

موتورهای جریان مستقیم

ماشین‌های جریان مستقیم (DC^۲) دارای قابلیت انعطاف بسیار بوده و در صنایع کاربرد وسیعی دارند. با اتصالات مختلف مدار تحریک (سیم‌پیچی میدان^۳) می‌توان در این ماشین‌ها به مشخصه‌های گشتاور سرعت و ولتاژ جریان گوناگون دست یافت. از ماشین‌های DC می‌توان به صورت موتور یا ژنراتور بهره‌برداری نمود. اما امروزه برای ایجاد برق DC از سیستم‌های الکترونیک قدرت استفاده می‌کنند و یکسوسازها کاربرد وسیعی پیدا کرده‌اند. لذا ژنراتورهای DC رفته رفته جای خود را در صنعت از دست داده‌اند. اما موتورهای DC بخاطر امکان کنترل سرعت آن‌ها کاربرد فراوانی در صنایع دارند. امروزه هنوز موتورهای DC در سیستم‌های حمل و نقل (مترو) حرف اول را می‌زنند و باید گفت موتورهای DC بدون شک نقش ارزنده‌ای در صنایع ایفا می‌کنند. موتورهای DC بزرگ در صنایع نورد، چاپ، جرثقیل‌سازی کاربرد فراوان دارند. موتورهای DC کوچک در سیستم‌های کنترل به وفور یافت می‌شوند. از جمله می‌توان از تاکوژنراتور^۴ برای حس سرعت نام برد [۵].

^۲Direct Current machines

^۳Field windings

^۴Tachogenerator

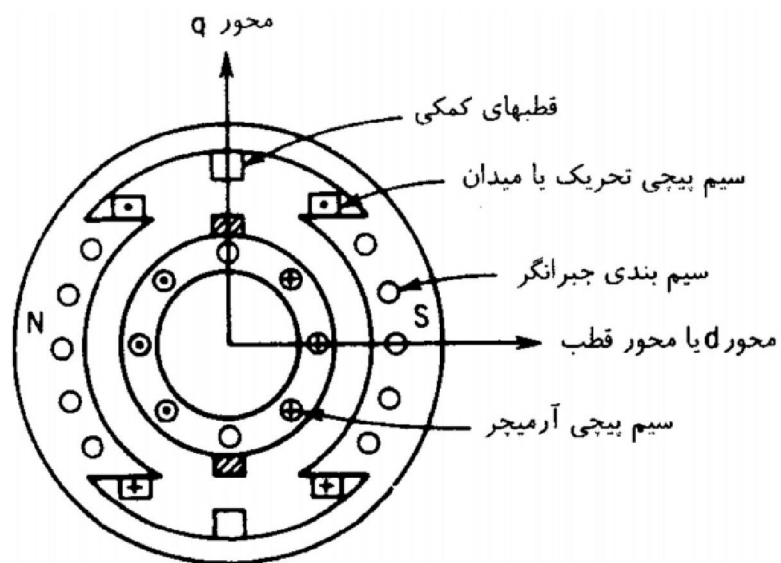
ساختمان ماشین‌های DC

در ماشین‌های DC سیم‌پیچی آرمیچر بر روی روتور قرار دارد و سیم‌پیچی تحریک (میدان) بر روی استاتور استوار است. شکل ۱.۳ یک ماشین DC دو قطبی^۵ را نشان می‌دهد. در این شکل استاتور حاوی دو قطب برجسته بوده و به دور قطب‌ها سیم‌پیچی تحریک (میدان) پیچیده شده است. قطب‌ها می‌توانند دارای یک یا دو سیم‌پیچی تحریک باشند. این دو سیم‌پیچی تحریک به قرار زیر هستند:

۱. سیم‌پیچی تحریک شنت یا موازی

۲. سیم‌پیچی سری

سیم‌پیچی‌های تحریک، توزیع شار در شکاف هوایی بین استاتور و روتور ایجاد می‌کنند. این توزیع شار نسبت به محور قطب متقارن است. نام‌های دیگر محور قطب به قرار زیر است:



۱. محور میدان^۱

۲. محور مستقیم^۲

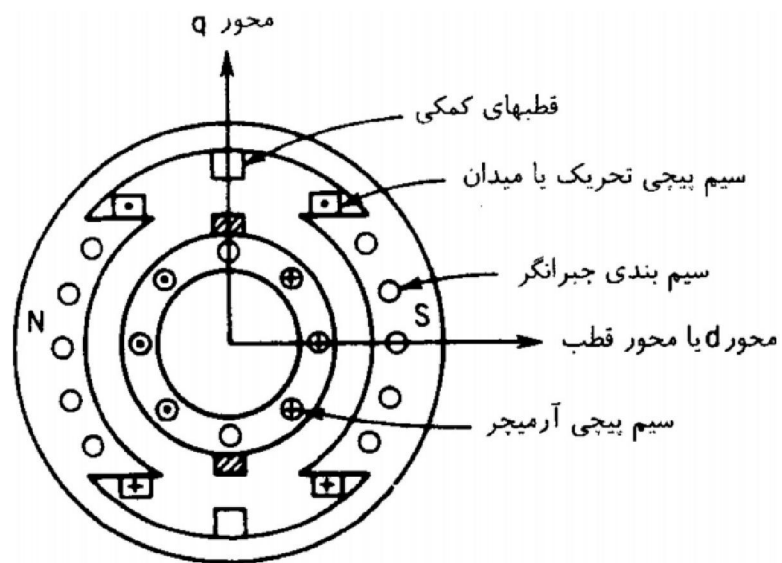
۳. محور d

⁵Two poles

¹Field axis

²Direct axis

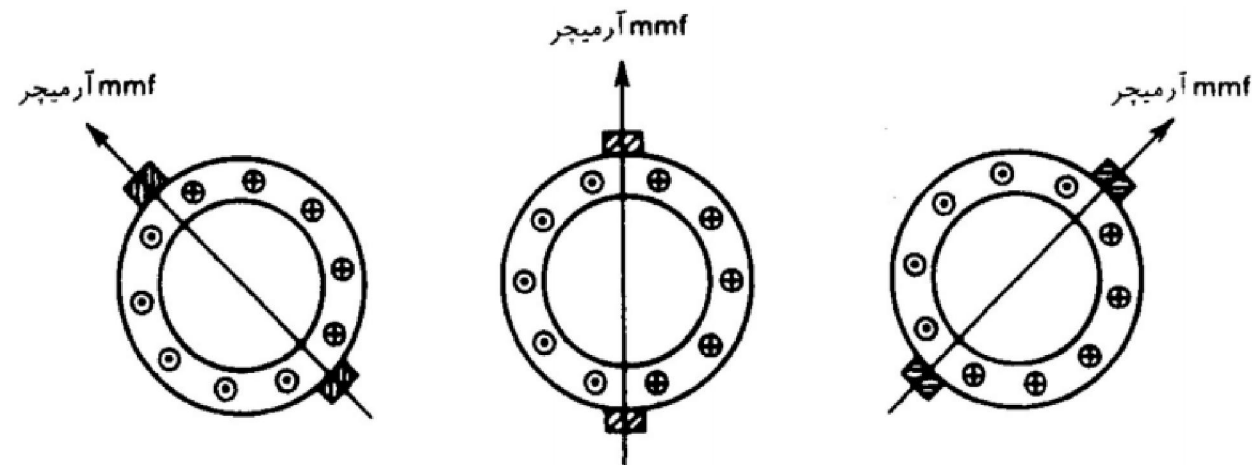
ولتاژ القا شده در حلقه‌های ^۳سیم‌پیچی آرمیچر ولتاژی متناوب است. برای یکسو کردن ولتاژ از کموتاتور و جاروبک استفاده می‌شود. در حقیقت این دو نقش یک یکسوساز مکانیکی را ایفا می‌کنند. گذشته از آن این یکسوساز مکانیکی موج mmf ناشی از جریان آرمیچر را در فضا تثبیت می‌کند. جاروبک‌ها بر روی تیغه‌های کموتاتور آنچنان قرار می‌گیرند تا جریان درون آن‌ها به هنگام عبور لبه‌های یک حلقه آرمیچر از منطقه میان قطب‌ها تغییر جهت دهد. این کار سبب می‌شود تا همگی هادی‌های زیر یک قطب، حامل جریانی در یک جهت باشند. در نتیجه، نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) حاصله از جریان آرمیچر، در راستای محور میانی دو قطب مجاور قرار می‌گیرد. محور یاد شده را محور متعامد^۱ یا محور q می‌نامند. در طرح‌واره شکل ۱.۳ جاروبک‌ها بر روی محور q قرار می‌گیرند تا نشان دند به هنگامی که یک حلقه در فرآیند کموتاسیون واقع می‌گردد لبه‌های هم راستای محور q قرار می‌گیرد. به هر حال، به سبب اتصال پایانه‌های کلاف‌ها، جایگاه عملی جاروبک‌ها تقریباً ۹۰ درجه الکتریکی از موقعیتی که در شکل ۱.۳ نشان داده شده است فاصله دارد.



³Turns

¹Quadrature axis

نظر به مجموعه کموتاتور و جاروبک، نیروی محرکه مغناطیسی آرمیچر در راستای محور q نسبت به نیروی محرکه مغناطیسی میدان در راستای محور d متعامد است. این نحوه جایگیری نیروهای محرکه مغناطیسی، تولید گشتاور را ماکزیمم خواهد ساخت. محور mmf ناشی از آرمیچر می‌تواند با تعویض جایگاه جاروبک‌ها مانند شکل ۲.۳ جابجا گردد. برای بهبود عملکرد ماشین‌های DC وجود قطب‌های کمکی^۲ در میان قطب‌های اصلی و سیم‌پیچی‌های جبرانگر^۳ در پیشانی قطب‌های اصلی ضروری است.



