

به نام خدا

ارائه یک مدل کامل برای شبیه سازی ماشین های DC در $PSPICE$

گردآوری

محمد رضا یوسفی نجف آبادی^۱، احمد رضا صالحی مورکانی^۲
دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد^۱، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر^۳

کلمات کلیدی

مدل کامپیوتری، شبیه سازی ماشین dc

چکیده

در این مقاله یک مدل کامپیوتری چهار سطحی برای شبیه سازی ماشین dc با استفاده از $Pspice$ پیشنهاد گردیده است. این مدل پیچیده، اشباع مغناطیسی، عکس العمل آرمیچر، پارامترهای سیم پیچی ماشین وابسته به جریان و اثرات جریانهای گردابی را مورد نظر قرار داده است. این مدل ها، امکان شبیه سازی مشخصه های استاتیکی و دینامیکی یک سیستم درایو با موتور dc را به طور مناسب و دقیق ارائه می دهند.



ماشین‌های dc به طور معمول در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند کنترل و اعمال نیرو به علت کنترل نسبتاً ساده آنها، مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل کامپیوتری برای آرمیچر یک موتور dc ، به صورت یک سلف و مقاومت ثابت به اضافه ولتاژ القایی متناسب با جریان میدان و سرعت روتور می‌باشد [۱]. برای تحقیق و بررسی روابط استاتیکی و دینامیکی یک سیستم درایو موتور dc واقعی، این مدل ساده و نامناسب است زیرا پدیده‌هایی مانند اشباع مغناطیسی، عکس‌العمل میدان آرمیچر و اثرات جریان گردابی را مورد ملاحظه قرار نمی‌دهد. معمولاً میدان ماشین نزدیک ناحیه اشباع خود عمل می‌کند و انتقال نقطه عملکرد به ناحیه اشباع هنگامی که گشتاور بیش از گشتاور نامی مورد نیاز باشد، بسیار آسان است. عکس‌العمل آرمیچر نیز یک پدیده مهم در خلال به حرکت درآوردن بارهای سنگین می‌باشد. همچنین یک یکسوساز یا درایو چار جریان پالسی برای ماشین ایجاد می‌کند که باعث تلفات مسی در سیم پیچ‌ها، تلفات فوکو و هیستریزیس شده و از این رو راندمان موتور را کاهش می‌دهد. مدل‌هایی از ماشین dc برای استفاده در آنالیزها و شبیه‌سازی‌های سیستم درایو ارائه شده‌اند. [۳]، [۲]. از نظر نویسندگان این مقاله، اغلب آنها با آنالیز ریاضی تشریح شده‌اند، چه با استفاده از معادلات دیفرانسیل [۳] و چه با استفاده از تبدیل لاپلاس [۴]. عیب این گونه رویکردها آن است که مدل‌های ریاضی گونه نمی‌توانند به آسانی به مبدل‌های توان مرتبط شوند و طراحان به طور کلی مجبورند که فرض نمایند که بخش‌های الکترونیکی درایو از وسایل کلیدزنی ایده‌آل تشکیل شده است.

PSPICE یک مجموعه برای شبیه‌سازی مدارهای مختلف است که به طور گسترده مورد پذیرش واقع شده و به طور معمول مورد استفاده قرار می‌گیرد. تا کنون محققان، از آن برای شبیه‌سازی اجزا مورد استفاده در سیستم‌های قدرت استفاده‌های زیادی کرده‌اند [۷]، [۵] که امکان مدل‌کردن اجزاء الکترونیکی و درایو آن را نیز در *PSPICE* بدون هیچگونه مشکلی به طراحان داده است. برای توسعه مدل‌های ماشین dc در *PSPICE* بایستی قابلیت‌های آن را وسیعتر نمود به طوریکه سیستم‌های کامل درایو ژنراتور / موتور را نیز شامل گردد. این امر امکان بررسی و مطالعه کل سیستم درایو را تنها در یک شبیه‌سازی بدون فرض‌های ویژه و عملیات پیچیده ریاضی به طراح می‌دهد که این مسئله باعث می‌شود کار طراحی درایو آسانتر و عملی‌تر صورت گیرد.

