Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 13 - No. 2 – Summer 2024
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Review Article

An overview of brushless DC motor control methods (BLDCM)

Fereshteh mirzaeian[1], Mohammad Jafarifar[2,*]

1- Phd student, Department of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran,
2- Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Andimeshk Branch, Islamic Azad University, Andimeshk, Iran

Abstract: Nowadays, electric motors are widely used in the domestic, commercial and industrial sectors for the optimal consumption of electric energy, the design and construction of high-efficiency motors, etc. Meanwhile, brushless DC motors or (BLDCM) have been used in many industrial and non-industrial applications for reasons such as high efficiency, easy control method and high reliability, power density and high torque, and their use is increasing day by day. A very big advantage of brushless DC motors is high efficiency because these motors can be continuously controlled with maximum rotational force (torque), in contrast to brush motors, which reach maximum torque only at certain points of rotation. The second advantage of BLDCM controllability is that it can be controlled using a feedback mechanism to deliver exactly the desired torque and rotation speed. Brushless DC motors have high durability and produce low electrical noise due to the absence of brushes. In the use of brushed motors, the brush and commutator are worn out due to continuous moving contact and also create sparks, therefore BLDC motors are often preferred in cases where it is important to prevent electrical noise. In this article, various control methods of BLDC brushless DC motors are discussed and various aspects of these motors and simulation results are discussed.

Keywords: Brushless DC motors (BLDCM), speed control, sensorless control, torque pulse, electrolytic capacitor, Pulse high frequency

Received: 21 Jun. 2024
Revised: 22 Aug. 2024
Accepted: 31 Aug. 2024

*** Corresponding Author:** Mohammad Jafarifar

Citation: F. Mirzaeian, M. Jafarifar "An overview of brushless DC motor control methods (BLDCM)", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 13, no. 2, pp. 1-17, September 2024 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]

مقاله مروری

مروری بر روش‌های کنترل موتورهای DC بدون جاروبک (BLDCM)

فرشته میرزائیان [۱]، محمد جعفری‌فر [۲]

۱- دانشجوی دکتری، گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران mirzayan1370@gmail.com
۲- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد اندیمشک، دانشگاه آزاد اسلامی، اندیمشک، ایران mohammad.jafarifar@gmail.com
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۴/۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۱۰

چکیده: امروزه موتورهای الکتریکی کاربردهای گسترده‌ای در بخش خانگی، تجاری و صنعتی برای مصرف بهینه انرژی الکتریکی، طراحی و ساخت موتورهای پربازده، و ... مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند و گسترش روزافزون زیادی دارند در این بین موتورهای DC بدون جاروبک یا (BLDCM) با دلایلی همچون بهره بالا، روش کنترل آسان و قابلیت اطمینان زیاد، چگالی توان و گشتاور زیاد در بسیاری از کاربردهای صنعتی و غیرصنعتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و روز به روز استفاده از آنها بیشتر می‌شود. یک مزیت خیلی بزرگ موتورهای DC بدون جاروبک بهره‌وری بالا است زیرا این موتورها می‌توانند با حداکثر نیروی چرخشی (گشتاور) به طور پیوسته کنترل شوند در مقابل موتورهای براش فقط در نقاط معینی از چرخش به حداکثر گشتاور می‌رسند. دومین مزیت قابلیت کنترل BLDCM را می‌توان با استفاده از مکانیزم بازخورد کنترل کرد تا دقیقاً گشتاور و سرعت چرخش مورد نظر را تحویل دهند. موتورهای DC بدون جاروبک بدلیل نبود جاروبک از دوام بالا و تولید تولید سروصدای کم الکتریکی برخوردارند. در استفاده از موتورهای جاروبک‌دار، جاروبک و کموتاتور در اثر تماس مداوم متحرک فرسوده می‌شوند و همچنین جرقه‌هایی را ایجاد می‌کنند برای همین موتورهای BLDC اغلب در مواردی که جلوگیری از نویز برق مهم است ترجیح داده می‌شوند. در این مقاله به بررسی روش‌های مختلف کنترل موتورهای DC بدون جاروبک BLDC پرداخته می‌شود و جنبه‌های مختلف این موتورها و نتایج شبیه‌سازی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: موتورهای DC بدون جاروبک (BLDCM)، کنترل سرعت، کنترل بدون حسگر، ضربان گشتاور، خازن الکترولیتی، پالس فرکانس بالا

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۴/۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۶/۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۱۰

* **نام نویسنده مسئول**: دکتر محمد جعفری فر
نشانی نویسنده مسئول: اندیمشک، خیابان دانشگاه، بلوار دانشجو، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اندیمشک ، دانشکده فنی، گروه برق

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 2- Summer 2024

۱- مقدمه

موتورهای DC دارای بازدهی خیلی بالایی هستند ویژگیهای خاص آنها باعث شده که به آنها سرو و موتور اطلاق شود اما در این بین مشکلی که وجود دارد، وجود کمتاتور و جاروبک است که این باعث فرسودگی و تعمیرات آنها شده است. با قرارگیری کلیدهای استاتیکی به جای کموتاتور و جاروبک موتورهای جدیدی وارد بازار شدند که دیگر نیازی به تعمیرات دوره‌ای ندارند این دسته از موتورها، موتورهای DC[1] بدون جاروبک (BLDCM)[2] گفته می‌شود. بیشترین کابردهایی که موتورهای BLDC دارند در صنایع و سیستم‌های مکاترونیکی هست در سالهای اخیر روشهای کنترل پیشرفته‌ای مانند کنترل غیرخطی، کنترل بهینه، کنترل ساختار متغیر و کنترل تطبیقی به طور وسیعی برای کنترل سرعت موتور BLDC بکار رفته شده است اما این روش‌ها و راهکارها دارای مبنای نظری دشوار یا پیاده‌سازی بسیار سخت هستند. با توجه به اهمیت موتورهای BLDC و کاربرد روزافزون این نوع موتورها تحقیق‌های زیادی بر روی مسائلی مانند طراحی بهینه، سیستم‌های کنترل سرعت و همچنین روش-های کاهش ریپل گشتاور این نوع موتورها انجام شده است [۳]. در مرجع [۱] چندین روش کنترل موتور DC بدون جاروبک را مورد بررسی قرار داده است و نتایج شبیه‌سازی را مورد بررسی قرار داده است. مرجع [۲] روش‌های متداول کنترل موتورهای DC بدون جاروبک را مورد بررسی قرار داده است و کیفیت گشتاور را در هر روش عنوان کرده است. مرجع [۳] در این مقاله کنترل موتورDC بدون جاوبک را با استفاده از الگوریتم زنبور عسل (ABC)[3] را مورد بررسی قرار داده است نتایج شبیه‌سازی در محیط سیمولینک هم انجام شده است. در مرجع [۴] در این مقاله کاهش ضربان گشتاور در محرکه موتور DC بدون جاوبک بدون خازن الکترونیکی در لینک DC مورد بررسی قرار گرفته کاهش ظرفیت خازن الکترولیتی و یا استفاده از خازن فیلم سوئیچ‌شونده با ظرفیت پایین در لینک DC، یک روش کنترلی جدید بر مبنای کنترل همزمان سرعت و گشتاور بیان کرده است که استفاده از آن به میزان خیلی زیاد ریپل گشتاور ناشی از نوسانات ولتاژ در لینک DC را کم می‌کند. در مرجع [۵] در این مقاله کنترل سرعت هوشمند موتور DC بدون جاروبک در سیستم‌های مکاترونیکی مورد ارزیابی قرار داده است و از کنترلر PID[4] استفاده شده است به منظور بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده PID از الگوریتم‌های هوشمند PSO[5] و الگوریتم ژنتیک GA[6] استفاده کرده است که نتایج نشان می‌دهد که کارایی الگوریتم ژنتیک نسبت به PSO بهتر است. مرجع [۶] در این مقاله روش جدید برای کنترل سرعت موتور DC بیان شده که در آن یک سیستم استنتاج منطق فازی از طریق الگوریتم بهینه ازدحام ذرات (PSO) کاملاً بهینه‌سازی شده است این روش شاخص‌های گوناگون پاسخ زمانی مانند زمان صعود، زمان تاخیر و زمان نشست برای کنترل سرعت موتور DC بهتر می‌کند. [۷] در این مقاله یک روش بدون حسگر جدید برای موتورهای DC بدون جاروبک معرفی شده این روش بر پایه شار خط به خط است. در این مقاله حساسیت خطای زاویه کموتاسیون به صورت سه بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد تا میزان وابستگی آن به خطای اندازه‌گیری و تغییر پارامترهای موتور مشخص شود علاوه بر آن میزان کاهش گشتاور و بازده موتور ناشی از خطای زاویه کموتاسیون مورد مطالعه قرار می‌گیرد کارایی این روش به کمک نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است. در مرجع [۸] این مقاله یک کنترلرPID فازی بعنوان کنترلر موتور BLDC طراحی شده است این تاییدکننده نتایج تجربی است اینکه عملکرد کنترلی، کنترلر PID فازی نسبت به کنترلر PID متداول بهتر است. مدلسازی، شبیه‌سازی و کنترل موتور BLDC با استفاده از نرم‌افزار متلب در این مقاله انجام شده است. در مرجع [۹] این مقاله بر این اساس است که سیگنال ولتاژ سینوسی فرکانس بالا بر روی محور مستقیم برآورده شده سیستم مختصات دوار سنکرون تزریق شود بطوری که موتور بتواند اثر برجستگی اشباع شده تولید کند، کنترل سرعت پایین استاتیک غیر موقعیتی BLDC را با اضافه کرده حلقه‌های جریان و سرعت محقق کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که این روش می‌تواند موقعیت و سرعت را بخوبی در سرعت های کم و سرعت صفر شناسایی کند. در مرجع [۱۰] این مقاله به تشریح روش طراحی یک موتور DC بدون جاروبک بدون شیار[7] با اندازه کوچک می پردازد. علاوه بر این در طراحی این موتور، به منظور دستیابی به چگالی گشتاور بالا و همچنین سهولت ساخت، از سیم پیچ های شش ضلعی توزیع شده استفاده می شود. در مرجع [۱۱] این مقاله به تشریح عملکرد موتور DC بدون جاروبک (BLDC) پر شده با روغن در اعماق دریا و در محیط زیر آب می پردازد. در مرجع [۱۲] این مقاله، به بررسی وضعیت صدای موتورهای BLDC در حالت‌های خرابی مختلف در

