

ارائه یک مدل جدید موتور DC در Simulink و مقایسه با مدل نرم افزار

سروش روستایی

بخش مهندسی برق

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

Soroush.r59@gmail.com

سید حمید رضا شمس دین

بخش مهندسی برق

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

Hamid.shamsdin@gmail.com

چکیده:

در این مقاله با استفاده از قابلیت های نرم افزار Simulink در مدل سازی و تحلیل سیستم های دینامیکی، مدل جدیدی از موتور DC ارائه خواهد شد. در ساخت این مدل از معادلات حالت و امکانات S-Function نرم افزار Simulink بهره گرفته شده است و مدل ارائه شده، با مدل ماشین DC نرم افزار Simulink مقایسه گشته و دقت و کارایی آن در حالات مختلف سنجیده شده و مزیت های مدل ارائه شده بررسی خواهد شد. در نهایت با نگاهی به سیستم های کنترل سرعت موتور DC، مدل ارائه شده در یک سیستم کنترل سرعت، مورد آزمایش قرار خواهد گرفت.

واژگان کلیدی : موتور DC، Simulink، معادلات حالت، کنترل سرعت

۱- مقدمه

به دلیل محدودیت ها و مشکلات ناشی از زمان، امکانات و سرمایه در طراحی، بهینه سازی و ساخت سیستم ها، استفاده از نرم افزارهای شبیه سازی در طراحی و تحلیل سیستم های مختلف امری اجتناب ناپذیر است. در این میان از خیل عظیم نرم افزارهای شبیه سازی که هر کدام در شاخه ای از علوم به کار می آیند. نرم افزار Simulink و مجموعه های بلوکی مرتبط با آن دارای قدرت و قابلیت انعطاف فراوانی در طراحی، مدل سازی، تحلیل و شبیه سازی سیستم ها می باشد. بخش زیادی از قابلیت های این نرم افزار ناشی از پیوند و امکان به کارگیری ابزارهای موجود در بسته نرم افزاری MATLAB می باشد. در این مقاله با توجه به این قابلیت ها و استفاده از امکانات موجود در نرم افزار Simulink مدلی نو از موتور DC ارائه شده است.

نیاز فرایندهای مختلف صنعتی و تجاری به سرعت های متغیر و سرو موتورها، دلیل توجه به موتورهای DC می باشد. از دو دسته سرو موتورهای الکتریکی، DC و AC، هر کدام مزایا و معایب مربوط به خود را دارند. موتورهای DC دارای مشخصه متغیر هستند و امکان ایجاد تغییرات وسیع سرعت را براحتی میسر می سازند. همچنین گشتاور راه اندازی موتورهای DC نسبتاً زیاد می باشد و این خاصیت در موتورهای DC سری، استفاده از آنها را در حمل و نقل امکان پذیر کرده است. در مقابل موتورهای DC از انواع AC سنگین تر و گرانتر هستند؛ همچنین به دلیل وجود

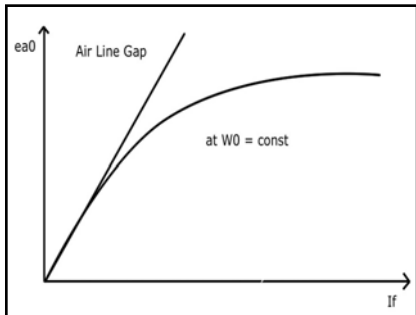
کموتاتورها و جاروبک ها موتورهای DC در سرعت بسیار زیاد چندان مناسب نمی باشند؛ بعلاوه نیازمند سرویس و مراقبت بیشتر هستند. موتورهای AC بر خلاف انواع DC سبکتر (۲۰ تا ۴۰ درصد) و ارزانتر هستند ولی روش های کنترل سرعت در آنها بسیار پیچیده و گران است که می تواند بوسیله میکروپروسسورها همراه با مبدل های کلیدزنی سرعت بالا پیاده سازی شود. به دلیل اهمیت سرو موتورهای DC، در این مقاله بر روی سرعت مکانیکی خروجی تأکید بیشتری صورت گرفته است و به عنوان مهمترین خروجی مدل ارائه شده در نظر گرفته می شود. به منظور مطالعه و شبیه سازی سیستم های کنترل سرعت و سرو موتورهای DC می توان از بلوک ماشین DC نرم افزار Simulink هم بهره گرفت ولی این بلوک به دلایل زیر گزینه مناسبی به شمار نمی آید:

