

## کنترل هوشمند وضعیت موتور DC

حمید رضا شریف خضری\*

دانشجوی مهندسی برق - الکترونیک

دانشکده مهندسی برق دانشگاه یزد

sharif\_natanz@yahoo.com

علیرضا صدیقی انارکی\*\*

عضو هیات علمی دانشکده برق

دانشکده مهندسی برق دانشگاه یزد

sedighi@yazduni.ac.ir

### چکیده:

سهولت کنترل موتورهای DC باعث کاربرد فراوان آنها در صنعت شده است. عمدتاً کنترل موتورهای DC با کنترل ولتاژ آرمیچر و یا کنترل میدان صورت می پذیرد. روشهای کنترل ارائه شده برای موتورهای DC با شناخته شدن روشهای جدید در تئوری کنترل گسترش یافته اند. در این مقاله از شبکه عصبی تطبیقی خطی و شبکه عصبی خود سازمانده جهت کنترل وضعیت یک موتور DC تحریک جداگانه استفاده شده است. در کنترل وضعیت با استفاده از شبکه عصبی تطبیقی خطی، وضعیت مبنای شبکه عصبی همان وضعیت ورودی (مطلوب) در نظر گرفته شده و پس از انطباق وضعیت خروجی موتور بر وضعیت مبنا ولتاژ آرمیچر صفر شده و موتور از کار می ایستد. در این مقاله وضعیت یک موتور DC تحریک جداگانه با استفاده از شبکه عصبی خود سازمانده نیز کنترل شده است. در این روش شبکه عصبی مدل موتور DC مورد استفاده جهت کنترل وضعیت را می آموزد سپس ورودی مدل را جهت تطبیق وضعیت خروجی مدل بر وضعیت مطلوب، بهینه می سازد. ویژگی روشهای پیشنهادی اصلاح ضرایب شبکه عصبی در حین کار کردن موتور و مقاوم بودن پاسخها نسبت به تغییرات ممان اینرسی (J) و اصطکاک (B) می باشد. برخلاف کنترل کننده PID که در اثر تغییر یکی از پارامترهای مدل، نظیر J و B کارایی بهینه خود را از دست می دهد و نیاز به تنظیم پارامترهای کنترل کننده دارد، روشهای پیشنهادی نیاز به طراحی مجدد نداشته و در برابر تغییرات پارامترها بطور خودکار اصلاح می شوند. روشهای پیشنهادی با استفاده از اطلاعات یک ماشین DC توسط نرم افزار Matlab و در محیط Simulink شبیه سازی شده اند. نتایج نشان می دهند که بواسطه استفاده از روشهای پیشنهادی هیچگونه نوسانی در پاسخها دیده نمی شود و زمان رسیدن به وضعیت مطلوب نیز کم است.

واژگان کلیدی: موتور DC، کنترل وضعیت، شبکه عصبی، کنترل هوشمند.

### ۱-مقدمه

موتورهای DC از اولین موتورهای الکتریکی در صنعت بوده اند که بواسطه سهولت کنترل آنها، در توانهای چندوات تا چندین هزار کیلووات و با رنج وسیع ولتاژ و درسرعتهای نامی مختلف ساخته شده اند [۱-۲]. روشهای ارائه شده برای کنترل وضعیت موتورهای DC بطور کلی به سه دسته تقسیم می شوند. روشهای کلاسیک مثل استفاده از کنترل کننده های PI، PID [۳-۴]، روشهای مدرن (تطبیقی، بهینه و ...) [۵-۶] و روشهای هوشمند مثل کاربرد تئوری فازی و شبکه های عصبی [۷-۸] روشهای ارائه شده برای کنترل وضعیت موتورهای DC می باشد.

هدف این مقاله ارائه روشهایی جهت کنترل هوشمند وضعیت موتور DC تحریک جداگانه، با استفاده از شبکه عصبی تطبیقی خطی و شبکه عصبی خود سازمانده می باشد. روشهای پیشنهادی با استفاده از نرم افزار Matlab و در محیط Simulink با شبیه سازی یک موتور DC، اجرا و حالت‌های مختلف آن بررسی شده اند. در ادامه و در بخش دوم مدل‌سازی موتور DC عنوان شده است. بخش سوم به توضیح در مورد شبکه عصبی تطبیقی خطی می پردازد. بخش چهارم شبکه عصبی خود سازمانده را شرح می دهد. روشهای پیشنهادی در بخش پنجم توضیح داده شده است و نتایج در بخش ششم آمده اند.