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

نتیجه آزمایشی است که توسط محققان دانشگاه دل کائوکا در کلمبیا صورت گرفته است. در مرجع [۱۳] در این مقاله یک روش کنترل حالت غیرخطی با هدف رفع و کنترل بروز آشوب (بی نظمی) بر مبنای نظریه پایداری لیاپانوف مطرح شده است. در این پژوهش در ابتدا، ویژگی‌های دینامیکی معادله حالت سیستم BLDCM مورد تحلیل قرار گرفته و اثبات می شود که در برخی پارامترهای خاص، پدیده آشوب بروز می کند. در نهایت بر اساس نظریه پایداری لیاپانوف، کنترل‌کننده بازخورد غیرخطی طراحی شده و اثبات می‌شود که روش کنترل می‌تواند سیستم را به صورت مجانبی تا نقطه تعادل به پایداری برساند. در مرجع [۱۴] این مقاله یک رویکرد ترکیبی برای تنظیم موتورهای DC بدون جاروبک بدون سنسور (BLDC) با استفاده از مبدل سلف اولیه تک سر (SEPIC) [۸]ارائه شده است. روش پیشنهادی ترکیبی از بهینه‌سازی عقاب طلای (GEO) [۹] و شبکه عصبی تابع پایه شعاعی (RBFNN)[۱۰] بوده و از این رو GEO-RPFNN نامیده می‌شود. در این مطالعه برای بهبود کنترل سرعت و گشتاور، مبدل سلف اولیه تک سر بدون پل اصلاح شده پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۵] در این مقاله برای کنترل موقعیت محدود فیزیکی یک موتور DC بدون جاروبک (BLDC) ، طراحی یک کنترل کننده پسگام با کنترل سطح پویا (DSC) [۱۱] بر اساس یک تابع مانع لیاپانوف نامتقارن(ABLF) [۱۲] انجام شده است. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که روش کنترل پیشنهادی همراه با یک لایه SOC [۱۳] به پایداری و عملکرد سیستم حلقه بسته برای دوره‌های عملیات طولانی منجر می‌شود. در مرجع [۱۶] این مقاله، یک روش یکپارچه‌سازی نیروی ضد محرکه (EMF معکوس) [۱۴] یکی از روش‌های کموتاسیون غیرمستقیم EMF معکوس مطرح شده است که برای کنترل موتور جریان مستقیم بدون جاروبک بدون سنسور (BLDC) مورد استفاده قرار می‌گیرد. از اینرو، تکنیک کنترل پیشنهادی با استفاده از متلب / سیمولینک در کتابخانه Simscape انجام شده است. اثربخشی تکنیک پیشنهادی توسط نتایج شبیه‌سازی مورد تائید قرار گرفته است. در مرجع [۱۷] این مقاله به تحلیل عملکرد درایو های موتور DC بدون جاروبک (BLDC) بدون سنسور تغذیه شده با مبدل ضریب توان باک بوست و کاک می پردازد. عملکرد درایو با استفاده از مبدل‌های انتخابی در سرعت‌های مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ضریب توان واحد با شاخص‌های کیفیت توان قابل قبول در محدوده‌های توصیه شده استاندارد IEEE 519 بدست می‌آید. در مرجع [۱۸] این مقاله برای تخمین سرعت مکانیکی روتور موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک (BLDC) از روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین (ML) [۱۵] استفاده شده است. یک روش تخمین ترکیبی با استفاده از تخمین‌گر سرعت توسعه‌یافته مبتنی بر ML با تخمین‌گر مبتنی بر EKF [۱۶]پیشنهادی مطرح شده است و عملکرد تخمین آن در شبیه‌سازی در سیستم محرکه DTC [۱۷] مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در مرجع [۱۹] این مقاله عملکرد تکنیک کنترل منطق فازی در هنگام استفاده از موتور DCبدون جاروبک (BLDC) مورد بررسی قرار می‌گیرد. از آنجائیکه این نوع موتورها دارای ماهیت غیر خطی هستند، از اینرو طرح کنترل PID کلاسیک در دستیابی به عملکرد حالت پایدار مورد نظر با شکست مواجه می شود. . این مقاله، عملکرد جامع این نوع از کنترل‌کننده‌های مبتنی بر منطق فازی را مورد بررسی قرار می‌دهد. در مرجع [۲۰] این مقاله یک پیکربندی کنترل‌کننده هوشمند ترکیبی برای کنترل سرعت بهینه موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک (BLDC) در یک سیستم جمع‌آوری داده‌های کنترل نظارتی کارخانه (SCADA)[۱۸] ارائه شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که کنترل‌کننده ترکیبی (عصبی فازی) از لحاظ عملکرد، ثبات، قابلیت ردیابی مسیر سرعت، پاسخ سریع و سهولت اجرا دارای برتری است. مرجع [۲۱] بررسی‌های صورت گرفته حاکی از آن است که، کشش خودروی برقی موتور جریان مستقیم بدون جاروبک (BLDCM) به دلیل اتصال شار مغناطیسی، نسبت قدرت به وزن و غیره در مقایسه با سایر خودروهای برقی بهتر است. شایان ذکر است که طرح معمول کنترل جهت‌گیری میدان (FOC) [۱۹]با سنسور برای BLDCM با کاستی‌های اندکی نظیر انحراف ویژگی‌های جریان و رانش همراه است. در این مقاله، یک سنسور FOC کمتر در زمینه BLDCM پیشنهاد شده است. EMF معکوس و سرعت دستگاه با استفاده از کنترل‌کننده حالت لغزشی که به عنوان بازخورد به قسمت کنترل‌کننده موتور وارد می‌گردد، برآورد می‌شود. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که همراه با تغییر سرعت مرجع، سرعت ماشین کنترل می‌شود. نتایج بدست آمده با شبیه‌سازی و ارزیابی تجربی تایید می‌شوند. در مرجع [۲۲] این مقاله یک بهینه‌ساز جفت‌گیری جدید بارناکل با کنترل‌کننده مبتنی بر عصبی فازی تطبیقی(BMO-ANFC)[۲۰] برای افزایش طول عمر در مرحله الکترونیک قدرت برای درایو موتورDC بدون جاروبک پیشنهاد شده است. تکنیک BMO-ANFC پیشنهادی برای بهینه‌سازی طراحی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 2- Summer 2024

شبکه مدل ANFC به‌کار می‌رود. نتایج تجربی عملکرد بهبود یافته تکنیک BMO-ANFC را در مقایسه با کنترل‌کننده‌های پیشرفته اخیر مورد تائید قرار می‌دهد. در مرجع [۲۳] این مقاله یک توپولوژی سیستم پمپاژ آب خورشیدی با استفاده از یک شبکه عصبی تابع پایه شعاعی (RBFNN)[۲۱] برای ردیابی موثر حداکثر نقطه توان(MPP)[۲۲] در یک آرایه فتوولتائیک PV [۲۳] تغذیه شده درایو موتور (BLDC) پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۴] این مقاله ، یک رویکرد تنظیم کنترل‌کننده تطبیقی جایگزین غیرمستقیم جدید بر اساس روش سطح پاسخ (SIACTA-RSM)[۲۴] برای پرداختن به محدودیت‌های بار محاسباتی پیشنهاد شده است. رویکرد پیشنهادی در زمینه کنترل کننده تنظیم سرعت یک موتور جریان مستقیم بدون جاروبک با هدف کاهش خطای تنظیم سرعت و مصرف برق سیستم کنترل مورد آزمایش قرار گرفته است. عملکرد سیستم حلقه بسته و زمان محاسباتی مورد نیاز حاصل توسط SIACTA-RSM[۲۵] پیشنهادی با عملکرد یکIACTA-GDM به خوبی اثبات شده مورد مقایسه قرار می‌گیرد. آمار توصیفی و استنباطی و همچنین مقایسه‌های گرافیکی حاکی از آن است که عملکرد سیستم حاصل با پیشنهاد SIACTA-RSM به اندازه رویکرد IACTA-GDM رقابتی بوده و میانگین اختلاف بین نتایج را تا ۳٫۱۸٪ حفظ کرده و همچنین به کاهش بار محاسباتی IACTA-GDM تا ۹۰٪ . منجر می‌شود. در مرجع [۲۵] هدف از این مقاله، بهبود عملکرد مدار مبدل تقویت کنندهDC–DC وکاهش نوسانات ولتاژ است. روش پیشنهادی شامل مدل‌سازی ریاضی مدار در قالب توابع انتقال و بهینه‌سازی مدار مبدل تقویت‌کننده DC-DC از طریق کنترل کننده تناسبی مشتقی انتگرالی (PID) و الگوریتم کرم شب تاب است. نتایج آزمایش شبیه‌سازی حاکی از بهبود عملکرد پاسخ گذرا مدار مبدل DC-DC به عنوان درایور برای موتور BLDC است. مرجع [۲۶] در این مقاله، یک کنترلر جدید برای موتورDC بدون جاروبک (BLDC) ارائه شده است. شایان ذکر است که، کنترل‌کننده پیشنهادی مبتنی بر سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی، (ANFIS) [۲۶] بوده و تحلیل دقیق از طریق شبیه‌سازی با استفاده از جعبه ابزار سیمولینک در محیط متلب انجام می‌شود. عملکرد موتور با کنترل‌کننده ANFIS پیشنهادی با کنترل‌کنندهٔ تناسبی-انتگرالی (PI)، کنترل‌کننده PID تنظیم‌شده فازی و کنترل‌کننده ساختار متغیر فازی تحلیل شده و مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در مرجع [۲۷] دینامیک موتور DC بدون جاروبک (BLDCM)، نوعی موتور سنکرون آهنربای دائم (PMSM) [۲۷] است که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مدل دینامیکی BLDCM با مدل PMSM که غالباً استفاده می‌شود مورد مقایسه قرار می‌گیرد. انتقال BLDCM به حالت بی‌نظمی هم در سطح محلی از طریق دوشاخه های محلی و هم در سطح جهانی از طریق مجموعه‌های چندگانه و ثابت مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، زمان گذرای آشوب پنهان با دو روش نظیر سطوح سرعت بحرانی (شتاب) و الگوریتم روش BFGS[۲۸] (روشی در محاسبات عددی بهینه‌سازی (ریاضیات) است) بهبود می‌یابد. در مرجع [۲۸] این مقاله در ابتدا برای هارمونیک‌های موجی گشتاور یک عبارت ریاضی به دست می‌آید. سپس برای یک موتور BLDC غیر ایده‌آل با محتویات هارمونیک شناخته شده EMF معکوس ، دامنه‌های جریان مرجع مربوطه که برای حذف برخی از هارمونیک‌های انتخابی ریپل گشتاور ضروری است، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

یکی از روشهای کنترل بدون حسگر موتور DC بدون جاروبک استفاده از نقاط گذر از صفر نیروی ضدمحرکه است. [۳۱-۲۹]. از آنجا که سیگنال نیروی ضد محرکه در دسترس نیست، نقاط گذر از صفر از روی ولتاژهای فیلتر شده ترمینال موتور شناسایی می‌شوند. هر چه سرعت افزایش می‌یابد، فیلترها تأخیر بیشتری در مدار وارد می‌کنند که باعث می‌شود زمان‌های کلیدزنی به درستی تشخیص داده نشوند. یکی دیگر از روش‌های بدون سنسور کنترل بدون حسگر موتور DC بدون جاروبک، استفاده از هارمونیک سوم نیروی ضد محرکه است. نقاط گذر از صفر هامونیک سوم نیروی ضد محرکه، منطبق بر نقاط کموتاسیون است. [۳۴-۳۲]. در مراجع [۳۵-۳۸] موقعیت روتور به کمک انتگرال‌گیری از نیروی ضدمحرکه فاز خاموش تشخیص داده می‌شود. این روش حساسیت کمتری به نویز کلیدزنی از خود نشان می‌دهد، اما هنوز با مشکلات ناشی از فیلتر مواجه است. در مراجع [۴۰و۳۹] از جریان دیودهای هرزگرد برای تشخیص لحظات کموتاسیون استفاده می‌شود. بزرگترین اشکال این روش، استفاده از شش منبع تغذیه ایزوله است که برای تشخیص شارش جریان در دیود هرزگرد استفاده می‌شود. لحظات کموتاسیون را می‌توان از روی شار پیوندی فاز [۴۲و۴۱] یا شار پیوندی آهنربای دائم [۴۴و۴۳] بدست آورد. در هر دو روش، شار پیوندی تابعی از سیگنال‌های جریان و موقعیت رتور است. برای تخمین شار پیوندی، ولتاژها و جریان‌های فاز اندازه-

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

گیری می‌شوند. از آنجا که نقطه خنثی موتور در دسترس نیست، این روش با مشکلات اندازه‌گیری ولتاژ فازها مواجه است. در لحظات کموتاسیون شیب جریان لینک DC تغییر می‌کند. از این رو در مرجع [۴۵] از این پدیده، برای کنترل بدون حسگر موتورهای DC بدون جاروبک استفاده می‌شود. در مراجع [۴۷و۴۶] برای تشخیص نقاط کموتاسیون، تابع شار جدیدی معرفی شده است. این روش مستقل از سرعت است، اما از آنجایی که در تابع مذکور از مشتق‌گیر استفاده شده است روش مذکور نسبت به نویز حساس است. در مراجع [۴۹و۴۸] از تغییرات اندوکتانس استاتور برای تشخیص مکان رتور استفاده شده است. از آنجایی که در موتورهای قطب صاف، تغییرات اندوکتانس استاتور صرفاً ناشی از اشباع شار مغناطیسی است، این روش برای این گونه موتورها استفاده نمی‌شود. تشخیص مکان روتور با استفاده از رویت‌گرهای در مراجع [۵۰-۵۲] بررسی شده است. این روش پیچیده می‌باشد زیرا به مدل ریاضی موتور نیازمند است. هدف این مقاله بررسی روش‌های کنترل موتورهایBLDC و تحلیل انواع روش‌های کنترلی که برای موتورهای BLDC استفاده می‌شود، مانند کنترل جریان لینک dc، کنترل مستقیم جریان فازها، کنترل مستقیم گشتاور، روش کنترل بدون حسگر سرعت پایین در موتور dc بدون جاوبک بر اساس تزریق ولتاژ فرکانس بالای پالس و ... مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش دوم فرمولبندی و اصول موتورهای BLDC بیان شده است بخش سوم اینورترهای مورد استفاده در محرکه‌های موتورBLDC مورد بررسی قرار داده شده است در بخش چهارم به بررسی چند روش کنترل موتورهای DC بدون جاروبک پرداخته شده و در بخش پنجم نتیجه‌گیری این مقاله بیان شده است.

