Applied Electromagnetics

Vol. ١٣, No.١, ٢٠٢٥ (Serial No. ٣٠) .pp.٥٥-٦٨
ISSN: ٢٦٤٥-٥١٥٣ , E-ISSN: ٢٨٢١-٢٧١١

Performance Improvement of Permanent Magnet Synchronous Motors in Both Steady and Transient Modes Through the Current Model Predictive Control Method

Gh.Lalezar[١], H.Fayazi[٢*]

[١] Assistant Professor, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

[٢] Assistant Professor, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: ٠٦ June ٢٠٢٥

Received in revised form: ٢٥ July ٢٠٢٥

Accepted: ١١ August ٢٠٢٥

Available online: ٢٣ August ٢٠٢٥

Keywords: Permanent magnet synchronous motor, Model predictive control, steady-state, transient-state.

ABSTRACT

Variable switching frequency and high torque oscillations are two significant drawbacks of current model predictive control (MPCC) methods. Although some recently proposed model-based approaches have made valuable efforts to enhance torque quality, they have inadvertently reduced the response speed of traditional methods. This paper presents a straightforward yet effective solution to address the shortcomings of the conventional MPCC method. In this proposed solution, two types of control strategies are introduced for steady-state and transient conditions. The first strategy targets steady-state conditions, aiming to minimize torque and output flux oscillations by appropriately selecting the voltage vector and its application duration. The second strategy, applicable in transient conditions, is designed to enhance dynamic speed and achieve the reference value of output torque in the shortest possible time. Thus, in this control strategy, a voltage vector is applied to the output throughout the entire control duration. Simulation and practical results, conducted using MATLAB software and a TM٣٢٠F٢٨٣٣٥ DSP processor, demonstrate the effectiveness of the proposed method in reducing torque fluctuations, flux fluctuations, and stator current THD compared to other methods.

Cite this article: Gh.Lalezar, H.Fayazi "Performance Improvement of Permanent Magnet Synchronous Motors in Both Steady and Transient Modes Through the Current Model Predictive Control Method" AppliedElectromagnetics, vol. ١٣(١), pp. ٥٥-٦٨, ٢٠٢٥.

DOR: https://dor.isc.ac/dor/٢٠,١٠٠١,١,٢٦٤٥٥١٥٣,١٤٠٤,١٣,١,٩,٤

OPEN ACCESS © The Author(s).

Publisher: Imam Hossein

«الکترومغناطیس کاربردی»
سال سیزدهم، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۴؛ ص ۶۸-۵۵
شاپا الکترونیکی: ۲۷۱۱-۲۸۲۱ شاپا چاپی: ۵۱۵۳-۲۶۴۵

بهبود عملکرد موتور سنکرون آهنربای دائم در هر دو حالت دائم و گذرا با استفاده از روش کنترل پیش‌بین مدل جریان

غلامرضا لاله‌زار[۱]، حسین فیاضی[۲]

[۱] استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی الکترومغناطیس، اصفهان، ایران.

[۲] استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی الکترومغناطیس، اصفهان، ایران.

چکیده

فرکانس کلید زنی متغیر و نوسانات گشتاور بالا دو عیب عمده‌ی روش‌های کنترل پیش‌بین مدل جریان (**MPCC**)می‌باشند. اگرچه بعضی از روش‌های مبتنی بر مدلی که اخیراً پیشنهادشده‌اند بر روی بالابردن کیفیت گشتاور فعالیت‌های مفیدی انجام داده‌اند ولی در عوض باعث کاهش سرعت پاسخ‌دهی روش‌های سنتی گردیده‌اند. در این مقاله یک راه‌حل ساده ولی سودمند به‌منظور رفع معایب روش **MPCC** سنتی ارائه گردیده است. در این راه‌حل پیشنهادی دو نوع استراتژی کنترلی برای شرایط ماندگار و گذرا ارائه‌شده است. استراتژی اول برای حالت ماندگار به کار گرفته‌شده و هدف آن کمینه کردن نوسانات گشتاور و شار خروجی با انتخاب مناسب بردار ولتاژ و مدت‌زمان اعمال آن است. استراتژی دوم که در شرایط گذرا از آن استفاده می‌شود باهدف بالابردن سرعت پویایی و رسیدن گشتاور خروجی به مقدار مرجع در سریع‌ترین زمان ممکن طراحی گردیده است. به‌طوری‌که در این استراتژی کنترلی یک بردار ولتاژ در کل مدت‌زمان کنترل به خروجی اعمال می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی و عملی که با استفاده از نرم‌افزار متلب و پردازنده‌ی **DSP** مدل **TM320F28335** انجام‌گرفته کارایی مناسب روش پیشنهادی را ازنقطه‌نظر کاهش نوسانات گشتاور، نوسان شار و **THD** جریان استاتور در مقایسه با دیگر روش‌ها نشان می‌دهد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۶

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۳

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱

کلید واژه ها:

موتور سنکرون آهنربای دائم، کنترل پیش-بین مدل، حالت ماندگار، حالت گذرا

استناد: لاله‌زار، غلامرضا، فیاضی، حسین. بهبود عملکرد موتور سنکرون آهنربای دائم در هر دو حالت دائم و گذرا با استفاده از روش کنترل پیش‌بین مدل جریان. الکترومغناطیس کاربردی. (۱۴۰۴)؛۱۳ (۱): ۶۸-۵۵.

DOR: https://dor.isc.ac/dor/۲۰,۱۰۰۱,۱,۲٦٤٥٥١٥٣,١٤٠٤,١٣,١,٩,٤

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.

ناشر: دانشگاه جام امام حسین(ع).

۱- مقدمه

ماشین‌های الکتریکی اجزای کلیدی در کاربردهای مختلف صنعتی هستند که تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی یا بالعکس را تسهیل می‌کنند. در میان انواع مختلف ماشین‌های الکتریکی، ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم از آهنربای دائمی برای تولید یک میدان مغناطیسی پایدار استفاده می‌کنند. موتورهای سنکرون آهنربای دائم (PMSM)[۱] به‌واسطه‌ی خصوصیاتی چون بازدهی بالا، چگالی توان[۲] بالا، نسبت گشتاور به اینرسی[۳] زیاد، قابلیت اطمینان بالا[۴]، کنترل پذیری[۵] و سادگی ساختار[۶] به‌طور وسیعی در کاربردهای صنعتی نظیر صنایع ماشین‌ابزار، سرو موتور، ساعت و غیره استفاده می‌شوند [۱]. در اغلب این کاربردها، نیاز به کنترل دقیق باکیفیت بالا و با حداقل نوسان خروجی است [۲].

روش‌های کنترلی PMSM به دو بخش کنترل اسکالر[۷] و کنترل برداری[۸] تقسیم می‌شوند. در مقایسه با کنترل اسکالر، کنترل برداری دارای ضعف عدم کنترل بر روی بردارهای فضایی[۹] در حالت گذرا[۱۰] است [۳]. همچنین در کنترل برداری که مبتنی بر روابط دینامیکی[۱۱] است، علاوه بر دامنه و فرکانس، موقعیت لحظه‌ای بردارهای فضایی قابل‌کنترل می‌باشند. بنابراین می‌توان انتظار داشت که با به‌کارگیری کنترل برداری، به عملکرد کنترلی مناسبی در حالت گذرا و دائم دست پیدا کرد. می‌توان به دو روش کنترل جهت‌یابی میدان (FOC[۱۲]) و کنترل مستقیم گشتاور (DTC[۱۳]) به‌عنوان مهم‌ترین روش‌های کنترل برداری، اشاره کرد [۴]. FOC اولین بار توسط هاس[۱۴] و بلاشک[۱۵] پیشنهادشده است. در FOC معادلات موتور به مرجع مختصاتی که با بردار شار روتور به‌صورت سنکرون می‌چرخد انتقال می‌یابد. این انتقال باعث ایجاد یک نسبت خطی بین متغیرهای کنترلی و گشتاور می‌گردد [۵].

سیزده سال بعد از ابداع روش FOC، توسط دپن‌براک[۱۶] و تاکاهاشی[۱۷] روش DTC پیشنهادشده است. در این روش نیاز به محاسبات پیچیده و انتقال به مختصات مرجع وجود ندارد [۶]. از مزایای روش DTC، سادگی ساختار، سرعت دینامیکی بالای پاسخ خروجی و عدم نیاز به مدولاتور پهنای پالس[۱۸] است. این مزایا باعث کاربرد وسیع این روش کنترلی در موتور نوع PMSM شده است. علیرغم مزایایی این روش کنترلی، نوسانات بالای گشتاور و فرکانس کلید زنی متغیر دو عیب عمده‌ی روش DTC است، که تحقیقات زیادی در جهت بهبود این دو عیب درروش DTC انجام‌شده است. این روش‌ها عبارت‌اند از روش‌های مبتنی بر تغییر سخت‌افزار که عمدتاً به‌منظور افزایش بردارهای ولتاژ انجام می‌شود و باعث پیچیدگی چیدمان فیزیکی سیستم راه‌انداز می‌شود. لذا حجم المان‌ها در این‌گونه روش‌ها افزایش می‌یابد که این در نوع خود عیب بزرگی است [۷].

دسته‌ی دیگر از روش‌های بهبود DTC استفاده از مدولاسیون بردار فضایی (SVM[۱۹]) در این روش است. با استفاده از روش DTC-SVM[۲۰] می‌توان نوسانات گشتاور را کاهش داده و فرکانس کلید زنی را تنظیم کرد. البته با توجه به اینکه در این روش نیاز به انتقال به مرجع روتور و کنترل‌کننده‌ی PI است، لذا سرعت دینامیکی پاسخ نسبت به DTC کاهش می‌یابد. همچنین چون در DTC-SVM نیاز به استفاده از دو بردار ولتاژ غیر صفر و یک بردار ولتاژ صفر است، لذا نیاز به کلید زنی با فرکانس بالا در این روش است [۸].