- سرعت شبیه سازی در بلوک ماشین DC بسیار پایین است.
 - با افزایش گشتاور بار، شبیه سازی بسیار کند و در گشتاور بارهای بیش از $3 N.m$ عملاً غیر ممکن می گردد.
 - در پروژه های واقعی که در آن با تغییرات تصادفی گشتاور بار مواجه هستیم نمی توان از آن استفاده کرد.
- مجموعه این عوامل، دلیل ارائه این مدل جدید می باشد که در رفع این مشکلات بسیار مناسب عمل می نماید.

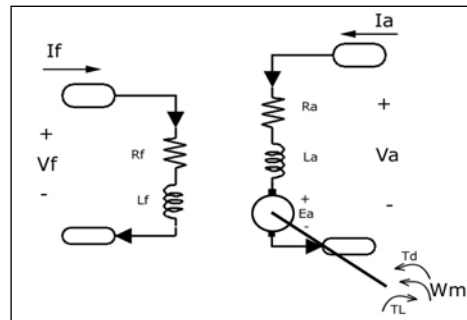
در ادامه مقاله در بخش دوم نحوه مدلسازی یک موتور DC تحریک مستقل بررسی شده است. در بخش سوم چگونگی پیاده سازی نرم افزاری طرح و در بخش چهارم صحت کارکرد و کارایی مدل ارایه شده است. در بخش پنجم با نگاهی به سیستم کنترل سرعت موتور DC مدل ارائه شده در یک سیستم کنترل سرعت به کا گرفته شده و نهایتاً در فصل ششم نتیجه گیری از مقاله ارائه خواهد شد.

۲- مدلسازی حالات پایدار و گذرای موتور DC تحریک مستقل

۲-۱- بررسی حالت پایدار موتور DC تحریک مستقل



شکل ۲- منحنی مغناطیسی یک موتور DC



شکل ۱- مدار معادل حالت پایدار موتور DC تحریک مستقل

شکل ۱ مدار معادل حالت پایدار یک موتور DC تحریک مستقل را نشان می دهد. در شکل ۱، R_f و L_f مقاومت و اندوکتانس سیم پیچ میدان و R_a و L_a مقاومت و اندوکتانس سیم پیچ آرمیچر است. E_a ولتاژ سرعت یا نیروی ضد محرکه مغناطیسی است که در مدار آرمیچر القا می شود. پایانه های این موتور DC با دو منبع DC جداگانه با عنوان های V_f و V_a تغذیه می شود و I_f و I_a به ترتیب جریان مدار میدان و جریان مدار آرمیچر می باشد. شار مغناطیسی تولیدی مدار میدان با توجه به محدودیت های منحنی مغناطیسی موتور DC تعیین می گردد. منحنی های مغناطیسی بسته به نوع ماده بکار رفته در ماشین، مقدار شار تولیدی را بر حسب جریان تحریک نمایش می دهند. شکل ۲ یک منحنی مغناطیسی نوعی برای موتور DC با صرف نظر از اثر عکس العمل عرضی آرمیچر را نشان می دهد. این منحنی در سرعت مکانیکی ثابت ω_0 رسم شده است. در حالت پایدار با ثابت بودن V_f جریان ثابتی از مدار میدان می

گذرد و در نتیجه شار قطب ها ثابت است. در همین حال در مدار آرمیچر روابط زیر نتیجه می شود که در آنها پارامتر K_a عدد ثابتی است و به مشخصات سیم پیچی موتور DC بستگی دارد :

$$E_a = K_a \varphi_d \omega_m \quad (1)$$

$$T_d = K_a \varphi_d I_a \quad (2)$$

$$I_a = (V_a - E_a) / R_a \quad (3)$$

ثابت بودن ولتاژ پایانه های مدار تحریک V_f ، باعث عبور جریان ثابتی از مدار میدان می شود و از آنجا شار قطب ها φ_d ، مقدار ثابتی خواهد بود و در نتیجه در روابط ۱ تا ۳ پارامتر $K_a \varphi_d$ عدد ثابتی خواهد بود که با K_m نمایش می یابد و در نهایت روابط اصلی موتور DC تحریک مستقل به صورت زیر مطرح می گردد:

$$K_m = K_a \varphi_d \quad (4)$$

$$E_a = K_m \omega_m \quad (5)$$

$$T_d = K_m I_a \quad (6)$$

با توجه به روابط ۵ و ۶ با داشتن مقدار K_m تمامی پارامترهای مربوط به حالت پایدار موتور DC تحریک مستقل به دست می آید. با توجه به رابطه ۴ برای محاسبه K_m به مقدار φ_d احتیاج داریم و بدین منظور از منحنی مغناطیسی موتور DC استفاده می کنیم. به عنوان مثال با استفاده از شکل ۲ و رابطه ۴ و با فرض ثابت بودن V_f داریم:

$$K_m = e_{a0} / \omega_{m0} \quad (7)$$

برای استفاده از منحنی شکل ۲ جریان مدار میدان اندازه گیری شده و مقدار e_{a0} معادل آن در منحنی بر ω_{m0} که منحنی، تحت آن سرعت رسم شده است، تقسیم می گردد تا K_m بدست آید [۱].

۲-۲- بررسی حالت گذرای موتور DC تحریک مستقل

برای بررسی حالت گذرای یک موتور DC تحریک مستقل از معادلات حالت استفاده می گردد. با در نظر گرفتن جریان آرمیچر و ω_m سرعت خروجی به عنوان متغیرهای حالت، مدل فضای حالت یک موتور DC به شکل زیر خواهد شد:

$$X = \begin{bmatrix} I_a \\ \omega_m \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$U = \begin{bmatrix} V_a \\ T_L \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \frac{-R_a}{L_a} & \frac{-K_m}{L_a} \\ \frac{K_m}{J_m} & \frac{-B_m}{J_m} \end{bmatrix} \times X + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{J_m} \end{bmatrix} \times U \quad (10)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times X \quad (11)$$

پارامترهای موجود در روابط ۸ تا ۱۱ عبارتند از:

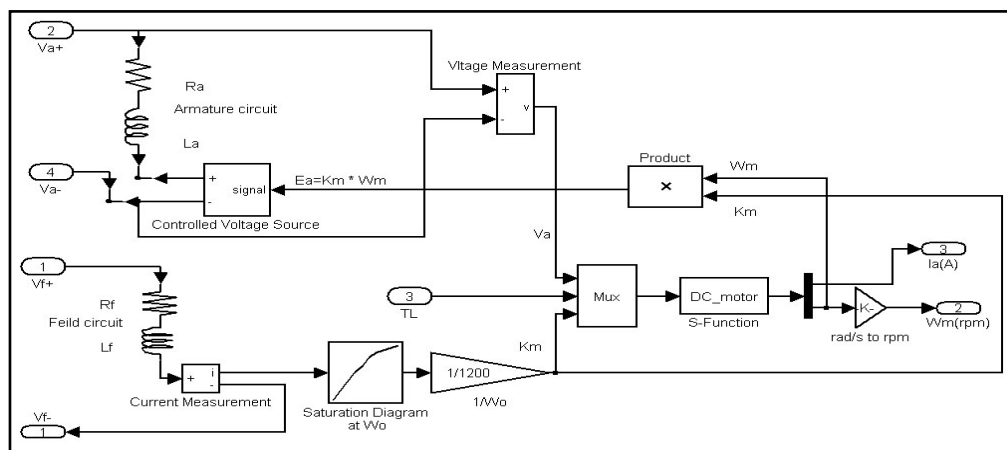
$J_m (Kg m^2)$	اینرسی بار و موتور	$B_m (\frac{N \cdot S}{m})$	ضریب اصطکاک ویسکوز
----------------	--------------------	-----------------------------	--------------------

جریان آرمیچر	$I_a (A)$	سرعت مکانیکی خروجی	$\omega_m (\frac{rad}{s})$
مقاومت آرمیچر	$R_a (\Omega)$	اندوکتانس آرمیچر	$L_a (H)$
ولتاژ پایانه آرمیچر	$V_a (v)$	گشتاور بار	$T_L (N.m)$

روابط ۱ تا ۱۱ معادلات اساسی برای مدلسازی حالت پایدار و گذرای موتور DC تحریک مستقل به شمار می آیند [۲].