۲- فرمولبندی و اصول موتورهایBLDC

برای موتور DC بدون جاروبک قطب پنهان، فرض می‌شود که نیروی محرک الکتریکی استاتور طبق قانون سینوسی تغییر می‌کند و تأثیر اشباع مغناطیسی، هیسترزیس و جریان گردآبی را نادیده می‌گیرد. بعد از تبدیل کلارک و پارک موتور DC بدون جاروبک در دستگاه مختصات استاتیک سه فاز، دیاگرام‌های بردار فضای دستگاه مختصات استاتیک دو فاز، دستگاه مختصات دوار دو فاز و موقعیت روتور بدست می‌آیند. دیاگرام شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است. محور سیم‌پیچ فاز A، به صورت محور مرجع دستگاه مختصات استاتیک سه فاز استاتور تنظیم می‌شود که با محور در دستگاه مختصات استاتیک دو فاز، باز ترکیب می‌شود. محور میدان مغناطیسی تحریک موتور به صورت محور d تعریف می شود و فاز با ۹۰ درجه الکتریکی جلوتر از محور d است که آنرا محور q می‌نامند. دو محور، نسبت به همدیگر متعامد هستند که به آن دستگاه مختصات دوار سنکرون دو فاز گفته می‌شود.

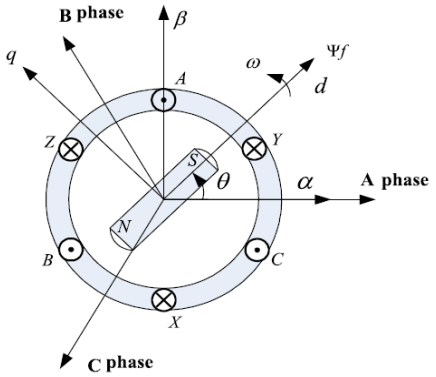
معادلات شار پیوندی و ولتاژ در دستگاه مختصات دوار سنکرون دو فاز dq به صورت معادله ۱و ۲ نوشته می‌شوند:

$$\begin{bmatrix}\psi_d\\ \psi_q\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}L_d & 0\\ 0 & L_q\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_d\\ i_q\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\psi_f\\ 0\end{bmatrix} \quad (۱)$$

$$\begin{bmatrix}u_d\\ u_q\end{bmatrix}=r_S\begin{bmatrix}i_d\\ i_q\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}p & -\omega_r\\ \omega_r & p\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\psi_d\\ \psi_q\end{bmatrix} \quad (۲)$$

که در آن، ψ_d، ψ_q، L_d و L_q، شار پیوندی و اندوکتانس دستگاه مختصات دوار dq می باشند، ψ_f شار پیوندی روتور مغناطیس دائم است، ω_r سرعت زاویه ای الکتریکی دوران سنکرون است، r_S مقاومت استاتور موتور است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 2- Summer 2024



شکل(۱): شماتیک موتور BLDC در دستگاه مختصات دوار [۹]

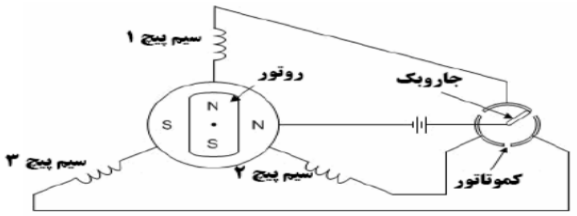
Figure (1): Schematic of the BLDC motor in rotational reference frame [9]

برای موتور DC بدون جاروبک قطب پنهان، مدل ریاضیاتی گفته شده در بالا را می‌توان به صورت فرمول ۳ تبدیل کرد[۹]:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & -\omega_r L \\ \omega_r L_d & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \psi_f \end{bmatrix} \quad (۳)$$

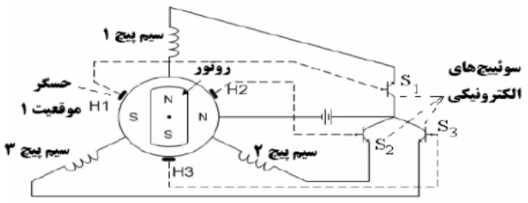
۲-۱- اصول عملکرد موتور BLDC

برای معرفی بهتر موتور BLDC، بهتر است وجه تشابه و افتراق آن به دو موتور DC و PMSM توضیح داده شود. شکل (۲ الف) یک موتور DC با سیم‌پیچی در آرمیچر ساکن همراه با آهنربای دائم دوار به عنوان تحریک را نشان می‌دهد. کموتاتورها ثابت بوده و جاروبک می‌چرخد اگر به جای جاروبک و کموتاتور که به عنوان کلید مکانیکی قطع و وصل جریان در فازها عمل می‌کنند، از سه سوئیچ الکترونیکی استفاده شود و زمان قطع و وصل جریان در فازها نیز توسط سه حسگر موقعیت که به فاصلهٔ ۱۲۰ درجه از یکدیگر قرار دارند، تشخیص داده شود، موتور BLDC پایه‌ای به دست می‌آید که در شکل (۲ب) نشان داده شده است.



شکل (۲ الف): موتور DC کموتاتوری با آرمیچر ساکن و تحریک آهن‌ربای دائم [۱]

Figure (2a): Commutator DC motor with stationary armature and permanent magnet excitation [1]



شکل (۲ ب): موتور BLDC سه فاز [۱]

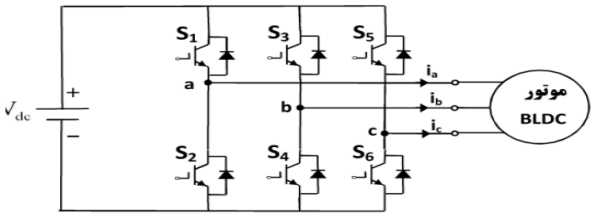
Figure (2b): 3 phase BLDC motor [1]

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

موتورهای BLDC تجاری اغلب به صورت سه فاز طراحی و ساخته شده‌اند. این موتور دارای روتور آهن‌ربای دائم همانند موتور PMSM بوده و استاتور آن نیز دارای سیم‌پیچی توزیع شدهٔ سه‌فاز همانند استاتور موتورهای القایی و سنکرون است. سه حسگر موقعیت اثر هال نیز به فاصلهٔ درجهٔ الکتریکی ۱۲۰ درجه الکتریکی از یکدیگر و بین سیم‌پیچ‌های یک سری از قطب‌های استاتور و در مجاورت روتور قرار دارند و با هر بار تغییر قطب روتور از مقابل آن، سیگنال خروجی‌اش تغییر حالت می‌دهد.
تفاوت سیم‌پیچی استاتور یک موتور BLDC با موتورهای القایی و PMSM آن است که در موتور BLDC سیم‌پیچی متمرکز بوده یا بصورت یکنواخت توزیع می‌شود، ولی در سایر موتورهای AC توزیع سیم‌پیچی حتی‌الامکان نزدیک به سینوسی است. در نتیجه ولتاژهای القا شده در سیم‌پیچ‌های استاتور به شکل ذوزنقه‌ای هستند [۱].

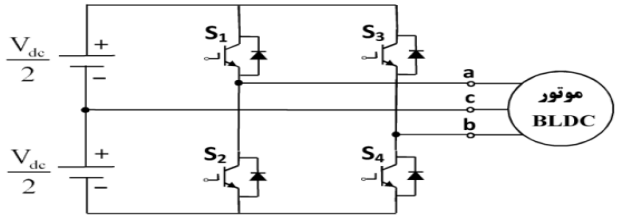
۳- اینورترهای مورد استفاده در محرکه موتور BLDC

موتور BLDC بدلیل انجام عمل کموتاسیون جریان به صورت الکترونیکی، برخلاف موتورهای القایی و سنکرون حتی در کاربردهای سرعت ثابت نیز نیاز دائمی به مبدل توان (اینورتر) دارد. با توجه به نوع کاربرد، قابلیت اطمینان، هزینه ساخت، رفتار دینامیکی و عوامل دیگر، اینورترهای مختلفی برای موتور BLDC پیشنهاد شده‌اند. کنترل اینورتر با کلیدزنی مناسب سوئیچ‌ها روی ولتاژ لینک dc به نحوی انجام می‌شود تا جریان هر فاز در بازه‌های ۱۲۰ درجه ثابت باقی بماند. اینورترهای پیشنهاد شده برای موتورهای BLDC به دو دسته کلی تمام‌موج و نیم‌موج تقسیم‌بندی می‌شوند. در اینورترهای تمام‌موج جریان هر فاز دارای هر دو مقدار مثبت و منفی است. اینورترهای تمام‌موج در دو نوع شش سوئیچه و چهار سوئیچه وجود دارند که در شکل (۳) نمایش داده شده‌اند. اینورتر چهار سوئیچه اگر چه ظاهراً به لحاظ پیچیدگی سخت‌افزاری ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر است، اما دارای مشکلاتی همچون پیچیدگی روش کنترلی، وجود دو خازن در لینک DC و از همه مهم‌تر کاهش بهره‌وری کامل از موتور است. لذا در محرکه‌های صنعتی این موتورها اغلب از ساختار شش سوئیچه استفاده می‌شود. اما در اینورترهای نیم‌موج، جریان فازها فقط دارای مقدار مثبت هستند. اینورترهای نیم‌موج شامل انواع مختلفی هستند که عبارت‌اند از نوع Split-Supply که حداقل تعداد سوئیچ در هر فاز را داراست، نوع انباره خازنی که دارای چهار سوئیچ است و نوع نیم‌موج با ولتاژ لینک dc متغیر. جهت جریان در اینورترهای نیم‌موج یک‌طرفه است اما جهت توان در آنها دوطرفه بوده و قابلیت عملکرد چهار ربعی را هم دارند. اینورترهای نیم‌موج اگر چه دارای ساختار ساده‌تری هستند اما چون در یک دوره ۳۶۰ درجه، هر فاز فقط ۱۲۰ درجه هدایت می‌کند و همچنین در بعضی انواع آن تنها از نصف ولتاژ لینک dc استفاده می‌شود، دارای بهره‌وری پایینی بوده و از ظرفیت نامی موتور استفاده نمی‌کنند. لذا کاربرد آنها به توان‌های خیلی پایین در حد کسری از اسب بخار محدود مانده است [۲].



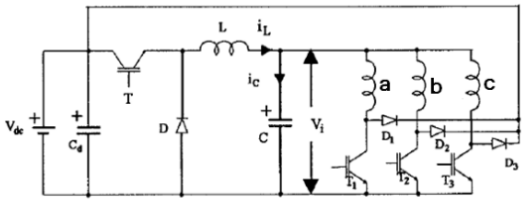
شکل (۳ الف): اینورتر تمام موج با شش سوئیچه [۲]
Figure (3a): Full wave inverter with 6 switch [2]

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 2- Summer 2024



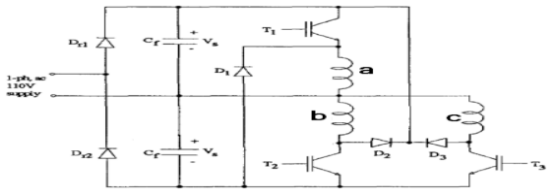
شکل (۳ب): اینورتر تمام موج با چهار سوئیچه [۲]

Figure (3b): Full wave inverter with 4 switch [2]



شکل (۳ ج): اینورتر نیم‌موج با ولتاژ لینک dc متغیر [۲]

Figure (3c): Half wave inverter with variable DC link voltage [2]



شکل(۳ د) اینورتر نیم‌موج نوع Split-supply [۲]

Figure (3d): Split-supply type of half wave inverter [2]

شکل(۳): انواع مختلف اینورترهای مورد استفاده در سیستم موتور BLDC [۲]

Figure (3): Different types of inverter used in BLDC motor system [2]

