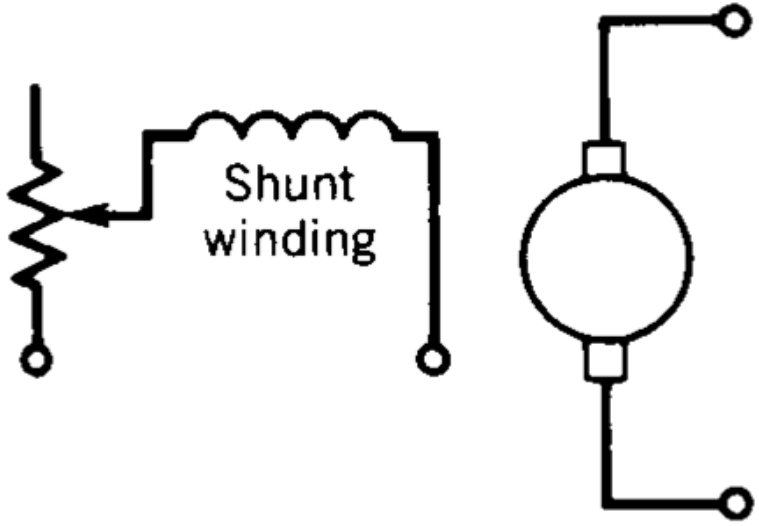
طبقه بندی ماشین های DC

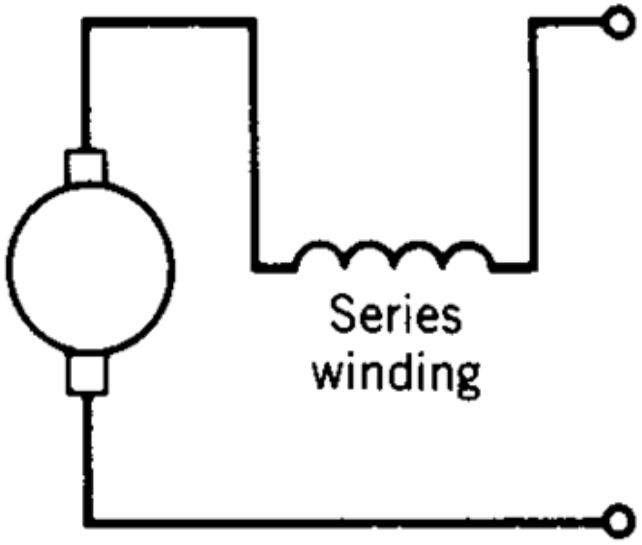
- مدار تحریک (سیم پیچ های میدان) و مدار آرمیچر را می توان بطرق گوناگون به یکدیگر مرتبط ساخت تا مشخصه های عملیاتی مختلفی پدید آید.
- قطب ها می توانند توسط دو سیم پیچی به نام سیم پیچی سری و سیم پیچی شنت (موازی) تحریک شوند
- تعداد حلقه های سیم پیچی شنت بسیار زیاد است و جریان این سیم پیچی بسیار کم می باشد. (حدود ۵ درصد جریان اسمی آرمیچر).
- معمولا در مدار تحریک شنت رئوستا قرار می دهند تا با این عمل بتوان جریان تحریک را کنترل نمود. با این کار mmf میدان قابل کنترل است. در برخی از ماشین های DC از آهن ربای دائم جهت ایجاد میدان استفاده می شود و در این حال تحریک دائما ثابت است.

در ماشین های DC **با تحریک جداگانه (تحریک مستقل)** ، سیم پیچی تحریک توسط منبع DC مستقل و جداگانه ای تغذیه می گردد .

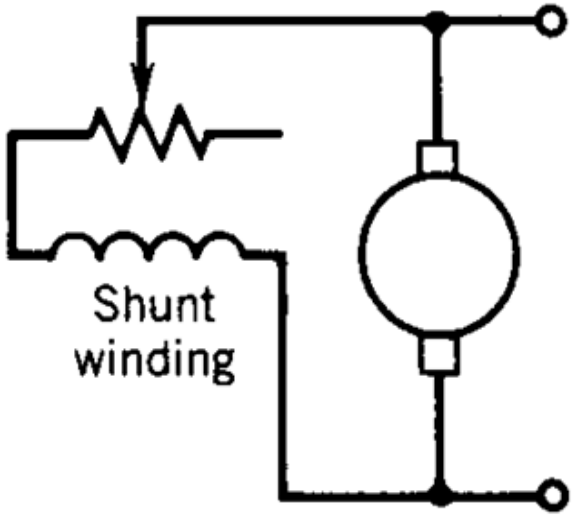


در ماشین های DC خود تحریک ، سیم پیچی تحریک به سه نحو (سری، موازی و کمپوند) با آرمیچر در ارتباط خواهد بود. قطب ها معمولا حاوی دو سیم پیچی سری و شنت هستند.

۱) اگر سیم پیچی سری با آرمیچرسری بسته شود ۲) اگر سیم پیچی شنت با آرمیچر موازی بسته شود



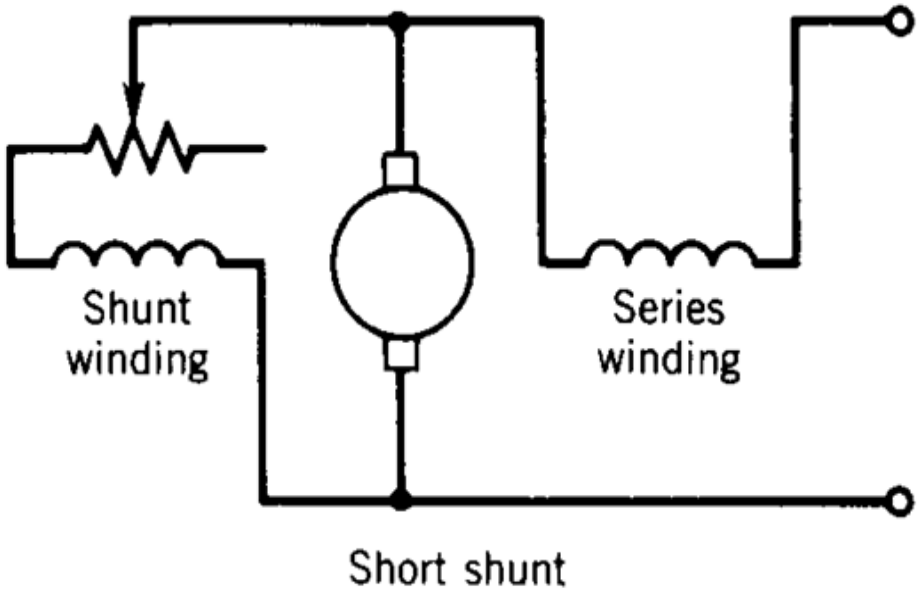
ماشین DC خود تحریک از نوع سری



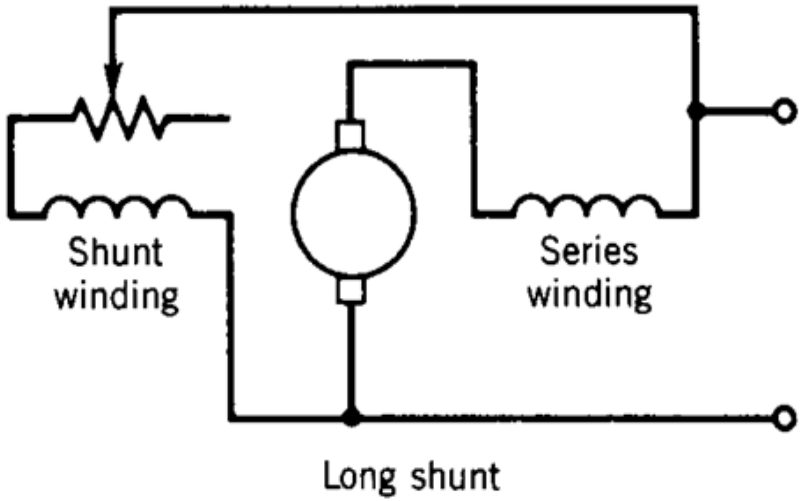
ماشین DC خود تحریک از نوع شنت

۳) اگر از هر دو سیم پیچی سری و شنت جهت تحریک ماشین استفاده شود ، ماشین های DC خود تحریک از نوع مختلط یا کمپوند شکل می گیرند.

در ماشین های کمپوند اگر سیم پیچی شنت موازی آرمیچر باشد ، ماشین DC کمپوند از نوع شنت کوتاه حاصل می شود



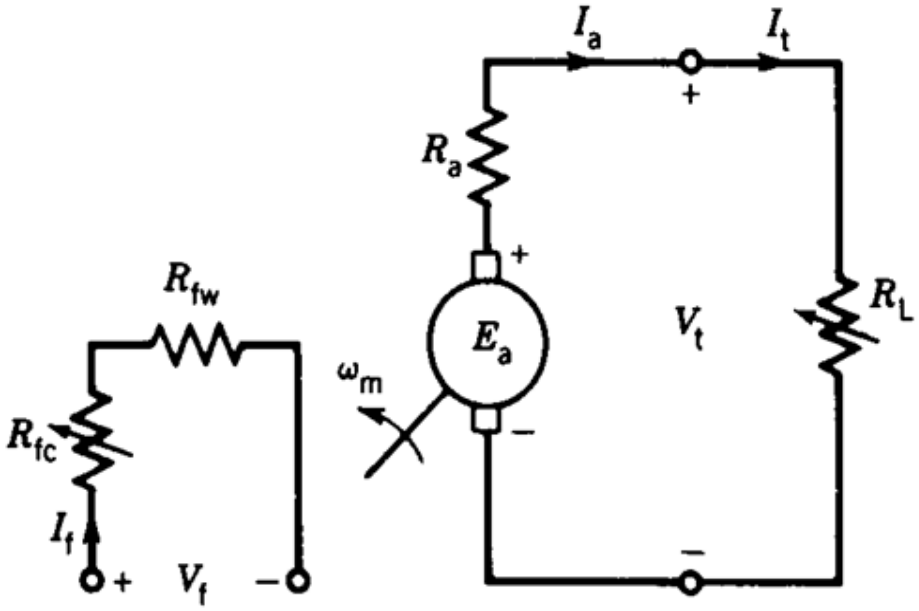
اگر ابتدا سیم پیچی سری با آرمیچر سری بسته شود و کل این مجموعه با سیم پیچی شنت موازی گردد ، در این صورت ماشین DC کمپوند از نوع شنت بلند حاصل می شود.



در ماشین های DC کمپوند اگر mmf سیم پیچی سری ، mmf سیم پیچی شنت را تقویت کند ماشین DC کمپوند اعم از شنت کوتاه یا شنت بلند را کمپوند اضافی می نامند. اگر mmf سیم پیچی سری mmf سیم پیچی شنت را تضعیف کند ، ماشین DC کمپوند اعم از شنت کوتاه یا شنت بلند را نقصانی گویند.

۱– ژنراتور DC از نوع تحریک جداگانه (تحریک مستقل)

در ژنراتور DC تحریک جداگانه (تحریک مستقل) سیم پیچی تحریک (سیم پیچی میدان) توسط منبع DC جداگانه و مستقلی تغذیه می شود.این منبع می تواند ، یک ژنراتور DC یا باطری یکسوساز کنترل شده یا یکسوساز دیودی باشد.



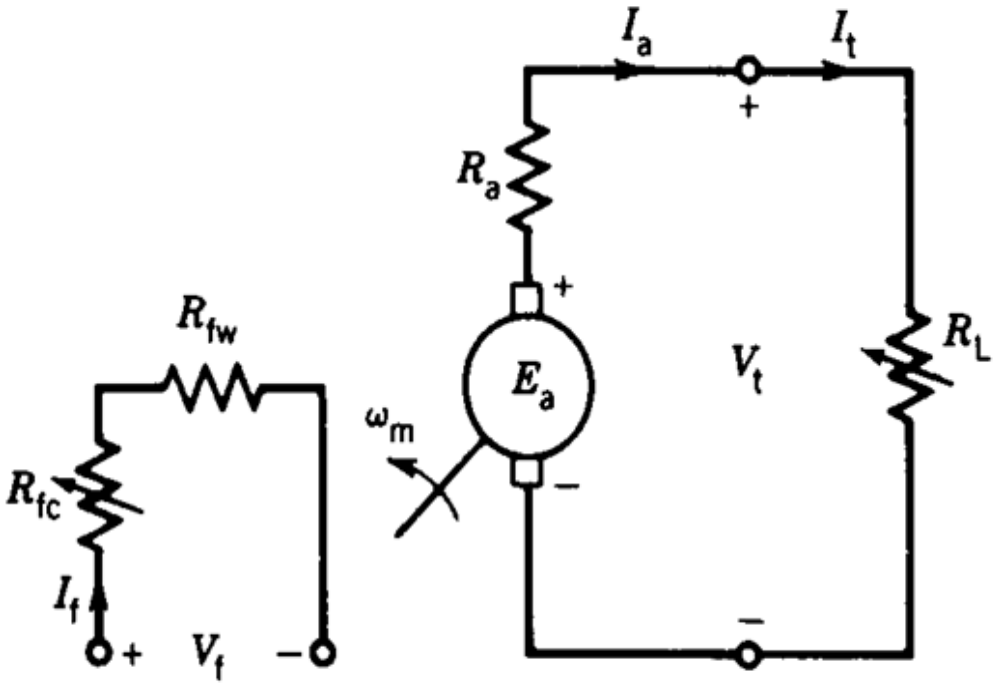
۱– R_{fw}: مقاومت مدار تحریک (سیم پیچی میدان)

۲– R_{fc}: مقاومت رئوستای مدار تحریک

۳– $R_{fc} + R_{fw}$: کل مقاومت مدار تحریک (R_f)

۴– R_a مقاومت آرمیچر با در نظر گرفتن اثر جاروبکها

۵– R_L مقاومت بار یا مصرف کننده



$$V_f = R_f I_f$$

$$V_t = I_t R_L$$

$$E_a = V_t + I_a R_a$$

$$I_a = I_t$$

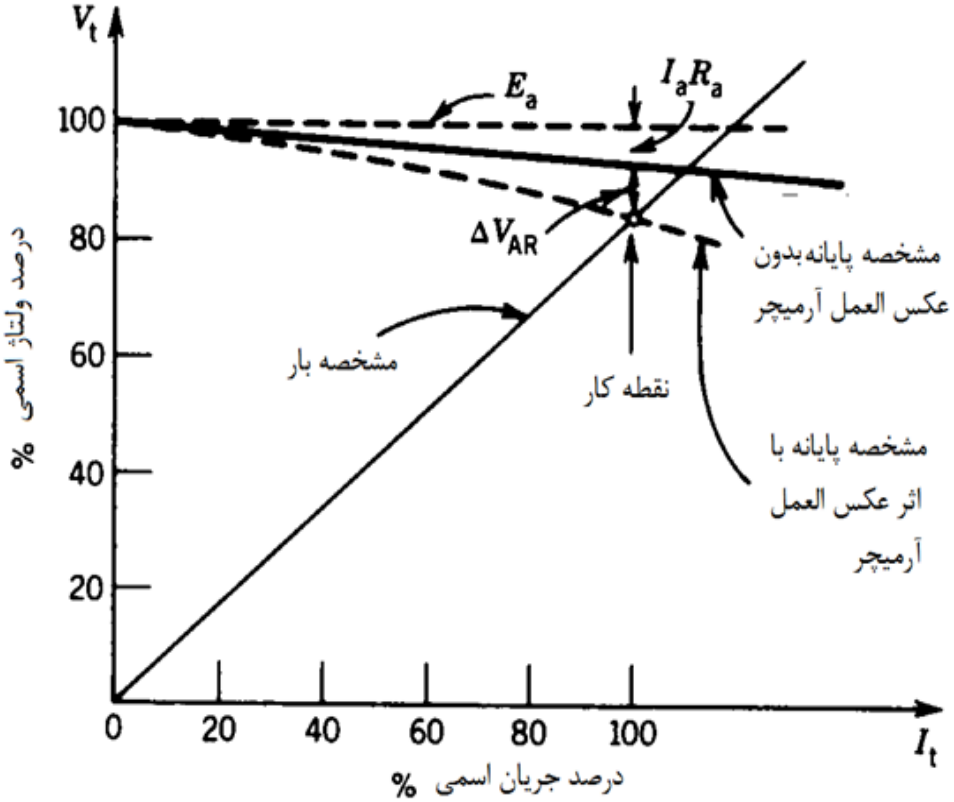
$$E_a = K_a \varphi \omega_m$$

$$V_t = E_a - R_a I_a$$

رابطه $E_a = V_t + I_a R_a$

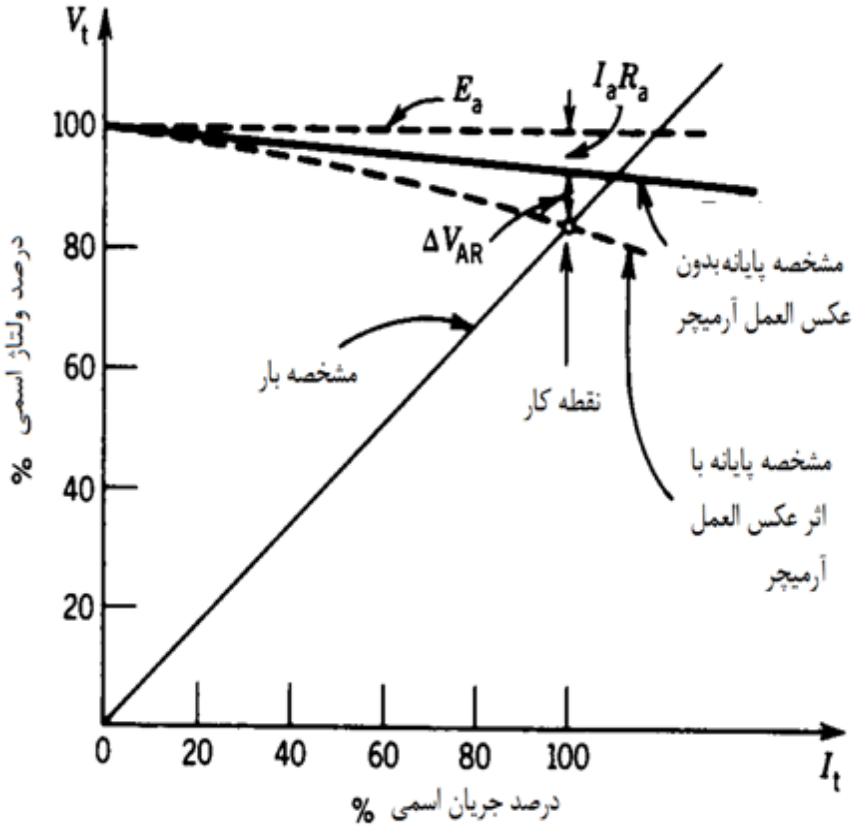
مشخصه خارجی یا مشخصه پایانه های ژنراتور DC تحریک جداگانه را تبیین می کند.

با افزایش جریان بار (I_t) ولتاژ پایانه (V_t) به طور خطی کاهش می یابد ، مشروط بر آن که Ea ثابت باشد. علت سقوط ولتاژ همان افت ولتاژ R_aI_a است .



عموما R_aI_a ناچیز است زیرا مقاومت آرمیچر یا R_a کم است. این گونه ژنراتورها را اساسا می توان ژنراتورهای با ولتاژ پایانه ثابت در نظر گرفت.

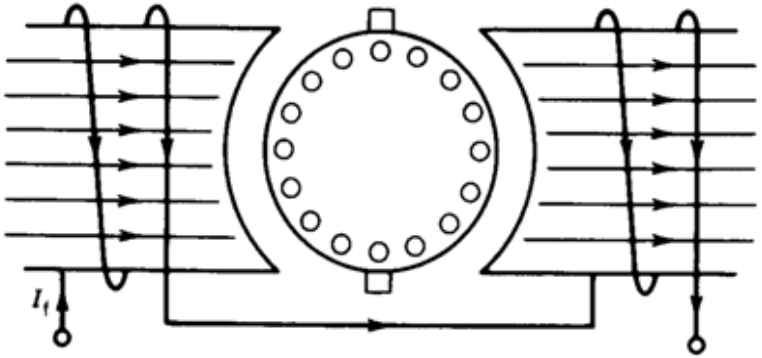
- در جریان های زیاد ، افت ولتاژ دیگری علاوه بر R_aI_a در پایانه ماشین ظاهر می شود و آنرا با ΔV_{AR} نشان می دهیم.
- ΔV_{AR} بخاطر پدیده عکس العمل آرمیچر یا اثر تضعیف مغناطیسی آرمیچر حاصل می شود



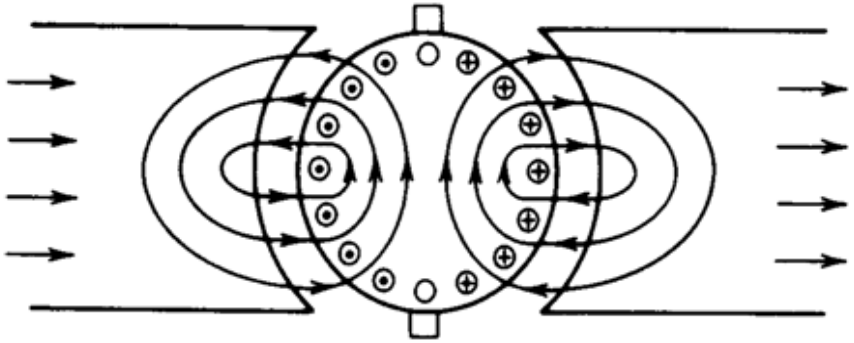
ΔV_{AR} تغییرات خطی V_t را مختل می سازد. از این پدیده می توان در جریان های کمتر از جریان اسمی آرمیچر صرف نظر کرد.

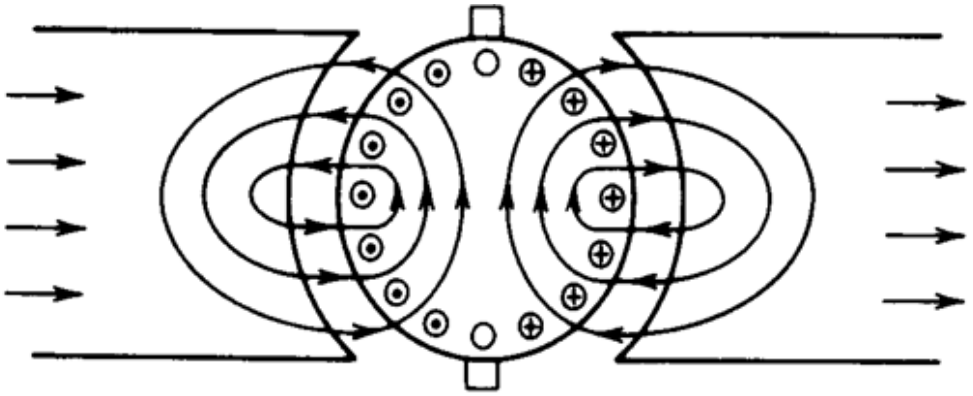
عکس العمل آرمیچر (AR)

اگر از سیم پیچی آرمیچر جریان عبور نکند ، در این صورت شار در ماشین DC توسط mmf حاصله از جریان تحریک شکل می گیرد.

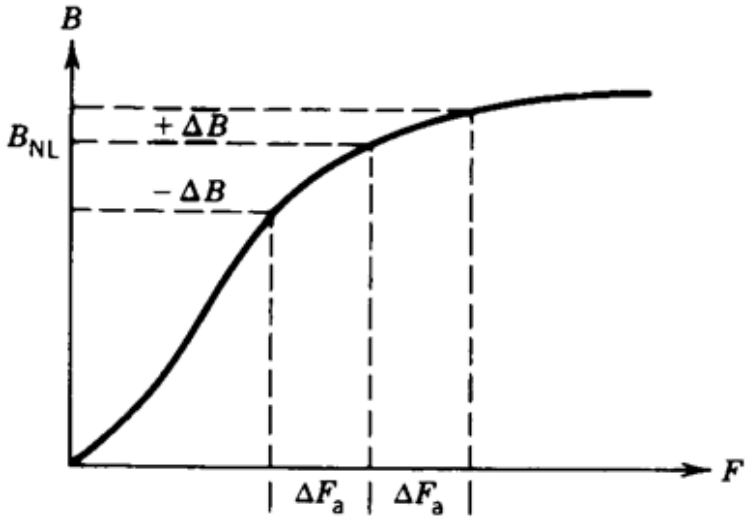


اما اگر از سیم پیچی آرمیچر جریان عبور کند ، در این صورت آرمیچر نیز mmf و درنتیجه شار مخصوص به خود را تولید می کند که در جهت محور q عمل می نماید. لذا در توزیع شار اصلی ماشین (شار قطب ها) اختلال پدید می آید.

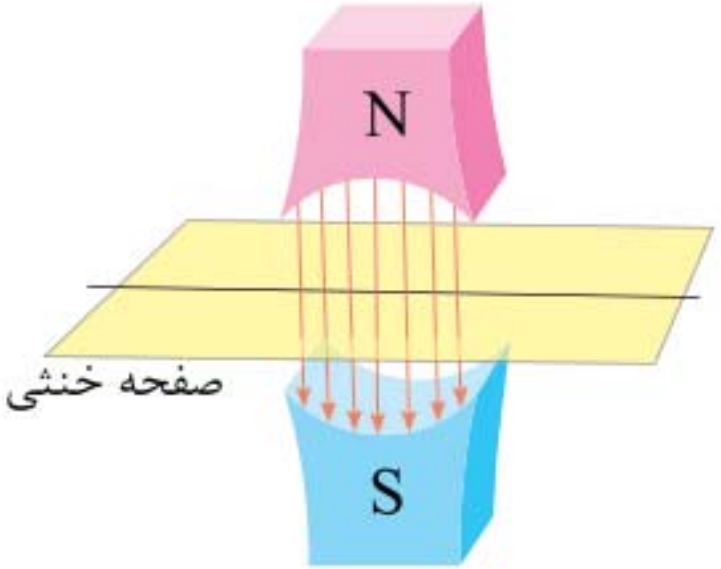




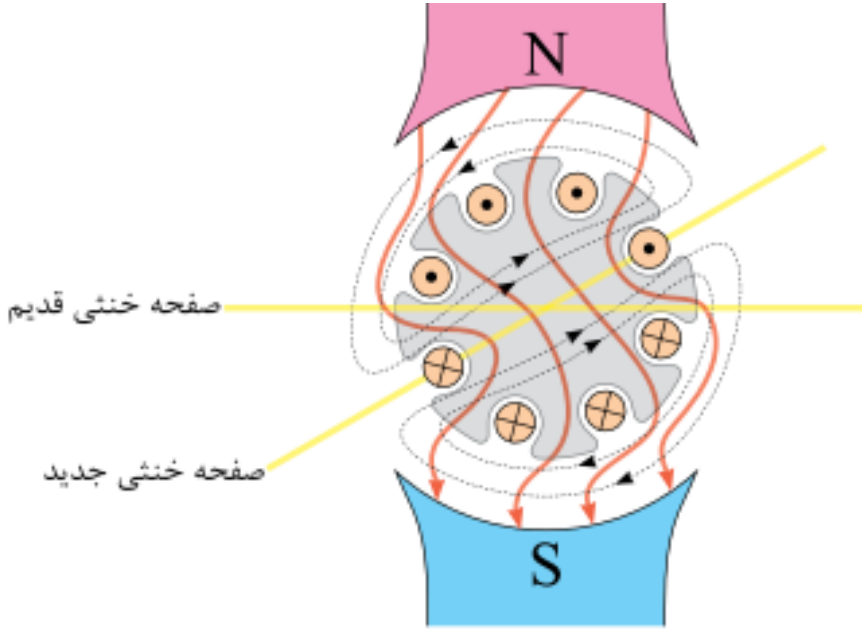
شار حاصله توسط mmf آرمیچر شار، اصلی را در نیمی از ناحیه زیر یک قطب تقویت و در نیمی دیگر از ناحیه زیر قطب تضعیف می نماید



لذا در نیمی از ناحیه زیر قطب چگالی شار افزایش و در نیمی دیگر از ناحیه زیر قطب اگر افزایش چگالی شار منجر به شکل گیری پدیده اشباع شود ، در این صورت اثر خالص این افزایش و کاهش چگالی شار آن است که شار هر قطب کاهش می یابد.



با قرار گرفتن هر یک از کلاف‌های سیم پیچی آرمیچر در موقعیت صفحه خنثی، نیروی محرکه در آن‌ها القا نمی‌شود. به همین دلیل این صفحه را خنثی نامیده‌اند.



