

فصل چهارم

موتورهای جریان مستقیم

هدفهای رفتاری: پس از پایان این فصل از دانش آموز انتظار می‌رود که :

- ۱- حالت موتوری ماشینهای الکتریکی جریان مستقیم را بیان کند.
- ۲- مفهوم گشتاور در موتورهای الکتریکی را توضیح دهد.
- ۳- مشخصه‌های گشتاور - سرعت، گشتاور - جریان و سرعت - جریان موتورهای DC را رسم کند.
- ۴- مدار الکتریکی موتورهای جریان مستقیم را رسم کرده توضیح دهد.
- ۵- انواع تحریک موتورهای جریان مستقیم را نام ببرد.
- ۶- ویژگیهای کاری موتورهای شنت، سری و کمپوند را بررسی و آنها را به لحاظ کاربردی مقایسه نماید.
- ۷- ضرورت و روش‌های راه اندازی موتورهای جریان مستقیم را بیان کند.
- ۸- راه اندازهای دستی و اتوماتیک را بیان کند.
- ۹- امکانات کنترل دور موتورهای جریان مستقیم را توضیح دهد.
- ۱۰- چگونگی تغییر جهت گردش موتورهای جریان مستقیم را بیان کند.
- ۱۱- علت استفاده از ترمز در موتورهای الکتریکی را شرح دهد.
- ۱۲- روش‌های مختلف ترمز در موتورهای جریان مستقیم را نام ببرد.
- ۱۳- برای هریک از انواع موتورهای جریان مستقیم روش‌های کنترل دور و راه اندازی و ترمز را بیان کند.
- ۱۴- با استفاده از نمودار توازن توان مسائل بارداری و تلفات در موتورهای جریان مستقیم را حل کند.

موتورهای جریان مستقیم

۱-۴-۱ 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 (به صورت جریان مستقیم) تبدیل می‌کنند. در این فصل موتورهای الکتریکی مورد بحث قرار می‌گیرند که وظیفه آنها تبدیل انرژی الکتریکی (به صورت جریان مستقیم) به انرژی مکانیکی است. در شکل ۲-۶ 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 به حرکت درمی‌آورند.

موتورهای الکتریکی امکان دسترسی به انرژی مکانیکی در حالت‌های مختلف را با هزینه نسبتاً کم، طول عمر زیاد، بهره‌برداری ساده و کم سروصدای روش‌های متنوع و کارآمد کنترل، فراهم ساخته‌اند. در حال حاضر موتورهای الکتریکی از قدرتهای بسیار کوچک (چند میلی‌وات) برای استفاده در ابزار دقیق و مهندسی پژوهشکی 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 دهه آخر قرن نوزدهم با عملی شدن احداث شبکه‌های تولید و انتقال الکتریسیته، موتورهای الکتریکی به سرعت مطرح و مورد استفاده وسیع قرار گرفتند.

از آنجا که شبکه‌های اولیه غالباً جریان مستقیم بودند، ماشینهای الکتریکی هم از نوع جریان مستقیم بودند. ولی به تدریج که شبکه‌های جریان متناوب بکار گرفته شدند، طبیعتاً موتورهای جریان مستقیم هم جای خود را تا حدودی به موتورهای جریان متناوب دادند اماً 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 بر جسته که بعداً مورد بحث قرار خواهد گرفت عبارتند از:

I) امکان کنترل دور دقیق و وسیع

II) گشتاور راهاندازی بسیار خوب

البته باید در نظر 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 بینیم 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، «مотор الکتریکی جریان مستقیم» است.

۲-۴- 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 القابی (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 دوار آشنایی کافی داشته باشند، که در این بخش بطور فشرده مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۴-۱- مفهوم گشتاور در یک سیستم دوار: در درس فیزیک، حاصلضرب خارجی بردارهای نیرو و فاصله به عنوان گشتاور تعریف می‌شود:

$$\vec{T} = \vec{F} \times \vec{r} \quad [T] = \text{N.m} \quad (4-1)$$

\vec{T} : بردار گشتاور بر حسب نیوتون متر

\vec{F} : بردار نیرو بر حسب نیوتون

\vec{r} : بردار فاصله بر حسب متر

اگر امتداد فاصله و نیرو بر هم عمود باشند، رابطه بالا ساده شده به صورت اسکالار در می‌آید:

$$T = F \cdot r$$

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

$$T = \frac{P}{\omega} \quad [T] = \frac{W}{\frac{1}{S}} = W \cdot S = N \cdot m \quad (4-2)$$

P : قدرت مکانیکی محور دوار بر حسب وات

ω : سرعت زاویه‌ای محور دوار بر حسب رادیان بر ثانیه

T : گشتاور محور بر حسب نیوتن متر

و رابطه سرعت زاویه‌ای با دور نیز چنین است :

$$\omega = 2\pi n' \quad [\omega] = rad \times \frac{1}{S} = \frac{rad}{S} \quad (4-3)$$

ω : سرعت زاویه‌ای بر حسب رادیان بر ثانیه

n' : سرعت دوران بر حسب دور بر ثانیه (R.P.S)

معمولًاً دور موتورها بر حسب دور بر دقیقه داده می‌شود، که برای تبدیل آن به دور بر ثانیه لازم است عبارت بر 6° تقسیم گردد.

$$\omega = \frac{2\pi n}{6^\circ} \quad (4-4)$$

ω : سرعت زاویه‌ای بر حسب رادیان بر ثانیه

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

مثال ۴-۱: یک موتور الکتریکی، با سرعت 150° دور بر دقیقه می‌چرخد. سرعت زاویه‌ای آن چقدر است؟

$$\omega = \frac{2\pi n}{6^\circ} = \frac{2\pi \times 150^\circ}{6^\circ} = 50\pi \frac{rad}{S} \quad \text{حل:}$$

مثال ۴-۲: یک موتور دیزلی با سرعت 75° دور بر دقیقه قدرت مکانیکی 8° کیلووات را به بار منتقل می‌کند. گشتاور محور چقدر است؟

$$\omega = \frac{2\pi n}{6^\circ} = \frac{2\pi \times 75^\circ}{6^\circ} = 25\pi \frac{rad}{S} \quad \text{حل:}$$

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{8^\circ \times 1^\circ}{25\pi} = 1^\circ 18 / 6 N.m$$

تذکر: گاهی مقدار سرعت زاویه‌ای را بر حسب دور دقیقه در فرمول گشتاور (رابطه ۴-۲)

قرارداده، مستقیماً گشتاور را بر حسب سرعت دوران تعیین می کنند :

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{2\pi n}{60}} = \frac{60 \cdot P}{2\pi n} \quad (4-5)$$

مثال ۴-۳ : در یک اتومبیل هنگام راه اندازی قدرت مکانیکی چرخها چقدر است؟

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

گشتاور راه اندازی هر قدر هم بزرگ باشد، حاصل ضرب آن در صفر، برابر صفر می شود.

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

یعنی قدرت مکانیکی سیستمهای دوار در زمان راه اندازی صفر است.

۴-۲- گشتاور الکترو مغناطیسی و گشتاور مفید : در فصل دوم دیدیم که وجود تلفات در قسمتهای مختلف ماشین باعث می شود که قدرتهای ماشین در قسمتهای مختلف (وروپی، خروجی، فاصله هوایی) متفاوت باشند. بر این اساس در موتورهای DC دو نوع گشتاور قابل محاسبه است :

نسبت قدرت تبدیل یافته (قدرت الکترو مغناطیسی) به سرعت زاویه ای محور را گشتاور الکترو مغناطیسی می نامیم و آن را با T_u نمایش می دهیم :

$$T_u = \frac{P_e}{\omega} \quad (4-6)$$

در حالی که نسبت قدرت خروجی (قدرت مفید) به سرعت زاویه ای محور گشتاور مفید نامیده شود و با T_u مشخص می گردد.

$$T_u = \frac{P_2}{\omega} \quad (4-7)$$

با جایگزینی مقدار قدرت الکترو مغناطیسی از رابطه (۴-۶) در رابطه (۴-۴۲) خواهیم داشت :

$$T_u = \frac{E_A I_A}{\omega} \quad (4-8)$$

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

۴-۳- مشخصه های موتور جریان مستقیم

ارتباط کمیتهای مورد اشاره در بخش (۴-۲) در موتورهای مختلف یکسان نیست. چگونگی



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

معمولًاً 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 هر کدام معین می‌شود.

۱-۴-۳-مشخصه الکترومغناطیسی: این مشخصه تابع تغییرات گشتاور موتور، بر حسب جریان آرمیچر آن را بیان می‌کند:

$$T = f(I_A) \quad (4-9)$$

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 ۲-۲۸) 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.

۱-۴-۴-مشخصه الکترومکانیکی: این مشخصه تابع تغییرات دور موتور بر حسب جریان آرمیچر آن را معلوم می‌دارد:

$$n = f(I_A) \quad (4-10)$$

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 (۲-۱۹) منجر به تغییرات دور می‌گردد. چگونگی تغییرات فوران نیز متناسب با نوع تحریک موتور خواهد بود.

۱-۴-۵-مشخصه گشتاور-دور: با حذف جریان آرمیچر در مشخصه‌های الکترومکانیکی و الکترومغناطیسی رابطه مستقیمی بین گشتاور و دور به دست می‌آید که آن را مشخصه گشتاور-دور می‌نامیم:

$$n = f(T) \quad (4-11\text{-(الف)})$$

در این سه مشخصه مورد اشاره در روابط (۴-۹) تا (۴-۱۱) مهمترین آنها مشخصه گشتاور-دور است که تا حدود زیادی ویژگیهای کاری یک موتور DC را معرفی می‌کند و آن را بر حسب سرعت زاویه‌ای نیز تعریف می‌کنند.

$$\omega = f(T) \quad (4-11\text{-(ب)})$$

همچنین در یک موتور الکتریکی چگونگی تغییرات سرعت در بارهای مختلف را با کمیتی به نام «درصد تنظیم سرعت» نیز بیان می‌کند و آن را با $SR\%$ ^۱ نمایش می‌دهند:

$$SR\% = \frac{n_e - n}{n} \times 100 \quad (2-4-پ)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} n_e : سرعت موتور در بی‌باری \\ n : سرعت موتور در بار موردنظر \\ SR\% : درصد تنظیم سرعت \end{array} \right.$$

هر دو بر حسب یک واحد

این کمیت تقریباً مشابه درصد تنظیم ولتاژ در مولدهای DC (مطابق رابطه ۳-۱۲) می‌باشد و همانند آن، هرقدر کمتر باشد قابل قبول تر است.