۴- روش‌های کنترل موتور BLDC

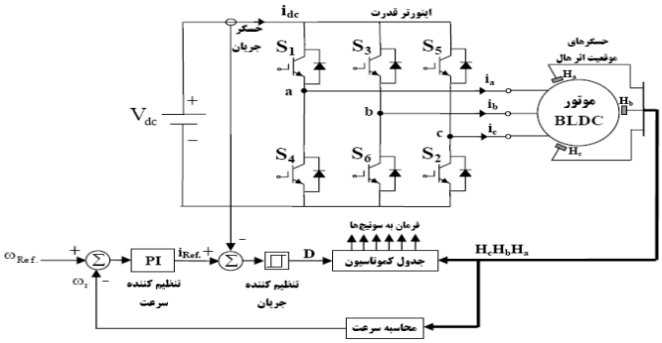
مزیت عمدهٔ موتورهای BLDC قابلیت کنترل آسان سرعت- گشتاور در آنهاست که همانند موتورهای DC فقط نیازمند تغییر دامنهٔ جریان استاتور است. روش‌های مختلفی برای کنترل سرعت-گشتاور موتورهای BLDC پیشنهاد شده که در این بخش به اهم آنها که در درایوهای تجاری نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند، پرداخته می‌شود. [۱] این روش‌ها عبارتند از ۱) کنترل جریان لینک dc ۲) کنترل مستقیم جریان فازها ۳) کنترل مستقیم گشتاور ۴) کنترل موتور BLDC به روش کنترل برداری بهبود یافته ۵) روش کنترل بدون حسگر سرعت پایین در موتور dc بدون جاوبک بر اساس تزریق ولتاژ فرکانس بالای پالس ۶) کنترل موتور DC بدون جاروبک با استفاده از الگوریتم زنبور عسل ABC

۴-۱- کنترل جریان در لینک DC

در یک موتور BLDC در هر لحظه از زمان جریان تنها در دو فاز جاری بوده و فاز سوم خاموش است (به غیر از لحظات کموتاسیون که جریان برای مدت کوتاهی در هر سه فاز جاری می‌شود) این جریان از منبع (یا لینک dc) وارد موتور شده و سپس به آن باز می‌گردد. لذا برای کنترل جریان در موتور BLDC کافی است تا تنها جریان لینک dc که با فرض ثابت بودن

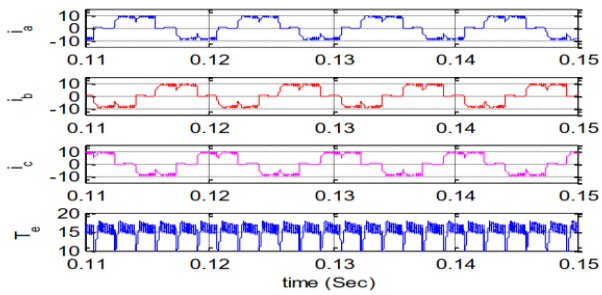
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

بار، باید مقدار ثابتی داشته باشد حول مقدار مرجعش تنظیم شود این روش متداولترین روش کنترل موتور BLDC است که روش کنترل جریان لینک dc نیز نامیده می‌شود شکل (۴) بلوک دیاگرام درایو کنترل سرعت موتور BLDC به روش کنترل جریان لینک dc را نمایش می‌دهد. تشابه زیادی بین کنترل موتور dc و موتور BLDC به چشم می‌خورد. در شکل (۵) تغییرات جریان فازهای یک موتور BLDC نمونه را با استفاده از این روش کنترلی نشان می‌دهد. پارامترهای این موتور در جدول (۲) آورده شده است مشاهده می‌شود که در لحظات کموتاسیون، بدلیل عملکرد دیودهای مکمل، جریان در هر سه فاز جاری می‌شود. همچنین به دلیل آنکه مدار الکتریکی جریان هر فاز به فازهای دیگر متفاوت است، نرخ تغییرات جریان فازها یکسان نبوده و بنابراین جریان فازها یکسان نبوده و بنابراین جریان فازها از حالت شبه مربعی ایده‌آل خارج می‌شوند. در نتیجه گشتاور، در این لحضات دیگر ثابت نبوده و بسته به مقدار سرعت دچار اعوجاجاتی به صورت بالازدگی یا فرورفتگی می‌شود. میزان اعوجاج نیز به سرعت، گشتاور بار، ولتاژ باس dc، مقادیر اندوکتانس و مقاومت هر فاز بستگی دارد. برای غلبه بر مشکل فوق، لازم است تا جریان فازها در تمامی زمان‌ها از جمله در بازه زمانی کموتاسیون نیز کنترل شود [۱].



شکل(۴): درایو موتور BLDC به روش کنترل جریان لینک DC [۱]

Figure (4): BLDC motor drive using control of the current of DC link method [1]



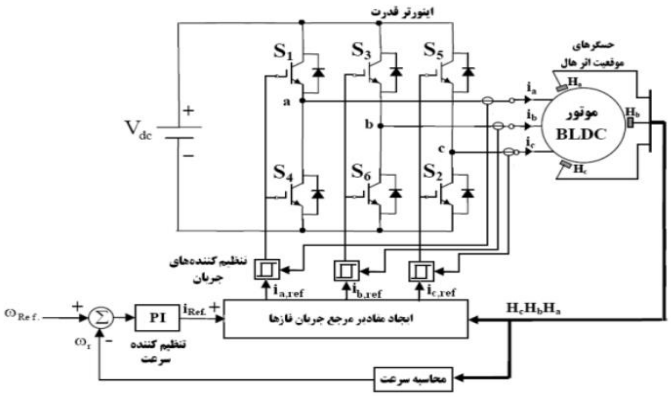
شکل (۵): تغییرات جریان‌های فازها در روش کنترل جریان لینک dc [۱]

Figure (5): Variation of phase currents in the current of DC link method [1]

۴-۲- کنترل مستقیم جریان فازها

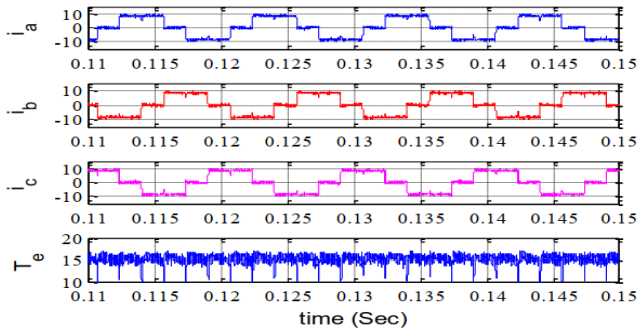
روش دیگر کنترل جریان، کنترل مستقیم جریان فازهاست. مطابق شکل (۶) در این روش، برای هر کدام از فازها یک کنترل-کنندهٔ جریان جداگانه در نظر گرفته شده است. شکل (۷) تغییرات جریان فازهای یک موتور BLDC نمونه را با استفاده از این روش کنترلی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که جریان فازها دستخوش هیچ‌گونه اعوجاجی در لحظات کوتاسیون نمی‌شود [۱].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 2- Summer 2024



شکل(۶): درایو موتور BLDC به روش کنترل مستقیم جریان فازها [۱]

Figure (6): BLDC motor drive using direct control of the phase currents method [1]



شکل (۷): تغییرات جریان در روش کنترل مستقیم جریان فازها [۱]

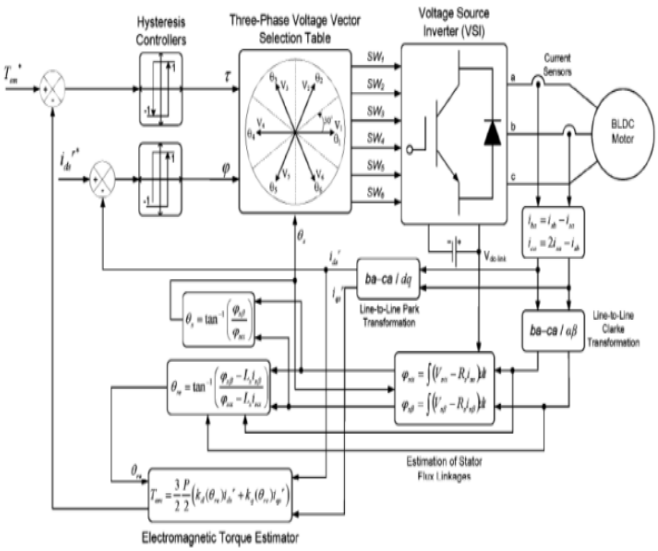
Figure (7): Variation of the currents in the direct control of the phase currents method [1]

۴-۳- کنترل مستقیم گشتاور

روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC) از روش‌های جدید کنترل موتورهای القایی و PMSM است که طی دو دهۀ اخیر به خوبی توسعه داده شده است و توسط شرکت‌هایی از جمله ABB تجاری شده است از مزایای روش DTC می‌توان به ساختار ساده‌تر، کنترل مستقیم شار و گشتاور و حذف حلقه‌های کنترل جریان، عملکرد دینامیکی بالا و پاسخ سریع، کلیدزنی سوئیچ‌ها به روش SVM اشاره کرد اگر چه این روش در ابتدا برای موتورهای سینوسی بیان شد، جذابیت‌ها و سادگی پیاده‌سازی این روش سبب شد تا برای موتورهای BLDC نیز بکار رود. شکل (۸) بلوک دیاگرام درایو موتور BLDC با روش کنترل مستقیم گشتاور را نشان می‌دهد. در این روش مقادیر شار و گشتاور بدون تنظیم جریان و مستقیماً با کلیدزنی سوئیچ‌های اینورتر کنترل می‌شوند. لذا این روش بدون احتساب حلقۀ سرعت، تنها دارای دو حلقۀ کنترل است. اما در روش DTC برای موتورهای BLDC بر خلاف موتورهای با تغذیه سینوسی (القایی و PMSM) نیاز به حلقۀ کنترل شار وجود ندارد و در صورت نیاز به کار موتور BLDC در ناحیۀ بالاتر از سرعت نامی، از روش کنترل زاویۀ پیش‌فازی (PAA) استفاده می‌شود. مطابق شکل (۸) خروجی مقایسه‌گر گشتاور به یک کنترل‌کننده هیسترزیس وارد می‌شود که می‌تواند دو سطحی یا سه‌سطحی باشد که البته در این شکل، نوع دو سطحی است. خطای گشتاور دارای علامت مثبت، منفی، یا صفر است. که بترتیب به معنای نیاز به افزایش- کاهش- بدون تغییر یافتن گشتاور است. بر این اساس، بردار ولتاژ مناسب از جدول انتخاب بردار ولتاژ انتخاب شده و به عبارتی،

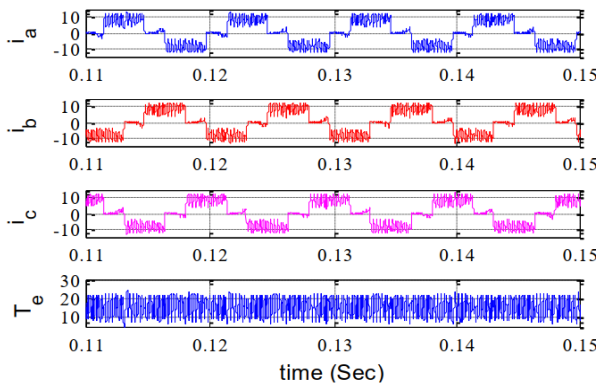
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

فرمان‌ها به دو سوئیچ مناسب از اینورتر اعمال می‌شوند. جدول (۱) بردار ولتاژ مناسب در هر ۶۰ درجه را نشان می‌دهد. هر بردار ولتاژ با یک عدد باینری شش بیتی متناظر است. ترتیب بیت از چپ به راست معادل شمارهٔ سوئیچ متناظر هستند. از جدول مشاهده می‌شود که در هر لحظه از زمان، تنها به دو فاز موتور فرمان اعمال می‌شود. در کنترل موتور BLDC به روش DTC نیز همانند کنترل DTC تمامی موتورها، گشتاور موتور باید تخمین زده شود. تخمین گشتاور با استفاده از رابطهٔ گشتاور و اندازه‌گیری پارامترهای ولتاژ و جریان موتور انجام می‌شود. همچنین از روئیت‌گرهای کلاسیک نیز می‌توان گشتاور و موقعیت را تخمین زد. شکل (۹) تغییرات جریان و گشتاور موتور BLDC به روش DTC را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ضربان گشتاور و جریان نسبت به دو روش قبلی بسیار بیشتر است. تحقیقات زیادی در زمینهٔ بهبود روش DTC و رفع مشکلات آن برای موتورهای مختلف انجام شده است. یکی از مشکلات روش DTC فرکانس سوئیچینگ متغیر و نسبتاً بالا در مقایسه با سوئیچزنی به روش PWM است تثبیت فرکانس سوئیچینگ در روش DTC یکی از اهداف تحقیقات انجام شده بوده است [۱].



