

بهبود پاسخ گشتاور و کاهش خطای سرعت در کنترل مستقیم گشتاور موتور القایی با استفاده از منطق فازی

حمیدرضا فخاری زاده بافقی^۱، محمدباقر منهج^۲، علیرضا صدیقی^۳

۱- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بافق، hfakharizade@yahoo.com

۲- استاد، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، tmenhaj@ieee.org

۳- استادیار، دانشکده برق، دانشگاه یزد، sedighi@yazduni.ac.ir

چکیده

در این مقاله سرعت یک موتور القایی با استفاده از روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC^۱) کنترل شده است، که در آن به منظور بهبود پاسخ گشتاور و کاهش خطای سرعت از منطق فازی برای طراحی کنترلر سرعت استفاده گردیده است. روش کنترل مستقیم گشتاور دارای پاسخ گشتاور بسیار سریع می باشد، و با توجه به اینکه این روش در مقابل تغییرات بار ناگهانی مقاوم عمل می کند، از آن استفاده شده است. همچنین با توجه به توانایی منطق فازی در حل مسائل پیچیده و غیردقیق و به منظور بهبود عملکرد کنترل سرعت موتور القایی از منطق فازی نیز برای طراحی کنترلر سرعت بهره گرفته شده است. نتایج بهبود قابل ملاحظه ای را در پاسخ گشتاور و کاهش خطای سرعت نشان می دهند.

واژه های کلیدی

شبیه سازی موتور القایی، کنترل مستقیم گشتاور، منطق فازی

۱- مقدمه

گشتاور نیز سریعتر شده است. خطای سرعت و پاسخ گشتاور در سرعت ها و بارهای مختلف برای مقایسه دو کنترلر آورده شده اند. در بخش بعد کنترل مستقیم گشتاور توضیح داده شده است. در بخش سوم منطق فازی بیان گردیده است. بخش چهارم به ارائه نتایج شبیه سازی می پردازد.

۲- کنترل مستقیم گشتاور

در کنترل مستقیم گشتاور، شار و گشتاور محاسبه و میزان خطای آنها از مقدار مرجع به یک مقایسه کننده اعمال می گردد. خروجی مقایسه کننده ها برای کلیدزنی اینورتر مورد نیاز استفاده می شود. در ادامه به شرح بیشتر می پردازیم.

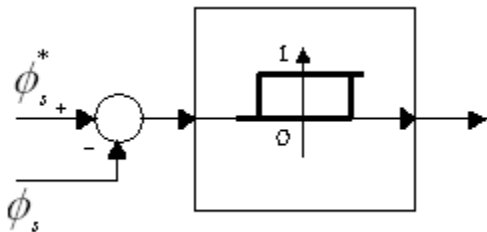
موتور القایی به دلیل ساختار ساده و هزینه تعمیرات و نگهداری بسیار کم، یکی از پرکاربردترین محرکه های الکتریکی در صنعت می باشد. کنترل سرعت و گشتاور جزء مباحث لاینفک موتورهای القایی محسوب می شود. یکی از روش های کنترل سرعت، کنترل مستقیم گشتاور بوده که دارای پاسخ گشتاور بسیار سریعی می باشد و همچنین در برابر تغییرات بار ناگهانی نیز مقاوم است. در کنترل مستقیم گشتاور عموماً از یک کنترلر PI برای کنترل سرعت استفاده می شود [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

در کنترلر PI افزایش و کاهش سرعت فرمان باید به صورت شیب به سیستم اعمال شود. در این مقاله از یک کنترلر فازی برای بهبود کنترل سرعت استفاده شده است. کنترلر فازی خطای سرعت را، در تغییرات ناگهانی سرعت مرجع بهبود بخشیده است. همچنین پاسخ

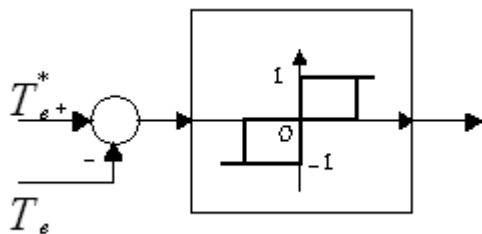
می‌گیرد. در این مقاله میزان خطای سرعت به یک کنترلر فازی اعمال می‌شود. خروجی این کنترلر گشتاور مرجع را مشخص می‌کند.