مثال ۴-۴: سرعت بی‌باری یک موتور DC برابر 1600 RPM و سرعت بار کامل آن 1350 RPM می‌باشد. درصد تنظیم سرعت را بدست آورید:

$$SR\% = \frac{n_e - n}{n} \times 100 = \frac{1600 - 1350}{1350} \times 100 = 18.5\% \quad \text{حل:}$$

۴-۴-۱- 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 ۴-۹ تا ۴-۱۱) 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.

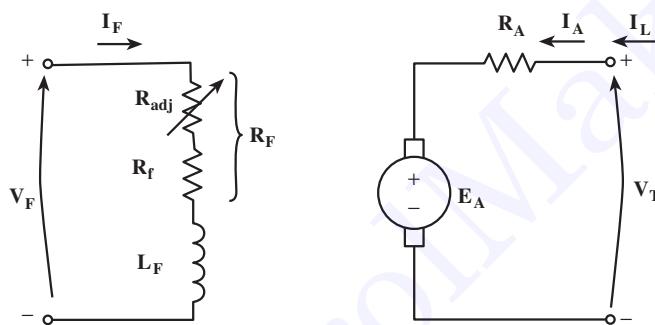
$$\text{رابطه نیروی محرکه القایی} \quad E_A = K\phi\omega \quad (2-19)$$

$$\text{رابطه گشتاور} \quad T = K\phi I_A \quad (2-28)$$

۴-۴-۲- موتور تحریک مستقل و موتور شنت: در موتور تحریک مستقل سیم‌ییچی تحریک و سیم‌ییچی آرمیچر جداگانه به دو منبع جدا از هم وصل می‌شوند در حالی که در موتور شنت

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 عکس العمل آرمیچر و با توجه به مدار معادل شکل ۱-۴ بین کمیتهای موتور تحریک مستقل این روابط برقرار است:

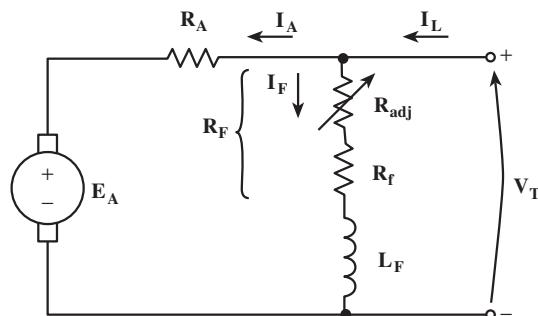
$$\left. \begin{array}{l} I_F = \frac{V_F}{R_F} \\ V_T = E_A + I_A R_A \\ I_L = I_A \end{array} \right\} \begin{array}{l} (\text{الف}) \\ (\text{ب}) \\ (\text{پ}) \end{array} \quad (4-12)$$



شکل ۱-۴—مدار معادل موتور تحریک مستقل

برای موتور شنت نیز روابط (۴-۱۳) برقرار است (مطابق شکل ۲-۴).

$$\left. \begin{array}{l} I_F = \frac{V_T}{R_F} \\ V_T = E_A + R_A I_A \\ I_L = I_A + I_F \end{array} \right\} \begin{array}{l} (\text{الف}) \\ (\text{ب}) \\ (\text{پ}) \end{array} \quad (4-13)$$



شکل ۲-۴—مدار معادل موتور شنت

روابط (۴-۱۲) و (۴-۱۳) با صرفنظر از عکس العمل آرمیچر برقرار هستند. برای یافتن تابع گشتاور - دور موتور تحریک مستقل و موتور شنت در رابطه (۴-۱۲) و (۴-۱۳) که مشابهند بجای I_A از رابطه (۲-۲۸) و بجای I_A از رابطه (۱۹-۲) جایگزین می‌کنیم.

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

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

$$\omega = \frac{V_T}{K\phi} - \frac{R_A}{(K\phi)^2} T \quad (4-14)$$

V_T : ولتاژ ترمینال ماشین

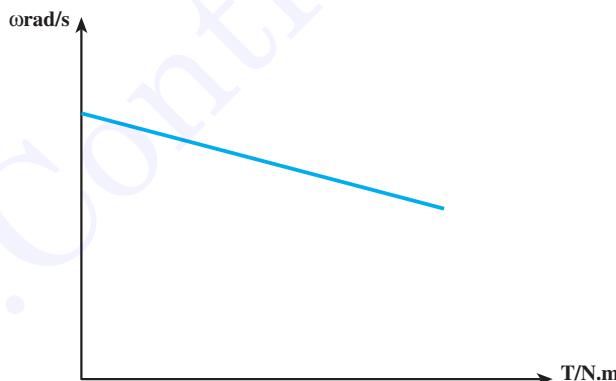
K : ضریب ثابت ماشین

R_A : مقاومت اهمی سیم پیچی آرمیچر

ω : سرعت زاویه‌ای حرکت رотор بر حسب رادیان بر ثانیه

T : گشتاور الکترومغناطیسی بر حسب نیوتن متر

رابطه (۴-۱۴) ارتباط سرعت زاویه‌ای (ω) و گشتاور (T) را بیان می‌کند که اگر آن را رسم کنیم نمودار آن خطی یا شبیه منفی خواهد بود (مطابق شکل ۴-۳).



شکل ۴-۳ - مشخصه گشتاور - دور موتور تحریک مستقل و موتور شنت

دقت در نمودار شکل ۴-۳ 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 مدّظر قرار گیرند:

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

(۲-۲۸) یکی از کمیتهای جریان آرمیچر (I_A) یا جریان تحریک (I_F) و یا هر دو به گونه‌ای 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 ۱-۴ یا ۲-۴) 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 محرور، مقدار نیروی محرکه القایی (E_A) مطابق رابطه (۲-۱۹) کم شده بر مبنای رابطه (۴-۱۲-ب) یا (۴-۱۳-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 (۲-۱۹) نسبت ولتاژ القایی آرمیچر و سرعت را بطور کلی به دست آورد. یعنی اگر موتور در نقطه کار اول (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 :

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

$$\boxed{\frac{E_{A1}}{E_{A2}} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2}} \quad (4-15)$$

از آنجا که رابطه (۴-۱۵) از رابطه اساسی (۲-۱۹) بدست آمده برای سایر موتورهای DC (سری و کمپوند) نیز برقرار است.

مثال ۵-۴: یک موتور DC شنت 25° ولت و با سرعت 1200 دور بر دقیقه (در حالت بی‌باری) و دارای سیم پیچی جبرانگر و قطب کمکی، مفروض است.

مقاومت اهمی مؤثر مدار آرمیچر (شامل مقاومت آرمیچر، سیم پیچی جبرانگر و سیم پیچی قطب کمکی) برابر $6/0$ اهم و مقاومت اهمی مؤثر مدار تحریک (شامل سیم پیچی تحریک شنت و مقاومت متغیر R_{adj}) برابر 5 اهم می‌باشند. در حالت‌های زیر سرعت موتور را محاسبه کنید :

الف) جریان دریافتی موتور از شبکه 100 آمپر باشد.

ب) جریان دریافتی موتور از شبکه 200 آمپر باشد.

حل: به دلیل وجود قطب کمکی و سیم پیچی جبرانگر عکس العمل آرمیچر قابل صرفنظر و رابطه (۴-۱۳-ب) و رابطه (۴-۱۵) برقرار هستند:

$$\frac{E_{A1}}{E_{A2}} = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{الف) از رابطه (۴-۱۵) داریم:}$$

$$I_A = I_L - I_F \quad \text{و مطابق روابط (۴-۱۳-ب):}$$

$$I_F = \frac{V_T}{R_F} \quad I_F = \frac{25}{5} = 5A$$

$$I_A = 100 - 5 = 95A$$

$$E_A = V_T - R_A I_A = 250 - (95 \times 0.06) = 244 / 3V$$

با توجه به ناچیز بودن جریان آرمیچر در بی باری می توان نیروی محرکه القایی را در بی باری برابر ولتاژ ترمینال فرض کرد، پس:

$$\frac{E_{A2}}{E_{A1}} = \frac{n_2}{n_1} \quad \frac{25}{244/3} = \frac{120}{n_1}$$

$$n_1 = \frac{244/3}{25} \times 120 = 1173R.P.M.$$

ب) مجدداً مانند فرض (الف) عمل می کنیم:

$$I_A = 200 - 5 = 195A$$

$$E_{A2} = 250 - (195 \times 0.06) = 238 / 3V$$

$$\frac{E_{A2}}{E_{A1}} = \frac{n_2}{n_1} \quad \frac{25}{238/3} = \frac{120}{n_1}$$

$$n_2 = \frac{238/3}{25} \times 120 = 1144R.P.M.$$

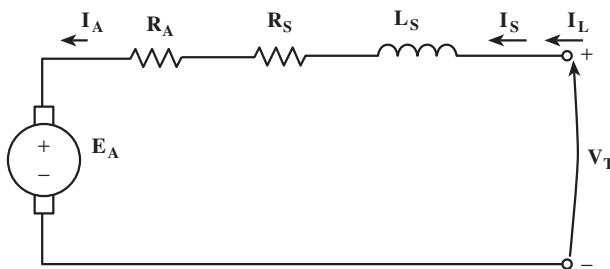
۴-۲-۴-۲ موتور سری: در موتورهای سری، سیم پیچی تحریک با آرمیچر سری می شود.

