فصل چهارم

موتورهای جریان مستقیم

هدفهای رفتاری: پس از پایان این فصل از دانش‌آموز انتظار می‌رود که :

۱ــ حالت موتوری ماشینهای الکتریکی جریان مستقیم را بیان کند.

۲ــ مفهوم گشتاور در موتورهای الکتریکی را توضیح دهد.

۳ــ مشخصه‌های گشتاور ــ سرعت، گشتاور ــ جریان و سرعت ــ جریان موتورهای DC را رسم کند.

۴ــ مدار الکتریکی موتورهای جریان مستقیم را رسم کرده توضیح دهد.

۵ــ انواع تحریک موتورهای جریان مستقیم را نام ببرد.

۶ــ ویژگیهای کاری موتورهای شنت، سری و کمپوند را بررسی و آنها را به‌لحاظ کاربردی مقایسه نماید.

۷ــ ضرورت و روشهای راه‌اندازی موتورهای جریان مستقیم را بیان کند.

۸ــ راه‌اندازهای دستی و اتوماتیک را بیان کند.

۹ــ امکانات کنترل دور موتورهای جریان مستقیم را توضیح دهد.

۱۰ــ چگونگی تغییر جهت گردش موتورهای جریان مستقیم را بیان کند.

۱۱ــ علت استفاده از ترمز در موتورهای الکتریکی را شرح دهد.

۱۲ــ روشهای مختلف ترمز در موتورهای جریان مستقیم را نام ببرد.

۱۳ــ برای هریک از انواع موتورهای جریان مستقیم روشهای کنترل دور و راه‌اندازی و ترمز را بیان کند.

۱۴ــ با استفاده از نمودار توازن توان مسائل بارداری و تلفات در موتورهای جریان مستقیم را حل کند.

موتورهای جریان مستقیم

۱ــ۴ــ مقدمه

در ماشینهای الکتریکی عمل تبدیل انرژی الکترومکانیکی صورت می‌پذیرد. در فصل سوم با مولدهای جریان مستقیم آشنا شدیم که انرژی مکانیکی ورودی را به انرژی الکتریکی (بصورت جریان مستقیم) تبدیل می‌کنند. در این فصل موتورهای الکتریکی مورد بحث قرار می‌گیرند که وظیفه آنها تبدیل انرژی الکتریکی (به‌صورت جریان مستقیم) به انرژی مکانیکی است. در شکل ۶۰ــ۲ چگونگی عمل تبدیل انرژی و قسمتهای مختلف انرژیهای ورودی، خروجی و تلف شده بصورت نمودار نشان داده شده است.

اصولاً بسیاری از پیشرفتهای تجهیزات صنعتی و ساخت ماشین‌آلات با قدرتها و تواناییهای زیاد ناشی از توسعه و پیشرفتهای موتورهای الکتریکی بوده است و چرخهای عظیم اکثر صنایع امروزی را موتورهای الکتریکی به‌حرکت درمی‌آورند.

موتورهای الکتریکی امکان دسترسی به انرژی مکانیکی در حالتهای مختلف را با هزینه نسبتاً کم، طول عمر زیاد، بهره‌برداری ساده و کم سروصدا و روشهای متنوع وکارآمد کنترل، فراهم ساخته‌اند.

در حال حاضر موتورهای الکتریکی از قدرتهای بسیار کوچک (چند میلی‌وات) برای استفاده در ابزار دقیق و مهندسی پزشکی و ... تا قدرتهای بسیار زیاد (صدها کیلووات) برای استفاده در صنایع سیمان و کارخانجات نورد فولاد و پالایشگاهها و ... ساخته می‌شوند.

از نظر تاریخی در دهه‌های اولیه قرن نوزدهم میلادی دانشمندانی چون اورستد و فاراده برای ساخت مولدها و موتورهای الکتریکی کوششهای فراوانی به عمل آوردند. نمونه‌های آزمایشگاهی موتورهای الکتریکی ساخته شدند، اما رواج گسترده موتورهای الکتریکی تا اواخر قرن نوزدهم به تأخیر افتاد و در دو دههٔ آخر قرن نوزدهم با عملی شدن احداث شبکه‌های تولید و انتقال الکتریسیته، موتورهای الکتریکی به سرعت مطرح و مورد استفاده وسیع قرارگرفتند.

از آنجا که شبکه‌های اولیه غالباً جریان مستقیم بودند، ماشینهای الکتریکی هم از نوع جریان مستقیم بودند. ولی به‌تدریج که شبکه‌های جریان متناوب بکار گرفته شدند، طبیعتاً موتورهای جریان مستقیم هم جای خود را تا حدودی به موتورهای جریان متناوب دادند امّا دو ویژگی خاص موتورهای DC باعث شدند که این موتورها نه تنها از رده خارج نشوند، بلکه حتی در بسیاری از تجهیزات صنعتی کاربرد بیشتری هم پیدا کنند و امروزه موتورهای DC در زمینه‌های مختلف، کاربردهای فراوانی دارند.

این دو ویژگی برجسته که بعداً مورد بحث قرار خواهند گرفت عبارتند از :

I) امکان کنترل دور دقیق و وسیع

II) گشتاور راه‌اندازی بسیار خوب

البته باید درنظر داشت که معمولاً موتور DC نسبت به مشابه AC خود به مراتب گرانتر و هزینه بهره‌برداری و تعمیرات آن نیز غالباً بیشتر است. علاوه بر این چون شبکه‌های صنعتی معمولاً AC هستند، در صورت استفاده از موتورهای جریان مستقیم بایستی یک منبع تغذیه اختصاصی نیز برای موتور تدارک ببینیم که برگرانی هزینه آن می‌افزاید. در این فصل با بررسی کمیتهای یک موتور DC، مشخصه‌های آن را تحلیل و کاربردهای انواع موتور DC را خواهیم شناخت، ضمن آن که با روشهای راه‌اندازی، کنترل دور و ترمز این موتورها نیز آشنا خواهیم شد.

تذکر: در این فصل منظور از موتور، «موتور الکتریکی جریان مستقیم» است.

۲ــ۴ــ کمیتهای موتور جریان مستقیم

در فصل دوم با ۵ کمیت اصلی ماشین DC آشنا شدیم. جریان آرمیچر (I_A)، جریان تحریک (I_F) سرعت یا دور (n)، نیروی محرکه القایی (E_A) و ولتاژ ترمینالها (V_T).

در مولدها فرض بر این بود که دور ثابت است و تغییرات ۴ کمیت دیگر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند، در حالی که در موتور، ولتاژ ترمینال V_T ثابت است.

از آنجا که خروجی یک موتور الکتریکی، انرژی مکانیکی است، کمیتهای مکانیکی (خصوصاً دور و گشتاور) بیشتر مورد توجه قرار دارند، در حالی که در مولدها، بحث اصلی روی کمیتهای الکتریکی (خصوصاً ولتاژ و جریان) می‌باشد. به همین دلیل لازم است هنرجویان عزیز در بحث موتورهای الکتریکی با مفهوم گشتاور و قدرت مکانیکی در سیستمهای دوّار آشنایی کافی داشته باشند، که در این بخش بطور فشرده مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱ــ۲ــ۴ــ مفهوم گشتاور در یک سیستم دوّار: در درس فیزیک، حاصلضرب خارجی بردارهای نیرو و فاصله به‌عنوان گشتاور تعریف می‌شود :

$$\vec{T} = \vec{F} \times \vec{r} \qquad [T] = N.m \qquad (۴ــ۱)$$

$\vec{T}$: بردار گشتاور برحسب نیوتن‌متر

$\vec{F}$: بردار نیرو برحسب نیوتن

$\vec{r}$: بردار فاصله برحسب متر

اگر امتداد فاصله و نیرو بر هم عمود باشند، رابطه بالا ساده شده به‌صورت اسکالر درمی‌آید :

$$T = F.r$$

که در آن T ، F و r به ترتیب مقادیر گشتاور، نیرو و فاصله هستند. اما دریک سیستم دوّار معمولاً رابطه دیگری برای بدست آوردن گشتاور بیان می‌شود و آن رابطه گشتاور با توان و سرعت زاویه‌ای است که بصورت زیر نشان داده می‌شود.

$$T = \frac{P}{\omega} \qquad [T] = \frac{w}{\frac{1}{S}} = w.S = N.m \qquad (۴_۲)$$

P : قدرت مکانیکی محور دوّار برحسب وات

ω : سرعت زاویه‌ای محور دوّار برحسب رادیان بر ثانیه

T : گشتاور محور برحسب نیوتن متر

و رابطه سرعت زاویه‌ای با دور نیز چنین است :

$$\omega = ۲\pi n' \qquad [\omega] = rad \times \frac{1}{S} = \frac{rad}{S} \qquad (۴_۳)$$

ω : سرعت زاویه‌ای برحسب رادیان بر ثانیه

n′ : سرعت دوران برحسب دور بر ثانیه (R.P.S)

معمولاً دور موتورها برحسب دور بر دقیقه داده می‌شود، که برای تبدیل آن به دور بر ثانیه لازم است عبارت بر ۶۰ تقسیم گردد.

$$\omega = \frac{۲\pi n}{۶۰} \qquad (۴_۴)$$

ω : سرعت زاویه‌ای برحسب رادیان بر ثانیه

n : سرعت دوران برحسب دور بر دقیقه (R.P.M)

مثال ۱ــ۴: یک موتور الکتریکی، با سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه می‌چرخد. سرعت زاویه‌ای آن چقدر است؟

حل:

$$\omega = \frac{۲\pi n}{۶۰} = \frac{۲\pi \times ۱۵۰۰}{۶۰} = ۵۰\pi \frac{rad}{S}$$

مثال ۲ــ۴: یک موتور دیزلی با سرعت ۷۵۰ دور بر دقیقه قدرت مکانیکی ۸۰ کیلووات را به بار منتقل می‌کند. گشتاور محور چقدر است؟

حل:

$$\omega = \frac{۲\pi n}{۶۰} = \frac{۲\pi \times ۷۵۰}{۶۰} = ۲۵\pi \frac{rad}{S}$$

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{۸۰ \times ۱۰^{۳}}{۲۵\pi} = ۱۰۱۸/۶ N.m$$

تذکر: گاهی مقدار سرعت زاویه‌ای رابرحسب دور دقیقه در فرمول گشتاور (رابطه ۲ــ۴)

قرارداده، مستقیماً گشتاور را برحسب سرعت دوران تعیین می‌کنند :

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{2\pi n}{60}} = \frac{60P}{2\pi n} \qquad (4\text{ـ}5)$$

مثال ۳ـ۴: در یک اتومبیل هنگام راه‌اندازی قدرت مکانیکی چرخها چقدر است؟

حل: چون در زمان راه‌اندازی سرعت صفر است، $n = 0 \Rightarrow \omega = 0$

گشتاور راه‌اندازی هر قدر هم بزرگ باشد، حاصلضرب آن در صفر، برابر صفر می‌شود.

$$P = T.\omega = T \times 0 = 0$$

یعنی قدرت مکانیکی سیستمهای دوّار در زمان راه‌اندازی صفر است.

۲ـ۲ـ۴ـ گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور مفید: در فصل دوم دیدیم که وجود تلفات در قسمتهای مختلف ماشین باعث می‌شود که قدرتهای ماشین در قسمتهای مختلف (ورودی، خروجی، فاصله هوایی) متفاوت باشند. بر این اساس در موتورهای DC دو نوع گشتاور قابل محاسبه است :

نسبت قدرت تبدیل یافته (قدرت الکترومغناطیسی) به سرعت زاویه‌ای محور را گشتاور الکترومغناطیسی می‌نامیم و آن را با T نمایش می‌دهیم :

$$T = \frac{P_e}{\omega} \qquad (4\text{ـ}6)$$

درحالی که نسبت قدرت خروجی (قدرت مفید) به سرعت زاویه‌ای محور گشتاور مفید نامیده شود و با T_u مشخص می‌گردد.

$$T_u = \frac{P_2}{\omega} \qquad (4\text{ـ}7)$$

با جایگزینی مقدار قدرت الکترومغناطیسی از رابطه (۴۲ـ۲) در رابطه (۶ـ۴) خواهیم داشت :

$$T = \frac{E_A I_A}{\omega} \qquad (4\text{ـ}8)$$

بدیهی است که به دلیل وجود تلفات، قدرت الکترومغناطیسی بیشتر از قدرت مفید و در نتیجه گشتاور الکترومغناطیسی هم بیشتر از گشتاور مفید خواهد بود. در بحثهای این فصل هرجا به گشتاور اشاره شود منظور گشتاور الکترومغناطیسی است مگر آن که از گشتاور مفید نام برده شود.

۳ـ۴ـ مشخصه‌های موتور جریان مستقیم

ارتباط کمیتهای مورد اشاره در بخش (۲ـ۴) در موتورهای مختلف یکسان نیست. چگونگی

تغییرات این کمیتها برحسب یکدیگر را توسط مشخصه‌های موتوری بیان می‌کنند. مثلاً چگونگی تغییرات سرعت یک موتور دربارهای مختلف را می‌توان توسط مشخصه $n = f(I_A)$ بیان نمود.

معمولاً مشخصه‌های اصلی یک موتور بر روی صفحه مختصات ترسیم شده و برای تحلیل حالتهای کاری ماشین از آنها استفاده می‌شود. سه مشخصه مهم موتوری در این بخش مورد بحث قرار گرفته و خواهیم دید که با مقایسه این مشخصه‌ها در موتورهای مختلف DC به خوبی کاربردهای هرکدام معیّن می‌شود.

۱ــ۳ــ۴ــ مشخصه الکترومغناطیسی: این مشخصه تابع تغییرات گشتاور موتور، برحسب جریان آرمیچر آن را بیان می‌کند :

$$T = f(I_A) \qquad (۴ــ۹)$$

از این مشخصه می‌توان نتیجه گرفت، که برای تأمین گشتاورهای مختلف به وسیله الکتروموتور چه مقدار جریان توسط آرمیچر آن از شبکه دریافت می‌شود. با توجه به رابطه اساسی گشتاور (رابطه ۲۸ــ۲) می‌توان دریافت مقدار گشتاور با جریان آرمیچر رابطه مستقیم دارد، اما نوع تحریک موتور مشخص خواهد کرد که با تغییر جریان آرمیچر مقدار فوران (ϕ) چگونه تغییر خواهد کرد.