۲-۳- مقایسه کننده هیستریزس

در کنترل مستقیم گشتاور از دو مقایسه کننده هیستریزس یکی برای کنترل شار و دیگری برای کنترل گشتاور استفاده می‌شود. ورودی این دو مقایسه کننده میزان خطای شار و گشتاور می‌باشد. همچنان که از شکل (۱) مشخص است مقایسه کننده هیستریزس مربوط به شار دارای دو سطح ۱ و ۰ بوده که به ترتیب بیانگر افزایش و کاهش شار می‌باشند.



شکل ۱- مقایسه کننده هیستریزس مربوط به شار



شکل ۲- مقایسه کننده هیستریزس مربوط به گشتاور

با توجه به شکل (۲) ملاحظه می‌شود که مقایسه کننده مربوط به گشتاور، دارای سه سطح ۱، ۰ و -۱ می‌باشد که به ترتیب بیانگر تغییرات مثبت، صفر و منفی است.

مقدار باندهای هیستریزس از فاکتورهای مهم در DTC می‌باشد. کوچک بودن این باندها شکل موج جریان را به یک موج سینوسی نزدیک تر می‌کند و باعث افزایش فرکانس کلیدزنی اینورتر می‌گردد. نتیجه این امر تلفات کلیدزنی را بیشتر می‌کند.

۲-۴- اصول کلید زنی اینورتر

تغذیه موتور القایی از طریق یک اینورتر صورت می‌پذیرد، که با انتخاب ولتاژ مناسب می‌توان شار و گشتاور را کنترل نمود. اگر V_a

۲-۱- تخمین شار و گشتاور

به منظور تخمین شار و گشتاور ابتدا از ولتاژ و جریان سه فاز استاتور نمونه برداری شده و به قاب مرجع $(\alpha\beta)$ تبدیل می‌گردد. سپس شار استاتور از روابط زیر تخمین زده می‌شود [۳].

$$\varphi_s = \int (v_s - R_s i_s) dt + \varphi_{s0} \quad (1)$$

$$\phi_s = \sqrt{\varphi_{s\alpha}^2 + \varphi_{s\beta}^2} \quad (2)$$

که در آن φ_{s0} شار استاتور، φ_s مقدار اولیه شار، R_s مقاومت استاتور و ϕ_s دامنه شار است و $v_s = v_{s\alpha} + jv_{s\beta}$ و $i_s = i_{s\alpha} + ji_{s\beta}$ می‌باشد. پس از محاسبه، ϕ_s با شار مرجع (ϕ_s^*) که مقدار آن نزدیک به شار نامی موتور است مقایسه می‌شود و میزان خطا به مقایسه کننده هیستریزس دو سطحی اعمال می‌گردد.

$$\Delta\phi = \phi_s^* - \phi_s \quad (3)$$

گشتاور الکترومغناطیسی (T_e) نیز از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} (\varphi_{s\alpha} i_{s\beta} - \varphi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (4)$$

گشتاور هم با گشتاور مرجع (T_e^*) مقایسه و خطا به مقایسه کننده هیستریزس سه سطحی اعمال می‌شود.

$$\Delta T = T_e^* - T_e \quad (5)$$

۲-۲- کنترل سرعت

سرعت چرخش موتور از رابطه ۶ بدست می‌آید.

$$\omega_m = \omega_s - \omega_r \quad (6)$$

که ω_s سرعت چرخش شار میدان استاتور و ω_r سرعت چرخش شار رتور را مطابق روابط زیر بیان می‌دارند.

$$\omega_s = d\theta_r / dt \quad (7)$$

$$\omega_r = \frac{2}{3} \cdot \frac{T_e}{\phi_r^2} \cdot R_r \quad (8)$$

که در آن θ_r موقعیت شار رتور، ϕ_r دامنه شار رتور و R_r مقاومت رتور می‌باشد. شار رتور (ϕ_r) و دامنه آن با روابط (۹) و (۱۰) نشان داده می‌شود.

$$\varphi_r = \frac{L_m^2 - L_s L_r}{L_m} i_s + \frac{L_r}{L_m} \varphi_s \quad (9)$$

$$\phi_r = \sqrt{\varphi_{r\alpha}^2 + \varphi_{r\beta}^2} \quad (10)$$

که در آن L_s ، L_m و L_r به ترتیب اندوکتانس مغناطیسی، اندوکتانس استاتور و اندوکتانس رتور می‌باشند.