## ۲- مدل‌سازی موتور DC

موتورهای جریان مستقیم انواع گوناگونی داشته و برای هر یک روشهای متعددی جهت کنترل وضعیت ارائه گردیده است. در این مقاله موتور DC تحریک جداگانه جهت کنترل وضعیت انتخاب شده و با کنترل ولتاژ تغذیه این اقدام صورت پذیرفته شده است. روابط حاکم بر این نوع موتور عبارتند از:

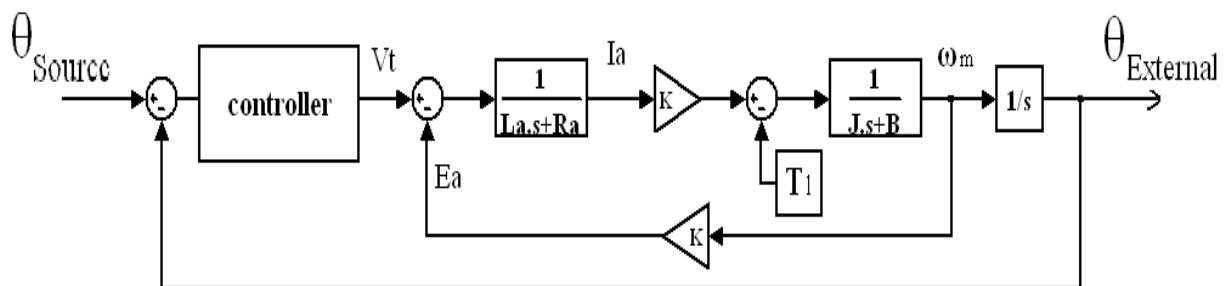
$$V_t = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + E_a \quad (۱)$$

$$E_a = K \omega_m \quad (۲)$$

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} - T_l = K i_a \quad (۳)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (۴)$$

که در آنها:  $R_a$ ،  $L_a$ ،  $i_a$  و  $V_t$  به ترتیب مقاومت، اندوکتانس، جریان و ولتاژ آرمیچر بوده،  $E_a$  نیروی ضد محرکه موتور،  $\omega$  سرعت زاویه ای،  $\theta$  وضعیت،  $T_l$  گشتاور بار،  $J$  و  $B$  نیز لختی دورانی و ضریب اصطکاک معادل در محور موتور می باشند. با توجه به روابط فوق مدل موتور DC مورد استفاده جهت کنترل وضعیت به همراه بلوک کنترل کننده، در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل (۱) مدل موتور DC تحریک جداگانه با کنترلر

کنترلر جهت تطبیق بهینه وضعیت مبنا ( $\theta_{source}$ ) بر وضعیت خروجی ( $\theta_{External}$ ) مورد استفاده قرار می گیرد. وضعیت

مبنا و وضعیت خروجی به واحد رادیان می باشند. مشخصات و پارامترهای موتور DC شبیه سازی شده به شرح زیر می باشد:

$$110 \text{ V} \quad 2/5 \text{ HP} \quad 1800 \text{ rpm} \quad i_a = 20 \text{ A} \quad L_a = 46 \text{ mH} \quad K = 0.55 \text{ V.s/rad} \quad R_a = 1 \Omega$$

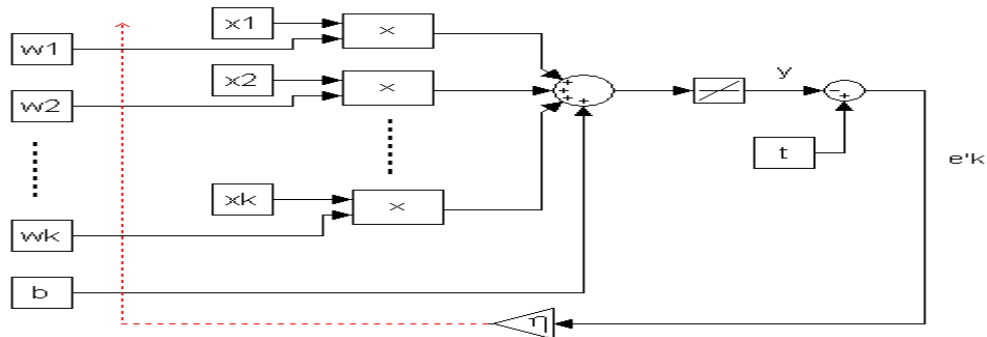
$$J = 0.093 \text{ Kg.m}^2 \quad B = 0.008 \text{ N.m.s/rad}$$

## ۳- شبکه عصبی تطبیقی خطی

شبکه های عصبی مصنوعی از جمله سیستم های دینامیکی هستند که با پردازش روی داده های تجربی، دانش یا قانون نهفته در ورای داده ها را به ساختار شبکه متصل می سازند.