بدیهی است که این سیم پیچی جدا از سیم پیچی تحریک شنت است هر چند هر دو سیم پیچی روی قطب اصلی قرار می گیرند).

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

$$\left. \begin{array}{l} I_A = I_S = I_L \\ V_T = E_A + I_A (R_A + R_S) \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} (\text{الف}) \\ (\text{ب}) \end{array} \quad (4-16)$$

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



شکل ۴-۴- 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 ۴-۲۸)، در موتور شنت که جریان تحریک جدا از جریان آرمیچر بود تغییرات بار در درجه اوّل روی جریان آرمیچر تأثیر می‌گذشت. یعنی در حالت کار عادی و بدون تغییر رُوستای 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 اشعاع نشده باشد با تقریب خوب می‌توان نوشت:

$$\phi = K_1 I_A = K_1 I_L \quad (4-17)$$

$I_L = I_A$: جریان موتور سری بر حسب آمپر

ϕ : فوران یکی از قطبها اصلی موتور بر حسب ویر

K_1 : ضریب ثابت ماشین بر حسب ویر بر آمپر (یا اهم ثانیه)

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

$$T = K\phi I_A = K(K_1 I_A) I_A = K K_1 I_A^2 = K_S I_A^2 \quad (4-18)$$

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

K_S : ضریب ثابت موتور سری بر حسب ویر بر آمپر

I_A : جریان موتور سری بر حسب آمپر

T : گشتاور موتور سری بر حسب نیوتن متر

رابطه (۴-۱۸) نشان می‌دهد که در موتور سری گشتاور متناسب مجدول 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 — دور موتور سری: همچنان فرض می‌کنیم که موتور وارد ناحیه اشباع نشده و رابطه (۴-۱۷) برقرار است (توجه شود که اگر هسته وارد ناحیه اشباع شود رابطه خطی (۴-۱۷) دیگر صدق نمی‌کند). حال اگر I_A را از رابطه (۴-۱۸) استخراج کرده و آن را در رابطه (۴-۱۶) قرار دهیم و نیز به جای 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 در رابطه (۴-۱۶-ب) مقدار I_A را جایگزین می‌کنیم.

$$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S) = K\phi\omega + \sqrt{\frac{T}{K_S}}(R_A + R_S) \quad (4-19)$$

مجددأً مقادیر جریان و فوران موتور سری را به ترتیب از روابط (۴-۱۷) و (۴-۱۸) بکار می‌بریم :

$$\left. \begin{array}{l} \phi = K_1 I_A \Rightarrow I_A = \frac{\phi}{K_1} \\ T = K K_1 I_A^2 = K K_1 \left(\frac{\phi}{K_1}\right)^2 = \frac{K}{K_1} \phi^2 \\ \phi = \sqrt{\frac{K_1}{K}} T = \sqrt{\frac{K_1}{K}} \sqrt{T} \end{array} \right\} \quad (4-20)$$

این بار مقادیر جریان (I_A) و فوران (ϕ) موتور سری را از روابط (۴-۲۰-پ) و (۴-۲۰-الف) در رابطه (۴-۱۹) قرار می‌دهیم :

$$V_T = K \sqrt{\frac{K_1}{K}} \sqrt{T} \omega + \sqrt{\frac{T}{K K_1}} (R_A + R_S) \quad (4-21)$$

با مرتب کردن رابطه (۴-۲۱) خواهیم داشت :

$$\sqrt{K K_1} \sqrt{T} \omega = V_T - \frac{R_A + R_S}{\sqrt{K K_1}} \sqrt{T}$$

اگر رابطه اخیر را بر حسب ω بنویسیم رابطه گشتاور – دو موتور سری بدست می آید:

$$\omega = \frac{V_T}{\sqrt{KK_1}} \frac{1}{\sqrt{T}} - \frac{R_A + R_S}{KK_1} \quad (4-22)$$

V_T : ولتاژ ترمینالها بر حسب ولت

K_1 و K : ضرایب ثابت ماشین

R_A : مقاومت سیم پیچی آرمیچر بر حسب اهم

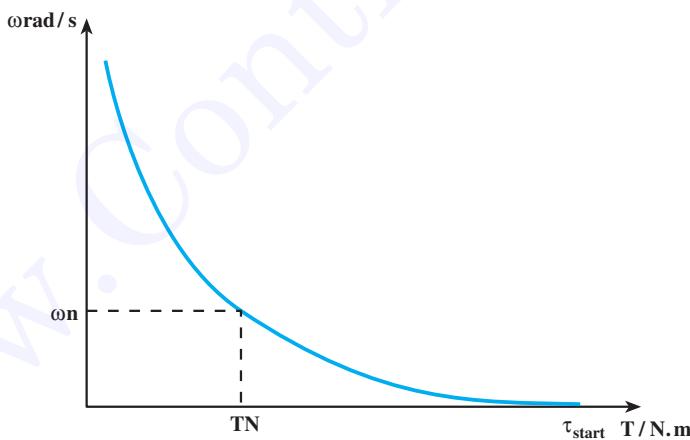
R_S : مقاومت سیم پیچی تحریک سری بر حسب اهم

T : گشتاور الکترومغناطیسی بر حسب نیوتون متر

ω : سرعت زاویه‌ای حرکت رotor بر حسب رادیان بر ثانیه

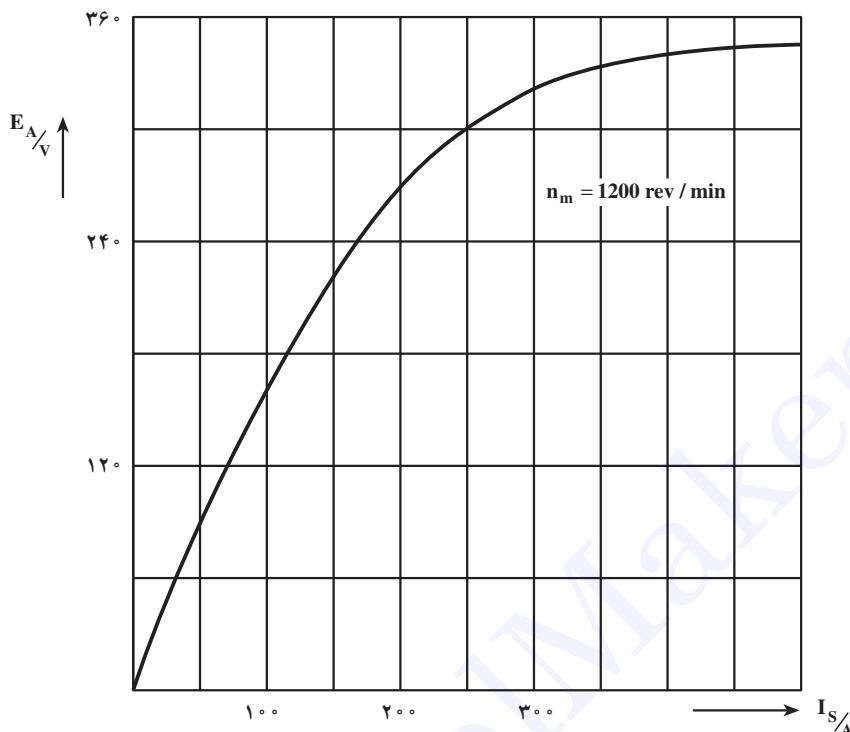
در شکل ۴-۵ مشخصه گشتاور – دور یک موتور سری و نقطه کار نامی موتور نشان داده شده است. این مشخصه نشان می دهد که گشتاور راه اندازی موتور سری بسیار بزرگ و در عوض در بارهای کم و بی باری دور موتور بسیار زیاد می شود.

پس موتور سری برای بارهای با گشتاور راه اندازی زیاد (مانند وسایل حمل و نقل و بالابرها) بر قی بسیار مناسب است. اما به هیچ وجه نباید موتور سری بی بار شود چرا که در این صورت دور آن بسیار زیاد شده قسمتهای گردنه ماشین آسیب خواهند دید.



شکل ۴-۵_مشخصه گشتاور – دور موتور سری

مثال ۶-۴: یک موتور سری 25° ولت دارای مقاومت آرمیچر 5 میلی اهم و مقاومت سیم پیچی 3 میلی اهم و مشخصه مغناطیسی آن به ازای دور 120° R.P.M در شکل ۶-۶ نشان داده



شکل ۴-۶ - مشخصه مغناطیسی موتور مثال ۶-۴

شده است:

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

حل: در هر حالت ابتدا از رابطه (۴-۱۶-ب) مقدار ولتاژ القایی (E_A) را یافته و سپس به کمک مشخصه مغناطیسی داده شده و رابطه (۴-۱۵) مقدار دور موتور مشخص می‌گردد. ونهایتاً از رابطه (۴-۸) مقدار گشتاور الکترومغناطیسی بدست می‌آید.

$$E_A = V_T - I_A(R_A + R_S) \quad (4-16\text{-}b)$$

$$\frac{E_{A1}}{E_{A2}} = \frac{n_1}{n_2} \quad (4-15)$$

$$T = \frac{E_A I_A}{\omega} \quad (4-8)$$

$$E_{A1} = 250 - 50(0.05 + 0.03) = 246V \quad \text{الف) به ازای جریان } 50 \text{ آمپر:}$$

با مراجعه به مشخصه مغناطیسی داریم:

$$I_A = I_F = 5 \text{ A} \Rightarrow E_{A\circ} = 120 \text{ V}$$

$$\frac{E_{A\circ}}{E_{A1}} = \frac{n_1}{n_1} \Rightarrow \frac{120}{246} = \frac{1200}{n_1}$$

$$n_1 = \frac{246}{120} \times 1200 = 3690 \text{ R.P.M}$$

$$T_1 = \frac{E_A I_A}{\omega} = \frac{246 \times 5}{3690(2\pi/60)} = 31/8 \text{ N.m.}$$