شکل (۸): درایو موتور BLDC به روش کنترل مستقیم گشتاور DTC [۱]

Figure (8): BLDC motor drive using DTC method [1]



شکل(۹): تغییرات گشتاور و جریان موتور BLDC به روش DTC [۱]

Figure (9): Variation of currents and torque of BLDC motor in DTC method [1]

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 2- Summer 2024

Table (1): Switching table in DTC for BLDC motor [1]

جدول (۱) جدول سوئیچینگ روش DTC برای موتور BLDC [۱]

علامت ΔT / ناحیه (θ_e)	+	−
۱ (۳۰-۳۳۰ درجه)	V_2 (001001)	V_5 (000110)
۲ (۳۰-۹۰ درجه)	V_3 (011000)	V_6 (100100)
۳ (۹۰-۱۵۰ درجه)	V_4 (010010)	V_1 (100001)
۴ (۱۵۰-۲۱۰ درجه)	V_5 (000110)	V_2 (001001)
۵ (۲۱۰-۲۷۰ درجه)	V_6 (100100)	V_3 (011000)
۶ (۲۷۰-۳۳۰ درجه)	V_1 (100001)	V_4 (010010)

Table (2): Parameters of simulated BLDC motor [1]

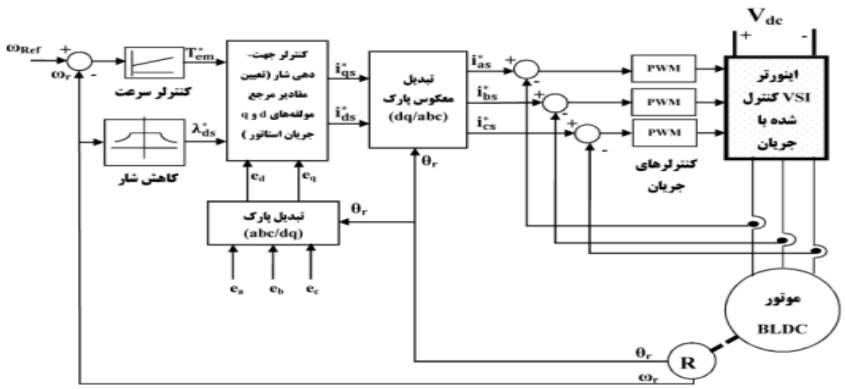
جدول(۲): پارامترهای موتورBLDC شبیه‌سازی شده [۱]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
سرعت نامی	ω_n = 1000 [rpm]	توان نامی	P_n = 1.5 [kW]
اندوکتانس متقابل	M= 0.1 [mH]	اندوکتانس خودی	L_s = 0.8 [mH]
ثابت ولتاژ (K_e)	0.15[V/(rad/sec)]	مقاومت فاز	R= 0.2 [Ω]
ولتاژ لینک dc	V_{dc} = 250 [V]	تعداد قطب‌ها	Z = 12
گشتاور بار نامی	T_l = 15 [N.m]	ممان اینرسی	J=0.015 [N.m/s^2]

۴-۴- کنترل موتور BLDC به روش کنترل برداری بهبود یافته

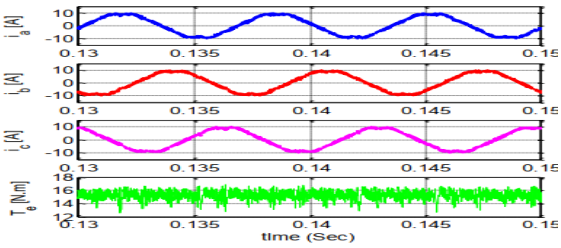
ویژگی کنترل برداری اغلب برای موتورهای AC با تغذیه سینوسی نظیر القایی و PMSM به کار گرفته می‌شود، اما ویژگی‌های ممتاز این روش نظیر دینامیک سریع و ایجاد حداقل ضربان گشتاور سبب شده است تا برای سایر انواع موتورها نظیر BLDC نیز بکار گرفته شوند، اما بکارگیری مستقیم روش کنترل برداری متداول برای موتورهای با ولتاژ ضد محرکه غیرسینوسی نظیر BLDC نتایج مطلوبی به همراه ندارد، زیرا در کنترل برداری متداول تنها هارمونیک اصلی مولفه‌های d و q جریان استاتور کنترل می‌شوند در صورتی که بدلیل ولتاژ ضدمحرکه غیرسینوسی موتور BLDC، هارمونیک‌های مرتبه بالای جریان نیز پدیدار می‌شوند که سبب ایجاد ضربان گشتاور قابل ملاحظه‌ای می‌گردند. شکل (۱۰الف) بلوک دیاگرام سیستم کنترل برداری بهبود یافته موتور BLDC را نشان می‌دهد. شکل (۱۰ب) نتایج شبیه‌سازی محرکه موتور BLDC به روش کنترل برداری بهبود یافته را نشان می‌دهد. مقدار ضربان گشتاور نسبت به روش‌های قبل کاهش بیشتری دارد. در این روش هر سه فاز همواره جریان را هدایت می‌کنند. عیب این روش، نیاز به استفاده از حسگرهای دقیق موقعیت مانند اینکودرها بجای سه حسگر موقعیت اثر هال است [۲].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024



شکل (۱۰ الف): بلوک دیاگرام روش کنترل برداری بهبود یافته [۲]

Figure (10a): Block diagram of modified vector control method [2]



شکل (۱۰ب): تغییرات گشتاور و جریان‌های فازها [۲]

Figure (10b): Variation of phase currents and torque [2]

شکل (۱۰): روش کنترل برداری بهبود یافته [۲]

Figure (10): Modified vector control method [2]

۴-۵- روش کنترل بدون حسگر سرعت پایین در موتور dc بدون جاوبک بر اساس تزریق ولتاژ فرکانس بالای پالس

اصول پایه روش تزریق ولتاژ پالس فرکانس بالا، تزریق سیگنال ولتاژ پالس فرکانس بالا در محور مستقیم تخمینی برای تحریک قطبیت برجسته اشباع روتور می‌باشد و سپس موقعیت روتور از سیگنال الکتریکی موتور با مدوله کردن سیگنال جریان با استفاده از محدب بودن اشباع، استخراج می‌شود. برای بدست آوردن رابطه بین ولتاژ و جریان در دستگاه مختصات دوار $\hat{d}-\hat{q}$، هنگامی که دستگاه مختصات دوار سنکرون روتور واقعی، سیستم محور dq باشد و زاویه بین محور d و محور سیم‌پیچ فاز A، برابر با θ می‌باشد، هنگامی که دستگاه مختصات ایستای دو فاز محور $\alpha\beta$ باشد، محور α و سیم‌پیچ فاز A با هم تلاقی پیدا می‌کنند. خطای تخمین موقعیت $\Delta\theta$ برابر است با:

$$\Delta = \theta - \hat{\theta} \qquad (۴)$$

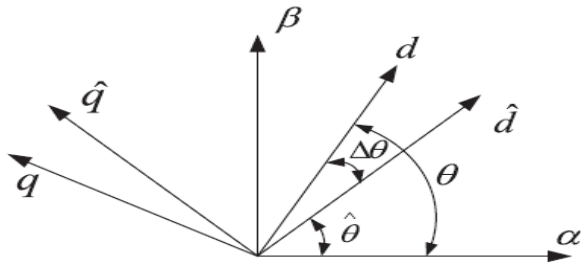
که در آن، θ موقعیت واقعی روتور است، $\hat{\theta}$ موقعیت تخمینی روتور در دستگاه مختصات $\hat{d}-\hat{q}$ است و رابطه بین دستگاه‌های مختصات در (شکل ۱۱) نشان داده شده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 2- Summer 2024

فرکانس سیگنال ولتاژ تزریق شده ω_h موتور، بسیار بیشتر از فرکانس زاویه‌ای ω متناظر با سرعت روتور تحت سرعت صفر و پایین و تحریک فرکانس بالا می‌باشد، بنابراین عبارت‌های فرکانس زاویه‌ای موج بنیادی و نیروی محرکه الکتریکی مخالف در معادله ولتاژ موتور را می‌توان نادیده گرفت و موتور را می‌توان به صورت بار R-L ساده‌سازی کرد که مدار معادل آن در (شکل۱۲) نشان داده شده است.

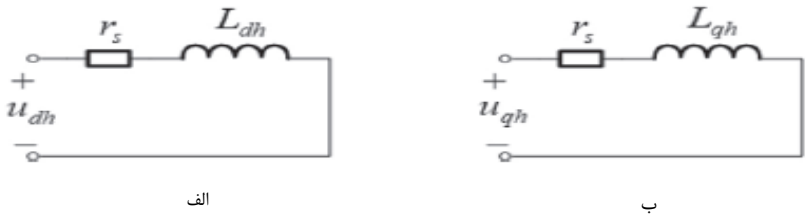
پس از ساده‌سازی، معادله تعادل ولتاژ فرکانس بالا در دستگاه مختصات دوار به صورت معادله ۵ است:

$$\begin{bmatrix} u_{dh} \\ u_{qh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_{dh} & 0 \\ 0 & r_s + pL_{qh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{dh} & 0 \\ 0 & Z_{qh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} \quad (۵)$$



شکل (۱۱): نمایش دستگاه‌های مختصات مختلف [۹]

Figure (11): Representation of different reference frames [9]

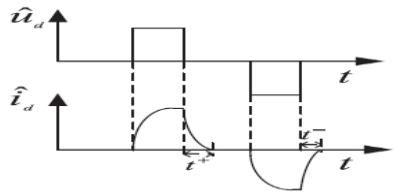


شکل (۱۲): مدار معادل موتور BLDC در دستگاه مختصات دوار دو فاز (الف): مدار معادل محور d (ب): مدار معادل محور q[۹]

Figure (12): Equivalent circuit of BLDC in rotational reference frame, a: d-axis equivalent circuit, b: q-axis equivalent circuit [9]

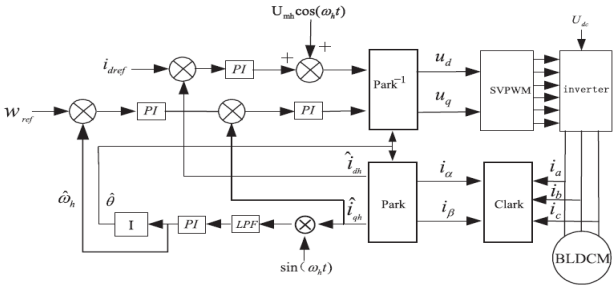
نتیجه‌گیری اینکه، تخمین موقعیت اولیه موتور DC بدون جاروبک بوسیله روش تزریق ولتاژ پالس فرکانس بالا محقق می‌شود که به دو مرحله تقسیم می‌شود: تخمین موقعیت اولیه و قضاوت در مورد جهت قطب و تغییر سرعت و حلقه جریان افزوده می‌شوند تا کنترل سرعت صفر و کم موتور DC بدون جاروبک بعد از بدست آوردن دقیق موقعیت اولیه روتور، محقق شود. دیاگرام بلوکی کنترل سرعت صفر و کم مربوط با روش تزریق ولتاژ پالس فرکانس بالای ارتعاشی در (شکل ۱۴) نشان داده شده است. طرح کنترل از این ماژول‌ها تشکیل شده است: ماژول تنظیم‌کننده سرعت و جریان، ماژول تخمین سرعت و موقعیت روتور (تخمین الگوریتم بدون حسگر و تخمین حسگر موقعیت۹، ماژول تبدیل پارک، ماژول تبدیل پارک معکوس، ماژول تبدیل کلارک، ماژول تولید SVPWM، و غیره. جریان های فاز i_a و i_b را می توان بوسیله حسگر جریان یا نمونه‌گیری مقاومت بدست آورد و i_a و i_b به مولفه سیستم مختصات ایستای دو فاز i_α و i_β تبدیل می‌شوند. اطلاعات زاویه، موقعیت و سرعت روتور از طریق ماژول فیدبک سرعت/موقعیت روتور (تخمین الگوریتم بدون حسگر و تخمین حسگر موقعیت)، بدست می‌آیند [۹].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024



شکل (۱۳): دیاگرام شماتیک برای تعیین قطب مغناطیسی [۹]

Figure (13): Schematic diagram for determining the magnetic pole [9]



شکل (۱۴): دیاگرام بلوکی کنترل سرعت صفر یا پایین BLDCM با استفاده از روش تزریق ولتاژ پالس فرکانس بالا [۹]

Figure (14): Block diagram of BLDCM zero or low speed control using high frequency pulse voltage injection method [9]