روش DDTC[۲۱] نیز یکی از راه‌حل‌هایی است که به‌منظور بهبود نوسانات گشتاور و جلوگیری از فرکانس کلید زنی متغیر در DTC پیشنهادشده است [۹]. در این روش مدت‌زمان اعمال بردار ولتاژ فعال از صفرتا کل زمان کنترل می‌تواند تغییر کند که این کار معادل با تغییر دامنه ولتاژ غیر صفر است. بردار ولتاژ صفر نیز برای باقیمانده‌ی زمان کنترل به اینورتر اعمال می‌گردد. با استفاده از روش DDTC نوسانات گشتاور کاهش‌یافته و فرکانس کلید زنی ثابت می‌گردد. علیرغم این مزایا، پیچیدگی محاسبات، حساسیت به پارامترهای موتور و بزرگ بودن نوسانات شار از معایب این روش است.

استفاده از مدل موتور برای پیش‌بینی رفتار بعدی متغیرهای کنترلی از دسته روش‌هایی است که اخیراً به‌منظور بهبود نقایص روش DTC پیشنهادشده است. از بین این متغیرهای کنترلی استفاده از شار و گشتاور الکترومغناطیسی در سامانه‌های کنترل موتور مرسوم‌تر است [۱۰]. این روش به روش کنترل گشتاور

۱- Permanent Magnet Synchronous Motor.
۲- Power density.
۳- Torque inertia ratio.
۴- Reliability.
۵- Controllability.
۶- Simplification of construction.
۷- Scalar control.
۸- Vector control.
۹- Space vectors.
۱۰- Transient.
۱۱- Dynamic states.
۱۲- Field Oriented Controller.
۱۳- Direct Torque Controller.
۱۴- Hasse.
۱۵- Blashke.
۱۶- Depenbrock.
۱۷- Takahashi.
۱۸- Pulse with modulation.
۱۹- Space Vector Modulation.
۲۰- Direct Torque Controller- Space Vector Modulation.
۲۱- Modulated direct torque control.

پیش‌بین بر اساس مدل[۱] (MPTC) مشهور است. درروش MPTC ، بر اساس مدل موتور، گشتاور و شار الکتریکی به ازای اعمال بردار ولتاژهای مختلف پیش‌بینی می‌گردند و بردار ولتاژی که منجر به بهترین پاسخ حالت ماندگار گردد توسط تابع هدف انتخاب می‌شود. از بزرگ‌ترین مشکلات این روش، تنظیم ضریب وزنی و نیاز به تخمین شار و گشتاور است.

جریان استاتور یکی دیگر از انتخاب‌هایی است که می‌تواند به‌عنوان متغیر کنترلی در روش‌های کنترل پیش‌بین[۲] وجود داشته باشد. روشی که در آن از این متغیر کنترلی استفاده می‌شود به روش کنترل جریان پیش‌بین بر اساس مدل[۳] (MPCC) مشهور است [۱۲-۱۱]. روش MPCC در مقایسه با روش MPTC سرعت پاسخ سریع‌تر و محاسبات کمتری دارد. این مزایا به این دلیل است که در این روش نیاز به تخمین شار و گشتاور نیست و متغیر کنترلی که جریان است به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری می‌شود. علاوه بر آن نیاز به تنظیم ضریب وزنی در تابع هدف آن نیست.

با توجه به اینکه در MPCC سنتی تنها از یک بردار ولتاژ در کل زمان کنترل استفاده می‌شود لذا فرکانس کلید زنی متغیر و نوسان گشتاور بالا از مشکلات این روش است. به‌منظور رفع این نقیصه درروش MPCC، راه‌حل‌های مشابه روش DDTC ارائه‌شده است. به‌طور مثال در مرجع [۱۳] به‌منظور بهبود پاسخ حالت ماندگار بردار ولتاژ غیر صفر تنها در جزئی از زمان کنترل به کلیدهای اینورتر اعمال می‌شود و مابقی زمان کنترل از بردار ولتاژ صفر استفاده می‌شود. استفاده از روش پیشنهادی [۱۳] مزایایی همچون بهبود پاسخ حالت ماندگار و فرکانس کلید زنی ثابت را به همراه دارد ولی علیرغم این مزایا حجم محاسبات بالا، کیفیت پایین شار استاتور و همچنین ضعف روش در زمان راه‌اندازی تا سرعت نامی از عیوب این روش است. در [۱۴]، یک روش پیش-بین جهت بهبود پاسخ خروجی راه‌انداز موتور PMSM ارائه‌شده است. این روش اگرچه مزایایی به سیستم کنترل موتور اضافه می‌کند ولی به‌شدت حجم محاسبات با به‌کارگیری این روش افزایش می‌یابد. این افزایش حجم محاسبات ناشی از اعمال بردارهای ثانویه و مدت‌زمان اعمال آن است. به‌طوری‌که درروش پیشنهادی در [۱۴] بردارهای ولتاژ ثانویه طی مراحلی نسبتاً حجیم و پیچیده مقداری غیر صفر به خود می‌گیرد نکته‌ای که گاها باعث می‌شود نتوان این روش را بر روی اکثر پردازنده‌ها پیاده‌سازی کرد. مدل کنترل هوشمند برای سیستم کنترل موتور PMSM توسط الگوریتم فازی در [۱۵] و با کمک سامانه‌های عصبی در [۱۶] طراحی‌شده است. این نوع روش‌های هوشمند اغلب پیچیده و حجم محاسباتی بالایی دارند.

در مرجع [۱۷]، روش MPCC با استفاده از کنترل مدت‌زمان اعمال بردارهای ولتاژ و باهدف بهبود پاسخ حالت دائم پیشنهادشده است. در این مرجع از تابع هدفی استفاده گردیده که در آن نیاز است تمامی بردارهای ولتاژ مورد ارزیابی قرار گیرند. به طوری که این موضوع باعث افزایش حجم محاسبات خواهد گردید. همچنین در این روش مدت‌زمان بهینه با استفاده از روش نسبتاً پیچیده و زمان‌گیری مبتنی بر مدولاسیون پهنای باند به دست می‌آید. علیرغم مزایای روش پیشنهادی در [۱۷]، حجم محاسبات زیاد و عدم معرفی استراتژی مناسب در شرایط گذرا از معایب این روش است.

در این مقاله به‌منظور رفع نواقص MPCC به همراه کنترل مدت‌زمان اعمال بردارهای ولتاژ، روشی پیشنهاد داده‌شده که توسط این روش، نوسانات شار و گشتاور الکتریکی تا حدودی کاهش می‌یابد. درواقع یکی از نوآوری‌های این مقاله بهبود کیفیت پاسخ حالت ماندگار با به‌کارگیری بخشی از بردارهای ولتاژ صفر و غیر صفر در قسمت دوم کلید زنی است. علاوه بر این‌یکی دیگر از نوآوری‌های این روش پیشنهادی که باهدف کاهش حجم محاسبات و زمان ارائه‌شده این است که در یک دوره‌ی کنترل از تمامی بردارهای ولتاژ به‌منظور ارزیابی تابع هدف استفاده نخواهد شد. به این صورت که به‌جای همه‌ی بردارهای ولتاژ، تنها بردارهایی که حائز شرایط (با توجه به موقعیت فضایی جریان استاتور) باشند امکان ورود به تابع هدف و ارزیابی توسط این تابع را خواهند داشت. همچنین ارائه‌ی راه‌حل در شرایط گذرا و جداسازی آن از حالت دائم از دیگر نوآوری‌های این روش پیشنهادی است.

۲- مدل موتور

استفاده از قاب مرجع روتور باهدف استخراج معادلات موتور PMSM به دلیل اینکه تمامی پارامترها در آن ثابت هستند مرسوم‌تر است. در این مقاله نیز به‌منظور سادگی از مدل قاب مرجع روتور[۴] استفاده‌شده و این معادلات به‌صورت زیر خواهند بود [۱۸].

$$\frac{di_d(t)}{dt} = \frac{1}{L_d}V_d(t) - \frac{R}{L_d}i_d(t) + \frac{\omega_r(t)L_q}{L_d}i_q(t) \qquad (۱)$$

$$\frac{di_q(t)}{dt} = \frac{1}{L_q}V_q(t) - \frac{R}{L_q}i_q(t) - \frac{\omega_r(t)L_d}{L_q}i_d(t) - \frac{\omega_r(t)\lambda_{pm}}{L_q} \qquad (۲)$$

۱ Model Predictive Torque Control
۲- Predictive control method.
۳- Model Predictive Current Control.
۴- Rotor reference frame model.

$$T_e = \frac{3p}{2}((L_d - L_q)i_q i_d + \lambda_{pm} i_q) \quad (۳)$$

در این معادلات $V_d(t)$ و $V_q(t)$ به ترتیب ولتاژ محور افقی و ولتاژ محور عمودی، R، L_d، L_q، $\omega_r(t)$ و λ_{pm} به ترتیب مقاومت استاتور، اندوکتانس محور افقی، اندوکتانس محور عمودی، سرعت الکتریکی و شار آهنرباهای دائم، T_e و p نیز به ترتیب گشتاور الکترومغناطیسی و جفت قطب‌های موتور می‌باشند. به منظور پیاده سازی روش پیشنهادی نیاز است معادلات به صورت گسسته نوشته شوند. لذا با استفاده از روش گسسته سازی اویلر که در (۴) نمایش داده‌شده است می‌توان معادلات گسسته‌ی موتور را به‌صورت (۵) و (۶) نوشت.

$$\frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x(k+1)-x(k)}{T_s} \quad (۴)$$

$$i_d(k+1) = \frac{T_s}{L_d} V_d(k) + (1 - \frac{R_s T_s}{L_d}) i_d(k) + \frac{\omega_r(k) L_q T_s}{L_d} i_q(k) \quad (۵)$$

$$i_q(k+1) = \frac{T_s}{L_q} V_q(k) + (1 - \frac{R_s T_s}{L_q}) i_q(k) - \frac{\omega_r(k) L_d T_s}{L_q} i_q(k) - \frac{\omega_r(k) \lambda_{pm} T_s}{L_q} \quad (۶)$$

در این معادلات T_s زمان نمونه‌برداری است.

