# كنترل سرعت موتور القايي با استفاده از ساختـار متغير مبتنـي بر مد لغزشی فازي بر مبناي خطيسازي با فيدبك


محمدرضا فيضی استاديار دانشكدة مهندسی برق و كامپيوتر، دانشگاه تبريز

محمدرضا بنائی دانشجوی دكترای قدرت، دانشكدة مهندسی برق و كامپيوتر، دانشگاه تبريز



**چكيده**

در اين مقاله كنترل سرعت موتور القايي به روش ساختار متغير مبتني بر مد لغزش مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از اين روش مقاومت عملكرد سيستم را در برابر اختلالات و نامعينيها و بالاخص تغييرات پارامترها تضمين ميكند. براي حذف نوسانات حول خط لغزش از قانون تعديل شده فازي استفاده شده است، بدون آنكه مقاومت سيستم در برابر نامعينيها كاهش چشمگيري داشته باشد. فلوي روتور با رؤيتگر فلو در قاب مرجع روتور تخمين زده شده و تئوري خطي سازي با فيدبك براي دكوپله كردن سرعت روتور و دامنه فلو مورد استفاده قرار گرفته است. نتايج شبيهسازي پاسخ مناسب كنترل كننده پيشنهادي را براي تغييرات بار و تغييرات سرعت مرجع نشان ميدهد.



**كلمات كليدی: كنترل ساختار متغير، خط لغزش فازي، خطي سازي با فيدبك، موتور القايي.**


# Speed Control of Induction Motors Using Variable Structure Technique Based on Fuzzy Sliding Mode and Feedback Based Linearization


M. R. Feyzi and M. R. Banaei Faculty of Elec. and Computer Eng., University of Tabriz



**Abstract**

The speed control of induction motor using a fuzzy sliding mode based variable structure technique is proposed. This technique provides a robust performance of the motor against the variation of the motor parameters as well as uncertainties and disturbances. Modified fuzzy rules are used to eliminate the oscillation around the sliding line without significant reduction of the robustness of the system. Rotor flux is estimated by using an observer in rotor reference frame and then the feedback linearization theory is used in order to decouple the rotor speed and flux. The simulation results showed satisfactory results for the proposed control technique where the load and reference speed are changed.



**Key words: Variable structure control, Sliding mode, Feedback Linearization, Induction motor.**

## ۱- مقدمه

اخیراً پیشرفت سریع در زمینه الکترونیك قدرت روشهای جدید و قابل انعطاف بیشتری را برای کنترل سرعت موتورهاي القايي امکانپذیر ساخته است که از آن جمله می‌توان به کنترل در جهت میدان اشاره نمد. در این روش در شرایط ایده‌آل، فلوي روتور در امتداد محور q به سمت صفر و فلوي روتور در امتداد محور d ثابت نگه داشته میشود به طوری‌که فلو و گشتاور موتور میتوانند به طور مستقل کنترل شوند. انجام این روشها مستلزم درایوهایی با کنترل ویژه به خود است که به طور ضمنی تابعی از پارامترهای مختلف موتور است و در نتیجه، هرگونه اختلال و نامعيني در پیشبینی یا تخمین این پارامترها کیفیت عمل کنترل سرعت را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. در عمل، هر گونه خطا در تخمین پارامترها و به خصوص تغییرات پارامترها با دما و نیز گشتاور بار اختلالات و نامعینیهایی در سیستم به وجود می‌آورند و مانع از عملکرد مورد انتظار از سیستم می‌گردند. همین مسأله نظر محققین زیادي را به خود جلب کرده و از آنجا طرحها و روشهای مختلفی پیشنهاد شده است که از جمله می‌توان به خطیسازي با فیدبك اشاره نمد [۳-۱]. کنترل ساختار متغیر با مد لغزشی نیز در سالهاي اخیر مورد توجه زيادي قرار گرفته است [۶-۴]. مرجع [۷] کنترل سرعت موتور القايي را با استفاده از مد لغزشی با جبرانساز انتگرالي انجام داده است ولی با توجه به ماهیت روش به کار رفته، دارای پاسخ زمانی نسبتاً طولانی بوده و در نتیجه پاسخ آن به تغییرات ورودی کُند است. مرجع [۸] نیز خطی‌سازی با فیدبک مبتنی بر شبکه عصبی را به کار برده است ولی زمان محاسبات لازم برای تولید ورودی کنترلی نسبتاً زیاد است که موجب کُند شدن پاسخ می گردد.