Armature Reaction

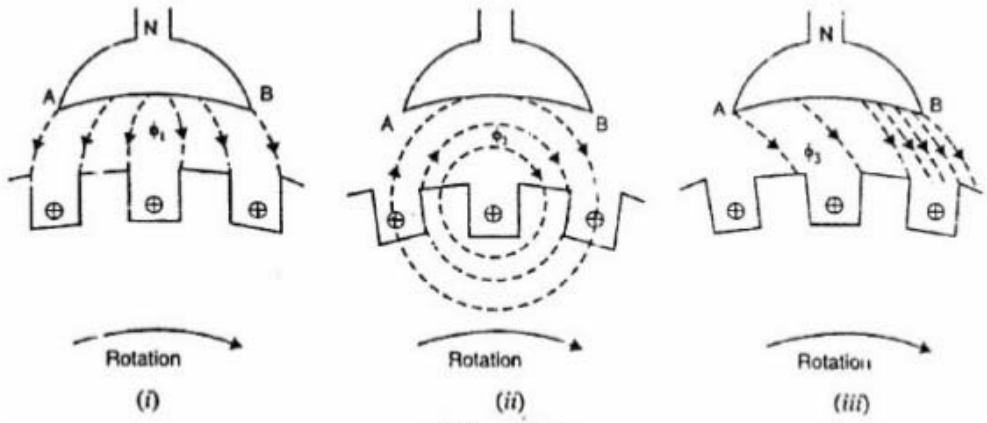
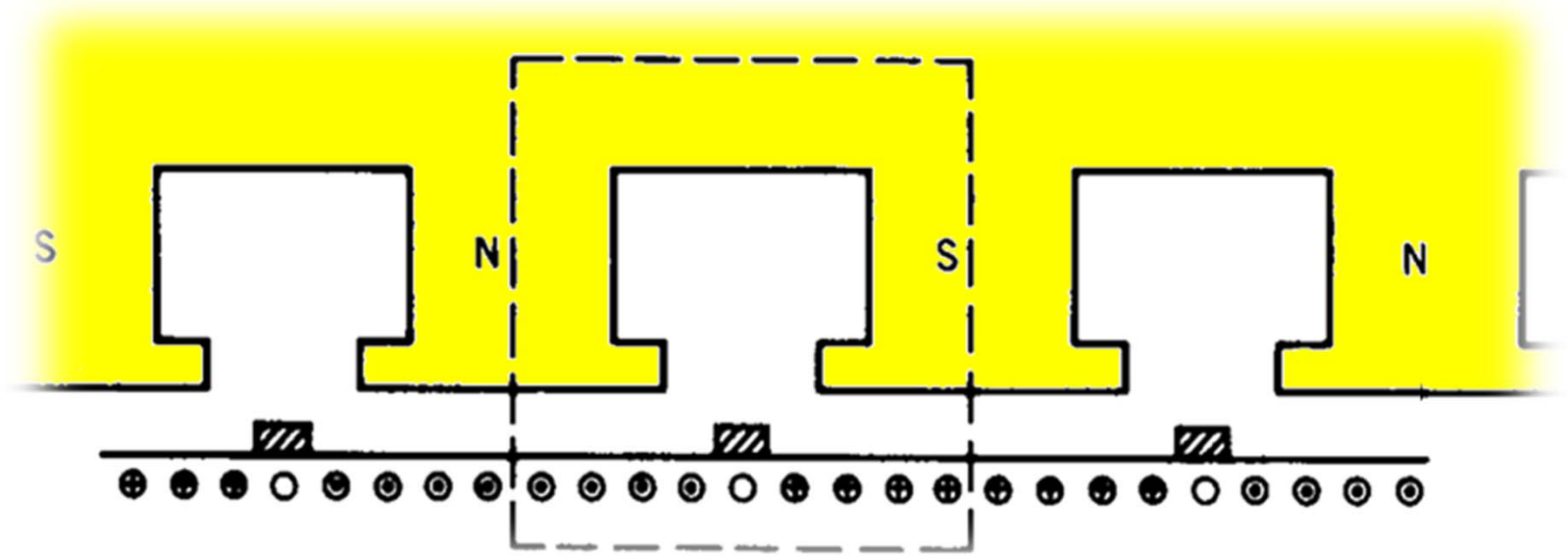


Fig. (2.1)

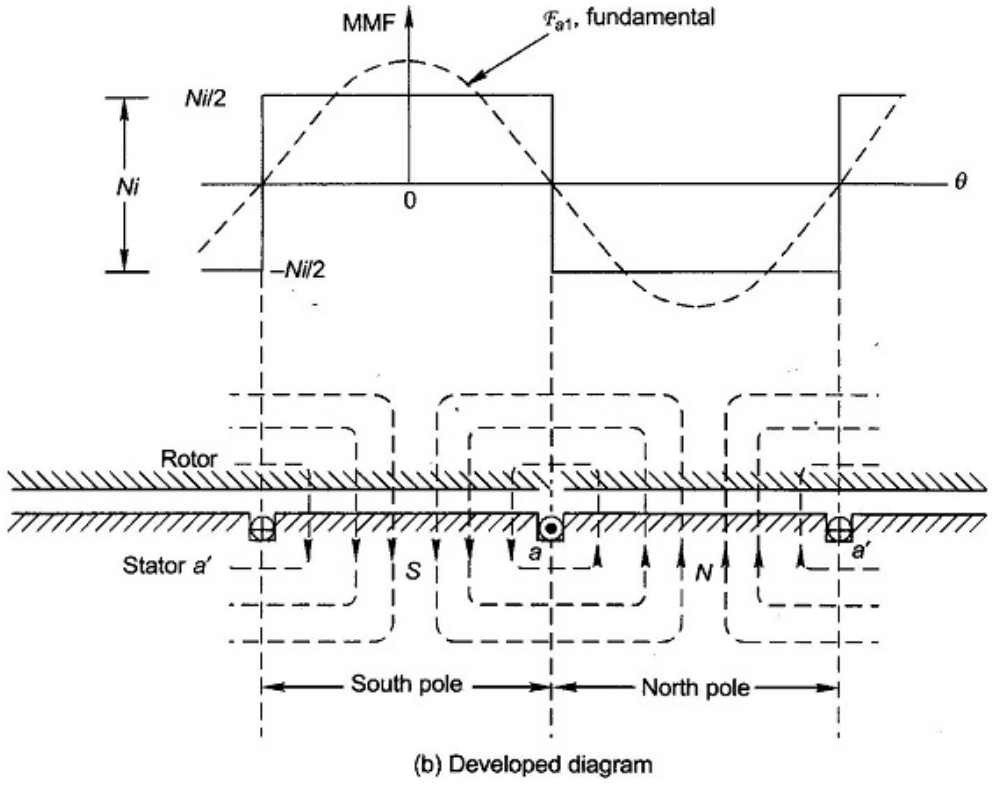
The phenomenon of armature reaction in a d.c. generator is shown in Fig. (2.1). Only one pole is shown for clarity. When the generator is on no-load, a smal1 current flowing in the armature does not appreciably affect the main flux Φ1 coming from the pole [See Fig 2.1 (i)]. When the generator is loaded, the current flowing through armature conductors sets up flux Φ1. Fig. (2.1) (ii) shows flux due to armature current alone. By superimposing Φ1 and Φ2, we obtain the resulting flux Φ3 as shown in Fig. (2.1) (iii). Referring to Fig (2.1) (iii), it is clear that flux density at; the trailing pole tip (point B) is increased while at the leading pole tip (point A) it is decreased. This unequal field distribution produces the following two effects:

(i) The main flux is distorted.

(ii) Due to higher flux density at pole tip B, saturation sets in. Consequently, the increase in flux at pole tip B is less than the decrease in flux under pole tip A. Flux Φ3 at full load is, therefore, less than flux Φ1 at no load. As we shall see, the weakening of flux due to armature reaction depends upon the position of brushes.

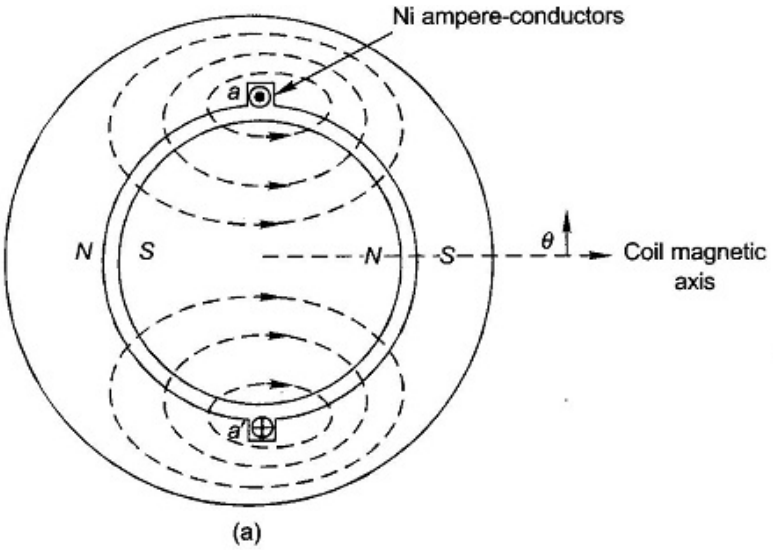


- در مسیر بسته خط چین ، mmf خالص تولید شده توسط جریان آرمیچر صفر است زیرا این مسیر بسته جریان های رفت و برگشت یکسانی را محاط کرده است.
- توزیع mmf آرمیچر با حرکت مسیر بسته خط چین و با در نظر گرفتن جریان های رفت و برگشت محاط شده توسط این مسیر قابل استحصال است.

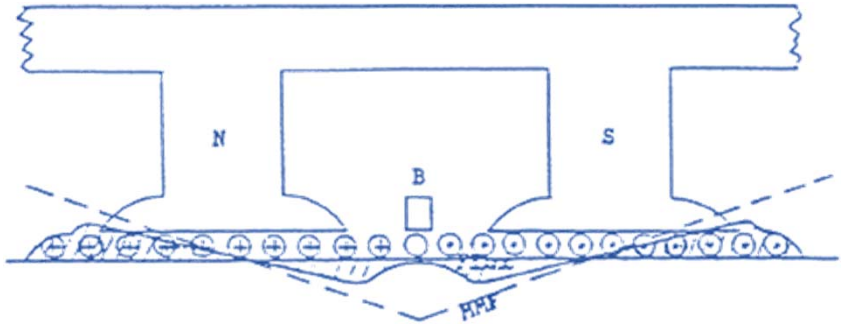


(b) Developed diagram

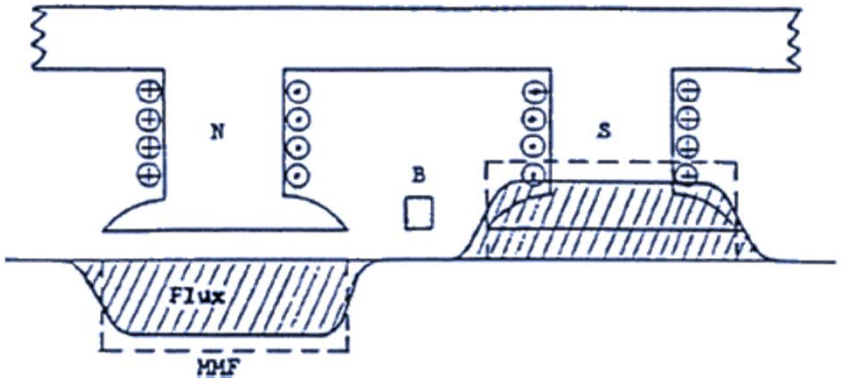
Fig. 5.24 *Mmf space wave of a single coil*



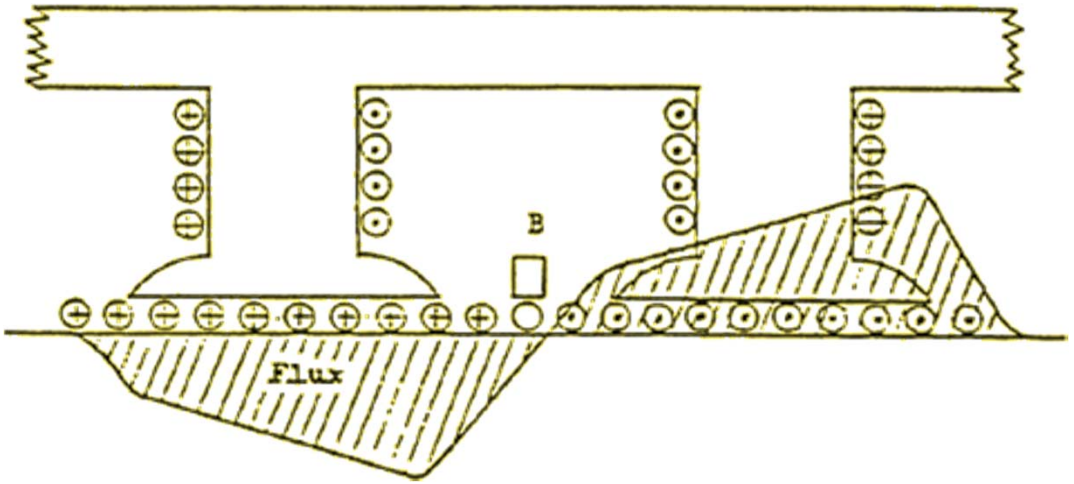
(a)



MMF and Flux Wave Shape due to Armature Reaction only



MMF and Flux Wave Shape due to Main Field only



Flux Wave Shape, combined effect

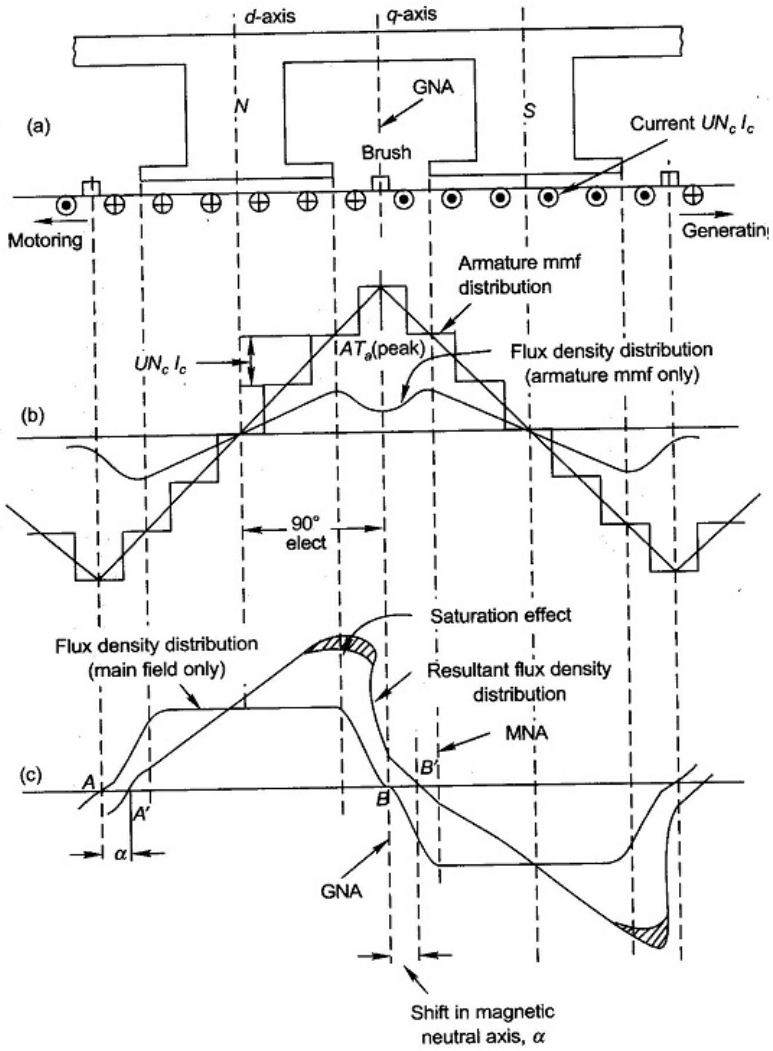
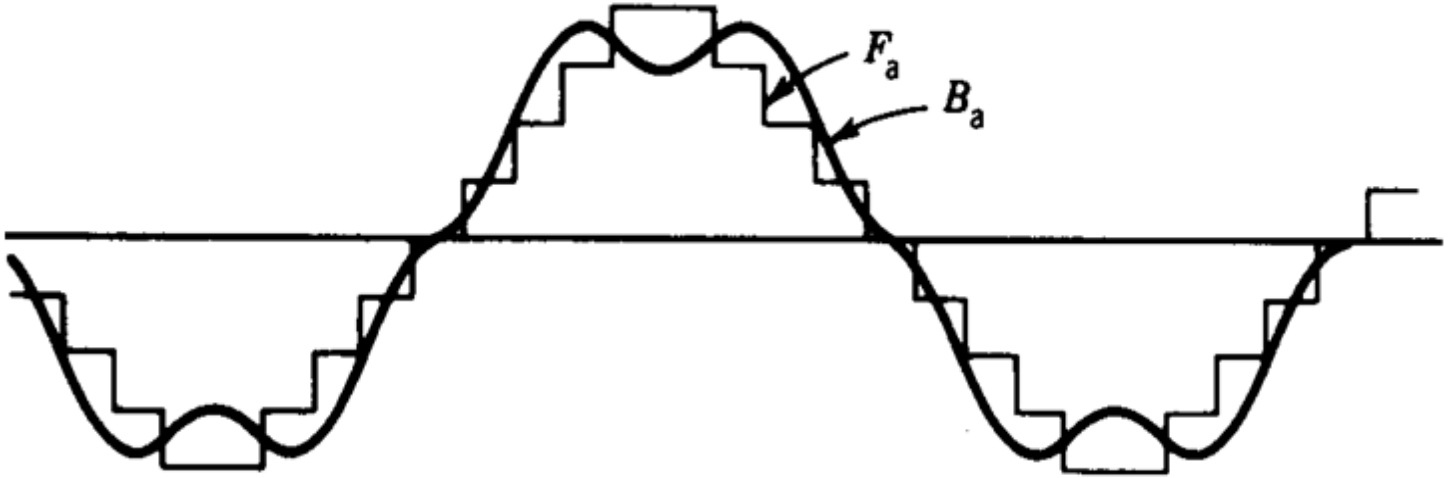
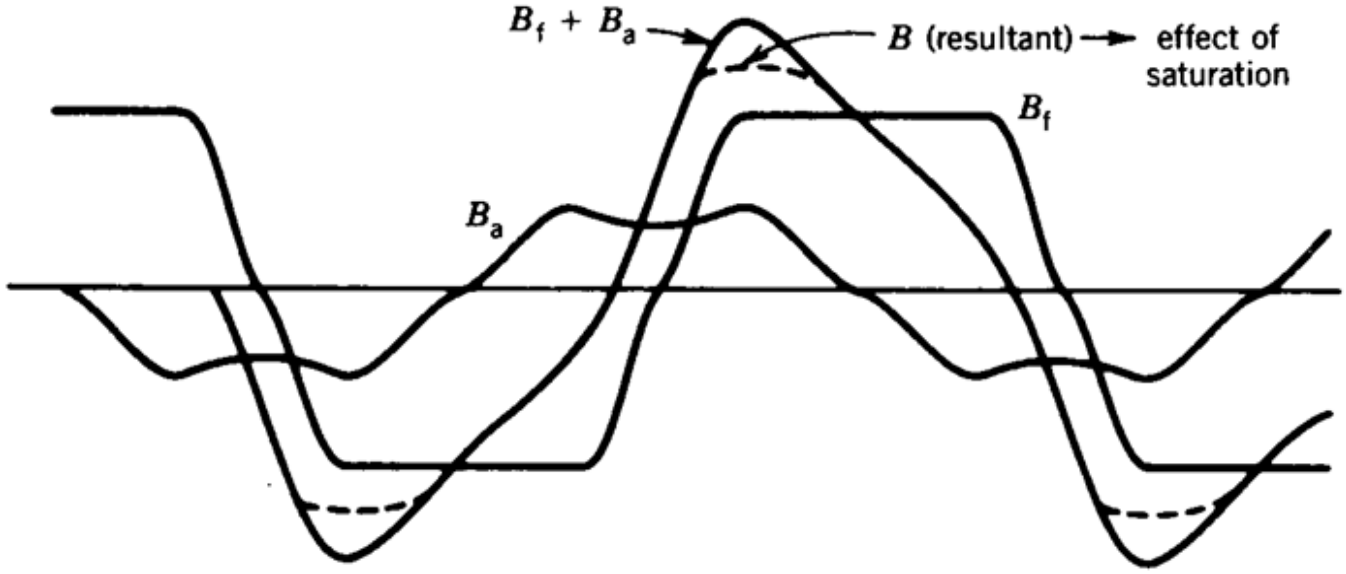


Fig. 7.9 *(a) Layout of armature and field of 2-poles of a dc machine (b) Armature mmf and flux density distribution (brushes in geometrical neutral axis (GNA)) (c) Main field and resultant flux density distribution-shift (α) in magnetic neutral axis (MNA)*

mmf ناشی از آرمیچر پله پله یا دندان اره ای می باشد (چرا؟).



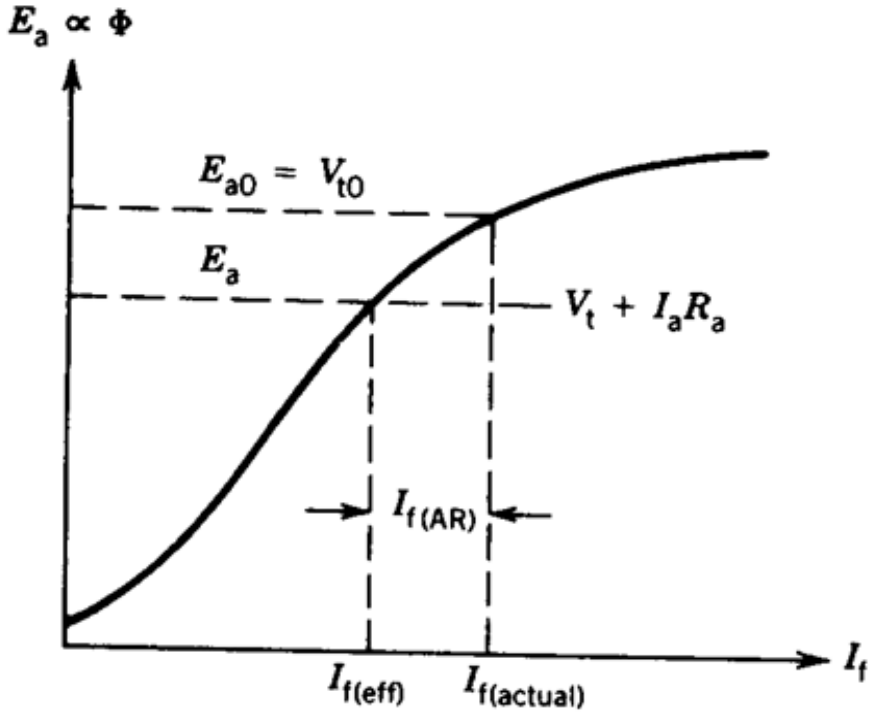
توزیع چگالی شار ناشی از جریان آرمیچر در منحنی توپر نشان داده شده است. در ناحیه میان قطب ها ، منحنی توزیع چگالی شار گودی دارد ، زیرا در این ناحیه مقاومت مغناطیسی (رلوکتانس) بسیار زیاد است.



- ناحیه چگالی شار صفر در هنگامی که از آرمیچر جریان می گذرد از محور q فاصله می گیرد. زیرا اگر B_f به تنهایی در ماشین باشد، این ناحیه در امتداد محور q است. اما با آمدن B_a این ناحیه جابجا می گردد.
- اگر اشباع رخ دهد، شار هر قطب کاهش می یابد. این اثر تضعیف مغناطیسی با افزایش جریان آرمیچر شدت می یابد.

شار (و در نتیجه E_a) بخاطر عکس العمل آرمیچر کاهش یافته.. لذا می توان اثر عکس العمل آرمیچر را به مثابه کاهش جریان تحریک مدل سازی نمود.

$$I_{f(eff)} = I_{f(actual)} - I_{f(AR)}$$



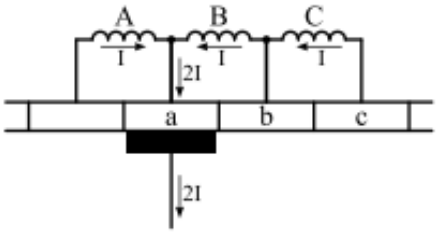
$I_{f(actual)}$:جریان واقعی مدار تحریک

$I_{f(eff)}$: جریان موثر مدار تحریک

$I_{f(AR)}$: جریان معادلی است که عکس العمل آرمیچر را در مدار تحریک مدل می کند.

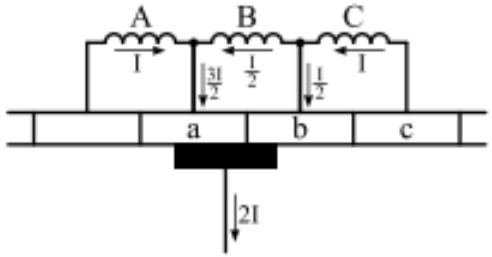
کموتاسیون

وقتی هادی‌های سیم‌پیچی آرمیچر از حوزه قطب N وارد حوزه قطب S می‌شوند جهت جریان در آن‌ها معکوس می‌شود. معکوس شدن جریان زمانی اتفاق می‌افتد که هادی‌ها از صفحه‌ی خنثی عبور می‌کنند.



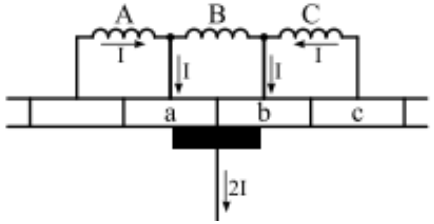
در این شکل هر کلاف I آمپر جریان دارد و جاروبک با تماس به تیغه α کموتاتور جریان کلاف‌های A و B را انتقال می‌دهد.

با گردش رتور لحظه‌ای فرا می‌رسد که جاروبک به تیغه‌های a و b کموتاتور تماس می‌یابد.



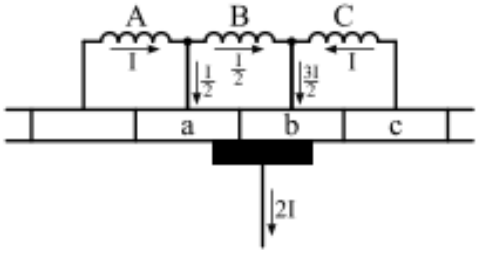
این شکل لحظه‌ای را نشان می‌دهد که جریان کلاف B در اثر کاهش القای نیروی محرکه به $\frac{I}{2}$ کاهش یافته است و توسط جاروبک اتصال کوتاه شده است. سطح تماسی جاروبک‌ها با تیغه‌های a و b کموتاتور تقسیم جریان را تعیین می‌کند. لذا سهم کلاف C کم‌تر از سهم کلاف A در تامین جریان آرمیچر شده است.

در ادامه گردش رتور لحظه‌ای فرا می‌رسد که سطح تماس جاروبک با تیغه‌های a و b کموتاتور مساوی می‌شود.



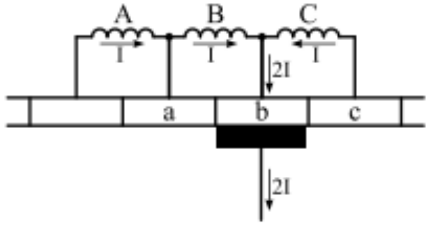
این شکل لحظه‌ای را نشان می‌دهد که کلاف B در صفحه خنثی قرار گرفته است. لذا نیروی محرکه در آن القا نمی‌شود و جریان آرمیچر توسط کلاف‌های A و C تامین می‌شود.

با گردش رتور سطح تماسی جاروبک با تغیه b کموتاتور بیش‌تر از تیغه a می‌شود و کلاف B از صفحه خنثی خارج خواهد شد و در آن نیروی محرکه القا می‌شود و جهت جریان آن معکوس می‌شود. شکل



این شکل لحظه‌ای را نشان می‌دهد که کلاف B از صفحه خنثی خارج شده است و در اثر القای نیروی محرکه جریان آن به $\frac{I}{2}$ رسیده است. سطح تماس جاروبک با تیغه‌های a و b باعث شده است که سم کلاف A کم‌تر از سهم کلاف C در تامین جریان آرمیچر باشد.

در ادامه گردش رتور جاروبک با تیغه b کموتاتور تماس می‌یابد و جریان کلاف‌های B و C را انتقال می‌دهد.



اگر معکوس شدن جریان کلاف B، یعنی تغییر کردن از $+I$ بـه صفر، و سـپس از صفر بـه $-I$، در طی زمان کموتاسـیون کامل شـود، در این صورت «کموتاسیون خوب» خواهد بود. کموتاسیون خوب به این معنی است که هیچ جرقه‌ای در جاروبک مشاهده نشود. اگر معکوس شـدن جریان کلاف B در طی زمان کموتاسیون کامل نشود، در این صورت جرقه‌هایی بین جاروبک و تیغه‌های کموتاتور ایجاد خواهد شد، لذا «کموتاسیون بد» خواهد بود. مـواردی که باعث ایجاد جرقه بین جاروبک و تیغه کموتاتور می‌شوند به شرح زیر است:

۱ ـ در طی زمان کموتاسیون تغییر جریان در کلاف اتصال کوتاه شده نیروی ضد محرکه U_{Cemf} القا می‌کند

$$U_{Cemf} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

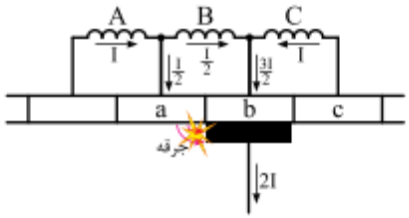
U_{Cemf} نیروی ضد محرکه

L ضریب خودالقایی کلاف اتصال کوتاه شده

ΔI تغییرات جریان

Δt زمان انجام کموتاسیون

نیـروی ضد محرکه U_{Cemf} طبـق قانون لنز با عامل به‌وجودآورنده‌اش یعنی «تغییرات جریان ΔI» مخالفت می‌کند و مانع تغییر جهت جریان به‌طور کامل در پایان زمان کموتاسیون می‌شود و جریان کلاف به I نمی‌رسد.



در این شـکل فرض شده اسـت جریان کلاف B در پایان زمان کموتاسیون به $\frac{I}{2}$ رسیده است. بنابراین $\frac{3I}{2}$ جریان آرمیچر توسط کلاف‌های B و C، و $\frac{I}{2}$ آن توسط جریـان کلاف A از طریق تیغـه a کموتاتور به صورت جرقه بین تیغه کموتاتور و جاروبک تامین شـده است. این جرقه‌هـا باعث وارد آمدن خسـاراتی به جاروبک و تیغه کموتاتور می‌شود.

برای بهبود «کموتاسیون بد» باید اثر نیروی ضد محرکه القایی U_{Cemf} در کلافی که کموتاسیون در آن انجام می‌شود را از بین برد. برای این منظور به هنگام کموتاسیون زمانی که کلاف به صفحه خنثی می‌رسد در آن نیروی محرکه‌ای به نام «نیروی محرکه القایی معکوس کننده» القا می‌کنند. جهت نیروی محرکه القایی معکوس‌کننده مخالف جهت نیروی ضد محرکه U_{Cemf} است و اثر آن را خنثی می‌کند. هم‌چنین به معکوس شدن جهت جریان در کلاف کمک می‌کند. لذا کموتاسیون به‌طور کامل و صحیح صورت می‌گیرد و جرقه بین تیغه کموتاتور و جاروبک ایجاد نمی‌شود.