۳- روش پیشنهادی MPCC بهبودیافته

در روش پیشنهادی، دو استراتژی کنترلی متفاوت به‌منظور بالابردن ضریب عملکرد موتور دنبال می‌شود. به صورتیکه در استراتژی کنترلی اول و به‌منظور دستیابی به گشتاور و شار با نوسانات حداقل، هر مدت‌زمان کنترل برای حالت ماندگار به دو بخش تقسیم می‌گردد. به طوریکه در این دو بازه‌ی کنترل یک بردار ولتاژ غیر صفر و یک بردار ولتاژ صفر به موتور اعمال می‌گردد. در این روش، مشابه با روش‌های MPCC قبلی بردار ولتاژ غیر صفر از طریق تابع هدف انتخاب می‌گردد. ولی تفاوت در مقایسه با روش‌های قبلی اینجاست که با استفاده از یک‌راه حل ساده تنها سه بردار ولتاژ برای وارد شدن در تابع هدف کاندید خواهند شد. این در حالی است که در روش‌های پیش‌بین قبلی، به‌منظور رسیدن به یک عملکرد مطلوب بایستی همه‌ی ۷ بردار ولتاژ در تابع هدف قرار می‌گرفتند. مشخص است که به‌کارگیری همه‌ی این بردارهای ولتاژ باعث افزایش حجم محاسبات و زمان‌بر بودن برنامه می‌گردد.

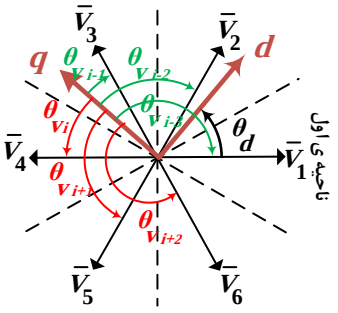
در حالت گذرا، با استفاده از استراتژی کنترلی دوم و به‌منظور دستیابی به پاسخ دینامیکی سریع، تنها یک بردار ولتاژ غیر صفر در کل مدت‌زمان کنترل به موتور اعمال می‌گردد. در این حالت، انتخاب بردار ولتاژ به نحوی صورت می‌گیرد که در سریع‌ترین زمان ممکن مقدار گشتاور خروجی به مقدار مرجع برسد. در بخش‌های بعدی در رابطه با دو استراتژی کنترلی به‌کاررفته شده در حالت دائم و گذرا توضیحات بیشتری ارائه گردیده است.

۳-۱- استراتژی کنترلی پیشنهادی برای حالت دائم

با استفاده از اینورتر سه فازه دوسطحی، دستیابی به ۸ حالت کلید زنی امکان‌پذیر است. در روش‌های پیش‌بین سنتی همه‌ی این بردارهای ولتاژ به‌منظور انتخاب بهترین بردار ولتاژ بایستی در داخل تابع هدف قرار بگیرند که این موضوع باعث افزایش حجم محاسبات و زمان اجرای برنامه خواهد شد. درروش پیشنهادی به‌منظور حل این مسئله، با توجه به مقدار جریان اندازه‌گیری شده و مقدار مرجع، تنها تعدادی از بردارهای ولتاژ به‌منظور استفاده در تابع هدف کاندید خواهند شد. نکته‌ی دیگر درروش پیشنهادی، نحوه‌ی محاسبه‌ی مدت‌زمان اعمال بردار ولتاژ غیر صفر است. به طوری که تعیین این مدت‌زمان باهدف بالابردن کیفیت پارامترهای خروجی در حالت ماندگار است. در ادامه در رابطه با نحوه‌ی انتخاب بردار ولتاژ و تعیین مدت‌زمان اعمال آن به‌تفصیل توضیحاتی ارائه گردیده است.

۳-۱-۱- تعیین بردار ولتاژ اول

یکی از موضوعات مهم در استراتژی کنترلی حالت دائم، چگونگی انتخاب بردار ولتاژ اول است. درروش پیشنهادی، هدف انتخاب این بردار ولتاژ با کمترین حجم محاسبات است. به‌منظور ارائه‌ی بهتر این روش، موقعیت بردارهای ولتاژ، محور α و β مختصات مرجع ثابت، بخش‌بندی شش‌گانه‌ی شار استاتور (S^1)، جریان مرجع محور عمودی و جریان اندازه‌گیری شده در شکل ۱ نمایش داده‌شده است.



شکل (۱). موقعیت‌های برداری

با توجه به این شکل، محور عمودی جریان روتور یا همان محور q در ناحیه‌ی سوم قرارگرفته است. در این حالت و درروش

۱- Sector.

پیشنهادی اگر جریان اندازه‌گیری شده کوچک‌تر از جریان مرجع باشد سه بردار ولتاژ $\bar{V}_2$، $\bar{V}_3$ و $\bar{V}_4$ برای ورود در تابع هدف (۷) کاندید می‌شوند. در غیر این صورت به‌منظور کاهش جریان استاتور موقعی که جریان اندازه‌گیری شده بزرگ‌تر از جریان مرجع باشد؛ بردارهای ولتاژ $\bar{V}_1$، $\bar{V}_5$ و $\bar{V}_6$ برای قرارگیری در تابع هدف (۷) کاندید می‌شوند. به‌طورکلی می‌توان از رابطه‌ی (۷) و (۸) برای انتخاب بردار ولتاژ اول استفاده کرد.

$$j = |i_d^* - i_d(k+2)|^2 + |i_q^* - i_q(k+2)|^2 \quad \begin{cases} if.\ (i_q^* - i_q(k))\rangle 0 \Rightarrow \bar{V}_s^1 \in (u_{s-1}, u_s, u_{s+1}) \\ if.\ (i_q^* - i_q(k))\langle 0 \Rightarrow \bar{V}_s^1 \in (u_{s-2}, u_{s+2}, u_{s+3}) \end{cases} \tag{۷}$$

$$\bar{V}_s^1 = V_d^1 + jV_q^1 \tag{۸}$$

در این دو رابطه، i_d^* و i_q^* معرف جریان‌های مرجع محور d و q می‌باشند. همان‌گونه که مشخص است درروش پیشنهادی علیرغم روش‌های MPCC قبلی، بردارهای ولتاژ مناسب با توجه به اختلاف جریان اندازه گیری‌شده با مقدار جریان مرجع در تابع هدف قرار می‌گیرند که این امر می‌تواند باعث کاهش حجم محاسبات و زمان موردنیاز برای اجرای برنامه گردد.

۲-۱-۳- تعیین مدت‌زمان اعمال بردار ولتاژ اول

درروش MPCC پیشنهادی بردار ولتاژ اول در زمان T_k به کلیدهای اینورتر اعمال می‌گردد. لذا در این روش، بردار ولتاژ به‌عنوان ورودی کنترل‌کننده و جریان محور q به‌عنوان خروجی کنترل‌کننده به‌حساب می‌آیند. لذا می‌توان از رابطه‌ی (۶) به‌منظور بررسی تغییرات جریان نسبت به اعمال ولتاژ در زمان T_k استفاده کرد. به طوری که با جایگذاری V_q^1 و T_k در معادله‌ی (۶) می‌توان نوشت:

$$\Delta i_q = \left(\frac{V_q^1(k)}{L_q} - \frac{R_s}{L_q} - \frac{\omega_r(k)L_d i_d(k)}{L_q} - \frac{\omega_r(k)\lambda_{pm}}{L_q}\right)T_k \cong S_q^1 T_k \tag{۹}$$

از معادله‌ی (۹) مشخص است که s_q^1 شیب تغییرات جریان در صورت اعمال بردار ولتاژ V_q^1 است. همچنین با فرض اعمال ولتاژ صفر به موتور در مابقی زمان کنترل، تغییرات جریان به‌صورت (۱۰) تا (۱۲) به دست می‌آید.

$$\Delta i_q = \left(-\frac{R_s}{L_q} - \frac{\omega_r(k)L_d i_d(k)}{L_q} - \frac{\omega_r(k)\lambda_{pm}}{L_q}\right)(T_s - T_k) \cong S_q^{\cdot}(T_s - T_k) \tag{۱۰}$$

در اینجا

$$S_q^1 = \frac{V_q^1(k)}{L_q} - \frac{R_s}{L_q} - \frac{\omega_r(k)L_d i_d(k)}{L_q} - \frac{\omega_r(k)\lambda_{pm}}{L_q} \tag{۱۱}$$

$$S_q^{\cdot} = -\frac{R_s}{L_q} - \frac{\omega_r(k)L_d i_d(k)}{L_q} - \frac{\omega_r(k)\lambda_{pm}}{L_q} \tag{۱۲}$$

در معادلات (۱۱) و (۱۲) با توجه به اینکه مقدار T_k کوچک است لذا $\omega_r(k)$ در این زمان نمی‌تواند تغییر چندانی داشته باشد. ازاین‌رو S_q^1 و $S_q^{\cdot}$ عبارات ثابتی خواهند بود و تغییرات جریان در دو بازه‌ی زمانی T_k و $T_s - T_k$ به‌صورت (۱۳) خواهد شد.

$$i_q(k+1) = \begin{cases} i_q(k) + S_q^1 t & 0 \le t \le T_k \\ i_q(k) + S_q^1 T_k + S_q^{\cdot} t - S_q^{\cdot} T_k & T_k \le t \le T_s \end{cases} \tag{۱۳}$$