۳- پیاده سازی نرم افزاری مدل موتور DC با استفاده از Simulink

به منظور ساخت مدل موتور DC از روابط ۱ تا ۱۱ استفاده می گردد. در پیاده سازی این معادلات از نرم افزار Simulink از نرم افزارهای جانبی MATLAB بهره گرفته شده است. شکل ۳ مدل پیشنهادی برای موتور DC را در نرم افزار Simulink نشان می دهد. در توضیح شکل ۳ می بایست یادآور شد که در قسمت مدار آرمیچر و مدار میدان از تعدادی بلوک های مجموعه بلوکی قدرت استفاده شده است. همچنین K_m موتور با استفاده از بلوک های اندازه گیر جریان در مدار میدان، جدول جستجو و بلوک بهره، بدست می آید. جدول جستجو بر اساس داده های مربوط به منحنی مغناطیسی موتور DC تنظیم گشته است و بلوک بهره مقدار عکس سرعت ω_0 که منحنی مغناطیسی تحت آن رسم شده است را در بر دارد. محاسبه K_m بر اساس شکل ۲ و رابطه ۷ انجام می شود (با فرض ثابت بودن V_f و I_f). به منظور پیاده سازی حالت گذرای موتور DC می بایست معادلات حالت آن حل شود (روابط ۸ تا ۱۱)؛ از این رو از یک بلوک S-Function کمک گرفته شده است (شکل ۳). این بلوک امکان استفاده از یک منطق برنامه نویسی شده را جهت توصیف یک مدل به دست می دهد. برنامه نویسی می تواند با کدهای MATLAB یا C انجام پذیرد. در این مقاله برای برنامه نویسی این S-Function از MATLAB کمک گرفته شده است. این بلوک در حقیقت وظیفه حل معادلات حالت مربوط به موتور DC را به عهده دارد.



شکل ۳- مدل پیشنهادی برای موتور DC در نرم افزار Simulink

سه پارامتر K_m ، V_a و T_L به عنوان ورودی به بلوک S-Function اعمال می شود و خروجی آن $I_a (A)$ و $\omega_m (\frac{rad}{s})$ می باشد. دیگر پارامترهای مندرج در معادلات ۱۰ و ۱۱ که در محاسبات مربوط به معادلات حالت مورد نیاز خواهند بود از طریق نرم افزار به S-Function فرستاده می شود. به منظور استفاده از این مدل به عنوان یک مدل کلی برای موتور DC و استفاده راحت تر از آن، تمامی متغیرهای مورد استفاده در شکل ۳ به صورت پارامتری تنظیم می گردد و نهایتاً مدل ماسک می شود تا امکان تنظیم پارامترها به صورت دلخواه فراهم آید [۵و۴].

۴- بررسی صحت کارکرد و کارایی مدل ارائه شده در مقایسه با مدل ماشین DC نرم افزار Simulink

در این بخش به منظور اطمینان از صحت کارکرد، مدل موتور DC اریه شده با مدل ماشین DC نرم افزار Simulink مقایسه گشته است. بدین منظور با استفاده از پارامترهای یک موتور DC واقعی هر دو مدل با شرایط یکسان تنظیم و راه اندازی گشته است. جدول ۱ مقادیر این پارامترها را نشان می دهد:

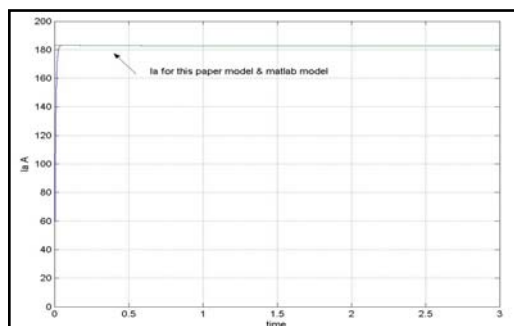
جدول ۱- پارامترهای مختلف موتور DC که در شبیه سازی به کار گرفته شده است

T_L	V_a	V_f	L_a	R_a	L_f	R_f	B_m	J_m
0,2N.m	220 v	147 v	8 mH	1.2Ω	20 mH	147Ω	0.6	0.2