در این مقاله یک مدل کامپیوتری چهار سطحی برای شبیه‌سازی ماشین dc با استفاده از *PSPICE* برای شبیه‌سازی ارائه گردیده است. سطح صفر مدل معمول شبیه‌سازی، سطح ۱ در این مدل با تاثیر اشباع

مغناطیس، عکس‌العمل آرمیچر و اثرات جریان گردابی ماشین و سطح ۲، اثر اشباع ماشین و پدیده عکس‌العمل آرمیچر را مورد نظر قرار می‌دهد. سطح ۳ هر دو پدیده بالا و نیز تلفات سرگردان ماشین و پارامترهای مدار سیم‌پیچی وابسته به جریان را شبیه‌سازی می‌نماید.

۲. توسعه مدل‌های شبیه‌سازی

۲-۱. مدل سطح صفر

برای یک مدل ماشین dc ایده‌آل مورد استفاده قرار می‌گیرد و با معادلات زیر بیان می‌شود :

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + k_m i_f \omega_m \quad (1)$$

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (2)$$

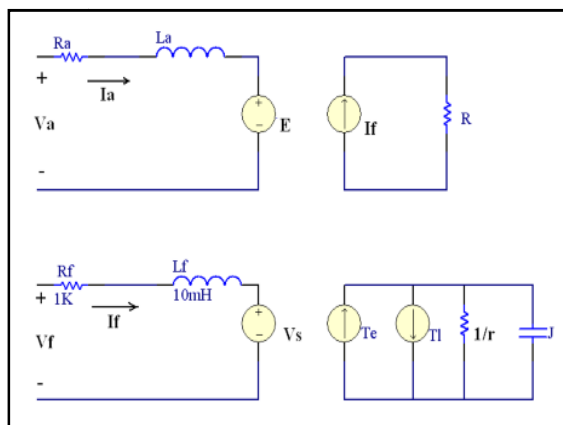
$$J \frac{d\omega_m}{dt} + f \omega_m + T_L = k_m i_f i_a \quad (3)$$

که در این معادلات V_a ، V_f به ترتیب ولتاژ القایی آرمیچر و میدان استاتور می‌باشند و R_a مقاومت آرمیچر و مقاومت میدان استاتور، T_L گشتاور بار، ω_m سرعت زاویه‌ای یا چرخشی ماشین، f ضریب اصطکاک شافت، J اینرسی چرخشی و k_m ولتاژ القایی ثابت می‌باشند. در اینجا سیم‌پیچی تحریک میدان می‌تواند به صورت سیم‌پیچی سری یا موازی باشد.

همه اجزاء مدار می‌توانند به آسانی توسط *PSPICE* مدلسازی شوند (شکل ۱) و همه پارامترهای این مدل می‌توانند توسط آزمایشات ساده یا اندازه‌گیری مستقیم بدست آیند. این مدل همه اثرات غیرخطی را نادیده می‌گیرد و با فرض اینکه ماشین در حال کار در شرایط بار سبک قرار دارد می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. به طور کلی می‌توان گفت دقیق بوده و برای طراحی سطح اولیه، مدلی مناسب و مفید می‌باشد.

۲-۲. مدل سطح ۱

این مدل شبیه سازی را برای ماشین در حال کار نزدیک به بار نامی می توان استفاده کرد. مدل بالا کاملاً صحیح نیست ، زیرا مدار مغناطیسی خطی نیست در صورتیکه در مدل سطح صفر مدار مغناطیسی فرض شده خطی می باشد. دو روش برای شبیه سازی اشباع میدان وجود دارد.



شکل ۱: سطح صفر مدل *pspice* در ماشینهای DC

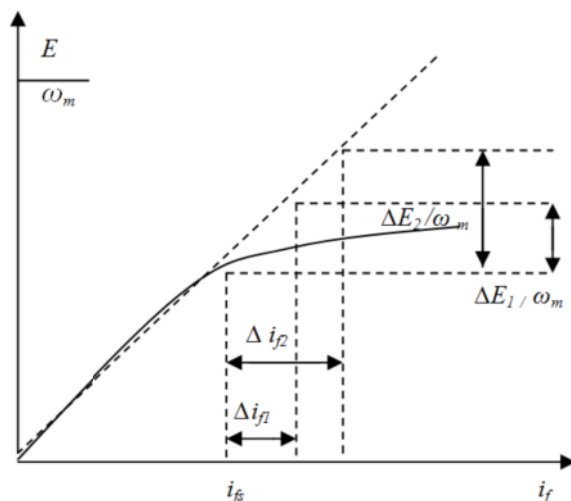
۲-۲-۱. روش ۱

منحنی اختلاف ولتاژ نسبت به میدان تحریک تحت شرایط بی باری می تواند به صورت پاره خطی توسط دو خط با شیب های مختلف در آید (شکل ۲) که معادلات آن به صورت زیر نوشته می شود :