الگوریتم یادگیری شبکه عصبی تطبیقی خطی از نوع یادگیری با ناظر است. این نوع از شبکه ها معمولاً یک لایه نرون دارند. این نرون مجموع وزندار شده ورودیها را با یک بایاس جمع کرده و نتیجه را از یک تابع خطی عبور می دهد. نرون فوق آدلاین (Adaline) نام دارد.

شکل (۲) شماتیک این نوع از شبکه ها را نشان می دهد.



شکل (۲) شبکه عصبی تطبیقی خطی

برای آموزش این نوع شبکه ها، در هر گام مقدار وزنها (W) و با یاسها (b) با استفاده از قانون Widrow-Hoff به گونه ای تغییر می یابد که مجموع مربعات خطا حداقل گردد. مقدار خطای خروج  $e'_k$  برابر اختلاف بین مقدار مطلوب و خروجی شبکه می باشد.

برای حداقل شدن مجموع مربعات خطا بایستی ماتریس وزنها و بایاس، که بقرار زیر می باشند در هر مرحله اصلاح شوند تا خطا صفر گردد:

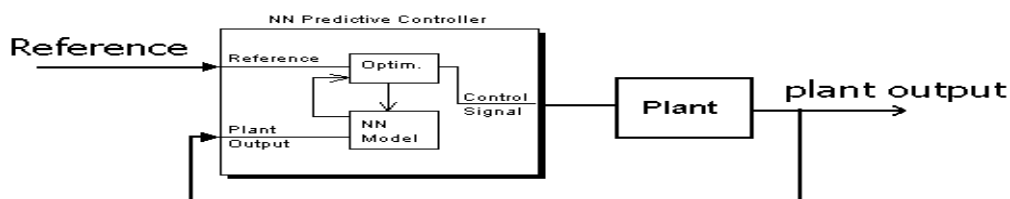
$$W(K+1) = W(K) + \eta e'_k X_k^T \quad (5)$$

$$b(K+1) = b(K) + \eta e'_k \quad (6)$$

که در آن  $\eta$  بهره آموزش و  $X_k$  نیز بردار ورودی شبکه می باشد.

#### ۴- شبکه عصبی خود سازمانده

شبکه عصبی خود سازمانده در شناسایی و کنترل سیستمهای دینامیک کاربرد موفقیت آمیزی داشته است. NN Predictiv controller یکی از بلوکهای موجود در محیط Simulink از نرم افزار Matlab می باشد که در ساختار آن از شبکه عصبی خود سازمانده استفاده شده است. شکل (۳) شماتیک کاربردی این بلوک را نشان می دهد.



