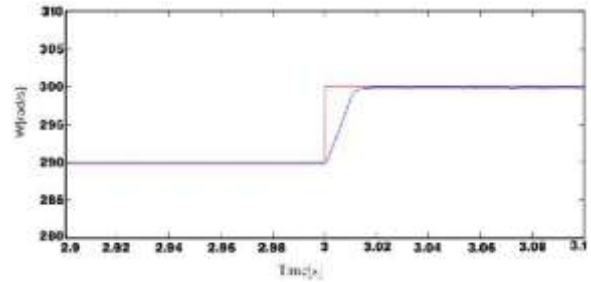


شکل (۱۷) نتایج شبیه‌سازی حاصل از گشتاور، در طول عملیات سرعت معکوس در روش DTC.

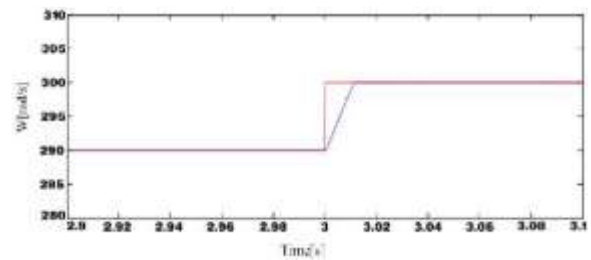


شکل (۱۸) نتایج شبیه‌سازی حاصل از گشتاور، در طول عملیات سرعت معکوس در روش PTC.

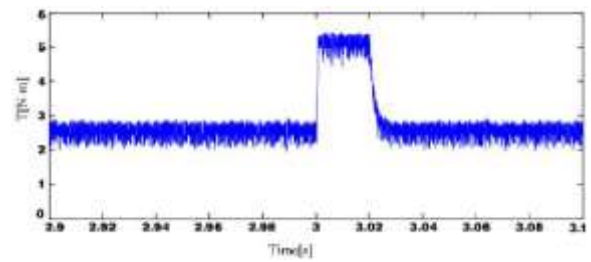
به همین دلیل سرعت پاسخی صاف دارد. می‌توان بیان کرد که اگر چه عملکرد هر دو استراتژی مشابه و مناسب است، موجدار شدن در کنترل پیش‌بین گشتاور کمتر از کنترل مستقیم گشتاور است.



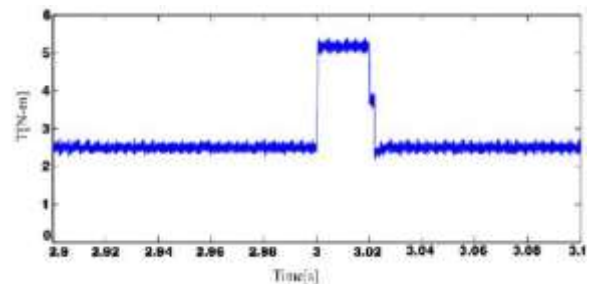
شکل (۱۱) شبیه‌سازی شکل موج سرعت در طول ردیابی سرعت در روش DTC.



شکل (۱۲) شبیه‌سازی شکل موج سرعت در طول ردیابی سرعت در روش PTC.



شکل (۱۳) شبیه‌سازی شکل موج گشتاور در طول ردیابی سرعت در روش DTC.



شکل (۱۴) شبیه‌سازی شکل موج گشتاور در طول ردیابی سرعت در روش PTC.

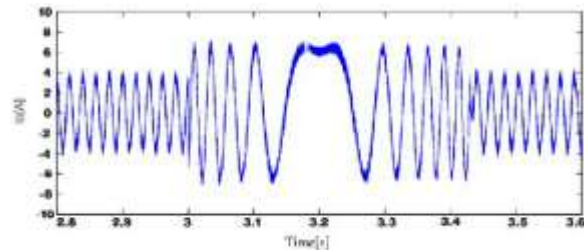
دستور سرعت از ۳۰۰ رادیان بر ثانیه تا ۳۰۰- رادیان بر ثانیه در ۵۰٪ بار نامی (۲،۵ نیوتن‌متر) تغییر است. کنترل‌کننده PI خارجی به عنوان کنترل‌کننده سرعت در هر دو استراتژی مورد استفاده قرار گرفته است.

نشان‌دهنده شکل موج سرعت و گشتاور در طول ردیابی سرعت مرجع می‌باشند. پاسخ به‌دست آمده در حالی است که سرعت مرجع از ۲۸۰ رادیان بر ثانیه تا ۳۰۰ رادیان بر ثانیه متغیر می‌باشد. تحت حالت پایدار موج‌دار شدن در گشتاور و شار در کنترل پیش‌بین گشتاور کمتر است، و تحت حالت گذار پاسخ سریع است.

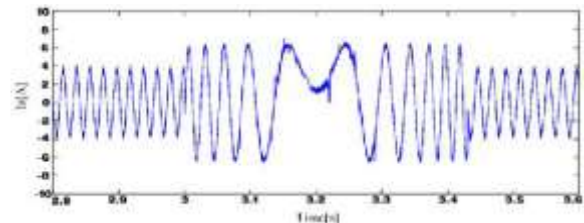
شکل‌های (۹) و (۱۰) رفتار دینامیکی گشتاور را نشان می‌دهند. وقتی که ماشین در مقدار نامی شرایط شار عمل می‌کند، یک مرحله ورودی ۵ نیوتن‌متری ارائه شده است. با توجه به عدم وجود کنترل جریان داخلی، پاسخ گذرای بسیار سریع گشتاور در کنترل پیش‌بین گشتاور به‌دست آمده است. شکل‌های (۵) الی (۱۰) نشان‌دهنده رفتار گشتاور، سرعت و شار در اثر بار ۵ نیوتن‌متری است. این نتایج نشان می‌دهد که کنترل پیش‌بینی گشتاور در مقایسه با کنترل مستقیم گشتاور در حالت پایدار نسبت به حالت گذار، عمل‌کرد بهتری دارد.