۲ــ۳ــ۴ــ مشخصه الکترومکانیکی: این مشخصه تابع تغییرات دور موتور برحسب جریان آرمیچر آن را معلوم می‌دارد :

$$n = f(I_A) \qquad (۴ــ۱۰)$$

این مشخصه نشان می‌دهد که در بارهای مختلف، دور موتور چگونه تغییر می‌کند بعداً خواهیم دید که تغییرات جریان آرمیچر چگونه بر نیروی محرکه القایی (E_A) اثر گذاشته و مطابق رابطه اساسی (۱۹ــ۲) منجر به تغییرات دور می‌گردد. چگونگی تغییرات فوران نیز متناسب با نوع تحریک موتور خواهد بود.

۳ــ۳ــ۴ــ مشخصه گشتاور ــ دور: با حذف جریان آرمیچر درمشخصه‌های الکترومکانیکی و الکترومغناطیسی رابطه مستقیمی بین گشتاور و دور به دست می‌آید که آن را مشخصه گشتاور ــ دور می‌نامیم :

$$n = f(T) \qquad (۴ــ۱۱ــ \text{الف})$$

در این سه مشخصه مورد اشاره در روابط (۴ــ۹) تا (۴ــ۱۱) مهمترین آنها مشخصه گشتاورــ دور است که تا حدود زیادی ویژگیهای کاری یک موتور DC را معرفی می‌کند و آن را برحسب سرعت زاویه‌ای نیز تعریف می‌کنند.

$$\omega = f(T) \qquad (۴ــ۱۱ــ \text{ب})$$

همچنین در یک موتور الکتریکی چگونگی تغییرات سرعت در بارهای مختلف را با کمیتی به نام «درصد تنظیم سرعت» نیز بیان می‌کنند و آن را با SR [1] نمایش می‌دهند :

$$SR\% = \frac{n_0 - n}{n} \times 100 \qquad (۱۱ــ۴ــ پ)$$

n_0 : سرعت موتور در بی‌باری
n : سرعت موتور در بار موردنظر
} هر دو برحسب یک واحد

SR% : درصد تنظیم سرعت

این کمیت تقریباً مشابه درصد تنظیم ولتاژ در مولدهای DC (مطابق رابطه ۱۲ــ۳) می‌باشد و همانند آن، هرقدر کمتر باشد قابل قبول‌تر است.

مثال ۴ــ۴: سرعت بی‌باری یک موتور DC برابر ۱۶۰۰ R.P.M و سرعت بار کامل آن ۱۳۵۰ R.P.M می‌باشد. درصد تنظیم سرعت را بدست آورید :

حل:

$$SR\% = \frac{n_0 - n}{n} \times 100 = \frac{1600 - 1350}{1350} \times 100 = 18/5\%$$

۴ــ۴ــ انواع تحریک موتورهای جریان مستقیم

در فصل سوم با ۴ نوع تحریک مولدهای DC (تحریک مستقل، تحریک موازی یا شنت، تحریک سری و تحریک مختلط یا کمپوند) آشنا شدیم.

در موتورهای DC نیز هریک از این چهار نوع تحریک قابل استفاده‌اند و هریک از این انواع تحریک موجب بروز خواص کاری مشخصی در ماشین می‌گردد که در مشخصه‌های موتوری (روابط ۹ــ۴ تا ۱۱ــ۴) تا حد زیادی این خواص کاری منعکس می‌شوند.

ضمناً موتورهای تحریک مستقل و موازی (شنت) از نظر مشخصه‌های موتوری، تفاوت کمی داشته معمولاً هردو در یک گروه و با هم مورد بررسی قرار می‌گیرند.

ضمناً دو رابطه اساسی ماشینهای جریان مستقیم که در فصل دوم مطرح و اثبات شدند کماکان در موتورهای DC نیز مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

$$E_A = K\phi\omega \qquad (۱۹ــ۲) \qquad \text{رابطه نیروی محرکه القایی}$$

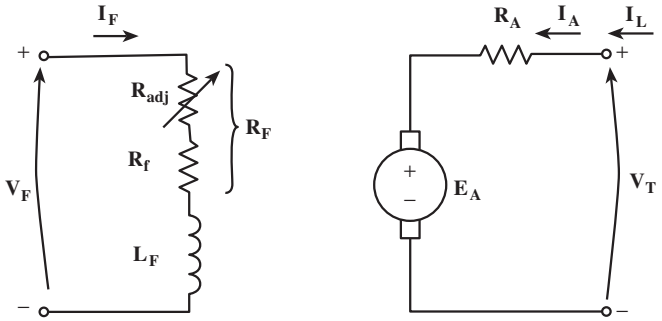
$$T = K\phi I_A \qquad (۲۸ــ۲) \qquad \text{رابطه گشتاور}$$

۱ــ۴ــ ۴ــ موتور تحریک مستقل و موتور شنت: در موتور تحریک مستقل سیم‌پیچی تحریک و سیم‌پیچی آرمیچر جداگانه به دو منبع جدا از هم وصل می‌شوند در حالی که در موتور شنت

۱ــSpeed Regulation

هر دو سیم پیچی (تحریک و آرمیچر) مشترکاً به یک منبع وصل می‌گردند. در هر دو ماشین برای کنترل جریان تحریک یک مقاومت متغیر در مدار تحریک قرار می‌گیرد و بعداً خواهیم دید که اتصال آرمیچر به شبکه نیز از طریق مقاومت متغیر پرقدرتی (به نام مقاومت راه‌انداز) می‌باشد. با صرفنظر از عکس‌العمل آرمیچر و با توجه به مدار معادل شکل ۱ــ۴ بین کمیتهای موتور تحریک مستقل این روابط برقرار است :

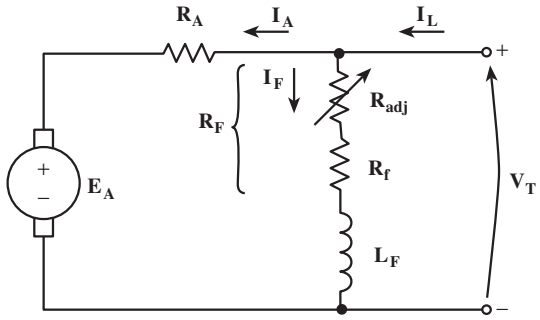
$$\left.\begin{aligned} I_F &= \frac{V_F}{R_F} && \text{(الف)} \\ V_T &= E_A + I_A R_A && \text{(ب)} \\ I_L &= I_A && \text{(پ)} \end{aligned}\right\} \qquad (۴ــ۱۲)$$



شکل ۱ــ۴ــ مدار معادل موتور تحریک مستقل

برای موتور شنت نیز روابط (۱۳ــ۴) برقرار است (مطابق شکل ۲ــ۴).

$$\left.\begin{aligned} I_F &= \frac{V_T}{R_F} && \text{(الف)} \\ V_T &= E_A + R_A I_A && \text{(ب)} \\ I_L &= I_A + I_F && \text{(پ)} \end{aligned}\right\} \qquad (۴ــ۱۳)$$



شکل ۲ ــ۴ــ مدار معادل موتور شنت

روابط (۱۲ــ۴ــ ب) و (۱۳ــ۴ــ ب) با صرفنظر از عکس‌العمل آرمیچر برقرار هستند. برای یافتن تابع گشتاور ــ دور موتور تحریک مستقل و موتور شنت در رابطه (۱۲ــ۴ــ ب) و یا (۱۳ــ۴ــب) که مشابهند بجای E_A از رابطه (۱۹ــ۲) و بجای I_A از رابطه (۲۸ــ۲) جایگزین می‌کنیم.

$$V_T = E_A + R_A I_A = K\phi\omega + R_A \frac{T}{K\phi}$$

$$K\phi\omega = V_T - R_A \frac{T}{K\phi}$$

$$\omega = \frac{V_T}{K\phi} - \frac{R_A}{(K\phi)^2} T \qquad (۴ــ۱۴)$$

V_T : ولتاژ ترمینال ماشین

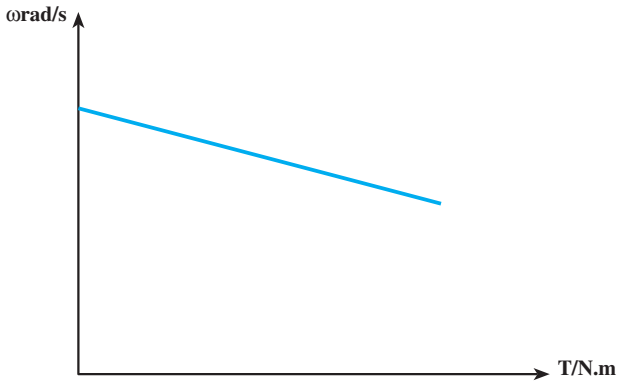
K : ضریب ثابت ماشین

R_A : مقاومت اهمی سیم‌پیچی آرمیچر

ω : سرعت زاویه‌ای حرکت رتور برحسب رادیان بر ثانیه

T : گشتاور الکترومغناطیسی برحسب نیوتن متر

رابطه (۱۴ــ۴) ارتباط سرعت زاویه‌ای (ω) و گشتاور (T) را بیان می‌کند که اگر آن را رسم کنیم نمودار آن خطی یا شیب منفی خواهد بود (مطابق شکل ۳ــ۴).



شکل ۳ــ۴ــ مشخصه گشتاور ــ دور موتور تحریک مستقل و موتور شنت

دقت در نمودار شکل ۳ــ۴ نشان می‌دهد که موتور شنت (و نیز موتور تحریک مستقل) در بارهای مختلف، سرعت تقریباً ثابتی دارد.

ضمناً برای تحلیل رفتار این نوع موتور در بارهای مختلف بایستی دو نکته زیر مدّنظر قرار گیرند :

الف) هنگام افزایش بار مکانیکی، محور موتور به دلیل افزایش گشتاور مقاوم باید مطابق رابطه

(۲۸ــ۲) یکی از کمیتهای جریان آرمیچر (I_A) یا جریان تحریک (I_F) و یا هر دو به‌گونه‌ای افزایش یابند که گشتاور محرک موتور برابر گشتاور مقاوم بار گردد.

تغییرات جریان تحریک (I_F) مستلزم تغییر در رئوستای مدار تحریک (R_{adj} در شکلهای ۱ــ۴ یا ۲ــ۴) است که می‌تواند بطور دستی توسط شخص بهره‌بردار از موتور و یا با یک مدار کنترل اتوماتیک انجام شود.

اما تغییرات جریان آرمیچر (I_A) می‌تواند مستقیماً با کاهش سرعت موتور و بدون نیاز به اعمال کنترل از بیرون موتور میسر گردد (خاصیت خودتنظیمی موتور شنت) چرا که با کاهش دور محور، مقدار نیروی محرکه القایی (E_A) مطابق رابطه (۱۹ــ۲) کم شده بر مبنای رابطه (۱۲ــ۴ــ ب) یا (۱۳ــ۴ ــ ب) جریان آرمیچر (I_A) افزایش می‌یابد.

ب) اگر تغییری در جریان تحریک موتور نداشته باشیم. می‌توان در بارهای مختلف مقدار فوران (ϕ) را ثابت فرض نمود و از رابطه (۱۹ــ۲) نسبت ولتاژ القایی آرمیچر و سرعت را بطور کلی به‌دست آورد. یعنی اگر موتور در نقطه کار اوّل (E_{A1} و ω_1) در حال انجام کار باشد و با تغییر بار به نقطه کار جدید (E_{A2} و ω_2) برسد، چنانچه رئوستای مدار تحریک تغییر نکرده باشد داریم :

$$\frac{E_{A1}}{E_{A2}} = \frac{K\phi\omega_1}{K\phi\omega_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\frac{2\pi n_1}{60}}{\frac{2\pi n_2}{60}} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\boxed{\frac{E_{A1}}{E_{A2}} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2}} \qquad (۴ــ۱۵)$$

از آنجا که رابطه (۱۵ــ۴) از رابطه اساسی (۱۹ــ۲) بدست آمده برای سایر موتورهای DC (سری و کمپوند) نیز برقرار است.

مثال ۵ــ۴: یک موتور DC شنت ۲۵۰ ولت و با سرعت ۱۲۰۰ دور بر دقیقه (در حالت بی‌باری) و دارای سیم‌پیچی جبرانگر و قطب کمکی، مفروض است.

مقاومت اهمی مؤثر مدار آرمیچر (شامل مقاومت آرمیچر، سیم‌پیچی جبرانگر و سیم‌پیچی قطب کمکی) برابر ۰/۰۶ اهم و مقاومت اهمی مؤثر مدار تحریک (شامل سیم‌پیچی تحریک شنت و مقاومت متغیر R_{adj}) برابر ۵۰ اهم می‌باشند. در حالتهای زیر سرعت موتور را محاسبه کنید :

الف) جریان دریافتی موتور از شبکه ۱۰۰ آمپر باشد.

ب) جریان دریافتی موتور از شبکه ۲۰۰ آمپر باشد.