شکل (۳) NN Predictive controller

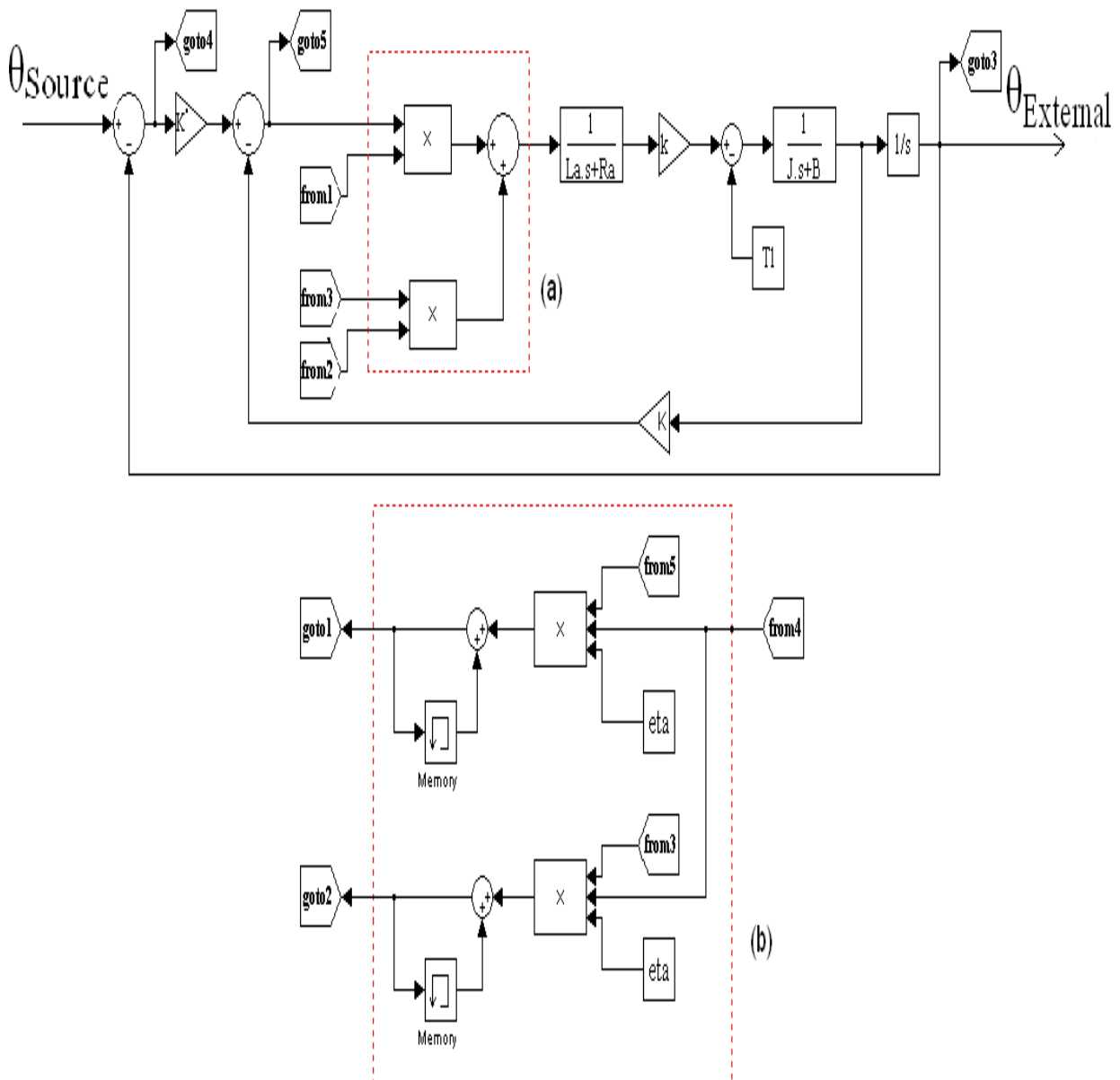
در ابتدا شبکه عصبی مدل Plant را شناسایی کرده و سپس با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ورودی Plant را برای انطباق Plant output بر Reference بهینه می سازد. در واقع از NNmodel موجود در بلوک جهت طراحی کنترل کننده استفاده می شود. شبکه عصبی موجود نوعی شبکه پسخور و دارای یک لایه پنهان می باشد. ورودی Plant تاخیریافته و همچنین Plant output تاخیر یافته به عنوان ورودیهای این شبکه می باشند. خطای میان Plant output و خروجی شبکه عصبی - خطای پیشگویی - به عنوان یک سیگنال جهت آموزش شبکه عصبی استفاده می شود. با انتخاب مناسب ورودی Plant به کمک Optim موجود در ساختار بلوک، بهینه سازی خروجی Plant صورت می پذیرد.

## ۵- روشهای پیشنهادی

هدف از طراحی یک کنترل کننده افزایش پایداری و کاهش زمان رسیدن به حالت مطلوب در برابر اعمال یک اغتشاش، در یک پروسه می باشد. در این مقاله از کنترل کننده PID، جهت مقایسه پاسخ آن با نتایج روشهای پیشنهادی، استفاده شده است. این کنترل کننده به جای بلوک کنترلر در شکل (۱) قرار می گیرد. عمده اشکال این نوع کنترل کننده علاوه بر دشواری تنظیم پارامترها برای داشتن پاسخ مطلوب، نیاز به اصلاح آنها بواسطه تغییر شرایط کارکرد موتور می باشد که عملاً تنظیم مجدد پارامترها در حین کار کردن موتور امکانپذیر نیست. جهت بر طرف کردن این مشکل روشهای کنترل هوشمند پیشنهاد می گردند.