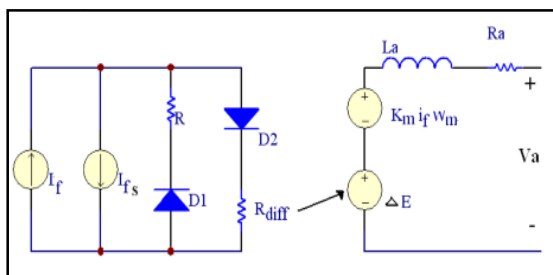
$$\Delta E = 0 \quad \text{while } i_f \leq i_{fs}$$

$$\frac{\Delta E_2}{\Delta i_{f1}} = \frac{\Delta E_2}{\Delta i_{f2}} = R_{diff} \quad \text{while } i_f > i_{fs}$$

برای اجرای این معادله در *PSpice* یک مدار کلیدزنی (سوئیچینگ) برای انتقال منحنی های عملکرد ماشین از حالت خطی به ناحیه اشباع و برعکس، مورد نیاز است. یک مدار کلیدزنی قابل استفاده در *PSpice* در شکل (۳) ارائه شده است. ΔE میزان کاهش اختلاف ولتاژ ناشی از اشباع میدان بوده و با افت ولتاژ در راستای R_{diff} متناسب است. در این مدار وقتی $i_f < i_{fs}$ باشد ، دیود $D2$ به طور معکوس بایاس شده و $\Delta E = 0$ خواهد بود. وقتی $i_f > i_{fs}$ دیود $D2$ به طور مستقیم بایاس شده و $\Delta E \propto \Delta i_f$ خواهد بود.



شکل (۲) منحنی اشباع مغناطیس هسته



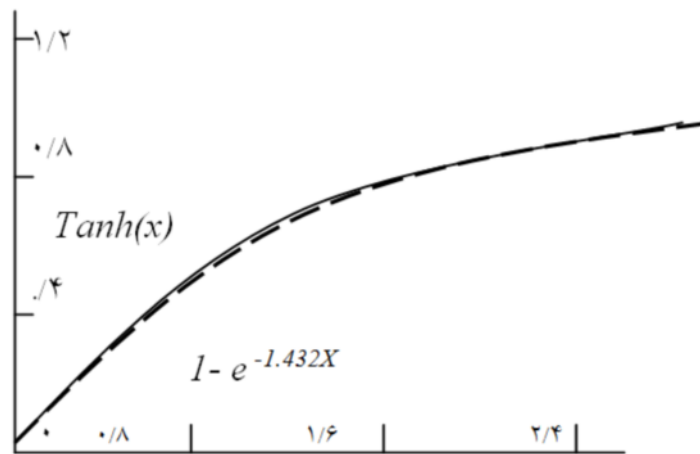
شکل ۳: مدار سوچینگ قابل شبیه سازی در *pspice*

۲-۳. روش ۲

از یک دیدگاه ریاضی گونه، وابستگی اختلاف ولتاژ ماشین و جریان میدان می تواند به خوبی توسط رابطه زیر تقریب زده شود :

$$E = C1. \tan h (C2 . I_f) + C3 . I_f + C4 \quad (5)$$

PSpice تابع تانژانت هیپربولیک را پشتیبانی نمی کند. اما این تابع می تواند با استفاده از یک تابع نمایی (که دارای مشخصه های یک دیود به طور معکوس بایاس شده) تقریب زده شود. شکل (۴) شباهت بین این دو تابع را نشان می دهد.



شکل (۴) تقریب میان $\tanh(x)$ و $1 - e^{-1.432X}$

مشخصه‌های دیود PSpice توسط یک منبع جریان غیرخطی I_d ، مدل‌سازی شده است. مقدار منفی I_D که برابر I_d است توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