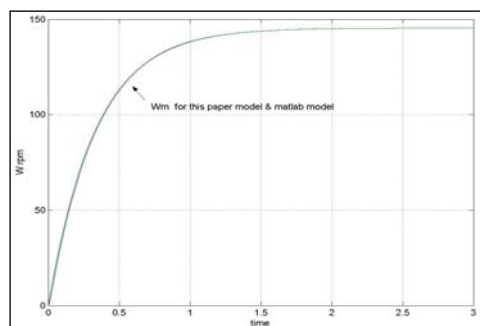
بدلیل استفاده از ساختارهای متفاوت برای دو مدل، تنظیم یکسان پارامترها به راحتی امکان پذیر نیست. نگاهی به ساختار مدل ماشین DC نرم افزار Simulink نشان می دهد که در آن مدل، منحنی مغناطیسی، خطی در نظر گرفته شده است. در حالی که در این مقاله منحنی مغناطیسی به صورت واقعی و همراه با اثرات اشباع در نظر گرفته شده است. این تفاوت ها به تفاوت بسیار اندکی در اندازه پاسخ منجر می گردد که البته قابل صرفنظر کردن است.

در شکل ۴ سرعت مکانیکی خروجی و در شکل ۵ جریان آرمیچر برای هر دو مدل نمایش داده شده است. شبیه سازی در شرایط یکسان و گشتاور بار، صفر در نظر گرفته شده است (حالت بی باری). در شکل ۶ تفاضل سرعت مکانیکی خروجی و در شکل ۷ تفاضل جریان آرمیچر خروجی هر دو مدل نمایش یافته است (در حالت بی باری). در شکل ۸ سرعت خروجی و در شکل ۹ جریان آرمیچر را با همان پارامترها و گشتاور بار 2 N.m نشان داده شده است (حالت بار ثابت). مطالعه نتایج حاصل از شبیه سازی هر دو مدل در دو حالت مختلف (یکی بدون بار و یکی بار ثابت) و همچنین بررسی منحنی های ۴ تا ۹ موارد زیر را مشخص می کند:

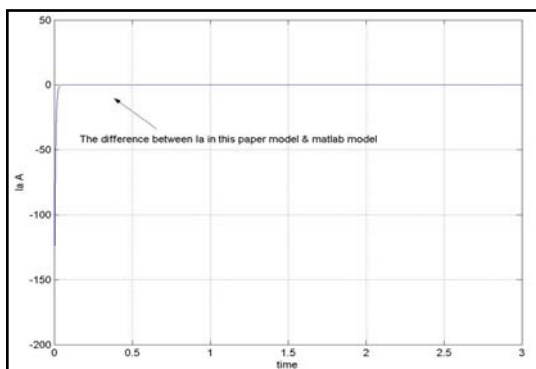
- نتایج حاصل از شبیه سازی هر دو مدل در دو حالت بی باری و بار ثابت یکسان است. این امر صحت کارکرد مدل ارائه شده را نشان می دهد (رجوع به شکل های ۴، ۵، ۸ و ۹).
- تفاوت های جزئی در نتایج خروجی که به راحتی قابل صرفنظر کردن است، ناشی از عدم امکان تنظیم پارامترهای هر دو مدل به صورت کاملاً یکسان است. شکل های ۶ و ۷ نشان می دهد که جواب نهایی هر دو مدل دقیقاً یکی است. این امر از صفر شدن منحنی تفاضل مقادیر موجود در این شکل ها، مشخص می گردد.
- قابلیت شبیه سازی در هر گشتاور بار با سرعت مطلوب مزیت و برتری کامل مدل ارائه شده را به مدل ماشین DC نرم افزار Simulink نشان می دهد. همچنین امکان بکارگیری این مدل در هر پروژه عملی شبیه سازی موجود می باشد در حالیکه مدل موجود در نرم افزار خصوصاً با افزایش گشتاور بار عملاً قابل استفاده نیست.



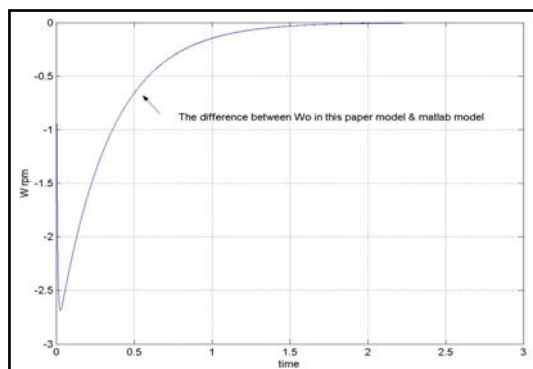
شکل ۵- جریان آرمیچر برای هر دو مدل در بی باری