²Inter pole

³Compensating Windings

آنگاه که آرمیچر در میدان مغناطیسی ناشی از قطب‌های استاتور می‌چرخد، در سیم‌پیچی آرمیچر ولتاژ القا می‌گردد.

$$E_a = k_a \phi \omega_m \quad (۱.۳)$$

k_a ضریب ثابت آرمیچر یا ضریب ثابت ماشین DC است. ϕ شار هر قطب بر حسب وبر، ω_m سرعت مکانیکی بر حسب رادیان بر ثانیه و E_a نیروی الکتروموتوری برگشتی^۱ یا نیروی ضد محرکه (در حالت موتوری) و ولتاژ تولید شده یا نیروی محرکه الکتریکی (EMF) (در حالت ژنراتوری) گفته می‌شود و بر حسب ولت است.

¹back Electro motive force (back EMF)

گشتاور حاصله یا گشتاور الکترومغناطیسی

گشتاور بخاطر عبور جریان از آرمیچر و میدان مغناطیسی ناشی از قطب‌های استاتور حاصل می‌شود.

$$T = k_a \phi I_a \quad (2.3)$$

I_a جریان آرمیچر برحسب آمپر، k_a ضریب ثابت آرمیچر یا ضریب ثابت ماشین DC است. ϕ شار هر قطب برحسب وبر است.

از روابط (۱.۳) و (۲.۳) داریم:

$$\text{توان مکانیکی} = E_a I_a = k_a \phi \omega_m I_a = T \omega_m = \text{توان الکتریکی} \quad (3.3)$$

از این رابطه در می‌یابیم که توان الکتریکی به توان مکانیکی و بالعکس قابل تبدیل است. در حالت موتوری توان الکتریکی وارده به آرمیچر ($E_a I_a$) به توان مکانیکی ($T \omega_m$) تبدیل می‌شود. در حالت ژنراتوری توان مکانیکی به توان الکتریکی مبدل می‌گردد. به $E_a I_a$ توان حاصله توسط آرمیچر یا توان الکترومغناطیسی نیز اطلاق می‌گردد.

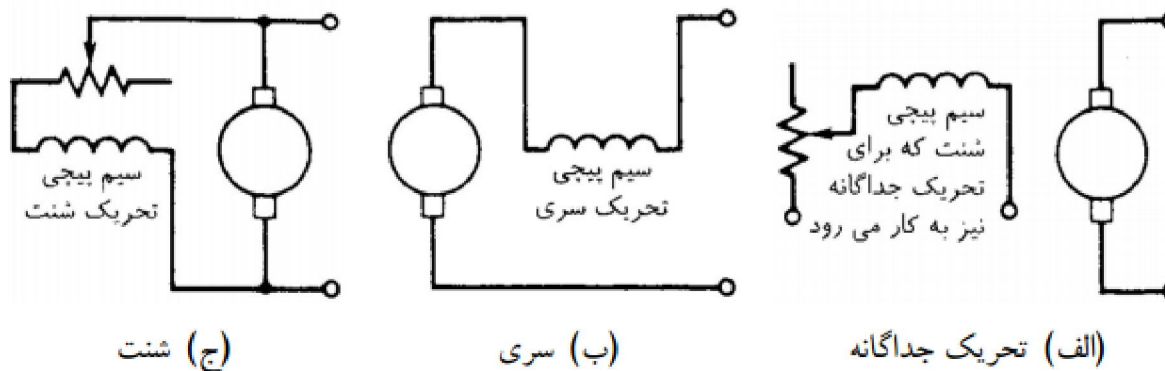
طبقه‌بندی ماشین‌های DC

مدار تحریک (سیم‌پیچ‌های میدان) و مدار آرمیچر را می‌توان به طرق گوناگون به یکدیگر مرتبط ساخت تا مشخصه‌های عملیاتی مختلفی پدید آید. این امر از محسنات بارز ماشین‌های DC است. قطب‌ها می‌توانند توسط دو سیم‌پیچی به نام سیم‌پیچی سری و سیم‌پیچی شنت (موازی) تحریک شوند. تعداد حلقه‌های سیم‌پیچی شنت بسیار زیاد است و جریان این سیم‌پیچی بسیار کم می‌باشد (حدود ۵ درصد جریان نامی آرمیچر). این سیم‌پیچی با سیم‌پیچی آرمیچر موازی بسته می‌شود و بهمین دلیل به آن سیم‌پیچی شنت یا موازی اطلاق می‌گردد.

سیم‌پیچی سری که باز بر روی قطب‌های قرار می‌گیرد تا میدان مغناطیسی را پدید آورد دارای تعداد حلقه کمتر بوده ولی جریان عبوری از آن نسبتاً زیاد است. این سیم‌پیچی با سیم‌پیچی آرمیچر سری بسته می‌شود و بدین دلیل لفظ سیم‌پیچی سری به آن اطلاق می‌گردد. اگر در ماشینی هردو سیم‌پیچی سری و شنت وجود داشته باشد، سیم‌پیچی سری در بالای سیم‌پیچی شنت نصب می‌شود.

در ماشین‌های DC با تحریک جداگانه (تحریک مستقل)^۱، سیم‌پیچی تحریک توسط منبع DC مستقل و جداگانه‌ای تغذیه می‌گردد (شکل ۳.۳ الف)).

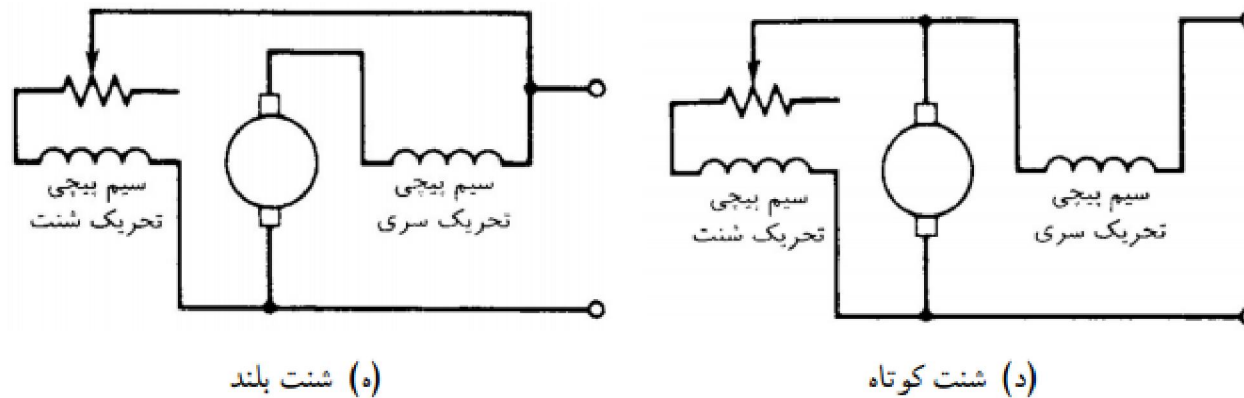
در ماشین‌های DC خود تحریک^۲، سیم‌پیچی تحریک به سه نحو با آرمیچر در ارتباط خواهد بود. همان‌طور که می‌دانیم قطب‌ها معمولا حاوی دو سیم‌پیچی سری و شنت هستند. اگر سیم‌پیچی سری با آرمیچر به طور سری بسته شود در این صورت ماشین DC خود تحریک از نوع سری حاصل می‌شود (شکل ۳.۳ ب)). اگر سیم‌پیچی شنت با آرمیچر موازی بسته شود، ماشین DC خود تحریک از نوع شنت حاصل می‌گردد (شکل ۳.۳ ج)).



¹Seperately excited

²Self excited

اگر از هر دو سیم پیچی سری و شنت جهت تحریک ماشین استفاده شود، ماشین های DC خود تحریک از نوع مختلط یا کمپوند^۳ شکل می گیرند. در ماشین های کمپوند اگر سیم پیچی شنت موازی آرمیچر باشد، ماشین DC کمپوند از نوع شنت کوتاه^۴ حاصل می شود (شکل ۳.۳(د)). 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 (شکل ۳.۳(ه)). 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 بلند را کمپوند اضافی^۵ می نامند. اگر mmf سیم پیچی سری mmf سیم پیچی شنت را تضعیف کند، ماشین DC کمپوند اعم از شنت کوتاه یا بلند را کمپوند نقصانی یا تفاضلی^۶ گویند.



³Compound

⁴Short shant

⁵Commulative

⁶Differential

معمولا در مدار تحریک شنت رئوسا 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 حقیقت می توان این ماشین ها را همانند ماشین هایی با تحریک جداگانه که در آن میدان تحریک ثابت می باشد، در نظر گرفت.

