

Research Article

Speed Control Improvement of Induction Machine Using Grey Wolf Optimization-Based Higher-Order Sliding Mode Load Torque Observer

Navid Foruzandeh Hafeshjani ¹, *Ph.D Student*, Mohammad Jafarifar^{*2}, *Assistant Professor*

¹ Department of Electrical Engineering, Dez. C., Islamic Azad University, Dezful, Iran,
navid.foroozandeh@iau.ir

^{2*} Department of Electrical Engineering, And. C., Islamic Azad University, Andimeshk, Iran,
mohammad.jafarifar@iau.ac.ir

Abstract:

Closed-loop speed control of induction machines has traditionally been implemented using PI controllers. However, in various applications of these machines, sudden load torque variations and changes in machine parameters during operation can significantly affect the performance of PI controllers, leading to unsatisfactory dynamic responses. To address this issue, this paper proposes a nonlinear control strategy combined with a PI controller and a High-Order Sliding Mode Control (HOSMC)-based load torque observer. In the proposed method, the load torque is estimated online by the observer, and the error between the actual and estimated load torque is compensated through the combined action of the PI controller and the nonlinear control strategy. Furthermore, to enhance the efficiency and robustness of the proposed approach, the controller parameters are optimally tuned using the Grey Wolf Optimization (GWO) algorithm, resulting in improved performance under various operating conditions. Simulation results obtained in the MATLAB environment demonstrate that the proposed method significantly enhances the control performance of the induction machine compared with conventional control approaches.

Keywords: Induction Machine (IM), Induction Machine Drives, Load Torque Observer, Sliding Mode, Grey Wolf Optimization (GWO) Algorithm.

Received: 13 Dec. 2025

Revised: 10 Jan. 2026

Accepted: 4 Feb. 2026

*** Corresponding Author:** Mohammad Jafarifar

Citation: N. Foruzandeh Hafeshjani, M. Jafarifar, "Speed Control Improvement of Induction Machine Using Grey Wolf Optimization-Based Higher-Order Sliding Mode Load Torque Observer", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 14, no. 4, pp. 71-86, March 2026 (in Persian).

بهبود کنترل سرعت ماشین القایی با استفاده از رؤیت گر مد لغزشی مرتبه بالای گشتاور- بار مبتنی بر الگوریتم گرگ خاکستری

نوید فروزنده هفشجانی^۱، دانشجوی دکتری، محمد جعفری فر^{۲*}، استادیار

۱- گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، navid.foroozandeh@iau.ir

۲- گروه برق، واحد اندیمشک، دانشگاه آزاد اسلامی، اندیمشک، ایران، mohammad.jafarifar@iau.ac.ir

چکیده:

کنترل سرعت حلقه بسته ماشین‌های القایی از ابتدا توسط کنترلرهای PI انجام می‌شده است. در کاربردهای مختلف این نوع ماشین‌ها، به علت تغییرات ناگهانی گشتاور بار و همچنین تغییر پارامترهای ماشین در حین کار، عملکرد این نوع کنترلر همواره تحت تأثیر بوده و چندان مطلوب نخواهد بود. برای رفع این مشکل در این مقاله یک استراتژی کنترل غیرخطی ترکیب‌شده با کنترلر PI به همراه یک رؤیت گر گشتاور بار حالت لغزشی (HOSMC) معرفی می‌گردد. گشتاور بار به صورت لحظه‌ای توسط رؤیت گر پیشنهادی تخمین زده شده و سپس خطای بین گشتاور بار واقعی و تخمینی به کمک کنترلر PI ترکیب شده با استراتژی غیر خطی از بین خواهد رفت. به منظور افزایش راندمان عملکرد روش پیشنهادی، پارامترهای کنترلر پیشنهاد شده با کمک الگوریتم گرگ خاکستری تنظیم می‌شوند که باعث بهبود عملکرد این روش در شرایط مختلف بهره‌برداری خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار MATLAB بهبود عملکرد ماشین القایی با روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: ماشین القایی، درایوهای ماشین‌های القایی، رؤیت گر گشتاور بار، مد لغزشی، الگوریتم گرگ خاکستری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۹/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۵

* نام نویسنده مسئول: محمد جعفری فر

نشانی نویسنده مسئول: اندیمشک، خیابان دانشگاه، بلوار دانشجو، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اندیمشک، دانشکده فنی، گروه برق