درروش پیشنهادی هدف اصلی در هر قسمت از زمان کنترل، کمینه‌سازی نوسان جریان و عدم انحراف از مقدار مرجع است. به‌منظور رسیدن به این هدف می‌توان از مفهوم حداقل سازی مربعات خطا استفاده کرد. به‌طوری‌که با استفاده از این روش، T_k بهینه که منجر به کمترین نوسان جریان شود به دست خواهد آمد. به‌منظور به دست آوردن T_k با استفاده از این مفهوم، ابتدا بایستی مقدار RMS خطای جریان که به‌صورت (۱۴) است نوشته شود.

$$\begin{aligned} (i_{q-error-RMS})^2 &= \frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} (i_{q-error-RMS})^2 dt \\ &= \frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} (i_q(k+1) - i_q^*)^2 dt \\ &\frac{1}{T_s}\int_0^{T_k} (i_q(k+1) + S_q^1 t - i_q^*)^2 dt + \\ &\frac{1}{T_s}\int_{T_k}^{T_s} (i_q(k+1) + S_q^1 T_k + S_q^{\cdot} t - S_q^{\cdot} T_k - i_q^*)^2 dt \end{aligned} \tag{۱۴}$$

همان‌گونه که از رابطه‌ی (۱۴) ملاحظه می‌گردد مقدار $i_{q-error-RMS}$ وابسته به T_k است و با انتخاب مناسب T_k می‌توان $i_{q-error-RMS}$ را کمینه کرد. بدین منظور با انجام عملیات زیر، می‌توان به T_k بهینه دست پیدا کرد.

$$\frac{\partial(i_{q-error-RMS})}{\partial T_k} = 0 \tag{۱۵}$$

با استفاده از معادله‌ی (۱۵) T_k بهینه به‌صورت زیر به دست می‌آید.

$$T_k = \frac{2(i_q^* - i_q(k+1)) - S_q^{\cdot} T_s}{2S_q^1 - S_q^{\cdot}} \tag{۱۶}$$

با استفاده از عبارت به‌دست‌آمده در (۱۶) و اعمال بردار ولتاژ V_q^1 در زمان T_k می‌توان انتظار داشت که $i_{q-error-RMS}$ کمترین مقدار ممکن را در یک مدت‌زمان کنترل داشته باشد.

۲-۳- استراتژی کنترلی برای حالت گذرا

هدف اصلی استراتژی کنترل پیشنهادی در حالت گذرا دستیابی به یک پاسخ دینامیکی سریع با انتخاب بردار ولتاژ مناسب است. بنابراین در این حالت، بردار ولتاژ غیر صفر طوری انتخاب‌شده که مقدار گشتاور خروجی در نزدیک‌ترین زمان ممکن به گشتاور مرجع برسد. صرف‌نظر از مقدار EMF برگشتی، حالتی از عملکرد به‌عنوان شرایط گذرا در نظر گرفته‌شده است که در آن بردارهای ولتاژ توانایی نزدیک کردن جریان خروجی به مقدار مرجع را در یک مدت‌زمان کنترل نداشته باشند. لذا با توجه به معادله‌ی (۶) می‌توان نامعادله‌ی (۱۷) را بر اساس توضیحاتی که داده شد برای تشخیص حالت گذرا به کار گرفت.

$$(i_q^* - i_q(k)) \rangle \frac{T_s}{L_q} V_1^q(k) \qquad (۱۷)$$

بنابراین با برقراری شرط معادله‌ی بالا، استراتژی کنترلی بایستی برای حالت گذرا تنظیم شود. در این شرایط، بردار ولتاژی که کوچک‌ترین زاویه را با محور جریان دارد برای اعمال به موتور انتخاب می‌گردد. این موضوع در شکل ۱ نمایش داده‌شده است. با توجه به این شکل و وابسته به مقدار جریان محور d مناسب‌ترین بردار ولتاژ به کار گرفته خواهد شد. به‌طوری‌که در صورت کوچک‌تر بودن جریان محور d از مقدار مرجعش یکی از بردارهای ولتاژ با زاویه‌ی θ_{vi-1}، θ_{vi-2} یا θ_{vi-3} موجود در شکل انتخاب می‌شوند. در این حالت یکی از این ۳ بردار ولتاژ با کمترین فاصله با محور عمودی انتخاب می‌گردد.

در حالت دیگر از شرایط گذرا، موقعی که مقدار جریان محور افقی از جریان مرجع بزرگ‌تر باشد یکی از سه بردار ولتاژ با زوایای θ_{vi} ، θ_{vi+1} یا θ_{vi+2} که دارای کوچک‌ترین زاویه باشند انتخاب می‌شوند. این نکته لازم به ذکر است که بردار ولتاژ انتخاب‌شده در کل مدت‌زمان کنترل به موتور اعمال می‌گردد. با این استراتژی همان‌گونه که ملاحظه می‌شود گشتاور خروجی در سریع‌ترین زمان ممکن می‌تواند مقدار مرجع را دنبال کند.

۱-۲-۳- بلوک دیاگرام روش کنترلی پیشنهادی و مراحل اجرای آن

بلوک دیاگرام کلی روش کنترل پیش‌بین جریان در شکل ۲-الف ارائه‌شده است. روش پیشنهادی در این بلوک کنترلی بعد از اندازه‌گیری جریان استاتور، ولتاژ لینک DC و موقعیت زاویه‌ای به ترتیب زیر اجرا خواهد شد:

۱- با توجه به موقعیت جریان محور عمودی و اختلاف مقدارش با جریان مرجع، ۳ بردار ولتاژ به‌منظور قرارگیری در تابع هدف انتخاب می‌شوند.

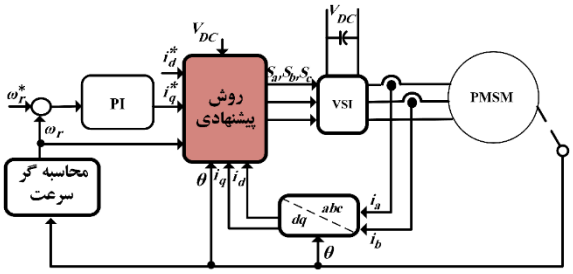
۲- از بین بردارهای ولتاژ انتخاب‌شده از مرحله‌ی قبل، بهترین بردار ولتاژ که منجر به بهترین جریان خروجی گردند توسط تابع هدف (۷) انتخاب می‌گردد.

۳- در حالت گذرا، درصورتی‌که نامعادله‌ی (۱۷) برقرار باشد، بردار ولتاژ دارای بزرگ‌ترین مؤلفه در راستای محور عمودی در کل مدت‌زمان کنترل به موتور اعمال می‌گردد.

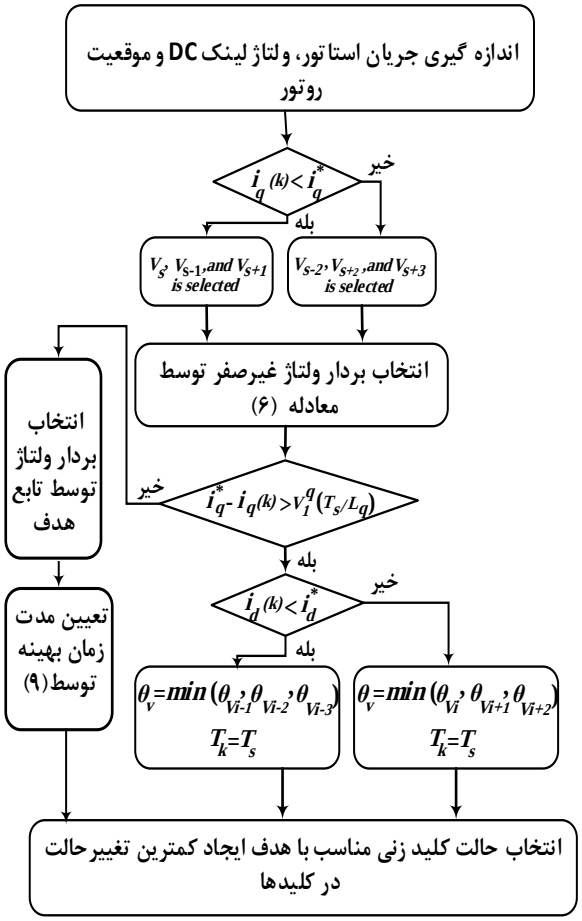
۴- برای حالت دائم، بردار ولتاژ انتخاب‌شده در مرحله‌ی ۲ به کار گرفته می‌شود و این بردار ولتاژ در مدت‌زمان T_k به‌دست‌آمده از رابطه‌ی (۱۶) به موتور اعمال می‌گردد.

۵- در انتها به‌منظور کاهش تلفات کلید زنی، حالت کلیدها طوری انتخاب می‌شود که کمترین تغییر را نسبت به حالت قبل داشته باشد.

روند اجرای برنامه در شکل ۲-ب ارائه گردیده است.



(الف)



(ب)

شکل (۲). الف- بلوک دیاگرام روش کنترل پیش‌بین جریان ب- فلوچارت مربوط به اجرای روش پیشنهادی

۴- ارزیابی چگونگی عملکرد روش پیشنهادی در مقایسه با روش سنتی و یک روش جدید دیگر

مشابه با روش پیشنهادی در این مقاله، مراجع [۱۱] و [۱۷] از استراتژی MPCC به‌عنوان یک راه‌حل ساده و مؤثر با کارایی مناسب استفاده کرده‌اند.

در این مقاله از این دو روش به‌منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی استفاده‌شده است. MPCC سنتی در [۱۱] به کار گرفته‌شده است به‌طوری‌که در این مرجع بهترین بردار ولتاژ از بین ۷ بردار ولتاژ توسط تابع هدف انتخاب می‌گردد. در ادامه بردار ولتاژ انتخاب‌شده در کل مدت‌زمان کنترل به موتور اعمال می‌گردد. این روش با توجه به اینکه روش شناخته‌شده‌ای است نیاز به توضیحات بیشتری ندارد.