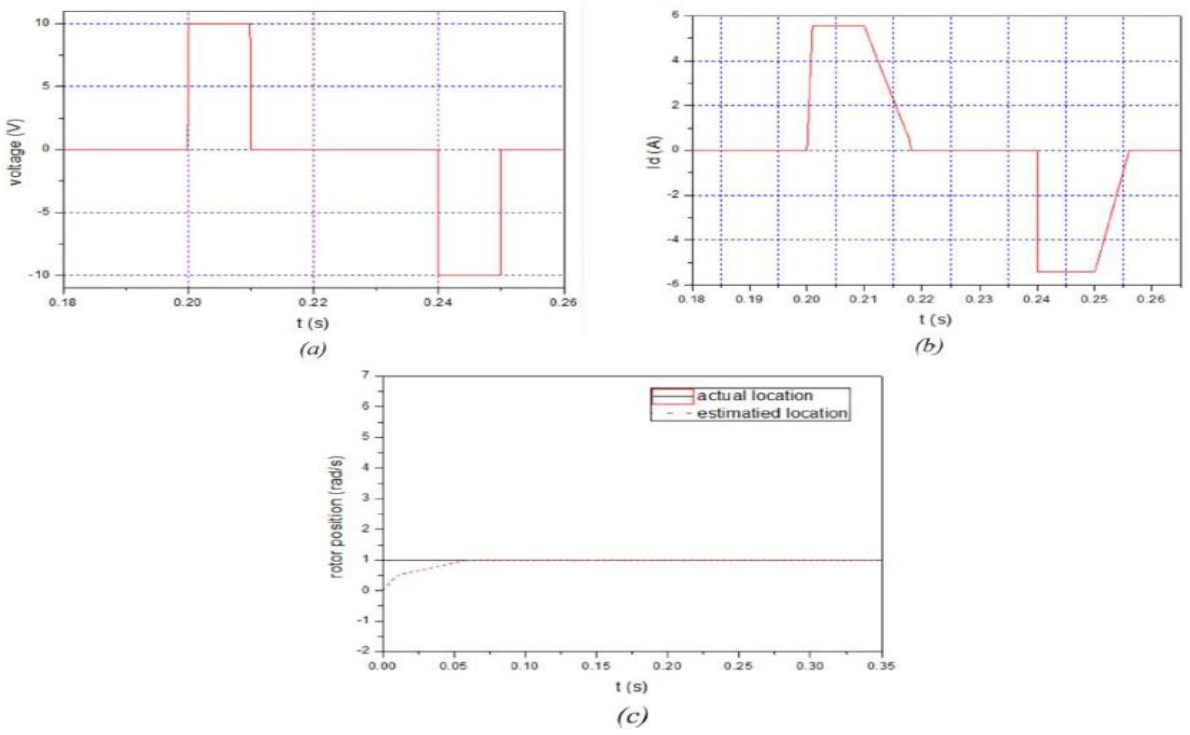
Table (3): Parameters of BLDC motor [9]

جدول (۳): پارامترهای موتور DC بدون جاروبک[۹]

اندوکتانس استاتور	مقاومت استاتور	لگاریتم قطب	سرعت اسمی	گشتاور اسمی	ولتاژ اسمی
۲/۵٦mh	۱,۷۵	۵	۳۰۰۰r/min	۰/۱۸ N.M	٤۸

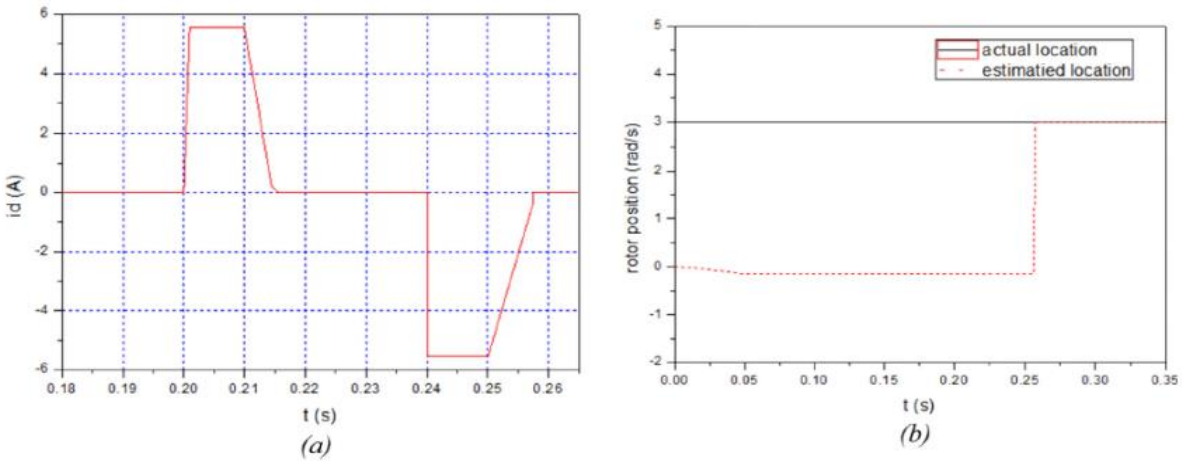
جهت تایید اینکه این روش می‌تواند نظارت بر موقعیت روتور موتور DC بدون جاروبک و عملکرد حسگر بدون موقعیت سرعت پایین را محقق سازد یا خیر، پارامترهای عمده موتور DC بدون جاروبک نشان داده شده در (جدول ۳) برای تحلیل شبیه‌سازی انتخاب می‌شوند. موقعیت واقعی روتور θ یعنی ۱ و ۳ رادیان برای شبیه‌سازی موقعیت روتور در سرعت صفر، انتخاب می‌شود. موقعیت واقعی روتور $\theta = 1\,rad$ انتخاب می‌شود درحالی که یک سیگنال ولتاژ مثبت انتخاب شده با دامنه ۱۵ ولت و فرکانس ۱ کیلوهرتز به درون $\hat{\imath}_d$ تزریق می‌شود. پالس‌های مثبت و منفی با دامنه ۱۰ ولت در زمان ۰,۲ ثانیه تزریق می‌شود درحالی که بازه پالس ۰,۰۳ ثانیه می‌باشد و زمان عمل ۰,۰۱ ثانیه است همانگونه که در شکل (a ۱۵) نشان داده شده. پس از پایان عمل پالس مثبت، زمان مورد نیاز برای اینکه $\hat{\imath}_{dh}$ از حالت پایدار به حالت صفر کاهش یابد، ۰,۰۰۸۶ ثانیه است؛ هنگامی که پالس منفی فعال می‌شود، زمان کاهش $\hat{\imath}_{dh}$ از حالت پایدار به حالت صفر، ۰,۰۰۶۱ ثانیه است همانگونه که در شکل (۱۵ b) نشان داده شده، $t^+ > t^-$ می‌تواند قضاوت کند که $f(\Delta\theta) = 0$ و موقعیت تخمینی برابر با موقعیت واقعی است، همانگونه که در شکل (c۱۵) نشان داده شده. موقعیت روتور واقعی $\theta = 3rad$ انتخاب شده است، درحالی که می‌توان آنرا از تزریق همان سیگنال سینوسی و سیگنال‌های پالس مثبت و منفی استفاده کرد که زمان برای تنزل $\hat{\imath}_{dh}$ از حالت ماندگار به حالت صفر ۰,۰۰۵۵ ثانیه است هنگامی که پالس منفی عمل کند، زمان برای نزول $\hat{\imath}_{dh}$ از حالت پایدار به حالت صفر برای پالس مثبت ۰,۰۰۷۶ ثانیه است که از (شکل a۱۶) به ازای $t^+ < t^-$ قابل حصول است و زاویه موقعیت تخمینی $\hat{\theta} + \pi$ است که از شکل (۱۶ b) قابل مشاهده است، بعد از ۰,۰۲۵۳ ثانیه ، موقعیت تخمینی برابر با موقعیت واقعی است [۹] .

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 2- Summer 2024



شکل (۱۵): تخمین موقعیت روتور $\theta = 1rad$ [۹]

Figure (15): Eestimation of rotor position $\theta = 1rad$ [9]



شکل (۱۶): تخمین موقعیت روتور در $\theta = 3rad$ [۹]

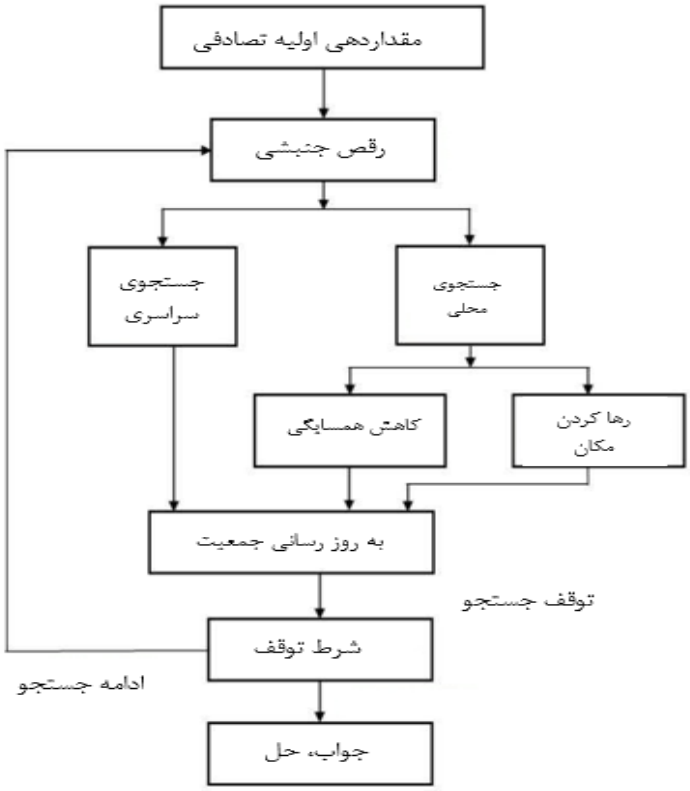
Figure (16): Eestimation of rotor position $\theta = 3rad$ [9]

طبق تست شبیه‌سازی، نشان داده شده که این روش می‌تواند موقعیت و سرعت روتور را بخوبی در سرعت صفر و سرعت‌های کم، شناسایی کند.

۴-۶- کنترل موتور DC بدون جاروبک با استفاده از الگوریتم زنبور عسل ABC

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

این روش از الگوریتم کلونی زنبور عسل برای تعیین پارامترهای بهینه کنترل‌کننده PID جهت کنترل سرعت موتور BLDC استفاده می‌کند. زنبور مصنوعی، الگوریتمی بر اساس گروه‌های زنبور عسل می‌باشد. این روش که توسط کارابوگا اولین بار در سال ۲۰۰۵ معرفی گردید، از رفتار جستجوی کلونی زنبور عسل الهام گرفته شده است. کاربردهای اصلی این الگوریتم، بهینه-سازی حل مسائل پیوسته و بهینه‌سازی توابع عددی چند متغیره می‌باشد. الگوریتم ABC که نسبت به الگوریتم‌های دیگر از پارامترهای کنترلی کمتری استفاده می‌کند، امروزه کاربرد وسیعی پیدا کرده است. فرایند جستجوی غذای یک کلونی زنبور عسل به وسیله زنبورهای دیده‌بان آغاز می‌شود که برای جستجوی تصادفی منابع غذایی گلزارهای امیدبخش فرستاده می‌شوند. یک کلونی زنبور عسل می‌تواند در مسافت‌های زیاد در حدود ۱۴ کلیومتر و نیز در جهت گوناگون پخش شود تا از منابع غذایی بهره‌بردای کند که این امر باعث می‌شود تمام مسیرهای ممکنه در نظر گرفته شود. همچنان که فرآیند جست و جو انجام می-شود، تعدادی از زنبورهای کلونی بطور مداوم به عنوان زنبورهای دیده‌بان انتخاب می‌شوند. اگر غذای جمع‌آوری شده از یک مسیر به یک حد معیار برسد زنبورهای دیده‌بان آن را مخفی کرده و مسیر نسبی را از طریق رقص چرخشی انتقال می‌دهند. رقص چرخشی یک ابزار ارتباطی مهم برای کلونی بوده که شامل تمام اطلاعات خارج از کندو می‌باشد. زنبورهای کندو بر اساس اطلاعات مختلف حاصل شده از رقص‌های چرخشی در مورد کیفیت نسبی آنها تصمیم‌گیری می‌کنند. بنابراین زنبورهای جدیدی را برای جستجوی مسیرهای بهتر انتخاب می‌کنند که این فرآیند منجر به جستجوی مؤثرتری می‌گردد، فرستادن زنبورها به مسیرهای مشخص تا حدی ادامه می‌یابد که سازگاری مسیر به حد آستانه خود برسد. مراحل الگوریتم زنبور عسل به صورت زیر است:۱- تولید پاسخ‌های اولیه و ارزیابی آن‌ها ۲- انتخاب پاسخ‌های بهتر و ارسال زنبورهای کارگر به آن سایت‌ها ۳- بازگشت زنبورها به کندو و انجام رقص مخصوص (تولید پاسخ همسایه) ۴-مقایسه همه زنبورهای یک سایت و انتخاب بهترین مورد ۵- جایگزین کردن زنبورهای غیرمنتخب با پاسخ تصادفی ۶- ذخیره موقعیت بهترین پاسخ ۷- بازگشت به مرحله ۲ در صورت برآورده نشدن شرایط خاتمه ۸- پایان. این مراحل به صورت فلوچارت در (شکل ۱۷) ترسیم شده است و پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم ABC در (جدول ۴) نشان داده شده است.