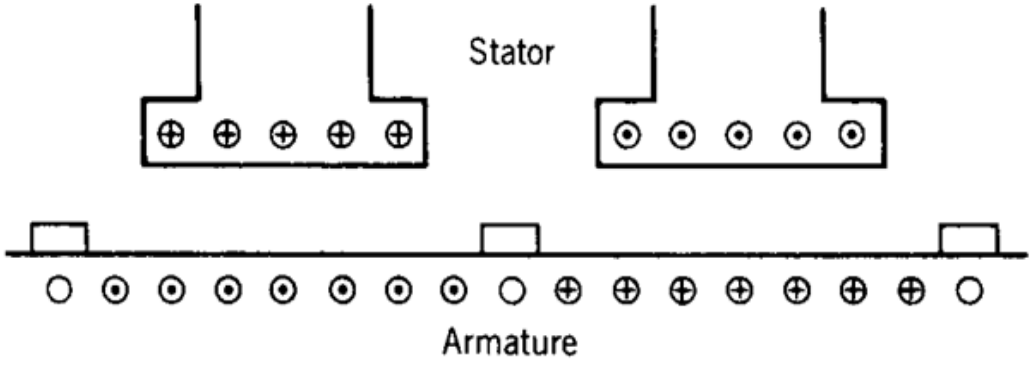
برای ایجاد نیروی محرکه القایی معکوس کننده، از میدان مغناطیسی قطب‌های کموتاسیون که در صفحه خنثی قرار دارند استفاده می‌شود. بنابراین قطب‌های کموتاسیون علاوه بر تعدیل عکس‌العمل آرمیچر، نقش خنثی‌کننده اثر خود القایی کلاف اتصال کوتاه شده سیم‌پیچی آرمیچر را در زمان کموتاسیون نیز به عهده دارد.

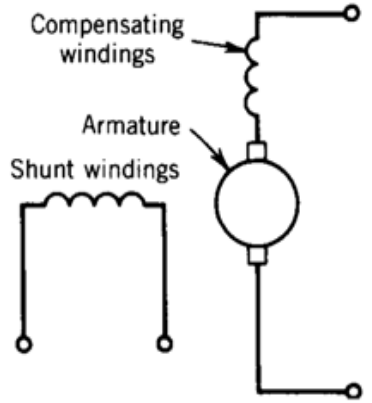
۲ ـ از دیگر علل ایجاد جرقه هنگام کموتاسیون، اشکالات مکانیکی زیر می‌باشد:

- ناصافی سطح تیغه‌های کموتاتور
- ناصافی و جذب نبودن جاروبک‌ها
- تنظیم نبودن جاروبک نگه‌دار
- تنظیم نبودن محور کموتاتور نسبت به محور رتور
- کثیف شدن سطح تیغه‌های کموتاتور در اثر ذرات چربی یا گرد و غبار
- قرار گرفتن پلیسه‌های بسیار ریز بین جاروبک و تیغه کموتاتور

سیم پیچی جبرانگر

mmf ناشی از آرمیچر در توزیع چگالی شار اعوجاج تولید می کند و یک اثر تضعیف مغناطیسی به نام عکس العمل آرمیچر از خود بروز می دهد. mmf آرمیچر باعث می شود که ناحیه چگالی شار صفر از محور q فاصله بگیرد. این امر باعث می گردد کموتاسیون ضعیفی رخ دهد و جرقه برقرار شود (چرا؟).

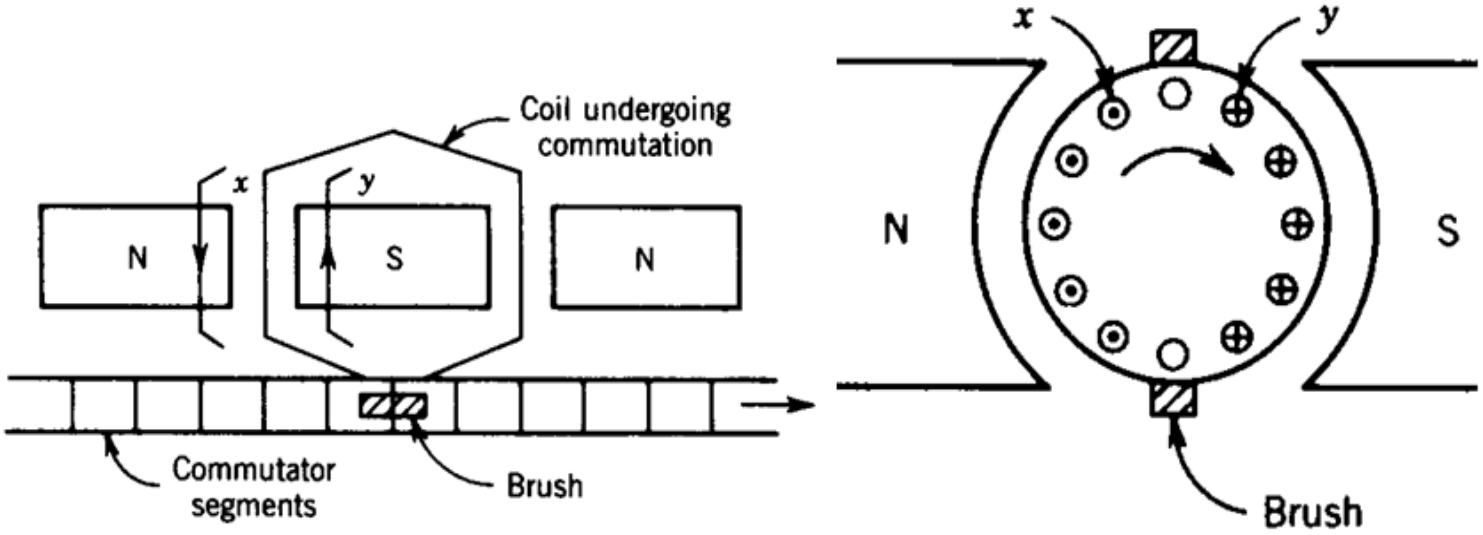




سیم پیچی جبرانگر می تواند بخش اعظمی از mmf رتور را خنثی سازد. سیم پیچی جبرانگر در شیارهایی در پیشانی قطب های اصلی جاسازی می شوند و با سیم پیچی آرمیچر به طور سری بسته می شود. جریان در سیم پیچی جبرانگر طوریست که mmf حاصله با mmf ناشی از آرمیچر مخالفت می ورزد. قطب های حاوی سیم پیچی جبرانگر از نظر ساخت بسیار گران تمام می شوند.

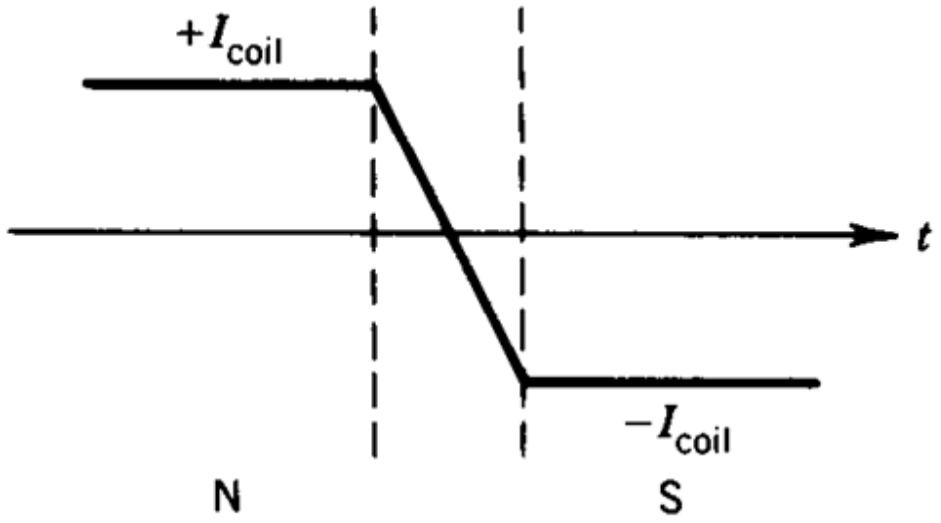
قطب های کمکی یا قطب های کموتاتور

در ماشین DC وظیفه کموتاتورها و جاروبک ها وارونه کردن جریان درون هادی است. هرگاه یک هادی از زیر یک قطب به زیر قطب دیگر می رود. کموتاتور و جاروبکها جریان هادی را وارونه می سازد.



هنگامی که هادی x در برابر قطب شمال (قطب مثبت) است جریان از آن بیرون می آید، اما پس از گذشتن از میان جاروبکها در برابر قطب جنوب (قطب منفی) قرار می گیرد، (هادی y) – در این صورت جریان به درون می رود.

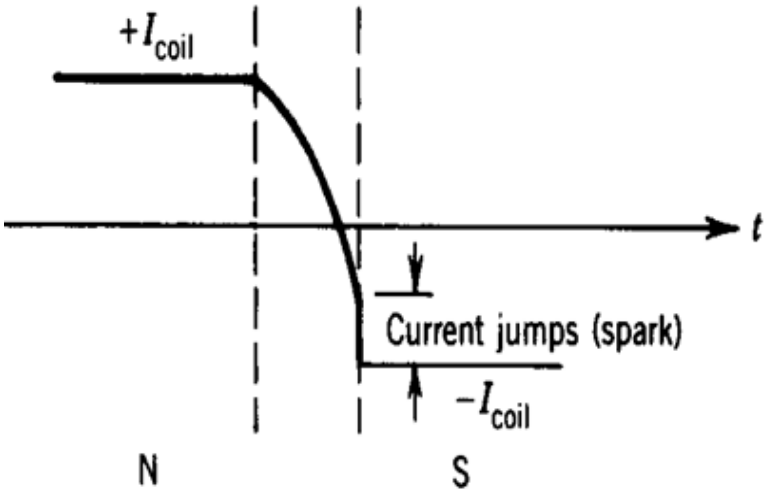
هرگاه که کلاف (یا حلقه) از برابر جاروبکها می گذرد جهت جریان آن وارونه می شود. شکل زیر یک تغییر خطی جریان درون کلاف را به نمایش می گذارد. این حالت ایده آل است زیرا تبدیل جریان به آرامی صورت می پذیرد.



اما به دلیل کموتاسیون تغییر جریان خطی نمی باشد. کلافی که با فرایند کموتاسیون رویاروی می گردد، دارای اندوکتانس است و این پارامتر سبب تاخیر در تغییر جریان می گردد.

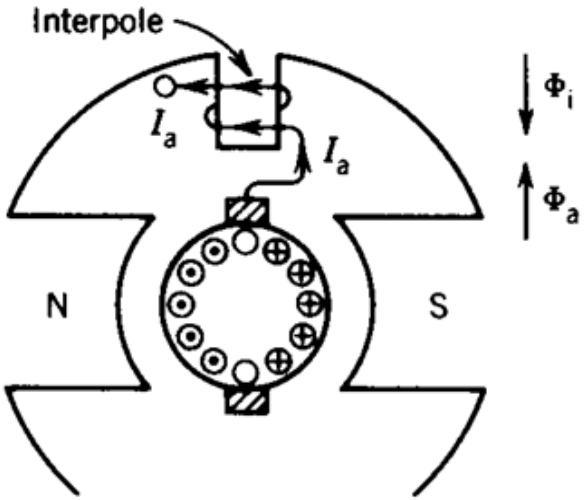
کلافی که با کموتاسیون مواجه می شود در قلمرو میان قطب ها قرار می گیرد. mmf آرمیچر در راستای محور q موثر می افتد و شاری را در این ناحیه پدید می آورد. هرگاه کلاف در این قلمرو حرکت می کند درون آن ولتاژ القا می گردد که به **ولتاژ راکتانسی** معروف است این ولتاژ راکتانسی در تغییر جریان درون کلاف تاخیر ایجاد می کند.

جریان واقعی کلاف که با فرایند کموتاسیون مواجه می گردد در شکل روبرو نشان داده شده است.

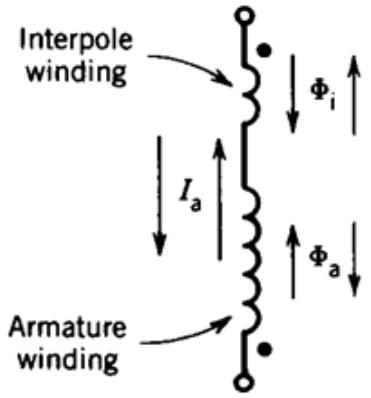


باید دانست هنگامی که کلاف محدوده جاروبک ها را تقریبا ترک می کند وارونه گشتن جریان کامل نشده و از این رو جریان بایستی پرش لحظه ای داشته باشد که این امر باعث پدید آمدن **جرقه** می شود.

برای بهبود کموتاسیون، یک قطب کوچک که قطب کمکی یا قطب میانی یا قطب کموتاسون نام دارد نصب می گردد.



- **در سیم پیچی این قطب جریان آرمیچر در سویی خاص جاری می گردد تا شار این قطب بتواند شار آرمیچر در امتداد محور q را تضعیف کند.پی آمد چنین کاری آن است که برآیند شار در محدود میان قطب ها (قطب های کمکی) تقریبا صفر است.**



- **اگر جریان در سیم پیچی آرمیچر معکوس شود جریان درون سیم پیچ های کمکی (میان قطب ها) نیز وارونه خواهد شد و از این رو شار آرمیچر و شار قطب های کمکی همواره دو سوی مخالف خواهد بود.**

توجه کنید که:

- سیم پیچی جبرانگر بر روی پیشانی قطب ها نیز شاری در امتداد q ایجاد می کند، اما این شار نمی تواند عکس العمل آرمیچر را در محدوده میان قطب ها (قطب های کمکی) کاملا خنثی کند.
- قطب های کمکی نیز قادر نیستند بر پدیده تضعیف مغناطیسی ناشی از عکس العمل آرمیچر در برابر قطب های اصلی چیره گردند.

از این رو وجود سیم پیچی های جبرانگر و قطب های کمکی هر دو برای بهبود بخشیدن به عملکرد ماشین DC ضروری بنظر می رسند.

مثال :

یک ژنراتور DC شنت ۱۲ کیلو واتی ، ۱۰۰ ولتی و ۱۰۰۰ دور در دقیقه ای مفروض است و مقاومت آرمیچر ۰/۱ اهم می باشد. مقاومت مدار تحریک شنت ۱۸۰ اهم و تعداد حلقه های مدار تحریک هر قطب ۸۰۰ می باشد (سیم پیچ ۸۰۰ دوری). جریان اسمی مدار تحریک یک آمپر می باشد. شکل زیر مشخصه مغناطیس شوندگی ماشین را در سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه نشان می دهد.

این ماشین را به صورت ژنراتور DC تحریک جداگانه تحت سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه مورد بهره برداری قرار می دهیم و جریان تحریک معادل جریان اسمی این مدار است.

الف : در بار کامل ولتاژ پایانه ژنراتور را حساب کنید. از عکس العمل آرمیچر صرف نظر کنید.

ب : گیریم جریان معادل مدار تحریک برای مدل سازی عکس العمل آرمیچر در بار کامل معادل ۰/۰۶ آمپر باشد.

۱– ولتاژ پایانه ماشین را در بار کامل حساب کنید.

۲– اگر بخواهیم در بار کامل ولتاژ پایانه ژنراتور ۱۰۰ ولت گردد، جریان تحریک را به دست آورید.

حل: با توجه به صورت مسئله داریم :

$$V_t = \left(\text{شرایط اسمی}\right) = 100 \text{ ولت}$$

توان اسمی خروجی تحویلی به بار

(کیلو وات) = 12

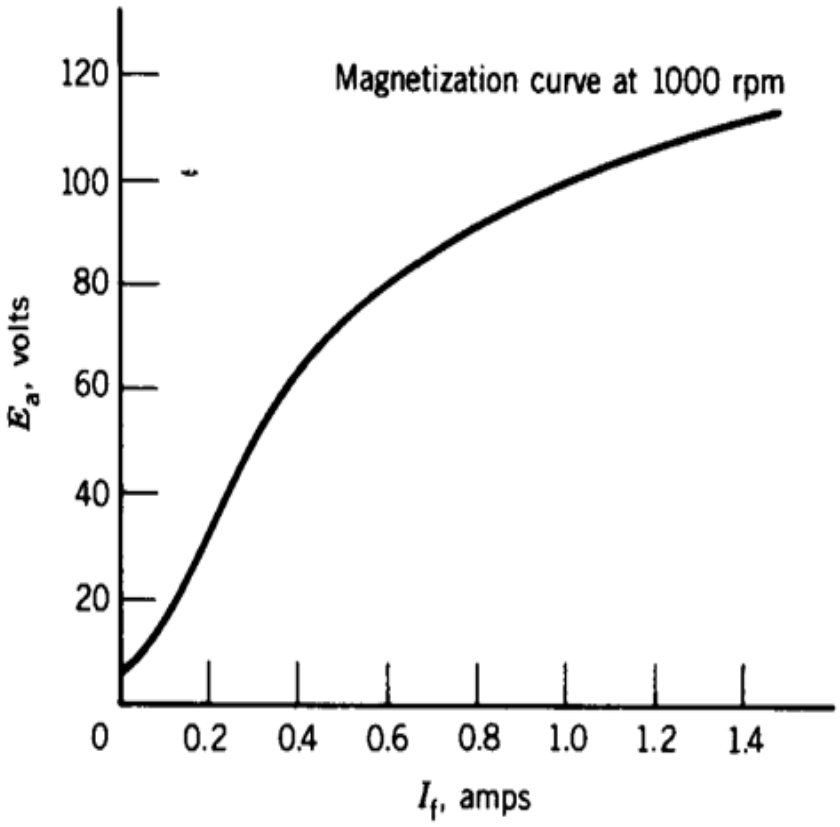
دور در دقیقه = 1000 سرعت اسمی

$$\text{جریان اسمی آرمیچر} = I_a = \frac{12000}{100}$$

آمپر = 120

$$I_f = \text{جریان اسمی مدار تحریک}$$

آمپر = 1



الف :

$$V_t = E_a - I_a R_a = 100 - 120 \times 0.1 = 88V$$

ب:

۱-

$$\mathbf{l_{f(eff)} = 1 - 0.06 = 0.94\ A}$$

از نمودار مغناطیس شوندگی برای این جریان تحریک داریم : E_a

$$V_t = E_a - l_a R_a = 98 - 120 \times 0.1 = 86V$$

۲- به سهولت داریم :

$$E_a = V_t + l_a R_a = 100 + 120 \times 0.1 = 112\ V$$

از نمودار مغناطیس شوندگی، جریان موثر مدار تحریک را به دست می آوریم :

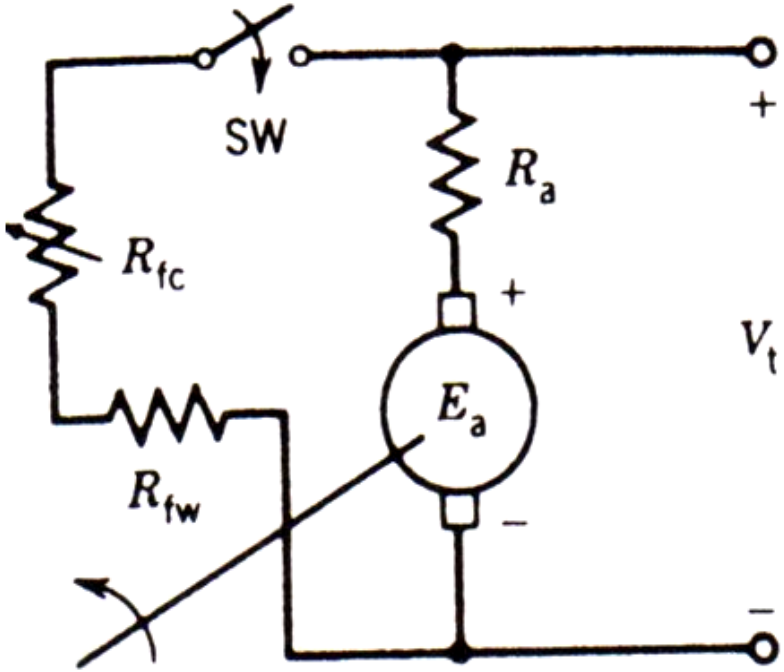
$$l_{f(eff)} = 1.4A$$

و داریم :

$$l_{f(actual)} = 1.4 + 0.06 = 1.46A$$

۲- ژنراتور DC شنت از نوع خود تحریک

در ژنراتورهای DC شنت سیم پیچی تحریک (میدان) با آرمیچر موازی بسته می شود و ولتاژ آرمیچر مدار تحریک را تغذیه می نماید. اگر بخواهیم این ژنراتور به مثابه یک ژنراتور خود تحریک عمل کند باید پس ماند مغناطیسی در ماشین وجود داشته باشد.



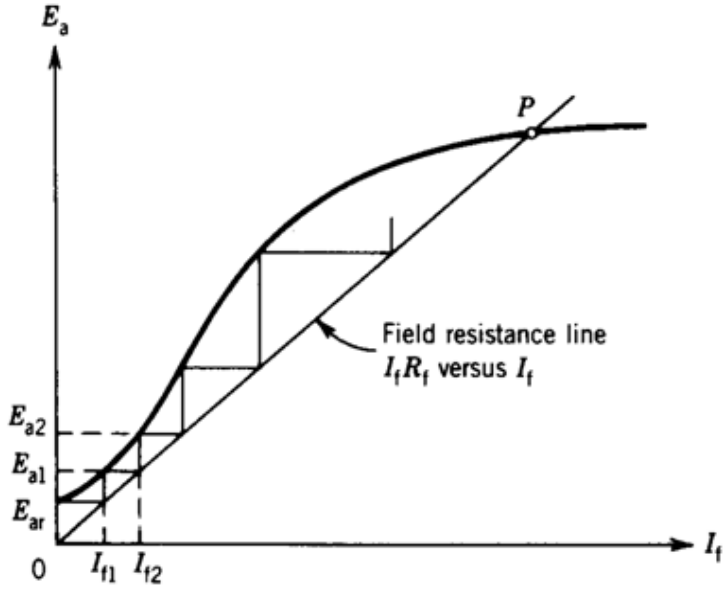
مدار معادل ژنراتور DC شنت در بی باری

منحنی مغناطیس شوندگی ماشین DC :

خط مقاومت تحریک یا خط مقاومت میدان، تغییرات I_fR_f بر حسب I_f

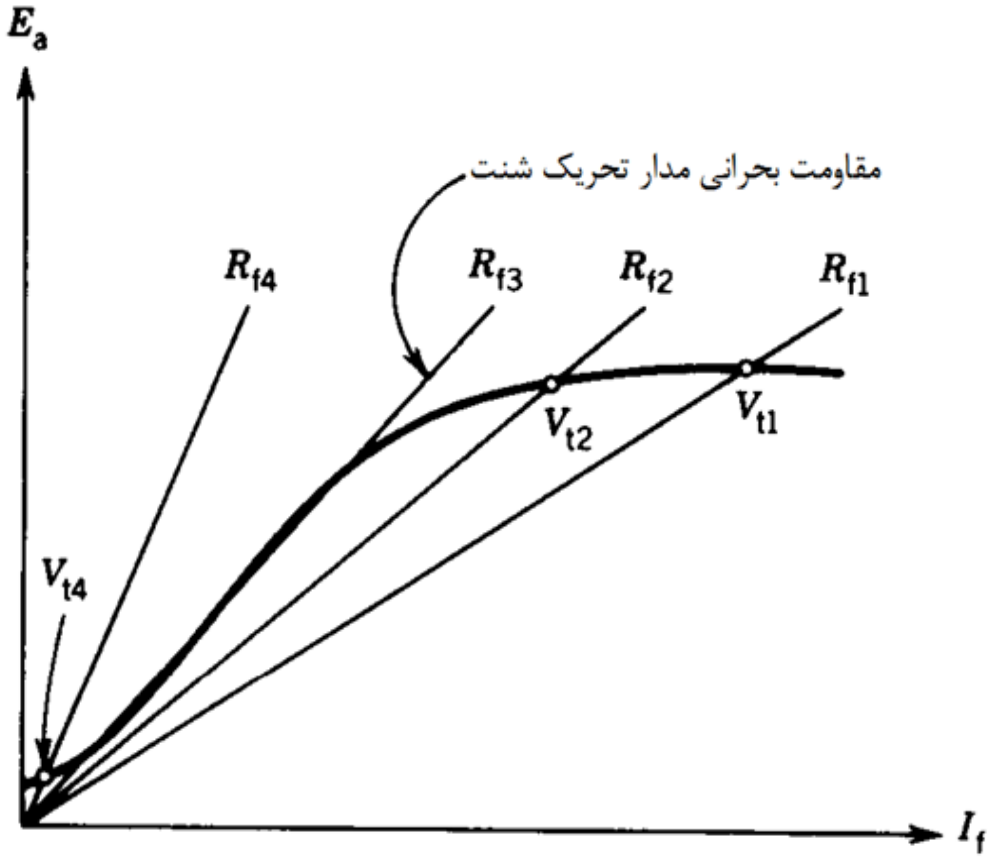
- گیریم در ابتدای امر مدار تحریک به دو سر آرمیچر وصل نباشد و ژنراتور تحت سرعت ثابتی چرخانده شود. بخاطر پدیده پس ماند مغناطیسی در دو سر آرمیچر ولتاژ کمی بنا به E_{ar} شکل می گیرد.
- حال اگر کلید SW ، در سیم پیچی تحریک (میدان) جریان برقرار می گردد. اگر mmf حاصله توسط مدار تحریک پس ماند مغناطیسی را تقویت کند، بالاخره جریان I_{f1} از مدار تحریک خواهد گذشت.
- جریان I_{f1} ولتاژ E_{a1} را در ژنراتور DC شنت پدید می آورد. E_{a1} باعث می گردد که جریان مدار تحریک بالاخره به I_{f2} برسد. I_{f2} باعث می گردد ولتاژ E_{a2} در ماشین پدید آید. این فرایند کماکان ادامه می یابد. اگر از افت ولتاژ در دوسر R_a صرف نظر گردد ($R_a < R_f$). در نهایت ولتاژ ماشین معادل ولتاژ نقطه p خواهد بود. در این نقطه داریم :

$$E_a = I_f R_f = Vt \quad (\text{از } R_a \text{ صرف نظر شده است})$$



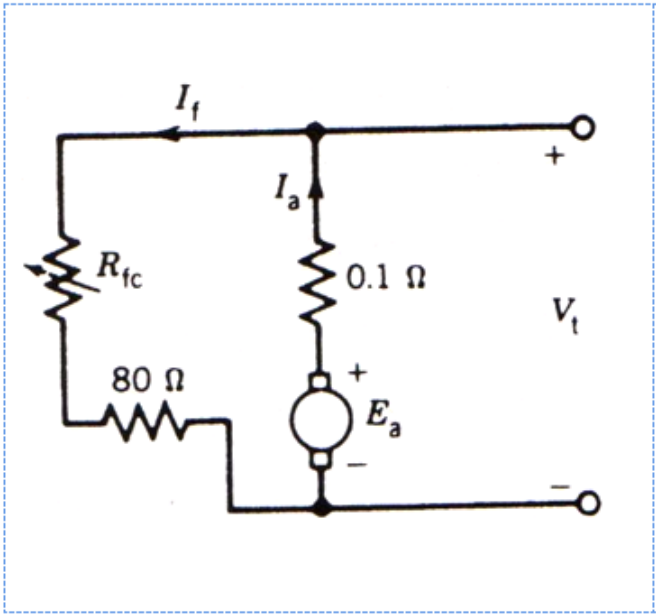
نحوه پیدایش و ایجاد ولتاژ در ژنراتور DC خود تحریک

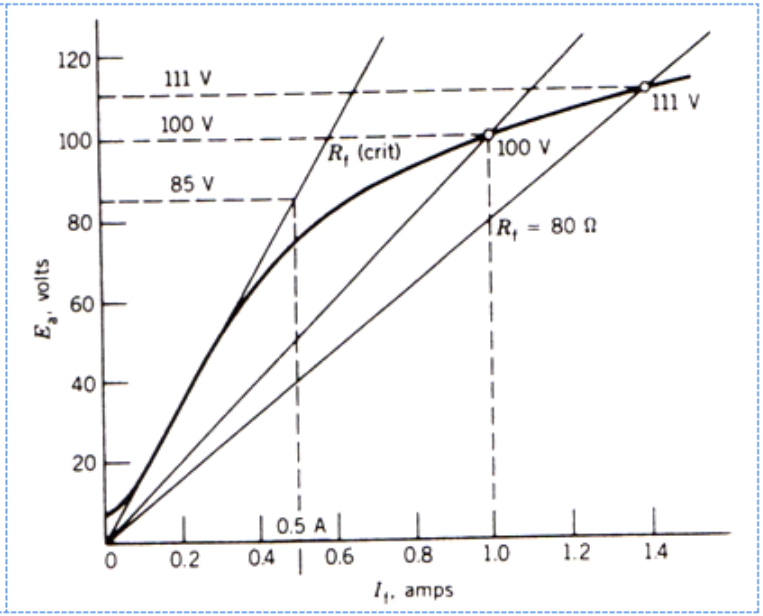
اثر مقاومت تحریک بر روی ولتاژ ژنراتور DC توسط رئوستای مدار تحریک



در تحت مقاومتی چون R_{f3} منحنی مغناطیس شوندگی مماس بر خط R_fI_f می گردد. این شرایط از نظر ولتاژ شرایط ناپایدار محسوب می شود. به مقاومت R_{f3} مقاومت بحرانی نیز گفته می شود. اگر مقاومت مدار تحریک از R_{f3} بیشتر شود (مثلا R_{f4}) ولتاژ حاصله بسیار ناچیز خواهد بود.

مثال : یک ژنراتور DC شنت ۱۲ کیلو واتی ، ۱۰۰ ولتی و ۱۰۰۰ دور در دقیقه ای مفروض است. این ماشین به صورت ژنراتور DC شنت در حالت بی باری مورد بهره برداری قرار می گیرد.





الف : حداکثر ولتاژی که ژنراتور می تواند تولید کند چقدر است.

ب : مقاومت رئوستای مدار تحریک را طوری حساب کنید تا ولتاژ اسمی در پایانه ماشین ظاهر شود (R_{fc}).

ج : مقاومت بحرانی مدار تحریک را به دست آورید.