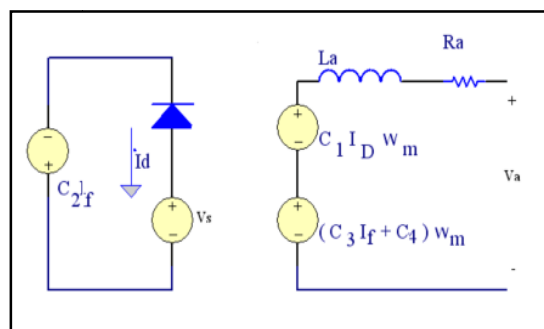
$$-I_D = I_d = I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{V_d}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (۶)$$

$$V_T = kT/q \quad (۷)$$

k ثابت بولتزمن است، T درجه حرارت مطلق در درجه k و q بار الکتریکی می‌باشد. V_T در حدود mv و $25/85$ در درجه حرارت اتاق است. V_d ولتاژ بایاس مستقیم دیود و I_d جریان مستقیم در دیود می‌باشد اگر $n=1$ و $I_s=1$ قرار دهیم، معادله به صورت زیر در می‌آید:

$$I_D = -1 = -\exp(1/432 \cdot V_d) \quad (۸)$$

در این معادله تابع تانژانت دارای شکل هندسی غیر خطی در ناحیه مورد نظر (وقتی $V_d < 0$)، تطبیق دارد. آنگاه منحنی اشباع ماشین می‌تواند توسط مدار شکل (۵) مدل‌سازی شود. که در آن یک سنسور جریان برای I_D می‌باشد.



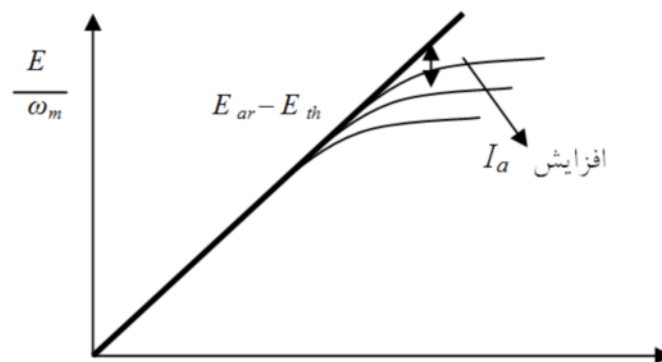
شکل (۵) مدل سطح یک ماشین DC با تاثیر اشباع

۲-۴. مدل سطح ۲

در این نوع ماشین با نزدیک شدن جریان ماشین به مقدار نامی، عکس‌العمل آرمیچر از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد. دو روش برای شبیه‌سازی این اثر ارائه خواهد شد.

۲-۴-۱. روش ۱:

منحنی $E-I_f$ نتایج و اثرات مختلف جریان و عکس‌العمل ماشین DC را نشان می‌دهد. شکل (۶) [۸] در استفاده از منحنی یک کاهش موثر در شار را با افزایش I_a (جریان آرمیچر) نشان می‌دهند.



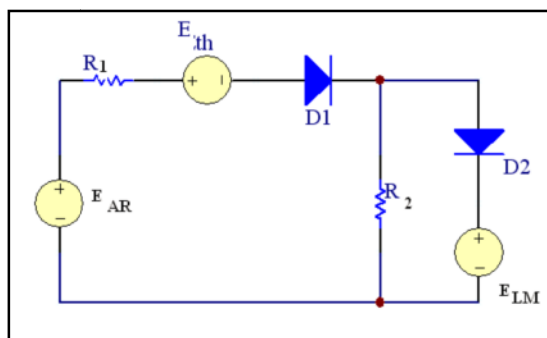
شکل (۶) نتایج و اثرات و عکس‌العمل آرمیچر ماشین DC

E_{th} ولتاژ آستانه است که در آن اثرات عکس‌العمل آرمیچر آغاز می‌گردد و می‌تواند از طریق اطلاعات ارائه شده سازنده یا توسط انجام آزمایشات ساده تعیین شود.

اثر افت ولتاژ و عکس‌العمل آرمیچر، توسط یک منبع ولتاژ وابسته EAR مدل‌های شبیه‌سازی شده و به وسیله جریان میدان I_f و جریان آرمیچر I_a کنترل می‌شود (شکل ۷) که طبق معادله زیر بیان می‌شود.

$$EAR = C5 I_u + C6 I_f \quad (9)$$

ELM و $D2$ ، افت ولتاژ و عکس‌العمل آرمیچر را محدود می‌سازد. (گروه ۴ تا ۱۰). تا اثر مغناطیس‌زدایی به صورت نا محدود با I_a افزایش نیابد.