[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 2- Summer 2024

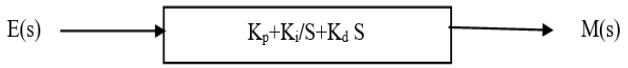
شکل (۱۷): مراحل الگوریتم زنبور عسل [۳]
Figure (17): The steps of the bee algorithm [3]

Table (۴): Parameters used in ABC algorithm [3]
جدول (۴): پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم ABC [۳]

پارامترها	تعداد تکرار	مقدار جمعیت کلونی	حد حذف	ضریب تسریع
مقدار	۵۰	۱۰	۰/۶	۱

۴-۶-۱- کنترل‌کننده PID

کنترل‌کننده سه جزئی تناسبی–انتگرال‌گیر–مشتق‌گیر، PID نامیده می‌شود. ساختار ساده این کنترل‌کننده‌ها باعث پیاده-سازی آسان آنها شده و در اغلب سیستم‌های صنعتی دقت قابل‌قبولی را به همراه دارند. اما مهمترین مسأله در کنترل‌کننده-های PID تنظیم ضرایب کنترلی آنها می‌باشد. اگر از مقادیر نادرست برای ثوابت تنظیم کنترل‌کننده PID استفاده شود سیستم کنترل، عملکرد ضعیفی داشته و حتی ناپایدار می‌شود. تابع انتقال این کنترل‌کننده در (شکل ۱۸) مشاهده می‌شود.



شکل (۱۸): تابع انتقال کنترل‌کننده PID [۳]
Figure (18): Transfer function of PID controller [3]

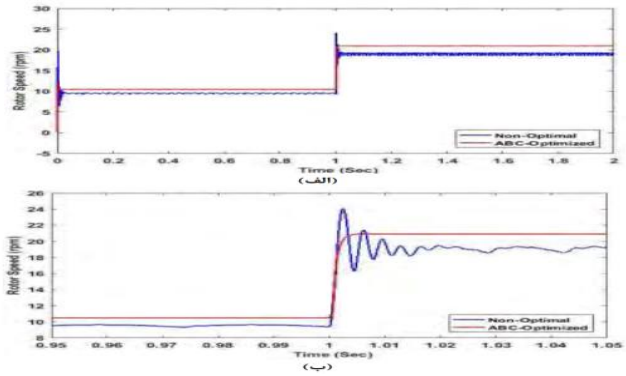
۴-۶-۲- مدل درایو BLDC مورد بررسی

موتور DC بدون جاربک شبیه موتورهای سنکرون AC می‌باشند با این تفاوت که موتورهای سنکرون، نیروی ضدمحرکه الکتریکی سینوسی و موتورهای DC بدون جاروبک نیروی ضد محرکه الکتریکی مستطیلی یا ذوزنقه تولید می‌کنند. هر دو نوع این موتورها داری میدان‌های مغناطیسی گردان استاتور بوده که باعث تولید گشتاور می‌گردد. به همین دلیل در مثالهای شبیه-سازی که شرکت Mathworks در نرم‌افزار متلب ارائه نموده است، برای شبیه‌سازی موتور BLDC از موتور PMSM استفاده شده است. موتورهای BLDC و PMSM تقریباً مشابه هم می‌باشند [۳].

Table (۵): Comparison of step response characteristics of optimal PID controllers [3]
جدول (۵): مقایسه‌ی مشخصات پاسخ پله‌ی کنترل‌کننده‌های PID بهینه [۳]

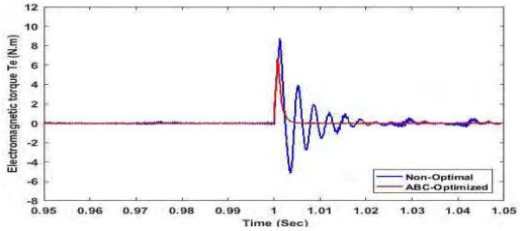
الگوریتم بهینه سازی	مشخصات سیستم			
	درصد فراجهش	زمان صعود (ثانیه)	زمان نشست (ثانیه)	خطای حالت دائم سرعت رتور (٪)
الگوریتم ABC	۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۰۵
بدون الگوریتم بهینه سازی	۱۴/۹۶	۰/۰۰۱	۰/۰۱۶	۸/۱۵

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024



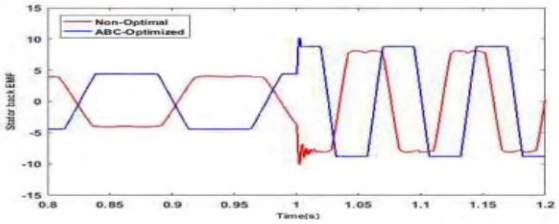
شکل (۱۹): سرعت رتور در اثر تغییر آنی سرعت مرجع از ۱۰۰ rpm به ۲۰۰ rpmدر ثانیه (بدون اعمال گشتاور بار): الف) تصویر زوم نشده ،ب) تصویر زوم شده [۳]

Table (۱۹): Rotor speed due to instantaneous change of reference speed from 100 rpm to 200 rpm per second (without applying load torque), a) un-zoomed, b) zoomed [3]



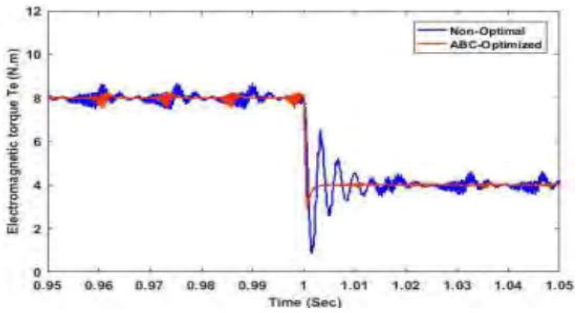
شکل (۲۰): گشتاور موتور با استفاده از ABC بدون اعمال گشتاور بار [۳]

Figure (20): Motor torque using ABC without applying load torque [3]



شکل (۲۱): نیروی ضد محرکه موتور BLDC بدون اعمال گشتاور بار [۳]

Figure (21): Motor electro motive force using ABC without applying load torque [3]



شکل(۲۲): گشتاور با استفاده از ABC برای سرعت مرجع روتور ۲۰۰rpm [۳]

Figure (22): Motor torque using ABC for reference speed **rpm ۲۰۰** [3]

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 2- Summer 2024

عملکرد PID غیربهینه به دلیل وجود خطای زیاد در حالت ماندگار، بسیار نامطلوب است. همچنین سیستم بهینه شده با الگوریتم ABC دارای مزایایی از جمله زمان نشست کمتر، خطای حالت ماندگار کمتر و درصد فراجهش کمتر نسبت به حالت غیر بهینه می‌باشد و تنها عیب آن نسبت به حالت غیر بهینه زمان صعود بیشتر می‌باشد.

Table (6): Comparison of stated methods]

جدول(6): مقایسه بین روش‌های بیان شده

روش کنترل موتور BLDC	مزایا	معایب
الگوریتم زنبور عسل ABC	زمان نشست کم، خطای حالت ماندگار کم، درصد فراجهش کم	زمان صعود زیاد
کنترل جریان در لینکDC	این روش متداولترین روش کنترل موتور BLDC است.	ــــــــــ
کنترل مستقیم جریان فازها	در لحظات کوتاسیون جریان فازها دستخوش هیچ-گونه اعوجاجی نمی‌شود	ــــــــــ
کنترل مستقیم گشتاور	ساختار ساده‌تر، کنترل مستقیم شار و گشتاور و حذف حلقه‌های کنترل جریان، عملکرد دینامیکی بالا و پاسخ سریع، کلیدزنی سوئیچ‌ها به روشSVM	فرکانس سوئیچینگ متغیر و نسبتاً بالا
کنترل برداری بهبود یافته	دینامیک سریع و ایجاد حداقل ضربان گشتاور	نیاز به استفاده از حسگرهای دقیق موقعیت مانند اینکودرها بجای سه حسگر موقعیت اثر هال است.
کنترل بدون حسگر سرعت پایین در موتور dc بدون جاوبک بر اساس تزریق ولتاژ فرکانس بالای پالس	موقعیت و سرعت روتور را بخوبی در سرعت صفر و سرعت کم شناسایی می‌کند.	ــــــــــ

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی چندین روش کنترل (BLDCM) پرداخته شده است و جنبه‌های مختلف این موتورها مورد بررسی قرار گرفت. برای کنترل سرعت روش کنترل مستقیم جریان فازها دارای بهترین عملکرد در بین بقیه‌ی روش‌های بررسی شده می-باشد استفاده از روش ساده و ارزان قیمت کنترل مستقیم جریان فازها بهترین و ساده‌ترین روش کاهش ضربان گشتاور ناشی از کموتاسیون در درایو موتور BLDC است. روش کنترل بدون حسگر سرعت پایین در موتور dc بدون جاوبک بر اساس تزریق ولتاژ فرکانس بالای پالس نیز برای سرعت‌های پایین نزدیک به سرعت صفر موتور dc بدون جاروبک مؤثر است و سرعت‌ها را به خوبی در سرعت‌های کم و سرعت صفر شناسایی می‌کند. اما روش کنترل برداری بهبود یافته نیاز به، بکارگیری حسگرهای دقیق‌تری می‌باشد. اینورترهای گوناگونی برای کنترل موتور جریان مستقیم بدون جاروبک پیشنهاد شده است که اینورترهای شش سوئیچه نسبت به دیگر اینورترها بهتر هستند. انتظار می‌رود که در آینده شاهد این باشیم که موتورهای BLDC در کاربردهای وسیعی استفاده شوند برای مثال، آنها به طور گسترده‌ای در راه‌اندازی ربات‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند موتورهای BLDC برای هواپیمایی که هیچ‌گونه سرنشینی ندارد هم ایده‌آل هستند توانایی خیلی خوب آنها در ارائه کنترل دقیق، آنها را بویژه برای هواپیماهای بدون سرنشین چند موتور مناسب می‌کند. پیش‌بینی می‌شود در آینده نزدیک در خیلی از کاربردهای دیگر از BLDMها استفاده شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از حمایت علمی و مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

[1] Abolfazl Helvai Niaser, "Review of the methods of analysis, control, implementation and evaluation of brushless DC motor drives", Scientific Research Journal of Energy Engineering and Management, Year 5, Number 2 - Page 41-24 - Summer 2014.

[2] Seyed Hossein Ejtahed, Abolfazl Helvai Niaser, "Control of brushless DC motors drives", Iranian Energy Journal, Volume 19- Number 3- Pages 145-166- Fall 2015.

[3] Maryam Mohammadi, Mehdi Bigdeli, "Brushless DC motor control using the bee algorithm (ABC)", International Conference on Challenges in Engineering, Technology and Applied Sciences, March 26-28, 2016.

[4] Ehsan Bilour Kashani, Abolfazl Helvai Niaser, "Decreasing torque pulse in BLDC motor drive without electronic capacitor in DC link" Journal of Iranian Electrical and Electronics Engineering Association - Year 19 - Page 117-125 - Fall 1401.

[5] Hamid Rezarahmani, Mojtaba Samai "Smart speed control of brushless DC motor in mechatronic systems" the first international conference of new research achievements in electrical and computer engineering.

[6] Mehdi Zanganeh, Ebrahim Aghajari, Seyed Mohsen Seyed Mousavi "Automatic design of fuzzy inference system based on PSO algorithm for speed control of DC motors" Scientific journal of modern research in electricity - 9th year - 3rd issue - pages 9 to 18 - autumn 2019 .

[7] Mehrdad Jafar Boland, Mohammad Hadi Rismani "A new sensorless control method for brushless DC motors based on line-to-line flux linkage" Journal of Modeling in Engineering - Year 15 - Number 49 - Page 139-150 - Summer 2016.

