

طراحی و ساخت کنترل کننده فازی-عصبی تطبیقی موتور DC مغناطیس دائم با وجود بار نامتعادل

رضا نجاتی^۱، رحمت ا... هوشمند^۲

۱- کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت و عضو هیات علمی دانشکده برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی، r.nejati@yahoo.com
۲- دانشیار دانشگاه اصفهان مهندسی برق- قدرت دانشگاه اصفهان، hooshmand_r@yahoo.com

چکیده

کنترل کننده‌های فازی در دو دهه اخیر به صورت موفقیت آمیزی در کنترل سیستم‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این مقاله روشی جدید برای کنترل موتور DC مغناطیس دائم متصل به بار نامتعادل ارائه می‌شود. عدم تعادل بار باعث ارتعاشات ماشین، نوسانی شدن توان، ایجاد خستگی در محور ماشین و استهلاک تجهیزات می‌شود. در این مقاله از کنترل کننده فازی-عصبی برای کنترل بار نامتعادل استفاده می‌شود. به علت طبیعت غیر خطی بار و ماشین، در سرعت‌های مختلف نوسانات ماشین متفاوت است، لذا به منظور تطبیقی بودن کنترل کننده با ماشین با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی ضرایب ورودی-خروجی کنترل کننده فازی در هر سرعت به‌هنگام می‌شوند. ضرایب بهینه در هر سرعت با استفاده از جستجوی مستقیم بدست آمده و با این ضرایب شبکه عصبی مصنوعی به روش لوونبرگ-مارکواردت آموزش می‌بیند. نتایج عملی بدست آمده از سیستم ساخته شده حکایت از کارایی روش ارائه شده دارد.

کلمات کلیدی

کنترل کننده فازی-عصبی، بار نامتعادل، کنترل تطبیقی، ماشین DC مغناطیس دائم.

۱- مقدمه

بسیاری پیشنهاد شده است. برای مثال می‌توان به کنترل کننده‌های PID^۱ اشاره نمود [۳،۶]. در این مقاله روشی نوین برای کنترل یک ماشین DC مغناطیس دائم متصل به بار نامتعادل^۲ ارائه خواهد شد. به علت غیر خطی بودن بار نامتعادل، در سرعت‌های مختلف ارتعاشات ماشین متفاوت است و به همین دلیل استفاده از کنترل کننده‌های خطی پاسخ مطلوبی را نخواهد داشت. اگر بخواهیم به طور خلاصه روشی را که در این مقاله برای کنترل بار نامتعادل و کاهش ارتعاشات ماشین ارائه می‌شود بیان کنیم باید بگوییم پس از اندازه‌گیری پارامترهای ماشین یک کنترل کننده فازی طراحی می‌شود. ورودی کنترل کننده فازی خطای سرعت و تغییرات آن می‌باشد و خروجی آن نیز ولتاژ اعمالی به موتور می‌باشد. به علت غیر خطی بودن بار و همچنین تغییر مشخصات ماشین در سرعت‌های مختلف، یک کنترل کننده ثابت در تمام سرعت‌ها کارایی مطلوبی ندارد و بایستی از کنترل کننده تطبیقی استفاده کنیم. به همین منظور در ورودی‌ها و خروجی کنترل کننده فازی ضرایبی را

با توجه به اینکه ماشین‌های الکتریکی بازوی چرخاننده در صنعت می‌باشند، کنترل آنها دارای اهمیت به سزایی می‌باشد. وجود کنترل کننده‌های مختلف برای انواع ماشین‌های الکتریکی می‌تواند موید این سخن باشد ولی یکی از مشکلات مهم در ماشین‌های الکتریکی که مورد توجه کافی قرار نگرفته است عدم تعادل بار مکانیکی متصل به محور ماشین می‌باشد. این عدم تعادل به صورت ارتعاشات ماشین، نوسانی شدن توان، خستگی در محور و استهلاک تجهیزات نمایان می‌شود. ماشین‌های DC قابلیت کنترل سرعت فوق‌العاده‌ای دارند و علی‌رغم گرانی قیمت و نیاز به تعمیر و نگهداری، در صنعت به طور قابل توجهی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴]. همچنین از موتورهای DC با قدرت زیر یک اسب بخار به صورت سرو موتور جهت کنترل وضعیت یا دنبال نمودن وضعیت استفاده می‌شوند. برای کنترل ماشین‌های DC تاکنون روش‌های

