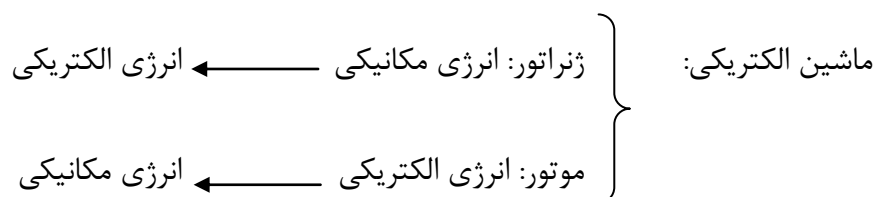


فصل اول: مدارهای مغناطیسی

۱-۱- مقدمه

ماشین الکتریکی سیستمی است که می تواند انرژی را از شکل الکتریکی به مکانیکی یا برعکس تبدیل کند.



ماشین DC: حوزه الکتریکی (مصرف کننده یا تولید کننده) DC است.

ماشین AC: حوزه الکتریکی AC است.

✓ استفاده از مواد فرومغناطیسی در ماشین های الکتریکی برای هدایت شار در مسیر مناسب

✓ وجود مدارهای الکتریکی و مغناطیسی مرتبط در ماشین های الکتریکی

عبور جریان های الکتریکی در مدار الکتریکی

عبور شارهای مغناطیسی از مدارهای مغناطیسی

تأثیر متقابل جریان های الکتریکی و شارهای مغناطیسی در ماشین های الکتریکی موجب فرآیند تبدیل انرژی می

گردد، بنابراین مدارهای مغناطیسی در این فرآیند نقش مهمی دارند.

هدف از این فصل آشنایی با مفاهیم اولیه مدارهای مغناطیسی و روش حل آن ها ست.

۱-۲- رابطه بین شدت میدان مغناطیسی و جریان

سیم حامل جریان در اطراف میدان مغناطیسی به شدت H ایجاد می کند که اندازه این شدت از قانون مداری آمپر

به دست می آید:

قانون مداری آمپر: انتگرال خطی شدت میدان مغناطیسی روی هر مسیر بسته معادل جریان های احاطه شده توسط مسیر مسدود است.

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i \quad (1-1)$$

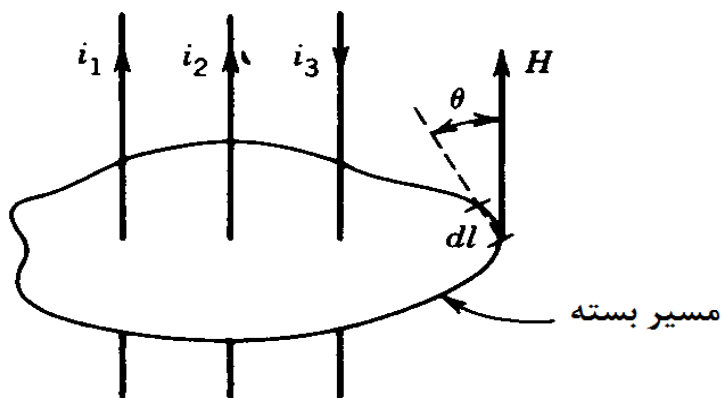
که در آن:

H : شدت میدان مغناطیسی در یک نقطه روی مسیر مسدود C

dl : طول جزئی در همان نقطه

تعیین جهت شدت میدان مغناطیسی توسط قانون دست راست:

انگشت شست دست راست در جهت جریان \Leftarrow پیچش انگشتان جهت شدت میدان مغناطیسی

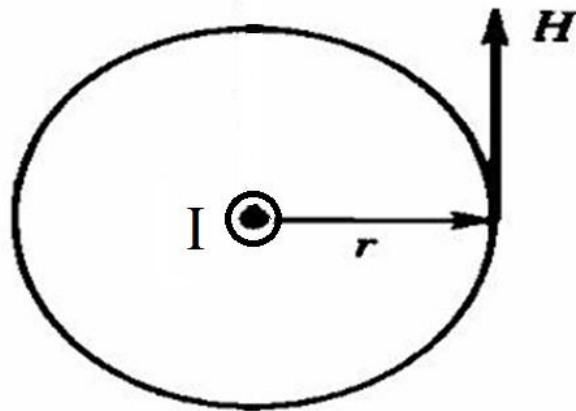


شکل ۱-۱- نمایش قانون مداری آمپر

قانون مداری آمپر برای مثال نشان داده شده در شکل (۱-۱) به صورت رابطه زیر می باشد:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i = i_1 + i_2 - i_3 \quad (2-1)$$

به عنوان یک مثال ساده تر، محاسبه شدت میدان مغناطیسی ناشی از یک هادی حامل جریان i در فاصله r را مورد بررسی قرار می دهیم:



شکل ۱-۲- شدت میدان مغناطیسی پیرامون یک هادی حامل جریان

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint H dl = H \oint dl = H \times 2\pi r = \sum i = I \quad (۳-۱)$$