[8] M D Bhutto, Prof. Ashis Patra "*A Brushless DC Motor Speed Control By Fuzzy PID Controller*" International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR), Volume 3, Issue 5, P.P 1469- 1474, May 2014.

[9] Lihui Sun "*Low speed sensorless control method of brushless DC motor based on pulse high frequency voltage injection*" Elsevier Alexandria Engineering Journal,P.P 6457-6453, Accepted 1 December 2021.

[10] Jung-Moo Seo, Joo-Han Kim, In-Soung Jung, *Senior Member, IEEE*, and Hyun-Kyo Jung, Senior Member, IEEE "*Design and Analysis of Slotless Brushless DC Motor*" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 47, NO. 2, P.P 730-735, MARCH/APRIL 2011.

[11] Jibin Zou, Wenjuan Qi, Yongxiang Xu, Fei Xu, Yong Li, and Jianjun Li "*Design of Deep Sea Oil-Filled Brushless DC Motors Considering the High Pressure Effect*" IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 48, NO. 11, P.P 4220-4223, NOVEMBER 2012.

[12] Rommel Stiward Prieto Estacio, Diego Alberto Bravo Montenegro, Carlos Felipe Rengifo Rodas "*Dataset of audio signals from brushless DC motors for predictive maintenance*" Elsevier Data in Brief, P.P 1-5, Accepted 7 September 2023.

[13] Ze Bin Lia,b,c, Wei Lua,b, Li Fu Gaoa, , Jin Si Zhangc, "*Nonlinear state feedback control of chaos system of brushless DC motor*" Elsevier ScienceDirect, P.P 636- 640, Procedia Computer Science 183 (2021).

[14] A. Prakash, C. Naveen "*Combined strategy for tuning sensor-less brushless DC motor using SEPIC converter to reduce torque ripple*" Elsevier ISA Transactions, P.P 328-344, Accepted 29 June 2022.

[15] Justus Nwoke Jairo Viola YangQuan Chen "*Asymmetric Barrier Lyapunov Function self Optimizing Control For Brushless DC Motor With Globalized Constrained Nelder-Mead Algorithm*" Elsevier ScienceDirect, 96-101, IFAC PapersOnLine 55-27 (2022).

[16] A. Attar, J. Bouchnaif, K. Grari "*Control of Brushless DC motors using sensorless Back-EMF integration method*" Elsevier Materials Today: Proceedings, P.P 7438-7443, Materials Today: Proceedings 45 (2021).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 2- Summer 2024

[17] Aishwarya V.a, Gnana Sheela K, "*Performance analysis of Buck-Boost and Cuk converter-fedbrushless DC motor drives*" Elsevier ScienceDirect, P.P 1865-1873, Materials Today: Proceedings 24 (2020).
[18] Remzi Inan, Bekir Aksoy, Osamah Khaled Musleh Salman "*Estimation performance of the novel hybrid estimator based on machine learning and extended Kalman filter proposed for speed-sensorless direct torque control of brushless direct current motor*" Elsevier Engineering Applications of Artificial Intelligence, P.P 1-13, Accepted 29 August 2023.
[19] Rakesh Goswamia, Dheeraj Joshi "*Performance Review of Fuzzy Logic Based Controllers Employed in Brushless DC Motor*" Elsevier ScienceDirect, P.P 623- 631, Procedia Computer Science 132 (2018).
[20] Tariku Sinshaw Tamir, Gang Xiong, Senior Member, IEEE, Zhen Shen Xiaoyan Gong 1, Sheng Liu Ehtisham Lodhi 1, 2, Li Wan 5, Xisong Dong (Correspondence author) " *Comparative Study of Four Speed Controllers of Brushless DC Motors for Industrial Applications*" Elsevier ScienceDirect, P.P 59-64, IFAC PapersOnLine 53-5 (2020).
[21] P. Ramesh, A. Ranjeev, C. Santhakumar, J. Vinoth, C. Bharatiraja "*Sensor-less field orientation control for brushless direct current motor controller for electric vehicles*" Elsevier Materials Today: Proceedings, P.P 277-284, Materials Today: Proceedings 65 (2022).
[22] N. Priya, N.B. Rajesh, D. Sivanandakumar, N.B. Prakash "*Optimized Adaptive Neuro Fuzzy based Controller for lifetime maximization in power electronics stage for brushless DC drives*" Elsevier Materials Today: Proceedings, P.P 33973386, Materials Today: Proceedings 56 (2022).
[23] Surabhi Chandra, Prerna Gaur, Diwaker Pathak "*Radial basis function neural network based maximum power point tracking for photovoltaic brushless DC motor connected water pumping system*" Elsevier Computers and Electrical Engineering, P.P 1-21, Accepted 9 June 2020 .
[24] Alam Gabriel Rojas-López, Miguel Gabriel Villarreal-Cervantes Alejandro Rodríguez-Molina "*Surrogate indirect adaptive controller tuning based on polynomial response surface method and bioinspired optimization: Application to the brushless direct current motor controller*" Elsevier Expert Systems With Applications, P.P 1-36, Expert Systems With Applications 245 (2024)
[25] Izza Anshory, Jamaaluddin Jamaaluddin, Arief Wisaksono, Indah Sulistiyowati Hindarto, Bagus Setya Rintyarna, Ahmad Fudholi, Yuli Asmi Rahman Kamaruzzaman Sopian "*Optimization DC-DC boost converter of BLDC motor drive by solar panel using PID and firefly algorithm*" Elsevier Results in Engineering, P.P 1-10, Results in Engineering 21 (2024)
[26] K. Premkumar, B.V. Manikandan "*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System based speed controllerfor brushless DC motor*" Elsevier Neurocomputing, P.P 260-270, Accepted 24 January 2014.
[27]Philippe Faradja, Guoyuan Qi "*Analysis of multistability, hidden chaos and transient chaos inbrushless DC motor*" Elsevier Chaos, Solitons and Fractals, P.P 1-10, Accepted 3 January 2020.
[28] M. Shirvani Boroujeni, G.R. Arab Markadeh *n*, J. Soltani "*Torque ripple reduction of brushless DC motor based on adaptive input-output feedback linearization*" Elsevier ISA Transactions, P.P 502-511, Accepted 8 May 2017.
[29] K. Iizuka, H. Uzuhashi, and M. Kano (1985), "*Microcomputer control for sensorless brushless motor*," IEEE Transaction on Industry Applications, vol. IA-27, pp. 595-601.
[30] T.Chun, Q.Tran, H.Lee; H.Kim (2014), "*Sensorless Control of BLDC Motor Drive for an Automotive Fuel Pump Using a Hysteresis Comparator*," IEEE Transactions on Power Electronics, vol.29, no.3, pp. 1382 – 1391.
[31] P. Damodharan, K.Vasudevan (2010), "*Sensorless Brushless DC Motor Drive Based on the Zero-Crossing Detection of Back Electromotive Force (EMF) From the Line Voltage Difference*", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 25, No. 3, pp. 661-668.
[32] J. Moreira (1996), "*Indirect Sensing for Rotor Flux Position of Permanent Magnet AC Motors Operating in a Wide Speed Range*," IEEE Transaction Industrial Application, Vol. 32, pp. 401-407.
[33] Z.Q. Zhu, D. Howe (2003), "*Sensorless Flux-Weakening Control of Permanent Magnet Brushless Machines Using Third-Harmonic Back-EMF*," IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Vol.: 2, pp. 1229 –1235, 2003.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024

[34] J. X. Shen, and S. Iwasaki, "*Improvement of ASIC-Based Sensorless Control for Ultra high-Speed Brushless DC Motor Drive*," IEEE international Electric Machines and Drives Conference, pp. 1049-1054.
[35] T. M. Jahns, R. C. Becerra, M. Ehsani (1991), "*Integrated Current Regulation for a BrushlessECM Drive*," IEEE Trans. Power Electron, vol. 6, pp. 118-126.
[36] R. C. Becerra, T. M. Jahns, and M. Ehsani (1991), "*Four-Quadrant Sensorless Brushless ECM Drive*," in Proceedings Record of IEEE-APEC'9, pp. 202-209.
[37] D. Regnier, C. Oudet, D. Prudham (1985), "*Starting Brushless DC Motors Utilizing Velocity Sensors*," in Proceedings of 14th Annual Symposium on incremental Motion Control Systems and Devices. pp. 99-107.
[38] D. Peters and J. Hart (1993), "ICs Provide Control for Sensorless DC Motors," in Proceedings of EDN. pp. 85-94.
[39] S. Ogasawara, H. Akagi (1990), "*An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless DC Motors*," IEEE Conference of the Industry Applications Society Annual Meeting, vol.1, pp. 443 –447
[40] S. Ogasawara, H. Akagi (2001), "*An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless DC Motors*," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No.5, pp. 928 –933.
[41] N. Ertugrul, P. P. Acarnley, and C. D. French (1993), "*Real-Time Estimation of Rotor Position in PM Motors during Transient Operation*," IEE Fifth European Conference on Power Electronics and Applications. pp. 311-316.
[42] N. Ertugrul and P. Acarnley (1994), "*A New Algorithm for Sensorless Operation of Permanent Magnet Motors*," IEEE Transaction Industrial Application, vol. 30, pp. 126-133.
[43] L.I. Iepure, I. Boldea, G.D. Andreescu, D.Iles, F. Blaabjerg (2010), "*Novel motion sensorless control of single phase brushless D.C. PM motor drive, with experiments*," International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), pp.329-336.
[44] L.I.Iepure, I.Boldea, G.D.Andreescu, F.Blaabjerg (2010). "*Improved state observers for sensorless single phase BLDC-PM motor drives*," IECON 2010 - 36th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, pp.870-875.
[45] W. Juan, M. Dixon, H. Rodrigo (2002), "*Simplified Sensorless Control for BLDC Motor, Using DSP Technology*," 19'th Electric Vehicle Symposium, pp. 1431-1442.
[46] T.Kim, and M.Ehsani (2004), "*Sensorless Control of the BLDC Motors From Near-Zero to High Speeds*," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, No. 6, pp.1635-1645.
[47] T.Kim, M.Ehsani (2003), "*An Error analysis of the Sensorless Position Estimation for BLDC Motors*," 38th IAS Annual Industry Applications Conference, pp. 611-617.
[48] G. H. Jang, J. H. Park, and J. H. Chang (2002), "*Position detection and startup algorithm of a rotor in a sensorless BLDC motor utilising inductance variation*," IEE proceedings -Electric Power Applications, Vol. 149, No. 2, pp. 137–142.
[49] M. Yilmaz, R. Tuncay, O. Ustun, T. Krein (2009), "*Sensorless Control of Brushless DC Motor Based on Wavelet Theory*," Electric Power Components and Systems, Vol.37, No.10, pp.1063-1080.
[50] L. A. Jonesand and J. H. Lang (1989), "*A State Observer for the Permanent Magnet Synchronous Motor*," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 36, No.3, pp. 374-382.
[51] T. Furuhashi, S. Sangwongwanich, S. Okuma (1992), "*A Position-and-Velocity Sensorless Control for Brushless DC Motors Using an Adaptive Sliding Mode Observer*," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 39, No. 2, pp. 89-95.
[52] H. Fakham, M.Djemai, K. Busawon (2008), "*Design and practical implementation of a back-emf slidingmode observer for a brushless dc motor*," IET Electric Power Applications, Vol.2, No.6, pp.353-361.

زیرنویس‌ها:

[1] Direct current motors
[2] Brushless DC motor
[3] Artificial Bee Colony algorithms
[4] Proportional integral derivative
[5] Particle swarm optimization

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13- No. 2- Summer 2024

[6] Genetic algorithm
[7] Slotless
[8] Single-ended primary-inductor converter
[9] Golden Eagle Optimization
[10] Radial Basis Function Neural Network
[11] Dynamic Surface Control
[12] Asymmetric barrier lyapunov function
[13] Self optimizing control
[14] Electromotive Force
[15] Machine learning
[16] Extended Kalman filter
[17] Direct torque control
[18] Supervisory control data acquisition
[19] Field Orientation Control
[20] Barnacles Mating Optimizer with Adaptive Neuro Fuzzy based Controller
[21] Radial basis function neural network
[22] Maximum power point
[23] Photovoltaic
[24] Surrogate indirect adaptive controller tuning approach based on the response surface method
[25] Indirect adaptive controller tuning approach based on the general dynamic model
[26] Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
[27] Permanent magnet synchronous motor
[28] Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-12-16]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 13 - No. 2- Summer 2024