کنترل سرعت درایو ماشین القایی IM همواره یک مساله مهم و چالش برانگیز در صنایع مختلف بوده است [۱]، [۲]. به طور معمول، طرح های کنترل خطی، مانند کنترلر انتگرالی-تناسبی (PI) به دلیل ایده ساده و تحقق آسان استفاده می شوند [۳]. با این حال در کاربردهای عملی، کنترل سرعت معمولاً به دلیل اختلال داخلی (تغییر پارامتر و دینامیک مدل نشده) و اختلال خارجی (تغییرات ناگهانی گشتاور بار) یک مساله غیرخطی و متغیر با زمان است [۴]. در میان این اختلالات، تغییرات ناگهانی گشتاور بار خارجی به طور اجتناب ناپذیری باعث نوسان سرعت می شود که منجر به بدتر شدن عملکرد حلقه سرعت مبتنی بر کنترلر PI معمولی می شود. اگرچه این نوسان سرعت را می توان در کاربردهای صنعتی عمومی نادیده گرفت، اما در کاربردهای صنعتی با دقت بالا، به عنوان مثال، ماشین ابزارهای کنترل شده CNC غیرقابل چشم پوشی می باشد. الگوریتم های مختلفی در سال های اخیر برای بهبود عملکرد حلقه ضد اغتشاش سرعت ارائه شده اند، مانند کنترل PI دو درجه آزادی [۵] کنترل تطبیقی [۶] کنترل پیش بینی [۲] [۷] کنترل فازی [۸]، کنترل حالت لغزشی [۹]، کنترل اغتشاش مبتنی بر رویتگر اغتشاش^۱ [۴] [۱]. در میان این الگوریتم ها، کنترل مبتنی بر DO به عنوان نوعی رویکرد بهینه با قابلیت ضد اغتشاش قوی در نظر گرفته می شود. ایده اصلی کنترل مبتنی بر DO برای اولین بار توسط Ohnishi در سال ۱۹۸۷ ارائه شد [۱۲]. بر این اساس، کنترل مبتنی بر DO به طور گسترده در کاربردهای صنعتی مختلف استفاده شده است [۱۳] - [۱۷]. در کنترل مبتنی بر DO، DO خطی به دلیل ساختار ساده اش به طور معمول استفاده می شود. با این حال، عملکرد پویا و استحکام آن محدود است. برای حل این مشکل، DO غیرخطی به عنوان یک رویکرد امیدوارکننده در نظر گرفته شده است. در [۱۵]، یک DO غیرخطی برای تخمین اختلال یک سیستم بسیار غیرخطی برای کنترل یک ربات مورد استفاده قرار گرفته است. [۱۸] یک DO فازی برای سیستم کنترل غیرخطی ارائه می کند که به وضوح پایداری سیستم و دقت ردیابی را بهبود می بخشد. در [۱۹]، نظریه شبکه عصبی با DO خطی ترکیب شده است تا اختلالات غیرخطی ناشناخته برای کنترل موقعیت موتور را تخمین بزند. برای کنترل سرعت درایو موتور AC، استفاده از کنترل مبتنی بر DO نیز توجه روزافزونی را به خود جلب کرده است. به عنوان فناوری کلیدی کنترل سرعت مبتنی بر DO، تخمین گشتاور بار یک مسئله محوری است. در [۲۰] و [۲۱]، نوعی رویت گر حالت توسعه یافته ESO^۲ که گشتاور بار را به عنوان حالت توسعه یافته در نظر می گیرد، برای کنترل سرعت موتور سنکرون مغناطیسی دائمی پیشنهاد شده است. با این حال، ESO ارائه شده اساساً یک DO خطی است و بنابراین عملکرد آن تحت عدم تطابق پارامترهای جانبی موتور و بار کاهش می یابد. [۲۲] کنترل حالت لغزشی معمولی SMC را با روش DO ادغام می کند تا استحکام آن را افزایش دهد، اما کنترل سوئیچینگ فرکانس بالا SMC باعث ایجاد اغتشاش می شود. بر این اساس، [۲۳] SMC^۲ معمولی را با ESO ترکیب می کند تا گشتاور بار را تخمین بزند. اگرچه گشتاور تخمینی را می توان با اعمال ساختار فیلتر پایین گذر هموار کرد، اما اغتشاش هنوز در ESO طراحی شده وجود دارد. [۲۴] همچنین یک SMC زمان گسسته یکپارچه را برای دستیابی به کنترل بدون گپ برای درایوهای سروو پیشنهاد می کند. در این روش پیشنهادی یک اتصال موازی از رویت گرهای مرتبه اول و دوم برای تخمین گشتاور بار اعمال می شود. با این حال، عملکرد دینامیکی رویت گر طراحی شده در برابر تغییرات گشتاور بار ناگهانی محدود است. برای بهبود ردیابی بار-گشتاور کنترل سرعت IM، این مقاله یک کنترل کننده PI با رویت گر گشتاور بار حالت لغزشی پایانه سریع HOSMC را پیشنهاد می کند. رویت گر مبتنی بر HOSMC پیشنهادی می تواند گشتاور بار سیستم را به دقت تخمین بزند و سپس گشتاور تخمین زده شده برای از بین بردن نوسانات سرعت ناشی از تغییرات گشتاور بار خارجی استفاده می شود. علاوه بر این، رویت گر پیشنهادی نه تنها می تواند از همگرایی سریع گشتاور بار تخمینی اطمینان حاصل کند، بلکه اغتشاش ذاتی رویت گر مبتنی بر SMC معمولی را نیز حذف می کند. در بخش دوم، ابتدا مدل ریاضی و دینامیک مکانیکی IM آورده شده است. سپس کنترل میدان جهت دهی شده روتور RFOC^۳ [25] به عنوان استراتژی کنترل پایه برای درایو IM اعمال می شود. در بخش سوم کنترل PI معمولی برای حلقه سرعت IM در حوزه فرکانس عنوان شده است. در بخش چهارم، کنترل مبتنی بر رویت گر گشتاور بار HOSMC بهبود یافته با الگوریتم گرگ خاکستری و همچنین تحلیل پایداری رویت گر و همگرایی زمان محدود ارائه شده است. در بخش نهایی نتایج حاصل از شبیه سازی کامپیوتری به منظور تایید عملکرد روش پیشنهادی با کمک نرم افزار سیمولینک آورده شده است.

۳- حلقه کنترل سرعت معمولی مبتنی بر PI و محدودیت‌های آن

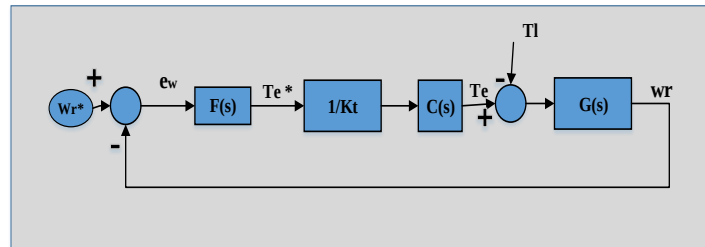
کنترل کننده PI معمولاً به عنوان تنظیم کننده حلقه سرعت برای اجرای ساده و بدون خطای استاتیکی استفاده می شود [۵]. رابطه (۴) تابع انتقال یک کنترل کننده PI استاندارد است:

$$F(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (۴)$$

که در آن K_p و K_i به ترتیب ضرایب تناسبی و انتگرالی هستند. نمودار ساده شده حلقه سرعت مبتنی بر کنترل PI در شکل (۲) نشان داده شده است. سرعت مرجع ω_r^* و سرعت اندازه گیری شده ω_r به ترتیب به عنوان ورودی و خروجی سیستم عمل می کنند. با اعمال کنترل PI با جبران نیرو محرکه القایی در حلقه جریان [۲۵]، [۲۶]، تابع انتقال حلقه جاری را می توان به صورت رابطه (۵) بیان کرد.

$$C(s) = \frac{k_t}{T_c s + 1} \quad (۵)$$

که در آن $1/T_c$ پهنای باند حلقه جاری است.



شکل (۲): بلوک دیاگرام ساده شده حلقه سرعت مبتنی بر کنترل PI

Figure (2): Simplified block diagram of a speed loop based on PI control

تابع انتقال حلقه باز سیستم از ω_r^* به ω_r می تواند به صورت رابطه (۶) نوشته شود:

$$G_0(s) = \frac{1}{k_t} F(s) C(s) G(s) = (k_p + \frac{k_i}{s}) \frac{1}{Js(T_c s + 1)} \quad (۶)$$

با توجه به تعریف فرکانس قطع ω_c و حاشیه فاز φ_m ، روابط (۷) و (۸) به دست خواهند آمد [27]:

$$|G_0(j\omega)| = \sqrt{K_p^2 + \frac{K_i^2}{\omega_c^2}} \frac{1}{J\omega_c \sqrt{T_c^2 \omega_c^2 + 1}} = 1 \quad (۷)$$

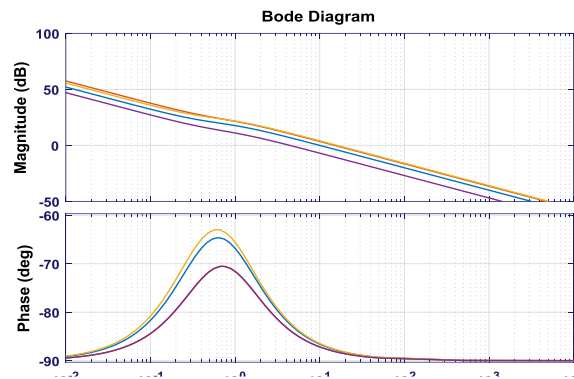
$$\varphi_m = \arg G_0(j\omega_c) = \arctan \frac{k_c \omega_c}{k_i} - \arctan(T_c \omega_c) \quad (۸)$$

با توجه به حلقه داخلی سیستم، پهنای باند حلقه جریان به طور کلی بسیار بیشتر از حلقه سرعت (حلقه خارجی) است و به این ترتیب می توان نوشت: $T_c^2 \omega_c^2 \ll 1$. بر این اساس، عبارات K_p و K_i را می توان با حل معادلات (۷) و (۸) استخراج کرد.

$$k_p = J\omega_c \sin(\varphi_m) \quad (۹)$$

$$k_i = J\omega_c \cos(\varphi_m) \quad (۱۰)$$

برای دستیابی به عملکرد رضایت بخش حلقه سرعت، باید ω_c و φ_m را در (۹) و (۱۰) تنظیم کرد. شکل (۳) نمودارهای Bode حلقه سرعت مبتنی بر کنترل PI را نشان می دهد. پارامترهای IM مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل در پیوست نشان داده شده است. پهنای باند حلقه جاری برابر با $T_c = 0.01$ رادیان بر ثانیه تنظیم شده است.