در مرجع [۱۷] روش MPCC با استفاده از کنترل مدت‌زمان وظیفه به‌منظور بهبود پاسخ حالت دائم پیشنهادشده است. در این مقاله از تابع هدفی شبیه تابع هدف (۷) استفاده گردیده است. با این تفاوت که در تابع هدف مرجع [۱۷] نیاز است که تمامی بردارهای ولتاژ داخل تابع هدف قرار گیرند که این موضوع باعث افزایش حجم محاسبات خواهد گردید. بعد از انتخاب بردار ولتاژ درروش مرجع مدت‌زمان بهینه با استفاده از روش نسبتاً پیچیده و زمان‌گیری مبتنی بر مدولاسیون پهنای باند به دست می‌آید. روش پیشنهادی در این مقاله دارای مزایای زیر نسبت به روش ارائه‌شده در [۱۷] است.

۱) روش پیشنهادی در [۱۷] دارای حجم محاسبات نسبتاً زیادی است که این باعث طولانی شدن روند محاسبات و کند شدن پاسخ سیستم می‌گردد.

۲) درروش پیشنهادی در این مقاله با توجه به موقعیت زاویه‌ای i_q و اختلافش با مقدار مرجع، یک پیش انتخاب انجام‌گرفته و تنها سه بردار ولتاژ از مجموعه‌ی ۷ بردار ولتاژ مورد ارزیابی قرار می‌گیرند که این امر موجب کاهش حجم محاسبات و همچنین کمک به تصمیم‌گیری بهتر کنترل‌کننده می‌گردد. این در حالی است که درروش پیشنهادی [۱۷] هر ۷ بردار از مجموعه ولتاژ از طریق تابع هدف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۳) در [۱۷]، هیچ اشاره‌ای به روش کنترل در حالت گذرا نشده است به نحوه‌ی که درروش پیشنهادی این مرجع، عملکرد در حالت گذرا شبیه به حالت دائم است که این خود باعث کاهش سرعت دینامیکی در حالت گذرا خواهد گردید. این در حالی است که درروش پیشنهادی در این مقاله یک معیار ریاضی به‌منظور تشخیص حالت گذرا و عملکردی که منجر به سریع‌ترین پاسخ گردد ارائه‌شده است.

۴) درروش پیشنهادی در این مقاله از مفهوم کمینه‌سازی خطای RMS به‌منظور تعیین استفاده‌شده است روشی که دارای کارایی بهتری در مقایسه با روش به‌کاررفته شده در [۱۷] است.

۵- مطالعات شبیه‌سازی

در این بخش با استفاده از نرم‌افزار متلب نحوه‌ی عملکرد روش پیشنهادی در حالت دائم و گذرا مورد ارزیابی قرارگرفته است. به‌منظور اعتبار دهی به این مطالعات، علاوه بر بررسی عملکرد روش پیشنهادی، روش MPCC سنتی [۱۱] و روش پیشنهادشده در [۱۷] به‌عنوان مراجع مقایسه‌ای مورد ارزیابی قرارگرفته‌اند. در ادامه‌ی این مقاله به‌منظور ساده‌سازی، روش پیشنهادشده در [۱۱] و [۱۷] به ترتیب بانام‌های MPCC و MPCC۱ مرجع داده می‌شوند.

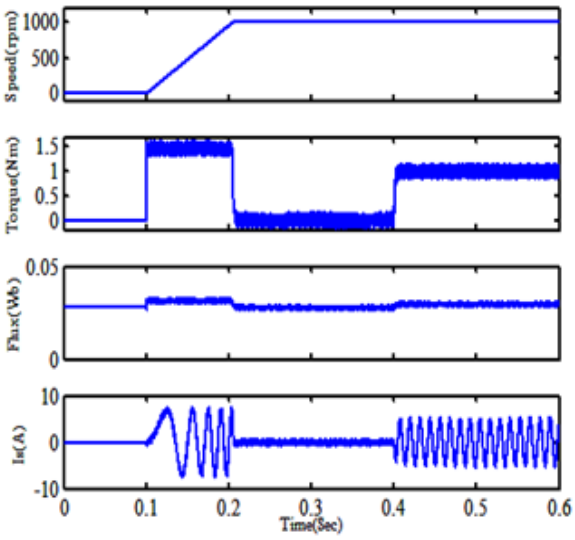
جدول(۱). مشخصات مورداستفاده در مطالعات شبیه‌سازی و تجربی

پارامتر	مقدار

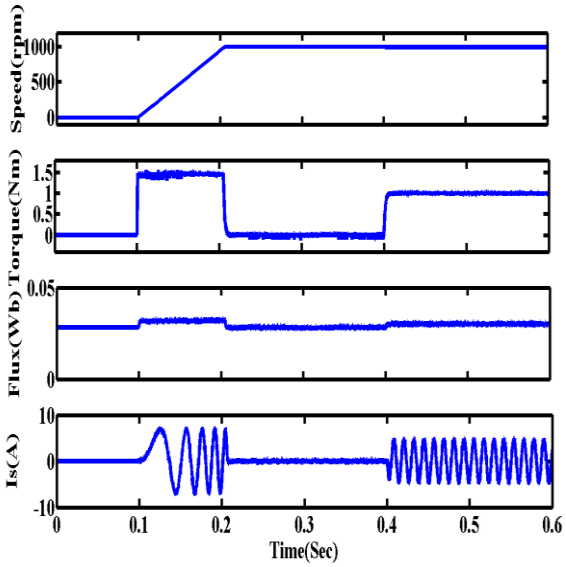
شار آهنربای دائم	۰/۰۱۰۲ (Wb)
مقاومت استاتور	۱/۱ (Ω)
اندوکتانس محور افقی و عمودی	۲/۱ (mH)
سرعت نامی	۲۵۰۰ (rpm)
گشتاور نامی	۰/۴ (Nm)
ولتاژ لینک DC	۴۰ (V)
ولتاژ نامی	۲۴ (V)
زمان نمونه‌برداری	۱۰۰ (μs)
تعداد جفت قطب	۵
توان موتور	۰/۱ (kw)

همچنین در تمامی شبیه‌سازی‌ها باهدف ایجاد شرایط یکسان، فرکانس نمونه‌برداری ۱۰ کیلوهرتز و از موتور PMSM با پارامترهای لیست شده در جدول ۱ استفاده‌شده است. در مطالعات انجام‌گرفته چندین نقطه‌نظر مهم همچون گشتاور، شار و جریان استاتور تحت عملکرد دینامیکی و طیف هماهنگ جریان، نوسان شار و گشتاور تحت شرایط ماندگار موردبررسی قرارگرفته است. در ادامه با جزییات بیشتر در رابطه با نتایج مطالعات بحث خواهد گردید.

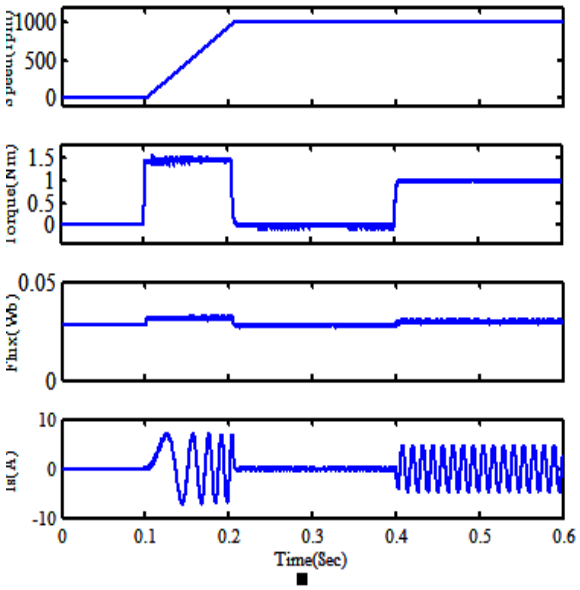
به‌عنوان اولین مرحله از شبیه‌سازی، به‌منظور بررسی عملکرد سه روش کنترلی، موتور با سناریوی تغییر سرعت و بار مورد آزمایش قرار می‌گیرد. بدین منظور در ابتدا سرعت مرجع موتور بر روی مقدار ۱۵۰rpm در حالت بدون بار تنظیم می‌شود. بعدازاینکه موتور در این شرایط به حالت ماندگار خود رسید؛ مرجع سرعت در زمان ۰/۱ ثانیه به مقدار نامی افزایش داده می‌شود. در انتها و به‌منظور تکمیل آزمون دینامیکی، بار ۰/۴ Nm در زمان ۰/۵ ثانیه به موتور اعمال می‌گردد. سناریوی فوق‌الذکر در شکل ۳ تا ۵ برای روش‌های مختلف نمایش داده‌شده است.



شکل (۳). نتایج شبیه‌سازی دینامیکی موتور با اعمال روش MPCC سنتی



شکل (۴). نتایج شبیه‌سازی دینامیکی موتور با اعمال روش MPCC[1]



شکل (۵). نتایج شبیه‌سازی دینامیکی موتور با اعمال روش پیشنهادی

۵-۱- پاسخ گشتاور، شار و جریان استاتور از راه‌اندازی تا حالت بار نامی

همان‌گونه که از شکل نیز مشخص است کیفیت پاسخ خروجی با به‌کارگیری هرکدام از روش‌ها تفاوت فراوانی دارد. به‌منظور ارزیابی کیفیت از روابط موجود در مرجع [۱۹] باهدف محاسبه‌ی نوسان شار و نوسان گشتاور استفاده‌شده و این معادلات در ادامه نیز ارائه گردیده است.