با توجه به نکات فوق به طور خلاصه انواع ماشین‌های DC اعم از ژنراتور یا موتور را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی نمود:

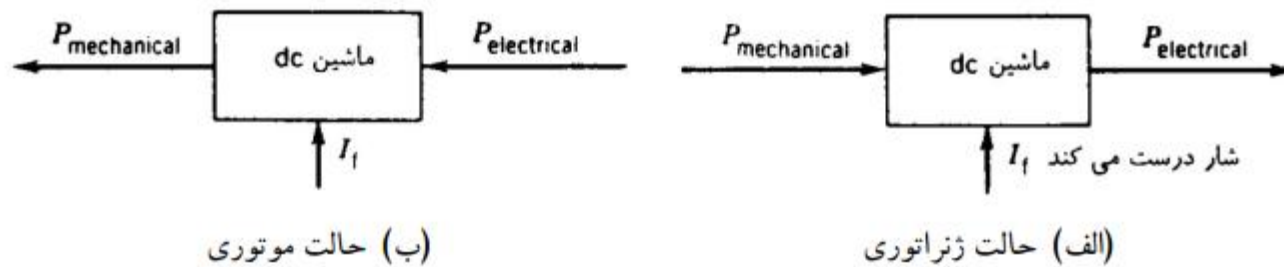
۱. ماشین DC از نوع تحریک جداگانه یا تحریک مستقل
۲. ماشین DC سری که از نوع خود تحریک است.
۳. ماشین DC شنت که از نوع خود تحریک است.
۴. ماشین DC کمپوند، شنت بلند اضافی که از نوع خود تحریک است.
۵. ماشین DC کمپوند، شنت بلند نقصانی که از نوع خود تحریک است.
۶. ماشین DC کمپوند، شنت کوتاه اضافی که از نوع خود تحریک است.
۷. ماشین DC کمپوند، شنت کوتاه نقصانی که از نوع خود تحریک است.
۸. ماشین DC با آهن‌ربای دائم^۱.

¹Permenant Magnet DC Machines

ماشین‌های DC در دو حالت زیر می‌توانند مورد بهره‌برداری قرار گیرند:

۱. حالت ژنراتوری (شکل ۴.۳ الف)) که در آن محرک اولیه (توربین) محور و آرمیچر را می‌چرخاند و در اثر چرخش آرمیچر و قطع خطوط شار حاصل از قطب‌های استاتور، در آرمیچر ولتاژ القا می‌گردد. این ولتاژ می‌تواند انرژی الکتریکی مصرف‌کننده‌های متصل به جاروبک‌ها را تامین کند. در حقیقت در ژنراتورها انرژی مکانیکی به الکتریکی تبدیل شده است.

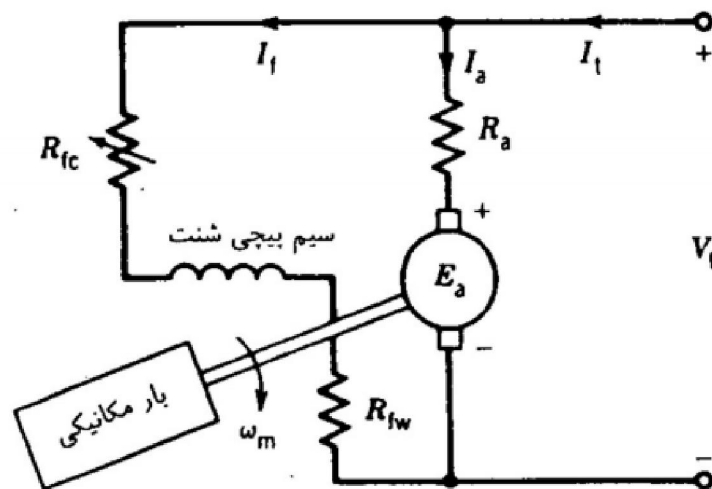
۲. حالت موتوری (شکل ۴.۳ ب)) که در آن انرژی الکتریکی از منبع تغذیه DC از طریق جاروبک وارد آرمیچر شده و گشتاور به علت وجود میدان قطب‌های استاتور پدید می‌آید. لذا چرخش حاصل می‌شود. در حقیقت در موتورهای DC انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود.



در هر دو حالت موتوری و ژنراتوری آرمیچر درون میدان مغناطیسی ناشی از قطب‌های استاتور می‌چرخد و از سیم‌پیچی آرمیچر جریان می‌گردد. لذا معادلات (۱.۳) و (۲.۳) برای دو حالت ژنراتوری و موتوری معتبر است. یکی از مشخصه‌های بارز موتورهای DC کنترل سرعت آن‌ها در طیف و محدوده‌ای وسیع می‌باشد.

موتور DC شنت

مدار معادل این موتور در شرایط مانا (ماندگار) در شکل ۵.۳ نشان داده شده است. در این ماشین‌ها سیم‌پیچی تحریک (سیم‌پیچی میدان) موازی آرمیچر بوده و هر دو به منبع تغذیه DC با ولتاژ V_t متصل‌اند. در مدار تحریک شنت نیز می‌توان رئوستای متغیر قرار داد. در موتورهای DC جریان I_t از شبکه وارد موتور می‌شود و پرواضح است که جهت خلاف حالت ژنراتوری است. از آنجایی که آرمیچر و سیم‌پیچ تحریک شنت هر دو توسط منبع ثابت V_t تغذیه می‌شود، می‌توان موتور DC تحریک جداگانه را نیز بهمین منوال تحلیل نمود. باید دانست در موتورهای DC شنت عملکرد مدار تحریک، مستقل از عملکرد مدار آرمیچر می‌باشد.



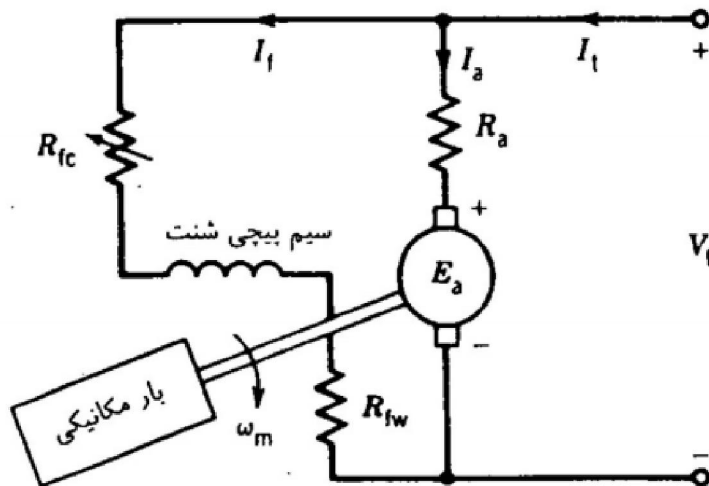
معادلات این گونه ماشین‌ها در شرایط ماندگار به قرار زیر است:

$$V_t = I_a R_a + E_a \quad (4.3)$$

$$I_t = I_a + I_f \quad (5.3)$$

$$E_a = k_a \phi \omega_m = V_t - R_a I_a \quad (6.3)$$

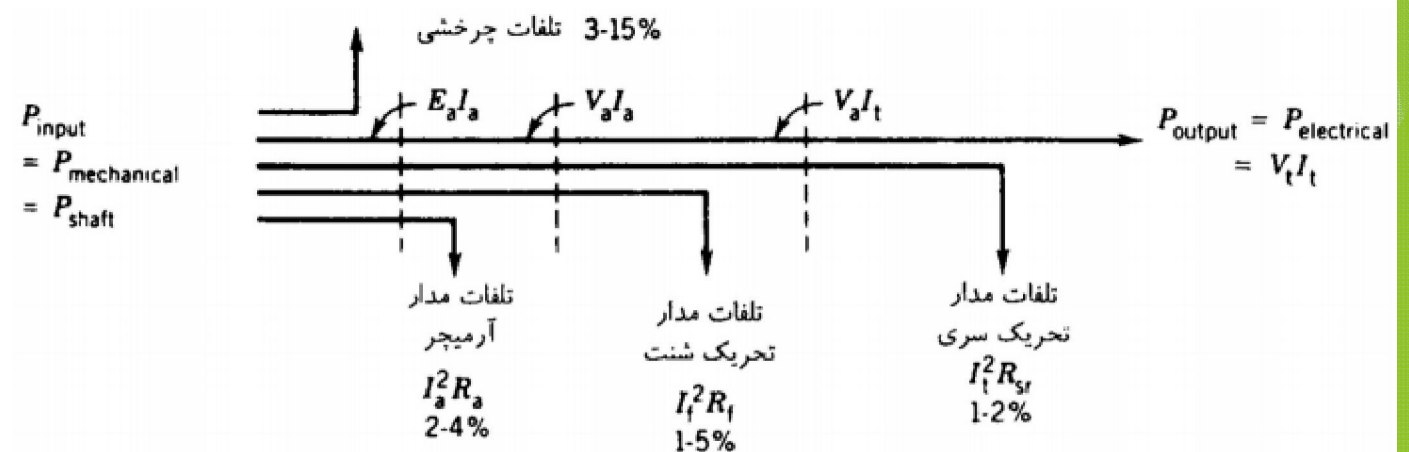
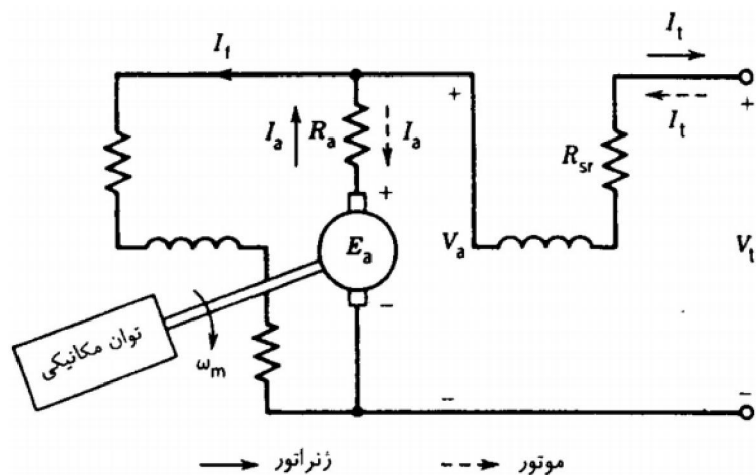
باید دانست جریان آرمیچر و سرعت موتور به بار مکانیکی متصل به محور بستگی دارند.