الف : حداکثر ولتاژ موقعی پدید می آید که $R_{fc} = 0$ باشد یعنی فقط مقاومت واقعی مدار تحریک در سیستم عمل نماید ($R_f = R_{fw}$). با توجه به شکل خط $R_f I_f = R_{fw} I_f = 80\ I_f$ را رسم می کنیم

پس از شکل داریم :

$$E_a = 111 \text{ ولت}$$

ب : به سهولت داریم :

$$V_t = E_a - I_a R_a \approx E_a = 100V$$

با توجه به شکل داریم :

$$I_f = 1A$$

$$R_f = \frac{100}{1} = 100\Omega = R_{fw} + R_{fc}$$

$$R_{fc} = 100 - 80 = 20\Omega$$

ج : برای پیدا کردن مقاومت بحرانی خطی رسم می کنیم که بر قسمت خطی منحنی مغناطیس شوندگی منطبق شود. پس :

$$R_{f(crit)} = \frac{85}{0.5} = 170\Omega$$

$$R_{fc} = 170 - 80 = 90\Omega$$

مشخصه ولتاژ –جریان

$$E_a = V_t + I_a R_a$$

$$E_a = K_a \varphi \omega_m = I_f \text{ تابع}$$

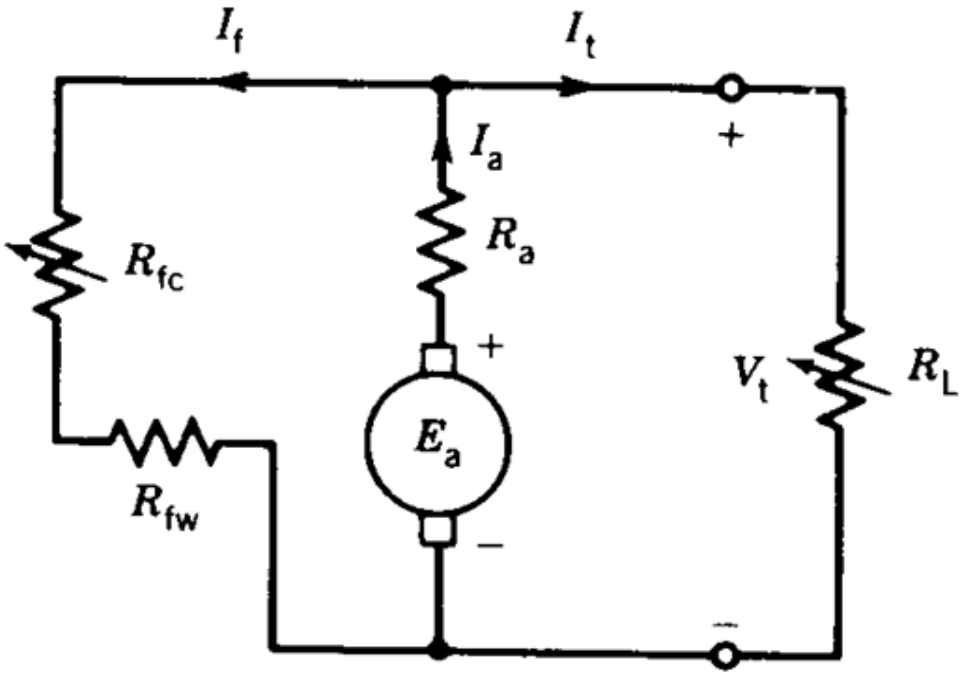
$$V_t = I_f (R_{fw} + R_{fr})$$

$$V_t = I_L R_L$$

$$I_a = I_f + I_L$$

$$I_L = I_t$$

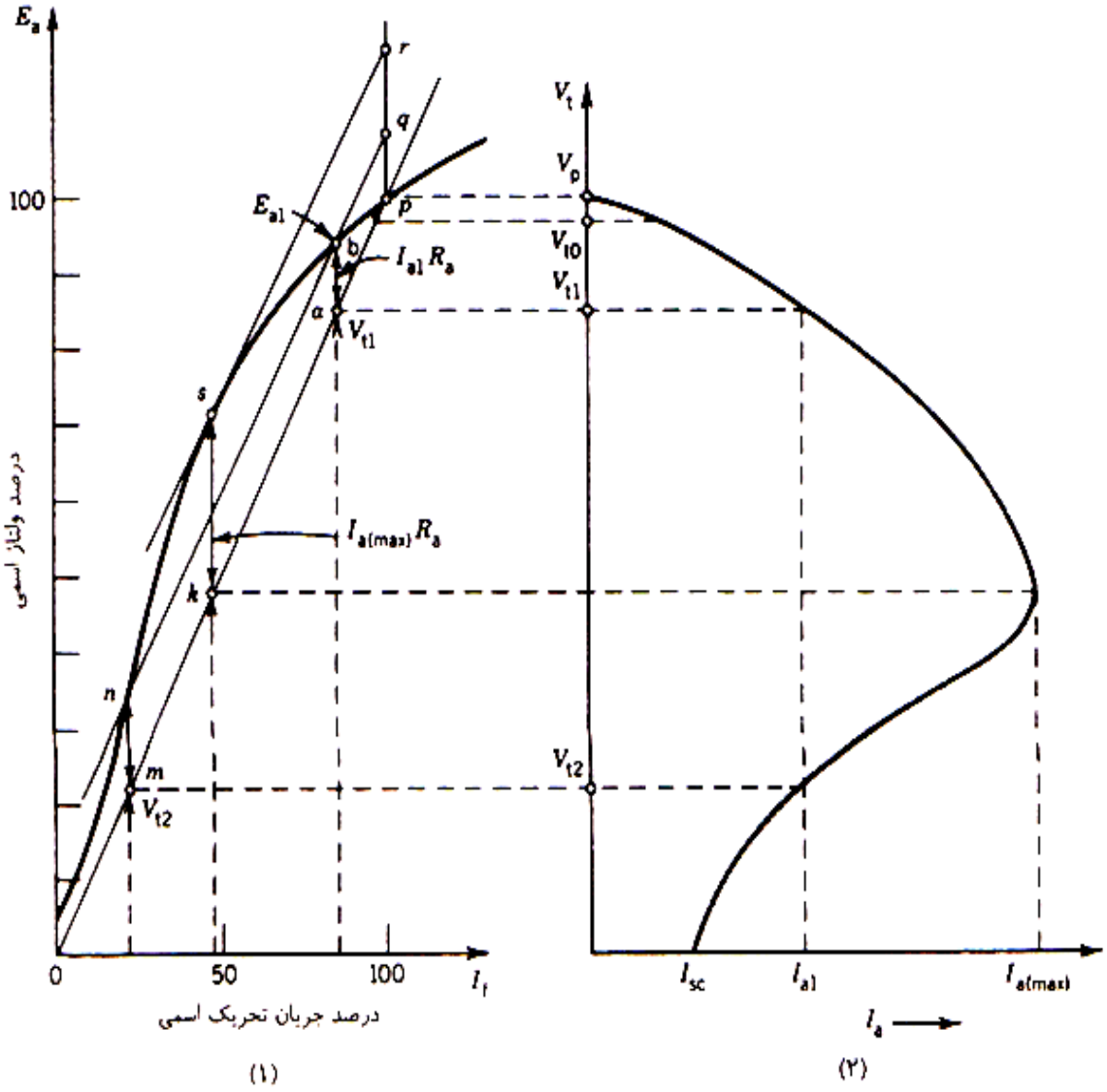
معادلات عملکرد ژنراتور در شرایط ماندگار (مانا)



مدار معادل ژنراتور DC شنت خود تحریک در حالت بارداری

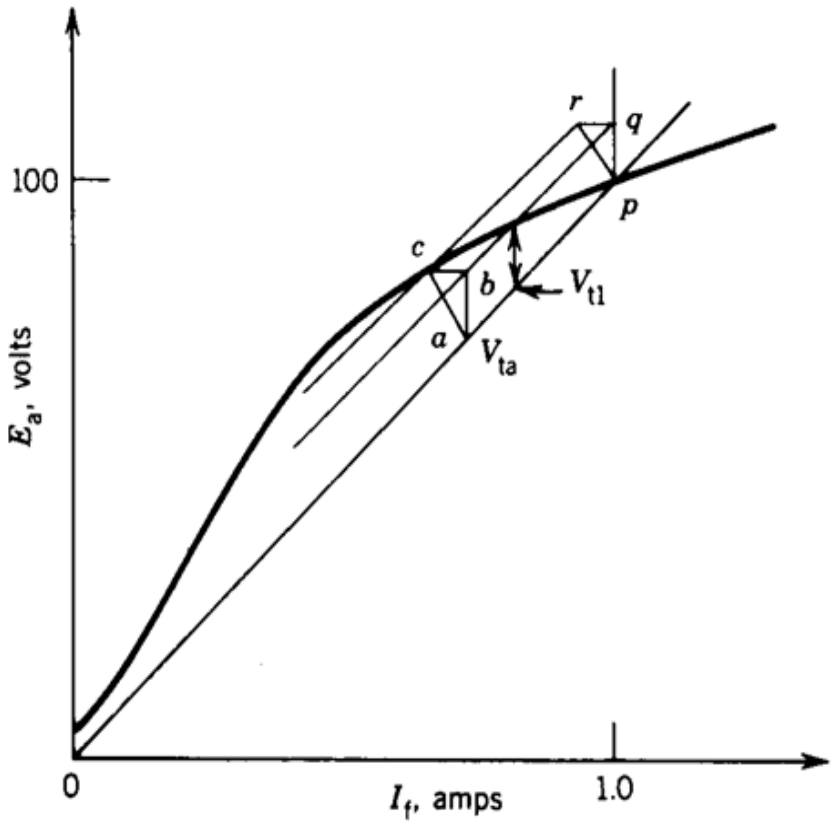
بدون عکس العمل آرمیچر

- مشخصه ولتاژ –جریان ژنراتور DC شنت از منحنی مغناطیس شوندگی و خط مدار تحریک (R_fI_f) حاصل می شود. فاصله عمودی منحنی مغناطیس شوندگی و خط مدار تحریک، افت ولتاژ R_aI_a را مشخص می سازد.
- برای هر نقطه مربوط به ولتاژ پایانه ماشین (مثلا V_{tl}) جریان آرمیچر (I_{al}) را از افت ولتاژ R_aI_{al} به دست آورید. فی المثل می توان گفت فاصله بین E_{al} و V_{tl} معادل R_aI_{al} است. با داشتن R_a می توان I_{al} را به دست آورد.



با عکس العمل آرمیچر

در حالتی که از آرمیچر جریان می گذرد با افت ولتاژ R_aI_a روبرو هستیم. اگر عکس العمل آرمیچر را در نظر بگیریم، E_a نیز کاهش می یابد، لذا ولتاژ پایانه ماشین سریعتر سقوط می کند.



- **دراین شکل، pq مربوط به افت ولتاژ آرمیچر در جریان خاص I_a باشد (R_aI_a). اگر عکس العمل آرمیچر وجود نداشته باشد، ولتاژ پایانه ماشین V_{tl} خواهد بود (چرا؟)**
- **گیریم qr معادل $I_{f(AR)}$ نمایانگر جریان معادلی در مدار تحریک است که عکس العمل آرمیچر را تحت جریان I_a مدل می کند.**
- **حال خط rc موازی op را رسم می کنیم تا منحنی مغناطیس شوندگی را در نقطه c قطع کند. حال از c خطی موازی rp رسم کرده تا خط مدار تحریک را در نقطه a قطع کند. سپس خط cb موازی rq و خط ab موازی pq را رسم می کنیم، تا مثلث abc متشابه rpq گردد. در این حالت، در تحت همان جریان آرمیچر (I_a) ولتاژ پایانه ژنراتور در هنگام منظور کردن اثر آرمیچر معادل V_{ta} خواهد بود.**

مثال

ماشین DC مورد بحث در مثال قبل:

الف : در شرایط بی باری ولتاژ پایانه را ۱۰۰ ولت تنظیم می کنیم. ولتاژ پایانه ماشین در دربار اسمی را حساب کنید. از عکس العمل آرمیچر صرف نظر کنید.

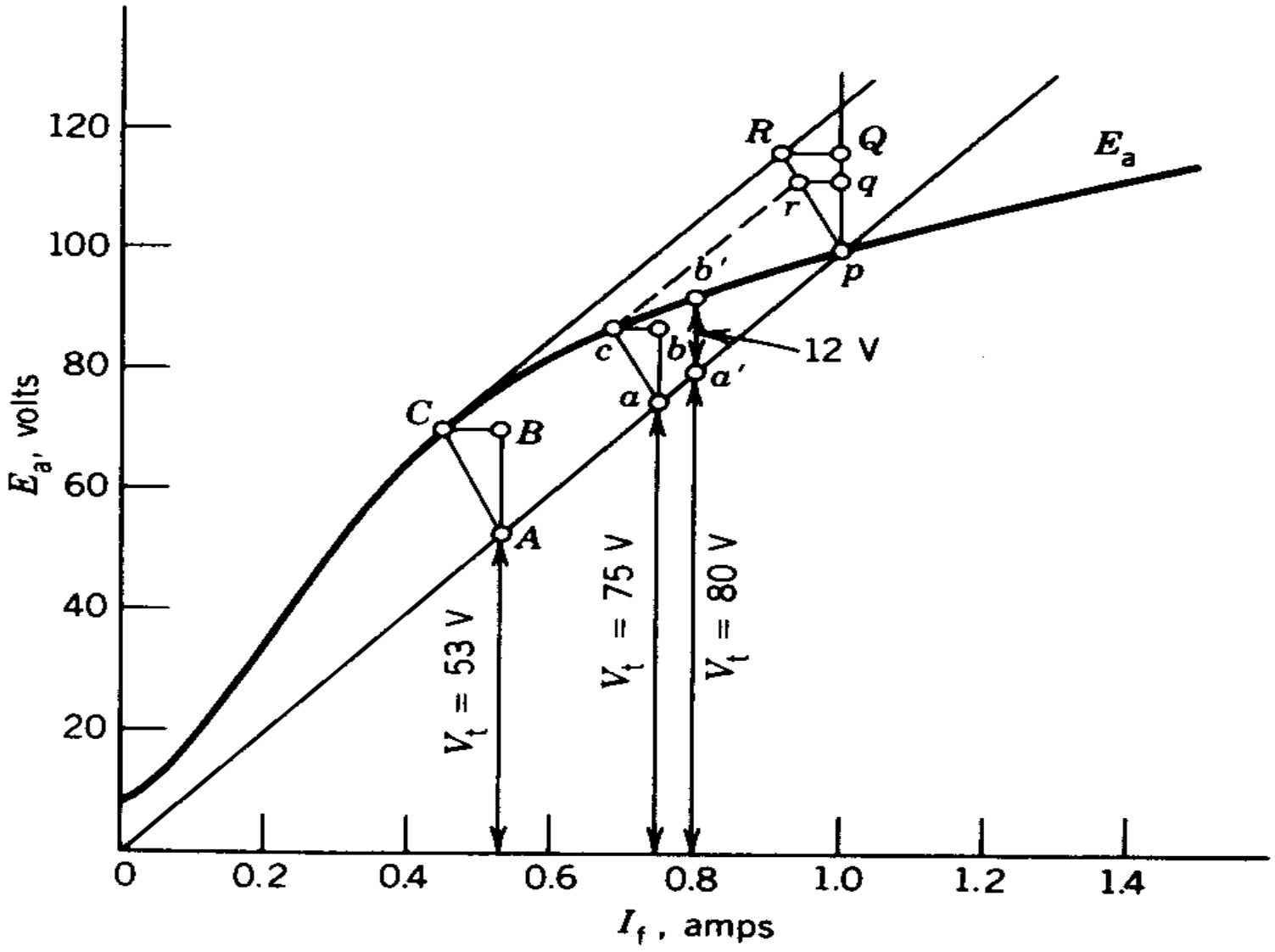
ب : فرض الف را تکرار کنید و اثر عکس العمل آرمیچر از دیدگاه مدار تحریک را ۰/۰۶ آمپر بگیرید.

یعنی : $I_{f(AR)} = 0.06A$

ج : حداکثر جریان آرمیچر که می تواند تحویل شود چقدر است و تحت چه ولتاژی حاصل می گردد.

$I_{f(AR)}$ را متناسب با I_a بگیرید.

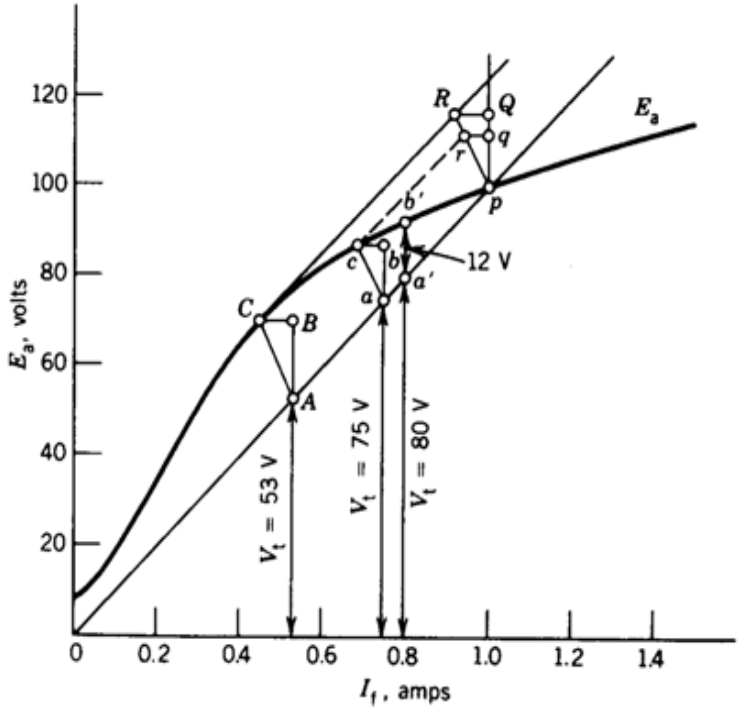
د : جریان اتصال کوتاه ژنراتور را حساب کنید.


120
100
80
60
40
20
E_a, volts
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
I_f, amps
E_a
R
Q
q
r
p
b′
c
b
a′
a
C
B
A
12 V
V_t = 53 V
V_t = 75 V
V_t = 80 V

الف : شکل بالا را در نظر می گیریم و خط op را طوری رسم می کنیم تا منحنی مغناطیس شوندگی را در ۱۰۰ ولت قطع کنید. به سهولت داریم :

$$I_a|_{F_L} = 120A \qquad R_a I_a = 120 \times 0.1 = 12\,V = pq$$

از نقطه q خطی موازی op رسم کرده تا نقطه b´ حاصل شود. a´ b´ همان R_aI_a یا ۱۲ ولت است و با توجه به شکل به سهولت داریم :



$$V_t = 80 \text{ ولت}$$

ب : مثلث pqr را این چنین می سازیم :

$$pq = 12 \text{ ولت}$$

$$qr = 0.06 \text{ آمپر}$$

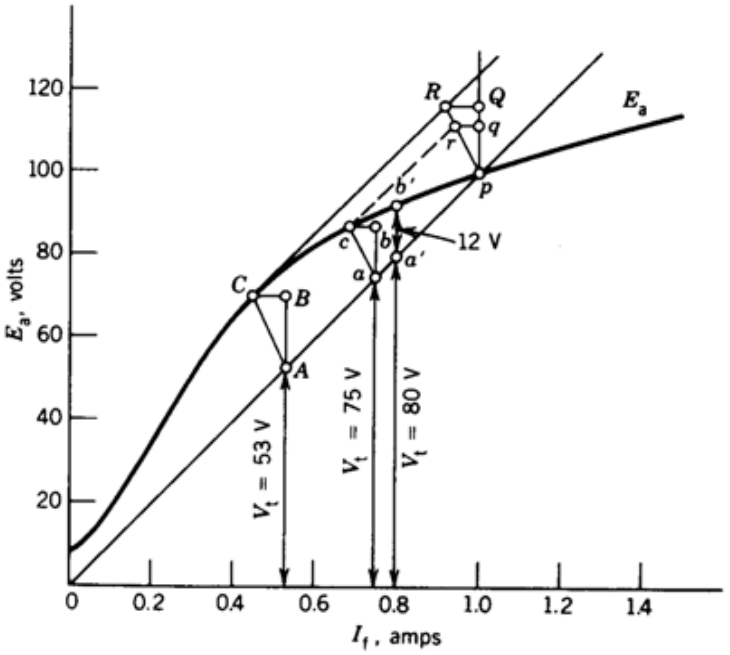
حال مثلث متشابهی هم چون abc می سازیم (چگونه؟) با توجه به شکل به سهولت داریم :

$$V_t = 75 \text{ ولت}$$

ج : خطی موازی خط op رسم می کنیم که مماس بر منحنی مغناطیس شوندگی باشد. خط pr را ادامه داده تا این مماس را در R قطع کند. حال از R خطی موازی rq رسم می کنیم تا pq را در Q قطع کند و مثلث PRQ شکل گیرد. در نقطه C مثلثی متشابه PRQ می سازیم. مثلث ABC بزرگترین مثلثی است که می توان در ناحیه بین منحنی مغناطیس شوندگی و خط تحریک ساخت.

$$QR = BC = I_{f(AR)} \qquad PQ = AB = R_a I_a \text{(افت ولتاژ)}$$

به سهولت داریم : $I_a R_a = AB = 17V$ در نتیجه: $V_t = 53V$ و $I_a = \frac{17}{0.1} = 170A$



د : در حالت اتصال کوتاه داریم $I_f = 0$ و $V_t = 0$

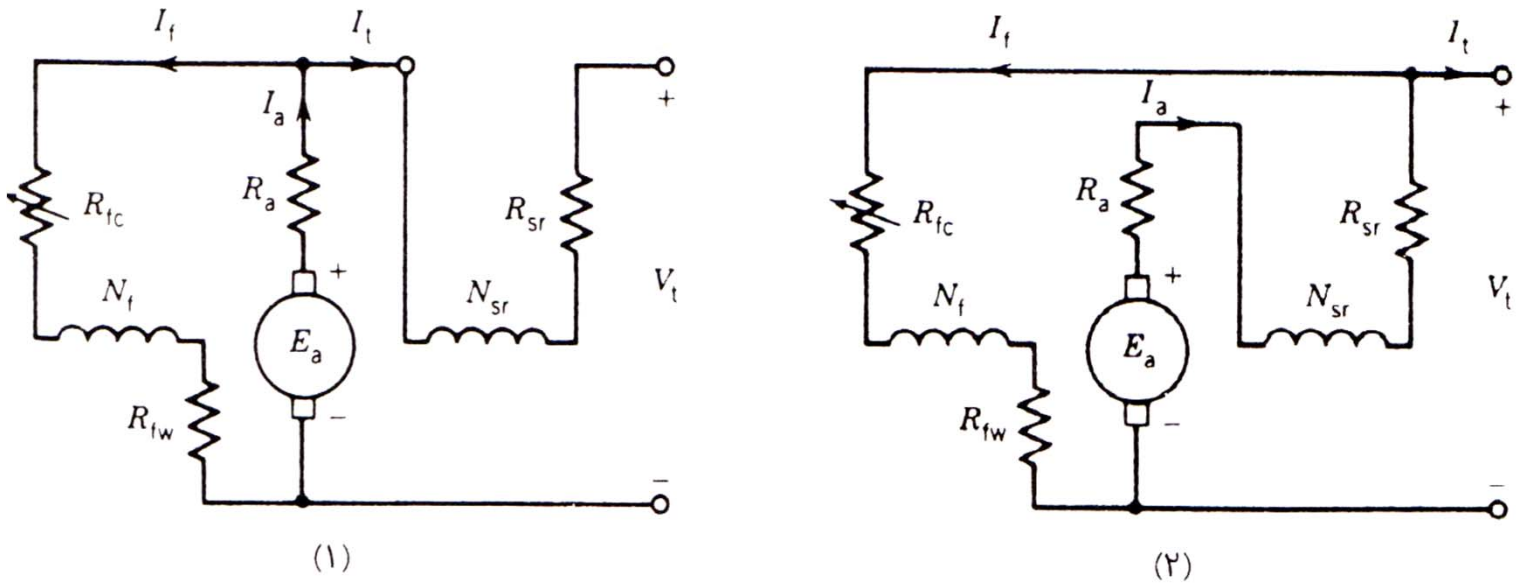
در این صورت پس ماند مغناطیسی باعث ایجاد E_a می گردد. پس : $E_a = E_r = 6V$

$$I_a R_a = 6V$$

$$I_a = \frac{6}{0.1} = 60A$$

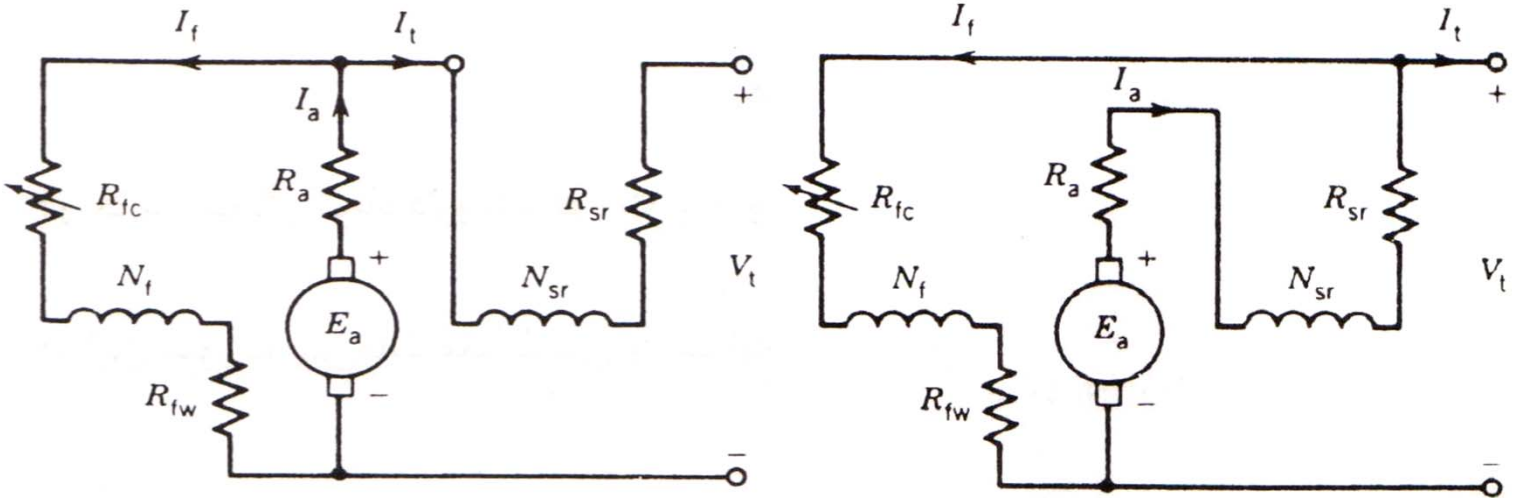
ژنراتور DC کمپوند

- در بسیاری از کاربردها در هنگام تغییر بار نیاز به ولتاژ پایانه ثابت داریم.
- اما در ژنراتورهای DC شنت با افزایش جریان بار، ولتاژ پایانه (V_t) سقوط کرده و در نتیجه I_f کم می شود. کم شدن I_f میزان E_a را کاهش می دهد که خود V_t را بیشتر کاهش می دهد. علاوه بر اینها عکس العمل آرمیچر نیز سقوط V_t را شدت می بخشد.
- برای جبران افت ولتاژ آرمیچر I_aR_a و عکس العمل آرمیچر به غیر از سیم پیچی تحریک شنت، سیم پیچی تحریک دیگری بر روی قطب ها جاسازی می کند که به سیم پیچی تحریک سری معروف است.
- این سیم پیچی با آرمیچر به صورت سری بسته می شود. این سری آمپر دوری پدید می آورد (mmf) که می تواند با توجه به نیاز شار قطب را افزایش یا کاهش دهد. ژنراتورهای DC که شامل دور سیم پیچی تحریک سری و تحریک شنت هستند را ژنراتورهای DC کمپوند (مختلط) گویند.



مدار معادل ژنراتور DC کمپوند ۱- شنت کوتاه ۲- شنت بلند

- **سیم پیچی تحریک شنت به عنوان سیم پیچی اصلی تحریک محسوب می شود و بخش اعظم mmf را تشکیل می دهد. تعداد حلقه های آن زیاد است و سطح مقطع هادی تشکیل دهنده آن کوچک می باشد. لذا مقاومت این سیم پیچی نسبتاً بزرگ است و جریان کمی از خود عبور می دهد.**
- **سیم پیچی سری حاوی تعداد حلقه های کمی است و سطح مقطع هادی تشکیل دهنده آن زیاد است. لذا مقاومت این سیم نسبتاً کم است و تقریباً تمامی جریان آرمیچر از آن عبور می کند. mmf حاصل از این سیم پیچی افت R_aI_a و عکس العمل آرمیچر را جبران می نماید.**



در ژنراتور DC کمپوند شنت بلند، سیم پیچی آرمیچر و سیم پیچی تحریک سری با هم سری شده است و این مجموعه با سیم پیچی شنت موازی شده است.	در ژنراتور DC کمپوند شنت کوتاه، سیم پیچی شنت با سیم پیچی آرمیچر موازی است
$V_t = E_a - I_a(R_a + R_{sr})$ $I_t = I_a - I_f$	$V_t = E_a - I_aR_a - I_tR_{sr}$ $I_t = I_a - I_f$

$$I_f = \frac{V_t}{R_{fw} + R_{fc}}$$

اگر سیستم را از نظر مغناطیسی خطی در نظر بگیریم داریم:

$$E_a = K_a(\varphi_{sh} \pm \varphi_{sh})\, W_m$$

φ_{sh} شار حاصله توسط هر قطب بوسیله سیم پیچی تحریک شنت بوده و φ_{sr} شار ایجاد شده توسط هر قطب بوسیله سیم پیچی تحریک سری است. هرگاه این دو شار یکدیگر را تقویت کنند ماشین DC کمپوند اعم از شنت بلند و کوتاه را اضافی نامند. (علامت +). اگر این دو شار یکدیگر را تضعیف کنند، ماشین DC کمپوند اعم از شنت بلند و شنت کوتاه را تفاضلی یا تفاضلی گویند (علامت −).

mmf هر دو سیم پیچی تحریک، اعم از شنت و سری به روی یک مدار مغناطیسی عمل می کند.

لذا کل mmf موثر هر قطب به قرار زیر است:

$$F_{eff} = F_{sh} \pm F_{sr} - F_{AR}$$

$$N_f I_{f(eff)} = N_f I_f \pm N_{sr} I_{sr} - N_f I_{f(AR)}$$

N_f تعداد حلقه ها یا دورهای سیم پیچی شنت در هر قطب بوده و N_{sr} تعداد حلقه ها یا دورهای سیم پیچی سری در هر قطب می باشد. F_{AR} برابر mmf ناشی از عکس العمل آرمیچر است.داریم:

$$I_{f(eff)} = I_f \pm \frac{Nsr}{Nf} I_{sr} - I_{f(AR)}$$

در حالت کمپوند اضافی به سه مشخصه دست می یابیم.

۱. مشخصه فوق کمپوند: در این حالت ، ولتاژ پایانه (V_t) با افزایش جریان آرمیچر (I_a) فزونی می یابد

۲. مشخصه زیر کمپوند: در این حالت ، V_t با افزیش I_a اساساً ثابت باقی می ماند.