و در نتیجه :

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (۴-۱)$$

۳-۱- رابطه بین چگالی شار و شدت میدان مغناطیسی

به هنگام وجود میدان مغناطیسی با شدت H ، چگالی شار (B) در هر نقطه از ماده از رابطه زیر به دست می آید:

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H \quad \left(\frac{wb}{m^2} \text{ یا } T \right) \quad (۵-۱)$$

که در آن:

μ : ضریب نفوذپذیری مغناطیسی (پرمابلیته) محیط برحسب هانری بر متر

μ_0 : ضریب نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد و برابر با: $4\pi \times 10^{-7}$

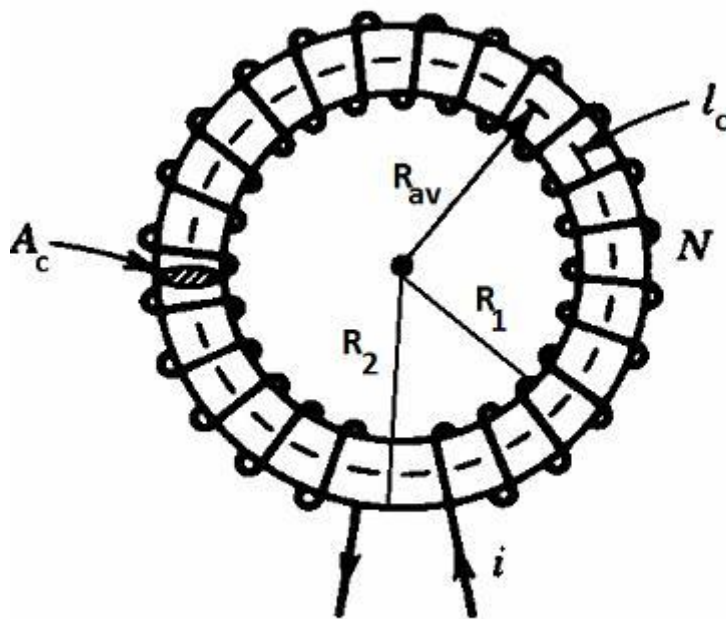
μ_r : ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی ماده

$$\left\{ \begin{array}{ll} \mu_r = 1 & \text{برای هادی های الکتریکی (مس)، عایق و هوا} \\ \mu_r = 1000 - 6000 & \text{برای مواد فرومغناطیسی به کار رفته در ماشین های الکتریکی} \end{array} \right.$$

هرچه μ_r بزرگتر باشد، به ازای جریان کمتری چگالی شار بیشتری حاصل می شود.

۴-۱- مدار معادل مغناطیسی

ساختار مغناطیسی چنبره ای را مطابق شکل روبرو در نظر بگیرید. سیم پیچی N دوری روی آن پیچیده شده و از آن جریان i می گذرد.



شکل ۱-۳- ساختار مغناطیسی یک چنبره

با فرض شار نشتی ناچیز:

$$H(R) = \begin{cases} 0 & R < R_1 \quad , \quad R > R_2 \\ \neq 0 & R_1 < R < R_2 \end{cases} \quad (۴-۱)$$

به قسمت هایی از مدار مغناطیسی که شار یکسانی را از خود عبور می دهند شاخه گفته می شود. به عبارت دیگر شاخه قسمتی از مدار است که شار یکسانی از تمام سطح مقطع آن می گذرد.

فرضی که در اکثر مسایل مربوط به مدارهای مغناطیسی در نظر گرفته می شود این است که بردار شدت میدان مغناطیسی روی تمام نقاط مسیر یک شاخه منطبق بر مسیر است.

فرض دیگر در این مسئله:

$$r \ll R_{av} \Rightarrow H(R) \simeq H_{av} \quad R_1 < R < R_2 \quad (7-1)$$

با فرض فوق همچنین مطمئن هستیم که بردار شدت میدان مغناطیسی فقط مولفه محیطی دارد و بنابراین بر بردار طول (dl) منطبق می شود.

با اعمال قانون مداری آمپر برای مسیر مسدود نشان داده شده در شکل ۱-۳ داریم:

$$\oint_{l_c} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint_{l_c} H dl = \oint_{l_c} H_{av} dl = H_{av} \oint_{l_c} dl = H_{av} l_c \quad (8-1)$$

طرف راست قانون مداری آمپر (۱-۱) که جمع جبری جریان‌هاست برای این مثال برابر با Ni می باشد و بنابراین:

$$H_{av} l_c = Ni \quad \Rightarrow \quad H_{av} = \frac{Ni}{l_c} \quad (9-1)$$

کمیت Ni نیروی محرکه مغناطیسی یا mmf نامیده می شود و واحد آن آمپر دور (At) است.

$$\xrightarrow{B = \mu H} \quad B = \mu \frac{Ni}{l_c} \quad (10-1)$$

$$\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = B \int dA = B A_c \rightarrow \phi = B A_c \quad (11-1)$$