شکل (۷) افت ولتاژ و عکس العمل آرمیچر در مدل های شبیه سازی

۲-۴-۲. روش ۲

برای ترکیب کردن اثرات اشباع میدان و عکس العمل آرمیچر، میدان مغناطیس ماشین به صورت وابسته به اشباع غیریکنواخت قطب استاتور ساخته شده است. جریان القایی میدان ماشین می تواند از معادله زیر وقتی عکس العمل آرمیچر مورد نظر قرار گرفته باشد، بدست آید:

$$k_m \phi_{eff} = \frac{N_f}{2\hbar_u} \int_{I_f - \hbar_a / N_f}^{I_f - \hbar_a / N_f} (C_1 \cdot \tanh(C_2 \cdot I) \quad (10)$$

$$+ C_3 \cdot I + C_4) dI$$

$$\tau_a = \frac{I_a Z b_p}{2a \pi D} \quad (11)$$

که در آن a تعداد مسیرهای جریان آرمیچر، b_p عرض کفشک قطب، D قطر آرمیچر، τ_a تعداد هادیهای سیم پیچ آرمیچر، Z تعداد رساناهای سیم پیچ آرمیچر، N_f تعداد دورهای میدان در فاصله بین $I_f - Fa/N_f$ و I_f ، عکس العمل آرمیچر به اندازه کافی برای به اشباع رساندن مقدار آهن، قوی نیست و وضعیت آن می تواند به صورت خطی فرض شود. شار متوسط مؤثر در این ناحیه با توجه به جریان میدان به صورت زیر خواهد بود:

$$I_{fe} = I_f - (\tau_a / 2N_f) \quad (12)$$

در ناحیه بین I_f ، $I_f + Fa/N_f$ عکس العمل آرمیچر، مقدار آهن را اشباع می کند به ویژه در سر قطب پیشرو (موتور) یا در سر قطب دنبال کننده (ژنراتور). اثر مغناطیس زدایی عکس العمل آرمیچر در طول کفشک قطب متغیر است. اگر این ناحیه به n جزئی خطی تقسیم شود، جزء شار متوسط که شامل عکس العمل آرمیچر برای این ناحیه می شود به صورت زیر است:

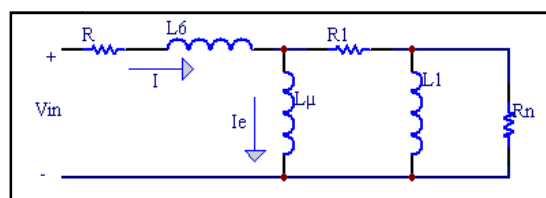
$$k_m \phi_{eff2} = \frac{1}{2n} \sum_{k=1}^n C_1 \cdot \tanh(C_2 \cdot (I_f + \frac{(k-1)\Im_a}{nN_f})) + \tanh(C_2 \cdot (I_f + \frac{k\Im_a}{nN_f})) + C_3 \cdot (2I_f + \frac{(2k-1)\Im_a}{nN_f}) + 2 \cdot C_4 \quad (13)$$

$$k_m \phi_{eff} = (k_m \phi(I_{feff1}) + k_m \phi_{eff2}) / 2 \quad (14)$$

برای اهداف عملی، تقسیم منحنی اشباع غیر خطی پس از نقطه زانو به سه تا شش بخش خطی، دقت کافی را فراهم خواهد آورد. برای دستیابی به نتایج رضایتبخش شبیه سازی برای اغلب ماشین ها با قراردادن $n = 3$ می تواند استفاده گردد. هر بخش در این مدل می تواند توسط یک مدار فرعی مشخص شود. (Subckt) در PSPICE مرتبط ساختن این مدارهای فرعی با هم مدل مربوطه به دست می آید.

۲-۵. مدل سطح ۳

پارامترهای ماشین DC به عنوان تابعی از فرکانس و درجه اشباع مغناطیسی در عمل (جایی که موتور کنترل شده توسط موتور تغییر داده شده است) ضروری می باشند. یک مدل نسبتاً با جزئیات بیشتر توسط بلاسکو برای یک موتور سری dc کنترل شده توسط چاپر ایجاد شد. ([۳] در ۱۹۸۵) در این مدل یک شبکه معادل که می تواند تلفات مخلوط جریان گردابی و پدیده تأخیر گشتاور را شبیه سازی نماید، آمده است. (شکل ۹) و [۳]/[۹]