حل: به دلیل وجود قطب کمکی و سیم‌پیچی جبرانگر عکس‌العمل آرمیچر قابل صرفنظر و رابطه (۱۳ــ۴ــ ب) و رابطه (۱۵ــ۴) برقرار هستند :

الف) از رابطه (۱۵ــ۴) داریم : $\frac{E_{A1}}{E_{A2}} = \frac{n_1}{n_2}$

و مطابق روابط (۱۳ــ۴ــ پ) : $I_A = I_L - I_F$

$$I_F = \frac{V_T}{R_F} \qquad I_F = \frac{۲۵۰}{۵۰} = ۵A$$

$$I_A = ۱۰۰ - ۵ = ۹۵A$$

$$E_A = V_T - R_A I_A = ۲۵۰ - (۹۵ \times ۰/۰۶) = ۲۴۴/۳V$$

با توجه به ناچیز بودن جریان آرمیچر در بی‌باری می‌توان نیروی محرکه القایی را در بی‌باری برابر ولتاژ ترمینال فرض کرد، پس :

$$\frac{E_{A0}}{E_{A1}} = \frac{n_0}{n_1} \qquad \frac{۲۵۰}{۲۴۳/۴} = \frac{۱۲۰۰}{n_1}$$

$$n_1 = \frac{۲۴۳/۴}{۲۵۰} \times ۱۲۰۰ = ۱۱۷۳R.P.M.$$

ب) مجدداً مانند فرض (الف) عمل می‌کنیم :

$$I_A = ۲۰۰ - ۵ = ۱۹۵A$$

$$E_{A2} = ۲۵۰ - (۱۹۵ \times ۰/۰۶) = ۲۳۸/۳V$$

$$\frac{E_{A0}}{E_{A2}} = \frac{n_0}{n_2} \qquad \frac{۲۵۰}{۲۳۸/۳} = \frac{۱۲۰۰}{n_2}$$

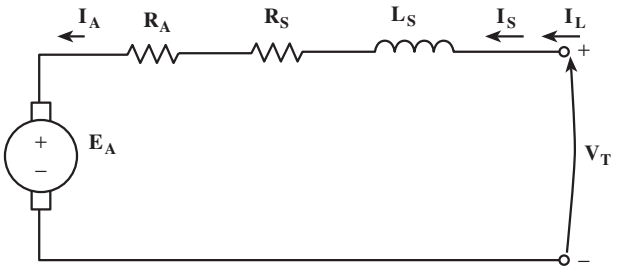
$$n_2 = \frac{۲۳۸/۳}{۲۵۰} \times ۱۲۰۰ = ۱۱۴۴R.P.M.$$

۲ــ۴ــ۴ــ موتور سری: در موتورهای سری، سیم‌پیچی تحریک با آرمیچر سری می‌شود. (بدیهی است که این سیم‌پیچی جدا از سیم‌پیچی تحریک شنت است هر چند هر دو سیم‌پیچی روی قطب اصلی قرار می‌گیرند.)

مطابق شکل ۴ــ۴ در موتور سری این روابط برقرار است :

$$\left.\begin{aligned} I_A = I_S = I_L \qquad & (الف) \\ V_T = E_A + I_A(R_A + R_S) \qquad & (ب) \end{aligned}\right\} \qquad (۱۶ــ۴)$$

در موتور سری عملاً یک جریان هم از آرمیچر و هم از تحریک عبور می‌کند. یعنی جریان



شکل ۴ــ۴ــ مدار معادل موتور سری

بوجود آورنده میدان (I_S) همان جریان آرمیچر (I_A) و همان جریانی است که توسط موتور از شبکه دریافت می‌شود (I_L).

در رابطه اساسی گشتاور دیدیم که گشتاور موتورهای DC متناسب حاصلضرب جریان تحریک و جریان آرمیچر است (رابطه ۲۸ــ۲)، در موتور شنت که جریان تحریک جدا از جریان آرمیچر بود تغییرات بار در درجه اوّل روی جریان آرمیچر تأثیر می‌گذاشت. یعنی در حالت کار عادی و بدون تغییر رئوستای مدار تحریک هر تغییری دربار، توسط تغییرات جریان آرمیچر جبران می‌شد. و اگر لازم بود با تغییرات جریان تحریک، گشتاور تولیدی موتور افزایش یابد نیاز به اعمال کنترل مناسب (دستی یا اتوماتیک) از بیرون ماشین بود.

اما در موتور سری که فوران میدان را هم جریان I_A تولید می‌کند، اگر فرض کنیم، هسته وارد ناحیه اشباع نشده باشد با تقریب خوب می‌توان نوشت :

$$\phi = K_1 I_A = K_1 I_L \qquad (۴ــ۱۷)$$

$I_L = I_A$: جریان موتور سری برحسب آمپر

ϕ : فوران یکی از قطبهای اصلی موتور برحسب وبر

K_1 : ضریب ثابت ماشین برحسب وبر بر آمپر (یا اهم ثانیه)

یعنی فوران هسته تقریباً بطور خطی با جریان ماشین متناسب است. پس :

$$T = K\phi I_A = K(K_1 I_A) I_A = K K_1 I_A^2 = K_S I_A^2 \qquad (۴ــ۱۸)$$

$$K_S = K K_1 \quad [T] = \frac{V.S}{A} A^2 = V.A.S = N.m$$

K_S : ضریب ثابت موتور سری برحسب وبر بر آمپر

I_A : جریان موتور سری برحسب آمپر

T : گشتاور موتور سری برحسب نیوتن متر

رابطه (۱۸ــ۴) نشان می‌دهد که در موتور سری گشتاور متناسب مجذور جریان است و این

خاصیت می‌تواند گشتاور راه‌اندازی بسیار زیادی را در زمان راه‌اندازی موتور موجب گردد، چرا که در زمان راه‌اندازی جریان قابل توجهی از موتور می‌گذرد.

مشخصه گشتاور ــ دور موتور سری: همچنان فرض می‌کنیم که موتور وارد ناحیه اشباع نشده و رابطه (۴ــ۱۷) برقرار است (توجه شود که اگر هسته وارد ناحیه اشباع شود رابطه خطی (۴ــ۱۷) دیگر صدق نمی‌کند.) حال اگر I_A را از رابطه (۴ــ۱۸) استخراج کرده و آن را در رابطه (۴ــ۱۶ ــ ب) قرار دهیم و نیز به‌جای E_A مقدار $K\phi\omega$ را در رابطه جایگزین کنیم با انجام عملیات ریاضی رابطه سرعت (ω) در موتور سری بدست می‌آید.

مطالعه آزاد: روند رسیدن به رابطه سرعت به شرح زیر است :

$$T = K_S I_A^2 \Rightarrow I_A = \sqrt{\frac{T}{K_S}}$$

و دررابطه (۴ــ۱۶ــ ب) مقدار I_A را جایگزین می‌کنیم.

$$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S) = K\phi\omega + \sqrt{\frac{T}{K_S}}(R_A + R_S) \quad (۴ــ۱۹)$$

مجدداً مقادیر جریان و فوران موتور سری را به ترتیب از روابط (۴ــ۱۷) و (۴ــ۱۸) بکار می‌بریم :

$$\left.\begin{aligned} &\phi = K_1 I_A \Rightarrow I_A \frac{\phi}{K_1} && \text{(الف)} \\ &T = KK_1 I_A^2 = KK_1(\frac{\phi}{K_1})^2 = \frac{K}{K_1}\phi^2 && \text{(ب)} \\ &\phi = \sqrt{\frac{K_1}{K}T} = \sqrt{\frac{K_1}{K}}\sqrt{T} && \text{(پ)} \end{aligned}\right\} \quad (۴ــ۲۰)$$

این بار مقادیر جریان (I_A) و فوران (ϕ) موتور سری را از روابط (۴ــ۲۰ــ پ) و (۴ــ۲۰ــ الف) در رابطه (۴ــ۱۹) قرار می‌دهیم :

$$V_T = K\sqrt{\frac{K_1}{K}}\sqrt{T}\,\omega + \sqrt{\frac{T}{KK_1}}(R_A + R_S) \quad (۴ــ۲۱)$$

با مرتب کردن رابطه (۴ــ۲۱) خواهیم داشت :

$$\sqrt{KK_1}\sqrt{T}\,\omega = V_T - \frac{R_A + R_S}{\sqrt{KK_1}}\sqrt{T}$$

اگر رابطه اخیر را برحسب ω بنویسیم رابطه گشتاور ــ دو موتور سری بدست می‌آید :

$$\omega = \frac{V_T}{\sqrt{KK_1}} \frac{1}{\sqrt{T}} - \frac{R_A + R_S}{KK_1} \qquad (۴ــ۲۲)$$

V_T : ولتاژ ترمینالها برحسب ولت

K_1 و K : ضرایب ثابت ماشین

R_A : مقاومت سیم‌پیچی آرمیچر برحسب اهم

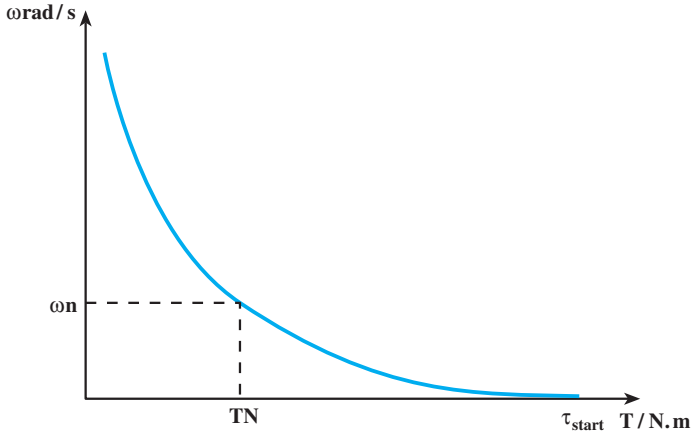
R_S : مقاومت سیم‌پیچی تحریک سری برحسب اهم

T : گشتاور الکترومغناطیسی برحسب نیوتن متر

ω : سرعت زاویه‌ای حرکت رتور برحسب رادیان بر ثانیه

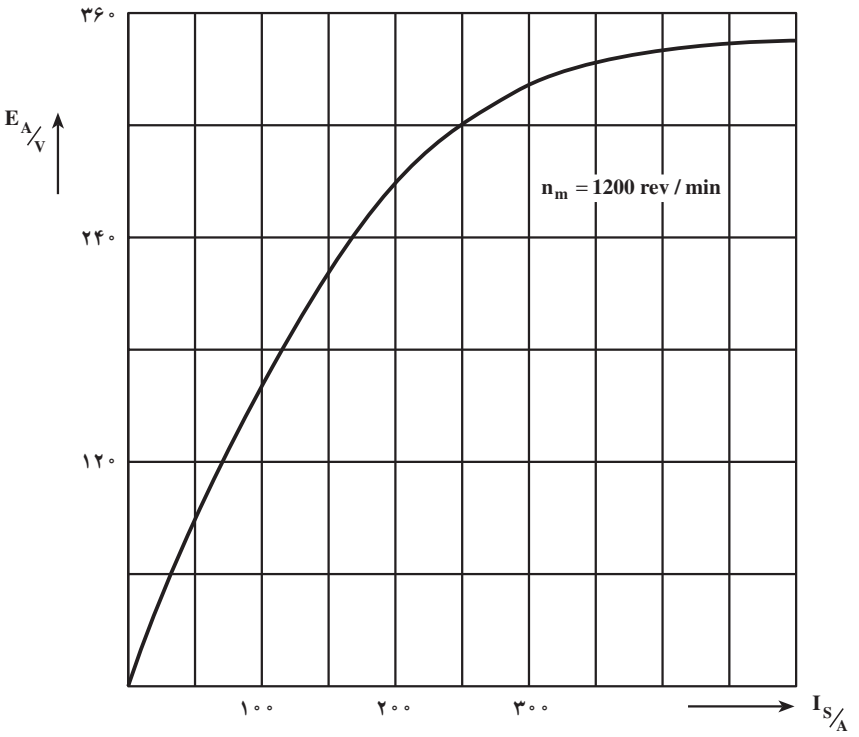
در شکل ۵ــ۴ مشخصه گشتاور ــ دور یک موتور سری و نقطه کار نامی موتور نشان داده شده است. این مشخصه نشان می‌دهد که گشتاور راه‌اندازی موتور سری بسیار بزرگ و در عوض در بارهای کم و بی‌باری دور موتور بسیار زیاد می‌شود.

پس موتور سری برای بارهای با گشتاور راه‌اندازی زیاد (مانند وسایل حمل و نقل و بالابرهای برقی) بسیار مناسب است. اما به هیچ‌وجه نباید موتور سری بی بار شود چرا که در این صورت دور آن بسیار زیاد شده قسمتهای گردنده ماشین آسیب خواهند دید.



شکل ۵ــ۴ــ مشخصه گشتاور ــ دور موتور سری

مثال ۶ــ۴: یک موتورسری ۲۵۰ ولت دارای مقاومت آرمیچر ۵۰ میلی‌اهم و مقاومت سیم‌پیچی تحریک ۳۰ میلی‌اهم و مشخصه مغناطیسی آن به ازای دور ۱۲۰۰ R.P.M در شکل ۶ــ۴ نشان داده



شکل ۶ــ۴ــ مشخصه مغناطیسی موتور مثال ۶ــ۴

شده است :

سرعت و گشتاور این موتور را به ازای جریانهای ۵۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ آمپر محاسبه و سپس مشخصه گشتاور ــ دور موتور را به‌طور تقریبی رسم نمایید.

حل: در هر حالت ابتدا از رابطه (۱۶ــ۴ ــ ب) مقدار ولتاژ القایی (E_A) را یافته و سپس به کمک مشخصه مغناطیسی داده شده و رابطه (۱۵ــ۴) مقدار دور موتور مشخص می‌گردد. و نهایتاً از رابطه (۸ــ۴) مقدار گشتاور الکترومغناطیسی بدست می‌آید.

$$E_A = V_T - I_A(R_A + R_S) \qquad (۱۶ــ۴ــ ب)$$

$$\frac{E_{A۱}}{E_{A۲}} = \frac{n_۱}{n_۲} \qquad (۱۵ــ۴)$$

$$T = \frac{E_A I_A}{\omega} \qquad (۸ــ۴)$$

الف) به ازای جریان ۵۰ آمپر : $E_{A۱} = ۲۵۰ - ۵۰(۰/۰۵ + ۰/۰۳) = ۲۴۶V$

با مراجعه به مشخصه مغناطیسی داریم :

$$I_A = I_F = ۵۰A \Rightarrow E_{A۰} = ۸۰V$$

$$\frac{E_{A۰}}{E_{A۱}} = \frac{n_۰}{n_۱} \Rightarrow \frac{۸۰}{۲۴۶} = \frac{۱۲۰۰}{n_۱}$$

$$n_۱ = \frac{۲۴۶}{۸۰} \times ۱۲۰۰ = ۳۶۹۰ R.P.M$$

$$T_۱ = \frac{E_A I_A}{\omega} = \frac{۲۴۶ \times ۵۰}{۳۶۹۰(۲\pi / ۶۰)} = ۳۱/۸ N.m.$$

ب) به ازای جریان ۱۰۰ آمپر :

$$E_{A۲} = ۲۵۰ - ۱۰۰(۰/۰۵ + ۰/۰۳) = ۲۴۲V$$

با مراجعه به مشخصه مغناطیسی داریم :

$$I_A = I_F = ۱۰۰A \Rightarrow E_{A۰} = ۱۵۶V$$

$$\frac{E_{A۰}}{E_{A۲}} = \frac{n_۰}{n_۲} \Rightarrow \frac{۱۵۶}{۲۴۲} = \frac{۱۲۰۰}{n_۲}$$

$$n_۲ = \frac{۲۴۲}{۱۵۶} \times ۱۲۰۰ = ۱۸۶۲ R.P.M$$

$$T_۲ = \frac{۱۵۶ \times ۱۰۰}{۱۸۶۲(۲\pi / ۶۰)} = ۱۲۴/۱ N.m.$$

پ) به ازای جریان ۳۰۰ آمپر :

$$E_{A۳} = ۲۵۰ - ۳۰۰(۰/۰۵ + ۰/۰۳) = ۲۲۶V$$

با مراجعه به مشخصه مغناطیسی داریم :