در بار متعادل $T_1(t)$ مقدار ثابتی می‌باشد و لذا با اعمال یک ولتاژ ثابت در حالت ماندگار موتور با سرعت ثابتی می‌چرخد. بار نامتعادل را می‌توان به صورت زیر مدل نمود:

$$T_1(t) = T_1 + T_2 \sin(\theta) \quad (۳)$$

که در رابطه فوق $T_2 \sin(\theta)$ مولفه نوسانی گشتاور بار و θ موقعیت زاویه‌ای روتور می‌باشند. در بار متعادل ضریب T_2 برابر صفر است و نوسانی در سرعت ماشین وجود ندارد در حالی که در یک بار نامتعادل T_2 صفر نیست و اگر ولتاژ ثابتی به موتور اعمال شود سرعت ماشین حول یک مقدار ثابت نوسان می‌کند که این نوسانات باعث ارتعاش ماشین می‌شود.

موتور DC استفاده شده در این مقاله دارای مشخصات زیر می‌باشد:

$$V_N = 12 \text{ volt} \quad P_N = 24 \text{ watt} \quad R_a = 3\Omega \quad L_a = 0.01 \text{ H}$$

$$\beta = 0.047 \text{ N.m} \cdot \frac{\text{sec}}{\text{rad}} \quad J = 0.025 \text{ N.m} \cdot \frac{\text{sec}^2}{\text{rad}} \quad k = 2.774 \text{ V} \cdot \frac{\text{sec}}{\text{rad}}$$

برای بدست آوردن معادلات حالت، اگر متغیرهای حالت را به صورت زیر انتخاب کنیم:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= i_a(t) \\ x_2(t) &= \omega(t) \\ u(t) &= V_a(t) \\ d(t) &= T_1(t) \end{aligned} \quad (۴)$$

معادلات حالت سیستم به صورت زیر در می‌آیند:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) \quad (۵)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

که داریم:

$$\begin{aligned} x(t) &= \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \quad C = [0 \quad 1] \\ E &= \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K}{L_a} \\ \frac{K}{J} & -\frac{\beta}{J} \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (۶)$$

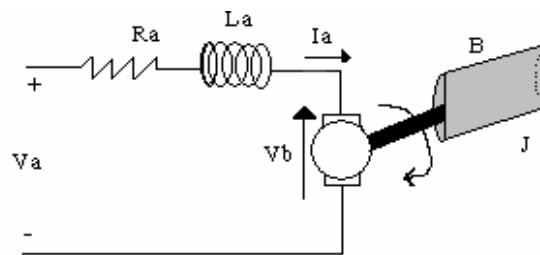
در شکل ۲ نمودار بلوکی معادلات فوق نشان داده شده است.

ضرب می‌کنیم که این ضرایب وابسته به سرعت مرجع می‌باشند و با تغییر سرعت مرجع تغییر می‌کنند. در این مقاله برای تعیین این ضرایب از یک شبکه عصبی مصنوعی^۴ استفاده می‌کنیم. ورودی شبکه عصبی سرعت مرجع موتور و خروجی آن سه ضریب می‌باشد که دو ضریب اول در ورودی کنترل کننده فازی ضرب شده و ضریب سوم در خروجی کنترل کننده فازی ضرب می‌شود. شبکه‌های عصبی مصنوعی برای آموزش دیدن به داده‌های آموزشی نیاز دارند. بدین منظور در چند سرعت مختلف ضرایب بهینه کنترل کننده فازی را به روش جستجوی مستقیم پیدا می‌کنیم. سپس با این ضرایب بهینه شبکه عصبی را آموزش می‌دهیم. مطالب ارائه شده در این مقاله به صورت زیر مرتب شده‌اند:

در قسمت دوم معادلات دینامیکی ماشین DC مغناطیس دائم متصل به بار نامتعادل بیان می‌شود و پس از آن در قسمت سوم کنترل کننده فازی-عصبی معرفی می‌شود. در قسمت چهارم نیز پس از معرفی سیستم ساخته شده به منظور بررسی کارایی کنترل کننده، نتایج حاصل شده از کنترل کننده فازی-عصبی را با نتایج بدست آمده از یک کنترل کننده PI مقایسه می‌کنیم. در قسمت پنجم هم نتیجه‌گیری و پیشنهادات آمده است.