### ۵-۱- کنترل وضعیت به کمک شبکه عصبی تطبیقی خطی

جهت کنترل مطلوب وضعیت در برابر تغییرات پارامترهای ماشین می توان از شبکه عصبی تطبیقی خطی استفاده نمود. شکل (۴) چگونگی استفاده از این شبکه برای کنترل وضعیت موتور DC را نشان می دهد. ضمن آنکه در این شکل جهت اتصال نقاط و به منظور کاهش تراکم خطوط از بلوکهای go to و from استفاده شده است.



شکل (۴) کنترل وضعیت به کمک شبکه عصبی تطبیقی خطی

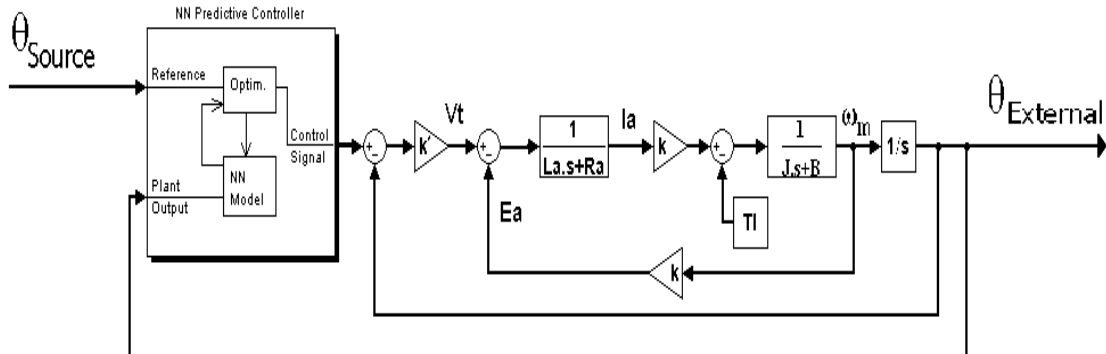
همانطور که در شکل (۴-a) ملاحظه می شود، شبکه عصبی تطبیقی خطی به کمک یک نرون آدالین و با استفاده از ورویهای وضعیت خروجی و خطای ولتاژ با تنظیم خودکارونها اقدام به بهینه سازی سیگنال خطای ولتاژ می نماید تا در نهایت وضعیت به حد مطلوب برسد.

به منظور اصلاح وزنهای در شبکه عصبی مورد استفاده، وضعیت خروجی با وضعیت مرجع (مطلوب) مقایسه شده و سیگنال خطای وضعیت بدست آمده جهت تنظیم وزنهای بکار می رود. با توجه به روابط (۵) و (۶)، بلوکهای نشان داده شده در شکل (b-۴) عملیات لازم را جهت اصلاح ضرایب انجام می دهند. شایان ذکر است که در این قسمت پارامتر  $b$  صفر در نظر گرفته شده است.

مقادیر اولیه وزنهای قبل از راه اندازی موتور با استفاده از شبیه سازی بدست می آیند. در این مرحله تعیین پارامتر  $\eta$  در رابطه (۵) بصورت تجربی انجام می شود. مقادیر بالای  $\eta$  موجب کاهش زمان آموزش شبکه می شود ولی میزان فراجهش و زمان رسیدن به پاسخ مطلوب در حین کار کردن موتور را افزایش می دهد. با تعیین این پارامتر برای یکبار و در حالت آموزش می توان میزان فراجهش را صفر کرده و زمان رسیدن به پاسخ مطلوب را کاهش داد.

## ۵-۲- کنترل وضعیت به کمک شبکه عصبی خود سازمانده

از شبکه عصبی خود سازمانده بعنوان روش دیگری جهت کنترل مطلوب وضعیت در برابر تغییرات پارامترهای ماشین استفاده می گردد. شکل (۵) چگونگی استفاده از این شبکه برای کنترل وضعیت موتور DC را نشان می دهد. همانطور که در شکل (۵) ملاحظه می شود، شبکه عصبی خود سازمانده موجود در بلوک NN Predictive controller، رابطه ورودی و خروجی موتور DC را شناسایی کرده و سپس با استفاده از الگوریتم بهینه سازی، ورودی موتور DC را برای انطباق وضعیت خروجی بر وضعیت مرجع بهینه می سازد.