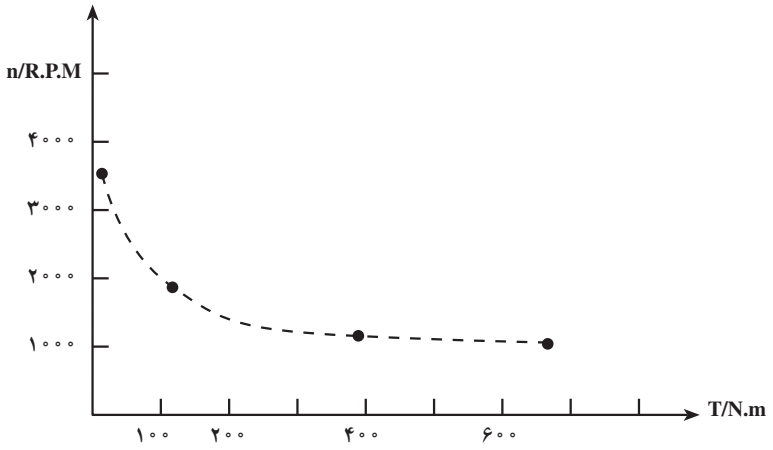
$$I_A = I_F = ۱۰۰A \Rightarrow E_{A۰} = ۳۱۵V$$

$$\frac{E_{A۰}}{E_{A۳}} = \frac{n_۰}{n_۳} \Rightarrow \frac{۳۱۵}{۲۲۶} = \frac{۱۲۰۰}{n_۳}$$

$$n_۳ = \frac{۲۲۶}{۲۸۲} \times ۱۲۰۰ = ۸۶۰/۹ \quad R.P.M$$

$$T_۳ = \frac{۲۲۶ \times ۳۰۰}{۸۶۰/۹(۲\pi / ۶۰)} = ۷۵۲ \quad N.m.$$

ت) برای رسم مشخصه تقریبی گشتاور ــ دور این موتور مقادیر سه نقطه کار بدست آمده را مشابه شکل ۵ــ۴ رسم می‌کنیم و شکل تقریبی ۷ــ۴ حاصل می‌گردد.



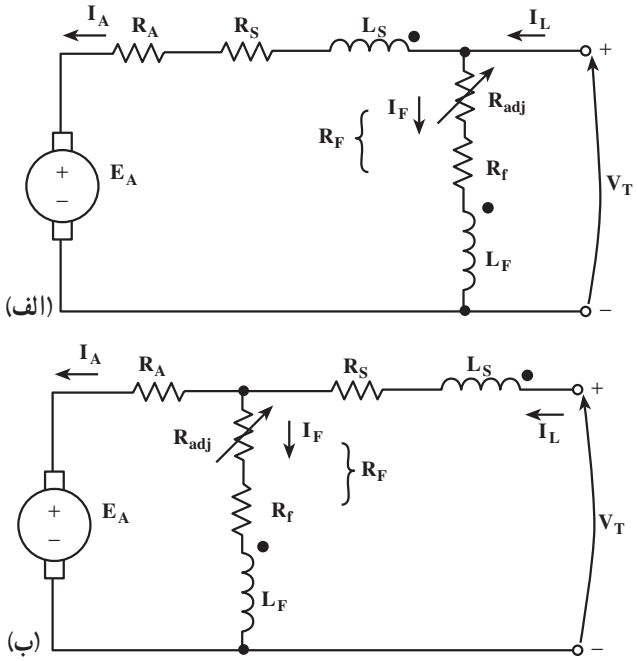
شکل ۷ــ۴ــ مشخصه تقریبی گشتاور ــ دور موتور مثال ۵ــ۴

۳ــ۴ــ۴ــ موتور مختلط (کمپوند): در دو قسمت قبل تاحدودی ویژگیهای موتورهای DC شنت و سری را شناختیم و دانستیم که موتور سری، نسبت به موتور شنت مشابه خود، دارای گشتاور راه‌اندازی بزرگتری است، اما در مقابل موتور شنت تحمل بی‌باری را داشته و تغییرات دور آن محدودتر است.

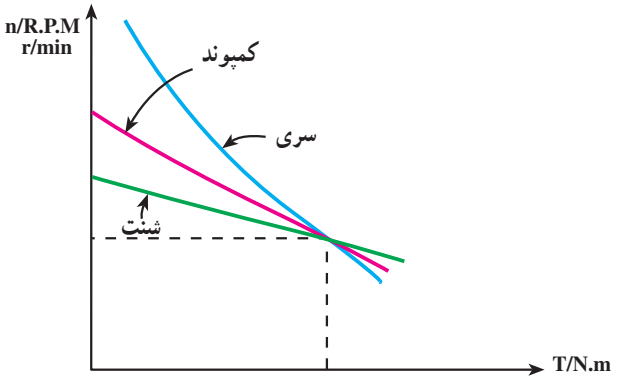
در بخشهای بعدی (۶ــ۴ و ۷ــ۴) خواهیم دید که امکانات کنترل دور و ترمز موتور شنت نیز وسیعتر است.

با توجه به این ویژگیها می‌توان در یک موتور DC همزمان از سیم‌پیچهای تحریک سری و شنت به‌طور مختلط (کمپوند) استفاده نمود که منجر به ویژگیهایی بینابین ویژگیهای موتورهای سری و شنت می‌گردد.

پس گشتاور راه‌اندازی موتور کمپوند، بیشتر از موتور شنت و کمتر از موتور سری است



شکل ۸ــ۴ــ مدار معادل موتور مختلط (کمپوند)
الف) با انشعاب بلند ب) با انشعاب کوتاه



شکل ۹ــ۴ــ مشخصه‌های گشتاور ــ دور سه موتور مشابه شنت، سری و کمپوند

و تغییرات دور آن نیز در زیر بار، حد وسطی بین موتور شنت و موتور سری می‌باشد. همچنین موتور کمپوند مانند موتور شنت تحمل بی‌باری را دارد. به این ترتیب مشخصه گشتاور ــ دور موتور کمپوند مطابق شکل **۹ــ۴** بین مشخصه‌های سری و شنت قرار می‌گیرد.

همان‌طور که در بخش **۲ــ۳** در مورد مولّدهای کمپوند اشاره شد رفتار ماشینهای کمپوند با شنت بلند و کوتاه تقریباً مشابه و لذا مطابق شکل **۸ــ۴** بین کمیتهای الکتریکی موتور کمپوند این روابط برقرار است :

$$\left.\begin{aligned} I_F &= \frac{V_T}{R_F} && \text{(الف)} \\ V_T &= E_A + I_A(R_A + R_S) && \text{(ب)} \\ I_L &= I_A + I_F && \text{(پ)} \end{aligned}\right\} \qquad (۴ــ۲۳)$$

برای تحلیل رفتار موتور کمپوند، باید توجه داشت که دربارهای کم و بی‌باری که جریان زیادی از آرمیچر و سیم‌پیچی تحریک سری نمی‌گذرد. اثر سیم‌پیچی تحریک سری در میدان مغناطیسی ماشین کم است و ایجاد میدان مغناطیسی عمدتاً توسط سیم‌پیچی تحریک شنت انجام می‌پذیرد. پس در بارهای کم رفتار موتور کمپوند شبیه موتور شنت است.

اما، با افزایش بار، جریان سیم پیچی تحریک سری نیز زیاد شده قسمت بیشتری از میدان مغناطیسی توسط سیم‌پیچی سری ایجاد می‌گردد و بتدریج با افزایش بار، موتور کمپوند خواصی شبیه به موتور سری پیدا می‌کند.

پس موتور کمپوند مناسب کاربردهایی است که نیاز به گشتاور راه‌اندازی نسبتاً زیاد بوده و در عین حال تغییرات گسترده بار از حوالی بی‌باری تا بار کامل موردنظر باشد.

۵ــ۴ــ پرسش

۱ــ ویژگیهای اصلی موتورهای جریان مستقیم را نام ببرید.

۲ــ کمیتهای اصلی یک موتور DC کدامند؟

۳ــ مفهوم گشتاور در یک موتور الکتریکی چیست؟ روی فرمول بحث شود.

۴ــ گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور مفید یک موتور جریان مستقیم چه تفاوتی با هم دارند؟ کدامیک بیشتر است؟

۵ــ روابط اساسی ماشینهای الکتریکی DC را مورد بررسی قرار دهید.

۶ــ چرا مشخصه گشتاور دور موتورهای DC مهمتر از سایر مشخصه‌های آنهاست؟

۷ــ منظور از نوع تحریک موتور جریان مستقیم چیست؟

۸ــ موتورهای سری و شنت را با هم مقایسه و چند نمونه از کاربردهای هریک را مشخص نمایید.

۹ــ آیا «قطبهای کمکی» و «سیم‌پیچهای جبران‌کننده» درموتورهای DC هم کاربرد دارند؟ چرا؟

۱۰ــ اگر روی محور یک موتور کمپوند، باری بیش از حد مجاز آن قرار گیرد چه اتفاقی می‌افتد؟

۱۱ــ مشخصه گشتاور ــ دورموتورهای شنت، سری و کمپوند را روی یک صفحه مختصات رسم کنید.

۶ــ۴ــ روشهای راه‌اندازی موتورهای جریان مستقیم

هنگام راه‌اندازی (آغاز به کار) موتور DC چون هنوز سرعت صفر است و برای افزایش نیاز به زمان دارد. طبق رابطه اساسی ولتاژ القایی ($E_A = k\varphi\omega$) ولتاژ القایی صفر است. اگر در روابط ولتاژ موتورهای DC (رابطه ۱۳ــ۴ــ ب برای موتورهای تحریک مستقل، شنت و رابطه ۱۶ــ۴ــ ب برای موتورهای سری و کمپوند) بجای نیروی محرکه القایی در لحظه راه‌اندازی (E_{AS}) صفر را قرار دهیم، خواهیم داشت :

$$V_T = E_A + R_A I_A \quad و \quad E_A = E_{As} = ۰ \Rightarrow I_{AS} = \frac{V_T}{R_A} \qquad (۴ــ۲۴)$$

رابطه (۲۴ــ۴) جریان راه‌اندازی آرمیچر موتور شنت و تحریک مستقل را نتیجه می‌دهد و برای موتور سری و کمپوند طبق رابطه (۲۵ــ۴) جریان راه‌اندازی (I_{AS}) بدست می‌آید.

$$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S)$$

$$E_A = 0 \Rightarrow I_{AS} = \frac{V_T}{R_A + R_S} \qquad (۴ــ۲۵)$$

از آنجاکه در موتورهای صنعتی R_A و R_S مقدار کوچکی دارند، مقدار جریان راه‌اندازی می‌تواند تا حوالی ده برابر جریان نامی (و حتّی بیشتر) باشد که این جریان بسیار زیاد، مشکلات متعددی را به همراه دارد از جمله :

I) نیاز به کلیدها و اتصالات با جریان خیلی بالاتر از جریان نامی

II) آسیب دیدن سیم‌پیچی آرمیچر و زغالها

III) آسیب دیدن قسمتهای مکانیکی رتور (از جمله محور اصلی و یاتاقانها) به دلیل بزرگی بیش از حد گشتاور راه‌اندازی

IV) افت ولتاژ زیاد در منبع تغذیه

البته با دورگرفتن موتور تدریجاً مقدار نیروی محرکهٔ القایی (E_A) افزایش یافته از بزرگی جریان آرمیچر کم می‌شود.

برای حل مشکلات ناشی از راه‌اندازی و جریان زیاد آن در موتورهای صنعتی معمولاً از مقاومتهای پرقدرتی (به عنوان راه‌انداز[۱]) استفاده می‌شود.

این مقاومتهای متغیر در ابتدای راه‌اندازی بطور کامل با آرمیچر سری شده، جریان راه‌اندازی را محدود می‌کنند. مقدار این مقاومتها عملاً طوری انتخاب می‌شوند که جریان راه‌اندازی از حدود ۲ برابر جریان نامی بیشتر نشود. سپس با افزایش دور ماشین که نیروی محرکه E_A افزایش می‌یابد این مقاومت به تدریج از مدار خارج می‌گردد و با رسیدن موتور به دور نامی مقاومت راه‌انداز کاملاً از مدار خارج شده است.

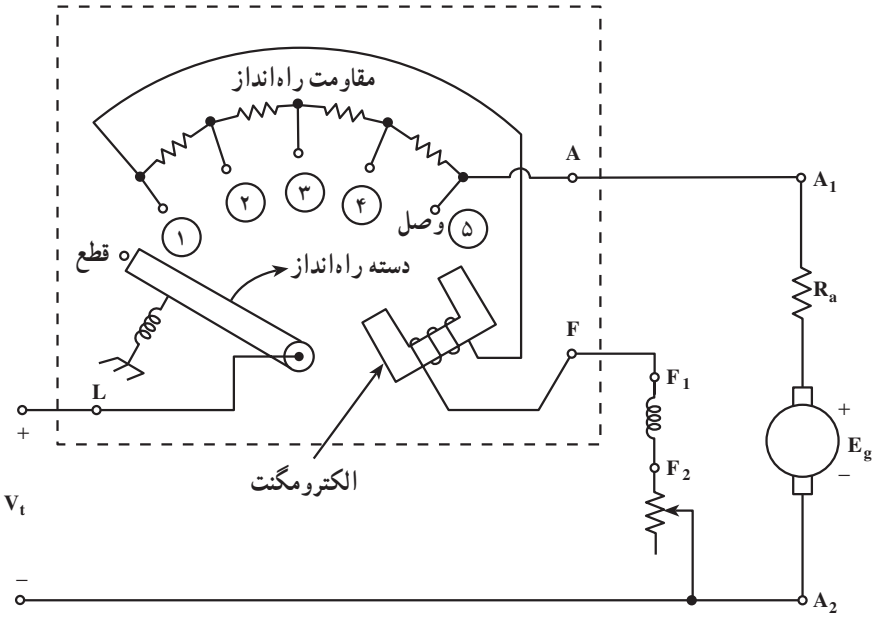
این مقاومتها می‌توانند بطور دستی و یا اتوماتیک عمل کنند. همچنین به کمک مدارهای الکترونیک صنعتی بدون استفاده از مقاومتهای راه‌انداز و با افزایش تدریجی ولتاژ می‌توان جریان‌راه‌اندازی را محدود نمود.