۲- معادلات دینامیک ماشین DC مغناطیس دائم با بار نامتعادل

در شکل ۱ دیاگرام یک موتور DC مغناطیس دائم متصل به بار نامتعادل رسم شده است. معادلاتی که رفتار دینامیکی ماشین DC مغناطیس دائم را توصیف می‌کنند به صورت زیر می‌باشند [۷]:



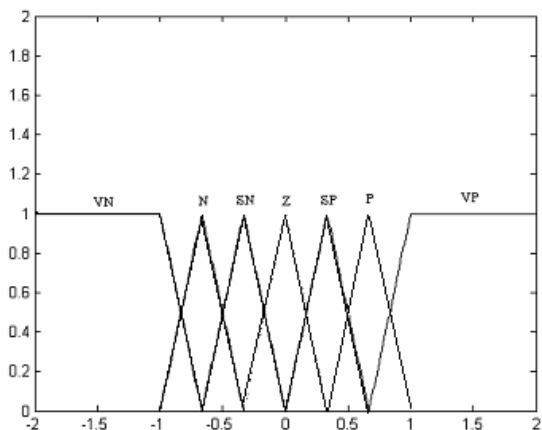
شکل ۱- دیاگرام بلوکی موتور DC متصل به بار نامتعادل

$$V_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + k\omega(t) \quad (۱)$$

$$T(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + \beta\omega(t) + T_1(t) = k i_a(t) \quad (۲)$$

که در رابطه‌های فوق $V_a(t)$ ولتاژ لحظه‌ای آرمیچر، R_a مقاومت اهمی روتور، $i_a(t)$ جریان لحظه‌ای آرمیچر، L_a اندوکتانس آرمیچر، k ثابت ماشین DC، $T(t)$ گشتاور لحظه‌ای محور ماشین، J ممان اینرسی محور، β ضریب میرایی محور و $T_1(t)$ گشتاور لحظه‌ای بار می‌باشند.

توابع عضویت در نظر گرفته شده برای خطای سرعت و تغییرات خطای سرعت در شکل ۳ آورده شده است. قوانین مربوط به کنترل کننده فازی نیز در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۳- توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی کنترل کننده فازی

جدول ۱- قوانین کنترل کننده فازی

$e(k) \setminus \Delta e(k)$	VN	N	SN	Z	SP	P	VP
VN	VN	VN	VN	N	SN	SN	Z
N	VN	N	N	N	SN	Z	SP
SN	VN	N	SN	SN	Z	SP	P
Z	VN	N	SN	Z	SP	P	VP
SP	N	SN	Z	SP	SP	P	VP
P	SN	Z	SP	P	P	P	VP
VP	Z	SP	SP	P	VP	VP	VP

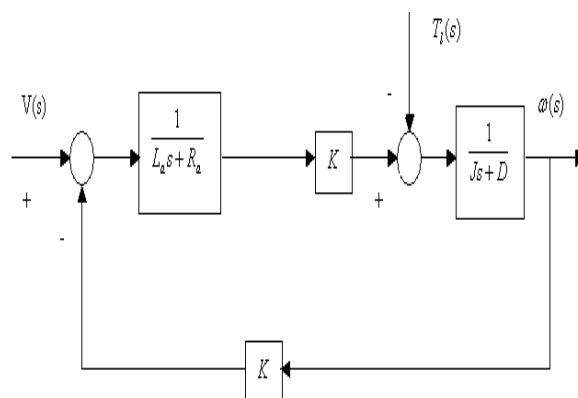
استنتاج فازی به روش ممدانی صورت می‌گیرد. معادلات زیر نحوه محاسبه خروجی کنترل کننده فازی را بیان می‌کنند:

$$V = \frac{\sum_{L=1}^M \theta_L \prod_{i=1}^P \mu F_i(x_i)}{\sum_{L=1}^M \prod_{i=1}^P \mu F_i(x_i)} \quad (8)$$

که M تعداد قوانین، P تعداد ورودی‌ها، θ_L مرکز ثقل توابع عضویت، $\mu F_i(x_i)$ درجه عضویت X_i در تابع F_i و V خروجی قاطع کنترل کننده فازی می‌باشد.