ویژگی یک سیستم کنترل ساختار متغیر آن است که کنترل کننده بین دو ساختار کنترل مجزاي ساده سوئیچ شود. در مرجع [۹] یک کنترل کننده سرعت مبتني بر مد لغزشی معرفي شده است که از سرعت و همچنین از تغییرات سرعت براي تولید ورودي کنترل براي موتور استفاده می‌کند. این ورودي به صورت ناپیوسته است و به اندازه اي بزرگ انتخاب شده است که بتواند بر نامعینیها غلبه کند ولی ناپیوسته بودن ورودي کنترل نوساناتي را حول خط لغزش به وجود میآورد. در همان مرجع از تابع اشباع براي کاهش نوسانات استفاده شده است و این میتواند پاسخ سیستم را کُند کُند. مرجع [۱۰] از کنترل ساختار متغیر با خط لغزش فازی و مرجع [۱۱] از رؤيتگر خط لغزش برای رسیدن به همان هدف استفاده نمده است ولی تعداد قوانین فازی به کار رفته در آنها زیاد و پیچیده است. در یک کار جدید، مرجع [۱۲] مد لغزشی فازی را در کنترل گشتاور و فلوی یک موتور القایی استفاده کرده و تغییرات آنها را تقریباً به صورت خطی با ورودیهای متناظر کنترل نمده است ولی برای از بین بردن نوسانات سرعت که به روش استفاده شده مربوط است به تعداد زیادی قانون فازی متوسل شده است.

در این مقاله، ابتدا از خطی سازی با فیدبک و سپس از ایده خط لغزش فازي براي کاهش نوسانات استفاده شده است. در روش ارائه شده، برخلاف روش به کار رفته در مرجع [۹] از ورودي کنترل تعدیل شده فازي در پهناي باند مشخصي از خط لغزش استفاده شده است که علاوه بر سادهتر کردن معادلات، پاسخ بهتری نسبت به سایر کارها، از جمله [۱۰] ارایه می‌دهد بدون آنکه مقاومت سیستم را در برابر اختلالات کاهش دهد.

## ۲- مدل رياضي موتور القايي

دینامیك موتور القايي در قاب مرجع d-q که با سرعت زاویهاي روتور میچرخد میتواند با معادلات زیر توصیف شود:

$$\dot{\lambda}_{dr} = -(\lambda_{dr} - M i_{ds}) / \tau_r \quad (۱)$$

$$\dot{\lambda}_{qr} = -(\lambda_{qr} - M i_{qs}) / \tau_r \quad (۲)$$

$$J\dot{\omega}_m = K_T (\lambda_{dr} i_{qs} - \lambda_{qr} i_{ds}) - B\omega_m - T_L \quad (۳)$$

$$\tau_r = L_r / R_r \;,\; K_T = 3 n_P M / (2 L_r) \quad (۴)$$

در روابط فوق، $(i_{ds}, i_{qs})$ و $(\lambda_{dr}, \lambda_{qr})$ به ترتیب جریانهای استاتور و فلوهای d و q می‌باشد. $\omega_m$ سرعت زاویهاي روتور است. $B, J, n_p, M, L_r, R_r$ به ترتیب مقاومت روتور، اندوکتانس روتور، اندوکتانس متقابل، تعداد زوج قطبها، ممان اینرسي قسمت گردان و ضریب ویسکوزیته موتور و بار هستند. $T_L, K_T, \tau_r$ نیز به ترتیب ثابت زماني موتور، ثابت گشتاور و گشتاور بار هستند. دامنه فلوي روتور به صورت زیر تعریف میشود:

$$\lambda_r = \sqrt{\lambda_{dr}^2 + \lambda_{qr}^2} \quad (۵)$$

از تـرکیب معادلـه فوق با (۱) و (۲) مشتق زمانـي $\lambda_r$ مـیتـوانـد بـه صورت زیر حاصل شود:

$$\dot{\lambda}_r = -\lambda_r / \tau_r + M(i_{ds}\lambda_{dr} + i_{qs}\lambda_{qr})/(\tau_r\lambda_r) \quad (۶)$$

با استفاده از (۳) و (٦) و بر مبناي خطیسازی با فیدبك [۹]، دو ورودي کنترل جدید میتواند به صورت زیر تعریف شوند:

$$\begin{bmatrix} u_\phi \\ u_T \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda_r}\begin{bmatrix} \lambda_{dr} & \lambda_{qr} \\ -\lambda_r\lambda_{qr} & \lambda_r\lambda_{dr} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (۷)$$

به کمك روابط (۳)، (٦) و (۷) دینامیك موتور به صورت دو معادله دکوپله شده زیر ساده شود:

$$\dot{\lambda}_r = -\lambda_r/\tau_r + Mu_\varphi/\tau_r \quad (۸)$$

$$J\dot{\omega}_m = -B\omega_m + K_T u_T - T_L \quad (۹)$$

بنابراین از دو ورودي کنترل جدید $u_\phi$ و $u_T$ میتوان به طور مجزا براي کنترل فلوي روتور و سرعت موتور استفاده کرد.

## ۳- رویت فلوي روتور

براي تخمین فلوي روتور، رؤیتگر فلو به ترتیب زیر پیشنهاد میشود [۹]:

$$\dot{\hat{\lambda}}_{dr} = -\hat{\lambda}_{dr} / \tau_r + Mi_{ds} / \tau_r \quad (۱۰)$$

$$\dot{\hat{\lambda}}_{qr} = -\hat{\lambda}_{qr} / \tau_r + Mi_{qs} / \tau_r \quad (۱۱)$$

$\hat{\lambda}_{dr}$ و $\hat{\lambda}_{qr}$ به ترتیب تخمین فلوي روتوردر امتداد محورهای $d$ و $q$ هستند.

