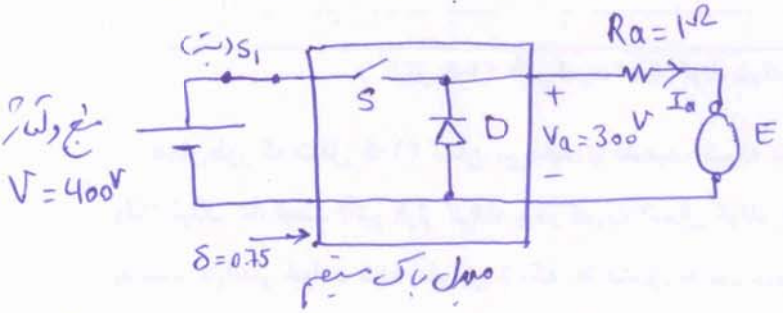
توضیحات تکمیلی در مورد ترمز موتوری DC به روش بازیاب انرژی (یا ترمز رژنراتوری):

۱- همانطور که در درس اشاره شد، جهت حرکت جریان در روش بازیاب انرژی، ترمز رژنراتوری بهترین روش است که در این روش منبع ولتاژ داخلی پشت (E) توان را به منبع تغذیه (V) برمی‌گرداند. منتهی با توجه به اینکه جریان از پتانسیل پایین‌تر (E) نمی‌تواند به پتانسیل بالاتر (V) برود، از یک مبدل DC/DC نوع بوست استفاده می‌شود که در ادامه با ذکر یک مثال عددی توضیح داده می‌شود.

۲- فرض کنید یک موتور DC تحریک مستقل داریم که به منبع ولتاژ 400^V متصل است و از طریق یک مبدل باک در جهت مستقیم (جهت انتقال توان از منبع به موتور را جهت مستقیم فرض نمایید) تغذیه می‌شود



شکل ۱

فرض کنید موتور در سرعت 1000^{rpm} مرجع و ثابت و ولتاژ ضد محرکه هم مقدارش $0.28^{V/rpm}$ است و همچنین دوره عملکرد مبدل هم 0.75 است. لذا

ولتاژ آرمیچر $V_a = \delta V = 0.75 \times 400 = 300^V$

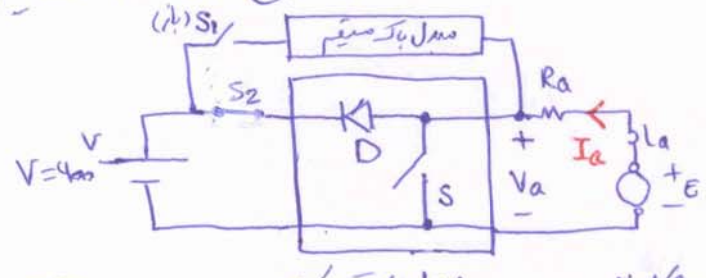
(دقت کنید بار موتور را هم گشتاور ثابت فرض کنید)

$$E = K\omega = 0.28^{V/rpm} \times 1000^{rpm} = 280V$$

پس ولتاژ آرمیچر $V_a = 300^V$، ولتاژ ضد محرکه یا داخلی موتور 280^V است و جریان موتور می‌شود:

$$I_a = \frac{V_a - E}{R_a} = \frac{300 - 280}{1} = 20A$$

۳- حال فرض کنید می‌خواهیم همین موتور، ترمز رژنراتوری شود. خوب چون $V_a < E$ است، لذا جریان نمی‌تواند امکانش وجود ندارد. باید کاری کنیم که $V_a > E$ شود. برای این منظور به موازات مبدل باک مستقیم یک مبدل بوست معکوس (که توان را از موتور یا ماشین به منبع جایی می‌کند) قرار می‌دهیم



شکل ۲

(دقت نمایید که در هر لحظه از زمان یا مبدل باک کار می‌کند و یا بوست معکوس که راهی صورت گشتاور یک دوسوئیچ از S_2 و D_2 را گذاشته‌ایم تا مسئله حل شده شود)