ب) به ازای جریان ۱۰۰ آمپر:

$$E_{A2} = 250 - 100(0.05 + 0.03) = 242 \text{ V}$$

با مراجعه به مشخصه مغناطیسی داریم:

$$I_A = I_F = 10 \text{ A} \Rightarrow E_{A\circ} = 156 \text{ V}$$

$$\frac{E_{A\circ}}{E_{A2}} = \frac{n_2}{n_2} \Rightarrow \frac{156}{242} = \frac{1200}{n_2}$$

$$n_2 = \frac{242}{156} \times 1200 = 1862 \text{ R.P.M}$$

$$T_2 = \frac{156 \times 10}{1862(2\pi/60)} = 124/1 \text{ N.m.}$$

ب) به ازای جریان ۳۰۰ آمپر:

$$E_{A3} = 250 - 300(0.05 + 0.03) = 226 \text{ V}$$

با مراجعه به مشخصه مغناطیسی داریم:

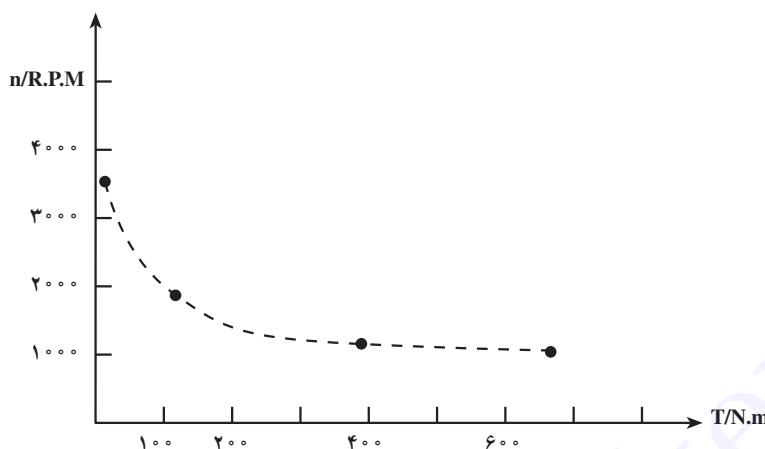
$$I_A = I_F = 30 \text{ A} \Rightarrow E_{A\circ} = 315 \text{ V}$$

$$\frac{E_{A\circ}}{E_{A3}} = \frac{n_3}{n_3} \Rightarrow \frac{315}{226} = \frac{1200}{n_3}$$

$$n_3 = \frac{226}{282} \times 1200 = 860/9 \text{ R.P.M}$$

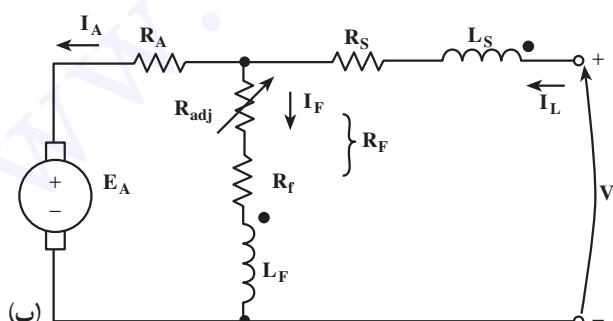
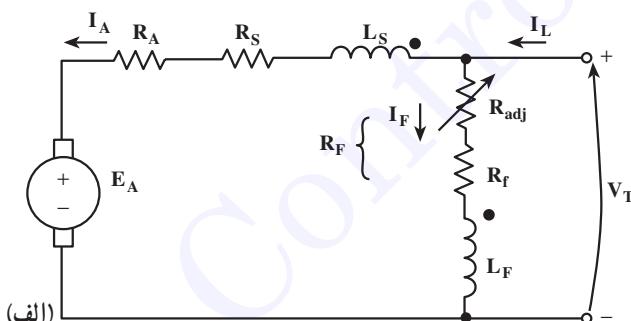
$$T_3 = \frac{226 \times 30}{860/9(2\pi/60)} = 752 \text{ N.m.}$$

ت) برای رسم مشخصه تقریبی گشتاور - دور این موتور مقادیر سه نقطه کار بدست آمده را مشابه شکل ۴-۵ رسم می کنیم و شکل تقریبی ۴-۷ حاصل می گردد.



شکل ۷-۴-۵ - مشخصه تقریبی گشتاور - دور موتور مثال ۴-۵

۴-۴-۳ - 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.

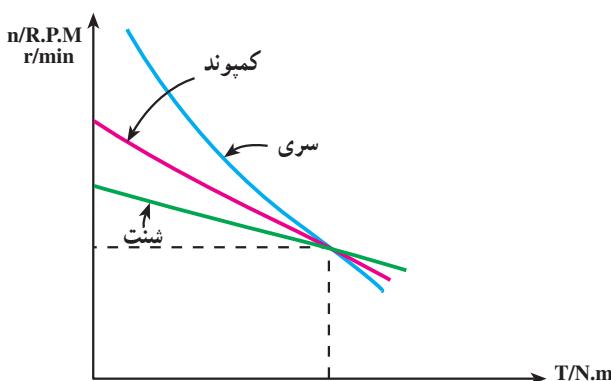


شکل ۷-۴-۸ - مدار معادل موتور مختلط (کمپوند)

(الف) با انشعاب بلند (ب) با انشعاب کوتاه

در بخش‌های بعدی ۴-۶ و ۴-۷) 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 به طور 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 ۴-۹ مشخصه های گشتاور - دور سه موتور مشابه شنت، سری و کمپوند

و تغییرات دور آن نیز در زیر بار، حد وسطی بین موتور شنت و موتور سری می باشد. همچنین موتور کمپوند مانند موتور شنت تحمل بی باری را دارد. به این ترتیب مشخصه گشتاور - دور موتور کمپوند مطابق شکل ۴-۹ بین مشخصه های سری و شنت قرار می گیرد.

همان طور که در بخش ۳-۲ در مورد مولدهای کمپوند اشاره شد رفتار ماشینهای کمپوند با شنت بلند و کوتاه تقریباً مشابه ولذا مطابق شکل ۴-۸ بین کمیتهای الکتریکی موتور کمپوند این روابط برقرار است :

$$\left. \begin{array}{l} I_F = \frac{V_T}{R_F} \\ V_T = E_A + I_A(R_A + R_S) \\ I_L = I_A + I_F \end{array} \right\} \quad (4-23)$$

برای تحلیل رفتار موتور کمپوند، باید توجه داشت که در بارهای کم و بی باری که جریان زیادی از آرمیچر و سیم پیچی تحریک سری نمی گذرد. اثر سیم پیچی تحریک سری در میدان مغناطیسی ماشین کم است و ایجاد میدان مغناطیسی عمده تو سیم پیچی تحریک شنت انجام می پذیرد. 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 تو سیم پیچی سری ایجاد می گردد و بتدریج با افزایش بار، موتور کمپوند خواصی شبیه به موتور سری پیدا می کند.

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.

۴-۵- پرسش

- ۱- ویژگیهای اصلی موتورهای جریان مستقیم را نام ببرید.
- ۲- کمیتهای اصلی یک موتور DC کدامند؟
- ۳- مفهوم گشتاور در یک موتور الکتریکی چیست؟ روی فرمول بحث شود.
- ۴- گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور مغناطیسی یک موتور جریان مستقیم چه تفاوتی با هم دارند؟ کدامیک بیشتر است؟
- ۵- روابط اساسی ماشینهای الکتریکی DC را مورد بررسی قرار دهد.
- ۶- چرا مشخصه گشتاور دور موتورهای DC مهمتر از سایر مشخصه‌های آنهاست؟
- ۷- منظور از نوع تحریک موتور جریان مستقیم چیست؟
- ۸- موتورهای سری و شنت را با هم مقایسه و چند نمونه از کاربردهای هریک را مشخص نمایید.
- ۹- آیا «قطبهای کمکی» و «سیم پیچهای جبران‌کننده» در موتورهای DC هم کاربرد دارند؟ چرا؟
- ۱۰- اگر روی محور یک موتور کمپوند، باری بیش از حد مجاز آن قرار گیرد چه اتفاقی می‌افتد؟
- ۱۱- مشخصه گشتاور - دور موتورهای شنت، سری و کمپوند را روی یک صفحه مختصاترسم کنید.

۶-۴- 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 ۴-۱۳- ب برای موتورهای تحریک مستقل، شنت و رابطه ۴-۱۶- ب برای موتورهای سری و کمپوند) بجای نیروی محرکه القایی در لحظه راهاندازی (E_{AS}) صفر را قرار دهیم، خواهیم داشت :

$$V_T = E_A + R_A I_A \quad E_A = E_{AS} = 0 \Rightarrow I_{AS} = \frac{V_T}{R_A} \quad (4-24)$$

رابطه (۴-۲۴) جریان راهاندازی آرمیچر موتور شنت و تحریک مستقل را نتیجه می‌دهد و برای موتور سری و کمپوند طبق رابطه (۴-۲۵) جریان راهاندازی (I_{AS}) بدست می‌آید.

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

$$E_A = 0 \Rightarrow I_{AS} = \frac{V_T}{R_A + R_S} \quad (4-25)$$

از آنجاکه در موتورهای صنعتی R_A و R_S مقدار کوچکی دارند، مقدار جریان راهاندازی می‌تواند تا حوالی ده برابر جریان نامی (و حتی 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 سیم پیچی 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 محرکه 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.