اگر خطاي فلوی روتور در امتداد محور $d$ برابر $e_d$ و در امتداد محور $q$ برابر $e_q$ باشد آنگاه $e_d = \lambda_{dr} - \hat{\lambda}_{dr}$ و $e_q = \lambda_{qr} - \hat{\lambda}_{qr}$ خواهــد شـد. در این صورت با استفاده ازمعادلات (۱) و (۲) و (۱۰) و (۱۱) نتیجه مي شود:

$$\dot{e}_d = -e_d / \lambda_r \quad (۱۲)$$

$$\dot{e}_q = -e_q / \lambda_r \quad (۱۳)$$

از روابط (۱۲) و (۱۳) ملاحظه میشود که همگرایي دینامیك خطاي رؤیتگر با ثابت زماني $\lambda_r$ محدود میشود.

## ۴- کنترل سرعت موتور القايي با کنترل کننده ساختار متغیر مبتني بر مد لغزشی فازي

طرحواره ساختار کنترل کننده با خط لغزش فازي در شکل (۱) نشان داده شده است. اساس طراحي در این شکل بر کنترل جریان بنا شده است. اینورتر به کار رفته براي تغذیه موتور از نوع ولتاژ کنترل شده با جریان است. جریان نمونهبرداري شده از فازهاي موتور از جریان مرجعي که توسط خطیسازي با فیدبك تولید میشود کم شده و اختلاف حاصله به عنوان خطاي جریان براي تولید پالس اینورتر به کنترل کننده هیسترزیس داده میشود. خطیسازي با فیدبك و عمل دکوپله کردن فلوي روتور و سرعت موتور توسط فلوي تخمین زده شده توسط رؤیتگر انجام میشود. ورودي کنترل $u_T$ توسط کنترل کننده ساختار متغیر مبتني بر خط لغزش به منظور صفر کردن خطاي سرعت تولید میشود.

### ۴-۱- طراحي کنترل کننده ساختار متغیر

در اولین مرحله طراحي، خطاي سرعت و مشتق آن به عنوان متغیرهای حالت $x_1$ و $x_2$ به صورت زیر تعریف میشود:

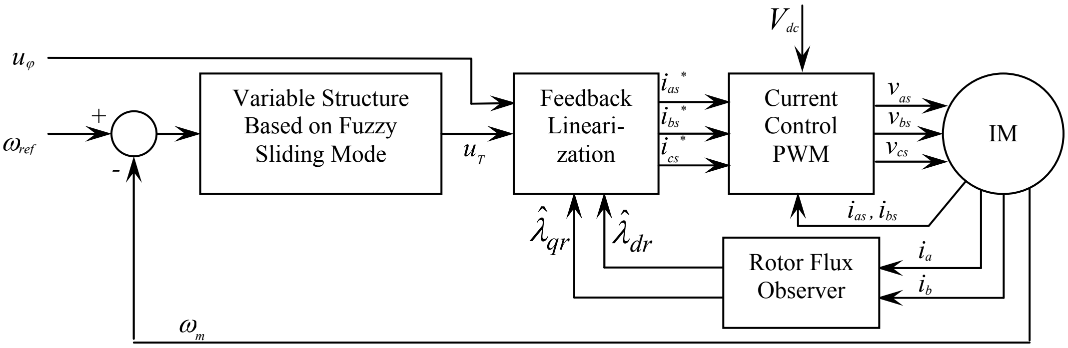
$$x_1 = \omega - \omega_{ref} \quad (۱۴)$$

$$x_2 = \dot{\omega} \quad (۱۵)$$

در روابط فوق $\omega$ و $\omega_{ref}$ به ترتیب سرعت موتور و سرعت مرجع است. خط لغزش به صورت (١٦) تعریف میشود [۹] (روي خط لغزش در فضاي دو بعدي $s = 0$ است).

$$s = x_2 + \lambda x_1 \quad (۱۶)$$

هدف تولید یک ورودي کنترل، $u_T$ است به طوري که حالت $x_1$ و $x_2$ در هر نقطه از فضاي حالت دو بعدي که قرار داشته باشد، بعداز گذشت مدت زمان محدودی روي خط لغزش (١٦) سوق داده شود. معادله حرکت از صفر قرار دادن رابطه (١٦) به صورت زیر حاصل میشود:




**شکل ۱- کنترل کننده ساختار متغیر مبتنی بر مد لغزشی فازی برای موتور القایي**

$$s = x_2 + \lambda x_1 = 0 \;\Rightarrow\; \dot{\omega} + \lambda(\omega - \omega_{ref}) = 0 \quad (۱۷)$$

مسیر حالت پس از برخورد با خط لغزش با ثابت زماني $\frac{1}{\lambda}$ در (۱۷) به صورت نمايي به سمت صفر سوق پيدا ميکند.