همچنین باید در نظر داشت که در موتورهای الکتریکی قدرت کم (معمولاً کمتر از یک کیلووات) به دلیل بزرگی نسبی مقاومت آرمیچر، جریان راه‌اندازی تا حدودی کمتر از موتورهای صنعتی بزرگ

۱ــStarter

است. به همین دلیل اکثراً این نوع موتورها مستقیماً (بدون استفاده از مقاومت راه‌انداز) به شبکه وصل می‌شوند. جریان راه‌اندازی این گونه موتورهای DC حدود ۲ تا ۳ برابر جریان نامی است که برای زمان کوتاه راه‌اندازی قابل تحمل خواهد بود.

۱ــ۶ــ۴ــ راه‌اندازهای دستی موتورهای جریان مستقیم: شکل ۱۰ــ۴ یک نمونه از راه‌اندازهای دستی موتور DC را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ــ۴ــ راه‌انداز سه نقطه‌ای موتور DC

این نوع راه‌انداز دارای سه ترمینال L، A و F است و به همین دلیل سه نقطه‌ای نامیده می‌شود. (معمولاً از این نوع راه‌انداز برای موتور سری استفاده نمی‌شود.)

با حرکت دسته راه‌انداز (در جهت نشان‌داده شده در شکل ۱۰ــ۴) در اولین وضعیت مدار تحریک نیز برقرار شده و مدار آرمیچر از طریق مقاومت راه‌انداز به شبکه متصل می‌گردد.

با حرکت تدریجی دسته راه‌انداز (متناسب با افزایش سرعت موتور) دسته راه‌انداز به وضعیتهای ۲، ۳، ... تا آخر رسیده و برای شکل (۱۰ــ۴) که دارای ۵ مرحله[۱] است در مرحلهٔ پنجم مقاومت راه‌انداز کاملاً از مدار خارج شده است. در این مرحله که دور موتور در حدود دور نامی است نیروی محرکه القایی E_A تا حدی افزایش یافته و جریان آرمیچر در حدود جریان نامی محدود می‌گردد و

۱ــStep

نیازی به مقاومت راه‌انداز نخواهد بود.

در مرحلهٔ آخر دسته راه‌انداز به واسطهٔ خاصیت مغناطیسی یک هستهٔ آهنی که بر روی آن یک سیم‌پیچی (سری شده با سیم‌پیچی تحریک موتور) قرار دارد، قفل شده مانع از برگشت دسته راه‌انداز به وضعیت اوّلیه آن می‌شود. در این حالت دو عامل می‌تواند سبب قطع راه‌انداز و خاموش شدن موتور باشد :

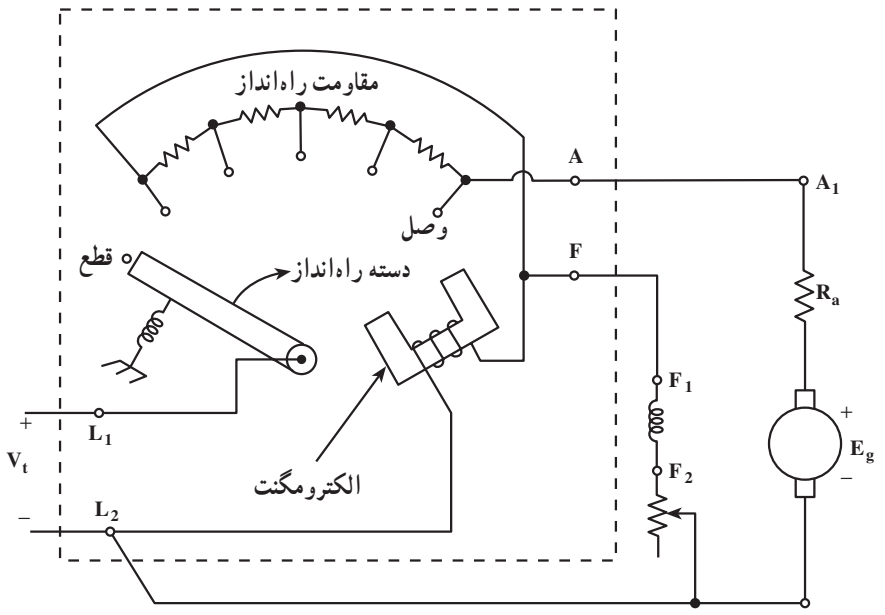
I) قطع برق اصلی که موجب از بین رفتن خاصیت مغناطیسی هسته U شکل (مطابق شکل ۱۰ــ۴) شده دسته راه‌انداز، به وسیله فنری که بر روی شکل نشان داده شده است به حالت اوّلیه قطع برگردد.

II) قطع جریان تحریک (به هر علت) باعث از بین رفتن خاصیت مغناطیسی هسته U شکل شده، با برگشت راه‌انداز به حالت اوّلیه قطع مدار آرمیچر هم از شبکه جدا خواهد شد.

این خاصیت در واقع حفاظت موتور در برابر قطع تحریک (افزایش شدید دور) است، اما از سویی نمی‌توان دور این موتور را خیلی افزایش داد زیرا برای این‌کار باید جریان تحریک خیلی کم شود که ممکن است موجب رهاشدن دسته راه‌انداز (قطع موتور از شبکه) گردد.

پس‌راه‌اندازی سه نقطه‌ای برای موتورهای با تنظیم دور وسیع و نیاز به دورهای زیاد مناسب نیست.

روش دیگر راه‌اندازی دستی موتور DC بکارگیری راه‌انداز چهار نقطه‌ای مطابق شکل ۱۱ــ۴ است که دارای ۴ ترمینال L_1 ، L_2 ، A و F می‌باشد.



شکل ۱۱ــ۴ــ راه‌انداز ۴ نقطه‌ای موتور DC

در این نوع راه‌انداز، سیم‌پیچی هسته نگهدارنده U شکل با سیم‌پیچی تحریک سری نمی‌شود بلکه مستقیماً به منبع ولتاژ متصل می‌گردد.

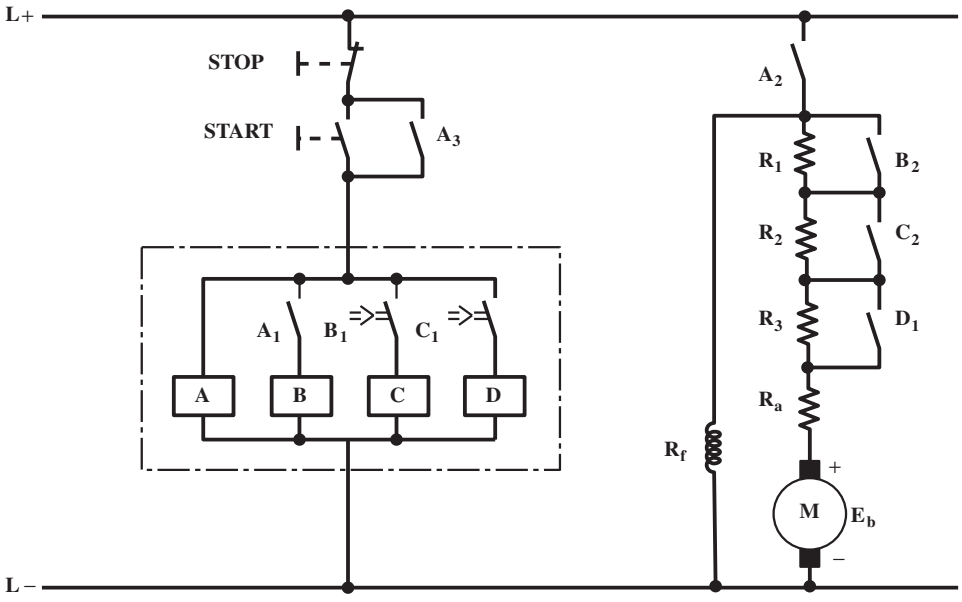
در این نوع راه‌اندازی امکان افزایش دور در محدوده وسیعتری وجود دارد. اما قطع مدار تحریک موجب قطع راه‌انداز نخواهد شد و برای حفاظت موتور در برابر قطع تحریک و افزایش دور باید یک کلید تابع دور در مدار اصلی موتور پیش‌بینی شده باشد.

در راه‌انداز چهار نقطه‌ای با قطع ولتاژ ورودی کلید به حالت اوّلیه قطع برخواهد گشت.

۲ــ۶ــ۴ــ راه‌اندازی اتوماتیک: می‌توان به کمک چند تایمر و کنتاکتور DC مداری طرح کرد که کار راه‌اندازی موتور DC را با فشار فقط یک دکمه انجام دهد و نیازی به راه‌اندازی دستی نباشد، خصوصاً آن که در موتورهای پرقدرت، رعایت دقیق زمان عمل کلید راه‌انداز (مثلاً ۵ ثانیه از مرحلهٔ اول تا مرحلهٔ آخر کلید راه‌انداز) بسیار حساس است و کمی عجله یا تأخیر مشخص بهره‌بردار هنگام راه‌اندازی می‌تواند به موتور آسیب برساند در حالی که در راه‌اندازی اتوماتیک زمان عمل راه‌اندازی دقیقاً توسط مدار اتوماتیک رعایت می‌شود.

یک نمونه مدار راه‌انداز اتوماتیک موتور DC در شکل ۱۲ــ۴ رسم شده است. در این مدار با فرمان (START) مقاومت راه‌انداز توسط کنتاکتور DC بنام A بطور کامل با آرمیچر موتور سری شده، جریان راه‌اندازی را محدود می‌کند.

همزمان با حرکت و سرعت گرفتن موتور، تایمر B نیز به‌کار افتاده پس از تأخیر مشخصی (مثلاً



شکل ۱۲ــ۴ــ یک نمونه مدار راه‌اندازی اتوماتیک موتور DC

حدود ۱/۵ ثانیه) عمل می‌کند و موجب اتصال کوتاه قسمت R_1 مقاومت راه‌انداز از مدار آرمیچر می‌گردد و همزمان تایمر C نیز تحریک و به کار می‌افتد. و پس از طی زمان تأخیر، قسمت R_2 مقاومت راه‌انداز نیز اتصال کوتاه می‌شود. و بالاخره در مرحله آخر تایمر D قسمت باقیمانده مقاومت راه‌انداز (R_3) را نیز اتصال کوتاه می‌کند و به این ترتیب با افزایش تدریجی دور ماشین مقاومت راه‌انداز در سه مرحله از مدار خارج می‌شود.

البته در چنین مدارهایی عملاً بجای تایمرهای B، C و D از رله‌های با تأخیر زمانی استفاده می‌شود که دارای تأخیر مشخصی در قطع بوده برعکس تایمر، زمان تأخیر آنها قابل تنظیم نیست.

یک مزیت دیگر راه‌اندازی اتوماتیک موتور DC خصوصاً برای موتورهای پرقدرت، ایجاد امکان کنترل بهتر از فاصله‌های مختلف است. زیرا در این روش مدارهای فرمان و قدرت از هم جدا بوده، می‌توان اتصالات مدار فرمان را که دارای جریان به مراتب کمتر از مدار قدرت است به نقاط مختلف انتقال داد و مثلاً از یک فاصله طولانی عمل قطع و وصل موتور را اجرا کرد.

اما راه‌اندازهای دستی باید حتماً در مجاورت موتور نصب شده و از همان جا فرمان بگیرند.

تنظیم جریان تحریک در زمان راه‌اندازی: به علت محدودیت جریان راه‌اندازی، برای بهبود گشتاور راه‌اندازی موتورهای جریان مستقیم آنها را با حداکثر جریان تحریک مجاز راه می‌اندازند، زیرا طبق رابطه اساسی (۲۸ــ۲) گشتاور تولیدی علاوه بر جریان آرمیچر با فوران قطب که آن هم تابع جریان تحریک می‌باشد متناسب است.

بنابراین در موتورهای تحریک مستقل، شنت و کمپوند مقاومت متغیر مدار تحریک (R_{adj} در شکلهای ۱ــ۴، ۲ــ۴ و ۸ــ۴) در حداقل مقدار مجاز خود قرار می‌گیرد، در حالی که رئوستای راه‌انداز مدار آرمیچر حداکثر است.

پس از شروع به کار و خروج راه‌انداز از مدار، با کنترل رئوستای تحریک (R_{adj}) دور موتور تنظیم می‌شود.

۷ــ۴ــ روشهای کنترل دور موتور جریان مستقیم

یکی از مزایای مهم موتورهای DC امکان کنترل دور آنها در یک محدوده نسبتاً وسیع و با دقت زیاد است و در این بخش روشهای کنترل دور موتور DC مورد بررسی قرار می‌گیرند.

اگر رابطه اساسی ولتاژ (۱۹ــ۲) را بر حسب دور بنویسیم داریم :

$$E_A = K\varphi\omega \Rightarrow \omega = \frac{E_A}{K\phi} \qquad (۴ــ۲۶)$$

رابطه (۲۶ــ۴) برای موتور تحریک مستقل و شنت چنین نوشته می‌شود :

$$\omega = \frac{V_T - R_A I_A}{K\phi} \qquad \text{(۲۷ــ۴ــ الف)}$$

و برای موتورهای سری و کمپوند داریم :

$$\omega = \frac{V_T - (R_A + R_S) I_A}{K\phi} \qquad \text{(۲۷ــ۴ــب)}$$

روابط (۲۶ــ۴) و (۲۷ــ۴) نشان می‌دهند که در موتورهای DC برای کنترل دور سه راه وجود دارد :

I) کنترل فوران

II) کنترل ولتاژ آرمیچر

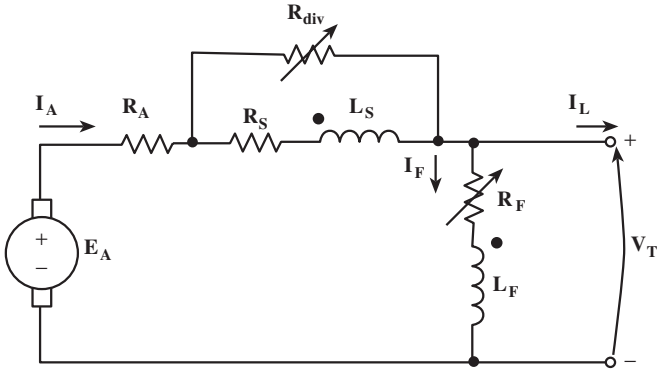
III) کنترل مقاومت مدار آرمیچر

روشهای I و II عملاً رایج بوده از روش III استفاده چندانی نمی‌شود.