۳. مشخصه کمپوند مسطح یا کمپوند تخت: در این حالت ، V_t با افزایش I_a سقوط می کند

- درجه کمپوندی یک ماشین همان تعداد حلقه ها یا دورهای سیم پیچی سری است.
- در حالت کمپوند نقصانی ولتاژ پایانه ماشین (V_t) در اثر افزایش I_a سریعاً سقوط می کند. در حقیقت در این حالت جریان آرمیچر اساساً ثابت می ماند. لذا از این ماشین ها برای مقاصد جوشکاری استفاده می شود.
- به طور خلاصه می توان گفت که ژنراتورهای DC کمپوند کلاً بر دو نوع اند:

شنت کوتاه

شنت بلند

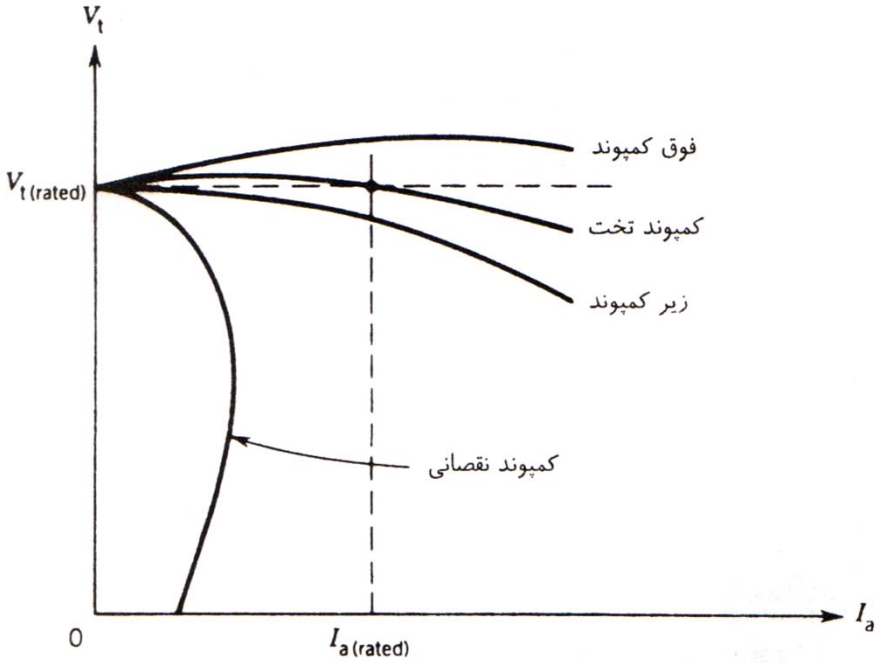
- ژنراتورهای DC کمپوند شنت کوتاه یا شنت بلند بر دو نوع اند:

کمپوند اضافی

کمپوند نقصانی یا تفاضلی

- ژنراتورهای کمپوند DC کمپوند شنت کوتاه یا شنت بلند از نوع اضافی از نقطه نظر بهره برداری به سه دسته تقسیم می شوند:

فوق کمپوند، زیر کمپوند، کمپوند مسطح یا کمپوند تخت



مشخصه I - V (ولتاژ - جریان) در ژنراتورهای DC کمپوند

- در حالت کمپوند اضافی به سه مشخصه دست می یابیم.

۱. مشخصه فوق کمپوند: در این حالت ، ولتاژ پایانه ($\mathbf{V_t}$) با افزایش جریان آرمیچر ($\mathbf{I_a}$) فزونی می یابد

۲. مشخصه زیر کمپوند: در این حالت ، $\mathbf{V_t}$ با افزیش $\mathbf{I_a}$ اساساً ثابت باقی می ماند.

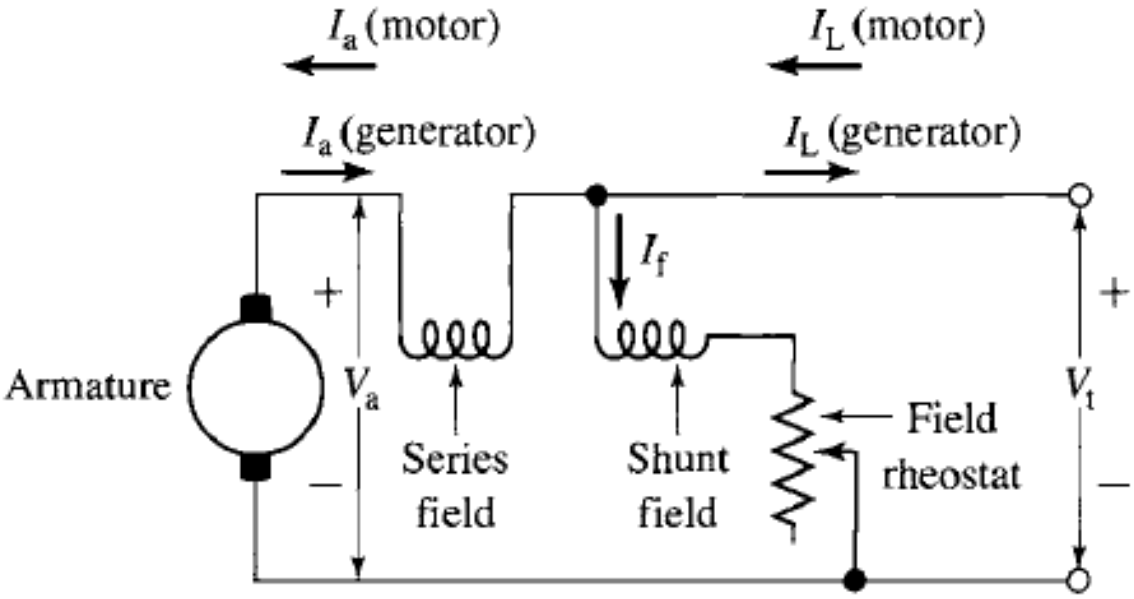
۳. مشخصه کمپوند مسطح یا کمپوند تخت: در این حالت ، $\mathbf{V_t}$ با افزایش $\mathbf{I_a}$ سقوط می کند

- درجه کمپوندی یک ماشین همان تعداد حلقه ها یا دورهای سیم پیچی سری است.
- در حالت کمپوند نقصانی ولتاژ پایانه ماشین ($\mathbf{V_t}$) در اثر افزایش $\mathbf{I_a}$ سریعاً سقوط می کند. در حقیقت در این حالت جریان آرمیچر اساساً ثابت می ماند. لذا از این ماشین ها برای مقاصد جوشکاری استفاده می شود.

EXAMPLE 7.3

A 100-kW, 250-V, 400-A, long-shunt compound generator has an armature resistance (including brushes) of 0.025 Ω, a series-field resistance of 0.005 Ω, and the magnetization curve of Fig. 7.14. There are 1000 shunt-field turns per pole and three series-field turns per pole. The series field is connected in such a fashion that positive armature current produces direct-axis mmf which adds to that of the shunt field.

Compute the terminal voltage at rated terminal current when the shunt-field current is 4.7 A and the speed is 1150 r/min. Neglect the effects of armature reaction.



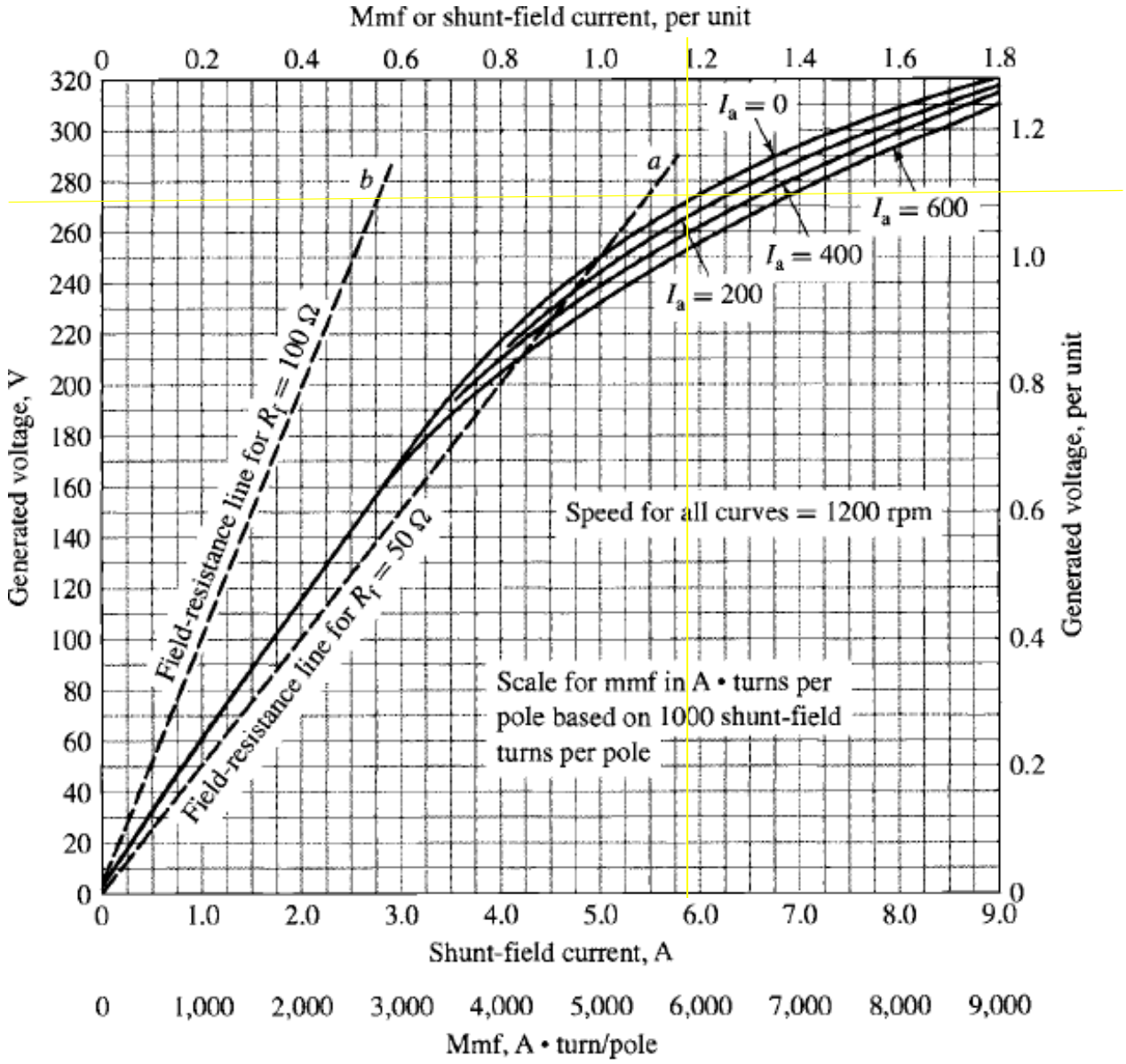


Figure 7.14 Magnetization curves for a 250-V 1200-r/min dc machine. Also

■ Solution

As is shown in Fig. 7.12, for a long-shunt connection the armature and series field-currents are equal. Thus

$$I_s = I_a = I_L + I_f = 400 + 4.7 = 405 \text{ A}$$

From Eq. 7.21 the main-field gross mmf is

$$\text{Gross mmf} = I_f + \left(\frac{N_s}{N_f}\right) I_s$$

$$= 4.7 + \left(\frac{3}{1000}\right) 405 = 5.9 \quad \text{equivalent shunt-field amperes}$$

By examining the $I_a = 0$ curve of Fig. 7.14 at this equivalent shunt-field current, one reads a generated voltage of 274 V. Accordingly, the actual emf at a speed of 1150 r/min can be found from Eq. 7.23

$$E_a = \left(\frac{n}{n_0}\right) E_{a0} = \left(\frac{1150}{1200}\right) 274 = 263 \text{ V}$$

Then

$$V_t = E_a - I_a(R_a + R_s) = 263 - 405(0.025 + 0.005) = 251 \text{ V}$$

EXAMPLE 7.4

Consider again the long-shunt compound dc generator of Example 7.3. As in Example 7.3, compute the terminal voltage at rated terminal current when the shunt-field current is 4.7 A and the speed is 1150 r/min. In this case however, include the effects of armature reaction.

As calculated in Example 7.3, $I_s = I_a = 400$ A and the gross mmf is equal to 5.9 equivalent shunt-field amperes. From the curve labeled $I_a = 400$ in Fig. 7.14 (based upon a rated terminal current of 400 A), the corresponding generated emf is found to be 261 V (as compared to 274 V with armature reaction neglected). Thus from Eq. 7.23, the actual generated voltage at a speed of 1150 r/min is equal to

$$E_a = \left(\frac{n}{n_0}\right) E_{a0} = \left(\frac{1150}{1200}\right) 261 = 250 \text{ V}$$

Then

$$V_t = E_a - I_a(R_a + R_s) = 250 - 405(0.025 + 0.005) = 238 \text{ V}$$

To counter the effects of armature reaction, a fourth turn is added to the series field winding of the dc generator of Examples 7.3 and 7.4, increasing its resistance to 0.007 Ω. Repeat the terminal-voltage calculation of Example 7.4.

■ Solution

As in Examples 7.3 and 7.4, $I_s = I_a = 405$ A. The main-field mmf can then be calculated as

$$\text{Gross mmf} = I_f + \left(\frac{N_s}{N_f}\right) I_s = 4.7 + \left(\frac{4}{1000}\right) 405$$
$$= 6.3 \quad \text{equivalent shunt-field amperes}$$

From the $I_a = 400$ curve of Fig. 7.14 with an equivalent shunt-field current of 6.3 A, one reads a generated voltage 269 V which corresponds to an emf at 1150 r/min of

$$E_a = \left(\frac{1150}{1200}\right) 269 = 258 \text{ V}$$

The terminal voltage can now be calculated as

$$V_t = E_a - I_a(R_a + R_s) = 258 - 405(0.025 + 0.007) = 245 \text{ V}$$

EXAMPLE 7.6

A 100-hp, 250-V dc shunt motor has the magnetization curves (including armature-reaction effects) of Fig. 7.14. The armature circuit resistance, including brushes, is 0.025 Ω. No-load rotational losses are 2000 W and the stray-load losses equal 1.0% of the output. The field rheostat is adjusted for a no-load speed of 1100 r/min.

a. As an example of computing points on the speed-load characteristic, determine the speed in r/min and output in horsepower (1 hp = 746 W) corresponding to an armature current of 400 A.
b. Because the speed-load characteristic observed to in part (a) is considered undesirable, a *stabilizing winding* consisting of 1-1/2 cumulative series turns per pole is to be added. The resistance of this winding is assumed negligible. There are 1000 turns per pole in the shunt field. Compute the speed corresponding to an armature current of 400 A.

■ Solution

a. At no load, $E_a = 250$ V. The corresponding point on the 1200-r/min no-load saturation curve is

$$E_{a0} = 250\left(\frac{1200}{1100}\right) = 273 \text{ V}$$

for which $I_f = 5.90$ A. The field current remains constant at this value.

At $I_a = 400$ A, the actual counter emf is

$$E_a = 250 - 400 \times 0.025 = 240 \text{ V}$$

From Fig. 7.14 with $I_a = 400$ and $I_f = 5.90$, the value of E_a would be 261 V if the speed were 1200 r/min. The actual speed is then found from Eq. 7.23

$$n = 1200\left(\frac{240}{261}\right) = 1100 \text{ r/min}$$

The electromagnetic power is

$$E_a I_a = 240 \times 400 = 96 \text{ kW}$$

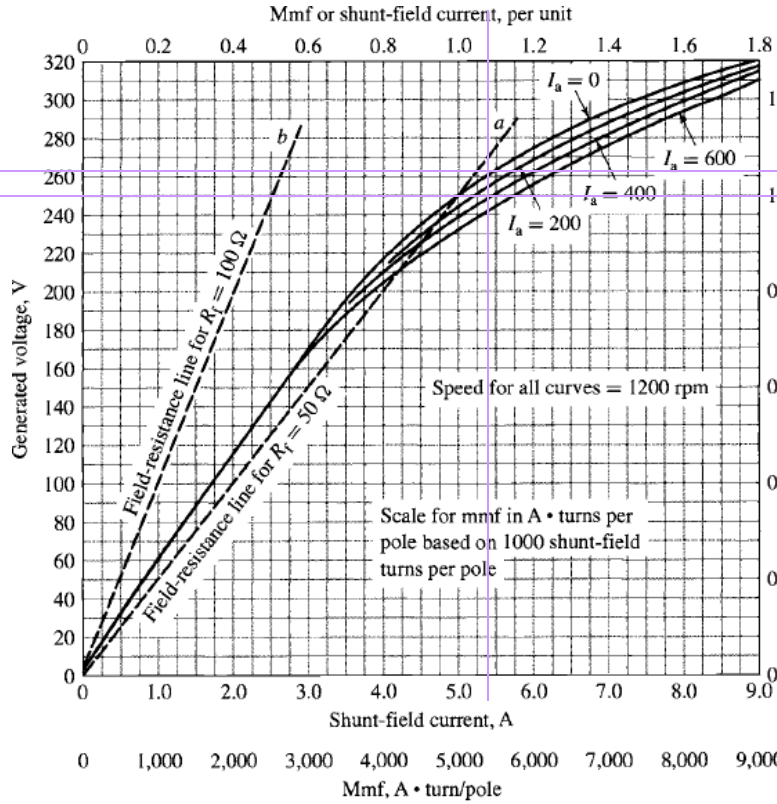


Figure 7.14 Magnetization curves for a 250-V 1200-r/min dc machine. Also

Deduction of the rotational losses leaves 94 kW. With stray load losses accounted for, the power output P_0 is given by

$$94\,\text{kW} - 0.01\,P_0 = P_0$$

or

$$P_0 = 93.1\,\text{kW} = 124.8\,\text{hp}$$

Note that the speed at this load is the same as at no load, indicating that armature-reaction effects have caused an essentially flat speed-load curve.

b. With $I_f = 5.90$ A and $I_s = I_a = 400$ A, the main-field mmf in equivalent shunt-field amperes is

$$5.90 + \left(\frac{1.5}{1000}\right) 400 = 6.50\,\text{A}$$

From Fig. 7.14 the corresponding value of E_a at 1200 r/min would be 271 V. Accordingly, the speed is now

$$n = 1200\left(\frac{240}{271}\right) = 1063\ \text{r/min}$$

The power output is the same as in part (a). The speed-load curve is now drooping, due to the effect of the stabilizing winding.

ژنراتور DC مورد بحث را با تعبیه سیم پیچی تحریک سری به صورت کمپوند در می آوریم. می خواهیم در بی باری و بار کامل وولتاژ پایانه ماشین ۱۰۰ ولت باشد و آنرا به صورت کمپوند اضافی مورد بهره برداری قرار می دهیم. اگر سیم پیچی تحریک شنت ۱۲۰۰ حلقه باشد (سیم پیچ ۱۲۰۰ دوری)، تعداد دور سیم پیچی تحریک سری را طوری بیابید که تنظیم ولتاژ صفر باشد (ولتای بی باری و بار کامل ۱۰۰ ولت باشد). ماشین را نوع شنت کوتاه در نظر بگیرید و مقاومت سیم پیچی تحریک سری (R_{sr}) را برابر ۰/۰۱ هم منظور نمایید.

$$V_t I_{NL} = ۱۰۰v \quad \text{و} \quad R = ۱۰۰$$

برای یک ماشین شنت کوتاه داریم:

$$I_a = I_f + I_t \quad \text{پس} \quad ۱۲۰ = I_f + I_t$$

از شکل ماشین شنت کوتاه داریم:

$$I_f R_f = I_t R_{sr} + V_t$$

$$I_f = \frac{V_t + I_t R_{sr}}{R_f} = \frac{100 + I_t \times 0.01}{100}$$

از معادلات داریم:

$$I_f = ۱/۰۱\ A$$

$$I = ۱۱۸/۹۹\ A$$

از شکل داریم:

$$E_a = V_t + I_t R_{sr} + I_a R_a = ۱۰۰ + ۱۱۸/۹۹ \times ۰/۰۱ + ۱۲۰ \times ۰/۱ = ۱۱۳/۲۷$$

از منحنی مغناطیس شوندگی شکل (۴-۲۴ سن) برای تولید E_a=۱۱۳/۲ ولت، جریان تحریک مورد نیاز ۱/۴۵ آمپر است پس:

$$I_{f(eff)} = ۱/۴۵$$

از طرفی داریم:

$$I_{f(eff)} = I_f + \frac{Nsr}{Nf} I_t - I_{f(AR)}$$

$$۱/۴۵ = ۱/۰۱ + \frac{Nsr}{100} \times ۱۱۸/۹۹ - ۰/۰۶$$

$$N_{sr} = ۵/۰۴ \text{ (حلقه ها یا دورهای هر قطب)}$$

A 25-kW, 230-V shunt motor has an armature resistance of 0.11 Ω and a field resistance of 117 Ω. At no load and rated voltage, the speed is 2150 r/min and the armature current is 6.35 A. At full load and rated voltage, the armature current is 115 A and, because of armature reaction, the flux is 6 percent less than its no-load value. What is the full-load speed?

At no load, $E_{a,nl} = 230 - 6.35 \times 0.11 = 229.3$ V. At full load, $E_{a,fl} = 230 - 115 * 0.11 = 217.4$ V. But, $E_a \propto n\Phi$, thus

$$n_{fl} = n_{nl}\left(\frac{E_{a,fl}}{E_{a,nl}}\right)\left(\frac{\Phi_{nl}}{\Phi_{fl}}\right) = 2150\left(\frac{217.4}{229.3}\right)\left(\frac{1}{0.94}\right) = 2168 \text{ r/min}$$

A 15-kW, 250-V, 1150 r/min shunt generator is driven by a prime mover whose speed is 1195 r/min when the generator delivers no load. The speed falls to 1140 r/min when the generator delivers 15 kW and may be assumed to decrease in proportion to the generator output. The generator is to be changed into a short-shunt compound generator by equipping it with a series field winding which will cause its voltage to rise from 230 V at no load to 250 V for a load of 61.5 A. It is estimated that the series field winding will have a resistance of 0.065 Ω. The armature resistance (including brushes) is 0.175 Ω. The shunt field winding has 500 turns per pole.

To determine the necessary series-field turns, the machine is run as a separately-excited generator and the following load data are obtained:

Armature terminal voltage = 254 V

Armature current = 62.7 A

Field current = 1.95 A

Speed = 1140 r/min

The magnetization curve at 1195 r/min is as follows:

E_a, V	230	240	250	260	270	280
I_f, A	1.05	1.13	1.25	1.44	1.65	1.91

Determine

a. the armature reaction in equivalent demagnetizing ampere-turns per pole for $I_a = 62.7$ A and

b. the necessary number of series-field turns per pole.

part (a): From the load data, the generated voltage is equal to $254 + 62.7 \times 0.175 = 265$ A. From the magnetizing curve (using the 'spline()' function of MATLAB), the corresponding field current is 1.54 A. Hence the demagnetizing effect of this armature current is equal to $(1.95 - 1.54)500 = 204$ A-turns/pole.

part (b): At the desired operating point, the generator output power will be 250 V $\times$ 61.5 A = 15.4 kW. Therefore, the motor speed will be

$$n = 1195 - 55\left(\frac{15.4}{15}\right) = 1139 \text{ r/min}$$

Because the machine terminal voltage at no load must equal 230 V, from the magnetizing curve we see that the shunt field under this operating condition

must equal 1.05 A and hence the shunt field resistance must be 219 Ω. Hence, under this loading condition, with a terminal voltage of 250 V, the armature voltage will be $250 + 61.5 \times 0.065 = 250.8$ V, the shunt field current will equal $250.8/219 = 1.15$ A and thus the armature current will equal $61.5 + 1.15 = 62.7$ A.

The generated voltage can now be calculated to be $250.8 + 62.7(0.175) = 286$ V. The corresponding voltage on the 1195 r/min mag curve will be $E_a = 286(1195/1139) = 285$ V and hence the required net field ampere-turns is (using the MATLAB 'spline()' function) 1042 A-turns. The shunt-field ampere-turns is $1.15 \times 500 = 575$ A-turns, the demagnetizing armature amp-turns are 204 A-turns and hence the required series turns are

$$N_s = \frac{1042 - (575 - 204)}{61.5} = 10.6 \approx 11 \text{ turns}$$

A 230-V dc shunt motor has an armature-circuit resistance of 0.23 Ω. When operating from a 230-V supply and driving a constant-torque load, the motor is observed to be drawing an armature current of 60 A. An external resistance of 1.0 Ω is now inserted in series with the armature while the shunt field current is unchanged. Neglecting the effects of rotational losses and armature reaction, calculate

a. the resultant armature current and

b. the fractional speed change of the motor.

part (a): For a constant torque load, changing the armature resistance will not change the armature current and hence $I_a = 60$ A.

part(b):

$$E_a = V_a - R_a I_a$$

Thus, without the added 1.0Ω resistor, $E_a = 216$ V and with it $E_a = 156$ V. Thus,

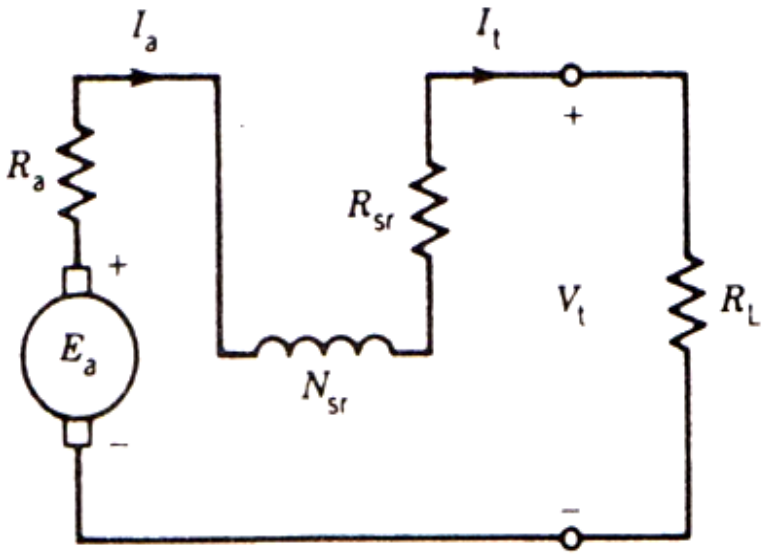
$$\text{Speed ratio} = \frac{156}{216} = 0.72$$

ژنراتور DC سری

در این ماشین ها شار قطب ها را سیم پیچی تولید می کند که با آرمیچر سری بسته سده است.

باید دانست هنگامی شار توسط این سیم پیچی برقرار می گردد که از آرمیچر جریان بگذرد.

لذا باید حتما به پایانه های ماشین بار وصل باشد.



مدار معادل ژنراتور DC سری

$$E_a = V_t + I_a(R_a + R_{sr})$$
$$I_t = I_a$$

When operated from a 230-V dc supply, a dc series motor operates at 975 r/min with a line current of 90 A. Its armature-circuit resistance is 0.11 Ω and its series-field resistance is 0.08 Ω. Due to saturation effects, the flux produced by an armature current of 30 A is 48 percent of that at an armature current of 90 A. Find the motor speed when the armature voltage is 230 V and the armature current is 30 A.

From the given data, the generated voltage at $I_a = 90\text{A}$ and $n(90) = 975$ r/min is

$$E_a(90) = V_a - I_a(R_a + R_s) = 230 - 90(0.11 + 0.08) = 212.9 \text{ V}$$

Similarly, the generated voltage at $I_a = 30$ A is

$$E_a(30) = 230 - 30(0.11 + 0.08) = 224.3 \text{ V}$$

Since $E_a \propto n\Phi$

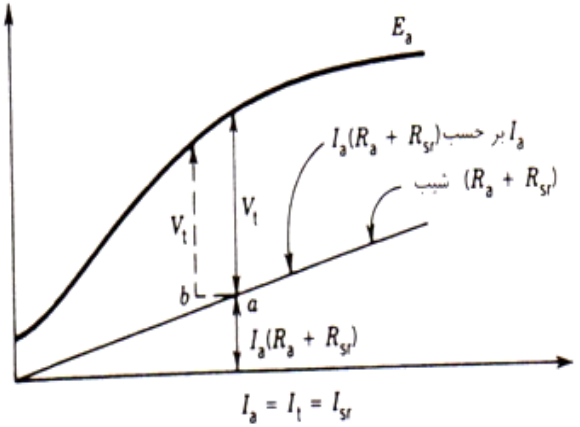
$$\frac{E_a(30)}{E_a(90)} = \left(\frac{n(30)}{n(90)}\right)\left(\frac{\Phi(30)}{\Phi(90)}\right)$$

Making use of the fact that $\Phi(30)/\Phi(90) = 0.48$, we can solve for $n(30)$

$$n(30) = n(90)\left(\frac{E_a(30)}{E_a(90)}\right)\left(\frac{\Phi(90)}{\Phi(30)}\right) = 2140 \text{ r/min}$$

منحنی مغناطیس شوندگی

- برای به دست آوردن مشخصه "ولتاژ– جریان" بر روی شکل روبرو خطی با شیب $R_a + R_{sr}$ رسم می کنیم. این خط نمایانگر افت ولتاژ در $R_a + R_{sr}$ است.
- فاصله عمودی بین منحنی مغناطیس شوندگی و خط افت ولتاژ، ولتاژ پایانه ماشین (V_t) را تحت جریان خاصی از آرمیچر (I_a) نشان می دهد.
- اگر عکس العمل آرمیچر نیز در مد نظر قرار گیرد، ولتاژ پایانه ماشین کمتر خواهد شد و در شکل با خط چین نشان داده شده است. پاره خط ab نمایانگر جریان معادلی از آرمیچر بوده که عکس العمل آرمیچر را مدل می سازد.



منحنی مغناطیس‌شوندگی (E_a برحسب I_a) و $I_a(R_a+R_{sr})$ برحسب I_a در ژنراتور DC سری

پخش توان و بازده (بهره)

یک ماشین DC کمپوند از نوع شنت کوتاه را در نظر می گیریم. در حالت ژنراتوری مطابق شکل داریم:

۱. توان ورودی به سیستم یک توان مکانیکی هست (P_{input} یا P_{shaft})

۲. بخش از این توان ورودی (حدود ۳ تا ۱۵ درصد) صرف تلفات چرخشی (P_{Rot}) می شود.

تلفات چرخشی شامل تلفات اصطکاک، تلفات تهویه و تلفات هسته روتور (هسته آرمیچر) است.