با انتخاب مناسب $\lambda$ ميتوان به پاسخ سرعت مناسب دست يافت. شرط اینکه مسیر حالت از هر نقطه اختياري به سمت خط لغزش سوق پيدا کند پايداري تابع لياپانوف $v = \frac{1}{2}s^2$ است [۹]. براي اين منظور بايد شرط (۱۸) برقرار شود.

$$\frac{d}{dt}v = \frac{1}{2}\frac{d}{dt}s^2 \le 0 \;\Rightarrow\; s\dot{s} < 0 \quad (۱۸)$$

$\dot{s}$ مشتق زمانی $s$ برحسب زمان است. براي به دست آوردن $u_{T,eq}$ که مسیر حالت را در سطح لغزش نگه دارد از $\dot{s} = 0$ استفاده ميشود و با استفاده از معادله ديناميك موتور (۹) مشتق ورودي کنترل معادل به صورت (۱۹) در ميآيد.

$$\dot{u}_{T,eq} = -\frac{\lambda J}{K_T}(\dot{\omega} + \dot{\omega}_{ref}) + \frac{B}{K_T}\dot{\omega} + \frac{\dot{T}_L}{K_T} \quad (۱۹)$$

به منظور تأمین شرط لغزش (۱۸) يك عبارت ناپیوسته به (۱۹) اضافه ميشود.

$$\dot{u}_T = \dot{u}_{T,eq} - K\,\mathrm{sgn}(s) \quad (۲۰)$$

که در آن $K$ عدد ثابت مثبت و sgn تابع علامت است. چنانکه ملاحظه ميشـود رابطه (۲۰) يك عبارت ناپیوسته است. لـذا اگر $K$ به اندازه کافی بزرگ نباشد نمیتوان بر نامعینیها غلبه کرد. در صورتیکه $K$ به حد کافي بزرگ انتخاب شود، با وجود اختلالات $\dot{T}_L$ و $\dot{\omega}_{ref}$، ميتوان خطاي تعقیب سرعت را به سمت صفر سوق داد؛ ولی دامنه نوسانات حول خط لغزش افزایش ميیابد. در این حالت، رابطه (۲۰) به صورت زير در ميآيد:

$$\dot{u}_T \approx -K\,\mathrm{sgn}(s) \quad (۲۱)$$

لذا ورودي کنترل $u_T$ که مستقيماً به موتور اعمال ميشود از انتگرالگيري از رابطه (۲۱) قابل حصول است.

### ۴-۲- فازي کردن خط لغزش

دامنه نوسانات ایجاد شده از کنترل ناپیوسته رابطه (۲۱) را ميتوان با کم کردن $K$ کاهش داد ولي در اينصورت مقاومت سیستم کنترلی در مقابل نامعينيها و اختلالات کاهش خواهد يافت. هدف از خط لغزش فازي آن است که با نزديك شدن به خط لغزش بهره $K$ کاهش يابد. برای رسیدن به این هدف، ميتوان از قانون تعدیل شده فازي حول خط لغزش استفاده کرد.

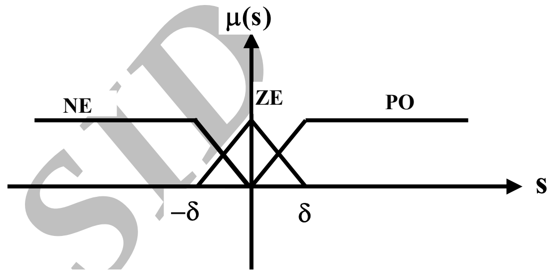
در [۱۰] از مجموعه قوانین فازی نسبتا" زیاد استفاده شده است. در این مقاله قوانین فازي به صورت زیر پیشنهاد میشود:

$$\begin{aligned} &R_1 : if\ \ s\ \ is\ \ PO\ \ then\ \ u\ \ is\ \ u_1(x_1, x_2) \\ &R_2 : if\ \ s\ \ is\ \ NE\ \ then\ \ u\ \ is\ \ u_2(x_1, x_2) \\ &R_3 : if\ \ s\ \ is\ \ ZE\ \ then\ \ u\ \ is\ \ u_3(x_1, x_2) \end{aligned} \quad (۲۲)$$

$$u_1(x_1, x_2) = -U_{max}$$
$$u_2(x_1, x_2) = U_{max} \qquad (۲۳)$$
$$u_3(x_1, x_2) = U_{eq}$$

مجموعههای فازی PO (Positive)، ZE (Zero) وNE (Negative) در شکل (۲) تعریف شدهاند.

$U_{eq}$ در اینجا معادل $U_{T,eq}$ در (۱۹) است با این تفاوت که از عبارات مربوط به اختلالات صرفنظر شده است.




**شکل ۲- مجموعه فازی به کار رفته در روش کنترل پیشنهادی**

$$U_{eq} = (\beta - \lambda J)\dot{\omega} / K_T \qquad (۲۴)$$

قانون اول و دوم (۲۳) به ورودي کنترل ناپیوسته اشاره میکند که مسیر حالت هنوز از خط لغزش دور است و باید نیروي زیادي اعمال شود. قانون سوم در واقع به ورودي تضعیف شده حول خط لغزش اشاره میکند.

## ۵- تحلیل نتایج شبیهسازي

روش پیشنهادی به صورت شبیهسازي کامپیوتري با استفاده از *MATLAB*5.3 روي یک موتور 0.8kW که مشخصات آن در جدول (۱) آمده است اعمال ونتایج آن مورد بررسی قرار گرفت.