۹- مراجع

- [1] K.D. Hoang, Z.Q. Zhu and M.P. Foster, "Influence And Compensation Of Inverter Voltage Drop in Direct Torque Controlled Four-Switch Three-Phase PM Brushless AC Drives", IEEE Industrial Electronics Magazine, Vol.26, No.8, pp.2343-2357, 2011.
- [2] M. Hafeez, M.N. Uddin and R.S. Rebeiro, "FLC Based Hysteresis Band Adaptation to Optimize Torque and Stator Flux Ripple of a DTC Based IM Drive", IEEE Conference Publications, pp.1-5, 2010.
- [3] J. Maciejowski, Predictive Control with Constraints. New York: Prentice-Hall, 2002.
- [4] M. Morari and J. H. Lee, "Model Predictive Control: Past, present, and future," Comput. Chem. Eng., Vol.23, No.4, pp.667-682, 1999.
- [5] M. Z. R. Z. Ahmadi, A. Jidin, M.N. Othman, M.L.M. Jamil, T. Sutikno and R. Nair, "High Efficiency of Switching Strategy Utilizing Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter for High-Performance DTC of Induction Machine", IEEE Conference Publications, pp.287-292, 2014.
- [6] S. Kouro, P. Cortes, R. Vargas, U. Ammann, and J. Rodriguez, "Model Predictive Control—A Simple and Powerful Method to Control Power Converters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.56, No.6, pp.1826-1838, 2009.
- [7] P. Cortés, M. P. Kazmierkowski, R. M. Kennel, D. E. Quevedo, and J. Rodríguez, "Predictive control in power electronics and drives," IEEE



شکل (۱۹) نتایج شبیه‌سازی حاصل از جریان استاتور، در طول عملیات سرعت معکوس در روش DTC.



شکل (۲۰) نتایج شبیه‌سازی حاصل از جریان استاتور، در طول عملیات سرعت معکوس در روش PTC.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله عملیات مقایسه از نظر اعوجاج گشتاور و شار برای کنترل پیش‌بین گشتاور و کنترل مستقیم گشتاور راه‌انداز سه‌فاز موتور القایی ارائه شده است. در کنترل پیش‌بین، اهداف کنترلی به عنوان تابع هزینه تعریف شده است که برای داشتن یک انعطاف‌پذیری بیشتر، به حداقل می‌رسد و در نتیجه پیچیدگی محاسبات در مقایسه با طرح کنترل مستقیم گشتاور کمتر شده است.

نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب نشان می‌دهد که اثربخشی طرح پیش‌بین در کاهش اعوجاج گشتاور در سرعت‌ها و بارگذاری‌های مختلف، مناسب بوده و نشان داده شده است که در روش کنترل پیش‌بین گشتاور نتایج بهتری نسبت به روش کنترل مستقیم گشتاور به‌دست آمده است. فرکانس نمونه‌برداری زیاد مورد نیاز برای انجام کنترل پیش‌بین گشتاور به دلیل در دسترس بودن پردازنده‌های قوی مشکلی ایجاد نخواهد کرد.

از نتایج روشن است که کنترل پیش‌بین گشتاور نسبت به کنترل مستقیم گشتاور یک واکنش سرعت خوب می‌دهد. شکل‌های (۱۵) الی (۲۰) نتایج شبیه‌سازی شکل موج‌های سرعت، گشتاور و جریان استاتور در طول عملیات سرعت معکوس را نشان می‌دهند. دستور سرعت از ۳۰۰ رادیان بر ثانیه تا ۳۰۰- رادیان بر ثانیه در ۵۰٪ بار نامی (۲،۵ نیوتن‌متر) تغییر می‌کند. شکل‌های (۱۱) الی (۱۴)

- Transactions on Industrial Electronics, Vol.55, No.12, pp.4312–4324, 2008.
- [8] S. Kouro, P. Cortés, R. Vargas, U. Ammann, and J. Rodríguez, “Model Predictive Control – a Simple and Powerful Method to Control Power Converters,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.56, No.6, pp.1826–1838, 2009.
- [9] J. Holtz, “The Dynamic Representation of AC Drive Systems by a Complex Signal Flow Graphs,” in Proc. IEEE ISIE, May 25–27, 1994, Vol.1, pp.1–6.
- [10] R. Kennel, J. Rodriguez, J. Espinoza, and M. Trincado, “High Performance Speed Control Methods for Electrical Machines: An Assessment”, in Proc. IEEE ICIT, pp.1793–1799, 2010.
- [11] H. R. Kumar, K. Harish and S. S. Rao, “Predictive Torque Controlled Induction Motor Drive with Reduced Torque and Flux Ripple Over DTC”, IEEE Conference Publications, pp.1–6, 2015.
- [12] Toshihiko Noguchi AND Isao Takahashi, (Sep 1986) (Sep–Oct 1986). “A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor”, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.22, No.5, pp.820-827, 2012.