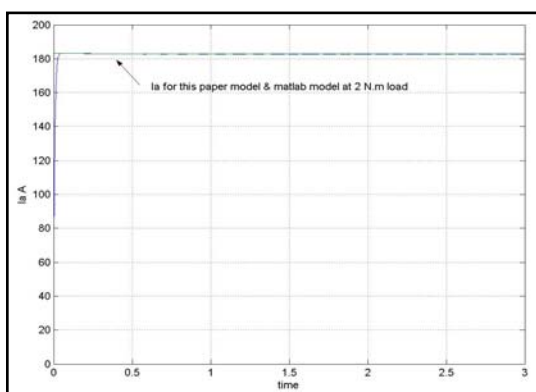
شکل ۴- سرعت خروجی برای هر دو مدل در حالت بی باری



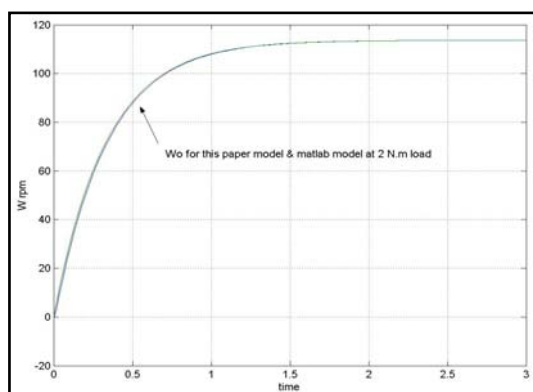
شکل ۷- تفاضل جریان آرمیچر هر دو مدل در بی باری



شکل ۶- تفاضل سرعت خروجی هر دو مدل در بی باری



شکل ۹- جریان آرمیچر هر دو مدل در حالت بار ثابت



شکل ۸- سرعت خروجی هر دو مدل در حالت بار ثابت

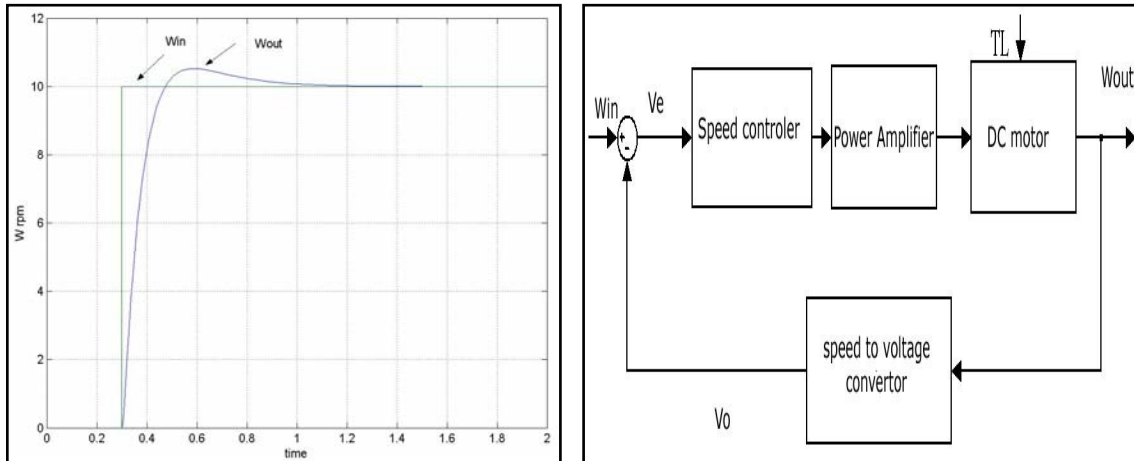
۵- بررسی سیستم کنترل سرعت موتور DC و بکارگیری مدل ارائه شده در یک سیستم کنترل سرعت