در این شـبیهسازی، یک بار فرضی با مشخصات داده شده در شـکل (۳) بر موتور اعمال گردید و رفتار موتور در دو حالت زیر مورد مطالعه قرار گرفت:

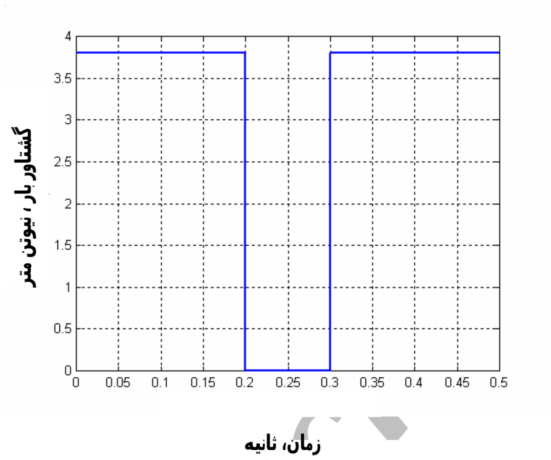
الف) کنترل سرعت به روش ساختار متغیر با استفاده از خط لغزش

ب) کنترل سرعت به روش ساختار متغیر با استفاده از خط لغزش فازی

چنانکه در شکل (۳) دیده میشود گشتاور نامی به مدت ۰/۲ ثانیه موجود بوده و پس از قطع شدن به مدت ۰/۱ ثانیه مجدداً ظاهر میگردد. نتایج حاصله در شکلهای (٤) الی (۸) جهت مقایسه ارائه گردیده است.

**جدول ۱- مشخصات موتور**

| | |
|---|---|
| قدرت خروجی [W] | ۸۰۰ |
| ولتاژ نامی [V] | ۱۲۰ |
| گشتاورنامي | ۳/۸۲۲Nm |
| جريان نامي | ۵/۴ A(rms) |
| سرعت نامي | ۲۰۰۰ rpm |
| تعداد زوج قطبها | ۱ |
| J [Nm.s^2/rad ] | ۰/۰۰۰۶۷۶ |
| مقاومت روتور | ۱/۲۶ Ω |
| مقاومت استاتور | ۱/۰۵ Ω |
| اندوکتانس استاتور | ۱۴۹mH |
| اندوکتانس متقابل | ۱۴۳mH |
| اندوکتانس روتور | ۱۴۹mH |
| [Nm.s/rad] B | ۰/۰۰۰۵۱۵ |

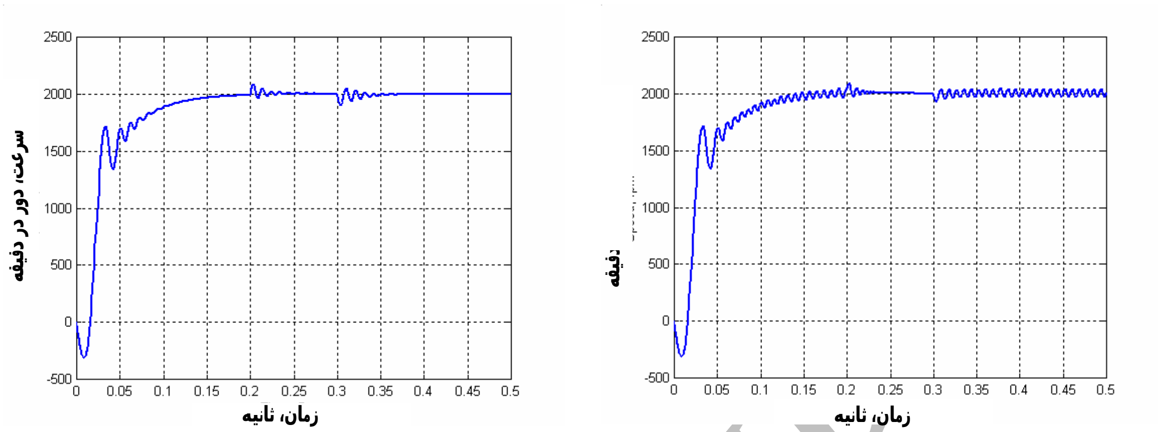



**شکل ۳- تغییرات گشتاور بار با زمان**

شکلهای (٤ الف) و (٤ ب) تغییرات سرعت موتور را در دو حالت اشاره شده نشان میدهد. همچنین شکلهای (۵ الف) و (۵ ب) مقادیر متناظر گشتاور القايي و شکلهای (۶ الف) و (۶ ب) جریان فازهای موتور را در دو حالت بالا نشان میدهد. چنانکه ملاحظه میشود نوسانات موجود در سرعت موتور در حالت دائمی که از کنترل ناپیوسته رابطه (۲۱) ناشي میشود به طور قابل ملاحظهای در حالت دوم کاهش یافته است.