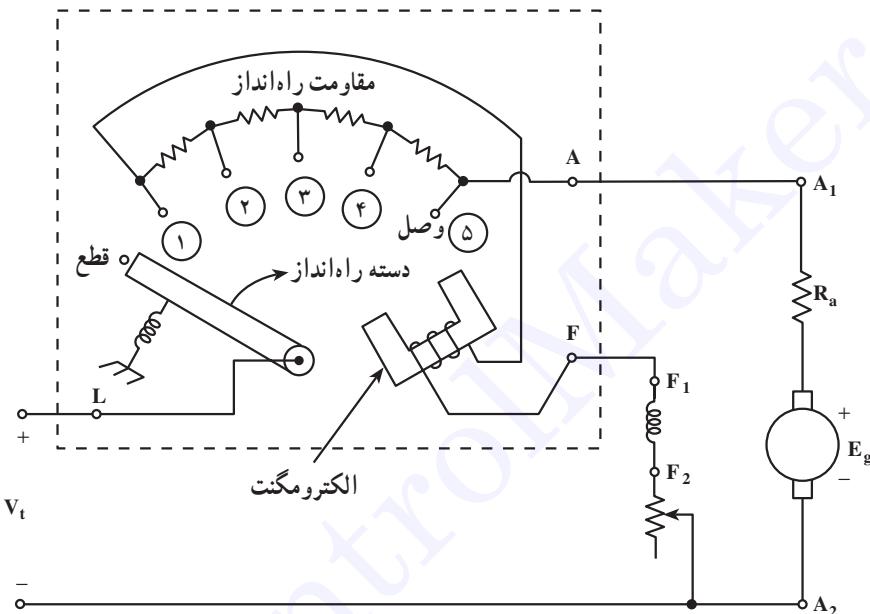
این مقاومتهای متغیر در ابتدای راهاندازی بطور کامل با آرمیچر سری شده، جریان راهاندازی را محدود می‌کنند. مقدار این مقاومتها عملاً طوری انتخاب می‌شوند که جریان راهاندازی از حدود ۲ برابر جریان نامی بیشتر نشود. سپس با افزایش دور ماشین که نیروی محرکه E_A افزایش می‌یابد این مقاومت به ترتیج از مدار خارج می‌گردد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

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

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.

۱۰-۴-۶- راهاندازهای دستی موتورهای جریان مستقیم: شکل ۱۰-۴ یک نمونه از راهاندازهای دستی موتور DC را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰-۴- 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 نشان داده شده در شکل ۱۰-۴) 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 (۱۰-۴) که دارای ۵ مرحله^۱ است در مرحله پنجم مقاومت راهانداز کاملاً از مدار خارج شده است. در این مرحله که دور موتور در حدود دور نامی است نیروی محركه القایی E_A تا حدی افزایش یافته و جریان آرمیچر در حدود جریان نامی محدود می‌گردد و

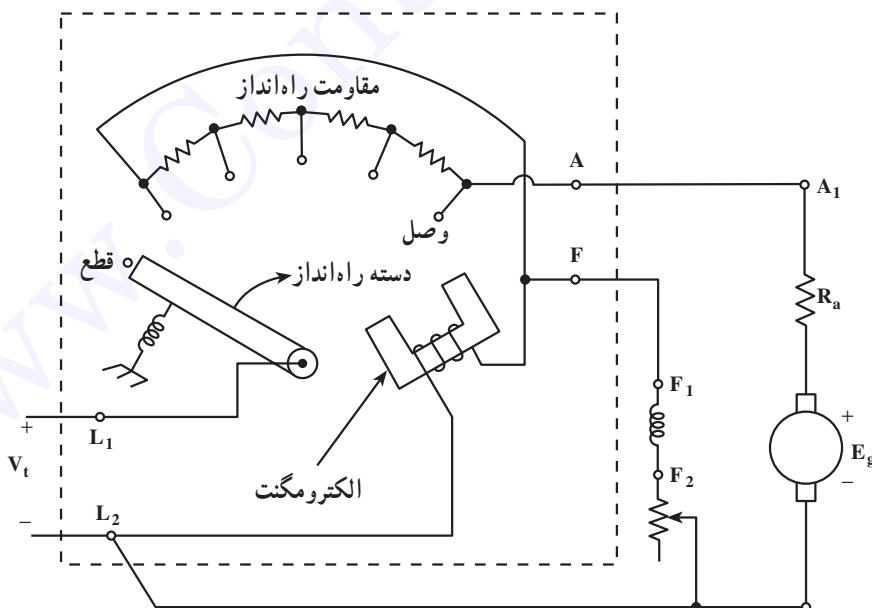
نیازی به مقاومت راه انداز نخواهد بود.

در مرحله آخر دسته راهانداز به واسطه خاصیت مغناطیسی یک هسته آهنی که بر روی آن یک سیم پیچی (سری شده با سیم پیچی تحریک موتور) قرار دارد، قفل شده مانع از برگشت دسته راهانداز به وضعیت اولیه 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 ۱-۴) شده دسته راه انداز، به وسیله فنری که بر روی شکل نشان داده شده است به حالت اولیه قطع پرگردید.

(II) قطع جریان تحریک (به هر علت) باعث از بین رفتن خاصیت مغناطیسی هسته U شکل شده، با برگشت راه انداز به حالت اولیه قطع مدار آرمیچر هم از شبکه جدا خواهد شد. این خاصیت در واقع حفاظت موتور در برابر قطع تحریک (افزايش شدید دور) است، اما از سویی نمی توان دور این موتور را خیلی افزایش داد زیرا برای این کار باید جریان تحریک خیلی کم شود که ممکن است موجب رهاسشدن دسته راه انداز (قطع موتور از شبکه) گردد.

پس راه اندازی سه نقطه ای برای موتورهای با تنظیم دور وسیع و نیاز به دورهای زیاد مناسب نیست. روش دیگر راه اندازی دستی موتور DC بکارگیری راه انداز چهار نقطه ای مطابق شکل ۱۱-۴ است که دارای ۴ ترمینال L_1 ، A ، L_2 و F می باشد.



شکل ۱۱-۴- راه انداز ۴ نقطه ای موتور DC

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

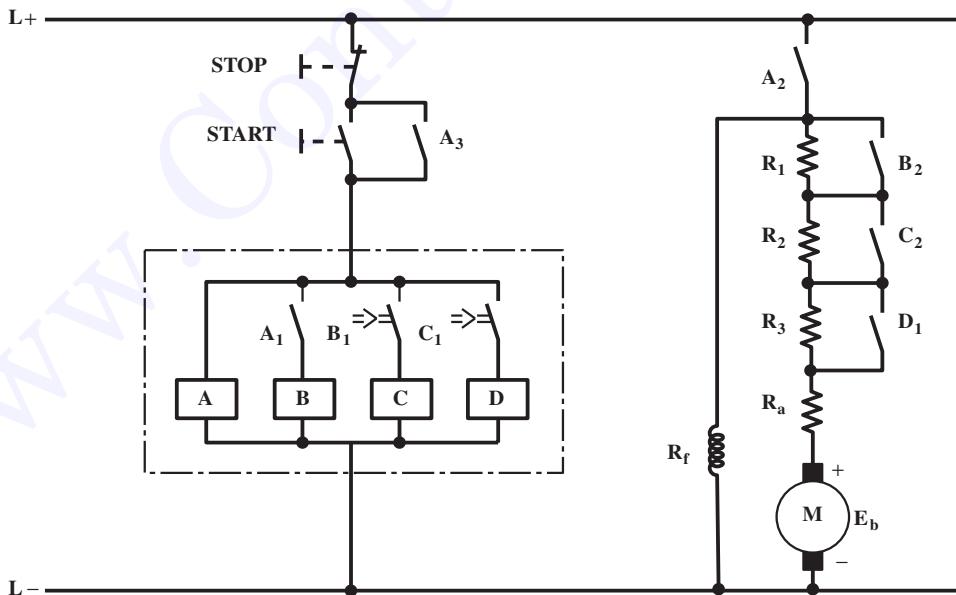
در این نوع راهاندازی امکان افزایش دور در محدوده وسیعتری وجود دارد. اما قطع مدار تحریک موجب قطع راهانداز نخواهد شد و برای حفاظت موتور در برابر قطع تحریک و افزایش دور باید یک کلید تابع دور در مدار اصلی موتور پیش‌بینی شده باشد.

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

۲-۴-۶- 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 مرحله اول تا مرحله آخر کلید راهانداز) بسیار حساس است و کمی عجله با 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 ۱۲-۴ 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 به کار افتاده پس از تأخیر مشخصی (مثلاً



شکل ۱۲-۴- 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 بر عکس 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 حداقل جریان تحریک مجاز راه می‌اندازند، زیرا طبق رابطه اساسی (۲-۲۸) گشتاور تولیدی علاوه بر جریان آرمیچر با فوران قطب که آن هم تابع جریان تحریک می‌باشد مناسب است.

بنابراین در موتورهای تحریک مستقل، شنت و کمپوند مقاومت متغیر مدار تحریک (R_{adj}) در شکل‌های ۱-۴ و ۴-۸ در حداقل مقدار مجاز خود قرار می‌گیرد، در حالی که رئوستای راهانداز مدار آرمیچر حداقل است.

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

۷-۴- 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 (۲-۱۹) را بر حسب دور بنویسیم داریم:

$$E_A = K\phi\omega \Rightarrow \omega = \frac{E_A}{K\phi} \quad (4-26)$$

رابطه (۴-۲۶) برای موتور تحریک مستقل و شنت چنین نوشته می‌شود :

$$\omega = \frac{V_T - R_A I_A}{K\phi} \quad (4-27)$$

و برای موتورهای سری و کمپوند داریم :

$$\omega = \frac{V_T - (R_A + R_S)I_A}{K\phi} \quad (4-27)$$

روابط (۴-۲۶) و (۴-۲۷) 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

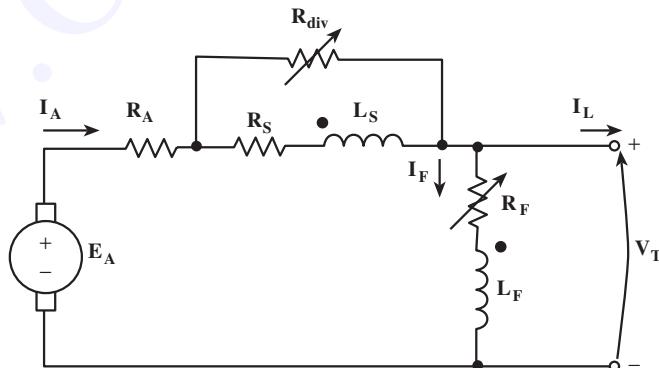
روشهای I و II عملأً رایج بوده از روش III استفاده چندانی نمی‌شود.