وقتی سرعت موتور تخمین زده شد با سرعت مرجع مقایسه و میزان خطای آن به یک کنترلر PI اعمال می‌شود، سپس خروجی با عبور از یک محدودکننده به عنوان گشتاور مرجع مورد استفاده قرار

در هر ناحیه جهت کنترل شار باید از دو برداری که سریع تر کلیدزنی را ممکن می سازد استفاده کنیم، که یکی باعث افزایش شار و دیگری باعث کاهش شار می شود.

همچنین با توجه به رابطه (۱۴) در می یابیم که گشتاور متناسب با شار رتور، شار استاتور و زاویه بین آنها δ است.

$$T_e = K|\varphi_s||\varphi_r|\sin(\delta) \quad (14)$$

بنابراین با تغییر دامنه شار استاتور و زاویه δ می توان گشتاور را کنترل کرد.

با توجه به خروجی های مقایسه کننده ها و همچنین ناحیه ای که شار استاتور در آن قرار دارد از جدول (۱) برای کلیدزنی اینورتر استفاده شده است.

جدول ۱- جدول کلیدزنی اینورتر

K_θ	K_T	θ					
		1	2	3	4	5	6
1	1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0
	-1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
0	1	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
	0	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7
	-1	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

شایان ذکر است برای بدست آوردن ناحیه های که شار در آن واقع شده از فرمول زیر استفاده می گردد.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\varphi_{s\beta}}{\varphi_{s\alpha}}\right) \quad (15)$$

۳- منطق فازی

منطق فازی سال هاست که به عنوان روشی مناسب در حل مسائل پیچیده مورد استفاده است. در این مقاله از منطق فازی جهت طراحی کنترلر سرعت استفاده شده است.

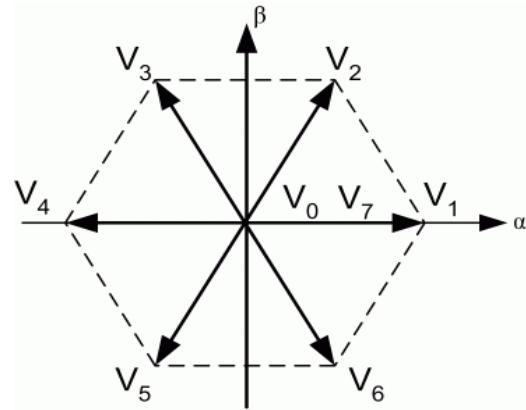
۳-۱- مجموعه های فازی

خطای سرعت (میزان خطای سرعت موتور از سرعت مرجع) و گشتاور بار به عنوان ورودی های کنترلر فازی در نظر گرفته شده اند. خروجی این کنترل کننده گشتاور مرجع است. خطای سرعت شامل ۵ تابع عضویت مثلثی شکل می باشد. شکل (۴) این توابع عضویت را نشان می دهد. گشتاور بار نیز شامل یک تابع عضویت ذوزنقه ای می باشد.

V_c و V_b مقادیر لحظه ای ولتاژهای فاز در خروجی اینورتر باشند، فازور ولتاژ V_s در خروجی سه فاز به صورت زیر است.

$$V_s = \sqrt{\frac{2}{3}}(V_a + V_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + V_c e^{j\frac{4\pi}{3}}) \quad (11)$$

این ولتاژها دارای دو حالت ۱ و ۰ است که حالت ۰ به معنای قطع کلید و حالت ۱ به معنای وصل بودن کلید است. پس با استفاده از اینورتر و با توجه به رابطه (۱۱) به شش بردار ولتاژ غیر صفر و دو بردار ولتاژ صفر دست می یابیم که در شکل (۳) نشان داده شده اند.