شکل (۳): نمودار بود از حلقه سرعت مبتنی بر کنترل PI

Figure (3): Bode diagram of a speed loop based on PI control

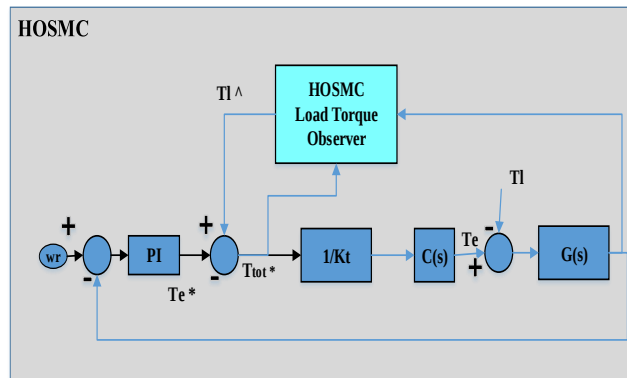
در شکل (۳)، حاشیه فاز با افزایش ϕ_m افزایش می‌یابد که منجر به افزایش پایداری سیستم می‌شود؛ اما به همین ترتیب، ϕ_m بیش از حد منجر به زمان نشست طولانی می‌شود؛ بنابراین، انتخاب ϕ_m و ω_c باید یک مبادله بین سرعت و ثبات سیستم باشد.

۴- کنترل مبتنی بر ریت گر گشتاور بار (HOSMC) پیشنهادی و بهبود آن با الگوریتم گرگ خاکستری

برای بهبود ردیابی بار-گشتاور در حلقه سرعت IM، یک کنترل مبتنی بر ریت گر گشتاور بار HOSMC مطابق با شکل (۴) پیشنهاد شده است. اگر گشتاور بار تخمینی بتواند به مقدار واقعی خود در دوره‌های نمونه‌گیری محدود همگرا شود، مرجع گشتاور بار ارائه‌شده توسط کنترل PI را می‌توان لغو کرد که منجر به خطی سازی دقیق سیستم کنترل می‌شود. خروجی T_{tot} کنترل‌کننده پیشنهادی به صورت طراحی شده است:

$$T_{tot}^* = T_e^* + T_l \quad (11)$$

جایی که $T_e^* = k_p e_\omega + k_i \int e_\omega dt$ مرجع گشتاور ارائه‌شده توسط کنترل PI است و $\hat{T}_l$ گشتاور بار تخمینی است.



شکل ۴. بلوک دیاگرام کنترل‌کننده مبتنی بر ریت گر گشتاور بار HOSMC پیشنهادی برای حلقه سرعت IM

Figure 4. Block diagram of the proposed HOSMC load torque observer-based controller for IM speed loop

در ادامه این بخش ابتدا اصل و مزایای تکنیک HOSMC معرفی می‌شود و سپس از تکنیک HOSMC برای طراحی ریت گر گشتاور بار استفاده می‌شود.

الف- اصول و مزایای HOSMC:

در مقایسه با کنترل خطی (به عنوان مثال، کنترل PI)، SMC به دلیل همگرایی سریع جهانی و پایداری قوی در برابر اختلالات سیستم شناخته شده است و در بسیاری از کاربردهای صنعتی با موفقیت استفاده شده است [۲۸]. به طور کلی، طراحی SMC شامل دو مرحله است:

- ۱) یک سطح حالت لغزشی که مسیر دینامیک سیستم را برنامه ریزی می کند، برای عملکرد مورد نظر انتخاب می شود.
- ۲) قانون کنترل به گونه ای طراحی شده است که دینامیک سیستم را وادار به رسیدن به سطح حالت لغزشی و ماندن بر روی سطح لغزشی می کند. به عنوان مثال یک سیستم غیر خطی نامشخص را به صورت زیر در نظر بگیرید:

$$\dot{x} = f(x) + d(x) + u \quad (12)$$

که در آن $x \in \mathbb{R}$ متغیر حالت است. $f(x)$ ورودی کنترل و تابع نرم و نامشخصی از x است و $d(x)$ نشان دهنده اختلال سیستم است. برای درک بهتر، سیستم تک خروجی-تک ورودی در اینجا در نظر گرفته شده است. همان طور که در [۲۹] نشان داده شده است، سطح حالت لغزشی ترمینال (TSM) و سطح حالت لغزشی پایانه سریع (FTSM) را می توان به ترتیب با (۱۳) و (۱۴) توصیف کرد:

$$s = \dot{x} + \beta |x|^\gamma \text{sign}(x) = 0 \quad (13)$$

$$s = \dot{x} + \alpha x + \beta |x|^\gamma \text{sign}(x) = 0 \quad (14)$$

که در آن $\alpha > 0$ ، $\beta > 0$ و $0 < \gamma < 1$ ثابت هستند. در مقایسه با سطح حالت لغزشی خطی معمولی، سطوح غیر خطی ارائه شده به ویژه سطح FTSM، برتری هایی را در نرخ همگرایی و دقت ردیابی حالت پایدار نشان می دهند [29]. در کنترل SMC متعارف، از یک قانون کنترل بسیار ساده (تابع علامت) استفاده می شود و به همین دلیل باعث نوسانات با فرکانس بالا و کاهش دقت کنترل خواهد شد. تحقیقات اخیر در زمینه حذف اغتشاش را می توان به طور عمده به سه دسته تقسیم کرد. دسته اول روش لایه مرزی [۳۰] است. تابع علامت SMC معمولی با یک تابع سیگموئید مانند یا یک تابع اشباع در لایه جایگزین می شود که به بهبود استحکام سیستم کمک می کند. دسته دوم استفاده از یک فیلتر پایین گذر اضافی برای صاف کردن سیگنال کنترل سوئیچینگ است، اما این روش تأخیر فاز را ایجاد می کند [31]. دسته سوم استفاده از کنترل مد لغزشی مرتبه بالا (HOSMC) است [32]. با تغییر کنترل ناپیوسته به مشتق قانون کنترل، HOSMC در تئوری به کنترل بدون اغتشاش دست می یابد. پایداری و استحکام HOSMC با استفاده از سطح TSM در [۳۳] اثبات شده است. در این مقاله، HOSMC به صورت ترکیب شده با سطح FTSM ارائه شده است. ساده ترین شکل قانون کنترل را می توان توسط رابطه زیر بیان کرد:

$$u = -f(x) - \beta |x|^\gamma \text{sign}(x) + u_n \quad (15)$$

$$\dot{u}_n + Tu_n = -k \text{sign}(x) \quad (16)$$

جایی که s توسط رابطه (۱۴) داده می شود و $u_n(0) = 0$ و $T, K > 0$ پارامترهای طراحی شده هستند. با انتخاب مناسب T و k ، کنترل کننده به شدت در برابر اختلالات سیستم $d(x)$ پایدار خواهد بود. به طور خلاصه، مزایای HOSMC ارائه شده به شرح زیر است:

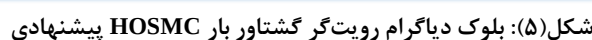
۱. همگرایی سریع و استحکام قوی SMC معمولی را حفظ می کند.
۲. با استفاده از سطح FTSM نقاط قوت را در همگرایی زمان محدود و دقت ردیابی حالت پایدار نشان می دهد.
۳. اساساً با استفاده از HOSMC مشکل اغتشاش SMC معمولی بهبود پیدا می کند.

ب. مشاهده گر گشتاور بار HOFTSM

در رابطه (۲)، با توجه به T_1 به عنوان حالت توسعه یافته سیستم، دینامیک مکانیکی IM توسعه یافته را می توان به صورت بیان کرد [۲۰]، [۲۱]:

همچنین رویت گر گشتاور بار HOSMC به صورت زیر در نظر گرفته خواهد شد:

که در آن $\hat{\mu}$ مقدار تخمینی را نشان می‌دهد، P قانون کنترل و Q مشتق گشتاور بار معادل طراحی شده است. شکل ۵ بلوک دیاگرام ریت‌گر گشتاور بار HOSMC پیشنهادی را نشان می‌دهد.



با کم کردن (۱۸) از (۱۷)، می‌توان معادله حالت خطای سیستم را به دست آورد:

که در آن $\hat{e}_\omega = \omega_r - \hat{\omega}_r$ خطای تخمینی سرعت و $\hat{e}_T = T_l - \hat{T}_l$ خطای تخمینی گشتاور بار است. طبق رابطه (۱۴)، یک سطح FTSM برای دستیابی به همگرایی زمان محدود و دقت ردیابی بهتر طراحی شده است.

که در آن α ، β و γ ثابت‌هایی هستند که به صورت (۱۴) تعریف شده‌اند.

قضیه ۱. اگر قانون کنترل HOSMC به صورت زیر طراحی شده باشد می توان نشان داد که سیستم خطا (۱۹)، به سطح (20) FTSM می رسد و حالت $e=0$ می تواند در امتداد سطح FTSM در مدت زمان محدود به صفر همگرا شود:

$$\dot{P}_n + \omega_f P_n = k_1 \text{sign}(s) \quad (22)$$

که در آن ω_f و k_1 پارامترهای قانون کنترل هستند؛ همچنین مشتق گشتاور بار معادل به صورت در نظر گرفته خواهد شد:

$$Q = -k_s \text{sign}(s) \quad (23)$$

که در آن k_2 پارامتر طراحی است. برای اثبات این موضوع یک تابع لیپانوف (V) در نظر گرفته می‌شود. مشتق آن نسبت به زمان برابر است با:

$$\dot{V} = s \dot{s} \quad (24)$$

با جایگزین کردن رابطه (19) در (20)، سطح حالت لغزشی s را می توان به فرم زیر بازنویسی کرد:

$$s = -\frac{e_T}{J} + \alpha e_\omega - P + \beta |e_\omega|^\gamma \text{sign}(e_\omega) \quad (25)$$

همچنین با جایگزینی (21) در (25) رابطه (26) استخراج می گردد:

$$s = -\frac{e_T}{J} - P_n \quad (26)$$

سپس مشتق s با توجه به زمان t را می توان به صورت بیان کرد:

$$\dot{s} = -\frac{\dot{e}_T}{J} - \dot{P}_n \quad (27)$$

با جایگزینی معادله دوم (19) و (26) در (27) نتیجه به صورت (28) خواهد شد:

$$\dot{s} = \frac{a-Q}{J} - k_1 \text{sign}(s) + \omega_f P_n \quad (28)$$

با جایگزینی (23) در (28) مشتق s به صورت (29) در می آید:

$$\dot{s} = \frac{a - (-k_2 \text{sign}(s))}{J} - k_1 \text{sign}(s) + \omega_f P_n = -(k_1 + \frac{k_2}{J}) \text{sign}(s) + \omega_f P_n - \frac{a}{J} \quad (29)$$

در نهایت تابع لیاپانوف را می توان با جایگزینی (29) در (28) به عنوان بازنویسی کرد:

$$-(k_1 + \frac{k_2}{J})|s| + \omega_f P_n s - \frac{as}{J} = (k_1|s| + \omega_f P_n s) + (\frac{-k_2|s| - as}{J})ss = s(-(k_1 + \frac{k_2}{J})\text{sign}(s) + \omega_f P_n - \frac{a}{J}) \quad (30)$$

لذا با انتخاب $k_2 > |a| + \eta J, k_1 > |\omega_f P_n|$ و η به صورت یک مقدار ثابت مثبت، پایداری تابع لیاپانوف تضمین خواهد شد:

$$\dot{V} = s \dot{s} < -\eta |s| < 0 \quad (31)$$

بنابراین، بر اساس قضیه پایداری لیاپانوف، دینامیک سیستم می تواند در مدت زمان محدود به سطح (20) FTSM همگرا شود و سپس بر روی آن باقی بماند. همچنین دینامیک خطای سیستم با معادله دیفرانسیل غیر خطی زیر تعیین می شود.

$$\dot{e}_\omega + \alpha e_\omega + \beta |e_\omega|^\gamma \text{sign}(e_\omega) = 0 \quad (32)$$

با توجه به قضیه پایداری زمان محدود [34]، و همچنین با در نظر گرفتن شرایط اولیه $e_\omega(0) \neq 0$ ، e_ω می تواند در زمان محدود با انتخاب مناسب α ، β و γ به صفر همگرا شود. تفسیر فیزیکی آن را می توان به صورت زیر بیان کرد: وقتی دینامیک

سیستم از $e_\omega = 0$ دور است، رابطه (32) را می توان به صورت $\dot{e}_\omega = -\alpha e_\omega$ تقریب زد که به این معنی است که نرخ همگرایی سریع می باشد [35]. با حل تحلیلی معادله دیفرانسیل (32) می توان زمان دقیق رسیدن به $e_\omega = 0$ را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$t_s = \frac{1}{\alpha(1-\gamma)} \ln \frac{\alpha |e_\omega(0)|^{1-\gamma} + \beta}{\beta} \quad (33)$$

علاوه بر این با جایگزینی $e_\omega = 0$ در (33) رابطه (34) به دست می آید که شرایط پایدار در سیستم را نشان خواهد داد:

$$\dot{e}_\omega = \alpha e_\omega = 0 \quad (34)$$

۱۱-۳- بهینه ساز گرگ خاکستری (GWO)