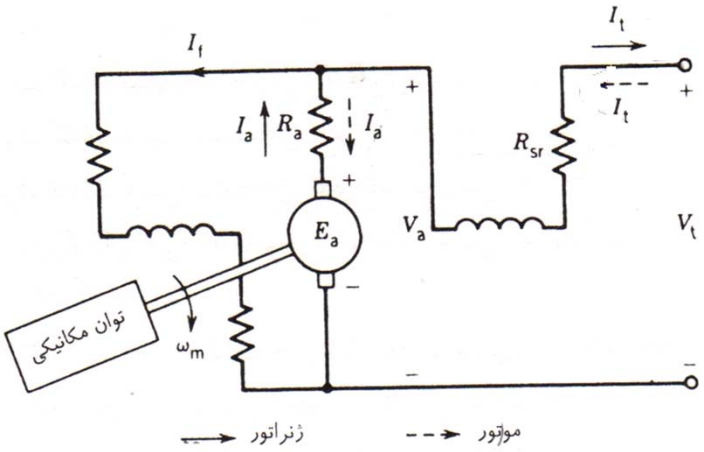
۳. ما به التفاوت توان ورودی و P_{rot} به توان الکتریکی تبدیل می شود و توان الکتریکی حاصله معادل E_aI_a خواهد بود.

۴. بخشی از E_aI_a صرف تلفات مسی آرمیچر یا $R_aI_a^2$ می گردد.

۵. بخشی از E_aI_a صرف تلفات مسی سیم پیچی تحریک شنت و رئوستای آن می گردد.

۶. بخشی از E_aI_a صرف تلفات مسی سیم پیچی تحریک سری می شود.

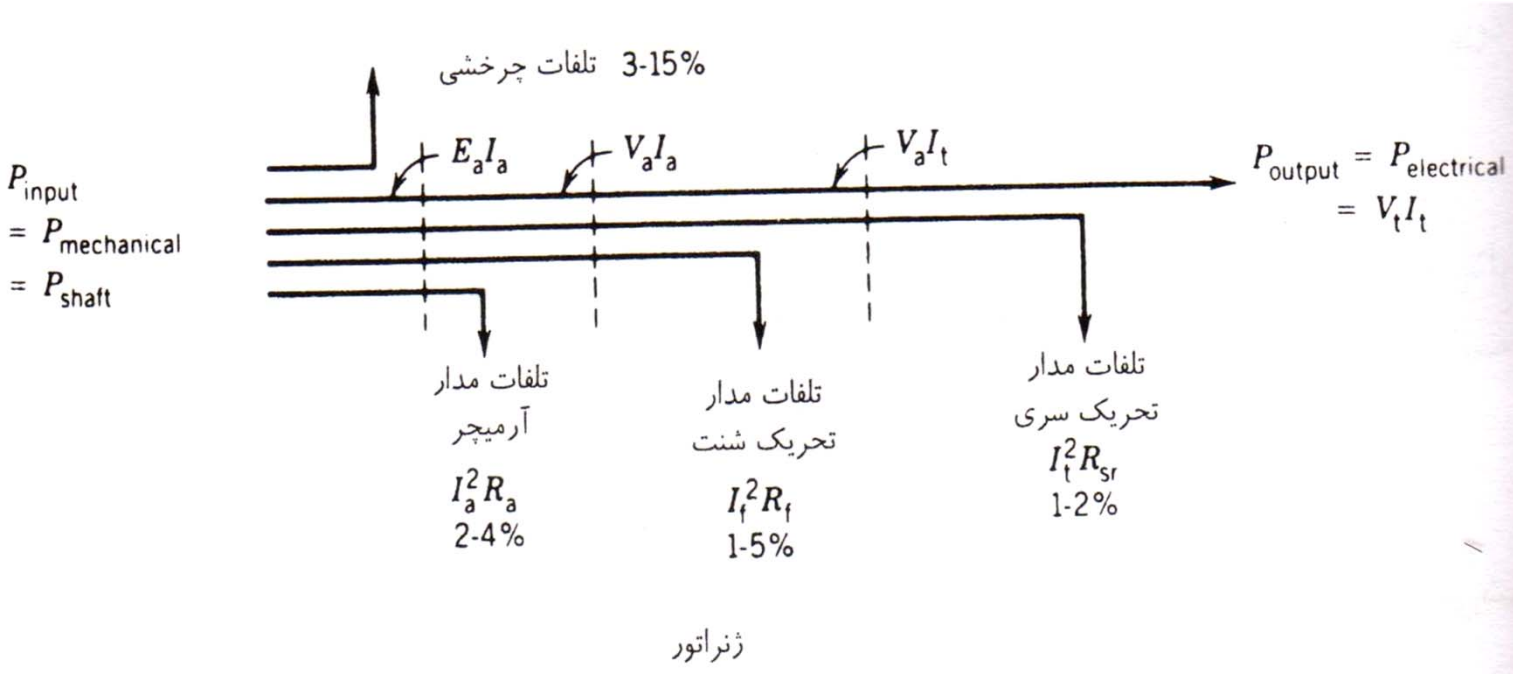
۷. بالاخره آنچه که از E_aI_a باقی می ماند تحویل مصرف کننده می شود که توان خروجی (P_{output})است



شمای ماشین DC کمپوند شنت کوتاه در دو حالت موتوری و ژنراتوری

در شکل زیر درصد تلفات ذکر شده در قبال توان ورودی (P_{input}) محاسبه شده و این درصد به اندازه و حجم ماشین بستگی دارد. بازده (بهره) ماشین DC مورد بحث به قرار زیر است:

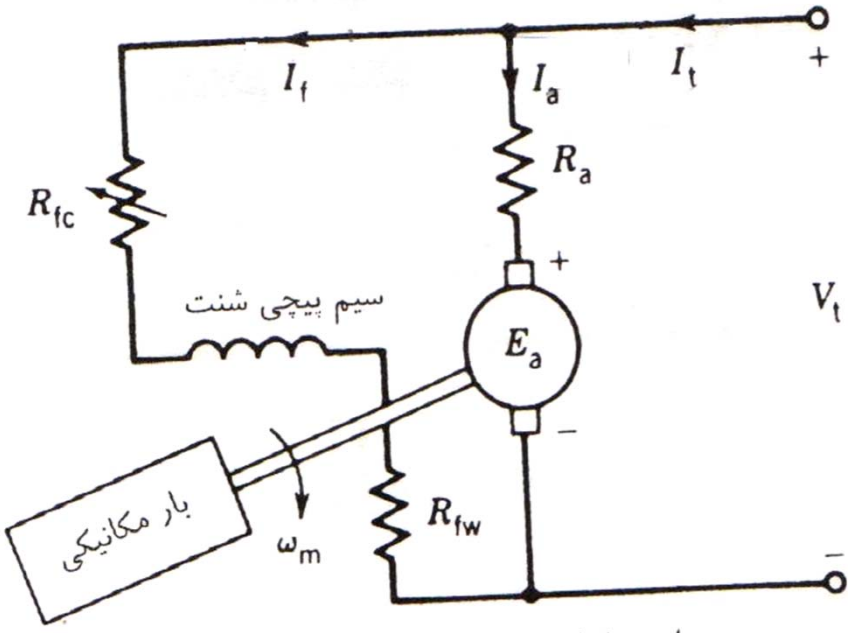
$$Eff = \frac{P_{output}}{P_{input}}$$



ژنراتور

موتورهای جریان مستقیم(DC)

انرژی و جریان الکتریکی از منبع تغذیه DC از جاروبک وارد آرمیچر شده و گشتاور به علت وجود میدان قطب های استاتور پدید می آید. لذا چرخش حاصل می شود. در حقیقت در موتورهای DC انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی تبدیل می شود. یکی از مشخصه های بارز موتور های DC کنترل سرعت آنها در طیف و محدوده ای وسیع می باشد.



مدار معادل موتور DC شنت

$$V_t = R_a I_a + E_a$$
$$I_t = I_a + I_f$$
$$E_a = K_a \varphi \omega_m = V_t - R_a I_a$$

برای حالت موتوری:

۱. توان ورودی به سیستم الکتریکی می باشد ($\mathbf{P_{input}}$)

۲. بخشی از این توان ورودی صرف تلفات مسی سیم پیچی تحریک سری می گردد.

۳. بخشی از این توان ورودی صرف تلفات مسی سیم پیچی تحریک شنت و رءوستای آن می گردد.

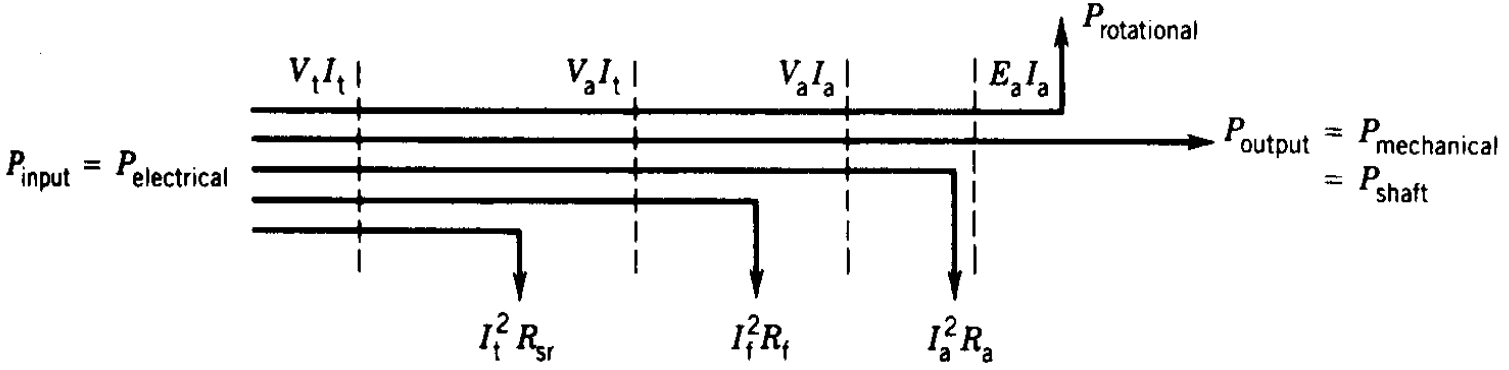
۴. بخشی از این توان ورودی صرف تلفات مسی سیم پیچی آرمیچر می شود.

۵. ما به التفاوت توان ورودی و کل تلفات مسی ماشین به توان مکانیکی تبدیل می شود ($\mathbf{E_aI_a}$).

۶. بخشی از $\mathbf{E_aI_a}$ صرف تلفات چرخشی ($\mathbf{P_{rot}}$) می گردد.

۷. مابه التفاوت $\mathbf{E_aI_a}$ و $\mathbf{P_{rot}}$ بر روی محور به صورت توان خروجی یا توان مکانیکی ($\mathbf{P_{output}}$) ظاهر می شود.

$$Eff = \frac{\mathbf{P_{output}}}{\mathbf{P_{input}}}$$



ماشین DC مورد بحث یعنی ماشین ۱۲ کیلوواتی، ۱۰۰ ولتی و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه ای را به منبع DC، ۱۰۰ ولتی متصل می کنیم و به صورت موتور DC شنت از آن بهره برداری می نماییم. در بی باری سرعت موتور ۱۰۰۰ دور بر دقیقه است و جریان ۶ آمپر می باشد.

الف: مقدار رئوستای مدار تحریک شنت (R_{fc}) تعیین کنید.

در بی باری I_a مساوی ۶ آمپر است، پس:

$$E_a = V_t - I_a R_a = ۱۰۰ - ۶ \times ۰/۱ = ۹۹/۴ \text{ V}$$

با توجه به شکل (۴-۲۴)، برای ایجاد E_a=۹۹/۴ ولت در تحت سرعت ۱۰۰۰ دور بر دقیقه باید I_f مساوی ۰/۹۹ آمپر باشد، پس:

$$R_f = R_{fc} + R_{fw} = ۱۰۱\ \Omega$$

$$R_{fc} = ۱۰۱ - R_{fw} = ۱۰۱ - ۸۰ = ۲۱\ \Omega$$

ب: در سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه P_{rot} را تعیین کنید (تلفات چرخشی).

در بارداری توان حاصله توسط موتور ($E_a I_a$) برابر تلفات چرخشی (P_{rot}) است، پس:

$$P_{rot} = E_a I_a = ۹۹/۴ \times ۶ = ۵۹۶/۴ \text{w}$$

ج: در شرایطی که از آرمیچر جریان اسمی می گذرد، سرعت، گشتاور حاصله و بازده موتور را بدست آورید. در این فرض یکبار فرض کنید که شار شکاف هوایی معادل حالت بی باری است و بار دیگر فرض کنید بخاطر عکس العمل آرمیچر در شرایط جریان اسمی، شار شکاف هوایی ۵ درصد نسبت به حالت بی باری کاهش می یابد.

در شرایط بارداری هستیم و داریم:

$$I_{a_{rated}} = 120\ A$$

$$E_{a_{rated}} = 99.4\ V$$

$$E_{a_{FL}} = V_t - I_a R_a = 100 - 120 \times 0.1 = 88\ V$$

در این فرض داریم: $\varphi_{FL} = 0.95\ \varphi_{NL}$

$$\frac{E_a|FL}{E_a|NL} = \frac{K_a\,\varphi_{FL}\,W_{FL}}{K_a\,\varphi_{NL}\,W_{NL}} = \frac{W_{FL}}{W_{NL}}$$

$$W_{FL} = \frac{88}{99.4} \times 1000 = 885.31\ \text{rpm}$$

$$W_m = \frac{885.31}{60} \times 2\pi = 92.71\ rad/sec$$

$$T = \frac{88 \times 120}{92.71} = 113.9\ \text{N.m}$$

$$P_{out} = E_a I_a - P_{rotational} = 10560 - 596.4 = 9963.6\ W$$

$$P_{in} = V_t I_t = V_t(I_a + I_f) = 100(120 + .99) = 12099\ W$$

$$E_{ff} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \%82.35$$

در محاسبات فوق از عکس العمل آرمیچر صرف نظر شده است. اگر عکس العمل آرمیچر را در نظر بگیریم داریم: φ_{NL} $\varphi_{FL} = 0.95$

$$\frac{E_a|FL}{E_a|NL} = \frac{K_a\,\varphi_{FL}\,W_{FL}}{K_a\,\varphi_{NL}\,W_{NL}}$$

$$\frac{88}{99.4} = 0.95\frac{W_{FL}}{W_{NL}}$$

$$W_{FL} = \frac{88}{99.4} \times \frac{1}{0.95} \times 1000 = 931.91\ \text{rpm}$$

$$W_m = \frac{931.91}{60} \times 2\pi = 97.59$$

$$T = \frac{88 \times 120}{97.59} = 108.21\ \text{N.m}$$

$$E_{ff} = \frac{9963.6}{12099} \times \%100 = \%82.35$$ (فرض بر آن است که تلفات چرخشی ثابت است)

د: گشتاور راه اندازی را بیابید، بشرطی که جریان آرمیچر در راه اندازی از ۱۵۰ درصد جریان اسمی بیشتر نشود. در این فرض یکبار از عکس العمل آرمیچر صرف نظر کنید و بار دیگر عکس العمل آرمیچر را $I_{f(AR)} = ۰/۱۶\ A$ در نظر بگیرید.

می دانیم $T = K_a \varphi I_a$ می باشد. پس در شرایطی که از عکس العمل آرمیچر صرف نظر می شود، داریم:

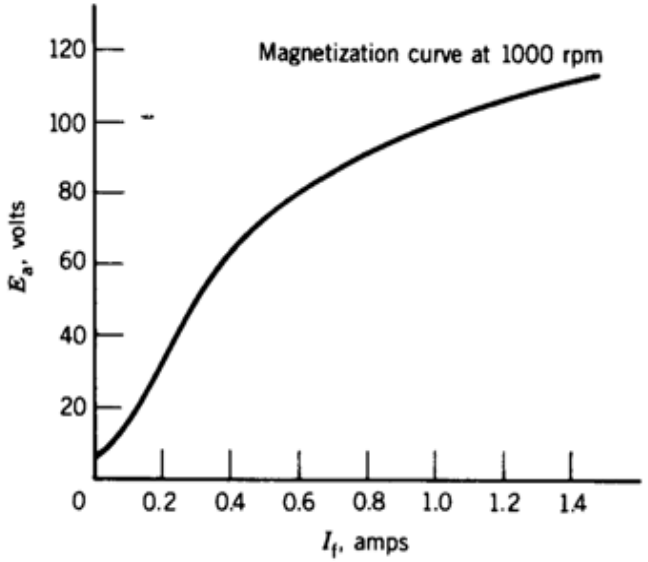
$$E_a|NL = 99.4\,v = K_a \varphi\, W_m = \frac{K_a \varphi\, 1000}{60} \times 2\pi$$

$$K_a \varphi = 0.949\,v/rad/sec$$

$$I_a = 1.5 \times 120 = 180\,A$$

$$T_{start} = 0.949 \times 180 = 170.82\,N.m$$

با در نظر گرفتن عکس العمل آرمیچر داریم:



$$I_f = 0.99\ A \qquad I_A = 180\ A$$

$$I_{f(eff)} = I_f - I_{f(AR)} = 0.99 - 0.16$$

$$= 0.83\ A$$

از شکل روبرو داریم:

$$E_a = 93.5\ v$$

$$= K_a \varphi\, \omega_m \quad \text{در} \quad 1000\ rpm$$

$$K_a\varphi = \frac{93.5}{\omega_m} = \frac{93.5}{1000 \times 2\pi/60} = 0.893\ \text{v/rad/sec}$$

$$T_{start} = 0.893 \times 180 = 160.71\ N.m$$

مثال :ماشین DC مورد بحث را به صورت موتور DC شنت مورد بهره برداری قرار می دهیم و داریم:

در حالت بی باری: سرعت = ۱۰۰۰ rpm و I_a = ۶ آمپر

در حایت بار اسمی: سرعت = ۹۳۲ rpm و I_a = ۱۲۰ آمپر

الف: عکس العمل آرمیچر را بر حسب آمپر دوری از دیدگاه مدار تحریک شنت بدست آورید.

الف: از مثال قبل در حالت بی باری داریم: I_f = ۰/۹۹ آمپر

در بار اسمی داریم: ۹۳۲ rpm در ولت $E_a = ۱۰۰ - ۱۲۰ \times ۰/۱ = ۸۸$

جریان موثر تحریک یا ($I_{f(eff)}$) در شرایط اسمی از منحنی مغناطیس شوندگی حاصل می شود.

ابتدا E_a را در سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه حساب می کنیم.

$$E_a = \frac{1000}{932} \times 88 = 94.42 \text{ V}$$

از منحنی مغناطیس شوندگی برای E_a=۹۴/۴۲ ولت در سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه داریم:

$$If_{(eff)} = 0.86 \text{ A} = I_f - I_{f(AR)}$$

$$I_{f(AR)} = If - 0.86 = 0.99 - 0.86 = 0.13 \text{ A}$$

آمپر دور مربوطه $= N_f I_{f(AR)}$

$$= 1200 \times 0.13 = 156 \text{ At/pole}$$

ب: در هر قطب چند حلقه (چند دور) سیم پیچی تحریک سری اضافه کنیم تا ماشین کمپوند اضافی گردد (شنت کوتاه) و سرعت آن در بار اسمی ۸۰۰ دور در دقیقه گردد. از مقاومت سیم پیچی تحریک سری صرف نظر کنید.

در سرعت ۸۰۰ دور در دقیقه Ea مساوی ۸۸ ولت است. پس:

$$E_a = \frac{1000}{800} \times 88 = 110\ \text{V}$$

از منحنی مغناطیس شوندگی برای E_a=110 V در سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه داریم:

$$I_{f(eff)} = 1.32 = I_f + \frac{Nsr}{Nf}(I_a + I_f) - I_{f(AR)}$$

$$1.32 = 0.99 + \frac{Nsr}{1200}(120 + 0.99) - 0.13$$

$$N_{sr} = 4.56\ \text{turn/pole}$$

ج: اگر سیم پیچی سری را طوری وصل کنیم تا که موتور کمپوند نقصانی (شنت کوتاه) حاصل شود، در شرایط اسمی سرعت موتور را حساب کنید.

ج: برای کمپوند نقصانی داریم:

$$I_f(eff) = 0.99 - \frac{4.56 \times 120.99}{1200} - 0.13$$
$$= 0.99 - 0.46 - 0.13$$
$$= 0.4\ A$$

از منحنی مغناطیس شوندگی در سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه و I_f=۰/۴ آمپر داریم:

E_a = ۶۵ ولت

اما در شرایط اسمی (بند الف و ب) داریم:

E_a = ۸۸ ولت

اگر سرعت بهره برداریم از ماشین n دور در دقیقه باشد، داریم:

۶۵ = K φ ۱۲۰۰

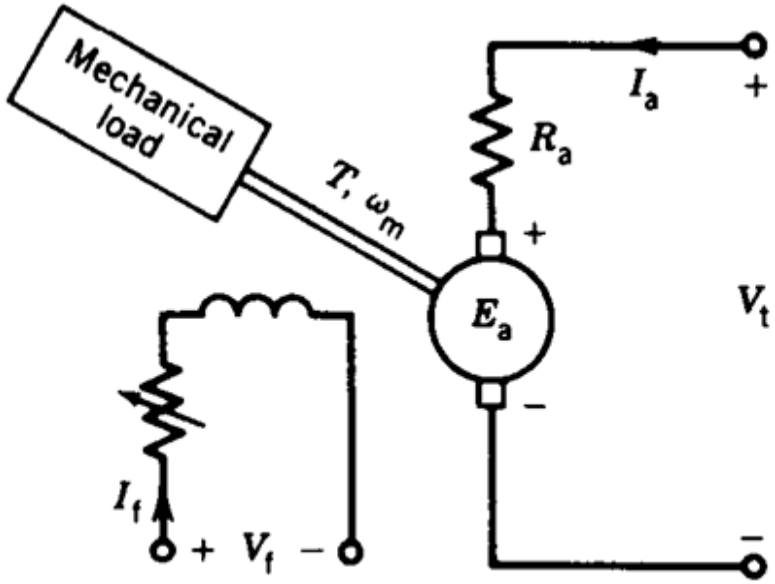
$$K\varphi n = 88$$

n = ۱۳۴۳/۹

مشخصه‌های گشتاور – سرعت

- در بسیاری از کاربردها از موتورهای DC برای چرخش بارهای مکانیکی استفاده می‌شود.
- در برخی از کاربردها هنگام تغییر بار سرعت باید ثابت بماند و در برخی از بارها سرعت باید در محدوده وسیعی تغییر کند.

یک موتور DC با تحریک جداگانه را در نظر می‌گیریم :



$$E_a = K_a \varphi \omega_m = V_t - I_a R_a$$

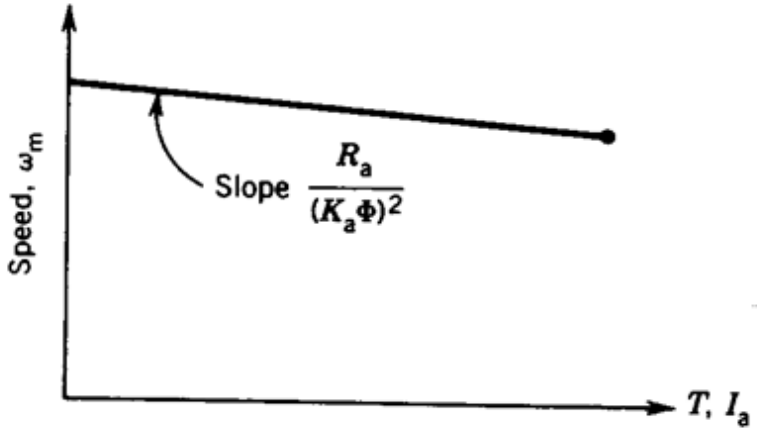
$$T = K_a \varphi I_a$$

$$\omega_m = \frac{V_t - I_a R_a}{K_a \varphi}$$

مشخصه گشتاور–سرعت این موتور DC:

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a \varphi} - \frac{R_a}{(K_a \varphi)^2} T$$

اگر ولتاژ پایانه (V_t) و شار ثابت باقی ماند، مشخصه گشتاور سرعت مطابق شکل خواهد بود.



$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a\varphi} - \frac{R_a}{(K_a\varphi)^2}T$$

- تغییر سرعت دراثر افزایش بار در این موتورها ناچیز است ، لذا تنظیم سرعت خوبی در این موتورها برقرار است.
- در ماشین‌های واقعی بخاطر عکس العمل آرمیچر ، ثابت نمی‌ماند و کاهش می‌یابد. لذا کاهش سرعت کمتر خواهد بود. پس عکس العمل آرمیچر تنظیم سرعت در موتورهای DC تحریک جداگانه را بهبود می‌بخشد.

کنترل سرعت در موتورهای DC تحریک جداگانه با تنظیم پارامترهای زیر امکان پذیر است:

۱. کنترل ولتاژ آرمیچر (V_t)

۲. کنترل شار مدار تحریک یا شار میدان (φ)

۳. کنترل مقاومت آرمیچر (R_a)

باید دانست:

الف : با افزایش V_t سرعت زیاد می‌شود.

ب : با افزایش F سرعت کم می‌شود.

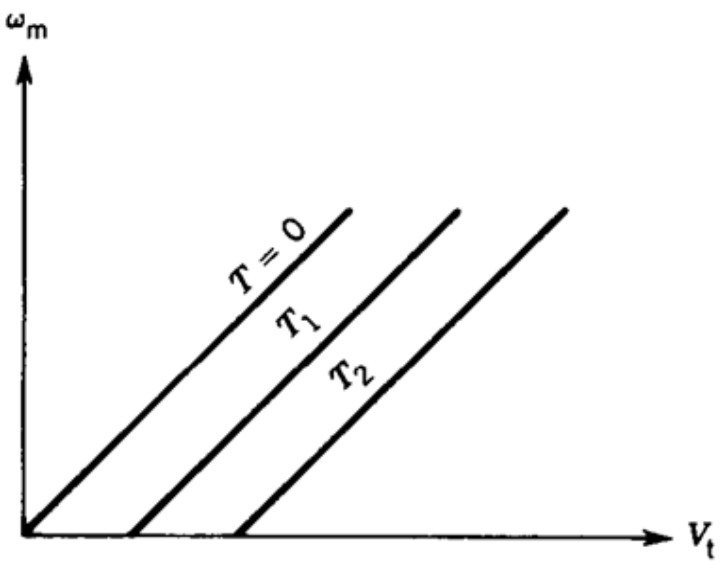
ج : با افزایش R_a سرعت کاهش می‌یابد.

کنترل ولتاژ آرمیچر

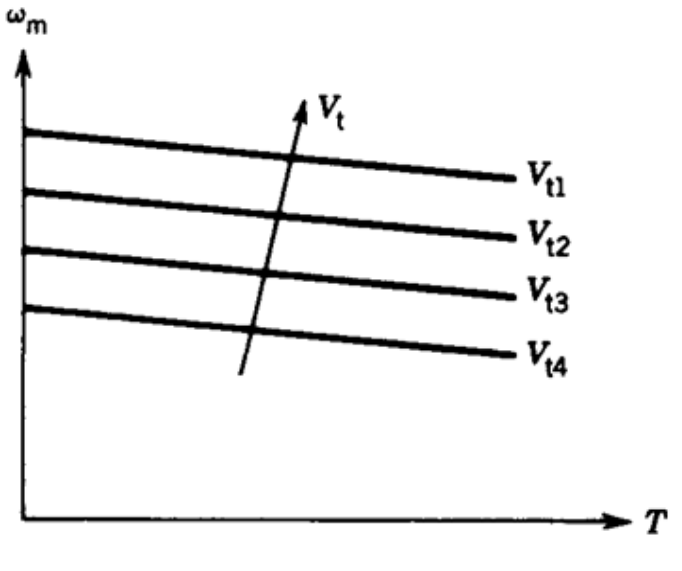
در این سیستم کنترل سرعت، F (شار) و یا I_f و R_a ثابت نگه داشته می‌شود و با تغییر V_t سرعت کنترل میشـــود.

اگر از عکس العمل آرمیچر صرف نظر کنیم داریم

$$\omega_m = K_1 V_1 - K_2 T \qquad K_1 = \frac{1}{K_a \varphi} \qquad K_2 = \frac{R_a}{(K_a \varphi)^2}$$



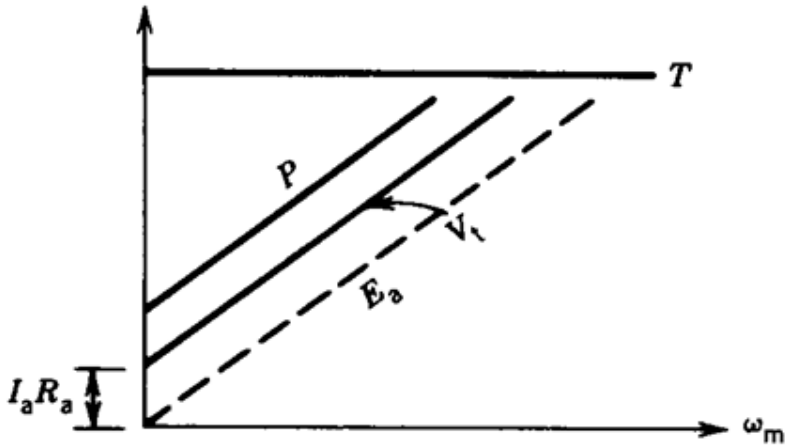
اگر ولتاژ (V_t) ثابت فرض شود و گشتاور تغییر کند، سرعت را می‌توان با تغییر V_t تنظیم نمود.



در بارهایی که گشتاور بار ثابت است (بالابرها، آسانسورها)، سرعت با ولتاژ (V_t) رابطه خطی دارد.