۱ــ۷ــ۴ــ کنترل سرعت موتور DC از طریق تغییر مقدار فوران: مطابق روابط (۲۶ــ۴) و (۲۷ــ۴) مقدار فوران (ϕ) با دور رابطه عکس دارد یعنی با افزایش فوران کاهش سرعت و با کاهش فوران، افزایش سرعت خواهیم داشت.

در موتورهای تحریک مستقل، شنت و کمپوند تغییر فوران توسط مقاومت متغیر مدار تحریک (R_{adj} در شکلهای ۱ــ۴، ۲ــ۴ و ۸ــ۴) به سادگی امکان‌پذیر است و با توجه به این که جریان تحریک معمولاً بسیار کوچکتر از جریان آرمیچر است مقاومت متغیر مدار تحریک نسبتاً کوچک و ظریف و کنترل دور از این روش به سادگی و با دقت زیاد امکان‌پذیر است.

اما در موتور سری که مدار مستقلی برای سیم‌پیچی تحریک وجود ندارد و نیز در رابطه با سیم‌پیچ سری موتورهای کمپوند برای تغییر فوران عملاً یک مقاومت متغیر نسبتاً پرقدرت (R_{div}[۱] در شکل ۱۳ ــ۴) با سیم‌پیچی تحریک، موازی می‌گردد.



شکل ۱۳ــ۴ــ کنترل جریان تحریک موتور سری

۱ــDiverter

علت وجود رابطه عکس بین فوران و سرعت را می‌توان چنین بیان نمود :

با کاهش فوران مطابق رابطه اساسی (۱۹ــ۲) مقدار ولتاژالقایی E_A کاهش می‌یابد و از آنجا که مطابق روابط (۱۲ــ۴ ــب، ۱۳ــ۴ــب، ۱۶ــ۴ــ ب و ۲۳ــ۴ــب) بدلیل کوچکی نسبی مقاومت مدار آرمیچر در هنگام کار عادی موتور E_A باید در حدود ولتاژ ترمینال V_T (و کمی کمتر از آن) باشد تا جریان آرمیچر بیش از حد بزرگ نشود، پس باید کاهش فوران را افزایش دور (و بالعکس افزایش فوران را کاهش دور) جبران کند تا E_A تقریباً ثابت بماند.

به عبارت دیگر با کاهش فوران، باید آرمیچر سریعتر بچرخد تا با این فوران کاهش یافته ولتاژی حوالی ولتاژ ترمینال V_T در آن القاء گردد.

با بکارگیری روش کنترل دور از طریق تغییر فوران در موتورهای تحریک مستقل، شنت و کمپوند فقط می‌توان به دورهای بالاتر از حالتی که رئوستا در مدار تحریک قرار ندارد، دست یافت و نمی‌توان دور موتور را از این حد کمتر نمود.

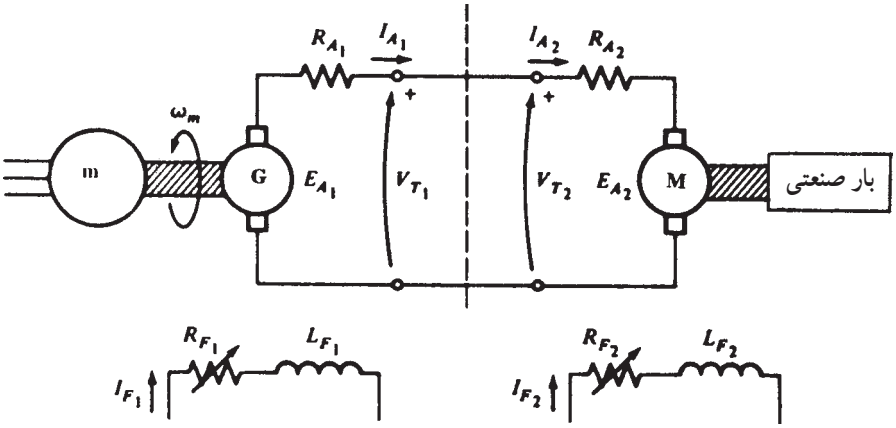
از سوی دیگر افزایش دور ماشین دارای محدودیتهای کموتاسیون (از نظر ایجاد جرقه‌های شدید جاروبکها در سرعتهای زیاد بخصوص در ماشینهای بدون قطب کمکی) و نیز محدودیتهای مکانیکی (از نظر محور، یاتاقانها و سیم‌بندی و ... با افزایش نیروهای گریز از مرکز) می‌باشد و لذا در افزایش دور موتور باید این محدودیتها مدنظر قرار گیرند تا اجزای مختلف ماشین آسیب نبینند.

۲ــ۷ــ۴ــ کنترل سرعت موتور DC از طریق کنترل ولتاژ آرمیچر: سرعت موتورهای DC با ولتاژ دو سر آرمیچر آنها تناسب مستقیم دارد و در سالهای اخیر با توسعهٔ دانش نیمه هادیها و الکترونیک قدرت مدارهایی برای کنترل ولتاژ آرمیچر بدون نیاز به رئوستاهای پرقدرت طراحی و ارائه شده‌اند. در این روش برای همهٔ انواع موتورهای DC (تحریک مستقل، شنت، سری و کمپوند) دور موتور به راحتی و با دقت زیاد در هر دو جهت کاهش یا افزایش قابل تنظیم است. البته بایستی توجه نمود که ولتاژ از حد مجاز ماشین فراتر نرود.

روش معروف و پرکاربردی بنام (وارد ــ لئونارد[۱]) از مدتها پیش در صنایع مختلف مورد استفاده قرارگرفته که اساس کار آن تنظیم ولتاژ یک موتور DC برای کنترل دور آن است.

همانطور که در شکل ۱۴ــ۴ مشخص شده در این روش از دو ماشین جریان مستقیم (مولد G و موتور M) و یک موتور سه فاز جریان متناوب m استفاده می‌شود که موتور m و مولد G هم محور هستند. موتور M موتور اصلی این مجموعه بوده و وظیفه تأمین گشتاور بار را به عهده دارد. طبیعتاً این مجموعه مفصل و گران قیمت خواهد بود، اما به دلیل امکان کنترل دور ساده موتور در یک

۱ــWard - Leonard system



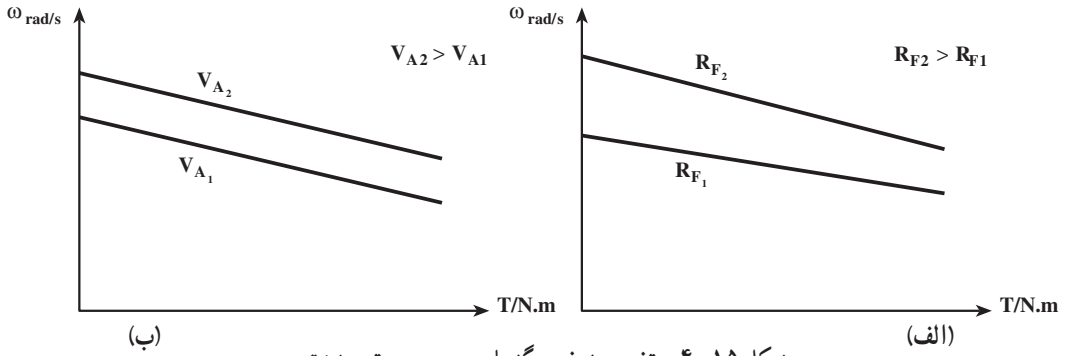
شکل ۱۴ــ۴ــ روش وارد ــ لئونارد برای کنترل دور موتور DC

محدوده وسیع (از یک حداقل دور تا بیش از ۱۰ برابر این حداقل دور) کاربردهای زیادی در موتورهای پرقدرت صنایع نورد، بالابرها و پرسهای الکتریکی و ... دارد.

طرز کار سیستم وارد ـ لئونارد: موتور M باید بار صنعتی را در یک محدوده وسیع تنظیم دور به حرکت درآورد. ولتاژ دو سر آرمیچر این موتور به وسیله یک مولّد جریان مستقیم G تأمین می‌شود و هر دو ماشین M و G به صورت تحریک مستقل هستند.

موتور جریان متناوب m وظیفه به حرکت درآوردن آرمیچر مولد G را به عهده دارد. محور مشترک G و m دارای سرعت تقریباً ثابتی است. با تنظیم رئوستای مدار تحریک مولد G (تغییر R_{F1}) می‌توان ولتاژ القایی مولد G (یعنی E_{A1}) را کنترل نمود. این ولتاژ قابل تنظیم از طریق ترمینالهای مشترک دو ماشین G و M به آرمیچر موتور M منتقل می‌شود ($V_{T1} = V_{T2}$) با تغییرات ولتاژ القایی E_{A1} که در یک محدوده وسیع امکان‌پذیر است ؛ ولتاژ V_{T2} کنترل شده دور موتور M بطور گسترده‌ای امکان تنظیم می‌یابد.

علاوه بر امکان تنظیم دور موتور اصلی M به کمک ولتاژ ورودی آن (از طریق تنظیم R_{F1}) یک امکان دیگر هم برای تنظیم دور موتور M وجود دارد، که آن تنظیم رئوستای مدار تحریک موتور M (تغییر R_{F2}) است. اگر فرض کنیم با تنظیم مقدار R_{F1} ولتاژ V_T به نسبت ۱ به ۶ و با تنظیم مقدار R_{F2} نیز دور موتور M به نسبت ۱ به ۲ قابل کنترل باشد، مجموعاً یک نسبت تنظیم ۱ به ۱۲ را به سادگی و به کمک دو رئوستای ظریف و کوچک R_{F1} و R_{F2} در اختیار خواهیم داشت که، باعث کاربردهای گسترده‌ای برای این سیستم می‌شود. ضمناً به دلیل امکان تنظیم ولتاژ ورودی موتور نیازی به مقاومت راه‌انداز در مدار آرمیچر موتور M نیز نخواهد بود.



شکل ۱۵ــ۴ــ تغییر مشخصه گشتاور ــ دور موتور شنت
الف) با تغییرات مقاومت مدار تحریک ب) با تغییر ولتاژ آرمیچر

برای مقایسه نموداری ۲ روش کنترل دور مورد اشاره در این بخش (روش کنترل جریان تحریک و روش کنترل ولتاژ آرمیچر)، اثر این دو روش بر مشخصه گشتاور ـ دور موتور DC (مثلاً تحریک مستقل یا شنت) در شکل ۱۵ــ۴ نشان داده شده است.

شکل (۱۵ــ ۴ــ الف) معلوم می‌دارد که با افزایش مقاومت مدار تحریک شیب مشخصه گشتاور ــ دور و نیز عرض از مبدأ آن افزایش می‌یابند و مشخصه جدیدی بدست می‌آید.

در حالی که با تغییر ولتاژ آرمیچر شیب مشخصه گشتاور ــ دور تغییر نکرده فقط عرض از مبدأ مشخصه متناسب با تغییر ولتاژ تغییر می‌کند که در شکل (۱۵ــ۴ــ ب) نحوه تغییر مشخصه نشان داده شده است.

۳ــ۷ــ۴ــ تغییر جهت گردش موتور جریان مستقیم: در بسیاری از بارهای صنعتی (مانند آسانسورها، نقالّه‌ها، وسایل حمل و نقل و ...) لازم است که امکان تغییر جهت گردش موتورهای الکتریکی فراهم باشد.

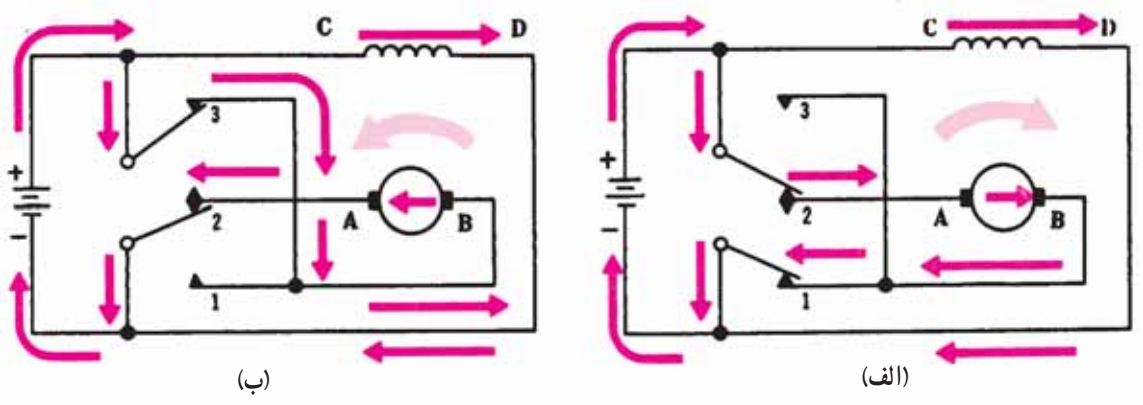
در موتورهای DC با توجه به رابطه اساسی (۲۸ــ۲) برای تغییر جهت گشتاور، یکی از دو کمیت I_A و I_F باید تغییر جهت بدهند. (یعنی در یکی از دو سیم‌پیچی آرمیچر یا تحریک پلاریتهٔ سیم‌پیچی عوض شود یا به اصطلاح دو سر سیم‌پیچی جابجا گردد) در موتور تحریک مستقل کافی است در یکی از دو مدار تحریک یا آرمیچر پلاریته منبع تغییر کند اما در موتورهای شنت و سری با تغییر جای مثبت و منفی منبع تغذیه، جهت گردش تغییر نخواهد کرد چرا که در این صورت هر دو جریان آرمیچر و تحریک تغییر جهت می‌دهند و علامت گشتاور تغییر نمی‌کند.

پس در موتورهای شنت و سری برای تغییر جهت گردش باید دو سر یکی از دو سیم‌پیچی آرمیچر یا تحریک را جابجا نمود.