شکل (۵) کنترل وضعیت به کمک شبکه عصبی خود سازمانده

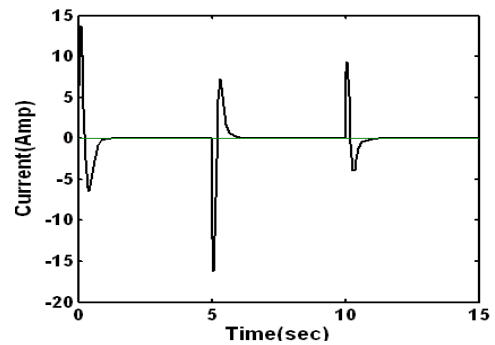
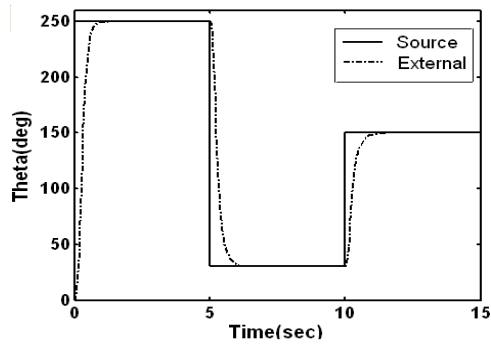
با اعمال تغییرات  $\theta_{source}$  و همچنین  $J$  و  $B$  و حالتیهای مختلف کارکرد موتور با استفاده از شبکه عصبی خود سازمانده بررسی شد، نتایج مربوطه در بخش ششم آمده اند.

## ۶- نتایج

در این بخش نتایج مدل‌های پیشنهادی در شرایط مختلف کارکرد موتور بررسی شده است.

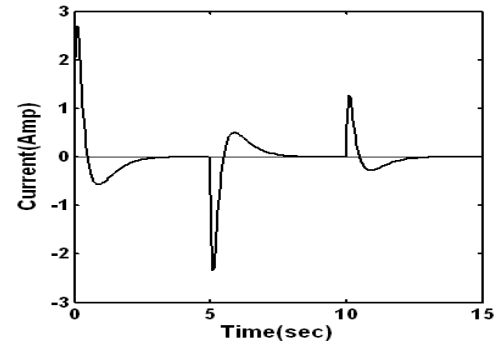
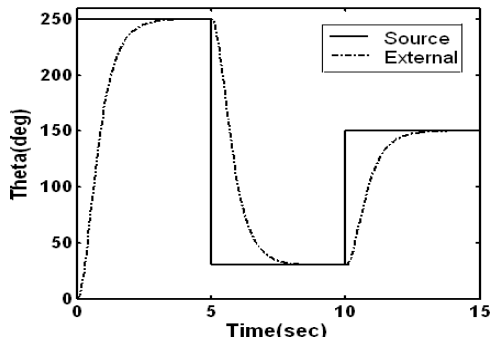
### ۶-۱- کنترل وضعیت به کمک شبکه عصبی تطبیقی خطی

الف) اثر تغییرات وضعیت مبنا بر وضعیت خروجی و همچنین تغییرات جریان آرمیچر در شکل (۶) نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می شود با افزایش و یا کاهش در میزان وضعیت مبنا، موتور به راه می افتد و پس از انطباق وضعیت خروجی موتور بر وضعیت مبنا ولتاژ آرمیچر صفر شده و موتور از کار می ایستد. این انطباق بدون هیچگونه بالازدگی (overshoot) و یا پائین زدگی (undershoot) در مدت  $1/5$  ثانیه به طول می انجامد.