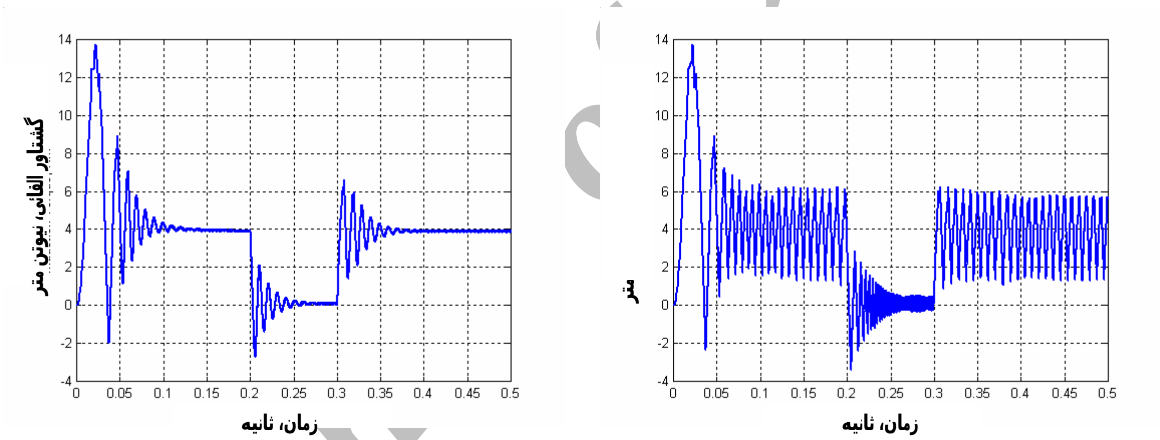
جهت بررسی توانايي سیستم کنترل در تعقیب سرعت مرجع در طول شبیهسازی، موتور به صورت بیبار راهاندازی شده و سرعت مرجع طبق شکل (۷ الف) انتخاب گردید. شکل (۷ ب) تغییرات سرعت موتور را برحسب زمان در این حالت نشان میدهد. چنانکه

ملاحظه می‌شود تعقیب سرعت نسبت به ثابت زمانی معادله (۹)، بـه خوبی انجام می‌گیرد.



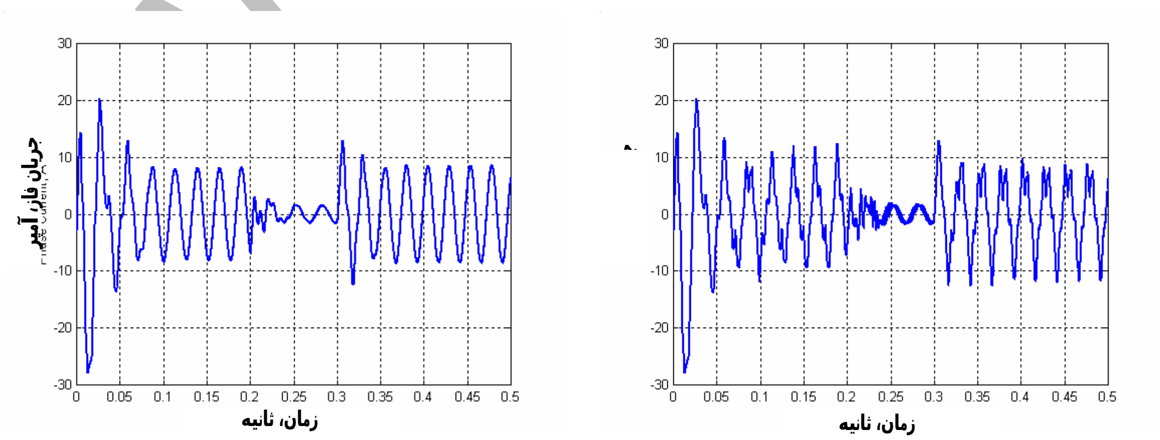

(الف) (ب)