پخش توان و بازده

به طور کلی پخش توان در ماشین‌های DC اعم از موتور و ژنراتور مطابق شکل ۷.۳ است. در اینجا برای تشریح موضوع یک ماشین DC کمپوند از نوع شنت کوتاه را در نظر می‌گیریم (شکل ۵.۳).
در حالت ژنراتوری مطابق شکل ۷.۳ (الف) داریم:

۱. توان ورودی به سیستم یک توان مکانیکی است (P_{input} یا P_{shaft}).
۲. بخشی از این توان ورودی (حدود ۳ تا ۱۵ درصد) صرف تلفات چرخشی (P_{rot}) می‌شود. تلفات چرخشی شامل تلفات اصطکاک، تلفات تهویه و تلفات هسته روتور (هسته آرمیچر) است.



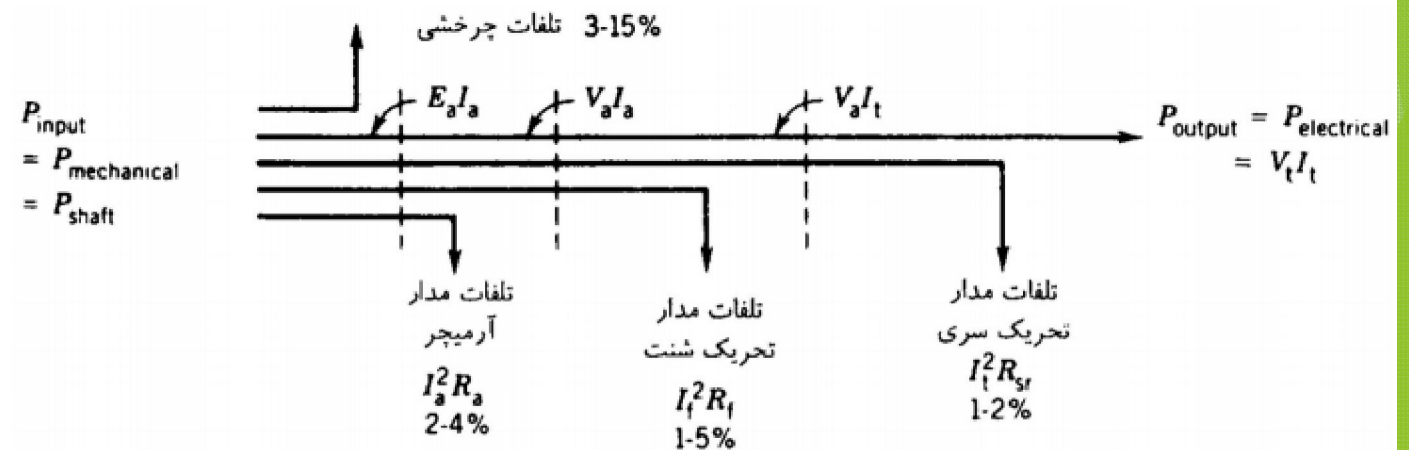
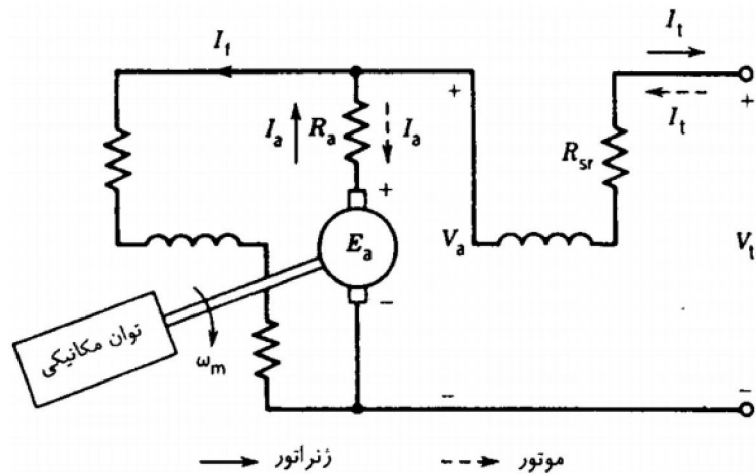
۳. تفاوت توان ورودی و تلفات چرخشی به توان الکتریکی تبدیل می‌شود و توان الکتریکی حاصله معادل $E_a I_a$ خواهد بود

۴. بخشی از $E_a I_a$ صرف تلفات مسی آرمیچر یا $R_a I_a^2$ می‌گردد.

۵. بخشی از $E_a I_a$ صرف تلفات مسی سیم‌پیچی تحریک شنت و رئوستای آن می‌گردد.

۶. بخشی از $E_a I_a$ صرف تلفات مسی سیم‌پیچی تحریک سری می‌شود.

۷. بالاخره آنچه از $E_a I_a$ باقی می‌ماند تحویل مصرف‌کننده می‌شود و به توان خروجی (P_{output}) شهرت دارد.



در شکل ۷.۳(الف) درصد تلفات ذکر شده در قبال توان ورودی محاسبه شده و این درصدها به اندازه و حجم ماشین

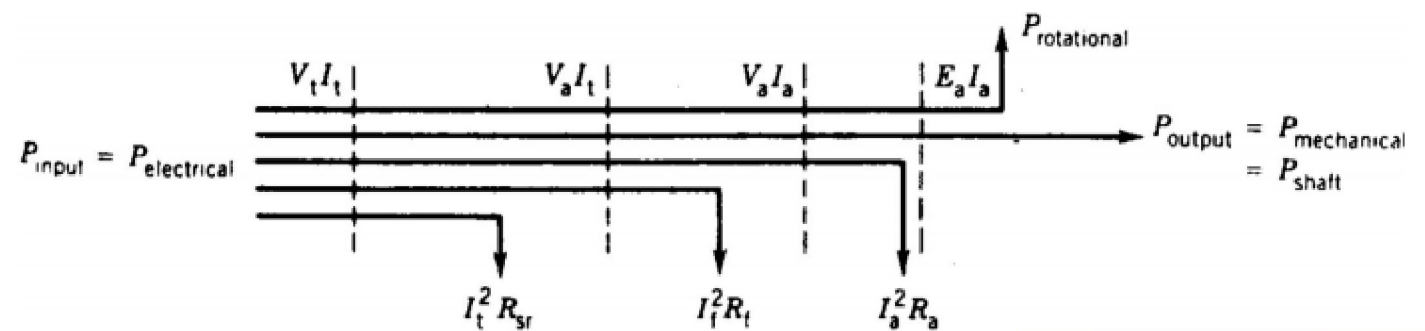
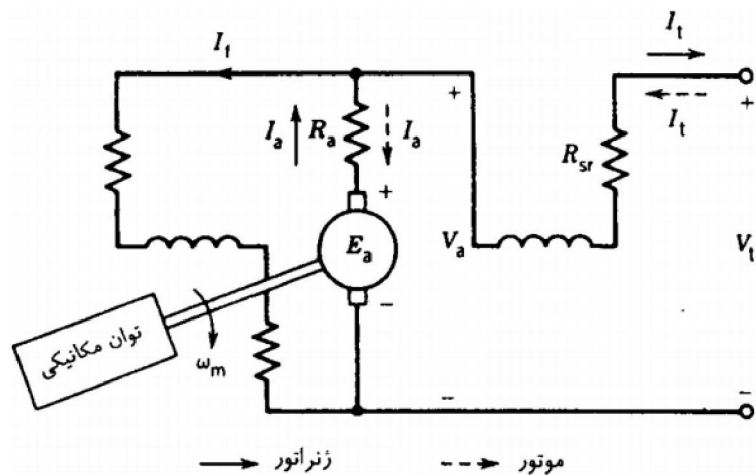
بستگی دارد. بازده (بهره) ماشین DC مورد بحث به صورت زیر است:

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} \quad (۷.۳)$$

برای حالت موتوری شکل ۷.۳(ب) معتبر است و می توان گفت:

۱. توان ورودی به سیستم الکتریکی می باشد.

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



۳. بخشی از این توان ورودی صرف تلفات مسی سیم‌پیچی تحریک شنت و رئوستای آن می‌گردد.

۴. بخشی از این توان ورودی صرف تلفات مسی سیم‌پیچی آرمیچر می‌شود.

۵. تفاوت توان ورودی و کل تلفات مسی ماشین به توان مکانیکی تبدیل می‌شود ($E_a I_a$).

۶. بخشی از $E_a I_a$ صرف تلفات چرخشی می‌گردد.

۷. تفاوت $E_a I_a$ و تلفات چرخشی بر روی محور به صورت توان خروجی یا توان مکانیکی ظاهر می‌شود.