صفحه ۱

- حال سئوال این است که دوره عملکرد مبدل پولت معکوس چقدر باشد تا ترمز نشود؟

در لحظه ابتدای ترمز که هنوز سرعت کم نشده است، $E = 280^V$ است ولذا باید V_a مقداری شود تا ضمن کوچکتر شدن از 280^V، سبب جاری شدن جریان معکوس در جهت نشان داده شده در شکل ۲ شود. فرض کنید جریان نامی موتور همان مقدار 20^A است. لذا خواهیم داشت:

$$V_a = E + R_a I_a = 280 + 1 \times (-20) = 260^V \quad \left(\text{یا } V_a = E - R_a I_a = 280 - 1 \times 20 = 260^V\right)$$

لذا دوره عملکرد مبدل پولت معکوس باید طوری انتخاب شود که ولتاژ $V_a = 260^V$ را به 400^V منبع تبدیل کند. با توجه به روابط اثبات شده برای مبدل پولت معکوس.

$$V_a = \delta V \Rightarrow 260 = \delta \times 400 \Rightarrow \delta = 0.65$$

دقت نمایید که در مبدل پولت معکوس با تعریفی که ما ضمن درس از دوره عملکرد δ کردیم:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{\delta} \Rightarrow V_{in} = \delta V_{out} \qquad (0 < \delta < 1)$$

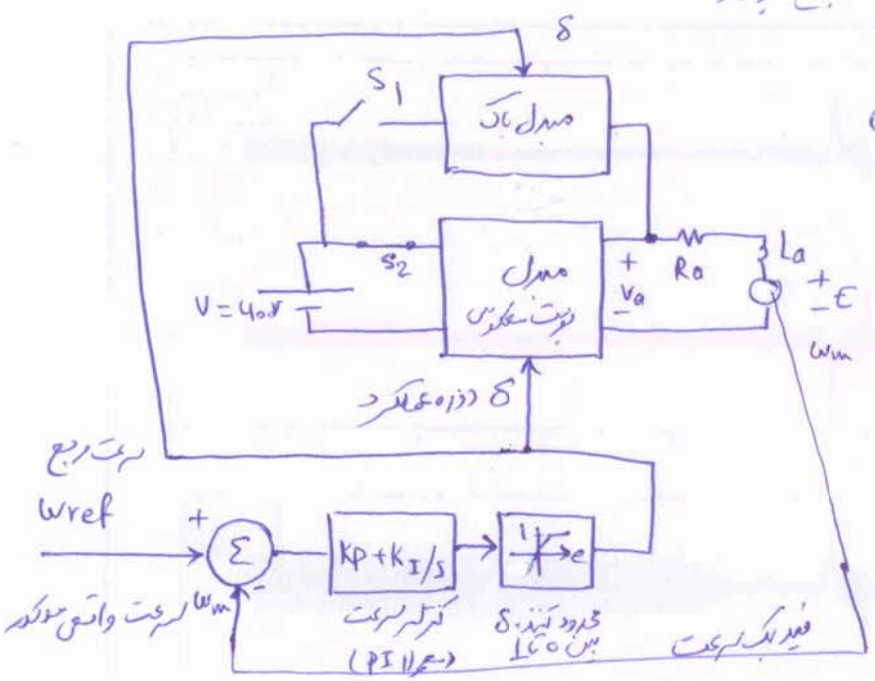
که اینجا $V_{in} = V_a$ است، $V_{out} = V$

- با این کار توان جنبشی موتور به توان الکتریکی تبدیل و از طریق مبدل پولت معکوس به منبع V رفته و در آنجا ذخیره می‌شود. با انتقال توان، رفته رفته سرعت موتور کم می‌شود و به تبع آن مقدار ولتاژ E کاهش می‌یابد. با کاهش ولتاژ E، جریان موتور هم کاهش می‌یابد تا جایکه شفت در سرعت 928.57^{rpm} که ولتاژ E به مقدار 260^V یعنی مقدار ولتاژ V_a می‌رسد، دیگر امکان ترمز و جود نخواهد داشت.

برای تداوم ترمزی باید جریان در جهت E به V_a تداوم داشته باشد. کاری که باید انجام داد این است که دوره عملکرد δ مبدل پولت معکوس را لحظه‌ای تغییر داد (یعنی کاهش داد) تا بازهم I_a سعی جاری شود. حال سئوال این است که مقدار δ جدید چقدر قرار داده شود. مسلم است که اگر δ مقدار ثابتی قرار داده شود با کاهش سرعت و E جریان بازهم کاهش می‌یابد و بازهم δ باید کم شود.