۲-۲- شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی استفاده شده دارای یک نرون در لایه ورودی و سه نرون در لایه خروجی می‌باشد. ورودی شبکه عصبی سرعت مرجع (ω_{ref}) و خروجی آن سه ضریب می‌باشد که این ضرایب به ترتیب در ورودی‌ها و خروجی کنترل کننده فازی ضرب می‌شوند. در



شکل ۲- دیاگرام بلوکی موتور DC

۳- کنترل کننده تطبیقی فازی-عصبی

در این مقاله برای کنترل موتور DC متصل به بار نامتعادل از کنترل کننده فازی استفاده می‌شود اما به دلیل طبیعت غیر خطی بار نامتعادل یک کنترل کننده ثابت نمی‌تواند در تمام سرعتها عملکرد بهینه‌ای داشته باشد، یک مسئله مهم در کارکرد کنترل کننده‌های فازی مسئله تنظیم پارامتر در آنها می‌باشد [۱]. در کنترل کننده‌های فازی پارامترهای مختلفی جهت تنظیم کنترل کننده وجود دارد. از جمله پارامترهای قابل تنظیم می‌توان به توابع عضویت^۵، ضرایب مقیاس بندی^۶، الگوریتم‌های استنتاج^۷، فازی سازی^۸ و فازی زدائی^۹ اشاره نمود. ثابت شده است که برای تنظیم کنترل کننده‌های فازی می‌توان توابع عضویت را به صورت خطی و ثابت در نظر گرفت و در عوض تمام خواص غیر خطی را به ضرایب مقیاس بندی منتقل نمود [۲]. در این مقاله برای تنظیم پارامترها از ضرایب مقیاس بندی در ورودی و خروجی کنترل کننده فازی استفاده شده است. در واقع بهبود کارایی با تنظیم ضرایب مقیاس بندی به صورت بلادرنگ انجام می‌گیرد. بدین منظور با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی در هر سرعت ضرایبی را در ورودی و خروجی کنترل کننده فازی ضرب می‌کنیم. برای آموزش شبکه عصبی به داده‌های آموزشی نیاز داریم که این داده‌ها را با استفاده از الگوریتم جستجوی تصادفی برای چند سرعت مختلف پیدا می‌کنیم.

۳-۱- کنترل کننده فازی

ورودی‌های کنترل کننده فازی خطای سرعت و تغییرات خطای سرعت می‌باشد که توسط رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

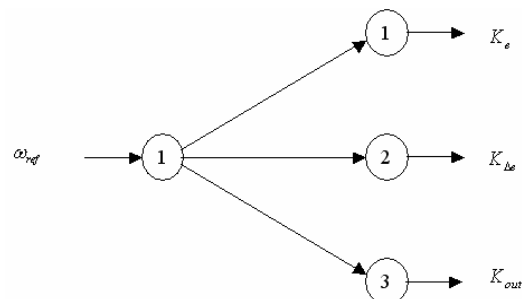
$$e(k) = \omega_{ref}(k) - \omega(k) \quad (7)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$$

خروجی کنترل کننده نیز ولتاژ اعمالی به موتور را تعیین می‌کند.

برای آموزش شبکه عصبی مصنوعی از الگوریتم بهینه‌سازی لوونبرگ-مارکواردت^{۱۰} [۵] استفاده شده است.

شکل ۴ ساختار شبکه عصبی رسم شده است.



شکل ۴- ساختار شبکه عصبی مصنوعی

۳-۳- جستجوی مستقیم

همانطور که اشاره شد برای آموزش شبکه عصبی به داده‌های آموزشی نیاز داریم. در این بخش چگونگی بدست آوردن این داده‌ها شرح داده شده است.