۵-۱- سیستم کنترل سرعت موتور DC

شکل ۱۰ سیستم کنترل سرعت حلقه بسته یک موتور DC را نشان می دهد. مزایای این سیستم: دقت بالا، پاسخ دینامیکی سریع، کاهش اغتشاش های بار و کاهش اثرات غیرخطی شدن سیستم است. در این سیستم سرعت خروجی با سرعت مبنا مقایسه می شود و از اختلاف آنها سیگنال کارانداز کنترل کننده سرعت و نهایتاً سیگنال کارانداز تقویت کننده توان، بدست می آید. تقویت کننده توان نیز ولتاژ پایانه های آرمیچر موتور را تغذیه می کند. ورودی دیگر سیستم، گشتاور بار است که بصورت اغتشاش در سیستم عمل می کند و نهایتاً باید اثر آن حذف گردد. در این سیستم فقط از فیدبک سرعت برای کنترل دور، استفاده شده است. اشکال این روش در پاسخ کند به اثرات اغتشاشات بار است. بنا به معادله ۶ گشتاور بار، مستقیماً با جریان آرمیچر، درگیر است. بنابراین راه بهتر اینست که از فیدبک جریان آرمیچر نیز استفاده گردد. بطور کلی برای کنترل سرعت یک موتور DC تحریک مستقل می توان از کنترل میدان یا کنترل آرمیچر استفاده نمود. در عمل برای کنترل سرعت در سرعت های کمتر از سرعت پایه، از روش کنترل ولتاژ پایانه های آرمیچر (V_a) و ثابت نگه داشتن جریان میدان و برای سرعت های بیش از آن با تثبیت ولتاژ آرمیچر در حد مقدار نامی و تغییر جریان میدان استفاده می شود [۳]. در هر کدام از این روش ها به یک منبع DC متغیر نیاز خواهد بود تا از طریق آن، ولتاژ پایانه های آرمیچر را تغییر کند یا جریان میدان کنترل گردد (برای موتورهای تحریک مستقل). و در صورتیکه از ترکیب هر دو روش استفاده گردد، به دو منبع DC متغیر احتیاج خواهد بود.

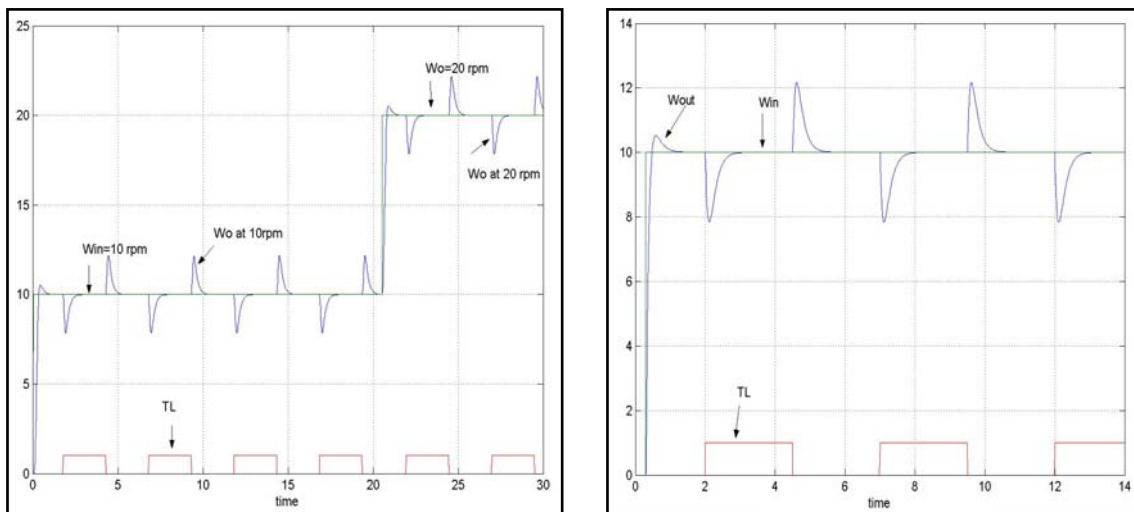
۵-۲- بکارگیری مدل ارائه شده در یک سیستم کنترل سرعت

قابلیت های مدل ارائه شده، در یک سیستم واقعی کنترل سرعت، مورد آزمایش قرار گرفته است. در این سیستم از روش کنترل ولتاژ پایانه های آرمیچر استفاده شده است و یک کنترل کننده ساده PID انتخاب شده و مقادیر صفر و قطب و بهره آنرا به گونه ای تنظیم گشته تا پاسخ پله مطلوبی در سیستم ایجاد شود. شکل ۱۱ پاسخ پله سیستم کنترل را نشان می دهد:



شکل ۱۱- پاسخ پله مدل ارائه شده در این مقاله

شکل ۱۰- سیستم کنترل حلقه بسته موتور DC



شکل ۱۲- پاسخ سیستم کنترل در نقطه تنظیم 10 rpm شکل ۱۳- پاسخ سیستم در 20 , 10 rpm

در نخست آزمایش سرعت مبنا روی مقدار 10 rpm تنظیم گشته و اثرات اغتشاش پالسی گشتاور بار بر سیستم، بررسی شده است. شکل ۱۲ نمودار سرعت خروجی در مقابل اثر این اغتشاشات است. همانگونه که از شکل پیداست سیستم در حذف این اغتشاشات به خوبی عمل می کند. آزمایش بعدی روی این سیستم تغییر نقطه کاری یا سرعت مبنا می باشد. نخست سیستم با سرعت 10 rpm راه اندازی شده و سپس نقطه کاری به 20 rpm تغییر می کند. در این حالت و با وجود تغییرات پالسی گشتاور بار همچنان سیستم در تنظیم سرعت خروجی، به خوبی عمل می نماید. خروجی این حالت در شکل ۱۳ رسم شده است. در مجموع از بررسی حالات مختلف، کارایی مدل ارائه شده در یک سیستم واقعی مطلوب می باشد و سرعت شبیه سازی سیستم و محاسبه پاسخ نیز بسیار سریع است. این نکته

از آنجا درخور توجه است که مدل ماشین DC موجود در نرم افزار Simulink را به دلیل کندی بیش از حد نمی توان در چنین سیستم واقعی بکار گرفت.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از امکانات S-Function نرم افزار Simulink و استفاده از معادلات حالت مدل جدیدی از موتور DC تحریک مستقل ارائه شد. این مدل از لحاظ دقت نتایج خروجی با مدل ماشین DC نرم افزار Simulink برابری می کند و از لحاظ سرعت شبیه سازی به مدل موجود در نرم افزار، برتری کامل دارد. همچنین ذکر این نکته ضروری است که مدل موجود در نرم افزار در بسیاری موارد، خصوصاً با افزایش گشتاور بار قادر به شبیه سازی نیست. که این موضوع ناشی از بکارگیری توابع تبدیل در ساختار آن مدل است. همچنین در مدل نرم افزار، منحنی مغناطیسی ماشین، خطی در نظر گرفته شده است. مدل این مقاله منحنی مغناطیسی را به صورت واقعی و همراه با اثرات اشباع در نظر گرفته است که برتری دیگر مدل ارائه شده به مدل موجود در نرم افزار Simulink است. همچنین جهت نشان دادن کارایی، مدل در یک سیستم کنترل سرعت، مورد استفاده قرار گرفته و نتایج حاصله، قابلیت مدل ارائه شده را در بکارگیری در پروژه های واقعی نشان می دهد. در رابطه با ساختار سیستم کنترل ارائه شده نیز باید گفت که این روش ساده ترین و ابتدایی ترین روش ممکن برای کنترل سرعت است که در آن از فیدبک سرعت و کنترل کننده PID استفاده شده است؛ هرچند که دقت و کارایی این روش در محدوده وسیعی قابل توجه است ولی روش های بهتر و سریع تری برای این منظور وجود دارد که از جمله آنها حلقه قفل فاز (PLL) و کنترل میکرو کامپیوتری می باشد.

۷- مراجع

- [۱] فیتز جرال و کینگسلی و اومنس، ماشین های الکتریکی، مترجم کوروش انصاری، نشر نما، مشهد، ۱۳۷۳،
- [۲] کو. بنجامین، سیستم های کنترل، مترجم علی کافی، مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۷۶،
- [۳] رشید. محمد هارون، الکترونیک قدرت، مدارها عناصر کاربردها، مترجم ابراهیم افجه ای، مجید مهاجر انتشارات نو پردازان، تهران، ۱۳۸۰،
- [۴] فکوریتا. علی، خودآموز سیمولینک و شبیه سازی به کمک MATLAB، انتشارات پرتو نگار، مشهد، ۱۳۷۸،
- [۵] مختاری. موهند و ماری. میشل، کاربردهای MATLAB و Simulink در مهندسی، مترجم وحید صمدی بخارایی. انتشارات خراسان، مشهد، ۱۳۸۰