**شکل ۴- تغییرات سرعت موتور با کنترل کننده ساختار متغیر ( الف) با مد لغزش (ب) با مد لغزش فازی**



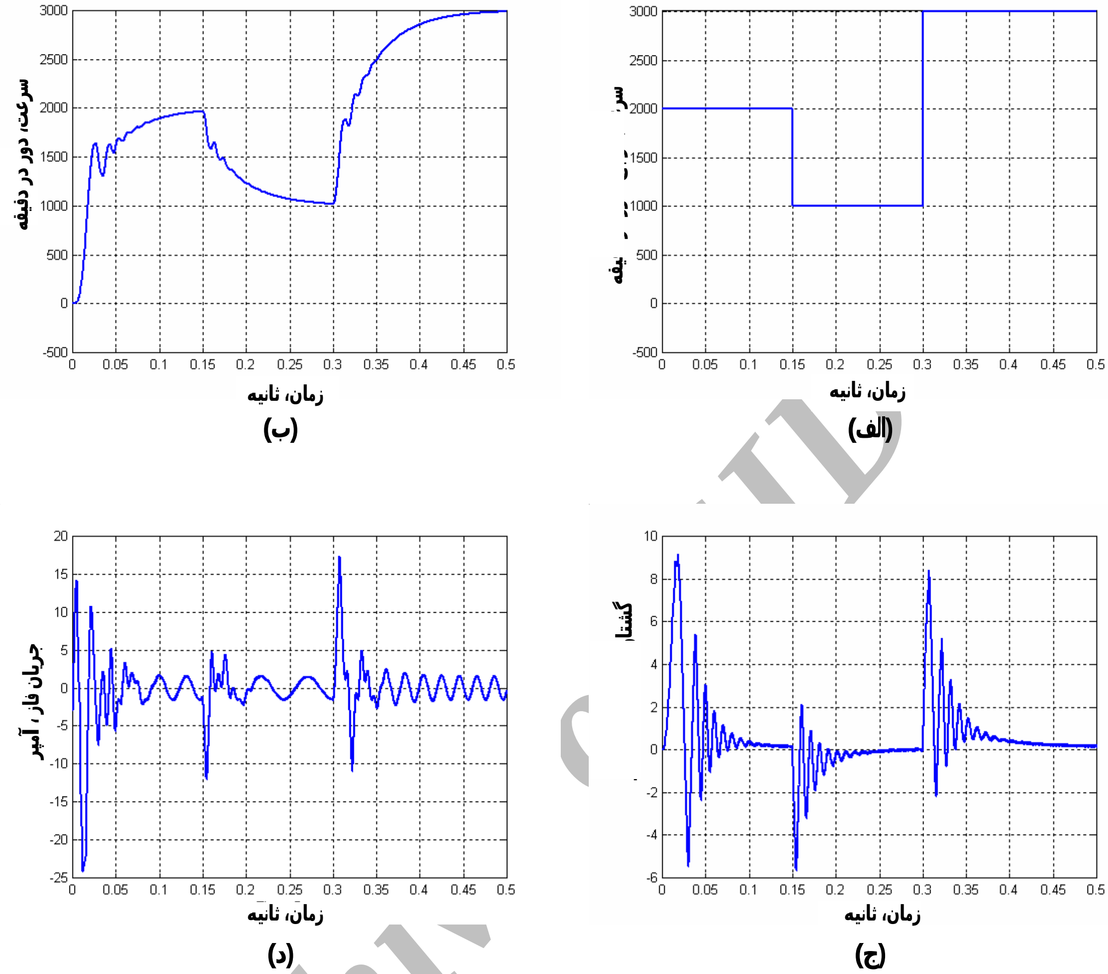

(الف) (ب)

**شکل ۵- تغییرات گشتاور القایی موتور با کنترل کننده ساختار متغیر ( الف) با مد لغزش (ب) با مد لغزش فازی**




(الف) (ب)

**شکل ۶- تغییرات جریان القایی موتور با کنترل کننده ساختار متغیر، ( الف) با مد لغزش (ب) با مد لغزش فازی**




**شکل ۷- تغییرات پارامترهای مختلف موتور در حالت بی باری با کنترل کننده ساختار متغیر با مد لغزش فازی**
**(الف) سرعت مرجع (ب) سرعت موتور (ج) گشتاور القایی (د) جریان موتور**

برای بررسی مقاومت سیستم کنترلي پیشنهادی در مقابل تغییرات پارامترها، مقدار ممان اینرسی قسمت گردان از مقدار نامی به چهار برابر خود افزایش داده شده و تغییرات سرعت موتور در این حالت استخراج گردید. شکل (۸) پاسخ سرعت موتور بی‌بار را در دو مقدار مختلف ممان اینرسی نشان میدهد.

چنانکه ملاحظه میشود سیستم کنترل مقاومت مناسبی از خود نشان میدهد. عین شکل (۳) مربوط به پاسخهای مرجع [۱۰] در حالت راه‌اندازی موتور در حالت بی‌بار نیز در شکل (۹) به منظور مقایسه نشان داده شده است. قدرت موتور مورد مطالعه در مرجع فوق ۵۵۰ وات بوده و تا حدی می‌تواند به عنوان معیار مقایسه برای کار حاضر به‌کار برود. یادآوری می‌شود که طول کل زمان شبیهسازی در شکل (۸) فقط ۰/۲ ثانیه است در حالی‌که هریک از فاصلههای افقی موجود در شکل (۹) معادل ۰/۵ ثانیه است. چنانکه ملاحظه میشود پاسخ زمانی روش پیشنهادی در این مقاله به مراتب سریعتر از روش استفاده شده در مرجع اشاره شده می‌باشد. میزان اغتشاشات موجود در هر دو کار با توجه به مقیاسهای به‌کار رفته تا حدی قابل مقایسه است.

## ۶- نتیجه گیری

کنترل کننده پیشنهادی ساختار متغیر با خط لغزش فازي براي کنترل سرعت موتور القايي استفاده شده و نشان داده شده است که عليرغم اختلالات خارجي تغييرات گشتاور بار و سرعت مرجع کنترل کننده پاسخ مناسبي را براي کنترل سرعت موتور القايي از خود نشان ميدهد. براي کاهش نوسانات سرعت بدون از دست دادن مقاوم بودن کنترل کننده از منطق فازي استفاده شده است که نتايج خوبي به دست آمد. ویژگی عمده این کنترل کننده خطی‌سازی با فیدبک است که منجر به کاهش تعداد قوانین فازی موردنیاز و از آنجا ساده‌تر کردن سیستم می‌گردد. در نهایت مقاومت کنترل کننده نسبت به تغییرات پارامترها امتحان شده است که با استفاده از نتايج شبيهسازي مقاوم بودن کنترل کننده تأييد گرديده است.