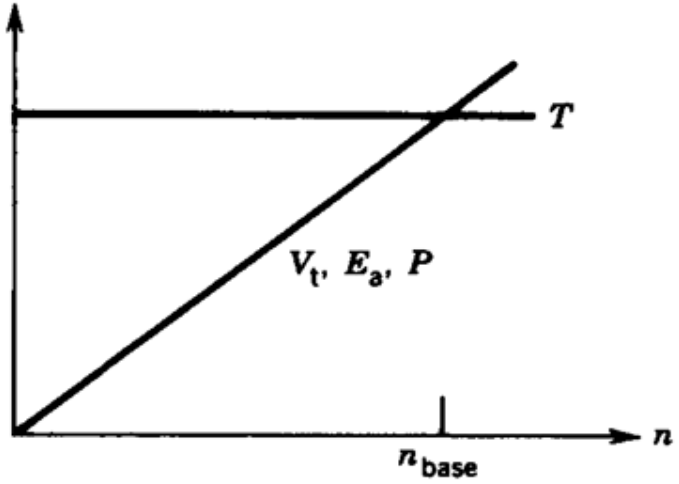
در کاربردهای عملی هرگاه تغییر سرعت بوسیله تغییر V_t صورت پذیرد جریان آرمیچر ثابت نگه داشته می‌شود(گشتاورثابت است، چرا؟).

$$E_a = V_t - I_a R_a \propto V_t \propto \omega_m$$



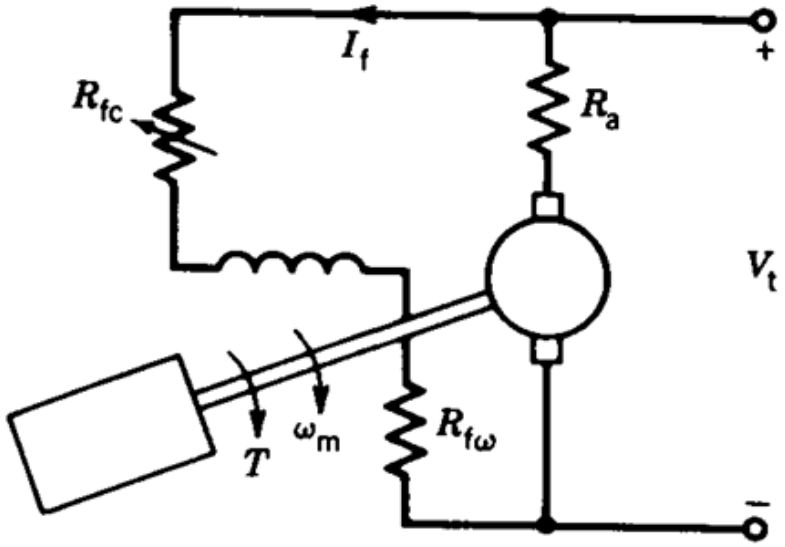
لذا با افزایش V_t، سرعت به طور خطی زیاد می‌شود. انرژی ورودی از منبع به موتور $(P = V_t I_a)$ نسبت به سرعت به طور خطی تغییر می‌کند.

اگر از مقاومت آرمیچر R_a صرف نظر شود، R_a ، E_a و P در سرعت صفر معادل صفر خواهند بود و نسبت به سرعت به طور خطی تغییر می‌کنند.



کنترل میدان

در این متد R_a (مقاومت آرمیچر) و V_t ثابت هستند و مقاومت مدار تحریک توسط رئوستای R_{fc} تغییر می‌کند. لذا جریان تحریک تغییر کرده و در نتیجه میدان تحریک قابل کنترل است.



این بحث برای موتور DC تحریک جداگانه نیز صادق است.

اگر سیستم را از نظر مغناطیسی خطی در نظر بگیریم ، شار در ماشین (φ) متناسب با جریان تحریک I_f خواهد بود.

$$K_a\varphi = K_f I_f$$

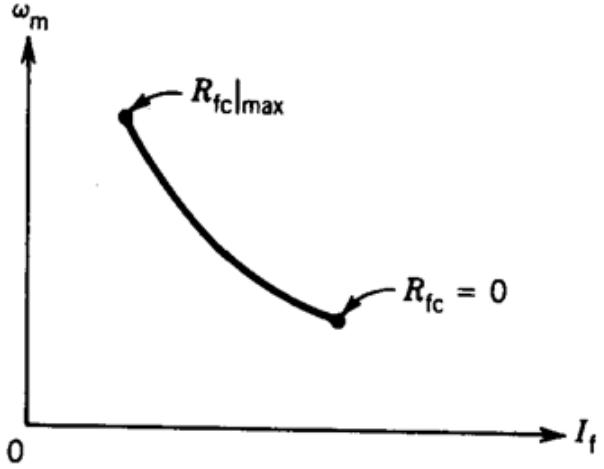
$$\omega_m = \frac{V_1}{K_f I_f} - \frac{R_a}{(K_f I_f)^2} T$$

در شرایط بی‌باری $(T = 0)$،

$$\omega_m \approx \frac{V_t}{K_f I_f}$$

دقت کنیداگر درمدار تحریک پاره‌گی رخ دهـــد$(I_f = 0)$

در این صورت سرعت بطرز خطرناکی بالا می‌رود.



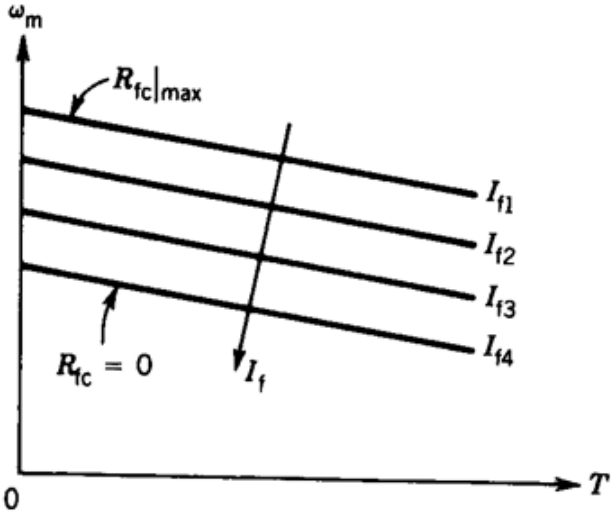
تغییرات سرعت نسبت به جریان تحریک

برای مقادیر خاصی از I_f از رابطه داریم :

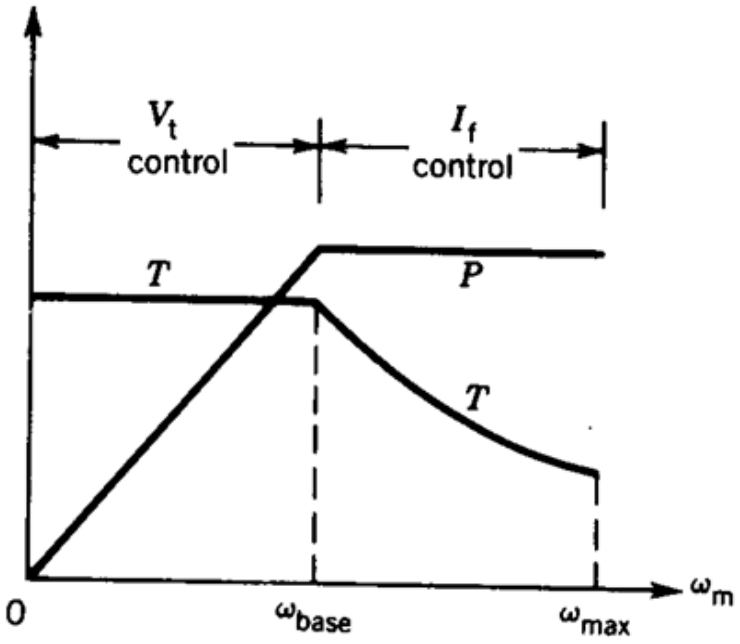
$$\omega_m = K_3 - K_4 T$$

سرعت در بی باری $K_3 = \frac{V_t}{K_f I_f}$

$$K_4 = \frac{R_a}{(K_f I_f)^2}$$



سرعت را می‌توان با تنظیم I_f کنترل و تنظیم نمود.

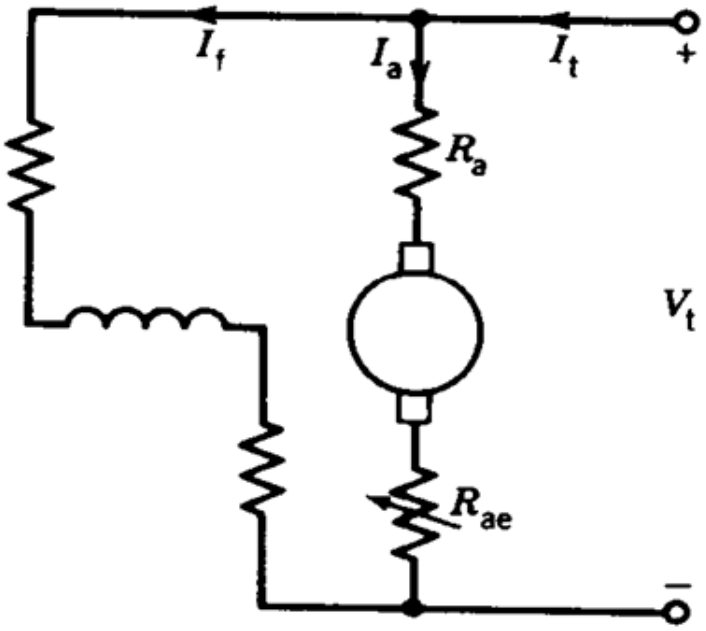


- کنترل سرعت از سرعت صفر تا سرعت مبنا عمدتاً توسط سیستم کنترل ولتاژ آرمیچر (V_t) انجام می‌پذیرد.
- کنترل سرعت پس از سرعت مبنا عمدتاً با کاهش جریان تحریک تحقق می‌پذیرد و این امر را تضعیف میدان می‌گویند.

در سرعت مبنا ، اگر بخواهیم جریان آرمیچر از مقدار اسمی فراتر نرود (بخاطر مسائل حرارتی)، کنترل سرعت پس از سرعت مبنا به محدوده توان ثابت محدود می‌گردد.

$$P = V_t I_a \text{ ثابت} \simeq E_a I_a = T\omega_m \Longrightarrow \quad T = \frac{E_a I_a}{\omega_m} \simeq \frac{\text{(مقدار ثابت)}}{\omega_m}$$

کنترل مقاومت آرمیچر



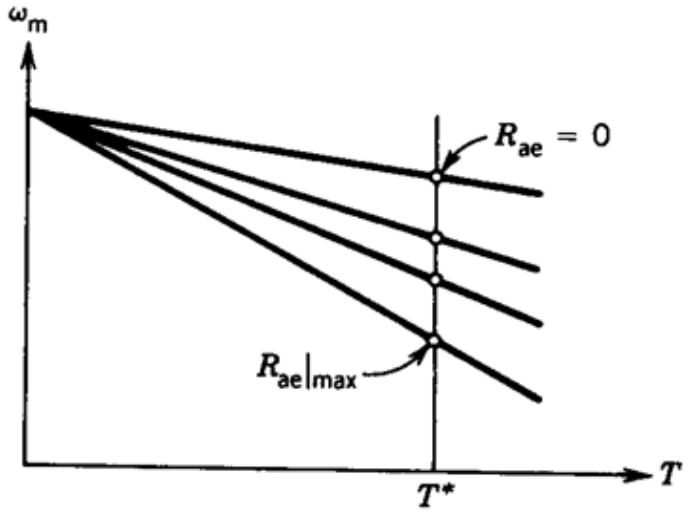
در این روش V_t و I_f (ویا φ) ثابت هستند و کنترل سرعت توسط تغییر مقاومت آرمیچر (R_a) صورت میپذیرد. R_{ae} رئوستایی است که برای تغییر R_a در مدار آرمیچر قرار گرفته است.

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a\varphi} - \frac{R_a + R_{ae}}{(K_a\varphi)^2}T$$

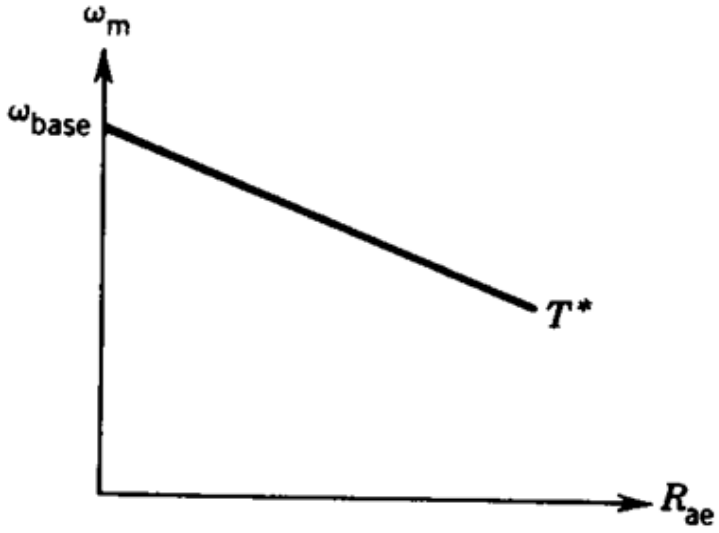
اگر V_t و φثابت باشند داریم :

$$\omega_m = k_5 - K_6 T$$

$$k_5 = \frac{V_t}{K_a\varphi}\ (\text{سرعت در بی باری}) \qquad K_6 = \frac{R_a + R_{ae}}{(K_a\varphi)^2}$$

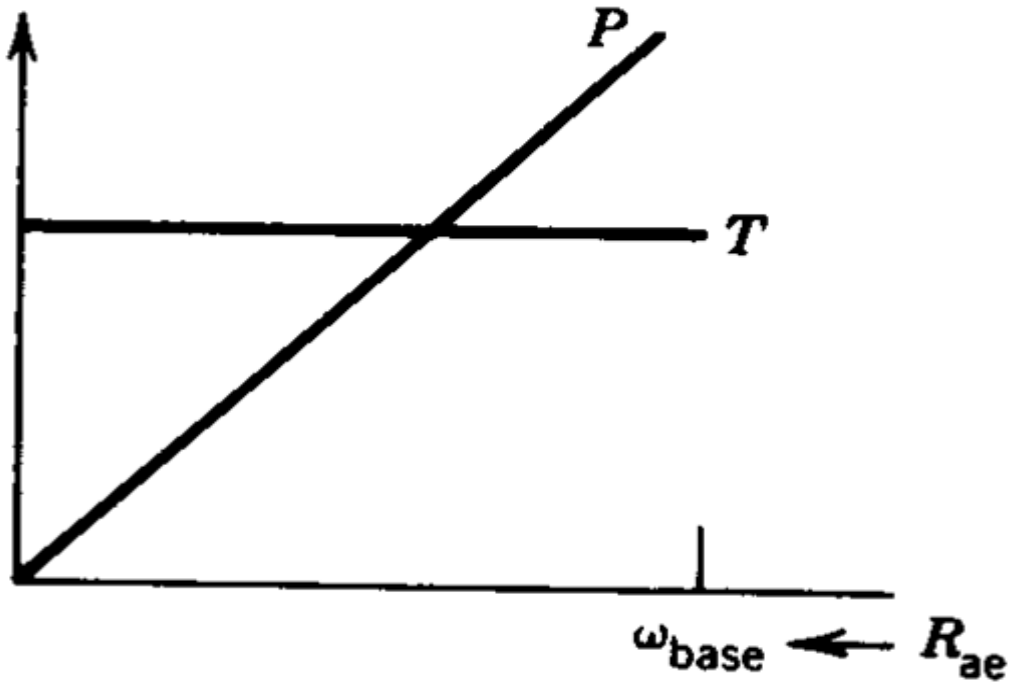


مقاومت رئوستا (R_{ae}) را می‌توان طوری تنظیم کرد که سرعت‌های مختلف تحت گشتاور ثابت حاصل گرد.



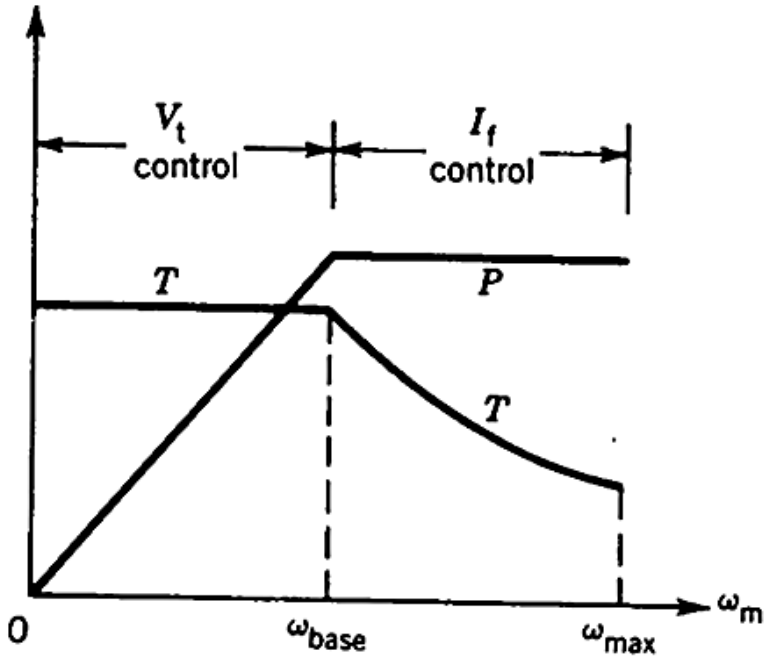
تغییرات سرعت بر حسب R_{ae} تحت گشتاور مفروض T^*

سرعت را می‌توان از صفر تا سرعت مبناتحت گشتاور ثابت توسط تغییر R_{ae} کنترل نمود.



این سیستم کنترل نسبتاً ساده بوده ولی بخاطر تلفات در رئوستا R_{ae} بازده آن کم است. از آنجایی که از R_{ae} جریان آرمیچر می‌گذرد، لذا این رئوستا از رئوستای R_{fc} گرانتر است.

مثال: سیستمی با سرعت متغیر ، یک موتور DC را به کار می‌گیرد که از طریق یک منبع با ولتاژ متغیر تغذیه می‌شود.مشخصه‌های توان و گشتاور در شکل نشان داده شده است.



سرعت از صفر تا ۱۵۰۰ دور در دقیقه (سرعت مبنا) متغیر است ولتاژ پایانه از صفر تا ۵۰۰ ولت تغییر می‌کند و جریان تحریک ثابت است.

الف :جریان آرمیچر موتور را در صورتی تعیین کنید که گشتاور در ۳۰۰N.m ثابت باقی می‌ماند سرعت را سرعت مبنا بگیرید.

ب : سرعت در ماورای سرعت مبنا با تضعیف میدان و ثابت بودن ولتاژ آرمیچر در ۵۰۰ ولت حاصل می‌شود.گشتاور در دسترس در سرعت ۳۰۰۰دور در دقیقه را تعیین کنید در صورتی که جریان آرمیچر در مقدار بدست آمده در بند (الف) ثابت بماند.

از تمام تلفات صرف نظر کنید.

الف)

$$N_a = 1500\ rpm\ ,\ V_t = 500\ V \simeq E_a$$

$$K_a\varphi = \frac{500}{1500 \times 2\pi/60} = 3.1831$$

$$I_a = \frac{T}{K_a\varphi} = \frac{300}{3.1831} = 94.2477\ A$$

ب)

$$n = 3000\ rpm\ ,\ V_t = E_a = 500\ V$$

$$K_a\varphi = \frac{500}{3000 \times 2\pi/60} = 1.5916$$

$$T = 1.5916 \times 94.2477 = 150\ N.m$$

یا $T = \frac{P}{\omega_m} = \frac{500 \times 94.2477}{3000 \times 2\pi/60} = 150\ N.m$

A 150-kW, 600-V, 600 r/min dc series-wound railway motor has a combined field and armature resistance (including brushes) of 0.125 Ω. The full-load current at rated voltage and speed is 250 A. The magnetization curve at 400 r/min is as follows:

Generated emf, V	375	400	425	450	475
Series-field current, A	227	260	301	350	402

Determine the internal starting torque when the starting current is limited to 460 A. Assume the armature reaction to be equivalent to a demagnetizing mmf which varies as the square of the current. (Hint: This problem can be solved either graphically or by use of the MATLAB "spline()" function to represent the magnetization curve.)

First find the demagnetizing mmf. At rated load,

$$E_{\mathrm{a}} = V_{\mathrm{a}} - I_{\mathrm{a}} R_{\mathrm{tot}} = 600 - 250 \times 0.125 = 568.8 \text{ V}$$

Using the MATLAB 'spline' function, the corresponding field current on the 400 r/min magnetizing curve is

$$I_{\mathrm{f}} = 232 \text{ A}$$

Thus, the demagnetizing mmf at a current of 250 A is equal to $250 - 232 = 18$ A and in general, the effective series-field current will be equal to

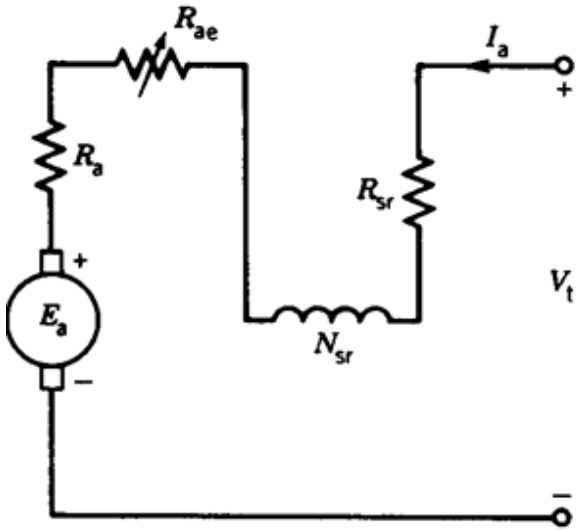
$$I_{\mathrm{s,eff}} = I_{\mathrm{a}} - 18 \left(\frac{I_{\mathrm{a}}}{250} \right)^2$$

For a starting current of 460 A, the effective series field current will thus equal 399 A. Using the MATLAB 'spline()' function, this corresponds to a generated voltage of 474 V from the 400 r/min magnetization curve. The corresponding torque (which will be the same as the starting torque due to the same flux and armature current) can then be calculated as

$$T = \frac{E_{\mathrm{a}} I_{\mathrm{a}}}{\omega_{\mathrm{m}}} = \frac{474 \times 560}{400(\pi/30)} = 5200 \text{ N} \cdot \text{m}$$

موتور DC سری

شار توسط جریان آرمیچر که از سیم پیچی تحریک سری با تعداد دور N_{sr} می‌گذرد حاصل می‌شود. داریم :

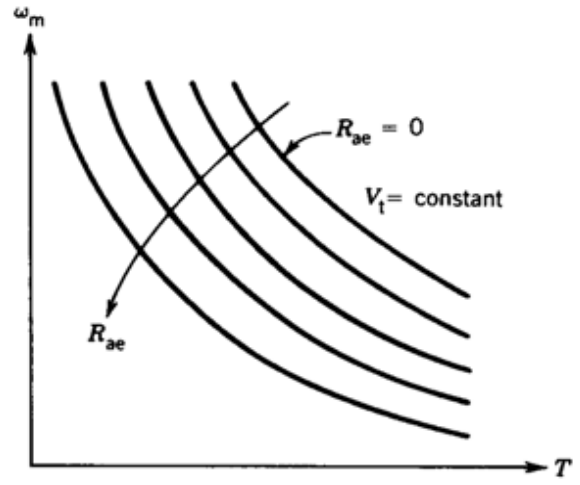


$$K_a\varphi = K_{sr}I_a \qquad E_a = K_{sr}I_a\omega_m$$

$$T = K_{sr}{I_a}^2$$

موتور DC سری یک گشتاور یکسویه برای جریانهای DC و AC پدید می‌آورد.

همچنین از شکل داریم :



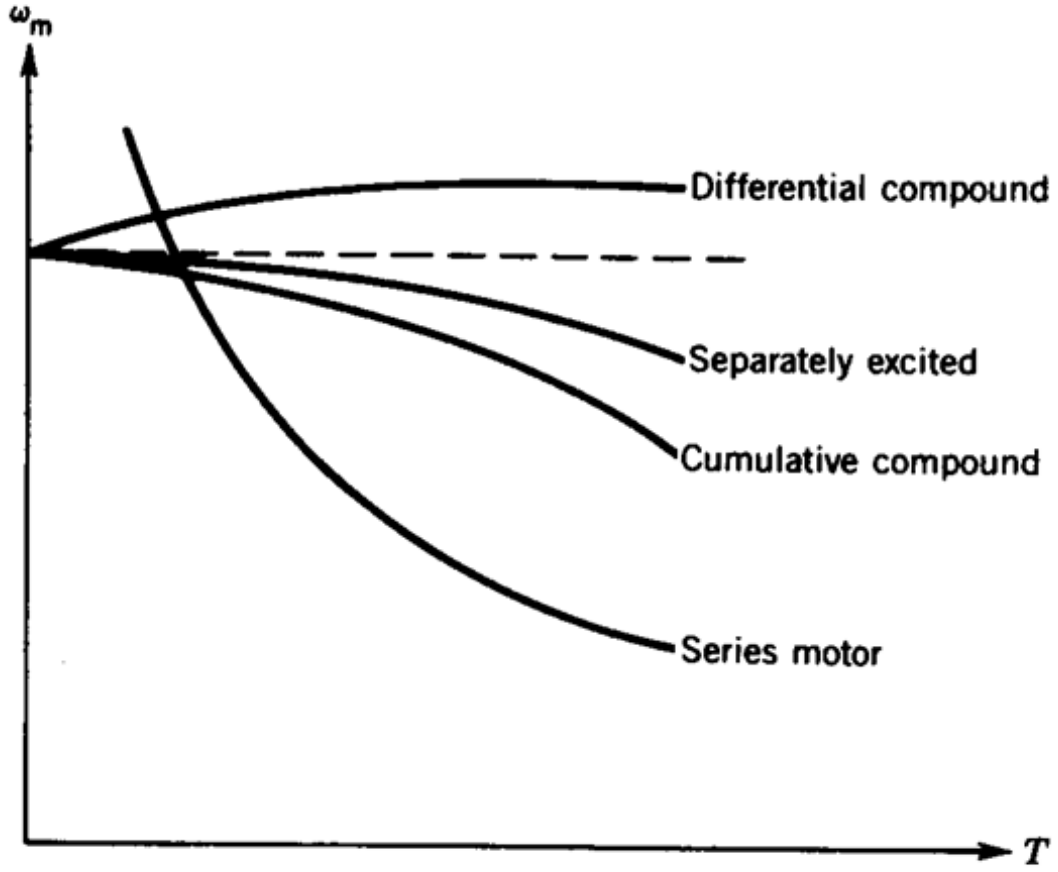
$$E_a = V_t - I_a(R_a + R_{ae} + R_{sr})$$

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_{sr}\,I_a} - \frac{R_a + R_{sr} + R_{ae}}{K_{sr}}$$

$$\omega_m = \frac{V_t}{\sqrt{K_{sr}}\,\sqrt{T}} - \frac{R_a + R_{ae} + R_{sr}}{K_{sr}}$$

هر گاه به گشتاور راه انداز زیاد نیاز داشتیم می‌تـــوان از موتورهای DC سری بهره جست (مثلا ترن برقی).

محدوده تغییرات سرعت در موتور DC سری از بقیه بیشتر است.



مشخصه گشتاور سرعت موتورهای DC گوناگون

مثال: محور یک موتور DC سری ، یک پنکه را می‌چرخاند. این موتور هنگامی که به ولتاژ ۲۲۰ ولت وصل است تحت سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه می‌چرخد و جریان ۲۵ آمپر از شبکه می‌کشد. این موتور ۲۲۰ولتی و ۷ اسب بخاری است. شرایط فوق مربوط به موقعی است که رئوستا در آرمیچر قرار ندارد. ($R_{ae} = 0$) گشتاور مورد نیاز پنکه با مجذور سرعت متناسب است و داریم :

$$R_a = 0.6 \text{ اهم}$$

$$R_{sr} = 0.4 \text{ اهم}$$

از عکس العمل آرمیچر و تلفات چرخشی (P_{rot}) صرف نظر کنید.

الف: توان تحویلی به پنکه و گشتاور حاصله توسط موتور را بیابید.

ب :میخواهیم سرعت به ۲۰۰دور در دقیقه کاهش یابد و رئوستا در مدار آرمیچر وارد می‌کنیم. مقاومت این رئوستا R_{ae} را حساب کرده و در این شرایط توان تحویلی به پنکه را به دست آورید.

الف)

$$E_a = V_t - I_a(R_a + R_{sr} + R_{ae}) = 220 - 25(0.6 + 0.4 + 0)$$
$$= 195\ V$$

$$P = E_a I_a = 195 \times 25 = 4880\ W = \frac{4880}{764}\ hp = 6.54\ hp$$

$$T = \frac{E_a I_a}{\omega_m} = \frac{4880}{300 \times 2\pi/60} = 155.2\ N.m$$

ب)

$$T = K_{sr} I_a{}^2 \qquad 155.2 = K_{sr} 25^2 \qquad K_{sr} = 0.248$$

$$T|_{200\ rpm} = \left(\frac{200}{300}\right)^2 \times 155.2 = 68.98\ N.m$$

داریم:

$$\omega_m = \frac{200}{60} \times 2\pi = \frac{200}{\sqrt{0.248}\sqrt{68.98}} - \frac{0.6 + 0.4 + R_{ae}}{0.248}$$
$$\Rightarrow R_{ae} = 7\ \Omega$$

$$P = T\omega_m = 68.98 \times \frac{200}{60} \times 2\pi = 1444\ W \rightarrow 1.94\ hp$$

راه انداز

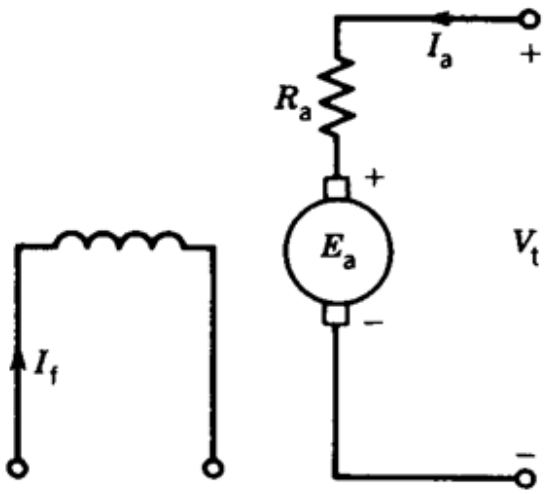
اگر موتور DC مستقیماً به شبکه DC وصل شود:

$$I_a = \frac{V_t - E_a}{R_a}$$

در لحظه راه اندازی E_a صفر است.