بهینه سازی، یکی از مسائل اصلی و حیاتی بشر محسوب می شود. از این رو، الگوریتم های بهینه سازی گوناگونی با رویکرد فراابتکاری^۵ معرفی شده اند. الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری که به اختصار (GWO) نامیده می شود یکی از جدیدترین

الگوریتم‌های فراابتکاری به شمار می‌رود که توسط آقای میرجلیلی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ ارائه شده است [36]. این الگوریتم در گروه الگوریتم‌های هوش جمعی قرار دارد و مانند خیلی از الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر، الهام گرفته از طبیعت است و اساس آن ساختار سلسله مراتبی است که رفتار اجتماعی گرگ‌های خاکستری را در زمان شکار، مدل‌سازی می‌کند. در پیاده‌سازی الگوریتم GWO، چهار نوع از گرگ‌های خاکستری، مانند آلفا، بتا، دلتا و امگا برای مدل‌سازی سلسله‌مراتبی رهبری گرگ‌های خاکستری، استفاده شده است که سه گام اصلی برای شکار، شامل جستجو برای طعمه، محاصره طعمه و حمله به طعمه، اجرا می‌شوند. نتایج حاصل از توابع محک گوناگون، حاکی از عملکرد مطلوب الگوریتم در مقایسه با الگوریتم‌های مشابه است [36].

به‌منظور شبیه‌سازی ریاضی رفتار شکار گرگ‌های خاکستری، فرض می‌شود آلفا (بهترین راه‌حل موجود)، بتا و دلتا در مورد مکان بالقوه طعمه آگاهی بهتری دارند؛ بنابراین سه تا از بهترین راه‌حل‌های به‌دست‌آمده را ذخیره کرده و دیگر عوامل جستجو (از جمله گرگ‌های امگا) وادار می‌شوند تا موقعیت خود را با توجه به موقعیت بهترین عوامل جستجو به‌روزرسانی نمایند. روابط (۳۵) و (۳۶) و (۳۷) در این رابطه ارائه شده است.

$$D_{\alpha} = |C_1 \cdot X_{\alpha} - X|, D_{\beta} = |C_2 \cdot X_{\beta} - X|, D_{\gamma} = |C_3 \cdot X_{\gamma} - X| \quad (35)$$

$$X_1 = X_{\alpha} - A_1 \cdot (D_{\alpha}), X_2 = X_{\beta} - A_1 \cdot (D_{\beta}), X_3 = X_{\gamma} - A_1 \cdot (D_{\gamma}) \quad (36)$$

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (37)$$

شکل (۶) فلوچارت الگوریتم GWO را نشان می‌دهد. این روش ابتدا به‌صورت تصادفی ماتریس متغیرها که همان موقعیت گرگ‌هاست شامل $K_p, K_i, k_1, k_2, \alpha, \beta, \gamma$ را به‌صورت تصادفی تولید کرده سپس برای هر حالت از موقعیت شبیه‌سازی را اجرا و تابع هدف را که اختلاف سرعت واقعی و سرعت مرجع می‌باشد را محاسبه و طبق روند الگوریتم گرگ خاکستری این روند تا پیدا کردن بهترین جواب ادامه می‌یابد.

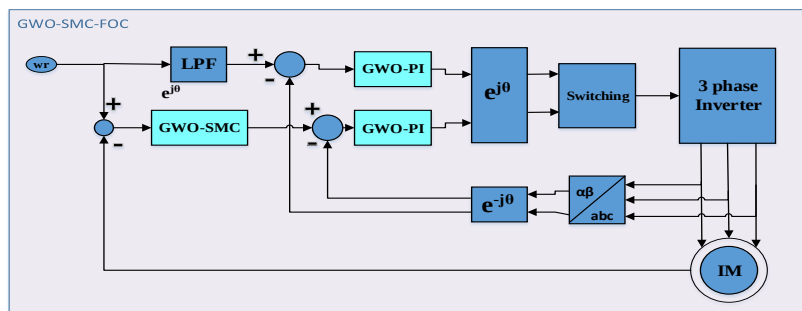


شکل (۶): فلوچارت روش HOSMC با الگوریتم GWO

Figure (6): Flowchart of the HOSMC method with the GWO algorithm

۵- شبیه سازی

برای تأیید عملکرد الگوریتم پیشنهادی، سیستم کنترلی راه انداز پیشنهادی مطابق شکل (۷) ارائه داده شده است. پارامترهای ماشین القایی در جدول (۱) آورده شده است. برای اندازه گیری سرعت از روش کنترل میدان جهت دار به عنوان الگوریتم کنترل پایه استفاده می شود. مرجع I_{sd} و حد اشباع I_{sq} به ترتیب روی ۶،۰ آمپر تنظیم می شوند. پهنای باند دو حلقه جاری روی ۱۰۰۰ رادیان بر ثانیه تنظیم شده و پارامترهای رویت گر گشتاور بار HOSMC طراحی شده عبارتند از: $\alpha = 1; \beta = 2; \gamma$ $k_2 = 200$ و $\omega = 1/2; \omega_f = 100; k_1 = 50$;



شکل (۷): بلوک دیاگرام سیستم پیشنهادی

Figure (7): Block diagram of the proposed system

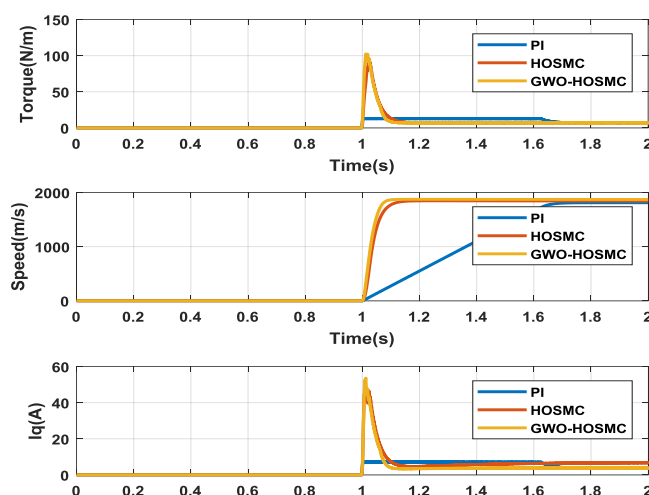
جدول (۱): پارامترهای ماشین القایی

Table (1): induction machine parameters

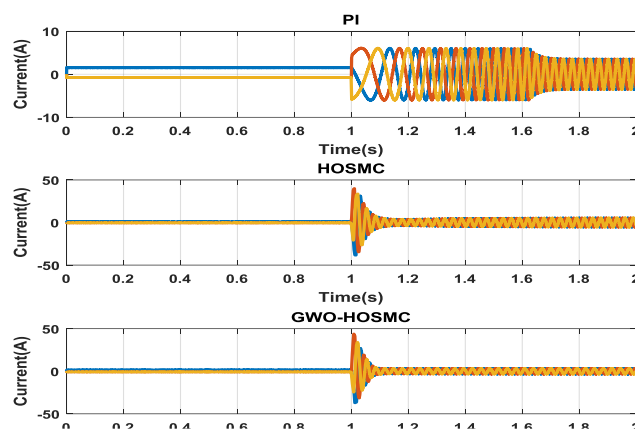
پارامتر	تعریف	مقدار
P_n	توان نامی	۳،۷ kW
V_n	ولتاژ نامی	380 v
ω_n	سرعت نامی	1500 r/min
n_p	تعداد قطبها	2
R_s	مقاومت استاتور	1.142 Ω
R_r	مقاومت روتور	0.825 Ω
L_m	اندوکتانس متقابل	118.9 mH
L_s, L_r	اندوکتانس استاتور و روتور	124.4 mH
J_{tot}	اینرسی کل	0.0256 kg.m ²