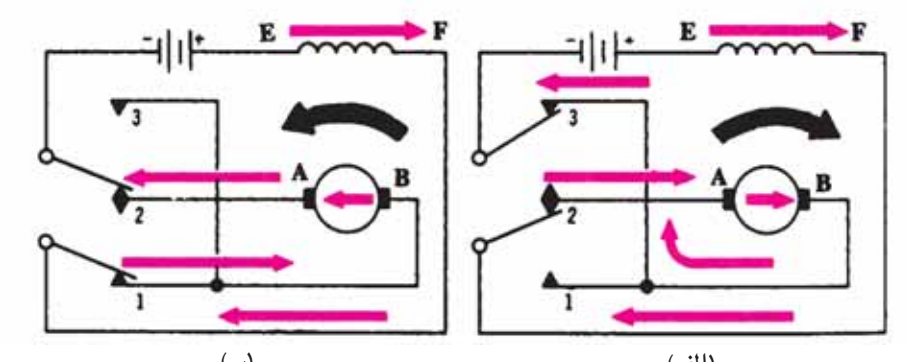
معمولاً برای تغییر جهت گردش موتورهای جریان مستقیم دو سر مدار آرمیچر را جابجا می‌کنند. زیرا اگر بخواهیم جهت جریان تحریک را عوض کنیم، مشکلاتی همچون :

قطع مدار تحریک در لحظه تغییر جهت، القای ولتاژهای ناخواسته در مدار آرمیچر و ... پیش خواهد آمد. ضمناً اگر آرمیچر دارای قطب کمکی یا سیم‌پیچی جبرانگر هم باشد، هنگام تغییر پلاریتهٔ آرمیچر باید ورودی و خروجی مدار آرمیچر طوری جابجا شود که جهت جریان در قطبهای کمکی و سیم‌پیچهای جبرانگر نیز تغییر کند.

در شکل ۱۶ــ۴ نحوه تغییر جهت گردش موتور شنت با تغییر جهت جریان آرمیچر آن نشان داده شده است و شکل ۱۷ــ۴ نیز تغییر جهت گردش موتور سری بر اثر تغییر جهت جریان آرمیچر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶ــ۴ــ تغییر جهت گردش موتور شنت الف) راستگرد ب) چپگرد



شکل ۱۷ــ۴ــ تغییر جهت گردش موتور سری الف) راستگرد ب) چپگرد

۸ــ۴ــ روشهای ترمز موتورهای جریان مستقیم

در بسیاری بارهای صنعتی (مانند آسانسورها) لازم است پس از قطع موتور از شبکه سریعاً محورِ در حال حرکت متوقف شود. در حالی که با قطع موتورهای الکتریکی از شبکه به خاطر لختی (اینرسی) قسمت دوّار تا مدتی حرکت محور آن ادامه خواهد یافت. در این موارد حالتهای ترمزی موتورهای الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد تا پس از خاموش شدن موتور، بلافاصله موتور و بار آن متوقف شوند.

(البته گاهی در برخی موتورهای کوچک با روشهای مکانیکی مانند استفاده از لنت ترمز محور را متوقف می‌کنند).

اساس کار ترمز موتورهای الکتریکی بر این مبنا استوار است که انرژی جنبشی قسمت در حال حرکت، یا به شبکه برگشت داده شود و یا سریعاً مستهلک شود، تا محور موتور بایستد.

برای ترمز موتورهای DC سه روش به‌کار می‌رود :

I) ترمز دینامیکی

II) ترمز با جریان مخالف

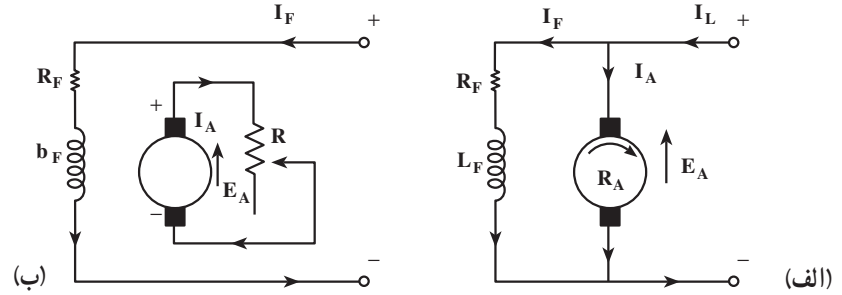
III) ترمز مولدی

روشهای اول و دوم در همه انواع موتورهای DC (تحریک مستقل، شنت، سری و کمپوند) بکار می‌آیند ولی روش سوم برای موتور سری قابل استفاده نبوده، در موتورهای تحریک مستقل، شنت و کمپوند کاربرد دارد.

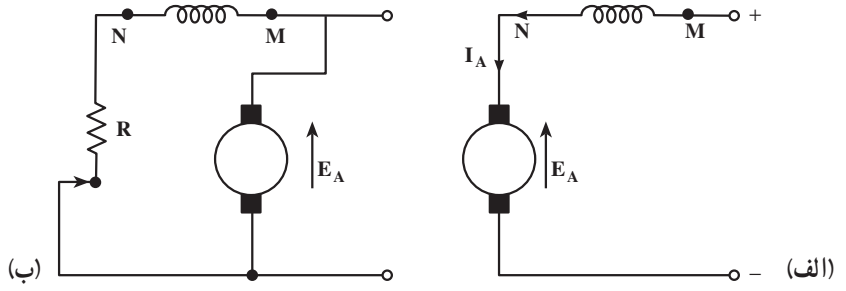
۱ــ۸ــ۴ــ ترمز دینامیکی: در این روش مدار آرمیچر از شبکه جدا شده، دو سر آن به یک مقاومت متغیر وصل می‌گردد تا انرژی جنبشی محور بوسیله آرمیچر، ابتدا تبدیل به انرژی الکتریکی شده، سپس در داخل مقاومت متغیر تبدیل به گرما شود. یعنی عملاً آرمیچر رفتار یک مولد را از خود بروز می‌دهد.

سیم‌پیچی تحریک موازی موتورهای تحریک مستقل، شنت و کمپوند به شبکه قبلی خود متصل باقی می‌ماند. تا میدان مغناطیسی لازم برای رفتار مولدی آرمیچر را تأمین نماید و پس از توقف کامل محور، مدار تحریک نیز از شبکه جدا می‌گردد.

اما در موتور سری و موتور کمپوند سیم‌پیچی تحریک سری همچنان با آرمیچر سری باقی می‌ماند، با این تفاوت که دو سر سیم‌پیچی سری در حالت ترمزی جابجا می‌شود تا جهت جریان آن مانند حالت کار موتوری باقی‌بماند و پس ماند هسته از بین نرود. در شکلهای ۱۸ــ۴ و ۱۹ــ۴ چگونگی اتصالات موتورهای شنت و سری در حالت کار عادی و کار ترمزی نشان داده شده است.



شکل ۱۸ــ۴ــ ترمز دینامیکی موتور شنت الف) حالت کار ب) حالت ترمز



شکل ۱۹ــ۴ــ ترمز دینامیکی موتور سری الف) حالت کار ب) حالت ترمز

در روش دینامیکی، مقدار نیروی ترمز کننده بستگی به ولتاژ آرمیچر داشته با کاهش سرعت و کاهش ولتاژ آرمیچر مقدار نیروی ترمزی نیز کاهش یافته، در توقف کامل این نیرو از بین می‌رود.

۲ــ۸ــ۴ــ ترمز با جریان مخالف: در این روش برای ایجاد گشتاور ترمزی در یک لحظه جای دو سر آرمیچر را عوض می‌کنند. با این کار جهت گشتاور تولیدی برعکس شده، موتور سریعاً رو به توقف می‌رود و نیروی ترمز کننده‌ای به مراتب بیش از حالت دینامیکی بوجود می‌آید. اما در این روش ضربات شدیدی به محور و نیز به مدارهای الکتریکی ماشین وارد می‌شود.

در این روش عمل جابجایی پلاریته فقط برای چند لحظه برقرار است و در زمان مشخص باید موتور از شبکه جدا گردد تا مجدداً در جهت مخالف جهت قبلی گردش نکند.

همچنین به علت جریان نسبتاً زیاد آرمیچر در این نوع ترمز می‌توان برای کاهش شوکهای الکتریکی و مکانیکی یک مقاومت نیز در مدار آرمیچر قرار داد تا جریان آرمیچر تا حدودی کمتر شود.

۳ــ۸ــ۴ــ ترمز مولدی: در مواردی که بار موتور تحت تأثیر شتاب حاصل از نیروی وزن خود (مانند حرکت وسایل نقلیه در سر پایینی یا حرکت روبه پایین بالابرها و آسانسورها) بتواند به بیش

از سرعت بی‌باری خود برسد می‌توان از روش ترمز مولّدی استفاده نمود.

در این حالت بجای تبدیل انرژی جنبشی محور به گرما، این انرژی را به صورت الکتریکی به‌شبکه جریان مستقیم برمی‌گردانند. یعنی موتور تبدیل به مولد شده، انرژی مکانیکی محور آن، با تبدیل به انرژی الکتریکی به شبکه برگردانده می‌شود. از آنجا که در این حالت سرعت ماشین بیشتر از حالت موتوری است، نیروی محرکهٔ القایی آرمیچر (E_A) مطابق رابطه (۱۹ــ۲) بیش از ولتاژ شبکه بوده، موجب معکوس شدن جهت جریان در آرمیچر می‌شود. یعنی در حالت کار موتوری داشته‌ایم :

$$I_A = \frac{V_T - E_A}{R_A} \qquad (۴ــ۲۸)$$

و برای حالت مولدی :

$$I_A = \frac{E_A - V_T}{R_A} \qquad (۴ــ۲۹)$$

بدیهی است که در این حالت باید امکان جذب انرژی الکتریکی توسط شبکه فراهم باشد. مثلاً این انرژی می‌تواند به یک شبکه بزرگ برگردانده شود و یا در یک شبکه کوچکتر صرف شارژ باتریها یا تأمین انرژی لازم در سیستم روشنایی گردد. عملاً از روش مولدی به تنهایی استفاده نمی‌شود و برای افزایش اطمینان یک سیستم ترمز مکانیکی نیز در کنار آن بکار می‌رود.

همان‌گونه که در ابتدای بخش بحث شد، در موتور سری روش ترمز مولدی بکار نمی‌رود زیرا ولتاژ القایی در آرمیچر آن نمی‌تواند از ولتاژ شبکه بیشتر شود.

۹ــ۴ــ تحلیل بارداری و انواع تلفات در موتور جریان مستقیم

در فصل دوم (بخش ۱۴ــ۲) با نمودار توازن توان و انواع تلفات در ماشینهای الکتریکی و روابط مربوط به آنها آشنا شدیم.

در این بخش با بکارگیری مطالب و روابط فصلهای دوم و چهارم چند نمونه از مسائل بارداری موتور DC مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد :

مثال ۷ــ۴: یک موتور شنت به ولتاژ ۲۵۰ ولت و سرعت نامی ۱۲۰۰ دور بر دقیقه و جریان نامی آرمیچر ۱۷۰ آمپر مفروض است، جریان تحریک در نقطه کار نامی برابر ۵ آمپر و مقاومت آرمیچر معادل ۰/۰۶ اهم می‌باشند. آرمیچر این موتور در حالت بی‌باری ۱۱/۵ آمپر جریان از شبکه دریافت می‌کند. مطلوبست :

الف) قدرت خروجی و ضریب بهره در نقطه کارنامی

ب) گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور مفید در نقطه کارنامی

حل: با محاسبه اجزای مختلف تلفات موتور مجموع تلفات آن را می‌یابیم.

تلفات تحریک $P_F = V_T I_F = ۲۵۰ \times ۵ = ۱۲۵۰ \ W$

تلفات مسی آرمیچر $P_A = R_A I_A^۲ = ۰/۰۶ \times ۱۷۰^۲ = ۱۷۳۴ \ W$

$P_{Cu} = P_A + P_F = ۱۷۳۴ + ۱۲۵۰ = ۲۹۸۴ \ W$

جریان بی‌باری موتور صرف تأمین تلفات ثابت (آهنی و مکانیکی و تحریک در ماشینهای شنت) می‌شود :

تلفات ثابت $= P_{Fe} + P_{mech} + P_F = ۲۵۰ \times ۱۱/۵ = ۲۸۷۵ \ W$

و مجموع تلفات ماشین در نقطه کارنامی چنین است :

$\Delta P = P_{Cu} + P_{Fe} + P_{mech} = P_A + P_F + P_{Fe} + P_{mech}$

$\Delta P = ۱۷۳۴ + ۲۸۷۵ \quad \Delta P = ۴۶۰۹ \ W$

الف)

$P_۱ = V_T I_L = ۲۵۰(۱۷۰ + ۵) = ۴۳۷۵۰ \ W$

$P_۲ = P_۱ - \Delta P = ۴۳۷۵۰ - ۴۶۰۹ = ۳۹۱۴۱ \ W$

$\eta = \frac{P_۲}{P_۱} \times ٪۱۰۰$

$\eta = \frac{۳۹۱۴۱}{۴۳۷۵۰} \times ٪۱۰۰ = ٪۸۹/۴$

ب) از نمودار توازن توان موتورهای DC (بخش ۱۴ــ۲) داریم :

$P_e = P_۱ - P_{Cu} = ۴۳۷۵۰ - (۱۷۳۴ + ۱۲۵۰) = ۴۰۷۶۶ \ W$

$T = \frac{p_e}{\omega} = \frac{۶۰ P_e}{۲\pi N} = \frac{۶۰ \times ۴۰۷۶۶}{۲\pi \times ۱۲۰۰} = ۳۲۴/۴ \ N.m$

$T_u = \frac{P_۲}{\omega} = \frac{۶۰ P_۲}{۲\pi N} = \frac{۶۰ \times ۳۹۱۴۱}{۲\pi \times ۱۲۰۰} = ۳۱۱/۵ \ N.m$

مثال ۸ــ۴: یک موتور کمپوند در بارنامی دارای مشخصات زیر است :

$V_T = ۱۲۰ V$

$I_L = ۱۵ A$

$\omega = ۱۴۰ \frac{rad}{s}$

$R_F = ۱۰۰ \Omega$

$R_A + R_S = ۰/۸ + ۰/۲ \Omega \qquad P_{Fe} + P_{mech} = ۱۵۰ \ W$

مطلوبست محاسبه نیروی محرکه القایی (E_A)، توان، ضریب بهره، گشتاور الکترومغناطیسی و

گشتاور مفید در نقطه کارنامی.