شکل (۹) شبکه معادل سیم پیچ ماشین dc برای نتیجه و اثر جریان گردابی

وابستگی پارامتر x (یا R یا L) مدار سیم پیچ معادل بر روی خط جریان I توسط رابطه زیر مشخص می شود.

$$X(I) = S_1 \cdot \cos^{-1}(S_2 I) + S_3 \quad (15)$$

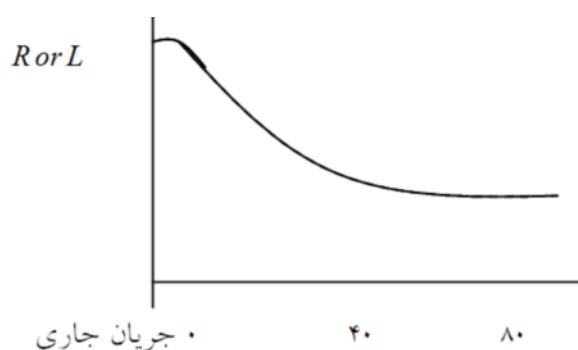
که در آن $S1$ ، $S2$ و $S3$ توسط روش حداقل ترکیبات تعیین می گردند، منحنی وابسته L یا R به جریان I در شکل (a) نشان داده شده است. در مقاله بلاسکو، آزمایشات تشخیص بر روی یک سیستم چاپر انجام پذیرفته است. مدل مربوط دقت بهتر از پنج درصد برای جریان آرمیچر، سرعت، زمان استارتینگ

واثر فرکانس چاپر را می دهد اما عیبی دارد که به خاطر آن طراح مجبور است مجموعه ای از معادلات دیفرانسیل غیرخطی را مورد بررسی و تحلیل قرار دهد. مدل dc سطح ۳ برای یکپارچه شدن با مدل بلاسکو ایجاد گردید به گونه ای که برای شبیه سازی $PSPICE$ مورد استفاده قرار بگیرد.

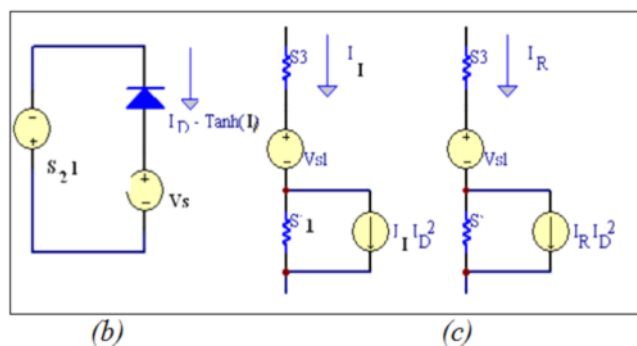
عبارت $cosh(x)$ در معادله (۱۵) می تواند با عبارت $tanh(x)$ با استفاده از رابطه زیر جایگزین شود:

$$1 - cosh^{-1}(x) = tanh^{-1}(x) \quad (16)$$

که در آن $tanh(x)$ می تواند با جریان یک دیود به طور معکوس بایاس شده شبیه سازی شود که در پاسخ به ولتاژ القایی موجود در قسمت بالا، ارائه شده است.



(a)



(b)

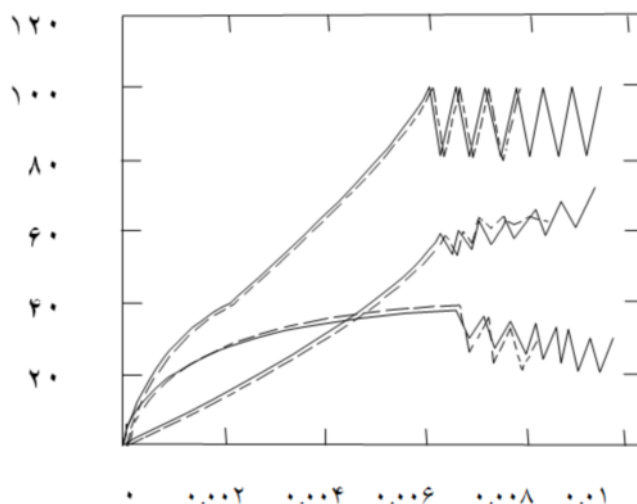
(c)

شکل (۱۰): $a-10$ جریان مربوط به مؤلفه های مدار سیم پیچ، $b-10$ مدلی برای شبیه

سازی Li ، $c-10$ مدلی برای شبیه سازی Ri

وقتی L متغیر است، Li می تواند با تغییر مناسب L یا با ثابت نگه داشتن L و تغییر I تحت مقداری مناسب شبیه سازی شود. این امر یک جایگزین بسیار مناسب در شبیه سازی $PSPICE$ بوده و می تواند توسط مدار نمایش داده شود. (شکل (b) ۱۰) روش مشابه نیز می تواند برای شبیه سازی Ri که در آن R متغیر است. مورد استفاده قرار گیرد. (شکل (c) ۱۰) Vs ، Vsr و Vsl در آن، سنسورهای جریان هستند.