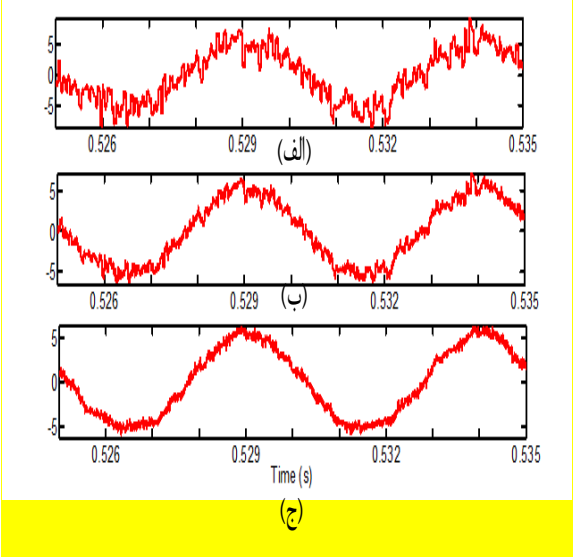
$$T_{rip} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(T_e(i) - T_{av})^2} \qquad (۲۰)$$

$$\psi_{rip} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\psi_s(i) - \psi_{av})^2} \qquad (۲۱)$$

در معادلات بالا N تعداد نمونه‌ها و T_{av} و ψ_{av} به ترتیب مقدار متوسط گشتاور و شار می‌باشند. در مطالعات انجام‌گرفته تحت ۶ درصد سرعت نامی (۱۵۰ دور بر دقیقه) و شرایط بدون بار، T_{rip} به‌دست‌آمده به ترتیب ٪۲۲، ٪۲۷.۲ و ٪۵۵ گشتاور نامی برای روش‌های MPCC پیشنهادی، MPCC۱ و MPCC سنتی است. علاوه بر آن، محاسبات تحلیلی نشان می‌دهد که مقدار ψ_{av} برای روش‌های MPCC پیشنهادی، MPCC۱ و MPCC حدود ۱/۵، ۱/۷ و ۲/۸ میلی وبر است. همان‌طور که از نتایج مشخص است T_{rip} و ψ_{av} درروش پیشنهادی ٪۶۰ و ٪۴۷ بهبود در مقایسه با روش سنتی پیداکرده است. همچنین این موضوع در شکل مشخص است که بعدازاینکه سرعت به مقدار نامی رسید بازهم نوسان گشتاور و شار درروش پیشنهادی نسبت به دو روش دیگر کمتر است. در ادامه‌ی این قسمت از شبیه‌سازی بعدازاینکه سرعت به مقدار نامی رسید بار نامی ۰/۴Nm به موتور در زمان ۰/۴ ثانیه اعمال می‌گردد به‌طوری‌که موتور در سرعت نامی تحت شرایط بار کامل قرار گیرد. در این مرحله از شبیه‌سازی همان‌گونه که در شکل نیز مشخص است روش پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به دو روش دیگر از خود نمایش داده است. به‌طوری‌که درروش پیشنهادی THD حدود ٪۵/۵۲ و نوسان گشتاور و شار به ترتیب ۰/۰۵۷Nm و ۲/۵ mWb به‌دست‌آمده است.

۵-۲- پاسخ گشتاور، شار و جریان استاتور از راه‌اندازی تا حالت بار نامی

طیف هماهنگ جریان استاتور برای سرعت ۱۰۰۰ rpm و گشتاور بار نامی در شکل ۶ نمایش داده‌شده است. همان‌گونه که از شکل مشخص است منحنی جریان مربوط به روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های دیگر به فرم سینوسی نزدیک‌تر است. به‌طوری‌که THD جریان به‌دست‌آمده حدود ٪۴/۶۲، ٪۶/۳۲ و ٪۱۱/۴۸ برای روش‌های MPCC پیشنهادی، MPCC۱ و MPCC است. این نتایج بدین معنی است که روش پیشنهادی منجر به بهبود THD در حدود ۲۷ و ۶۰ درصد نسبت به روش MPCC۱ و MPCC سنتی گردیده است.

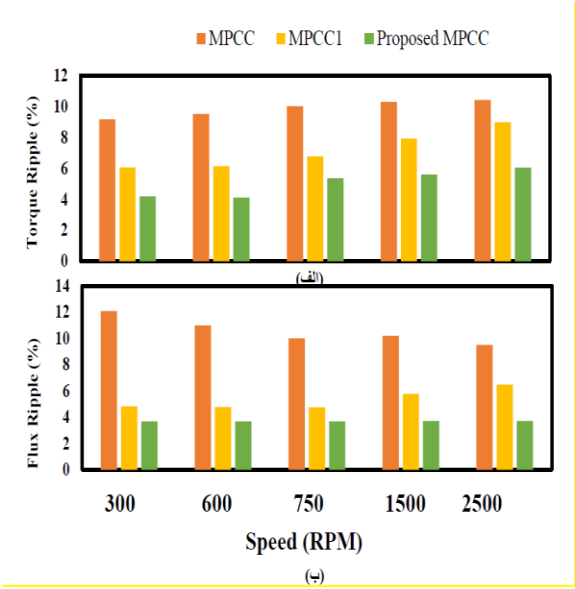


شکل (۶). طیف هماهنگ جریان استاتور برای سرعت ۱۰۰۰ rpm و گشتاور بار نامی الف) روش MPCC سنتی ب)روش MPCC۱ ج) روش پیشنهادی

۵-۳- نوسان گشتاور و شار در شرایط کار دائم

شبیه‌سازی‌های زیادی به‌منظور ارزیابی کیفیت گشتاور و شار برای سه روش در سرعت‌های مختلف و بارهای متفاوت انجام‌گرفته است. ولی با توجه به محدودیت صفحات مقاله تنها بخشی از آن‌ها در شکل ارائه گردیده است. مقدار نوسان گشتاور محاسبه‌شده از سرعت‌های کم تا سرعت نامی تحت بار کامل برای هر سه روش در شکل ۷ ارائه گردیده است. همان‌گونه که از شکل

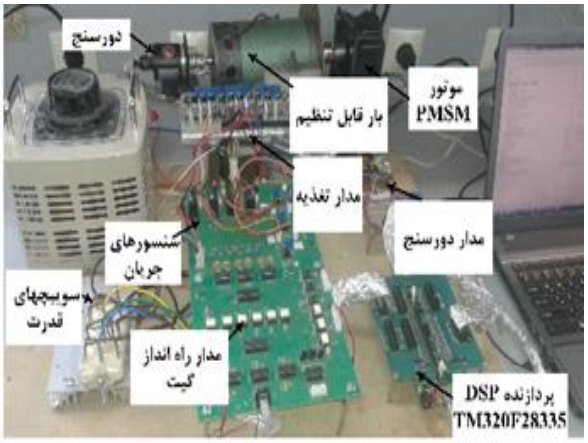
نیز مشخص است در سرعت‌های پایین مقدار نوسان گشتاور حدود ۴.۲ درصد از گشتاور نامی برای روش پیشنهادی است. این در حالی است که این مقدار برای روش MPCC۱ و MPCC حدود ۵/۳ و ۸/۵ درصد به‌دست‌آمده است. همچنین با توجه به شکل تا نصف سرعت نامی مقدار نوسان گشتاور به‌طور متوسط حدود ۰/۱۱، ۰/۰۷ و ۰/۰۶ نیوتن-متر برای روش‌های MPCC، MPCC۱ و MPCC پیشنهادی به‌دست‌آمده است. بنابراین با استفاده از روش پیشنهادی نوسان گشتاور در حدود ۵۰، ۳۰ و ۴۵ درصد کمتر از MPCC سنتی به ترتیب در سرعت‌های کم، متوسط و نامی گردیده است. در شکل ۷، تغییرات نوسان شار در سرعت‌های متفاوت برای هر سه روش نمایش داده‌شده است. مطابق با این شکل، در سرعت‌های پایین نوسان شار با به‌کارگیری روش پیشنهادی حدود ۲۰ و ۶۷ درصد نسبت به روش MPCC۱ و MPCC سنتی بهبودیافته است. درروش پیشنهادی از سرعت‌های پایین تا نصف سرعت نامی، نوسان شار حدوداً ثابت است اما درروش MPCC۱ مقدار نوسان تا ٪۵/۴۵ مقدار نامی افزایش داشته است. همچنین از نصف سرعت نامی تا سرعت نامی، روش پیشنهادی نسبت به دو روش MPCC و MPCC۱، نوسان شار حدود ۵۶ و ۳۵ درصد بهبودیافته است.



شکل (۷). مقدار نوسان گشتاور و شار محاسبه‌شده از سرعت‌های کم تا سرعت نامی تحت بار کامل برای هر سه روش

۶- مطالعات آزمایشگاهی

روش‌های MPCC سنتی، MPCC پیشنهادی و MPCC۱، بر روی یک میز آزمایشگاهی موتور PMSM و سیستم کنترل آن به‌منظور ارزیابی عملی هر یک از روش‌ها پیاده‌سازی شده است. مشخصات موتور این میز مشابه موتور PMSM استفاده‌شده در بخش شبیه‌سازی است. در آزمون‌های صورت گرفته مشابه با شرایط موجود در شبیه‌سازی، فرکانس نمونه‌برداری ۱۰ کیلوهرتز انتخاب‌شده است. همچنین یک پردازشگر سیگنال دیجیتال (DSP) مدل TM۳۲۰F۲۸۳۳۵ با CPU دارای فرکانس کاری ۱۵۰ مگاهرتز به‌عنوان پردازشگر اصلی استفاده‌شده است. در این میز آزمایشگاهی موقعیت روتور و سرعت آن توسط انکدر ۱۰۲۴ بیتی و جریان با استفاده از حس‌گر CNS اندازه‌گیری می‌شوند. در شکل ۸ این میز آزمایشگاهی نمایش داده‌شده است.