برای موتورهای نیز بازده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} \quad (۸.۳)$$

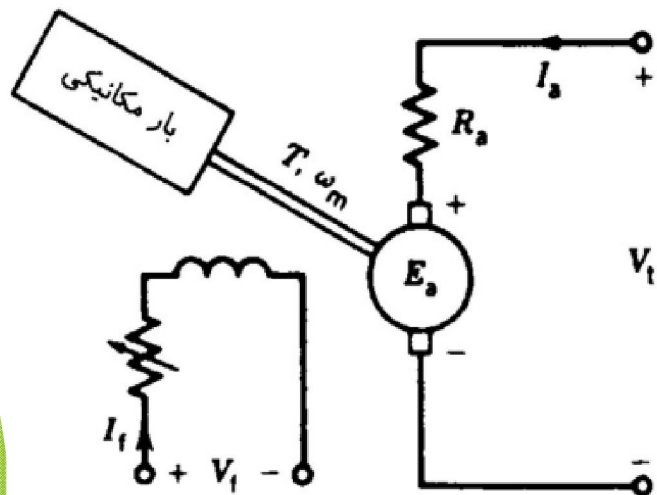
باید گفت برای موتورهای و ژنراتورهای شنت نیز تمامی استدلال‌های فوق صادق است ولی تلفات مسی سیم‌پیچی سری در محاسبات وجود ندارد. برای موتورهای و ژنراتورهای DC سری نیز تمام محاسبات فوق صادق است ولی از تلفات مسی سیم‌پیچی تحریک شنت خبری نیست. برای موتورهای و ژنراتورهای DC کمپوند از نوع شنت بلند نیز می‌توان کلیه استدلال‌های فوق را معتبر دانست.

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. لذا برای کاربرد موتورهای DC در وضعیتی خاص، باید مشخصه‌های گشتاور سرعت آن‌ها را مورد مطالعه قرار داد. یک موتور DC با تحریک جداگانه را در نظر می‌گیریم (شکل ۸.۳). ولتاژ، جریان و گشتاور آن‌ها این چنین به هم مربوط می‌شوند:

$$E_a = k_a \phi \omega_m = V_t - I_a R_a \quad (۹.۳)$$

$$T = k_a \phi I_a \quad (۱۰.۳)$$



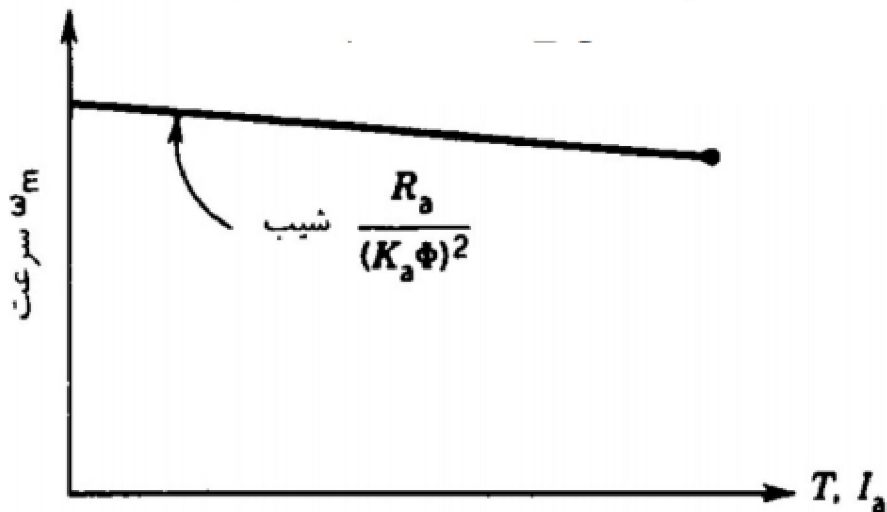
از رابطه (۹.۳) داریم:

$$\omega_m = \frac{V_t - I_a R_a}{k_a \phi} \quad (۱۱.۳)$$

از روابط (۱۰.۳) و (۱۱.۳) داریم:

$$\omega_m = \frac{V_t}{k_a \phi} - \frac{R_a}{(k_a \phi)^2} T \quad (۱۲.۳)$$

اگر ولتاژ پایانه (V_t) و شار ثابت باقی بمانند، مشخصه گشتاور سرعت مطابق شکل ۹.۳ خواهد بود. تغییر سرعت در اثر افزایش بار در این موتورها ناچیز است و لذا تنظیم سرعت خوبی در این موتورها برقرار است. در ماشین‌های واقعی بخاطر عکس‌العمل آرمیچر ناشی از افزایش گشتاور و در نتیجه جریان I_a شار ثابت نمی‌ماند و کاهش می‌یابد. لذا کاهش سرعت کمتر از شکل ۹.۳ خواهد بود. پس عکس‌العمل آرمیچر تنظیم سرعت در موتورهای DC تحریک جداگانه را بهبود می‌بخشد.



از رابطه (۱۲.۳) در می یابیم که 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:

۱. با افزایش V_t سرعت زیاد می شود.

۲. با افزایش ϕ سرعت کم می شود.

۳. با افزایش R_a سرعت کاهش می یابد.

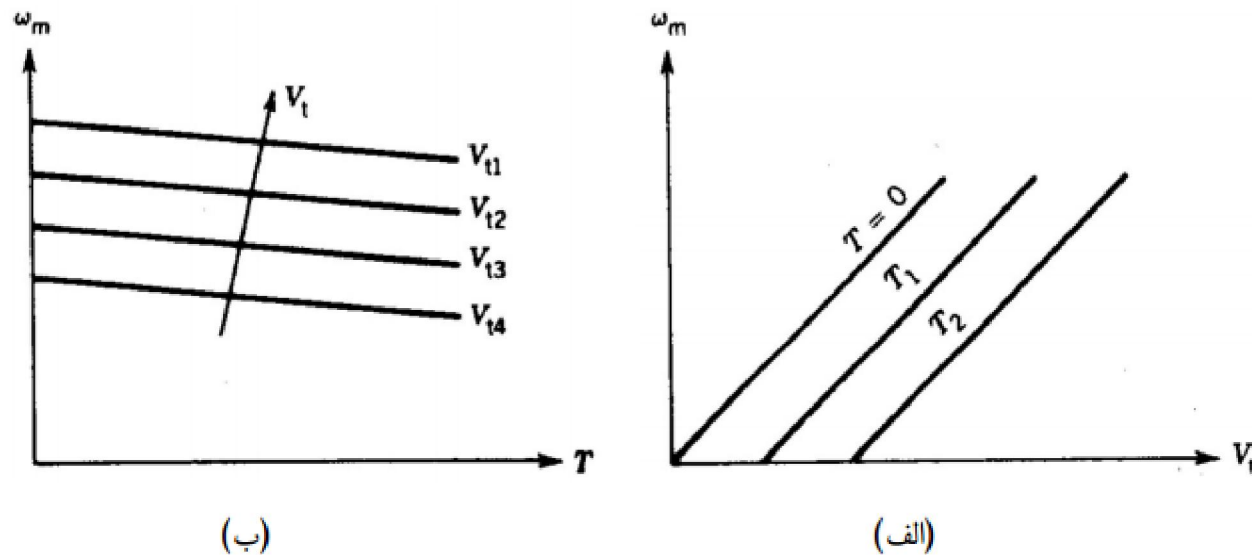
کنترل ولتاژ آرمیچر

در این سیستم کنترل سرعت، ϕ شار و یا I_f و R_a ثابت نگه داشته می شود و با تغییر V_t سرعت کنترل می شود. اگر از عکس العمل آرمیچر صرف نظر کنیم، داریم:

$$\omega_m = k_1 V_t - k_2 T, \quad k_1 = \frac{1}{k_a \phi}, \quad k_2 = \frac{R_a}{(k_a \phi)^2} \quad (13.3)$$

در بارهایی که گشتاور ثابت است (بالابرها، آسانسورها)، سرعت با ولتاژ رابطه خطی دارد و این امر در شکل ۱۰.۳ (الف) نشان داده شده است.

اگر ولتاژ پایانه (V_t) ثابت فرض شود و گشتاور تغییر کند، سرعت را می توان با تغییر V_t تنظیم نمود (شکل ۱۰.۳ (ب)).



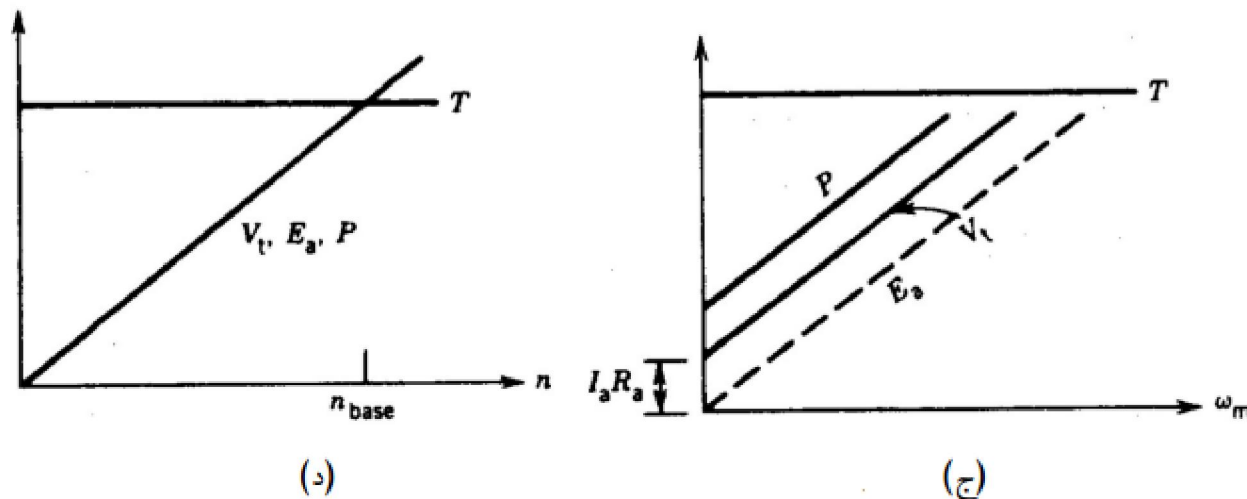
در کاربردهای عملی هرگاه تغییر سرعت بوسیله تغییر V_t صورت پذیرد، جریان آرمیچر ثابت نگه داشته می شود. در

هنگام جریان آرمیچر ثابت داریم؛

$$E_a \propto V_t \propto \omega_m \quad (۱۴.۳)$$

لذا با افزایش V_t سرعت به طور خطی زیاد می شود (شکل ۱۰.۳ ج). اگر I_a ثابت بماند، گشتاور نیز ثابت باقی می ماند. انرژی ورودی از منبع به موتور نیز $(P = V_t I_a)$ نسبت به سرعت به طور خطی تغییر می کند (شکل ۱۰.۳ ج).