به عنوان یک بررسی، اقدام به تکرار یکی از شبیه سازی های بلاسکو صورت گرفته، به همراه برخی از شبیه سازی اصلی او که با خطوط منقطع است، نشان داده شده است. (شکل ۱۱)

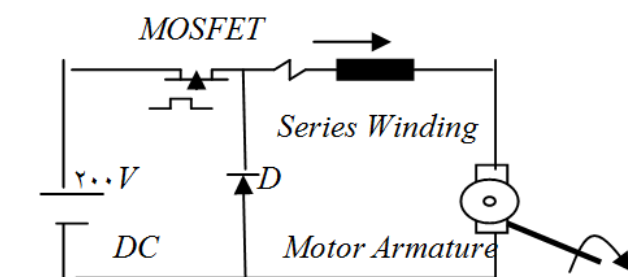


شکل (۱۱) تطبیق شبیه سازی بانایج بلاسکو

مقاله بلاسکو، مقدار همه پارامترهای او را نمی دهد و برخی از مقادیر حدس زده شده اند. با این وجود توافقهایی بسیار خوبی مشاهده شده که نشان می داد *PSPICE* می تواند برای اتوماتیک کردن را محل مدل های پیچیده ماشین که شامل معادلات دیفرانسیل غیر خطی هستند مورد استفاده قرار گیرد.

۳. شبیه سازی های موتور

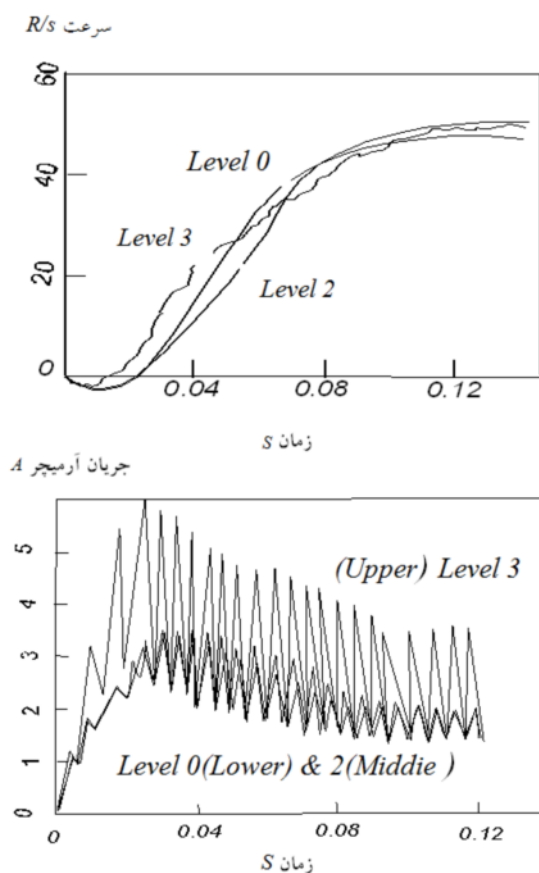
مدل های موتور که قبلاً شرح داده شدند برای شبیه سازی نرم افزاری حالات گذاری یک سیستم درایو چاپر *MOSFET* نمونه با استفاده از یک موتور متصل شده به صورت *dc*، استفاده شده اند. دیاگرام مدار و فهرست ورودی نمونه *PSPICE* به ترتیب در (شکل ۱۲) و [۱۰] نشان داده شده است.