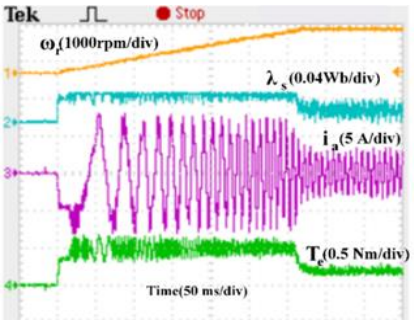
شکل (۸). میز آزمایشگاهی راه‌انداز و موتور

در روش‌های مبتنی بر پیش‌بینی مدل، به‌منظور دستیابی به یک کارایی بهتر در پیاده‌سازی عملی، لازم است که یک جبران سازی برای جبران تأخیر سیستم انجام شود [۹]. با توجه به این توضیحات، برای جبران این تأخیر، متغیرها در لحظه‌ی زمانی k+۲ به‌جای پیش‌بینی برای k+۱ پیش‌بینی می‌شوند. نتایج آزمون‌های عملی انجام‌شده شامل سرعت، گشتاور، شار و جریان تحت شرایط عملکردی متفاوت در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ ارائه گردیده است.

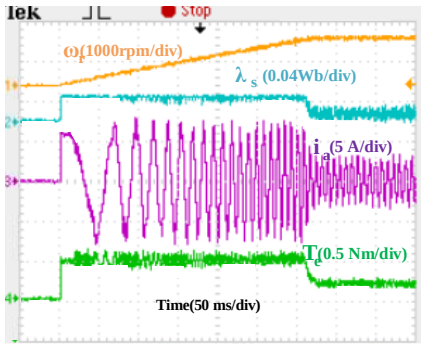
در شکل ۹ رفتار راه‌انداز برای ۳ روش در مدت‌زمان راه‌اندازی ارائه گردیده است. تحت این شرایط، در تمامی روش‌ها موتور ظرف مدت‌زمان ۰/۳ ثانیه به نصف سرعت نامی در حالت بدون بار می‌رسد. نوسان گشتاور ثبت‌شده برای روش پیشنهادی ۰/۰۳۱، برای MPCC۱ ۰/۰۳۷ و برای MPCC ۰/۰۵۸۶ نیوتن-متر بوده است. همچنین مقادیر ۰/۷، ۰/۸ و ۱/۷ میلی وبر برای ۳ روش ذکرشده به‌دست‌آمده است. بنابراین، روش پیشنهادی قادر به کاهش نوسان گشتاور در حدود ٪۴۵ و ٪۲۲.۵ در مقایسه با MPCC و MPCC۱ است. نوسان شار و THD نیز درروش پیشنهادی بهبود ۵۹ و ۵۷ درصدی نسبت به حالت استفاده از MPCC سنتی را پیداکرده‌اند.

در ادامه عملکرد موتور در حالت بار کامل و نصف سرعت نامی آزمایش‌شده و نتایج آن در شکل ۱۰ نمایش داده‌شده است. مقادیر ۰/۰۶۲ Nm، ۱/۵ mWb و ٪۸/۷۵ به ترتیب برای نوسان گشتاور، نوسان شار و THD مربوط به روش پیشنهادی ثبت‌شده

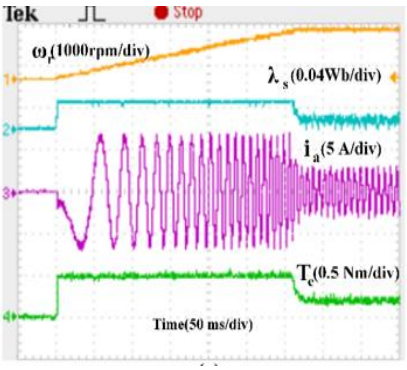
است. این در حالی است که این مقادیر ۰/۱۱ Nm، ۱/۸۷ mWb و ۱۴/۲ درصد برای روش MPCC حاصل‌شده است. بر پایه‌ی این نتایج، می‌توان این‌گونه بیان کرد که با به‌کارگیری روش پیشنهادی می‌توان به بهبود ۴۳، ۳۲ و ۲۹٪ برای نوسان گشتاور، نوسان شار و THD نسبت به روش MPCC۱ دست پیدا کرد. در ادامه‌ی آزمون‌های تجربی و به‌منظور ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده در حالت گذرا، سرعت پاسخ دینامیکی هر سه روش با اعمال یک‌بار خارجی ۰/۳ نیوتن-متر آزمون گردیده است. بدین منظور این بار خارجی به‌طور ناگهانی و در هنگامی‌که موتور در سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه در حال چرخش است به موتور اعمال گردیده است.



(الف)

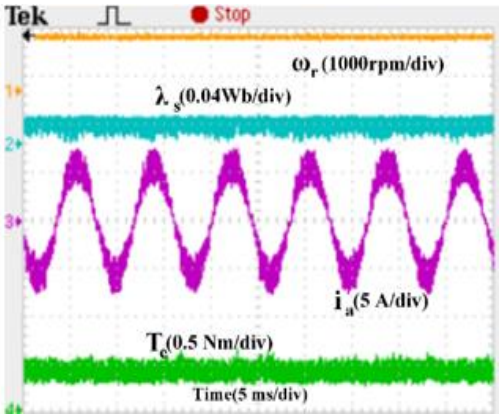


(ب)

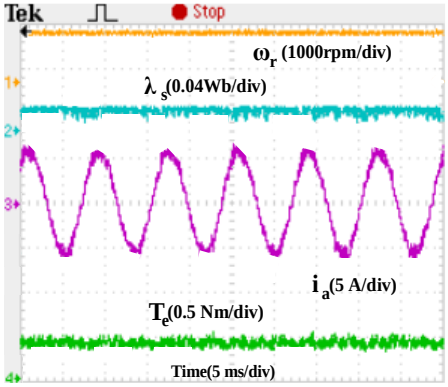


(ج)

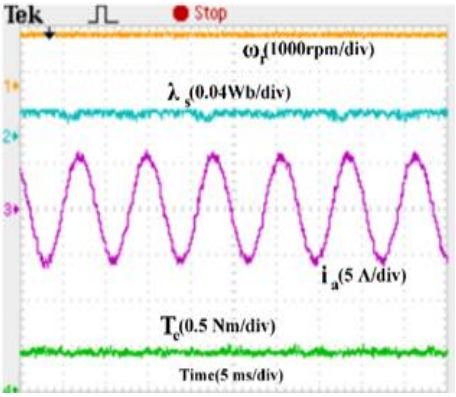
شکل (۹). نتایج عملی مربوط به حالت شتاب گیری موتور الف) روش MPCC سنتی ب)روش MPCC۱ ج) روش پیشنهادی



(الف)



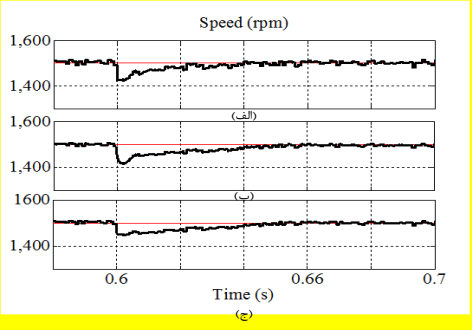
(ب)



(ج)

شکل (۱۰). نتایج عملی در حالت بار کامل و نصف سرعت نامی الف) روش MPCC سنتی ب)روش MPCC۱ ج) روش پیشنهادی

چگونگی عملکرد هرکدام از سه روش در شکل ۱۱ نمایش داده‌شده است. همان‌گونه که از شکل نیز مشخص است، هر سه روش در مدت‌زمان کوتاهی بعد از اعمال بار در زمان ۰/۶ ثانیه قادر به دنبال کردن مقدار مرجع هستند. به‌طوری‌که اندازه‌گیری‌های انجام‌شده مقادیر زمان نشست ثبت‌شده‌ی ۳/۸، ۴/۸ و ۴/۳۶ میلی‌ثانیه را به ترتیب برای روش‌های MPCC، MPCC۱ و MPCC پیشنهادی نمایش می‌دهد.



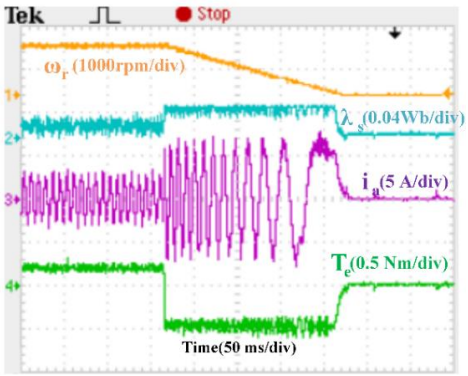
شکل (۱۱). نتایج عملی هنگام اعمال بار ۰/۳Nm الف) روش MPCC سنتی ب)روش MPCC۱ ج) روش پیشنهادی

زمان اجرای برنامه در هر مدت‌زمان کنترل برای انتخاب پردازنده‌ی مناسب موضوع مهمی است. لذا در این فعالیت عملی با استفاده از تایمرهای قرار داده‌شده در DSP این زمان اندازه‌گیری شده است. به‌طوری‌که زمان ثبت‌شده برای اجرای روش پیشنهادی $69\mu s$ و برای روش‌های MPCC۱ و MPCC سنتی $93\ \mu s$ و $64/6\ \mu s$ به ترتیب به‌دست‌آمده است. بنابراین زمان اجرای برنامه برای روش پیشنهادی از زمان اجرا درروش MPCC۱ کمتر بوده و این مقدار بیشتر از زمان اجرای برنامه توسط MPCC سنتی بوده است. در جدول ۳ نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی برای حالت‌های مختلف عملکردی ارائه گردیده است. همان‌گونه که از داده‌های جدول مشخص است روش پیشنهادی در حالت کار دائم عملکرد بهتری نسبت به دو روش دیگر از خود نشان داده است. همچنین روش پیشنهادی در حالت گذرا سریع‌تر از روش MPCC۱ عمل کرده است.