در ابتدا چند سرعت مرجع متفاوت را انتخاب می‌کنیم. اطلاعات مورد نیاز برای داده‌های آموزشی ضرایب بهینه ورودی و خروجی کنترل کننده فازی می‌باشد. متغیر x را به صورت زیر نامگذاری می‌کنیم:

$$x = \begin{bmatrix} K_{error} \\ K_{error\dot{}} \\ K_{output} \end{bmatrix} \quad (13)$$

سپس تابع زیر را به عنوان تابع برازندگی^{۱۱} تعریف می‌کنیم:

$$J = \int_{t=10sec}^{t=30sec} |error(t)| dt \quad (14)$$

در مرحله بعد با انتخاب مقادیر مختلف برای بردار x مقدار بهینه بردار x را پیدا می‌کنیم. منظور از مقدار بهینه بردار x مقداری است که تابع برازندگی را کمینه کند.

در جدول ۳ مقادیر بهینه ضرایب برای سه سرعت مرجع مختلف آمده است.

جدول ۳- ضرایب بهینه ورودی-خروجی کنترل کننده فازی

سرعت مرجع (دورانه‌ای)	k_e	$k_{\Delta e}$	k_{out}
۵	۰/۱	۰/۳	۲
۷/۵	۰/۱۵	۰/۳	۲/۵
۱۰	۰/۱۵	۰/۳	۲

از اطلاعات جدول ۳ برای آموزش شبکه عصبی استفاده شده است.

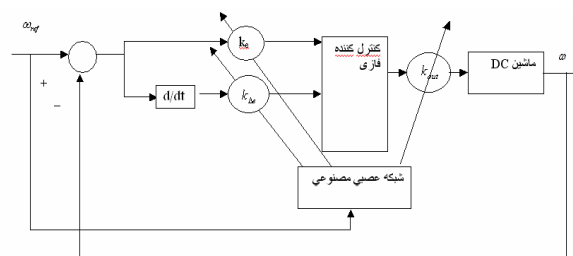
۴- سیستم ساخته شده و نتایج عملی

در این بخش پس از معرفی سیستم ساخته شده به منظور بررسی کارایی کنترل کننده فازی-عصبی نتایج عملی بدست آمده را با نتایج بدست آمده از حالتی که از یک کنترل کننده PID طراحی شده به روش نیکولز مقایسه می‌کنیم.

در جدول ۲ نیز مشخصات شبکه عصبی داده شده است. در شکل ۵ دیاگرام بلوکی ماشین DC به همراه کنترل کننده تطبیقی فازی-عصبی رسم شده است.

جدول ۲- مشخصات شبکه عصبی مصنوعی

لایه	لایه اول	لایه دوم
نوع	ورودی	خروجی
تعداد نرون	۱	۳
نوع تابع	سیگموئید	خطی



شکل ۵- دیاگرام بلوکی ماشین DC به همراه کنترل کننده فازی-عصبی

ورودی هر نرون توسط رابطه زیر بدست می‌آید [۸]:

$$I_j = \sum_{j=k}^N w_{ji} y_j \quad (9)$$

که در رابطه فوق w_{ji} ضریب وزنی بین نرون i ام و نرون j ام می‌باشد و y_j خروجی نرون j ام می‌باشد.

خروجی هر نرون را می‌توان توسط رابطه زیر بیان نمود:

$$y_j = f(I_j) \quad (10)$$

توابع سیگموئید و خطی که در شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده‌اند به صورت زیر تعریف می‌شوند:

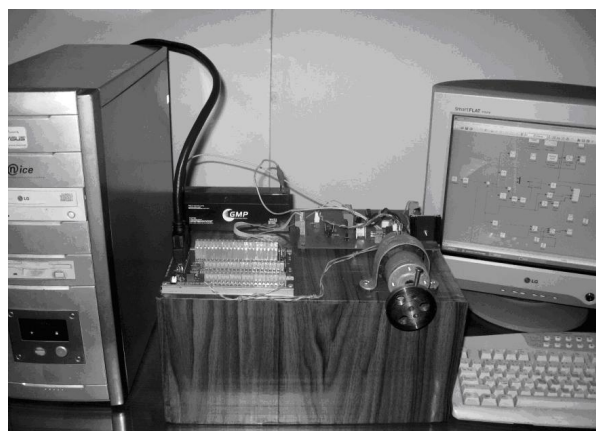
$$f(x) = x \quad (11) \text{ تابع خطی}$$