شکل (۱۲) سیستم موتور *dc* متحرک چاپر از نوع *MOSFET*

پارامترهای مربوط به موتور شبیه سازی شده نیز در ضمیمه فهرست شده است. سه شبیه سازی از گشتاور بار کامل سیگنال راه اندازی با استفاده از سه مدل سطوح مختلف انجام گردید. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که تفاوت چشمگیری در عکس العمل ناپایدار بین مدل سطح ۳ و بقیه مدل ها وجود دارد. از این رو اگر شبیه سازی کامپیوتری دقیقی مورد نیاز باشد مدل ماشین غیر خطی، سطح ۳، بایستی مورد استفاده قرار گیرد. کل زمان کار برای سه شبیه سازی ثبت شده و در جدول به عنوان مرجع آمده است. نکته: زمان مربوطه شامل خواندن اطلاعات، مکان یابی مجموعه *PSpice*، نوشتن داده ها و نمایش نهایی بر روی سیستم می باشد.

تفاوت زیاد زمان مورد استفاده کامپیوتر بین مدل سطح ۳ و سایر مدل ها به خاطر پیچیدگی مدل نیست بلکه به علت جریان نواری زیاد آرمیچر است (شکل ۱۳). جریان گذرای زیاد *PSpice* را مجبور می سازد تا در کمترین زمان ممکن، تکرارهای بیشتری را به منظور دریافت خروجی دقیق شبیه سازی انجام دهد.



شکل (۱۳) نتایج شبیه سازی سیستم موتور dc متحرک

جدول (۱) شبیه سازی

سطح ۳	سطح ۲	سطح صفر
s۵۱/۹۹۲	s۷۳/۲۶۳	s۴۹/۱۰۸

۳. نتیجه گیری

در این مقاله، یک مدل کامپیوتری چهار سطحی ماشین dc با استفاده از $PSPICE$ برای شبیه سازی، ارائه شده است. این مدل ها اشباع مغناطیسی میدان ماشین، پدیده عکس العمل آرمیچر، پارامترهای مدار سیم پیچی وابسته به جریان و اثرات اتلافی جریان های گردابی را مورد نظر قرار می دهند. این مدل ها به این منظور ایجاد شده اند که امکان شبیه سازی مشخصه های استاتیک و دینامیک کل سیستم درایو کانورتر که شامل ماشین dc می شود را به طور بسیار ساده تر، عملی تر و مطمئن تر در یک بار شبیه سازی ارائه بدهند. برخی از شبیه سازی ها به منظور نشان دادن مزایای مدل های ماشین پیشنهادی $PSPICE$ مورد بررسی قرار گرفته اند.

۴. مراجع

- 1) J. Hindmarsh, *Electrical Machines and their Applications*. London: Pergamon. 1977, pp. 266-359.
- 2) H. B. Hamilton and E. Strangas, "Series motor parameter variations as a function of frequency and saturation," *IEEE Trans. Power App. Syst*, vol. PAS-99, no. 4, pp. 1567-1574, July / Aug. 1980.
- 3) V. Blasko, "A model of echopper-controlled DC series motor." *IEEE Trans. Ind. Appl.* vol. IA-21, no. 1, pp. 207-217, Jan / Feb. 1985.
- 4) S. N. Singh, D. R. Kohi, "Analysis and performance of a chopper controlled separately excited dc motor," *IEEE Trans. Ind. Electron. Vol. IE-29*, no. 1, pp. 1-6, Feb. 1982.
- 5) P. L. B. Teixeira. "Modelling of biopolar power transistors for CAD", *IEEE Catalog CH1529-7/80*. pp. 29-33, 1980.
- 6) H. A. Nienhaus, J. C. Bowers, "A high power MOSFET computer model." *IEEE Catalog CH1529-7/80*. pp. 79-103, 1980.
- 7) R. L. Avant, F. C. Lee. "A unified SCR model for continuous to pology CADA." *IEEE Trans. Ind. Electron. Vol. IE-31*, no. 4, pp. 352-361, Nov. 1984.

8) A. E. Flixgcrald. C. Kingsley. And S. D. Umans. *Electric Machinery*. New York: McGraw-Hill, 1983, pp. 217-218.

9) J. S. Ewing. "Lumped circuit impedance representation for dc machines. "IEEE Trans. Power App. Stys. Vol. PAS-87, no. 4, pp. 1106-1110, Apr. 1968.

موتور آزمایشی dc تحریک شده سری

$200V, 1/4A, 1200r/min, R_a=16/105\Omega$,

$L_a = 0.4549, R_s = 4/399\Omega, L_s = 0/0423H$,

$B = 0/00083nm/rad/s, j = 0/00286KgM$,

$k_m = 0/66$ (unsaturated).

chopper

period = 5 ms, input voltage = 200 V,

Duty cycle = 0/5