۴-۷-۱ کنترل سرعت موتور DC از طریق تغییر مقدار فوران : مطابق روابط (۴-۲۶)

و (۴-۲۷) 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 ۱-۴ و ۴-۸ به سادگی امکان پذیر است و با توجه به این که جریان تحریک عموماً بسیار کوچکتر از جریان آرمیچر است مقاومت متغیر مدار تحریک نسبتاً کوچک و ظرف و کنترل دور از این روش به سادگی و با دقت زیاد امکان پذیر است.

اما در موتور سری که مدار مستقلی برای سیم پیچی تحریک وجود ندارد و نیز در رابطه با سیم پیچ سری موتورهای کمپوند برای تغییر فوران عملأً یک مقاومت متغیر نسبتاً پرقدرت (R_{div}) در شکل ۱۳-۴) با سیم پیچی تحریک، موازی می‌گردد.



شکل ۱۳-۴- کنترل جریان تحریک موتور سری

۱-Diverter

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

با کاهش فوران مطابق رابطه اساسی (۲-۱۹) مقدار ولتاژ القایی E_A کاهش می یابد و از آنجا که مطابق روابط (۴-۱۲-ب، ۴-۱۳-ب، ۴-۱۶-ب و ۴-۲۳-ب) بدليل 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.

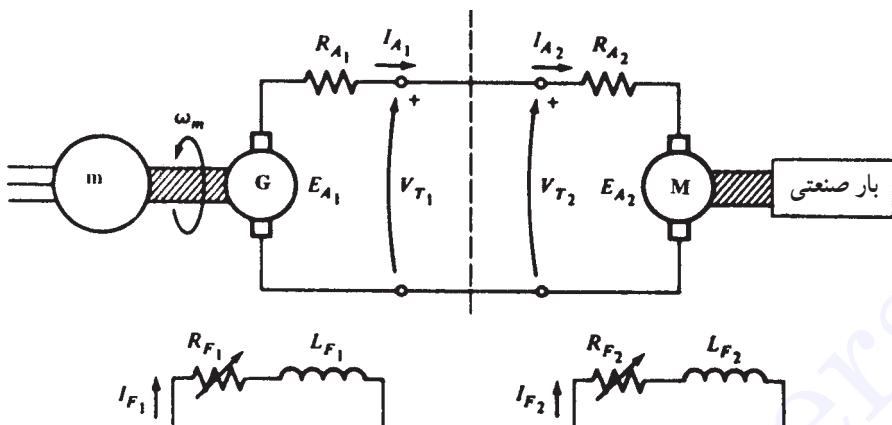
به عبارت دیگر با کاهش فوران، باید آرمیچر سریعتر بچرخد تا با این فوران کاهش یافته ولتاژی حوالی ولتاژ ترمینال V_T در آن القاء گردد.

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

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

۲-۴-۷-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 توسعه دانش نیمه هادیها و الکترونیک قدرت مدارهایی برای کنترل ولتاژ آرمیچر بدون نیاز به رؤستاهای پرقدرت طراحی و ارائه شده اند. در این روش برای همه 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 - لئونارد^۱) از مدتھا پیش در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته که اساس کار آن تنظیم ولتاژ یک موتور DC برای کنترل دور آن است. همانطور که در شکل ۲-۱۴ مشخص شده در این روش از دو ماشین جریان مستقیم (مولد G و موتور M) و یک موتور سه فاز جریان متناوب m استفاده می شود 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



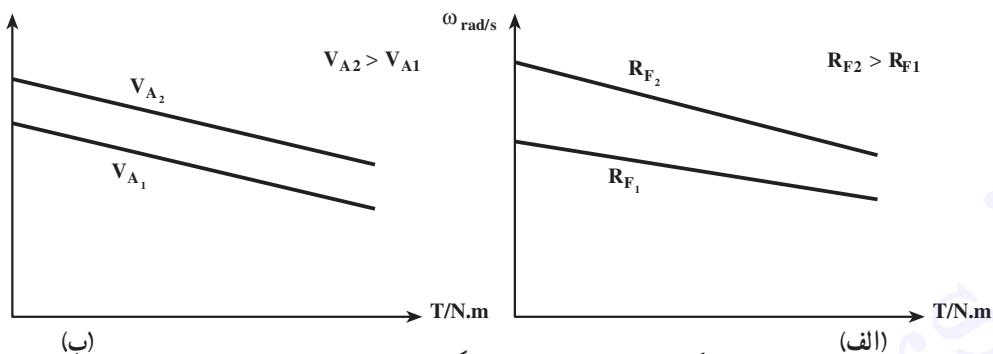
شکل ۱۴-۴- روش وارد - لئونارد برای کنترل دور موتور DC

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 - 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 مولڈ جریان مستقیم G تأمین می شود و هر دو ماشین M و G به صورت تحریک مستقل هستند.

موتور جریان متناوب m وظیفه به حرکت درآوردن آرمیچر مولڈ G را به عهده دارد. محور مشترک G و m دارای سرعت تقریباً ثابتی است. با تنظیم رئوستای مدار تحریک مولڈ G (تغییر R_{F1}) می توان ولتاژ القابی مولڈ 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 می شود ($V_{T1} = V_{T2}$) با تغییرات ولتاژ القابی E_{A1} که در یک محدوده وسیع امکان پذیر است؛ ولتاژ V_{T2} کنترل شده دور موتور M بطور گسترده‌ای امکان تنظیم می یابد.

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 ظرفی و کوچک R_{F1} و R_{F2} در اختیار خواهیم داشت که، باعث کاربردهای گسترده‌ای برای این سیستم می شود. ضمناً به دلیل امکان تنظیم ولتاژ ورودی موتور نیازی به مقاومت راه انداز در مدار آرمیچر موتور M نیز نخواهد بود.



شکل ۱۵-۴- تغییر مشخصه گشتاور - 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 - دور موتور DC (مثلاً تحریک مستقل یا شنت) در شکل ۱۵-۴ نشان داده شده است.

شکل (۱۵-۴-الف) معلوم می‌دارد که با افزایش مقاومت مدار تحریک شبیه مشخصه گشتاور - دور و نیز عرض از مبدأ آن افزایش می‌یابند و مشخصه جدیدی بدست می‌آید.
در حالی که با تغییر ولتاژ آرمیچر شبیه مشخصه گشتاور - دور تغییر نکرده فقط عرض از مبدأ مشخصه متناسب با تغییر ولتاژ تغییر می‌کند که در شکل (۱۵-۴-ب) نحوه تغییر مشخصه نشان داده شده است.

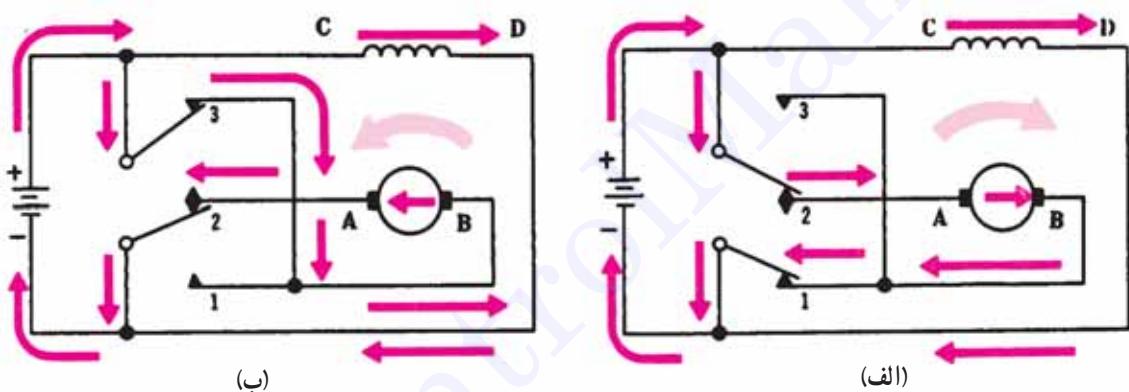
۱۵-۷-۳- تغییر جهت گردش موتور جریان مستقیم: در بسیاری از بارهای صنعتی (مانند آسانسورها، نقاله‌ها، وسایل حمل و نقل و ...) لازم است که امکان تغییر جهت گردش موتورهای الکتریکی فراهم باشد.

در موتورهای DC با توجه به رابطه اساسی (۲-۲۸) برای تغییر جهت گشتاور، یکی از دو کمیت I_A و I_F باید تغییر جهت بدهند. (یعنی در یکی از دو سیم پیچی آرمیچر یا تحریک پلاریته سیم پیچی عوض شود یا به اصطلاح دو سر سیم پیچی 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 تعذیه، جهت گردش تغییر نخواهد کرد چرا که در این صورت هر دو جریان آرمیچر و تحریک تغییر جهت می‌دهند و علامت گشتاور تغییر نمی‌کند.