شکل ۳- بردارهای ولتاژ در قاب مرجع $\alpha\beta$

این بردارها را می توان با استفاده از کلیدهای S_a ، S_b و S_c به صورت زیر نشان داد.

$$V_s = \sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc}(S_a + S_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + S_c e^{j\frac{4\pi}{3}}) \quad (12)$$

که در آن V_{dc} ولتاژ تغذیه اینورتر می باشد. با قرار دادن ۰ و ۱ به جای کلیدها به بردارهای زیر می رسیم.

$$V_0(000) \quad V_1(100) \quad V_2(110) \quad V_3(010)$$

$$V_4(011) \quad V_5(001) \quad V_6(101) \quad V_7(111)$$

حال با توجه به معادله (۱) و صرف نظر کردن از مقاومت استاتور داریم.

$$\dot{\varphi}_s = V_s \quad (13)$$

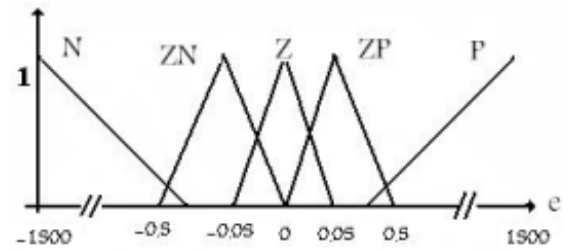
که این عبارت بیانگر این است که ولتاژ تغذیه استاتور تعیین کننده جهت بردار شار استاتور است. حال برای کنترل دامنه شار و نگه داشتن آن در یک باند هیستریزیس معین باید بردار ولتاژ مناسبی را انتخاب کنیم. برای این منظور صفحه $\alpha\beta$ را به شش ناحیه مساوی ۶۰ درجه ای تقسیم می کنیم که از ۳۰- درجه شروع می شود و هر بردار ولتاژ، نیمساز این نواحی می باشد.

شکل‌های (۶) و (۷) تغییرات سرعت را در بار ثابت نشان می‌دهد. شکل (۶) نتایج شبیه‌سازی مربوط به کنترلر PI و شکل (۷) نتایج شبیه‌سازی مربوط به کنترلر فازی می‌باشد. در این شکل‌ها قسمت (الف)، سرعت موتور می‌باشد. همچنان‌که از شکل مشخص است، سرعت مرجع از لحظه $t=0$ تا $t=1$ ، $t=1$ تا $t=2$ (rpm) $t > 2$ در نظر گرفته شده است. همچنین گشتاور بار (Nm) ۱۰ می‌باشد. قسمت (ب) و (ج) نیز به ترتیب، خطای سرعت و گشتاور الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد.

جدول ۲- پارامترهای موتور القایی

P	4KW	x_m	22.92Ω
V	220V	x_s	1.7Ω
R_s	1.48Ω	x_r	1.7Ω
R_r	1.05Ω	Poles	4

در شکل‌های (۸) و (۹) تغییرات بار در سرعت ثابت (rpm) ۴۰۰ آورده شده است. مقدار گشتاور بار از لحظه $t=0$ تا $t=1$ (Nm) ۱۰، از لحظه $t=1$ تا $t=1/5$ $t=1/5$ و از لحظه $t=1/5$ تا $t=2$ (Nm) ۱۵ در نظر گرفته شده است. شکل (۸) نتایج شبیه‌سازی مربوط به کنترلر PI و شکل (۹) نتایج شبیه‌سازی مربوط به کنترلر فازی را نشان می‌دهد. در این دو شکل قسمت (الف)، (ب) و (ج) به ترتیب بیانگر سرعت، خطای سرعت و گشتاور الکترومغناطیسی می‌باشند. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب پاسخ گشتاور مربوط به کنترلر PI و فازی را نشان می‌دهند. مقایسه شکل‌ها بهبود پاسخ گشتاور در کنترلر فازی را به خوبی مشخص می‌کند. باید توجه داشت این دو شکل قسمت (ج) از شکل‌های (۸) و (۹) است، که برای بیان دقیق‌تر در بازه زمانی $[1/51 \ 1/50]$ آورده شده‌اند.