اگر از مقاومت آرمیچر R_a صرف نظر شود، V_t ، E_a و P در سرعت صفر معادل صفر خواهند بود و نسبت به سرعت به طور خطی تغییر می کنند (شکل ۱۰.۳ د).

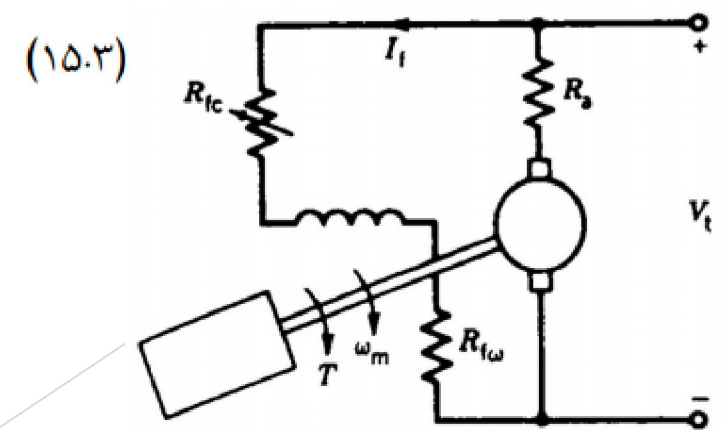


کنترل ولتاژ آرمیچر سرعت را به آرامی کنترل و تغییر می‌دهد و می‌توان سرعت را از صفر تا سرعت مبنا^۱ تغییر داد. سرعت مبنا، سرعتی است که در تحت ولتاژ اسمی پایانه موتور حاصل می‌شود. این سیستم کنترل قدری گران است زیرا به منبع DC با ولتاژ متغیر نیاز داریم.

کنترل میدان

برای بحث درباره کنترل میدان، یک موتور DC شنت مطابق شکل ۱۱.۳ (الف) را در نظر می‌گیریم. در این روش مقاومت آرمیچر R_a و V_t ثابت هستند و مقاومت مدار تحریک توسط رئوستای R_{fc} تغییر می‌کند. لذا جریان تحریک تغییر می‌کند و در نتیجه، میدان تحریک قابل کنترل است. البته در این بحث موتور را شنت در نظر گرفته‌ایم ولی باید دانست کلیه مطالب 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. در نتیجه داریم:

$$k_a \phi = k_f I_f$$



(الف) موتور DC شنت

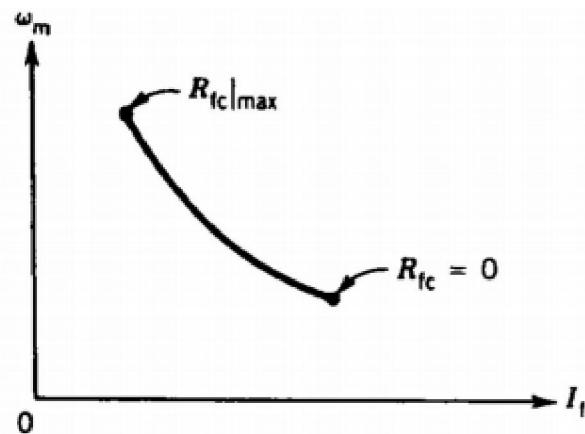
¹Base speed

$$\omega_m = \frac{V_t}{k_f I_f} - \frac{R_a}{(k_f I_f)^2} T \quad (۱۶.۳)$$

در شرایط بی‌باری $T = ۰$ بوده و از رابطه بالا داریم:

$$\omega_m = \frac{V_t}{k_f I_f} \quad (۱۷.۳)$$

تغییرات سرعت نسبت به جریان تحریک مطابق شکل ۱۱.۳ (ب) خواهد بود زیرا سرعت با معکوس I_f متناسب است. دقت کنید اگر در مدار تحریک پارگی رخ دهد ($I_f = ۰$)، در این صورت سرعت بطرز خطرناکی بالا می‌رود.



(ب) سرعت جریان

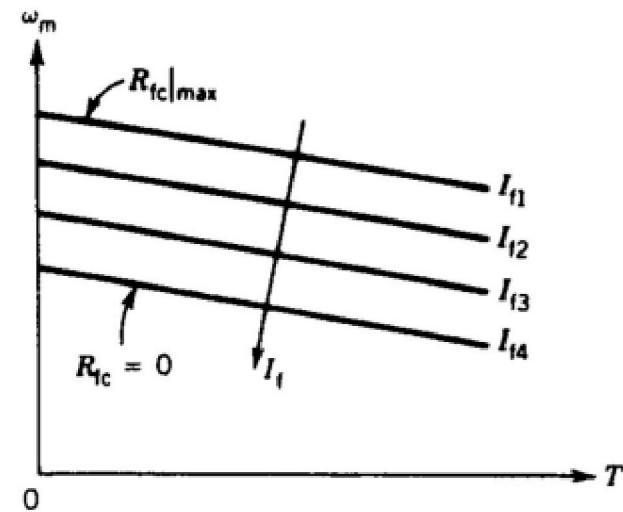
برای مقادیر خاصی از I_f داریم:

$$\omega_m = k_3 - k_4 T, \quad k_3 = \frac{V_t}{k_f I_f} \text{ سرعت در بی باری}, \quad k_4 = \frac{R_a}{(k_f I_f)^2} \quad (18.3)$$

شکل ۱۱.۳ (ج) تغییرات رابطه بالا را نشان می‌دهد. سرعت را می‌توان با تنظیم I_f همانند شکل ۱۱.۳ (ج) کنترل و تنظیم نمود. لذا همانند سیستم کنترل ولتاژ آرمیچر، این سیستم کنترل نیز می‌تواند سرعت‌های متغیر و قابل‌تنظیمی را حاصل سازد. باید گفت کنترل سرعت از سرعت صفر تا سرعت مبنا عمدتاً توسط سیستم کنترل ولتاژ آرمیچر انجام می‌پذیرد. کنترل سرعت پس از سرعت مبنا عمدتاً با کاهش جریان تحریک تحقق می‌پذیرد و این امر را تضعیف میدان^۱ گویند. باید گفت در سرعت مبنا ولتاژ پایانه آرمیچر همان ولتاژ اسمی است اگر بخواهیم جریان آرمیچر از مقدار اسمی فراتر نرود (بخاطر مسائل حرارتی)، کنترل سرعت پس از سرعت مبنا به محدوده توان ثابت محدود می‌گردد. این نوع عملکرد را بهره‌برداری در شرایط توان ثابت می‌نامند. لذا:

$$P = V_t I_a \cong E_a I_a \text{ ثابت}$$

$$T \omega_m = E_a I_a \Rightarrow T = \frac{E_a I_a}{\omega_m} = \frac{\text{مقدار ثابت}}{\omega_m} \quad (19.3)$$



(ج) سرعت گشتاور

¹Field Weakening

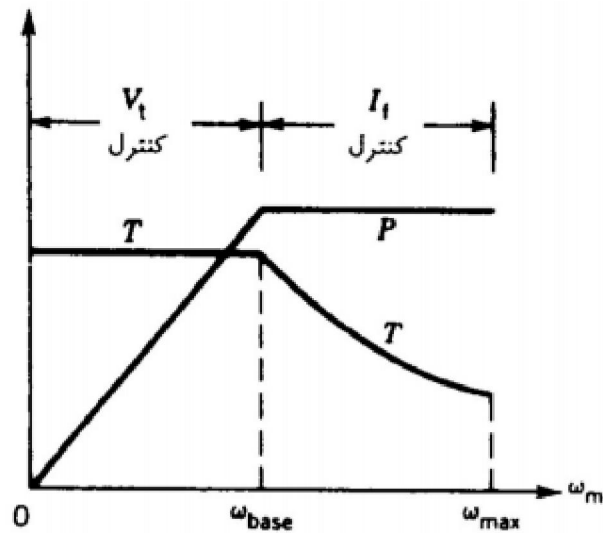
لذا در ناحیه تضعیف میدان، گشتاور با معکوس سرعت متناسب است. شکل ۱۱.۳ (د) دو مرحله کنترل سرعت را نشان می‌دهد.