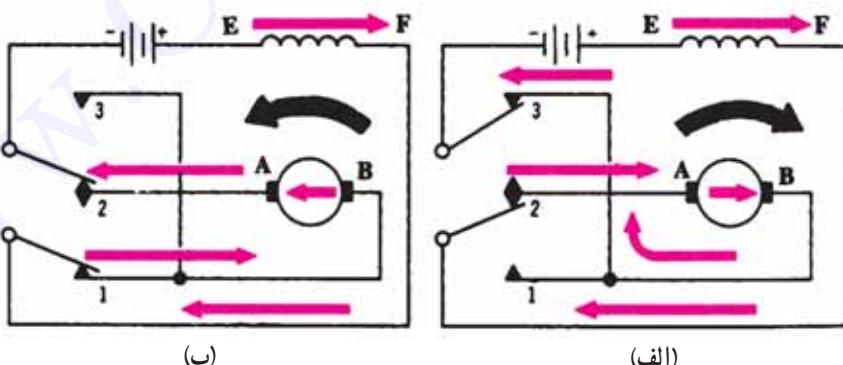
پس در موتورهای شنت و سری برای تغییر جهت گردش باید دو سر یکی از دو سیم پیچی آرمیچر یا تحریک را جابجا نمود.

معمولًا برای تغییر جهت گردش موتورهای جریان مستقیم دو سر مدار آرمیچر را جابجا می کنند. 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 سیم پیچی جبرانگر هم باشد، هنگام تغییر پلاریتۀ آرمیچر باید ورودی و خروجی مدار آرمیچر طوری جابجا شود که جهت جریان در قطبها کمکی و سیم پیچهای جبرانگر نیز تغییر کند.

در شکل ۱۶-۴ نحوه تغییر جهت گردش موتور شنت با تغییر جهت جریان آرمیچر آن نشان داده شده است و شکل ۱۷-۴ نیز تغییر جهت گردش موتور سری بر اثر تغییر جهت جریان آرمیچر را نشان می دهد.



شکل ۱۶-۴- تغییر جهت گردش موتور شنت (الف) راستگرد (ب) چپگرد



شکل ۱۷-۴- تغییر جهت گردش موتور سری (الف) راستگرد (ب) چپگرد



۴-۸- روشهای ترمز موتورهای جریان مستقیم

در بسیاری بارهای صنعتی (مانند آسانسورها) لازم است پس از قطع موتور از شبکه سریعاً محور در حال حرکت متوقف شود. در حالی که با قطع موتورهای الکتریکی از شبکه به خاطر لختی (اینرسی) قسمت دوار 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، بلا فاصله موتور و بار آن متوقف شوند.

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

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

برای ترمز موتورهای DC سه روش به کار می‌رود:

(I) ترمز دینامیکی

(II) ترمز با جریان مخالف

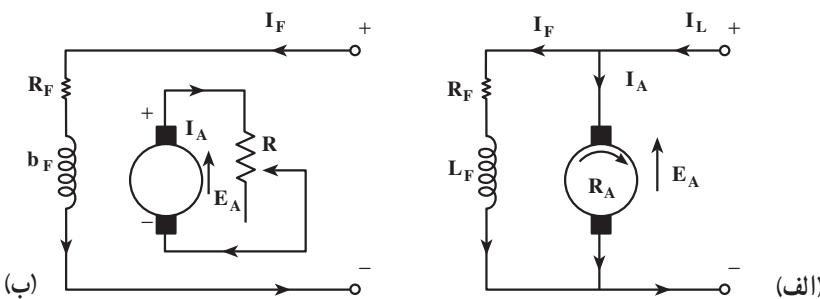
(III) ترمز مولیدی

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.

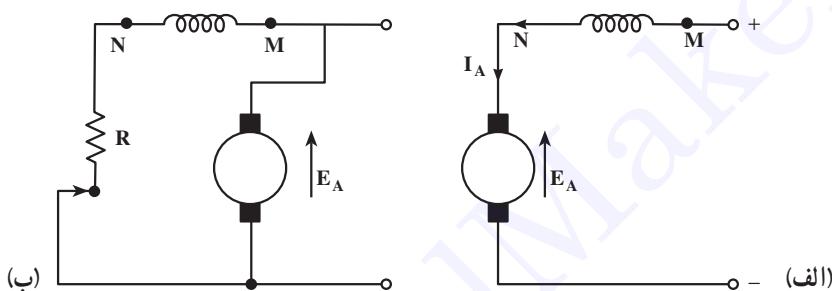
۱-۴- ترمز دینامیکی: در این روش مدار آرمیچر از شبکه جدا شده، دو سر آن به یک مقاومت متغیر وصل می‌گردد تا انرژی جنبشی موتور بوسیله آرمیچر، ابتدا تبدیل به انرژی الکتریکی شده، سپس در داخل مقاومت متغیر تبدیل به گرما شود. یعنی عملاً آرمیچر رفتار یک مولد را از خود بروز می‌دهد.

سیم‌پیچی تحریک موازی موتورهای تحریک مستقل، شنت و کمپوند به شبکه قبلی خود متصل باقی می‌ماند. تا میدان مغناطیسی لازم برای رفتار مولیدی آرمیچر را تأمین نماید و پس از توقف کامل موتور، 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 باقی‌ماند و پس ماند هسته از بین نرود. در شکل‌های ۴-۱۸ و ۴-۱۹ چگونگی اتصالات موتورهای شنت و سری در حالت کار عادی و کار ترمزی نشان داده شده است.



شکل ۱۸-۴- ترمز دینامیکی موتور شنت (الف) حالت کار (ب) حالت ترمز



شکل ۱۹-۴- 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 ترمز نیز کاهش یافته، در توقف کامل این نیرو از بین می‌رود.

۲-۸-۴- 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 پلاستیک 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.

۳-۸-۴- ترمز مولدی: در مواردی که بار موتور تحت تأثیر شتاب حاصل از نیروی وزن خود (مانند حرکت وسایل نقلیه در سر پایینی یا حرکت روبرو پایین بالا براها و آسانسورها) بتواند به بیش

از سرعت بی‌باری خود بر سد می‌توان از روش ترمز مولّدی استفاده نمود.

در این حالت بجای تبدیل انرژی جنبشی محور به گرما، این انرژی را به صورت الکتریکی به شبکه 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 محرکه القایی آرمیچر (E_A) مطابق رابطه (۲-۱۹) بیش از ولتاژ شبکه بوده، موجب معکوس شدن جهت جریان در آرمیچر می‌شود. یعنی در حالت کار موتوری داشته‌ایم:

$$I_A = \frac{V_T - E_A}{R_A} \quad (4-28)$$

و برای حالت مولّدی:

$$I_A = \frac{E_A - V_T}{R_A} \quad (4-29)$$

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. عملًا از روش مولّدی به تنها یکی 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 مولّدی بکار نمی‌رود زیرا ولتاژ القایی در آرمیچر آن نمی‌تواند از ولتاژ شبکه بیشتر شود.

۹-۴- تحلیل بارداری و انواع تلفات در موتور جریان مستقیم

در فصل دوم (بخش ۲-۱۴) با نمودار توازن توان و انواع تلفات در ماشینهای الکتریکی و روابط مربوط به آنها آشنا شدیم.

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

مثال ۴-۷: یک موتور شنت به ولتاژ 25° ولت و سرعت نامی 120° دور بر دقیقه و جریان نامی آرمیچر 17° آمپر مفروض است، جریان تحریک در نقطه کار نامی برابر 5° آمپر و مقاومت آرمیچر معادل 6° اهم می‌باشند. آرمیچر این موتور در حالت بی‌باری $11/5$ 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.

$$P_F = V_T I_F = 25 \times 5 = 125 \text{ W}$$

تلفات تحریک

$$P_A = R_A I_A^2 = 0.6 \times 170^2 = 1734 \text{ W}$$

تلفات مسی آرمیچر

$$P_{Cu} = P_A + P_F = 1734 + 125 = 1859 \text{ W}$$

جريان بی‌باری موتور صرف تأمین تلفات ثابت (آهنی و مکانیکی و تحریک در ماشینهای شنت)

می‌شود:

$$P_{Fe} + P_{mech} + P_F = 25 \times 11 / 5 = 2875 \text{ W}$$

و مجموع تلفات ماشین در نقطه کارنامی چنین است:

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

$$\Delta P = 1734 + 2875 \quad \Delta P = 4609 \text{ W}$$

(الف)

$$P_1 = V_T I_L = 25 \times (17 + 5) = 4375 \text{ W}$$

$$P_2 = P_1 - \Delta P = 4375 - 4609 = 39141 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100$$

$$\eta = \frac{39141}{4375} \times 100 = 89.4\%$$

ب) از نمودار توازن توان موتورهای DC (بخش ۱۴-۲) داریم:

$$P_e = P_1 - P_{Cu} = 4375 - (1734 + 125) = 40766 \text{ W}$$

$$T = \frac{P_e}{\omega} = \frac{60 \times 40766}{2\pi N} = \frac{60 \times 40766}{2\pi \times 1200} = 324.4 \text{ N.m}$$

$$T_u = \frac{P_2}{\omega} = \frac{60 \times 39141}{2\pi N} = \frac{60 \times 39141}{2\pi \times 1200} = 311.5 \text{ N.m}$$

مثال ۸-۴: یک موتور کمپوند در برنامی دارای مشخصات زیر است:

$$V_T = 12 \text{ V}$$

$$I_L = 15 \text{ A}$$

$$\omega = 14 \text{ rad/s}$$

$$R_F = 1 \text{ }\Omega$$

$$R_A + R_S = 0.8 + 0.2 \Omega \quad P_{Fe} + P_{mech} = 15 \text{ W}$$

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

گشتاور مفید در نقطه کارنامی.