شکل ۴- توابع عضویت خطای سرعت

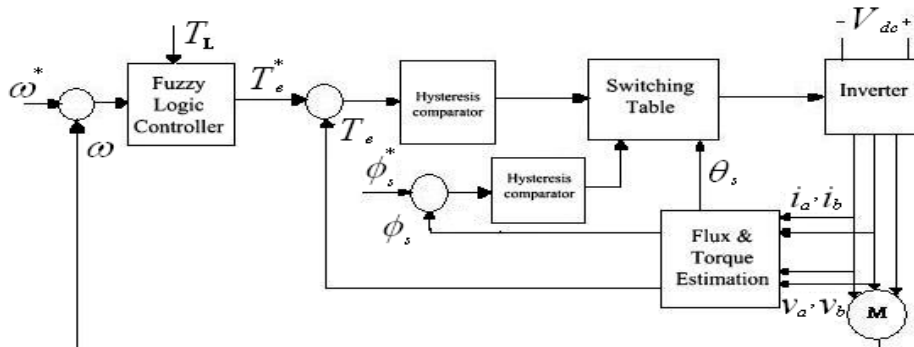
۳-۲- پایگاه قوانین

در پایگاه قوانین از ۵ قانون اگر و آنگاه برای فرمول‌بندی روابط استفاده شده است. این قوانین به صورت زیر بیان می‌گردد.
 (۱) اگر خطای سرعت P آنگاه گشتاور مرجع، TMP است.
 (۲) اگر خطای سرعت ZP آنگاه گشتاور مرجع، TLM است.
 (۳) اگر خطای سرعت Z آنگاه گشتاور مرجع، TLM است.
 (۴) اگر خطای سرعت ZN آنگاه گشتاور مرجع، TLL است.
 (۵) اگر خطای سرعت N آنگاه گشتاور مرجع، TMN است.

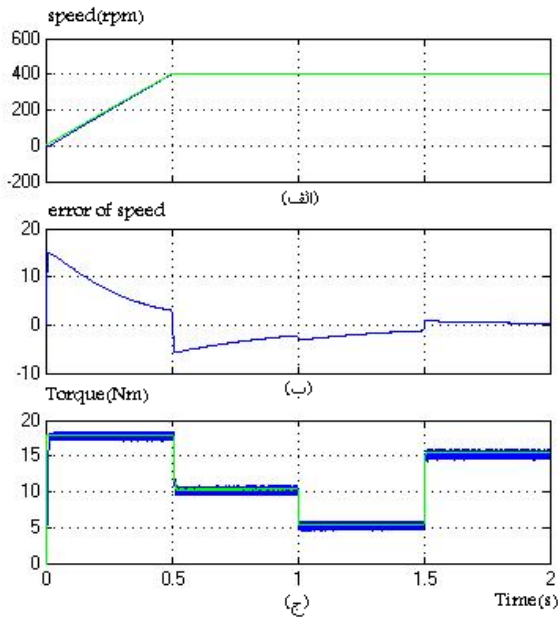
باید توجه داشت متغیر گشتاور بار به منظور تعیین خروجی مورد استفاده قرار گرفته است. برای استنتاج و غیرفازی‌کردن مقادیر خروجی از مدل سوگنو استفاده شده است. در مدل سوگنو خروجی کنترل‌کننده به صورت تابعی از ورودی‌ها می‌باشد. TMP و TMN به ترتیب گشتاور ماکزیمم مثبت و منفی می‌باشند. TLM و TLL نیز به ترتیب مفهوم بیشتر و کمتر از گشتاور بار را بیان می‌دارند.

۴- شبیه‌سازی

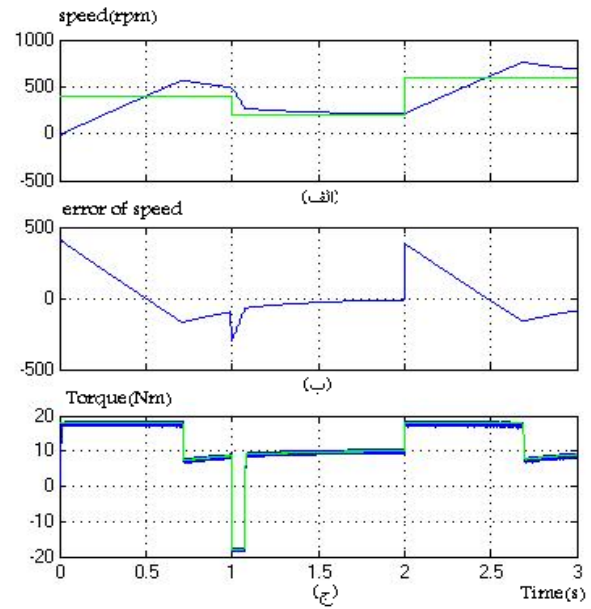
شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. برای این منظور از یک موتور القایی با مشخصات (جدول ۲) استفاده کرده‌ایم. شکل (۵) شماتیک بلوک دیاگرام DTC موتور القایی که در آن از کنترلر فازی استفاده شده را نشان می‌دهد.