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (12) \text{ تابع سیگموئید}$$

۴-۱- سیستم ساخته شده

در شکل ۶ تصویری از سیستم ساخته آورده شده است. در مورد این سیستم می توان به نکات زیر اشاره نمود:

- استفاده از کارت ورودی-خروجی PCI-1710HG ساخت شرکت Advantech.
- طراحی و ساخت یک درایو الکتریکی به گونه ای که سیگنال کنترل را از کارت دریافت کرده و ولتاژی متناسب با سیگنال دریافتی به پایانه های موتور اعمال می کند.
- استفاده از یک کد کننده^{۱۲} سرعت دیجیتال برای اندازه گیری SSS سس سرعت چرخش محور موتور سرعت ماشین



شکل ۶- تصویری از سیستم ساخته شده

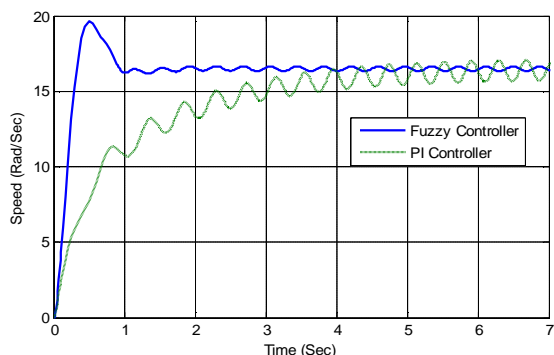
۴-۲- نتایج عملی

به منظور بررسی کارایی کنترل کننده معرفی شده، این کنترل کننده را با یک کنترل کننده PI طراحی شده به روش زیگلر-نیکولز^{۱۳} مقایسه می کنیم [۹]. مشخصات کنترل کننده PI طراحی شده به صورت زیر می باشد:

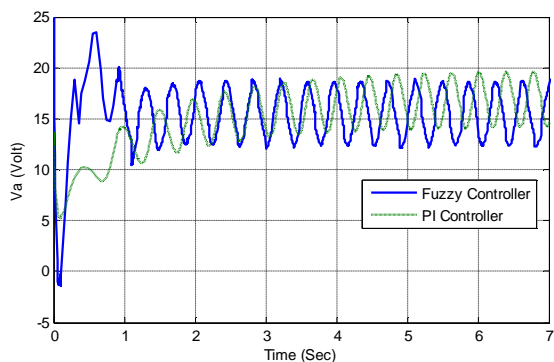
$$U = K_p \times e + K_I \int e dt \quad (15)$$

$$K_p = 0.72, K_I = 0.15$$

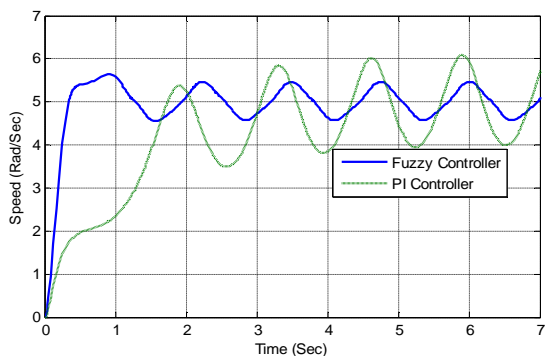
شکل های ۷ و ۸ و ۹ و ۱۰ پاسخ کنترل کننده ها را به ورودی های پله با دامنه های متفاوت نشان می دهند.



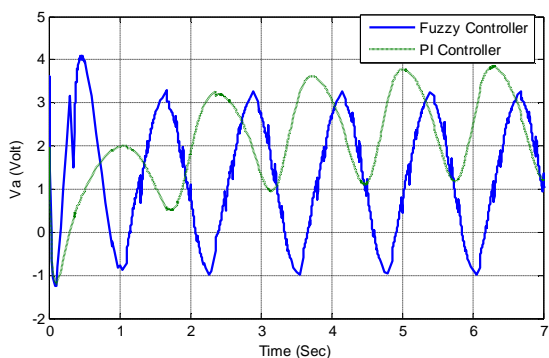
شکل ۷- پاسخ سیستم به ورودی مرجع ۱۶/۵ رادیان در ثانیه