- در عمل کاری که انجام می‌شود این است که بصورت پیوسته مقدار δ همزمان با کاهش سرعت کاهش می‌یابد به نحوی که جریان I_a همواره در مقدار حداکثر خود یعنی 20^A - باشد تا حداکثر گشتاور ترمزی مجاز اعمال شود. این کار توسط یک سیستم کنترل حلقه بسته انجام می‌شود.

- بلوک دیاگرام زیر سیستم کنترل حلقه بسته را نشان می‌دهد که در آن کاهش ولتاژ تا سرعت دلخواهی که مرجع موتور به آن برود را به عنوان سرعت مرجع قرار می‌دهیم و دوره عملکرد δ تغییرات پیوسته و یا کاهش سرعت تغییر می‌کند تا سرعت موتور به سرعت جدید برسد.



شکل ۳

- وقتی می‌خواهیم سیستم کنترل PI برای کنترل سرعت موتور dc بوستری و با استفاده از مدل باک هم به کار برود. البته در حالت عملکرد ترمزی، مدل باک توسط بازگشت سوئیچ S_1 کار می‌کند.

- فرض کنید موتور در سرعت 1000^{rpm} طبق مثال قبل مورد بحث بوده است و قرار است سرعت آن به دلیل ترمزگیری به 500^{rpm} کاهش یابد و در سرعت 400^{rpm} باقی بماند. بار ثابت است. چرخه تغییرات موتور چگونه است؟

- دوره عملکرد مدل باک در حالت موتوری در سرعت 1000^{rpm} را قبلاً گفتیم $\delta = 0.75$ است.

و با مثال قبل دیدیم که δ از 0.75 باید کم شود و مدل بوست کار کند تا جریان برگردد. توسط سیستم کنترل فرق δ بطور پیوسته کاهش می‌یابد تا سرعت به 500^{rpm} برسد. در سرعت 500^{rpm}:

$$E = 0.28 \times 500 = 140^{V} \quad , \quad I_a = -20^{A}$$

$$\Rightarrow V_a = E + R_a I_a = 140 + 1 \times (-20) = 120^{V}$$

$$\Rightarrow \text{دوره عملکرد مدل بوست } \delta = \frac{V_a}{V} = \frac{120}{400} = 0.3$$

- یعنی دوره عملکرد مدل بوست از مقدار 0.75 در ابتدای حالت ترمزی بصورت پیوسته تا مقدار 0.3 کاهش داده می‌شود تا سرعت موتور از 1000^{rpm} به 500^{rpm} برسد.

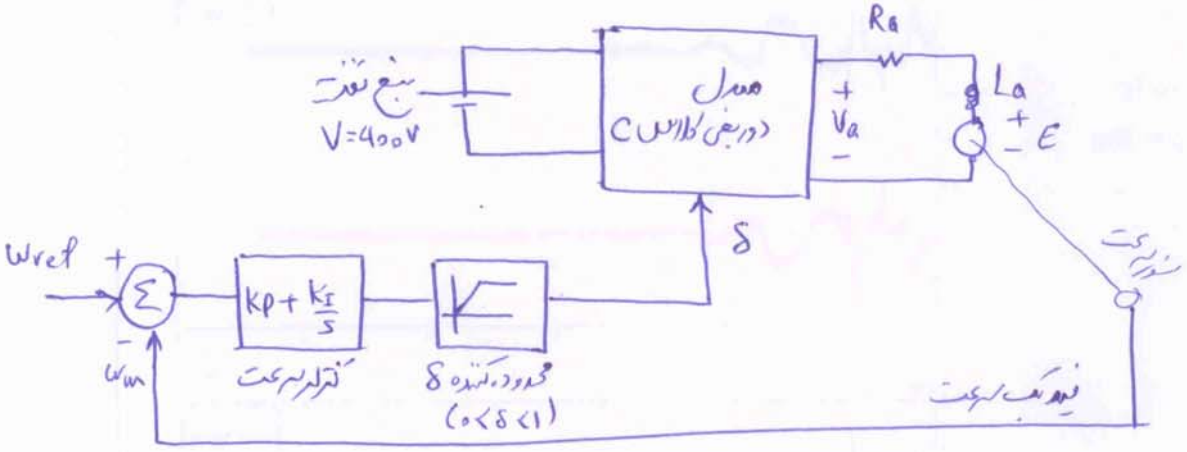
- به محض رسیدن سرعت به 500^{rpm}، کار مدل بوست تمام شده و برای ادامه کار موتور، مدل باک در مدار می‌آید و سوئیچ S_1 وصل و سوئیچ S_2 قطع می‌شود. دوره عملکرد δ باک به راحتی قابل محاسبه است: (فرض شده گشتاور ثابت است)