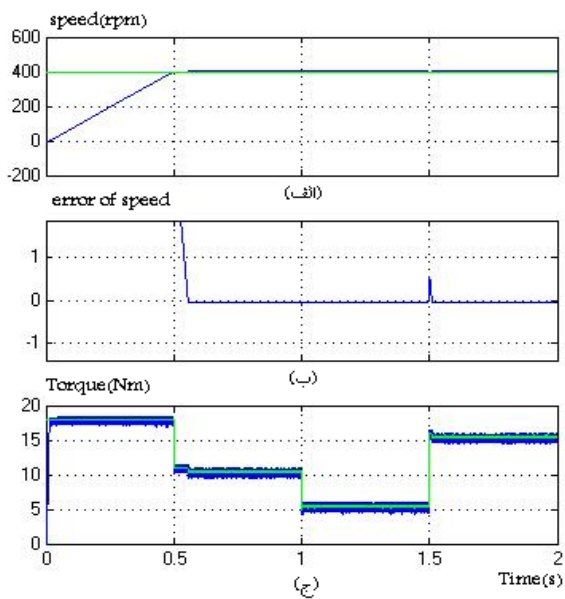
شکل ۵- شماتیک بلوک دیاگرام DTC موتور القایی کنترل شده با منطق فازی



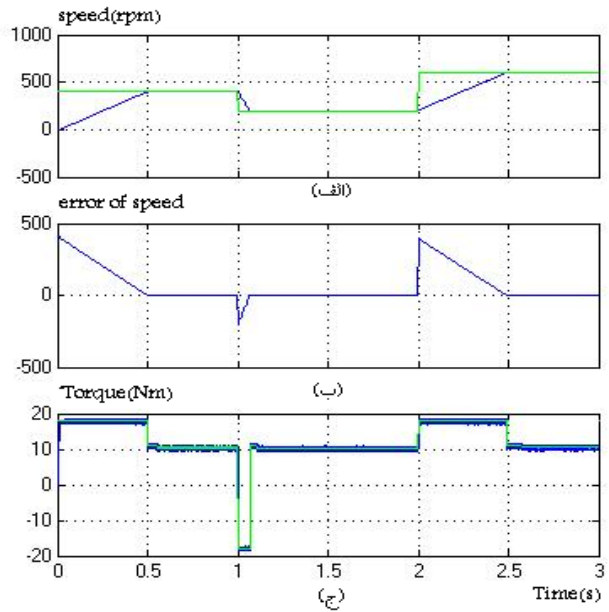
شکل ۸- نتایج شبیه سازی مربوط به کنترلر PI در سرعت ثابت
الف- سرعت موتور ب- خطای سرعت ج- گشتاور
الکترومغناطیسی



شکل ۶- نتایج شبیه سازی مربوط به کنترلر PI در بار ثابت
الف- سرعت موتور ب- خطای سرعت ج- گشتاور الکترومغناطیسی



شکل ۹- نتایج شبیه سازی مربوط به کنترلر فازی در سرعت ثابت
الف- سرعت موتور ب- خطای سرعت ج- گشتاور
الکترومغناطیسی



شکل ۷- نتایج شبیه سازی مربوط به کنترلر فازی در بار ثابت
الف- سرعت موتور ب- خطای سرعت ج- گشتاور الکترومغناطیسی

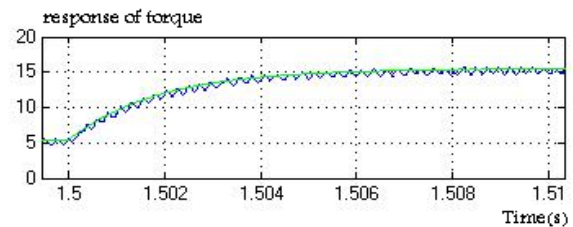
در این مقاله از یک کنترلر فازی جهت بهبود خطای سرعت و پاسخ گشتاور استفاده شده و نتایج برای بارها و سرعت‌های مختلف بررسی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد برای کارهای بسیار سریع و دقیق استفاده از کنترلر فازی مطلوب‌تر می‌باشد.