۵-۱- افزایش سرعت از صفر به ۱۸۰۰

شکل (۸) نمودار نتایج شبیه سازی گشتاور، سرعت و جریان I_q ماشین القایی را برای روش PI و کنترل کننده HOSMC و کنترل کننده HOSMC بهینه شده با الگوریتم گرگ خاکستری تحت پارامترهای کنترلی مختلف نشان می دهند. در نمودار گشتاور مشاهده می شود که روش PI بعد از ۰،۷ ثانیه به مقدار گشتاور مرجع می رسد در حالی که HOSMC پس از ۰،۱۱۹ ثانیه و GWO-HOSMC پس از ۰،۱۲ ثانیه مقدار گشتاور مرجع را دنبال خواهند کرد که بهینه کردن پارامترها این بهبود رفتار را بوجود آورده است. بنابراین، برای کنترل کننده PI دشوار است که به ردیابی گشتاور بار رضایت بخش دست یابد، در حالی که کنترل کننده پیشنهادی به خوبی و با سرعتی بیشتر از HOSMC مقدار مرجع را دنبال می کند. همچنین با همین نسبت زمانی در نمودار سرعت و جریان نیز تفاوت این دو روش واضح است. شکل (۹) نیز جریان های استاتور را برای روش های ذکر شده نشان می دهد که بسیار سریعتر و در زمان کمتری جریان به مقدار نهایی خود خواهند رسید.



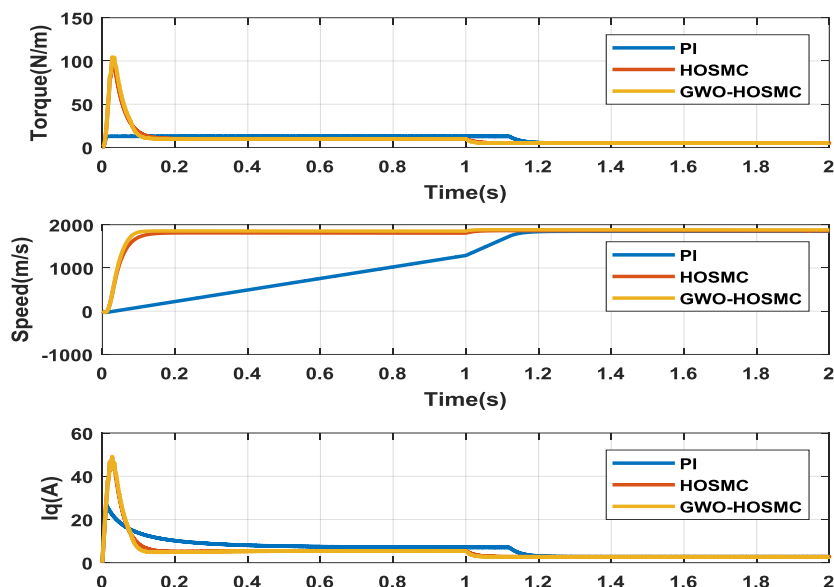
شکل (۸): نمودار گشتاور، سرعت و جریان موتور القایی در سناریو افزایش سرعت مرجع تا ۱۸۰۰ رادیان بر ثانیه
Figure (8): Torque, speed and current diagram of an induction motor in the scenario of increasing the reference speed to 1800 radians/s



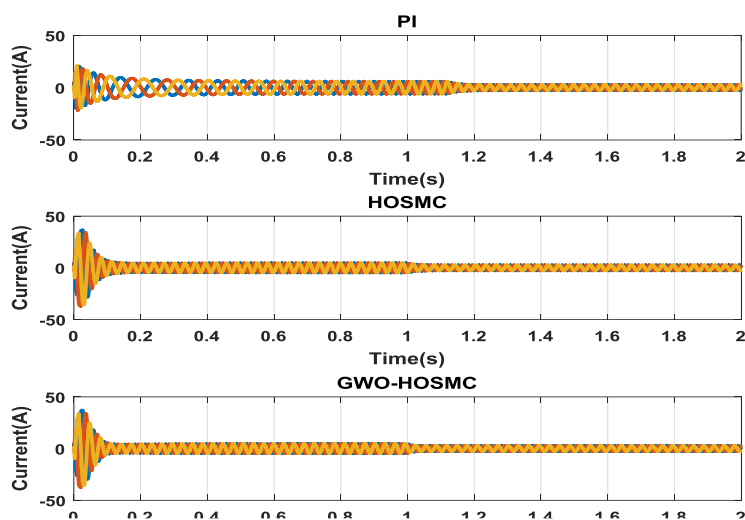
شکل (۹): نمودار جریان سه فاز موتور القایی در سناریو افزایش سرعت مرجع تا ۱۸۰۰ رادیان بر ثانیه
Figure (9): Three-phase currents of induction motor in the scenario of increasing the reference speed to 1800 radians/s

۵-۲- سرعت ثابت و کاهش ناگهانی گشتاور در ثانیه ۱

به منظور بررسی رفتار کنترل کننده پیشنهادی GWO-HOSMC سناریویی با سرعت ثابت ۱۸۰۰ دور بر ثانیه و تغییر ناگهانی گشتاور از ۱۰ به ۵ نیوتن بر متر در نظر گرفته شده است. شکل (۱۰) نمودار نتایج شبیه سازی این سناریو را نشان می دهد. در نمودار گشتاور مشاهده می شود که PI بعد از ۱،۱۶ ثانیه به مقدار گشتاور مرجع می رسد در حالی که HOSMC پس از ۰،۲۳ و GWO-HOSMC پس از ۰،۲۲ ثانیه مقدار گشتاور مرجع را دنبال می کند. همچنین با همین نسبت زمانی در نمودار سرعت و جریان نیز تفاوت این دو روش واضح است. شکل (۱۱) نیز جریان استاتور را نشان می دهد که تغییر اختلاف فاز در روش PI تا زمان تغییر گشتاور وجود دارد ولی در روش پیشنهادی قبل و بعد از تغییر گشتاور به سرعت پایداری مشاهده می شود.