حل:

$$I_F = \frac{V_T}{R_F} = \frac{۱۲۰}{۱۰۰} = ۱/۲ \ A$$

$$I_A = I_L - I_F = ۱۵ - ۱/۲ = ۱۳/۸ \ A$$

$$E_A = V_T - I_A(R_A + R_S)$$

$$= ۱۲۰ - ۱۳/۸(۰/۸ + ۰/۲) = ۱۰۶/۲V$$

تلفات سیم‌پیچهای تحریک :

$$P_F = V_T I_F + R_S I_A^۲$$

$$= ۱۲۰ \times ۱/۲ + ۰/۲ \times ۱۳/۸^۲ = ۱۴۴ + ۳۸ = ۱۸۲ \ W$$

تلفات سیم‌پیچی آرمیچر :

$$P_A = R_A I_A^۲$$

$$P_A = ۰/۸ \times ۱۳/۸^۲ = ۱۵۲ \ W$$

توان ورودی :

$$P_۱ = V_T I_L = ۱۲۰ \times ۱۵ = ۱۸۰۰ \ W$$

$$\Delta P = P_F + P_A + P_{mech} + P_{Fe}$$

$$= ۱۸۲ + ۱۵۲ + ۱۵۰ = ۴۸۴ \ W$$

توان خروجی :

$$P_۲ = P_۱ - \Delta P = ۱۸۰۰ - ۴۸۴ = ۱۳۱۶ \ W$$

$$\eta = \frac{P_۲}{P_۱} \times ٪۱۰۰$$

$$= \frac{۱۳۱۶}{۱۸۰۰} \times ٪۱۰۰ = ٪۷۳/۱$$

توان الکترومغناطیسی

$$P_e = E_A I_A = ۱۰۶/۲ \times ۱۳/۸ = ۱۴۶۵/۵ \ W$$

گشتاور الکترو مغناطیسی

$$T = \frac{P_e}{\omega} = \frac{۱۴۶۵}{۱۴۰} = ۱۰/۴۶ \ N.m$$

گشتاور مفید :

$$T_u = \frac{P_۲}{\omega} = \frac{۱۳۱۶}{۱۴۰} = ۹/۴ \ N.m$$

مثال ۹ــ۴: یک موتور سری ۲۲۰ ولت، یک بار صنعتی به قدرت ۱۵ اسب بخار را با سرعت ۱۲۰۰ دور بر دقیقه به حرکت درمی‌آورد. اگر مقاومت اهمی آرمیچر و سیم‌پیچی تحریک این موتور مجموعاً ۰/۴ اهم و ضریب بهره آن در این نقطه کار ٪۸۷ باشند، جریان دریافتی از شبکه و نیز تلفات مسی موتور را محاسبه نمایید.

حل: هر اسب بخار معادل ۷۳۶ وات است :

$$P_۲ = ۱۵ \times ۷۳۶ = ۱۱۰۴۰ \ W$$

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{11040}{0/87} = 12690 \ W$$

$$I_L = I_A = \frac{P_1}{V_T} = \frac{12690}{220} = 57/7 \ A$$

$$P_{Cu} = (R_A + R_S) I_L^2 = 1330 \ W$$

مثال ۱۰ــ۴: یک موتور شنت ۲۵۰ ولت و ۸۴ آمپر با سرعت بی‌باری ۱۸۰۰R.P.M مفروض است. مقاومت اهمی مدار تحریک (شامل مقاومت متغیر R_{adj}) برابر ۱۸۴ اهم و مقاومت اهمی مدار آرمیچر (شامل سیم‌پیچهای قطب کمکی و زغالها) برابر ۸۲ میلی‌اهم می‌باشند. تلفات آهنی و مکانیکی این موتور مجموعاً ۱۳۰۰ وات فرض می‌شود. مطلوبست محاسبه کمیتهای زیر در نقطه کارنامی :

الف) سرعت ب) قدرت الکترومغناطیسی پ) قدرت خروجی

ت) گشتاور مفید ث) ضریب بهره

حل:

$$I_F = \frac{V_T}{R_F} = \frac{250}{184} = 1/36 \ A$$

$$I_A = I_L - I_F = 84 - 1/36 = 82/64 \ A$$

$$E_A = V_T - R_A I_A = 250 - 0/082(82/6) = 250 - 6/8$$

$$E_A = 243/2 \ V$$

الف) از مقایسه حالت بی‌باری با نقطه کارنامی از رابطه (۱۵ــ۴) داریم :

$$\frac{n}{n_0} = \frac{E_A}{E_{A0}} \qquad \frac{n}{1800} = \frac{243/2}{250}$$

$$n = \frac{243/2}{250} 1800 = 1751 \ R.P.M$$

ب)

$$P_e = E_A I_A = 243/2 \times 82/64 = 20098 \ W$$

پ) از نمودار توازن توان موتورهای DC شکل ۶۰ــ۲ داریم :

$$P_2 = P_e - (P_{Fe} + P_{mech}) = 20098 - 1300$$

$$P_2 = 18798 \ W$$

ت) گشتاور مفید را از رابطه (۵ــ۴) می‌توان بدست آورد :

$$T_u = \frac{P_2}{\omega} = \frac{18798 \times 60}{2\pi \times 1751} = 102/5 \ N.m$$

ث)

$$\%\eta = \frac{P_2}{P_1} \times ۱۰۰ \qquad P_1 = V_T I_L = ۲۵۰ \times ۸۴ = ۲۱ \ kW$$

$$\%\eta = \frac{۱۸۷۹۸}{۲۱۰۰۰} = \%۸۹/۵$$

۱۰ــ۴ــ پرسش

۱ــ چرا نمی‌توان یک موتور DC صنعتی را مستقیماً به شبکه برق شهر وصل نمود؟

۲ــ هنگام راه‌اندازی موتورهای جریان مستقیم رئوستای مدار آرمیچر و رئوستای مدار تحریک (در صورت موجود بودن) هرکدام در چه وضعیتی قرار می‌گیرند؟ چرا؟

۳ــ اگر در هنگام کار یک موتور DC برای چند لحظه برق قطع و وصل شود آیا در وصل مجدد برق، موتور بدون راه‌انداز و با جریان زیاد راه‌اندازی خواهد شد؟

۴ــ روشهای کنترل دور موتورهای DC را بررسی نمایید. برای کنترل دور موتور سری کدامیک از این روشها بیشتر قابل استفاده است؟

۵ــ هنگام کار موتورهای DC زیر، یکباره سیم‌پیچی تحریک قطع می‌شود در هر حالت رفتار ماشین چگونه خواهد بود؟

I) موتور تحریک مستقل　　II) موتور شنت

III) موتور سری بدون diverter　　IV) موتور سری با diverter

V) موتور کمپوند (قطع تحریک سری)　　VI) موتور کمپوند (قطع تحریک موازی)

۶ــ طرز کار سیستم (وارد ــ لئونارد) را مورد بررسی قرار دهید. به نظر شما چگونه می‌توان جهت گردش بار را در این روش تغییر داد. روی شکل نشان دهید.

۷ــ علت نیاز به روشهای ترمزی موتورهای الکتریکی را بیان نمایید.

۸ــ سه روش ترمزی (دینامیکی، با جریان مخالف و مولدی) را بطور کلی با هم مقایسه کنید.

۹ــ برای حرکت یک بالابر الکتریکی از موتور سری استفاده شده است، آیا هنگام ترمز این موتور می‌توان از روش مولّدی استفاده نمود؟ چرا؟

۱۱ــ۴ــ مسائل

۱ــ یک موتور الکتریکی با سرعت ۱۲۰۰ دور بر دقیقه، باری با گشتاور ۲۰ نیوتن متر را به‌حرکت در می‌آورد. قدرت خروجی این موتور چند کیلو وات است؟

۲ــ یک موتور جریان مستقیم ۵ اسب در سرعتهای زیر، باری را تغذیه می‌کند. در هر حالت

گشتاور مفید موتور را بدست آورید.

الف) ۱۰۰۰R.P.M ب) ۱۵۰۰R.P.M پ) ۱۸۰۰R.P.M

۳ــ یک آسانسور الکتریکی دارای گشتاور ثابت ۱۸۰ نیوتن‌متر است در حالتهای زیر قدرت موتور محرک آن را محاسبه کنید.

الف) سرعت موتور R.P.M ۷۵۰ باشد.

ب) سرعت موتور R.P.M ۵۰۰ باشد.

۴ــ یک موتور DC به شبکه ۲۵۰ ولتی متصل و بار مکانیکی ۲ کیلوواتی را تغذیه می‌کند. اگر بازده ماشین ۸۰٪ باشد، جریان دریافتی آن از شبکه چند آمپر است؟

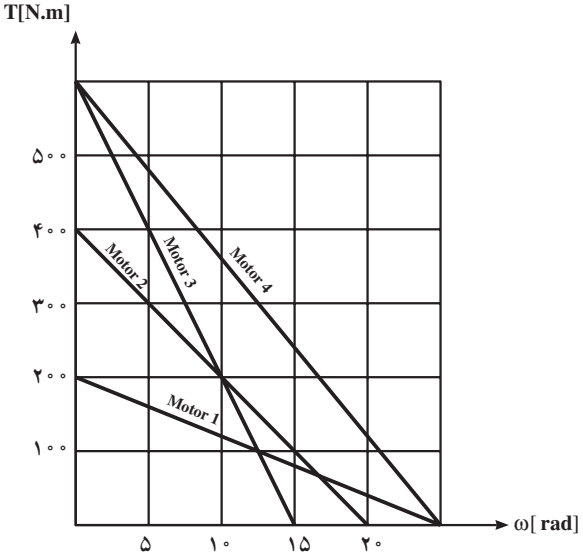
۵ــ مشخصه گشتاور ــ دور چهار موتور DC در شکل داده شده است :

الف) گشتاور راه‌اندازی موتور ۱ چقدر است؟

ب) موتور ۲ در بی‌باری چه سرعتی دارد؟

پ) برای تغذیه، باری با گشتاور ۱۵۰ نیوتن‌متر و سرعت ۱۲/۵ رادیان بر ثانیه، کدام موتور مناسبتر است؟

ت) کدام یک از موتورها دارای قدرت نامی ۱/۵ کیلووات و سرعت نامی ۵ رادیان بر ثانیه است؟



۶ــ یک موتور شنت ۱۱۰ ولت در بار نامی جریان ۴۰ آمپر را از شبکه جذب می‌نماید. مقاومت اهمی مدار آرمیچر ۰/۱۸ اهم و مدار تحریک مجموعاً دارای ۱۰۰ اهم مقاومت می‌باشند.

اگر سرعت این موتور در بی‌باری ۱۸۵۰ دور بر دقیقه باشد :

الف) سرعت موتور در بار کامل را بدست آورید.

ب) اگر با کاهش بار محور، جریان دریافتی از شبکه به ۲۰ آمپر کاهش یابد سرعت موتور چقدر خواهد شد؟

پ) درصد تنظیم سرعت در دو فرض (الف) و (ب) را محاسبه کنید.

۷ــ یک موتور کمپوند با شنت بلند ۱۲۰ ولت، ۴۱ آمپر و ۱۸۰۰ دور بر دقیقه در بار کامل مشغول کار است. مقاومت آرمیچر ۰/۳ اهم، مقاومت سیم‌پیچ تحریک سری ۰/۲ اهم و مقاومت مدار تحریک موازی ۱۲۰ اهم می‌باشند.

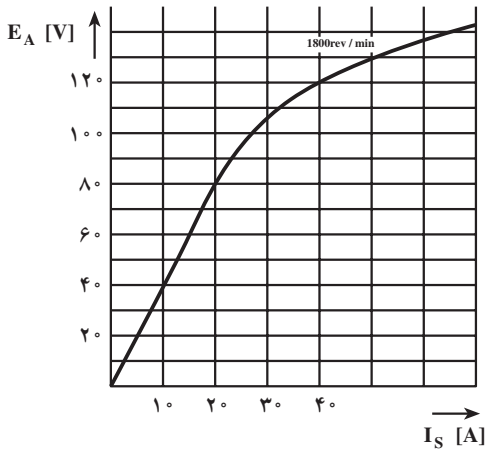
الف) تلفات مسی موتور در بار کامل را تعیین کنید.

ب) گشتاور و قدرت الکترومغناطیسی در بار کامل را بدست آورید.

۸ــ یک موتور سری ۲۴۰ ولت با مقاومت اهمی آرمیچر ۰/۳ اهم و مقاومت سیم‌پیچی تحریک ۰/۲۲ اهم در بار کامل ۵۸ آمپر جریان از شبکه دریافت نموده و با سرعت ۱۰۵۰ دور بر دقیقه بار را به حرکت در می‌آورد. منحنی مغناطیسی این موتور در شکل زیر داده شده و مجموع تلفات آهنی و مکانیکی آن ۸۸۰ وات فرض می‌شود. مطلوبست :

الف) ضریب بهره موتور در بار کامل

ب) سرعت موتور و ضریب بهره در جریان بار ۳۵ آمپر



فهرست منابع کتاب ماشینهای الکتریکی

1) Fachkunde Elektrotechnik, Europa Lehrmittel, 1990

2) Transformatoren und Elektrische Maschinen, Europa Lehrmittel, 1990

3) Electric Machinery Fundamentals, S. chapman, McGraw- Hill, 1985

4) Fundamentals of Electric Circuits D.A.Bell, Prentice/Hall, 1981

5) Electric Machines, G.R. Slemon A. Straughen, A. Wesley Publishing, 1980

6) Motors, Generators, Transformers and Energy, P. Emanuel, Printice/Hall, 1985

7) Electric Machines (V.I), M. Kosenko L. Piotrovsky, Mir Publisher, 1977

8) Electromagnetic and Electromechanical Machines, Leander W. Matsch, John - wiley, 1987

9) Electric Machinery, A. E. Fitzgerald, C. Kingsley S.D. Umans, McGraw-Hill, 1983

10) Electricity one - seven, Harry Mileaf, Hayden, 1966

۱۱) وسایل تبدیل انرژی الکتریکی ــ مکانیکی (جلد دوم)، کاظم انصاری، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۵۳

۱۲) ماشینهای الکتریکی مقدماتی، حسن کلهر، انتشارات دانشگاه شیراز، ۱۳۶۹.