جدول (۳). نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی

پارامتر	حالت	MPCC پیشنهادی	MPCC۱	MPCC
نوسان گشتاور (نیوتن-متر)	راه‌اندازی	۰/۰۳۱	۰/۰۳۷	۰/۰۵۶
	بار کامل و نصف سرعت نامی	۰/۰۶۲	۰.۰۸۵	۰/۱۵
نوسان شار (میلی وبر)	راه‌اندازی	۰/۷	۰/۸	۱/۷
	بار کامل و نصف سرعت نامی	۱/۵	۱/۷۳	۲/۱
THD (%)	راه‌اندازی	۸/۷۵	۹/۲۵	۱۴/۲
	بار کامل و نصف سرعت نامی	۸/۷۵	۱۱/۵	۱۶/۵
زمان اجرای برنامه (میکروثانیه)	دائم	۶۹	۹۳	۶۴/۶
زمان پاسخ گذرا (میلی‌ثانیه)	گذرا	۴/۳۶	۴/۸	۳/۸

به‌منظور تائید و اعتبارسنجی کارایی روش پیشنهادی، پاسخ موتور در شرایط عملکرد ترمزی نیز مورد آزمایش قرارگرفته و نتیجه‌ی آن در شکل ۱۲ ارائه‌شده است. همان‌گونه که از شکل ملاحظه می‌گردد با اعمال روش پیشنهادی موتور عملکرد قابل‌قبول و پایداری را در این حالت از خود به نمایش گذاشته است.



شکل (۱۲). بررسی عملکرد روش پیشنهادی در شرایط عملکرد ترمزی

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، دو استراتژی کنترلی برای دستیابی به کنترل دقیق و سریع در راه‌انداز موتور PMSM پیشنهادشده است. درروش پیشنهادی در حالت گذرا، بردار ولتاژ باهدف رسیدن گشتاور خروجی به مقدار گشتاور مرجع در سریع‌ترین زمان ممکن انجام می‌پذیرد. در حالی که در حالت کار دائم استراتژی کنترلی طوری طرح‌ریزی‌شده است که بردارهای ولتاژ و زمان اعمال آن باعث کمینه شدن نوسان گشتاور و شار گردند. نتایج شبیه‌سازی و عملی نشان می‌دهد که با استفاده از روش پیشنهادی سرعت دینامیکی نزدیک به روش‌های مشابه سنتی است. همچنین این نتایج نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که کیفیت پاسخ خروجی از نظرگاه نوسان گشتاور، نوسان شار و THD بهبود فراوانی نسبت به دو روش دیگر یافته است. به‌طور نمونه، آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در حالت راه‌اندازی قادر به کاهش نوسان گشتاور در حدود ۴۵٪ و ۲۲.۵٪ در مقایسه با MPCC و MPCC۱ بوده است. نوسان شار و THD نیز درروش پیشنهادی بهبود ۵۹ و ۵۷ درصدی نسبت به حالت استفاده از MPCC سنتی را در حالت راه‌اندازی پیداکرده‌اند.

۸- مراجع

[۱] D.Liang, Z.Q.Zhu, J.Feng, L.Yifeng, and G.Shuying, "Initial Temperature Determination for Real-Time Thermal Models in Permanent Magnet Synchronous Machines," IEEE Transactions on Transportation Electrification, (Early Access), ۲۰۲٤, https://doi.org/۱۰,۱۱۰۹/TTE.۲۰۲٤,۳٤۱۹۰۱٤.

[۲] A.Brosch, O.Wallscheid, and J.Böcker,"Time-optimal model predictive control of permanent magnet

synchronous motors considering current and torque constraints," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. ۳۸, no. ۷,pp. ۷۹۴۵-۷۹۵۷, ۲۰۲۳. https://doi.org/۱۰,۱۱۰۹/TPEL .۲۰۲۳,۳۲۶۵۷۰۵.

[۳] R. M. Pindoriya; A. K. Mishra; B. S. Rajpurohit; R. Kumar, "Performance analysis of control strategies of permanent magnet synchronous motor," IEEE Region ۱۰ Conference (TENCON), ۲۰۱۶. https://doi.org/۱۰,۱۱۰۹/TENCON.۲۰۱۶,۷۸۴۸۶۴۵

[۴] T.A.Wolbank, A.Moucka, J.L.Machl, "A comparative study of field-oriented and direct-torque control of induction motors reference to shaft-sensorless control at low and zero-speed," Intelligent Control, IEEE International Symposium, pp. ۳۹۱- ۳۹۶, ۲۰۰۲. https://doi.org/۱۰,۱۱۰۹/ISIC.۲۰۰۲,۱۱۵۷۷۹۵.

[۵] D. Casadei, F. Profumo, A. Tani, "FOC and DTC: two viable schemes for induction motors torque control," IEEE Trans. Power Electron., vol. ۱۷, pp. ۷۷۹-۷۸۷, ۲۰۰۲. https://doi.org/۱۰,۱۱۰۹/TPEL.۲۰۰۲,۸۰۲۱۸۳.

[۶] M. Jin, J. Qiu, C. Shi, and R. Lin, "A fuzzy DTC method with a SVM defuzzification to permanent magnet synchronous machine," The ۳۰th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Korea, pp. ۳۱۹۶-۳۱۹۹, ۲۰۰۴. https://doi.org/۱۰,۱۱۰۹/IECON.۲۰۰۴,۱۴۳۲۳۲۴.

[۷] D. Xiao, and M. F. Rahman, "Sensorless Direct Torque and Flux Controlled IPM Synchronous Machine Fed by Matrix Converter over a Wide Speed Range," IEEE transactions on industrial informatics, vol. ۹, no. ۴, pp. ۱۸۵۵-۱۸۶۷, Nov. ۲۰۱۳. https://doi.org/۱۰,۱۱۰۹/TII.۲۰۱۲,۲۲۲۶۸۹۵.

[۸] J. Wang, H. Wang, T. Lu and D. Teng, "A Novel Direct Torque Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive," International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS, pp. ۱۱۰-۱۱۴, ۲۰۰۸. DOI:۱۰,۱۱۵۹۱/ijpeds.v۱i۲,۱۴۱

[۹] 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 Transactions on Power Electronics., vol. ۳۳, no.۳, pp. ۲۳۱۷-۲۳۲۹, ۲۰۱۷. https://doi.org/۱۰,۱۱۰۹/TPEL.۲۰۱۷,۲۶۹۰۳۰۴

[۱۰] Z.Zhanqing, C.Xia, Y.Yan, W.Zhiqiang and T.Shi, " Torque Ripple Minimization of Predictive Torque Control for PMSM with Extended Control Set'' IEEE Transactions on Industrial Electronics.,vol. ۶۴, no.۹, pp.۶۹۳۰-۶۹۳۹, ۲۰۱۷. https://doi.org/۱۰,۱۱۰۹/TIE.۲۰۱۷,۲۶۸۶۳۲۰

[۱۱] J. Rodriguez, J. Pontt, C. A. Silva, P. Correa, P. Lezana, P. Cortes, and U. Ammann, "Predictive current control of a voltage source inverter," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. ۵۴, no. ۱, pp. ۴۹۵ –۵۰۳, feb. ۲۰۰۷. https://doi.org/۱۰,۱۱۰۹/TIE.۲۰۰۶,۸۸۸۸۰۲.

[۱۲] J.Peng, M.Yao, "Overview of Predictive Control Technology for Permanent Magnet Synchronous Motor Systems" Applied Sciences, vol. ۱۳, no. ۱۰, P.۶۲۵۵, ۲۰۲۳. https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/app۱۳۱۰۶۲۵۵

[۱۳] Z.Yongchang, X.Donglin, J.Liu, S.Gao, and W.Xu, "Performance improvement of model-predictive current control of permanent magnet synchronous motor drives, " IEEE Transactions on Industry Applications, vol. ۵۳, no. ۴, p.p. ۳۶۸۳-۳۶۹۵, ۲۰۱۷. https://doi.org/۱۰,۱۱۰۹/TIA.۲۰۱۷,۲۶۹۰۹۹۸.

[۱۴] G.Lalezar, S.M.Saghaian Nejad and M.Mojiri, "Applying a modified model predictive current control method to improve surface-mounted permanent magnet synchronous motor drives performance in transient and steady-state operations" IET Electric Power Applications, Vol. ۱۴, no. ۱۰, p.p. ۱۸۸۶-۹۷, ۲۰۲۰. https://doi.org/۱۰,۱۰۴۹/iet-epa.۲۰۱۹,۰۹۳۰

[۱۵] B.Zhang, n.Pingjuan and X.Guo, J.He, "Fuzzy PID control of permanent magnet synchronous motor electric steering engine by improved beetle antennae search algorithm" Scientific Reports, vol. ۱۴. no.۱, p.p.۲۸۹۸, ۲۰۲۴. ۱۰,۱۰۳۸/s۴۱۵۹۸-۰۲۴-۵۲۶۰۰-۸.

[۱۶] Y. Li, D. Liu, T. Wu, W. Guo, X. Zhang and Y. Deng, "Model Predictive Current Control for Permanent Magnet Synchronous Motor based on Neural Network," *2023 IEEE* International Conference on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE), pp. ۱-۶, Wuhan, China, ۲۰۲۳, doi: ۱۰,۱۱۰۹/PRECEDE۵۷۳۱۹,۲۰۲۳,۱۰۱۷۴۵۰۳.

[۱۷] J. Zhu, Q. Duan, Q. Bao and Y. Mao, "Model predictive current control based on hybrid control set for permanent magnet synchronous motor drives," IET Power Electron, vol. ۱۷, pp. ۴۵۰_۴۶۲, ۲۰۲۴. https://doi.org/۱۰,۱۰۴۹/pel۲,۱۲۶۵۷.

[۱۸] S.K. Sul, "Control of electric machine drive systems" book, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, ۲۰۱۱. DOI:۱۰,۱۰۰۲/۹۷۸۰۴۷۰۸۷۶۵۴۱.

[۱۹] Y. Zhang and J. Zhu, "Direct torque control of permanent magnet synchronous motor with reduced torque ripple and commutation frequency," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. ۲۶, no. ۱, pp. ۲۳۵ _۲۴۸, ۲۰۱۱. https://doi.org/۱۰,۱۱۰۹/TPEL.۲۰۱۰,۲۰۵۹۰۴۷.