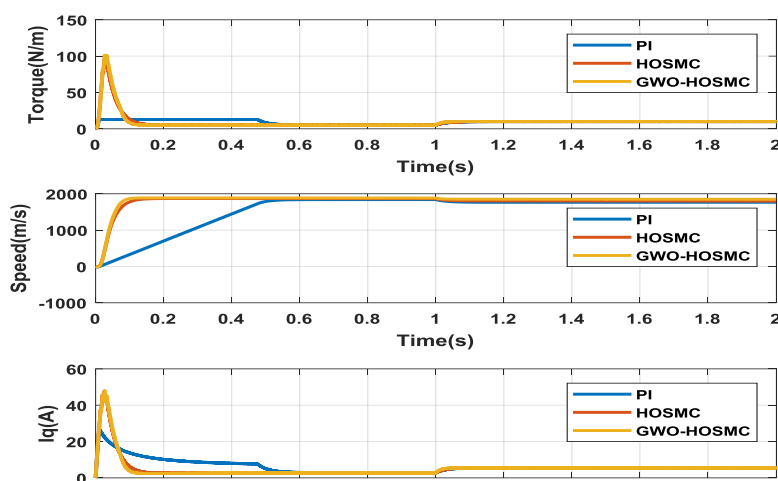
شکل (۱۰): نمودار گشتاور، سرعت و جریان موتور القایی در سناریو کاهش گشتاور
Figure (10): Torque, speed and current diagram of induction motor in torque reduction scenario



شکل (۱۱): نمودار جریان سه فاز موتور القایی در سناریو کاهش گشتاور
Figure (11): Three-phase currents of induction motor in torque reduction scenario

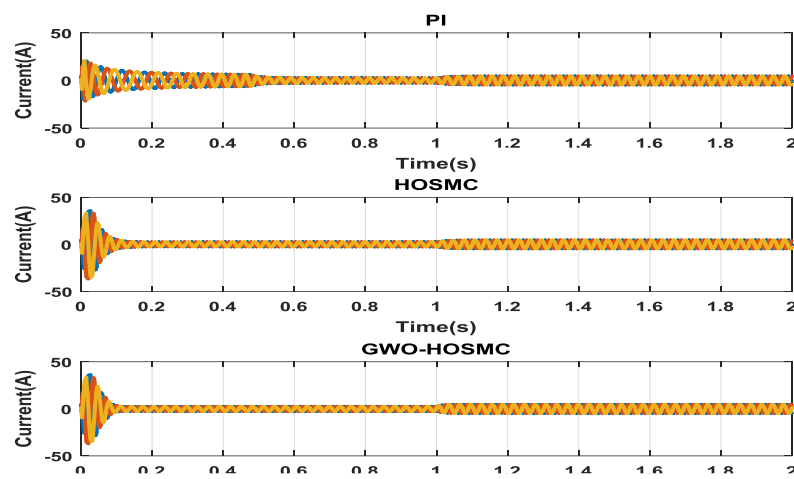
۳-۵- سرعت ثابت و افزایش ناگهانی گشتاور در ثانیه ۱

به منظور بررسی رفتار کنترل کننده پیشنهادی GWO-HOSMC سناریویی با سرعت ثابت ۱۸۰۰ دور در ثانیه و تغییر ناگهانی گشتاور از ۵ به ۱۰ نیوتن بر متر در نظر گرفته می شود تا عملکرد روش پیشنهادی سنجیده شود. شکل (۱۲) نمودار نتایج شبیه سازی گشتاور، سرعت و جریان I_q ماشین القایی را برای کنترل کننده PI، کنترل کننده HOSMC معمولی و GWO-HOSMC بهینه شده با الگوریتم گرگ خاکستری را تحت پارامترهای کنترلی مختلف نشان می دهد. همچنین مشخص است که با همین نسبت زمانی در نمودار سرعت و جریان نیز تفاوت این دو روش واضح است. شکل (۱۳) نیز جریان استاتور را نشان می دهد که تغییر اختلاف فاز در روش اول تا ۰.۵ ثانیه بعد از تغییر گشتاور وجود دارد ولی در روش پیشنهادی قبل و بعد از تغییر گشتاور به سرعت پایداری مشاهده می شود.



شکل (۱۲): نمودار گشتاور، سرعت و جریان تربیعی موتور القایی در سناریو افزایش گشتاور

Figure (12): Torque, speed and squared current diagram of an induction motor in a torque boost scenario



شکل (۱۳): نمودار گشتاور، سرعت و جریان موتور القایی در سناریو افزایش گشتاور

Figure (13): Torque, speed and current diagram of an induction motor in a torque boost scenario

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش کنترل سرعت مبتنی بر رؤیت گر گشتاور بار مد لغزشی مرتبه بالا (HOSMC) همراه با کنترل کننده PI و بهینه سازی پارامترها توسط الگوریتم گرگ خاکستری (GWO) برای درایو موتور القایی ارائه شد. در ساختار پیشنهادی، گشتاور بار به صورت برخط توسط رؤیت گر HOSMC تخمین زده شده و خطای ناشی از اغتشاشات بار از طریق ساختار کنترلی ترکیبی جبران می شود. همچنین، به کارگیری الگوریتم گرگ خاکستری موجب تنظیم بهینه پارامترهای کنترل کننده و بهبود عملکرد دینامیکی سیستم گردید.

به منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، سه سناریوی مختلف شامل راه اندازی و افزایش سرعت مرجع، کاهش ناگهانی گشتاور بار و افزایش ناگهانی گشتاور بار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی نشان دادند که کنترل کننده پیشنهادی در مقایسه با کنترل کننده PI متداول و روش HOSMC معمولی دارای زمان نشست کمتر، دقت ردیابی بالاتر و مقاومت بیشتر در برابر اغتشاشات بار است. در سناریوی افزایش سرعت، زمان رسیدن به مقدار مرجع از حدود ۰٫۷ ثانیه در روش PI به حدود ۰٫۱۲ ثانیه در روش پیشنهادی کاهش یافت. همچنین در شرایط تغییرات ناگهانی بار، روش پیشنهادی توانست با سرعت بیشتری به شرایط پایدار بازگردد و نوسانات سرعت، گشتاور و جریان را به میزان قابل توجهی کاهش دهد.

نتایج به دست آمده نشان می دهد که ترکیب رؤیت گر HOSMC با الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری می تواند ضمن کاهش اثر پدیده چترینگ، قابلیت دفع اغتشاش و پایداری سیستم را بهبود داده و عملکرد مطلوب تری نسبت به روش های مرسوم فراهم کند. بنابراین، ساختار پیشنهادی گزینه ای مناسب برای کاربردهای صنعتی موتورهای القایی در شرایط بهره برداری متغیر و حضور اغتشاشات بار محسوب می شود.

به عنوان ادامه این پژوهش، پیاده سازی عملی روش پیشنهادی بر روی یک درایو واقعی موتور القایی و بررسی عملکرد آن در شرایط عدم قطعیت پارامترهای ماشین و وقوع خطاهای الکتریکی می تواند مورد توجه قرار گیرد.