## مراجع


[1] Peter Vas, Vector Control of AC Machines, Clarendon press, 1990.

[2] Jie Zhang, Msc, and V. Thiagarajan, MSc, and T. Grant, Meng, and T. H Barton, Deng, Fiee, “New Approach to Field Orientation Control of a CSI Induction Motor Drive”, IEE Proceedings, Vol. 135, pt. B, No. 1, JANUARY 1988.

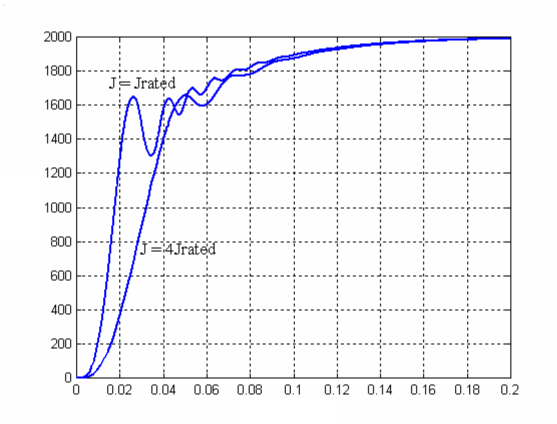
[3] Wen-Jieh Wang, and Chun – Chin Wnag, “A New Composite Adaptive Speed Controller for an Induction Motor Based on Feedback Linearization”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, No. 1, March 1988.

[4] Kuo-Kai Shya and Hsin-Hnag Shieh, “A New Switching Surface Sliding Mode Speed Control for Induction Motor Drive Systems”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 11, No. 4, July 1996.

[5] B. K. Bose, Sliding Mode Control of Induction, Motor”, IEEE Conf. Rec, 1985, pp. 479-486.

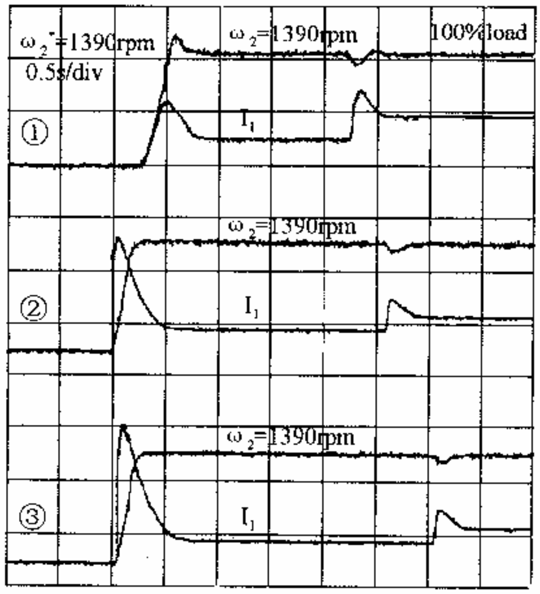
[6] V. I. Utkin, “ Sliding Mode Control Design Principles and Applications to Electric Drives”, IEEE Trans. Ind. Electron, Vol. 40, No. 1, pp. 23-36 1993

[7] Edward Y. Y. Ho, and Paresh C. Sen, “Control Dynamics of Speed Drives Systems Using Sliding Mode Controllers with Integral Compensation”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 5, September/October 1991.


زمان، ثانیه

شکل ۸ -پاسخ سرعت موتور بی‌بار را در دو مقدار مختلف ممان اینرسی




① PI control: $t_r$=0.6s, $dn_2$=-139rpm, $t_s$=0.55s

② fuzzy control: $t_r$=0.3s, $dn_2$=84rpm, $t_s$=0.3s

③ FSM control: $t_r$=0.25s, $dn_2$=-46rpm, $t_s$=0.18s

شکل ۹- پاسخهای مرجع [۱۰] در حالت راه‌اندازی موتور۵۵۰ واتی در حالت بی‌بار

[8] S. H. Hosseini, M. Banaei, "Neural Network Speed Controller for Induction Motor Based on Feedback Linearization", Second International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 7-11 November 2001/Bursa-Turkey, ELECO 2001.

[9] J. J. E. Slotine, W. LI, Englewood Cliffs NJ, "Applied Nonlinear Control", Prentice–Hall Inc., 1991

[10] Li Ying Zou Jingxiang, Zhang Xinzheng and Li Xiuhua, "The Self-Adjustable Fuzzy Sliding Mode Control for AC Speed Drive Systems", Proceedings of the American Control Conference Chicago, Itlinois. June 2000.

[11] F. Chen, and M. W. Dunnigan, "Comparative study of a sliding-mode observer and Kalman filter for full state estimation in an induction machine", IEE Proc. Electric Power Application, Vol. 149, No. 1, January 2002.

[12] F. Chen, and M. W. Dunnigan, "Sliding-mode torque and flux control of an induction machine", IEE Proc. Electric Power Application, Vol. 150, No. 2, March 2003.