۶- مراجع

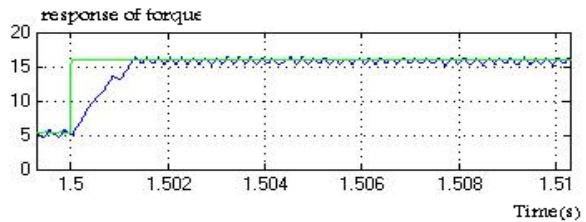
- [1] I. Takahashi, T. Noguchi. **A New Quick Response and High Efficiency Control Strategies of an Induction Motor**. IEEE Trans Ind Appl, Vol. 22, No. 5, pp. 820 – 7, 1986.
- [2] I. Takahashi, Y. Ohmori; **High Performance Direct Torque Control of an Induction Motor**, IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. 25, No. 2, pp. 257 – 264, 1989.
- [3] J. Faiz, M.B.B. Sharifian; **Comparison of Different Switching Pat-terns in Direct Torque Control Technique of Induction Motors**. Electric Power Systems Research, Vol. 60, pp. 63 – 75, 2001.
- [4] P. Vas; **Sensorless Vector and Direct Torque Control**. Oxford University Press, 1995.
- [5] R. Ortega, N. Barabanov, G. Escobar; **“Direct Torque Control of Induction Motors: Stability Analysis and Performance Improvement”**, IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. 46, No. 12. pp.1209 - 1222, August. 2001.
- [6] H. Baghgar Bostan Abad, Ali Yazdian Varjani, Taheri. **Using Fuzzy Controller in Induction Motor Speed Control with Constant Flux**. Transactions on engineering, computing and technology Vol. 5, ISSN, pp. 1305 - 5313, April 2005.
- [7] Y. Kumsuwan, S. Premrudeepreechacharn, H.A. Toliyat. **Modified Direct Torque Control Method for Induction Motor Drives Based on Amplitude and Angle Control of Stator Flux**. Electric Power Systems Research, Vol. 78, pp. 1712 – 1718, 2008.
- [8] S.M. Gadoue, D. Giaouris, J.W. Finch. **Artificial Intelligence-based Speed Control of DTC Induction Motor Drives A Comparative Study**. Electric Power Systems Research, Vol. 79, pp. 210 – 219, 2009.

۷- پی‌نوشت‌ها

1- Direct Torque Control



شکل ۱۰- پاسخ گشتاور مربوط به کنترلر PI



شکل ۱۱- پاسخ گشتاور مربوط به کنترلر فازی

مقایسه شکل‌های (۶) و (۸) ضعف کنترلر PI در سرعت‌های پله‌ای را نشان می‌دهد. در کنترلر PI برای داشتن کنترل مطلوب باید سرعت فرمان به صورت شیب به سیستم اعمال شود. شیب سرعت فرمان بستگی به نوع موتور و مقدار گشتاور بار دارد. برای رفع این مشکل از یک کنترلر فازی استفاده شده است. چنان‌که از شکل‌های (۶) و (۷) مشخص است در کنترلر فازی پس از رسیدن به سرعت مطلوب خطا در حد صفر نگه داشته شده ولی در کنترلر PI خطا شروع به زیاد شدن تا حد ۱۵۰ (rpm) و دوباره شروع به کم شدن می‌کند.

کنترلر فازی در مقابل تغییر بار ناگهانی نیز مقاوم‌تر از PI است. شکل‌های (۸) و (۹) مقاوم‌تر بودن کنترلر فازی را نشان می‌دهد، چنان‌که هنگام رسیدن به سرعت ۴۰۰ (rpm) خطا در کنترلر فازی صفر می‌شود و در $t=1$ که میزان بار کمتر می‌شود باز خطا صفر می‌ماند و در $t=1/5$ که بار بیشتر می‌شود خطا در حد ۰/۵ (rpm) می‌باشد که سریعاً صفر می‌شود. ولی در کنترلر PI هنگام رسیدن به سرعت ۴۰۰ (rpm) خطا ۶ (rpm) و در $t=1$ که میزان بار کمتر شده خطا که هنوز به صفر نرسیده ۳ (rpm) می‌شود و در $t=1/5$ که بار بیشتر می‌شود خطا ۲ (rpm) تغییر می‌کند و به کندی به سمت صفر میل می‌کند. در شکل (۸) از سرعت فرمان شیبدار استفاده شده، تا در سرعت مطلوب به بررسی تغییر بار بپردازیم.

۵- نتیجه‌گیری

منطق فازی در حل مسائل پیچیده سال‌هاست که مورد استفاده است. موتورهای القایی نیز به‌عنوان یکی از پر کاربردترین محرک‌های الکتریکی نقش بسیار مهمی را در صنایع به‌عهده دارند.