References

- [1] L. Amezcuita-Brooks, J. Liceaga-Castro, and E. Liceaga-Castro, "Speed and position controllers using indirect field-oriented control: A classical control approach," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 4, pp. 1928–1943, Apr. 2014.
- [2] Z. Hu, K. Hameyer, "A Method of Constraint Handling for Speed-Controlled Induction Machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 7, pp. 4061–4072, May. 2016.
- [3] L. Niu, D. Xu, M. Yang, X. Gui, and Z. Liu, "On-line inertia identification algorithm for PI parameters optimization in speed loop," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 2, pp. 849–859, Feb. 2015.
- [4] J. Li, H. Ren, and Y. Zhong, "Robust speed control of induction motor drives using first-order auto-disturbance rejection controllers," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 1, pp. 712–720, Jan./Feb. 2015.
- [5] L. Harnefors, S. Saarakkala, and M. Hinkkanen, "Speed control of electrical drives using classical control methods," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 2, pp. 889–898, Mar./Apr. 2013.
- [6] J. W. Jung, V. Q. Leu, T. D. Do, E. K. Kim, and H. H. Choi, "Adaptive PID speed control design for permanent magnet synchronous motor drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 2, pp. 900–908, Feb. 2015.
- [7] C. Wang, M. Yang, W. Zheng, J. Long, and D. Xu, "Vibration suppression with shaft torque limitation using explicit MPC-PI switching control in elastic drive systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 11, pp. 6855–6867, Nov. 2015.
- [8] M. Masiala, B. Vafakhah, J. Salmon, and A. M. Knight, "Fuzzy self-tuning speed control of an indirect field-oriented control induction motor drive," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, no. 6, pp. 1732–1740, Nov./Dec. 2008.
- [9] M. Jafarifar, and I. Chaharmahali, "Sensorless Speed Control of Multiphase Induction Machine under Unbalanced Supply Condition using Super Twist Observer and MRAS Theory," *Journal of Novel Researches on Electrical Power*, vol. 11, no. 2, pp. 1-8, 2022.
- [10] J. Back and H. Shim, "Adding robustness to nominal output-feedback controllers for uncertain nonlinear systems: A nonlinear version of disturbance observer," *Automatica*, vol. 44, no. 10, pp. 2528–2537, Oct. 2008.
- [11] W. Chen, J. Yang, L. Guo, and S. Li, "Disturbance-observer-based control and related methods—an overview," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 2, pp. 1083–1095, Feb. 2016.
- [12] K. Ohnishi, "A new servo method in mechatronics," *Trans. Jpn. Soc. Elect. Eng.*, vol. 107-D, pp. 83–86, 1987.
- [13] W. Kim, D. Shin, D. Won, and C. C. Chung, "Disturbance-observer based position tracking controller in the presence of biased sinusoidal disturbance for electrohydraulic actuators," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 21, no. 6, pp. 2290–2298, Nov. 2013.
- [14] C. S. Wang, X. L. Li, L. Guo, and Y. W. Li, "A nonlinear-disturbance observer-based DC-bus voltage control for a hybrid AC/DC microgrid," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 11, pp. 6162–6177, Nov. 2014.
- [15] Z. Li, C.-Y. Su, L. Wang, Z. Chen, and T. Chai, "Nonlinear disturbance observer based control design for a robotic exoskeleton incorporating fuzzy approximation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 9, pp. 5763–5775, Sep. 2015.

- [16] N. Kobayashi, F. P. Wijaya, K. Kondo, O. Yamazaki, "Induction motor speed-sensorless vector control using mechanical simulator and disturbance torque compensation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 3, pp. 2323-2331, May./Jun. 2016.
- [17] H. Chu, B. Gao, W. Gu, and H. Chen, "Low speed control for permanent magnet dc torque motor using observer-based nonlinear triple-step controller," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 4, pp. 3286-3296, Apr. 2017.
- [18] E. Kim, "A fuzzy disturbance observer and its application to control," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 10, no. 1, pp. 77-85, Feb. 2002.
- [19] J.-S. Ko and B.-M. Han, "Precision position control of PMSM using neural network disturbance observer on forced nominal plant," in *Proc. IEEE Int. Conf. Mechatronics*, 2006, pp. 316-320.
- [20] S. Li and Z. Liu, "Adaptive speed control for permanent-magnet synchronous motor system with variations of load inertia," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 8, pp. 3050-3059, Aug. 2009.
- [21] H. Liu and S. Li, "Speed control for PMSM servo system using predictive functional control and extended state observer," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 2, pp. 1171-1183, Feb. 2012.
- [22] S. Lin, Y. Cai, B. Yang, and W. Zhang, "Electrical line-shafting control for motor speed synchronisation using sliding mode controller and disturbance observer," *IET Control Theory Appl.*, vol. 11, no. 2, pp. 205-212, 2017.
- [23] X. Zhang, L. Sun, K. Zhao, and L. Sun, "Nonlinear speed control for PMSM system using sliding-mode control and disturbance compensation techniques," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 3, pp. 1358-1365, Mar. 2013.
- [24] C. Milosavljevic, B. P. Drazenovic, and B. Veselic, "Discrete-time velocity servo system design using sliding mode control approach with disturbance compensation," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 9, no. 2, pp. 920-927, May. 2013.
- [25] S. K. Sul, *Control of electric machine drive systems*, NYSE: John Wiley & Sons, 2011, ch. 5.
- [26] A. G. Yepes, A. Vidal, O. Lopez, and J. Doval-Gandoy, "Evaluation of techniques for cross-coupling decoupling between orthogonal axes in double synchronous reference frame current control," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 7, pp. 3527-3531, Jul. 2014.
- [27] K. Åström and T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, 2nd ed. Research Triangle Park, NC, USA: Instrum. Soc. Amer., 1995.
- [28] V. Utkin, *Sliding Modes in Control Optimization*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1992.
- [29] S. Yu, X. H. Yu, and B. Shirinzadeh, "Continuous finite-time control for robotic manipulators with terminal sliding mode," *Automatica*, vol. 41, no. 11, pp. 1957-1964, Nov. 2005.
- [30] M.-S. Chen, Y.-R. Hwang, and M. Tomizuka, "A state-dependent boundary layer design for sliding mode control," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 47, no. 10, pp. 1677-1681, Oct. 2002.
- [31] K. L. Kang, J. M. Kim, K. B. Hwang, and K. H. Kim, "Sensorless control of PMSM in high speed range with iterative sliding mode observer," in *Proc. IEEE APEC*, Feb. 22-26, 2004, vol. 2, pp. 1111-1116.
- [32] A. Levant, "Higher-order sliding modes, differentiation and output- feedback control," *Int. J. Control*, vol. 76, no. 9/10, pp. 924-941, 2003.
- [33] Y. Feng, F. Han, and X. Yu, "Chattering free full-order sliding-mode control," *Automatica*, vol. 50, no. 4, pp. 1310-1314, Apr. 2014.
- [34] Y. Hong, J. Huang, and Y. Xu, "On an output finite-time stabilization problem," *IEEE Trans Automat. Contr.*, vol. 46, no. 2, pp. 305-309, Feb. 2001.
- [35] X. Yu and Z. Man, "Fast terminal sliding mode design for nonlinear dynamic systems," *IEEE Trans. Circuit Syst. Part I*, vol. 49, no. 2, pp. 261-264, Feb. 2002.
- [36] Seyedali Mirjalili, Seyed Mohammad Mirjalili, Andrew Lewis, *Grey Wolf Optimizer*, *Advances in Engineering Software*, Volume 69, 2014.

زیرنویس‌ها:

1. Disturbance Observer (DO)
۲. Extended State Observer
۳. Sliding-Mode Control
4. Rotor Field-Oriented Control
5. Metaheuristics
6. Gray Wolf Optimization (GWO)