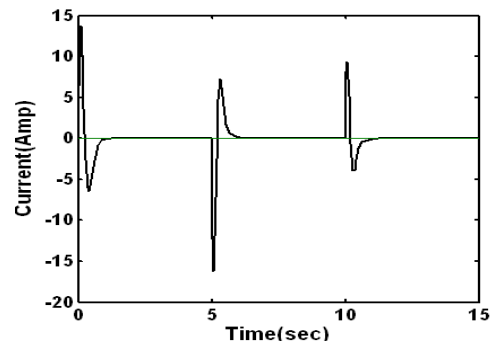
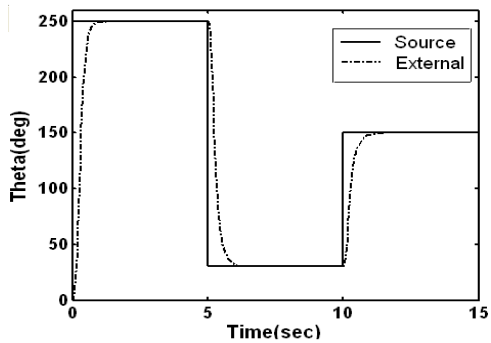
شکل (۶)

اگر به جای شبکه عصبی تطبیقی خطی از کنترل کننده PID استفاده می شد پس از تنظیم پارامترهای آن و تحت شرایط یکسان همان گونه که در شکل (۷) نشان داده شده است انطباق وضعیت خروجی موتور بر وضعیت مبنا بدون هیچگونه نوسانی و در مدت  $3/7$  ثانیه صورت می پذیرد.



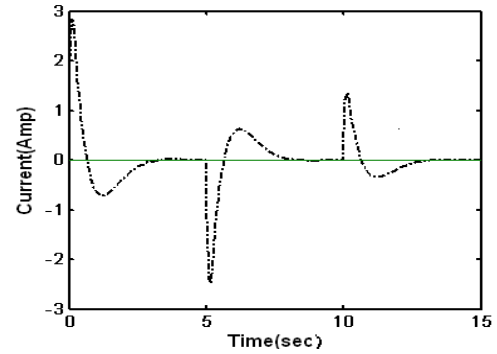
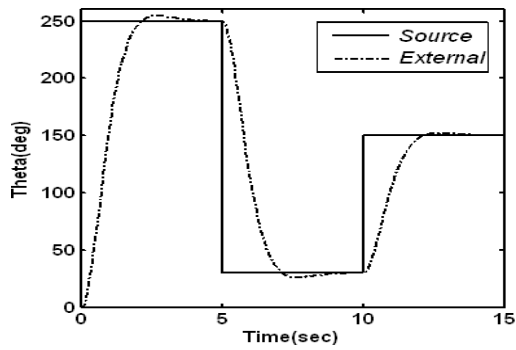
شکل (۷)

ب) مدل ارائه شده در برابر تغییرات  $J$  و  $B$  در حین کار مقاوم می باشد. به منظور بررسی این ویژگی، در حین اعمال وضعیت مبنا تغییرات  $10\%$  برای  $J$  و  $B$  نیز در نظر گرفته شده است. همانگونه که در شکل (۸) ملاحظه می شود، مدل پیشنهادی بدون هیچ نوسانی و در مدت  $1/5$  ثانیه به وضعیت مبنا دست می یابد.



شکل (۸)

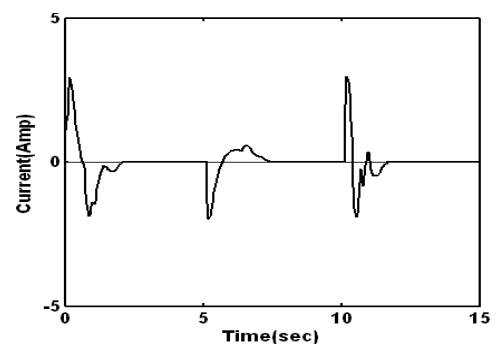
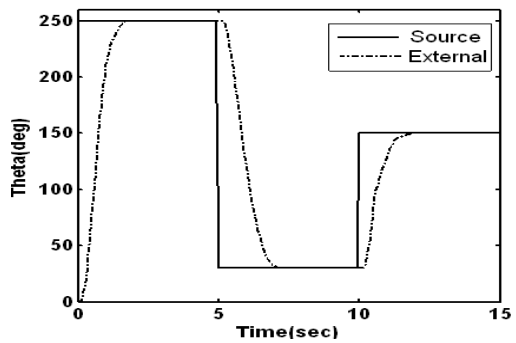
اگر به جای مدل پیشنهادی از کنترل کننده PID استفاده شود و همچنین تغییرات  $10\%$  نیز برای  $J$  و  $B$  در نظر گرفته شود، همانگونه که در شکل (۹) ملاحظه می شود به ازای افزایش وضعیت مبنا، وضعیت خروجی  $2\%$  بالادگی داشته و در مدت  $4/5$  ثانیه بر وضعیت مبنا منطبق می شود. در حین کاهش وضعیت مبنا، وضعیت خروجی دارای  $14\%$  پایین زدگی بوده که در مدت  $4/5$  ثانیه اصلاح و بر وضعیت مبنا منطبق می شود.