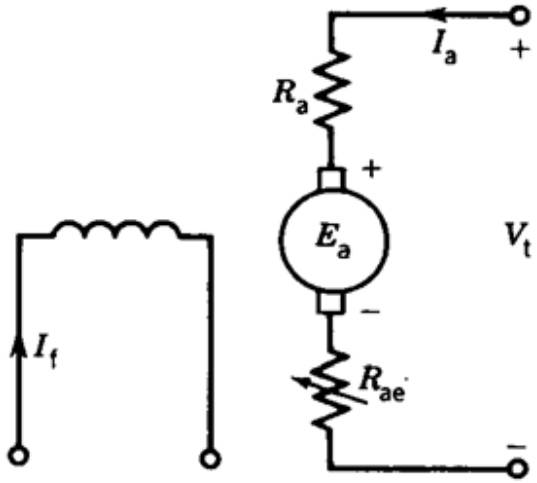
$$I_a\Big|_{start} = \frac{V_t}{R_a} \quad \text{(جریان راه اندازی)}$$

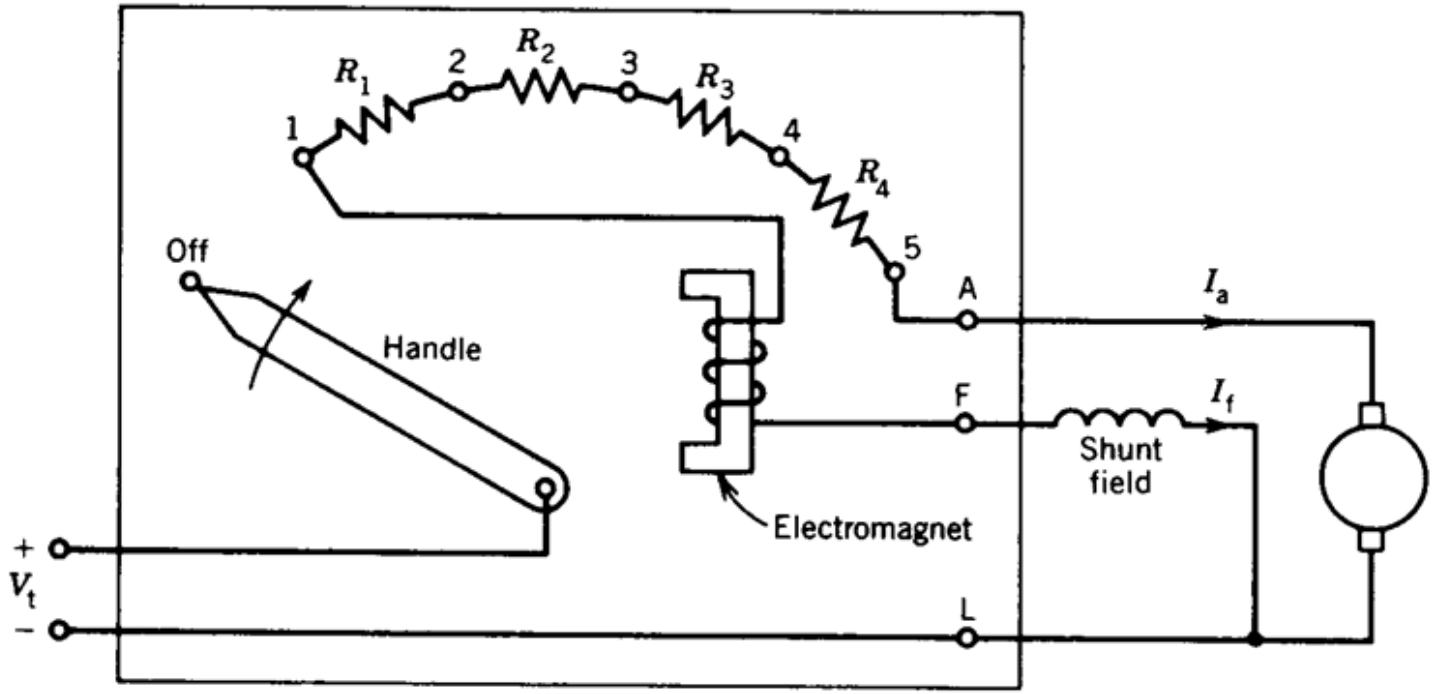
R_a کوچک است پس جریان راه انداز بطرز خطرناکی بالا می‌رود.



روشهای محدود سازی جریان راه اندازی

- **افزودن رئوستا در لحظه راه اندازی**
- **راه اندازی با ولتاژ پایانه نسبتاً کم (V_t کم). این روش مستلزم یک منبع تغذیه DC با ولتاژ متغیر است.**





$$I_a = \frac{V_t - E_a}{R_a + R_{ae}}$$

با افزایش سرعت نیروی ضد محرکه (E_a) زیاد می‌شود. لذا می‌توان با افزایش سرعت، R_{ae} را بتدریج از مدار خارج ساخت، بدون آنکه جریان آرمیچر از حد متعارف فراتر رود.

در یک ماشین DC ۱۰ کیلوواتی ، ۱۰۰ ولتی و ۱۰۰۰ دور در دقیقه‌ای $R_a = 0.1\Omega$ و این ماشین به یک منبع DC ۱۰۰ ولتی متصل ست.

الف : اگر در مدار آرمیچر رئوستا نباشد، جریان راه انداز را حساب کنید.

ب :اگر بخواهیم جریان راه انداز به دو برابر جریان اسمی محدود گردد،مقدار مقاومت رئوستای راه انداز را حساب کنید.

الف) به سهولت داریم

$$I_a \downarrow_{rated} = \frac{1000}{100} = 100\ A$$

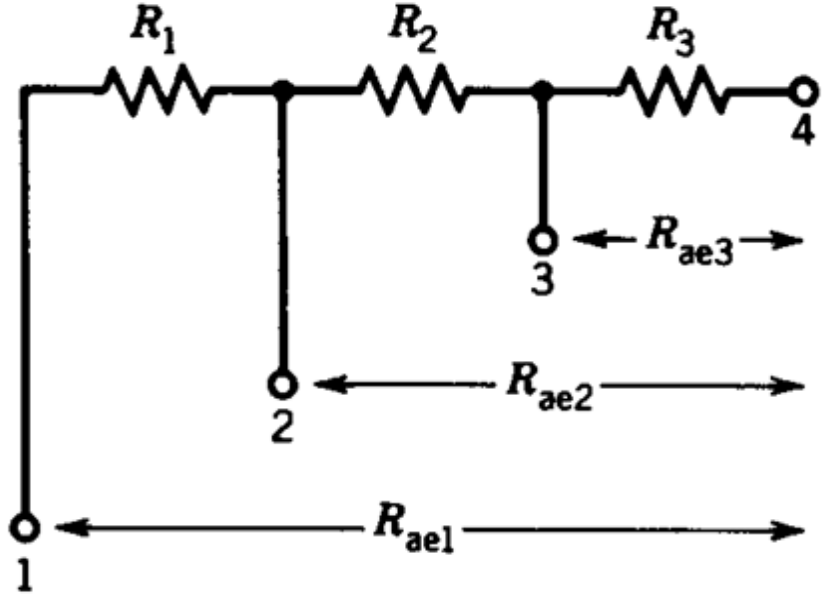
$$I_a \downarrow_{start} = \frac{V_t}{R_a} = \frac{100}{0.1} = 1000\ A = 10 I_a \downarrow_{rated} = 10\ Pu$$

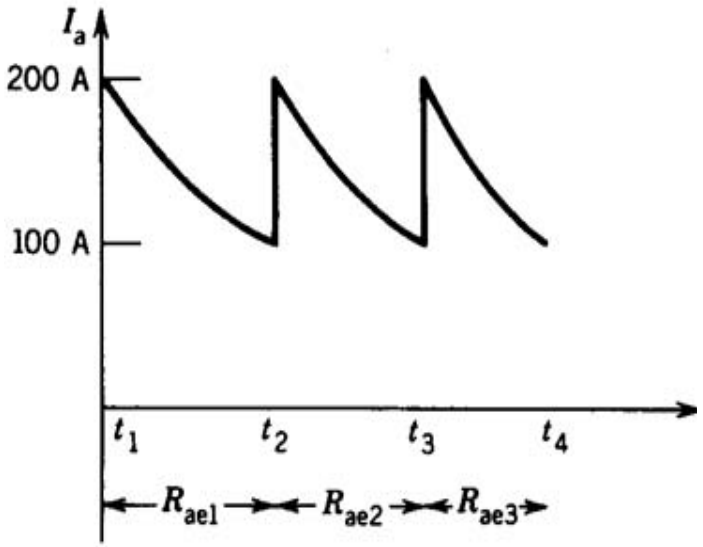
ب) به آسانی داریم

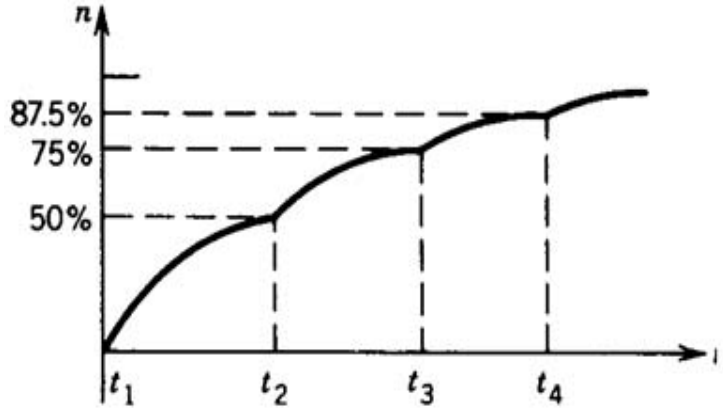
$$200 = \frac{100}{0.1 + R_{ae}} \quad \Rightarrow \quad R_{ae} = 0.4\ \Omega$$

ج:اگر بخواهیم برای این موتور جعبه راه انداز بسازیم، مقدار مقاومتهای این جعبه راه انداز را حساب کنید، مشروط بر آنکه بخواهنیم جریان آرمیچر (I_a) بین۱۰۰ درصد تا ۲۰۰ درصد جریان اسمی در هنگام راه اندازی محدود گردد.

R_{ae2} R_{ae1} و... مقاومتهای جعبه راه انداز را در وضعیتهای (۱) و(۲) و... نشان می‌دهند. دسته راه انداز را هنگامی به وضعیت جدید می‌بریم که جریان آرمیچر (I_a) به جریان اسمی ۱۰۰ آمپر برسد.







تغییرات جریان آرمیچر و سرعت (n) نسبت به زمان

$$R_{ae1} = 0.4\ \Omega$$

(کل مقاومت در جعبه راه انداز) =

برای پیدا کردن R_{ae2}:

$$V_t = E_a + I_a(R_a + R_{ae})$$

V_t	E_a	$I_a(R_a + R_{ae})$
↑	↑	↑
fixed	increases with speed	decreases with speed

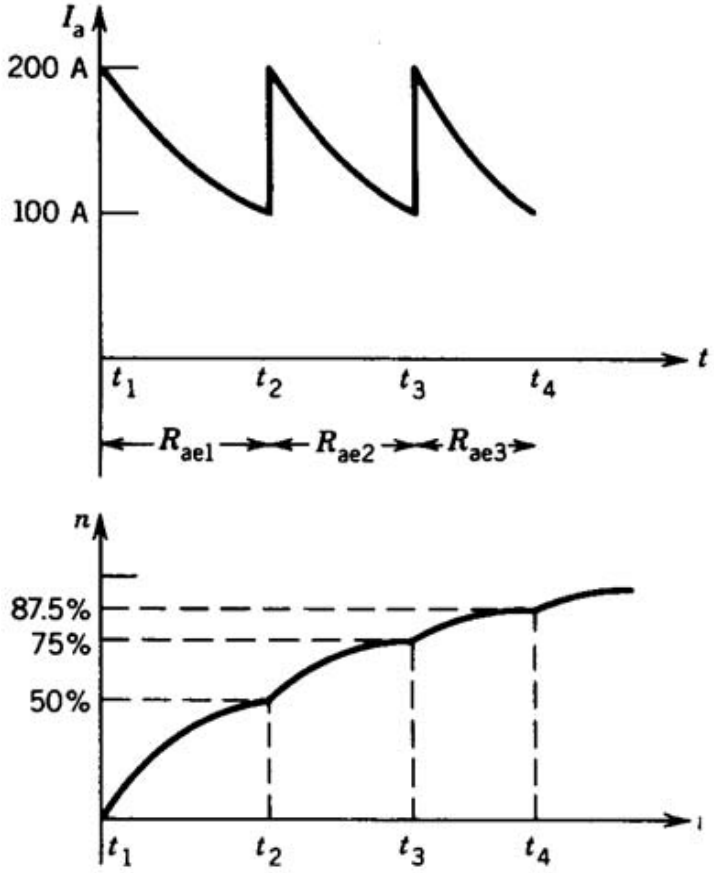
در لحظه $t = t_2^-$ قبل از آن که دسته راه انداز به وضعیت (۲) برده شود، داریم:

$$I_a = 100\ A$$

$$E_{a2} = V_t - I_a(R_a + R_{ae1})$$

$$= 100 - 100(0.1 + 0.4)$$

$$= 50\ V$$



تغییرات جریان آرمیچر و سرعت (n) نسبت به زمان

در لحظه $t = t_2^+$ دسته راه انداز به وضعیت (۲) برده شده است:

$$I_a = 200\ A = \frac{V_t - E_{a2}}{R_a + R_{ae2}}$$

$$200 = \frac{100 - 50}{0.1 + R_{ae2}}$$

$$R_{ae2} = 0.15\ \Omega$$

در $t = t_3^-$ داریم:

$$I_a = 100\ A$$

$$E_{a3} = 100 - 100(0.1 + 0.15) = 75\ \Omega$$

در $t = t_3^+$ داریم دسته راه انداز به وضعیت (۳) برده شده است:

$$I_a = 200\ A = \frac{100 - 75}{0.1 + R_{ae3}}$$

$$R_{ae3} = 0.025\ \Omega$$

برای محاسبه R_{ae4} در $t = t_4^-$ داریم :

$$E_{a4} = 100 - 100(0.1 + 0.025) = 87.5\ V$$

در $t = t_4^+$ داریم :

$$I_a = 200\ A = \frac{100 - 87.5}{0.1 + R_{ae4}} \quad \Longrightarrow \quad R_{ae4} = -0.0375\ \Omega$$

مقاومت منفی (R_{ae4}) مبین آن است که به این مقاومت نیاز نداریم. لذا $R_{ae4} = 0$ و جریان آرمیچر بدون وجود هیچ مقاومتی در جعبه راه انداز از ۲۰۰ آمپر فراتر نمی‌رود.

$$I_a = \frac{100 - 87.5}{0.1} = 125\ A$$

لذا مقادیر مقاومتها در جعبه راه انداز به قرار زیر است :

$$R_1 = R_{ae1} - R_{ae2} = 0.4 - 0.15 = 0.25\ \Omega$$
$$R_2 = R_{ae2} - R_{ae3} = 0.15 - 0.025 = 0.125\ \Omega$$
$$R_3 = R_{ae3} - R_{ae4} = 0.025 - 0 = 0.025\ \Omega$$

A 25-kW, 230-V shunt motor has an armature resistance of 0.064 Ω and a field-circuit resistance of 95 Ω. The motor delivers rated output power at rated voltage when its armature current is 122 A. When the motor is operating at rated voltage, the speed is observed to be 1150 r/min when the machine is loaded such that the armature current is 69.5 A.

a. Calculate the rated-load speed of this motor.

In order to protect both the motor and the dc supply under starting conditions, an external resistance will be connected in series with the armature winding (with the field winding remaining directly across the 230-V supply). The resistance will then be automatically adjusted in steps so that the armature current does not exceed 200 percent of rated current. The step size will be determined such that, until all the external resistance is switched out, the armature current will not be permitted to drop below rated value. In other words, the machine is to start with 200 percent of rated armature current and as soon as the current falls to rated value, sufficient series resistance is to be cut out to restore the current to 200 percent. This process will be repeated until all of the series resistance has been eliminated.

b. Find the maximum value of the series resistance.

c. How much resistance should be cut out at each step in the starting operation and at what speed should each step change occur?

part (a): At rated load, $E_a = 230 - 122\ times 0.064 = 222$ V. Thus, rated-load speed is

$$n = 1150\left(\frac{222}{230}\right) = 1133 \text{ r/min}$$

part (b): The maximum value of the starting resistance will be required at starting.

$$\frac{230}{R_a + R_{max}} = 2 \times 122 = 244$$

and thus $R_{max} = 0.878\ \Omega$.

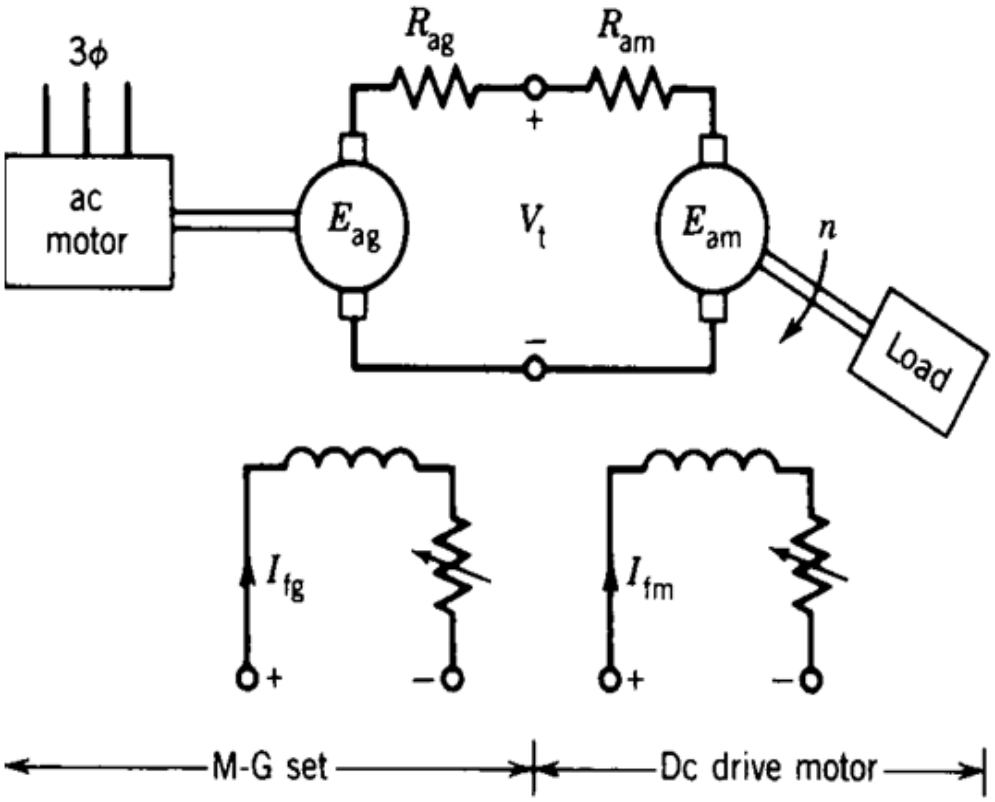
part (c): For each value of $R_{tot} = R_a + R_{ext}$, the armature current will reach its rated value when the motor reaches a speed such that

$$E_a = 230 - 122 R_{tot,old}$$

At this point R_{tot} will be reduced such that the armature current again reaches 122 A. Based upon this alogrithm, the external resistance can be controlled as shown in the following table:

Step number	$R_{ext}[\Omega]$	$E_{a,min}$ [V]	n_{min} [r/min] [V]	$E_{a,max}$ [V]	n_{max} [r/min]
1	0.878	0	0	115	587
2	0.407	115	587	173	882
3	0.170	173	882	202	1030
4	0.051	202	1030	216	1101
5	0	216	1101	-	-

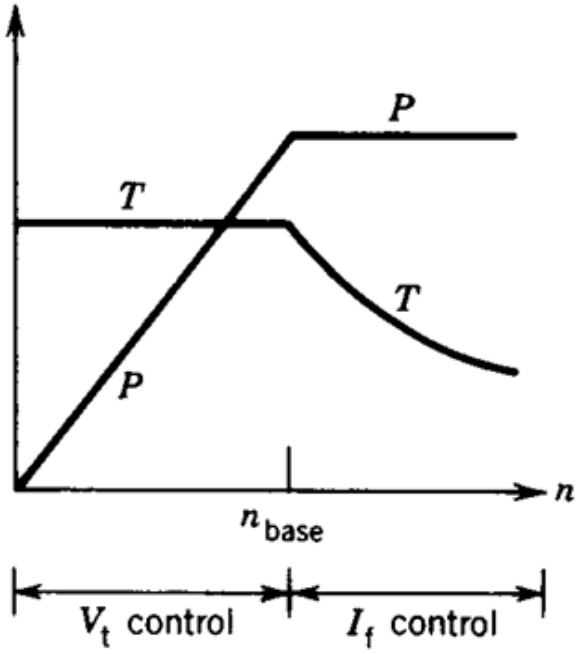
کنترل سرعت با سیستم وارد لئونارد



این سیستم در سال ۱۸۹۰ میلادی مطرح گشت. شکل این سیستم از یک مجموعه موتور – ژنراتور یا مجموعه $M-G$ تشکیل شده است. در مجموعه $M-G$ ژنراتور از نوع DC است و موتور AC با سرعت ثابت می‌باشد. ژنراتور DC یک موتور DC را تغذیه می‌کند.

سیستم وارد لئونارد در دو وضعیت مختلف می‌تواند سرعت موتور DC را کنترل نماید.

کنترل V_t



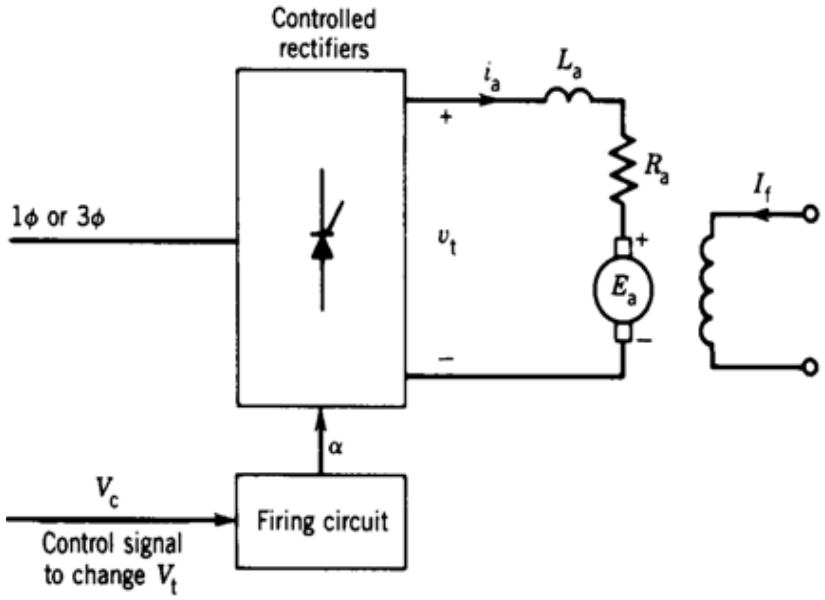
در حالت کنترل ولتاژ آرمیچر، جریان تحریک موتـور DC (I_{fm}) ثابت نگه داشته می‌شود (در حد مقدار اسمی). اگر جریان تحریک ژنراتورDC (I_{fg}) بنحوی تغییر نماید که V_t از صفر تـا مقـدار اسمی تغییر کند، در این صورت سرعت موتور DC از صفر تا سرعت مبنا تغییر خواهد کرد. در این محدوده از سرعت، گشتاور می‌تواند ثابت بماند.

کنترل I_f

در این حالت می‌توان به سرعتهایی بیش از سرعت مبنا دست یافت. در این وضعیت ولتاژ آرمیچر (V_t) ثابت نگه داشته می‌شود و جریان تحریک موتور DC (I_{fm}) را کاهش می‌دهیم(تضعیف میدان) . در این صورت به سرعت‌هایی بیش از سرعت مبنا دست می‌یابیم. در این حالت جریان آرمیچر می‌تواند ثابت نگهداشته شود (توان ثابت).

سیستم‌های الکترونیکی برای کنترل سرعت موتورهای DC

اگر منبع تغذیه تک فاز یا سه فـــازی AC در دسترس باشد، در این صورت مـــی‌تـــوان از یکسوکننده‌های کنترل شده استفاده نمود و ولتاژ AC ثابتی را به ولتاژ متغیر DC مبدل ساخت.



برای مبدل تک فاز تمام موج تمام کنترل شده:

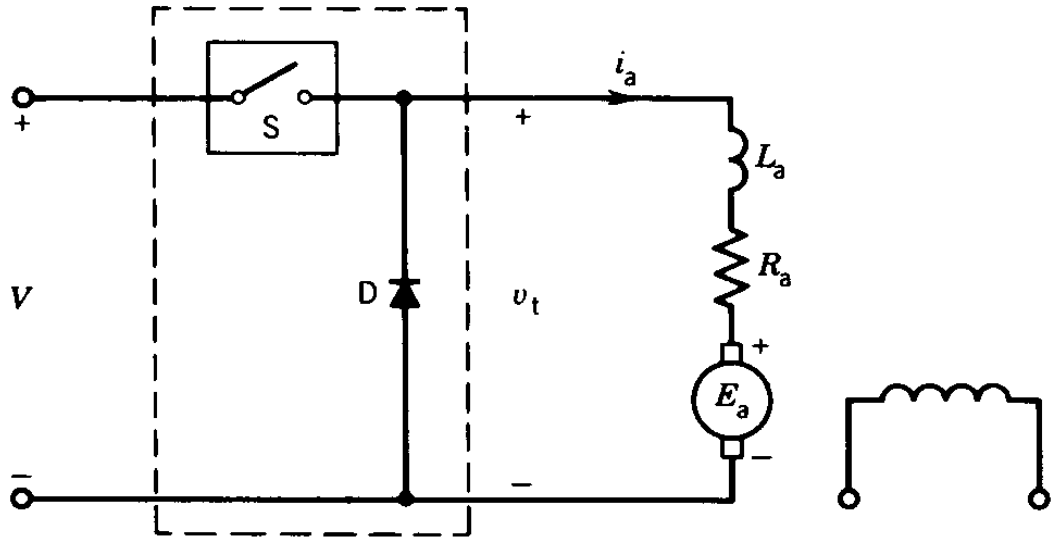
$$V_t = \frac{2\sqrt{2}\,V_p}{\pi}\cos\alpha$$

برای مبدل سه فاز تمام مومج تمام کنترل شده:

$$V_t = \frac{3\sqrt{6}\,V_p}{\pi}\cos\alpha$$

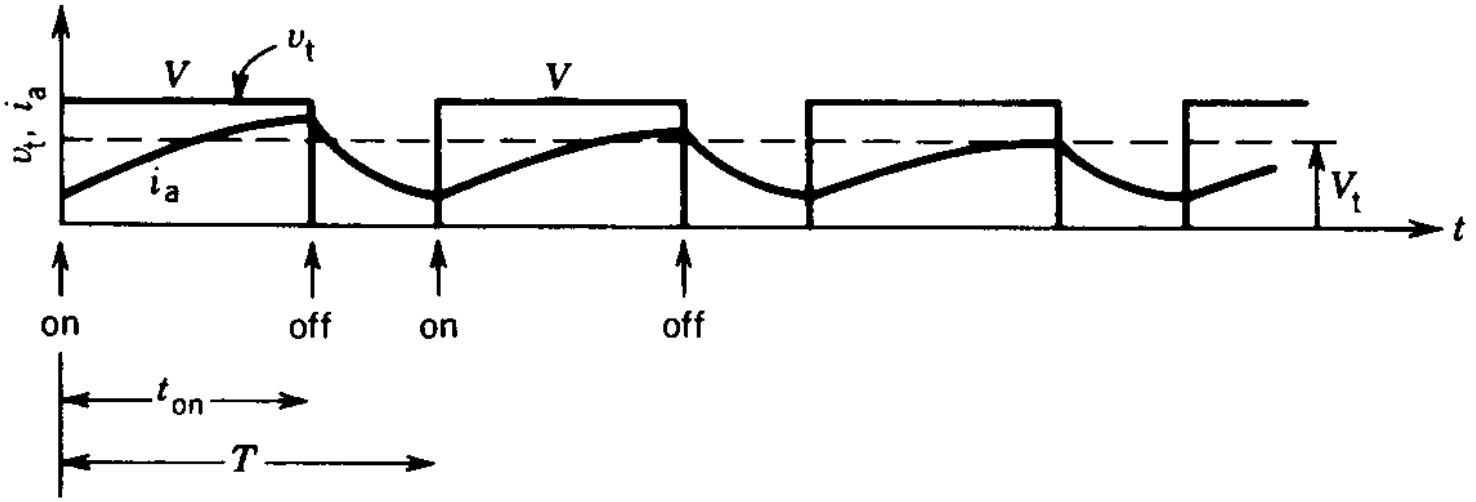
V_p مقدار مؤثر (rms) منبع AC ورودی به یکسو کننده است. α زاویه آتش ترستورها می باشد

برشگرها



$$V_t = \frac{t_{on}}{T} V$$

$$= \alpha V$$



Applications of DC Machines

Direct current motors are very commonly used as variable speed drives and in applications where severe torque variations occur.

❖ Applications of DC Motors

The main applications of the three types of direct current motors are given below.

❑ Series Motors

The series DC motors are used where high starting torque is required, and variations in speed are possible. For example – the series motors are used in Traction system, Cranes, air compressors, Vacuum Cleaner, Sewing machine, etc.

❑ Shunt Motors

The shunt motors are used where constant speed is required and starting conditions are not severe. The various applications of DC shunt motor are in Lathe Machines, Centrifugal Pumps, Fans, Blowers, Conveyors, Lifts, Weaving Machine, Spinning machines, etc.

❑ Compound Motors

The compound motors are used where higher starting torque and fairly constant speed is required. The examples of usage of compound motors are in Presses, Shears, Conveyors, Elevators, Rolling Mills, Heavy Planners, etc.

The small DC machines whose ratings are in fractional kilowatt are mainly used as control device such in Techno generators for speed sensing and in Servo motors for positioning and tracking.

❖ Applications of DC Generators

The applications of the various types of DC Generators are as follows:-

❑ Separately Excited DC Generators

Separately excited DC Generators are used in laboratories for testing as they have a wide range of voltage output.

Used as a supply source of DC motors.

❑ Shunt wound Generators

DC shunt wound generators are used for lighting purposes.

Used to charge the battery.

Providing excitation to the alternators.

❑ Series Wound Generators

DC series wound generators are used in DC locomotives for regenerative braking for providing field excitation current.

Used as a booster in distribution networks.

Over compounded cumulative generators are used in lighting and heavy power supply.

Flat compounded generators are used in offices, hotels, homes, schools, etc.

Differentially compounded generators are mainly used for arc welding purpose.