$$I_a = 20 \Rightarrow V_a = E + R_a I_a = 500 \times 0.28 + 1 \times 20 = 160\,V$$

$$\text{باک } \delta = \frac{V_a}{V} = \frac{160}{400} = 0.4$$

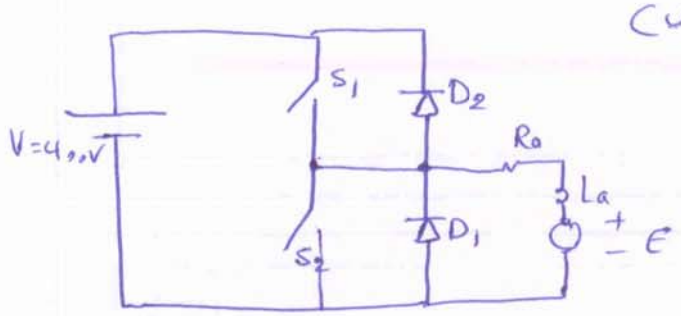
صفحه ۳

۴- ساختاری که در شکل ۳ ارائه شد یک ساختار معمولی برای عملکرد موتور در دو ناحیه ۱ و ۲ یعنی موتوری و ترمزی را تضمین می‌کند اما در عمل این دو مدل جداگانه و دو سوئیچ S_1 و S_2 برای وارد و خارج کردن دو مدل وجود ندارد. در عمل برای اینکار از مدل کلاس C که یک مدل دو ربعی است استفاده می‌شود و تم کنترل حلقه بسته همان است که در شکل ۳ نشان داده شده است و در شکل زیر آورده می‌شود. کلیدهای S_1 و S_2 هم در شکل‌های ۱ و ۲ در خود مدل کلاس C مستتر شده‌اند.



مدل کلاس C را هم در اسلایدهای فیلم و هم در پیوست ارسال شد. در گروه تلگرامی بصورت کامل تحلیل شد.

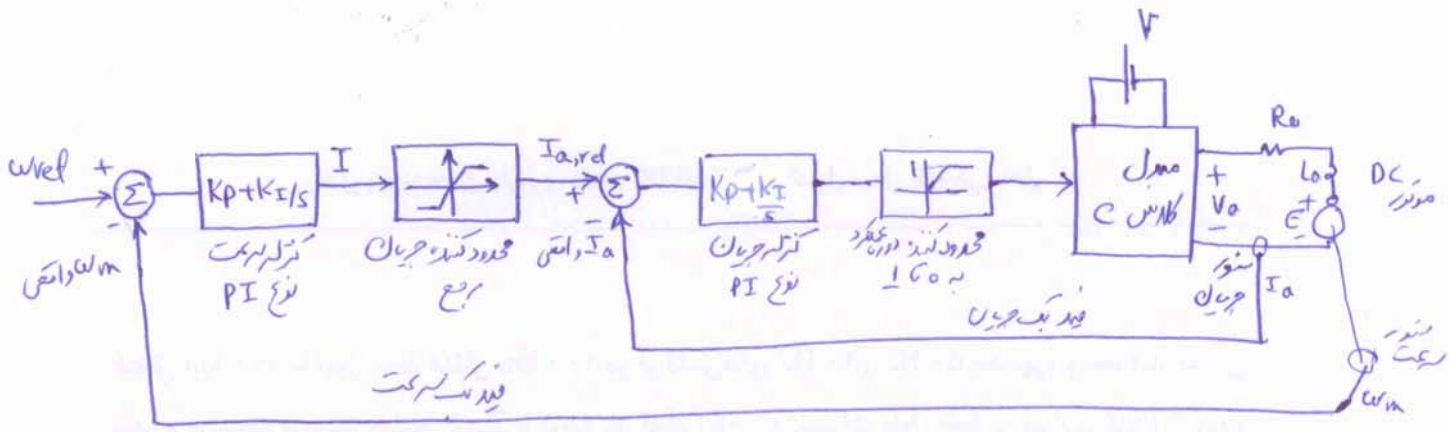
عملکرد هرکدام از سوئیچ‌ها و دیودها در مدل کلاس C با جزئیات در پیوست ارسال هستند که خواهشمند است به آنها مراجعه بفرمائید.