حل:

$$I_F = \frac{V_T}{R_F} = \frac{120}{100} = 1.2 \text{ A}$$

$$I_A = I_L - I_F = 15 - 1.2 = 13.8 \text{ A}$$

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

$$= 120 - 13.8(0.8 + 0.2) = 106.2 \text{ V}$$

$$P_F = V_T I_F + R_S I_A^2$$

$$= 120 \times 1.2 + 0.2 \times 13.8^2 = 144 + 38 = 182 \text{ W}$$

$$P_A = R_A I_A^2$$

$$P_A = 0.8 \times 13.8^2 = 152 \text{ W}$$

$$P_V = V_T I_L = 120 \times 15 = 1800 \text{ W}$$

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

$$= 182 + 152 + 150 = 484 \text{ W}$$

$$P_r = P_V - \Delta P = 1800 - 484 = 1316 \text{ W}$$

توان خروجی :

$$\eta = \frac{P_r}{P_V} \times 100$$

$$= \frac{1316}{1800} \times 100 = 73.1\%$$

$$P_e = E_A I_A = 106.2 \times 13.8 / 8 = 1465 / 5 \text{ W}$$

توان الکترومغناطیسی

$$T = \frac{P_e}{\omega} = \frac{1465}{140} = 10.46 \text{ N.m}$$

گشتاور الکترو مغناطیسی

$$T_u = \frac{P_r}{\omega} = \frac{1316}{140} = 9.4 \text{ N.m}$$

گشتاور مفید :

مثال ۹-۴: یک موتور سری ۲۲۰ ولت، یک بار صنعتی به قدرت ۱۵ اسب بخار را با سرعت ۱۲۰۰ دور بر دقیقه به حرکت درمی آورد. اگر مقاومت اهمی آرمیچر و سیم پیچی تحریک این موتور مجموعاً 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 :

$$P_r = 15 \times 736 = 11040 \text{ W}$$

$$P_1 = \frac{P_T}{\eta} = \frac{11040}{0.87} = 12690 \text{ W}$$

$$I_L = I_A = \frac{P_1}{V_T} = \frac{12690}{220} = 57.7 \text{ A}$$

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

مثال ۱۰-۴: یک موتور شنت ۲۵۰ ولت و ۸۴ آمپر با سرعت بی‌باری ۱۸۰° R.P.M مفروض است. مقاومت اهمی مدار تحریک (شامل مقاومت متغیر R_{adj}) برابر ۱۸۴ اهم و مقاومت اهمی مدار آرمیچر (شامل سیم پیچهای قطب کمکی و زغالها) برابر ۸۲ میلی اهم 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) ضریب بهره
حل:

$$I_F = \frac{V_T}{R_F} = \frac{250}{184} = 1.36 \text{ A}$$

$$I_A = I_L - I_F = 84 - 1.36 = 82.64 \text{ A}$$

$$E_A = V_T - R_A I_A = 250 - 0.082(82.64) = 250 - 6.64 = 243.36 \text{ V}$$

$$E_A = 243.36 \text{ V}$$

الف) از مقایسه حالت بی‌باری با نقطه کارنامی از رابطه (۱۵-۴) داریم:

$$\frac{n}{n_0} = \frac{E_A}{E_{A0}} \quad \frac{n}{180^\circ} = \frac{243.36}{250}$$

$$n = \frac{243.36}{250} \times 180^\circ = 1751 \text{ R.P.M}$$

(ب)

$$P_e = E_A I_A = 243.36 \times 82.64 = 20098 \text{ W}$$

پ) از نمودار توازن توان موتورهای DC شکل ۲-۶ داریم:

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

$$P_T = 18798 \text{ W}$$

ت) گشتاور مفید را از رابطه (۴-۵) می‌توان بدست آورد:

$$T_u = \frac{P_T}{\omega} = \frac{18798 \times 6^\circ}{2\pi \times 1751} = 1.2 / 5 \text{ N.m}$$

(ث)

$$\% \eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100 \quad P_1 = V_T I_L = 250 \times 84 = 21 \text{ kW}$$

$$\% \eta = \frac{18798}{21000} = \% 89.5$$

۱۰-۴- پرسش

- ۱- چرا نمی‌توان یک موتور DC صنعتی را مستقیماً به شبکه برق شهر وصل نمود؟
- ۲- هنگام راه اندازی موتورهای جریان مستقیم رئوستای مدار آرمیچر و رئوستای مدار تحریک (در صورت موجود بودن) هر کدام در چه وضعیتی قرار می‌گیرند؟ چرا؟
- ۳- اگر در هنگام کار یک موتور DC برای چند لحظه برق قطع و وصل شود آیا در وصل مجدد برق، موتور بدون راه انداز و با جریان زیاد راه اندازی خواهد شد؟
- ۴- روشهای کنترل دور موتورهای DC را بررسی نمایید. برای کنترل دور موتور سری کدامیک از این روشها بیشتر قابل استفاده است؟
- ۵- هنگام کار موتورهای DC زیر، یکباره سیم پیچی 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)

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

۷- علت نیاز به روشهای ترمی موتورهای الکتریکی را بیان نمایید.

- ۸- سه روش ترمی (دینامیکی، با جریان مخالف و مولدی) را بطور کلی با هم مقایسه کنید.
- ۹- برای حرکت یک بالابر الکتریکی از موتور سری استفاده شده است، آیا هنگام ترمی این موتور می‌توان از روش مولدی استفاده نمود؟ چرا؟

۱۱-۴- مسائل

- ۱- یک موتور الکتریکی با سرعت ۱۲۰۰ دور بر دقیقه، باری با گشتاور ۲۰ نیوتون متر را به حرکت در می‌آورد. قدرت خروجی این موتور چند کیلووات است؟
- ۲- یک موتور جریان مستقیم ۵ اسب در سرعتهای زیر، باری را تغذیه می‌کند. در هر حالت

گشتاور مفید موتور را بدست آورید.

پ) 180° R.P.M

ب) 150° R.P.M

الف) 100° R.P.M

۳- یک آسانسور الکتریکی دارای گشتاور ثابت 180° نیوتن متر است در حالت های زیر قدرت موتور محرک آن را محاسبه کنید.

الف) سرعت موتور M R.P.M 75° باشد.

ب) سرعت موتور R.P.M 50° باشد.

۴- یک موتور DC به شبکه 25° ولتی متصل و بار مکانیکی ۲ کیلوواتی را تغذیه می کند. اگر بازده ماشین 80% باشد، جریان دریافتی آن از شبکه چند آمپر است؟

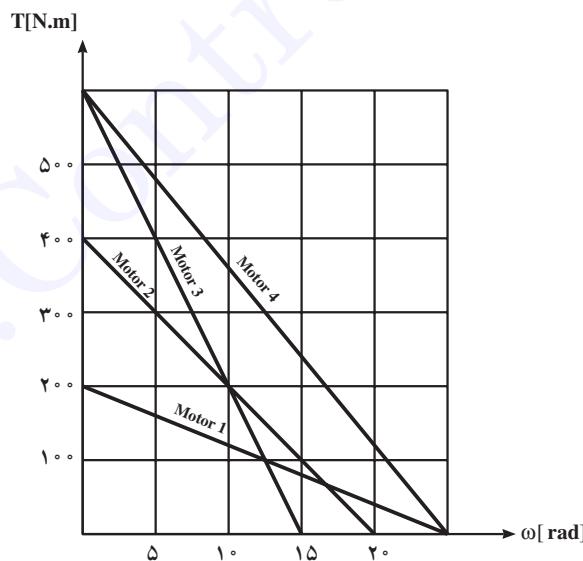
۵- مشخصه گشتاور - دور چهار موتور DC در شکل داده شده است:

الف) گشتاور راه اندازی موتور ۱ چقدر است؟

ب) موتور ۲ در بی باری چه سرعتی دارد؟

پ) برای تغذیه، باری با گشتاور 15° نیوتن متر و سرعت $12/5$ رادیان بر ثانیه، کدام موتور مناسبتر است؟

ت) کدام یک از موتورها دارای قدرت نامی $1/5$ کیلووات و سرعت نامی ۵ رادیان بر ثانیه است؟



۶- یک موتور شنت 11° ولت در بار نامی جریان 40 آمپر را از شبکه جذب می نماید. مقاومت اهمی مدار آرمیچر $18/10$ اهم و مدار تحریک مجموعاً دارای 100° اهم مقاومت می باشند.

اگر سرعت این موتور در بی‌باری 185° دور بر دقیقه باشد :

الف) سرعت موتور در بار کامل را بدست آورید.

ب) اگر با کاهش بار محور، جریان دریافتی از شبکه به 2° آمپر کاهش یابد سرعت موتور چقدر خواهد شد؟

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

۷- یک موتور کمپوند با شنت بلند 12° ولت، 41° آمپر و 180° دور بر دقیقه در بار کامل مشغول کار است. مقاومت آرمیچر $3/2^\circ$ اهم، مقاومت سیم پیچ تحریک سری $2/1^\circ$ اهم و مقاومت مدار تحریک موازی 12° اهم می‌باشند.

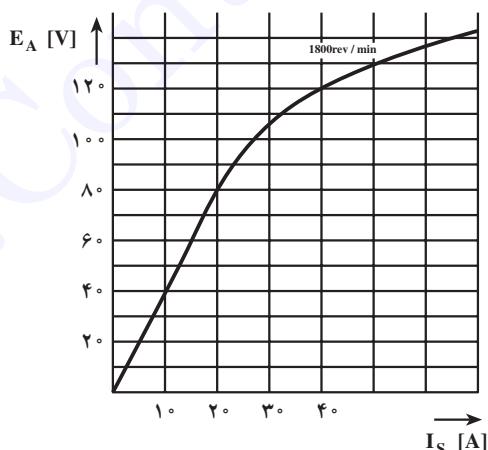
الف) تلفات مسی موتور در بار کامل را تعیین کنید.

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

۸- یک موتور سری 24° ولت با مقاومت اهمی آرمیچر $3/2^\circ$ اهم و مقاومت سیم پیچی تحریک 22° اهم در بار کامل 58° آمپر جریان از شبکه دریافت نموده و با سرعت 105° 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 88° وات فرض می‌شود. مطلوبست :

الف) ضربی بهره موتور در بار کامل

ب) سرعت موتور و ضربی بهره در جریان بار 35° 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) وسائل تبدیل انرژی الکتریکی – مکانیکی (جلد دوم)، کاظم انصاری، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۵۳
- ۱۲) ماشینهای الکتریکی مقدماتی، حسن کلهر، انتشارات دانشگاه شیراز، ۱۳۶۹.