۱. ناحیه عملیاتی گشتاور ثابت که توسط کنترل V_t تحقق می‌یابد.

۲. ناحیه عملیاتی توان ثابت که توسط کنترل جریان تحریک تحقق می‌پذیرد.

باید دانست سیستم کنترل میدان نسبتاً ارزان است. اما باید دانست بخاطر اندوکتانس زیاد در مدار تحریک، تغییر

جریان در مدار تحریک به کندی صورت می‌پذیرد، لذا این سیستم کنترل قدری کند و لخت است.



(د) مشخصه کامل

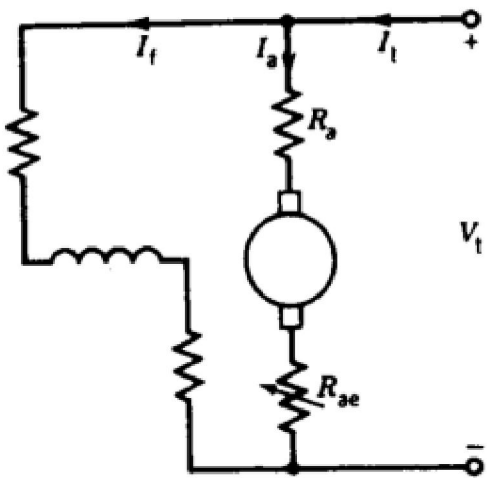
کنترل مقاومت آرمیچر

در این مبحث نیز یک موتور DC شنت را در نظر می‌گیریم (شکل ۱۲.۳ الف)). در این روش V_t و I_f ثابت هستند و کنترل سرعت توسط تغییر مقاومت آرمیچر (R_a) صورت می‌پذیرد. در شکل ۱۲.۳ الف)، R_{ae} رئوستایی است که برای تغییر R_a در مدار آرمیچر قرار گرفته است. داریم:

$$\omega_m = \frac{V_t}{k_a \phi} - \frac{R_a R_{ae}}{(k_a \phi)^2} T \quad (20.3)$$

اگر V_t و ϕ ثابت باشند، داریم:

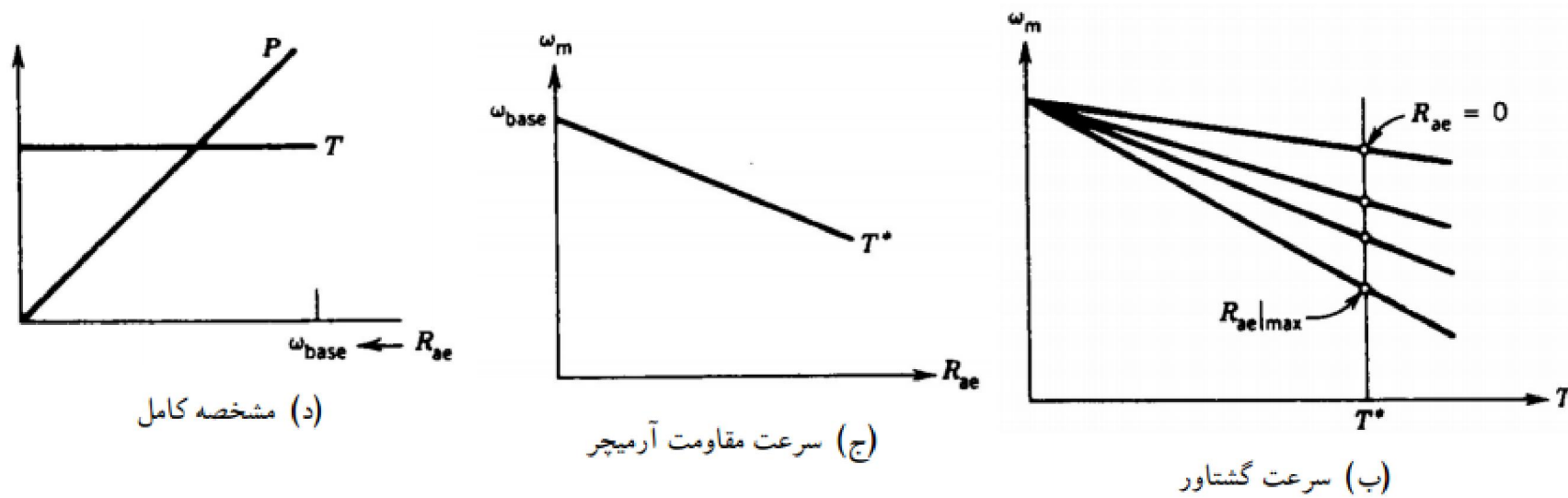
$$\omega_m = k_\Delta - k_\epsilon T, \quad k_\Delta = \frac{V_t}{k_a \phi}, \quad k_\epsilon = \frac{R_a R_{ae}}{(k_a \phi)^2} \quad (21.3)$$



(الف) موتور DC شنت

شکل ۱۲.۳ (ب) مشخصه گشتاور سرعت را تحت مقاومتهای مختلف در مدار آرمیچر نشان می‌دهد. مقاومت رئوستا (R_{ae}) را می‌توان طوری تنظیم نمود که سرعت‌های مختلف تحت گشتاور ثابت (و یا I_a ثابت) حاصل گردد. شکل ۱۲.۳ (ب) مقادیر مختلف R_{ae} را برای گشتاور مفروض T^* نشان می‌دهد.

شکل ۱۲.۳ (ج) تغییرات سرعت برحسب R_{ae} را تحت گشتاور مفروض T^* نشان می‌دهد. سرعت را می‌توان از صفر تا سرعت مبنا تحت گشتاور ثابت توسط تغییر R_{ae} کنترل نمود (شکل ۱۲.۳ (د)). 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.



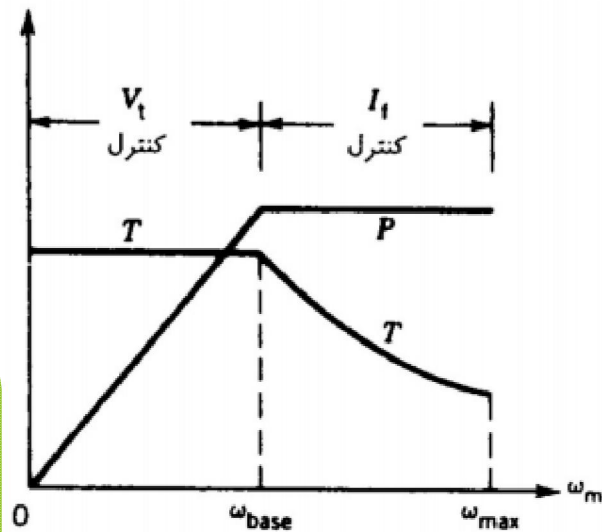
مثال: سیستمی با سرعت متغیر، یک موتور DC را به کار می‌گیرد که از طریق یک منبع با ولتاژ متغیر تغذیه می‌شود.

مشخصه‌های توان و گشتاور در شکل ۱۱.۳ (د) 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.

۱. جریان آرمیچر موتور را در صورتی تعیین کنید که گشتاور در 300 N.m ثابت باقی می‌ماند. سرعت را سرعت مبنا بگیرید.

۲. سرعت در ماورای سرعت مبنا با تضعیف میدان و ثابت بودن ولتاژ آرمیچر در ۵۰۰ ولت حاصل می‌شود. گشتاور در دسترس در سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه را تعیین کنید. در صورتی که جریان آرمیچر در مقدار بدیت آمده در بند قبل ثابت بماند.



۱.

$$n_b = 1500 \text{ rpm}, V_t = 50 \text{ V} \cong E_a$$

$$k_a \phi = \frac{V_t}{\omega_m} = \frac{50}{1500 \times \frac{2\pi}{60}} = 3.1831$$

$$I_a = \frac{T}{k_a \phi} = \frac{30}{3.1831} = 9.42477 \text{ A}$$

۲.

$$n = 3000 \text{ rpm}, V_t = E_a = 50 \text{ V}$$

$$k_a \phi = \frac{50}{3000 \times \frac{2\pi}{60}} = 1.5916$$

$$T = k_a \phi I_a = 1.5916 \times 9.42477 = 15.0 \text{ N.m}$$

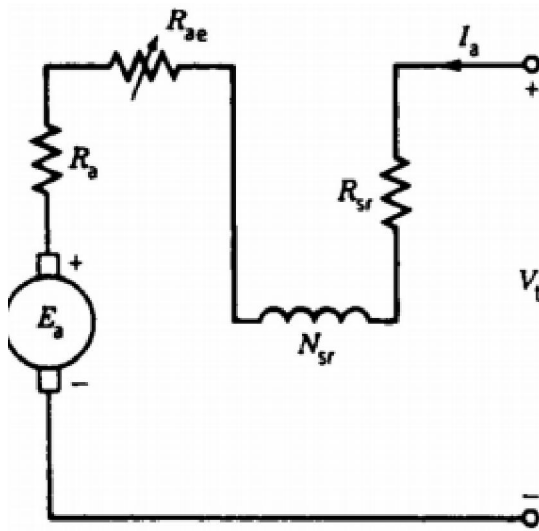
$$T = \frac{P}{\omega_m} = \frac{V_t I_a}{\omega_m} = \frac{50 \times 9.42477}{3000 \times \frac{2\pi}{60}} = 15.0 \text{ N.m}$$

شکل ۱۳.۳ (الف) مدار معادل موتور DC سری را نشان می‌دهد که در آن رئوستای R_{ae} با آرمیچر سری شده است. از R_{ae} برای کنترل سرعت موتور DC سری استفاده می‌شود. برای موتورهای DC سری از روابط اساسی قبلی استفاده می‌شود و باید دانست شار توسط جریان آرمیچر که از سیم‌پیچی تحریک سری با تعداد دور N_{sr} می‌گذرد، حاصل می‌شود.