مدل دو ربعی کلاس C

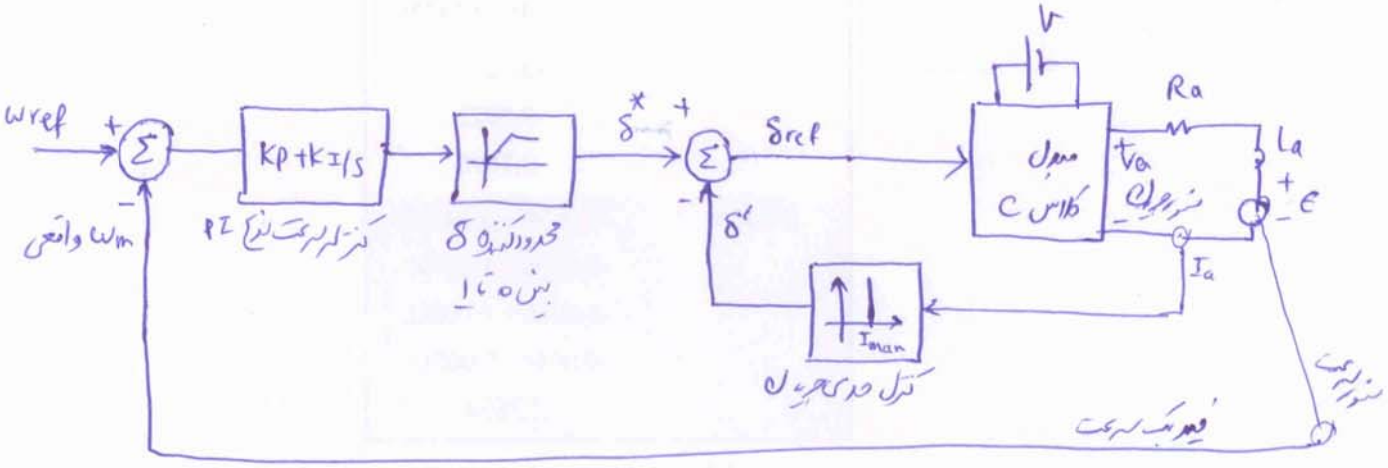
۵- نکته آخر اینکه در تم کنترل حلقه بسته فوق، حلقه کنترل جریان (چه بصورت حلقه کنترل داخلی یا بصورت ساده‌تر کنترل حدی) رسم نشده است که در تم‌های واقعی، حتما کنترل جریان هم هست.

برای آشنایی بیشتر شما، تم کنترل با حلقه جریان در صفحه بعد رسم شده است.



بلوک دیاگرام سیستم کنترل حلقه بسته سرعت با استفاده از کنترل جریان با حلقه داخلی و عملکرد دوربین (ربعهای ۱ و ۲)

توجه نمایید که در بلوک دیاگرام فوق، بجای کنترل جریان از نوع PI می‌توان از نوع ساده‌تر کنترل کننده جریان هیسترزیس استفاده نمود.



بلوک دیاگرام سیستم کنترل حلقه بسته سرعت موتور DC تحریک مستقل با استفاده از کنترل حدی جریان و عملکرد دو ربعی (ربعهای ۱ و ۲)

طرز عملکرد کنترل حدی فوق به اینصورت است که اگر جریان موتور از مقدار I_{max} بخواهد فراتر برود، کنترل حدی جریان سیگنال δ' بزرگ ایجاد می‌کند که مقدار δ^* سیستم کنترل سرعت را ضعیف نموده و در نهایتا δ_{ref} اعمالی به معدل کلاس C کاهش می‌یابد و در نتیجه ولتاژ V_a کم شده و جریان موتور کاهش می‌یابد.