شکل (۹)

## ۶-۲- کنترل وضعیت به کمک شبکه عصبی خود سازمانده

الف) اثر تغییرات وضعیت مبنا بر وضعیت خروجی و همچنین تغییرات جریان آرمیچر در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۱۰)

همان گونه که ملاحظه می شود با افزایش و یا کاهش در میزان وضعیت مبنا، موتور به راه می افتد و پس از انطباق وضعیت خروجی موتور بر وضعیت مبنا ولتاژ آرمیچر صفر شده و موتور از کار می ایستد. این انطباق بدون هیچگونه بالازدگی و یا پائین زدگی در مدت ۱/۷ ثانیه به طول می انجامد.

ب) مدل ارائه شده در برابر تغییرات J و B در حین کار مقاوم می باشد. به منظور بررسی این ویژگی، در حین اعمال وضعیت مبنا تغییرات ۱۰٪ برای J و B نیز در نظر گرفته شده است. همانگونه که در شکل (۱۰) ملاحظه می شود، مدل پیشنهادی بدون هیچ نوسانی و در مدت ۱/۷ ثانیه به وضعیت مبنا دست می یابد.

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله از شبکه عصبی تطبیقی خطی و شبکه عصبی خود سازمانده جهت کنترل وضعیت یک موتور DC تحریک جداگانه استفاده شده است. ویژگی روشهای پیشنهادی اصلاح ضرایب شبکه عصبی در حین کار کردن موتور و مقاوم بودن پاسخها نسبت به تغییرات ممان اینرسی (J) و اصطکاک (B) می باشد. برخلاف کنترل کننده PID که در اثر تغییر یکی از پارامترهای مدل، نظیر J و B کارایی بهینه خود را از دست می دهد و نیاز به تنظیم پارامترهای کنترل کننده دارد، روشهای پیشنهادی نیاز به طراحی مجدد نداشته و در برابر تغییرات پارامترها بطور خودکار اصلاح می شوند، همچنین توانایی حذف کامل فراجش در شرایط مختلف کارکرد موتور و کاهش زمان رسیدن به پاسخ نهایی را دارا هستند. ضمن آنکه شبکه عصبی تطبیقی خطی نسبت به شبکه عصبی خود سازمانده انعطافپذیرتر بوده و زمان رسیدن به پاسخ نهایی در آن کمتر می باشد.

## مراجع:

- [۱] مطلبی، ع، «ماشینهای الکتریکی و جریان مستقیم»، انتشارات قائم.
- [۲] تألیف ه. رشید، ترجمه ا. افجعی و م. مهاجر، «الکترونیک قدرت، مدارها - عناصر و کاربردها»، انتشارات نوپردازان، چاپ چهارم، سال ۱۳۸۲.
- [۳] تألیف ک. ه. اوگاتا، ترجمه م. دیانی، «مهندسی کنترل»، انتشارات نص، چاپ چهارم، سال ۱۳۸۱.
- [4] Kwork L. Tang, Robert J. Mulholland, "Comparing Fuzzy Logic With Classical Controller Designs". IEEE Trans. SMC, Vol.17, No. 6. Nov./Dec. 1987, pp.1085-1087.
- [۵] تألیف م. مختاری، ترجمه و. صمدی، «کاربردهای Matlab و Simulink در مهندسی»، انتشارات خراسان، چاپ اول، سال ۱۳۸۰.
- [۶] تألیف ب. منهای، «هوش محاسباتی، مبانی شبکه های عصبی» انتشارات حسابی، چاپ اول، سال ۱۳۷۷.
- [7] R. Rico martinez, J.S. Anderson and I. G. Kebrekidis, "Continuous-time nonlinear signal processing: a neural network based approach for griy box identification," in Proc. IEEE Workshop on neural network for signal Processing, pp. 596-605, Oct. 1994
- [8] Y.F. La, C.C. Lau, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems". 1988 IEEE International Conference on Robotics and automation, Philadelphir, PA, April 24-29, PP.65-71.