اگر سیستم مغناطیسی را خطی بگیریم، داریم:

$$k_a \phi = k_{sr} I_a \quad (22.3)$$

$$E_a = k_{sr} I_a \omega_m \quad (23.3)$$



(الف) موتور DC سری

$$T = k_{sr} I_a^2 \quad (24.3)$$

از رابطه بالا در می‌یابیم که موتور DC سری یک گشتاور یکسویه^۱ برای جریان‌های DC و AC پدید می‌آورد. همچنین از شکل ۱۳.۳ (الف) داریم:

$$E_a = V_t - I_a(R_a + R_{ae} + R_{sr}) \quad (25.3)$$

همچنین داریم:

$$\omega_m = \frac{V_t}{\sqrt{k_{sr}} \sqrt{I_a}} - \frac{R_a + R_{sr} + R_{ae}}{k_{sr}} \quad (26.3)$$

و

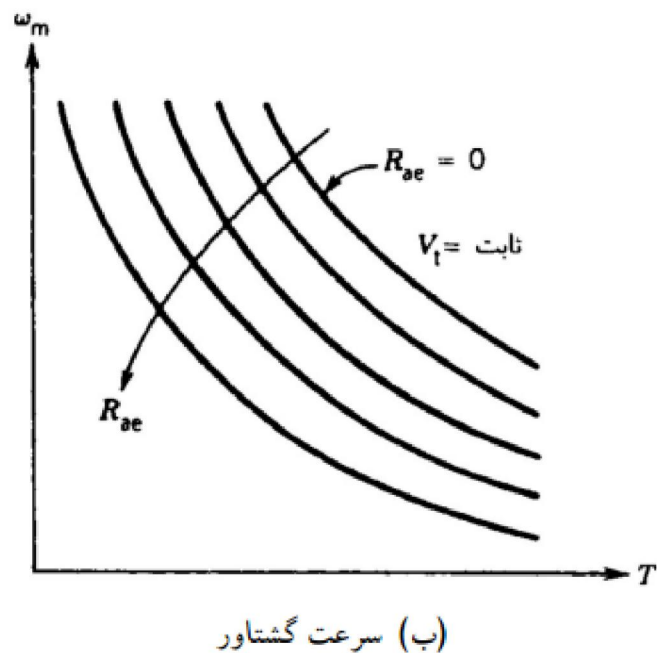
$$\omega_m = \frac{V_t}{\sqrt{k_{sr}} \sqrt{T}} - \frac{R_a + R_{sr} + R_{ae}}{k_{sr}} \quad (27.3)$$

مشخصه‌های گشتاور سرعت موتورهای DC سری تحت مقاومت‌های مختلف R_{ae} در شکل ۱۳.۳ (ب) نشان داده

شده است. در تحت R_{ae} خاصی سرعت تقریباً با معکوس جذر گشتاور متناسب است. باید دانست:

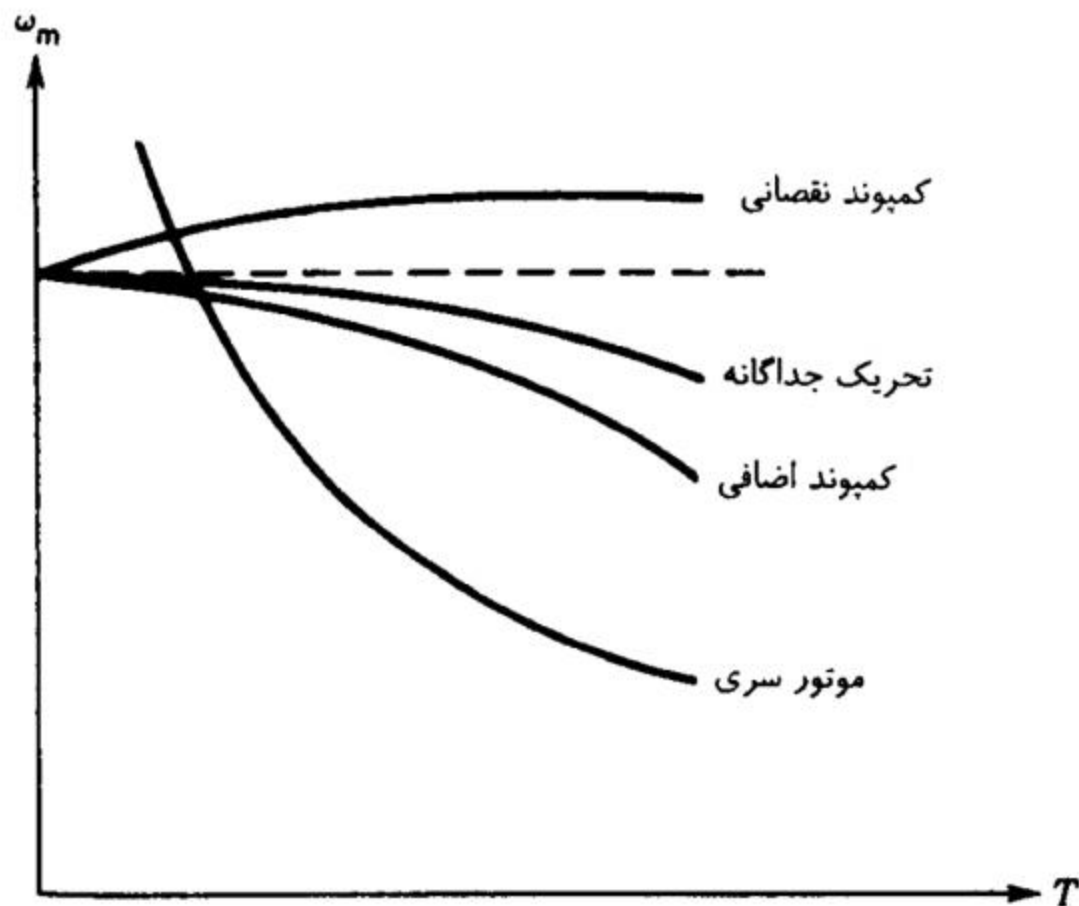
۱. گشتاور زیاد در سرعت کم حاصل می‌شود.
۲. گشتاور کم در سرعت زیاد بدست می‌آید.

از گفتار بالا نتیجه می‌شود که هرگاه به گشتاور راه‌انداز زیاد نیاز داشته باشیم، می‌توان از موتورهای DC سری بهره‌بد (ترن برقی).



¹Unidirectional Torque

شکل ۱۴.۳ مشخصه گشتاور سرعت موتورهای DC گوناگون را نشان می‌دهد و مشاهده می‌شود، محدوده تغییرات سرعت در موتورهای DC سری از بقیه بیشتر است.



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 ۳۵ آمپر از شبکه می‌کشد. این موتور ۲۲۰ ولتی و ۷ اسب بخاری می‌باشد. شرایط فوق مربوط به موقعی است که رئوستا در مدار آرمیچر قرار ندارد ($R_{ae} = 0$). گشتاور مورد نیاز پنکه با مجذور سرعت متناسب است و داریم:

$$R_a = 0.6 \Omega, R_{sr} = 0.4 \Omega$$

از عکس‌العمل آرمیچر و تلفات چرخی صرف‌نظر کنید.

۱. توان تحویلی به پنکه و گشتاور حاصله توسط موتور را بیابید.
۲. می‌خواهیم سرعت به ۲۰۰ دور در دقیقه کاهش یابد و رئوستا در مدار آرمیچر وارد کنیم. مقاومت رئوستا را حساب کرده و در این شرایط توان تحویلی به پنکه را بدست آورید.

پاسخ:

۱.

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

$$P = E_a I_a = 195 \times 25 = 4880 \text{ W} = \frac{4880}{746} = 6.54 \text{ hp}$$

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

۲.

$$T = k_{sr} I_a^2 \Rightarrow 155/2 = k_{sr} 25^2 \Rightarrow k_{sr} = 0.248$$

$$T(200\text{rpm}) = \left(\frac{200}{300}\right)^2 \times 155/2 = 68/98 \text{ N.m}$$

$$\frac{200 \times 2\pi}{60} = \frac{200}{\sqrt{0.248} \sqrt{68/98}} - \frac{0.6 + 0.4 + R_{ae}}{0.248} \Rightarrow R_{ae} = 7 \Omega$$

$$P = T \omega_m = 68/98 \times \frac{200 \times 2\pi}{60} = 1444 \text{ W} = 1/94 \text{ hp}$$

یا

$$68/98 = 0.248 I_a^2 \Rightarrow I_a = 16/68 \text{ A}$$

$$E_a = k_{sr} I_a \omega_m = 0.248 \times 16/68 \times \frac{200 \times 2\pi}{60} = 86/57$$

$$E_a = V_t - I_a(R_a + R_{sr} + R_{ae}) \Rightarrow 86/57 = 220 - 16/68(0.6 + 0.4 + R_{ae})$$

$$\Rightarrow R_{ae} = 7 \Omega$$

$$P = E_a I_A = 86/57 \times 16/68 = 1444 \text{ W} = 1/94 \text{ hp}$$