شکل ۸- ولتاژ اعمالی به موتور DC برای ورودی مرجع ۱۶/۵ رادیان در ثانیه



شکل ۹- پاسخ سیستم به ورودی مرجع ۵ رادیان در ثانیه



شکل ۱۰- ولتاژ اعمالی به موتور DC برای ورودی مرجع ۵ رادیان در ثانیه

- [۶] Kim Y. T. & Beak S. H., "The Speed Regulation of a DC Motor Drive System with a PI, PID, and Command Matching Controllers", Dongguk Journal, Vol. 29, pp.525-541, 1990
- [۷] Kraues P. C., "Analysis of Electric Machinery". Mc Grow – Hill, 1987
- [۸] Maureen Caudill and Charles Butler, "Understanding Neural Networks", The MIT Press, 1994.
- [۹] Ziegler J. G. and Nichols N. B., "Optimum settings for automatic controllers" Trans. ASME 64: 759-768, 1942.

اگر معیار کارائی کنترل کننده‌ها را به صورت (۹) در نظر بگیریم نتایج زیر حاصل شده‌اند:
برای سرعت مرجع ۱۶/۵ دور بر ثانیه:

$$J = 2.04 \text{ nero - fuzzy controller} \quad (۱۶)$$

$$J = 4.41 \text{ PI controller}$$

و برای سرعت مرجع ۵ دور بر ثانیه:

$$J = 1.62 \text{ nero - fuzzy controller} \quad (۱۷)$$

$$J = 3.4 \text{ PI controller}$$

مقادیر J در (۱۱) و (۱۲) نشان دهنده کارائی بهتر کنترل کننده فازی-عصبی نسبت به کنترل کننده PI می‌باشد.

۷- پی‌نوشتها

- ۱- Servo Motor
- ۲- Proportional-Integral-Derivative
- ۳- Unbalanced Load
- ۴- Artificial Neural Network
- ۵- Membership Function
- ۶- Scaling Factors
- ۷- Reasoning Algorithm
- ۸- Fuzzification
- ۹- Difuzzification
- ۱۰- Levenberg-Marquardt
- ۱۱- Performance Function
- ۱۲- Encoder

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک کنترل کننده جدید برای کنترل موتور DC مغناطیس دائم متصل به بار نامتعادل معرفی شد. به علت غیر خطی بودن بار نامتعادل و همچنین بروز رفتار غیر خطی از موتور DC در سرعت‌های متفاوت، کنترل کننده معرفی شده به صورت تطبیقی عمل می‌نماید. مقایسه پاسخ کنترل کننده معرفی شده با یک کنترل کننده PI طراحی شده به روش زیگلر-نیکولز موید کارائی بهتر این کنترل کننده می‌باشد. نکته دیگری که باید به آن اشاره نمود وجود عدم مطابقت رفتار موتور DC با آنچه که در شبیه‌سازی دیده می‌شود است که برخی علل این عدم تطابق را می‌توان با در نظر گرفتن کموتاتور و جاروبک و همچنین عکس‌العمل آرمیچر توجیح کرد. به همین علت کنترل نوسان‌های ماشین به طور کامل میسر نمی‌باشد.

۶- مراجع

- [۱] تاناکا، کازو، "مقدمه‌ای بر منطق فازی برای کاربردهای عملی آن"، ترجمه وحیدیان و طارقیان، مشهد، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۱.
- [۲] مرتضوی، سعید و همکاران "طراحی و شبیه‌سازی پایدار ساز فازی خود تنظیم با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، سیزدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، زنجان، ایران، ۱۳۸۴.
- [۳] Chen G. , "Conventional and Fuzzy PID Controllers: An Overview", 1996.
- [۴] Fisher M. E., Ghosh A., & Sharaf A. M., "Intelligent Control Strategies for permanent Magnet DC Motor Drives", Proceedings of the IEEE International Conference on Power Electronics, New Delhi, India, 1996.
- [۵] Hagan. M.T , H. B. Demuth, and M. H. Beale, "Neural Network Design", Boston. MA: PWS Publishing, 1996.