از (۱۰-۱) و (۱۱-۱) داریم :

$$\Rightarrow \phi = \mu \frac{N_i}{l_c} A_c = \frac{N_i}{\frac{l_c}{\mu A_c}} = \frac{F}{R} \quad (12-1)$$

در نتیجه: $F = R\phi$

در این رابطه :

$$\frac{l_c}{\mu A_c} \triangleq R(\text{رلوکتانس}) = \frac{1}{P} \quad (13-1)$$

که در آن :

R : مقاومت مغناطیسی (رلوکتانس)

P : هدایت مغناطیسی (پرمیانس)

نیروی محرکه مغناطیسی (F یا N_i یا mmf) شار مغناطیسی (ϕ) را در برابر مقاومت مغناطیسی با رلوکتانس R ایجاد می کند :

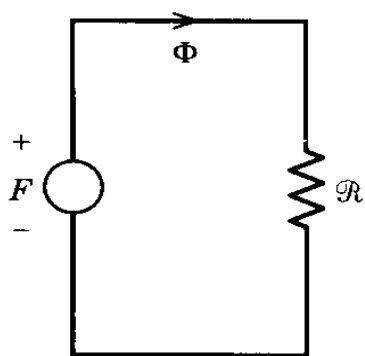
$$F = N_i = R\phi \quad (14-1)$$

این رابطه مشابه قانون اهم در مدار الکتریکی ($V = Ri$) است.

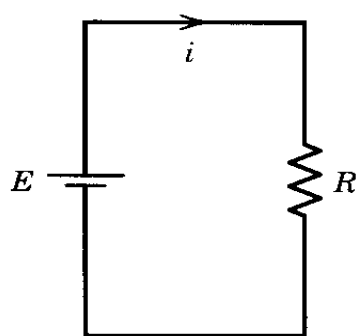
مدار الکتریکی : جریان (i) ولتاژ (V) مقاومت الکتریکی $R = \frac{l}{\sigma A}$

مدار مغناطیسی : شار (ϕ) نیروی محرکه مغناطیسی ($F=\text{mmf}$) مقاومت مغناطیسی $R = \frac{l}{\mu A}$

تشابه بین مدار الکتریکی و مدار معادل مغناطیسی در شکل ۴-۱ نمایش داده شده است.



(ب)

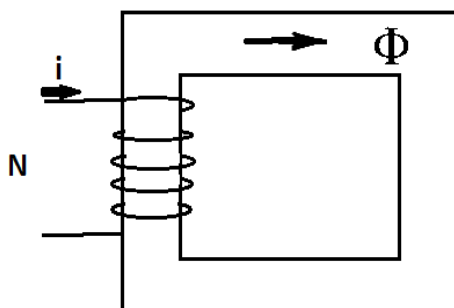


(الف)

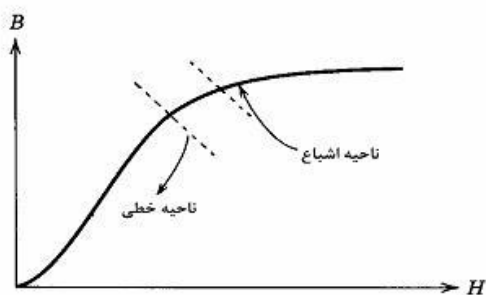
شکل ۱-۴- تشابه میان مدارها: (الف) مدار الکتریکی ، (ب) مدار معادل مغناطیسی

۱-۵- منحنی مغناطیس شوندگی

با افزایش جریان (i) شدت میدان مغناطیسی (H) افزایش می یابد و چگالی شار در هسته مطابق شکل زیر تغییر می کند.



شکل ۱-۵- ساختار هسته مغناطیسی

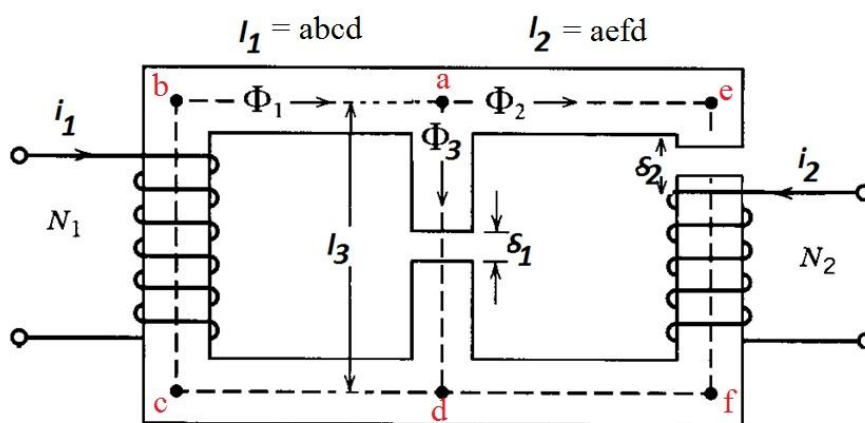


شکل ۱-۶- منحنی مغناطیس شوندگی

در ابتدا افزایش اندکی در جریان یا نیروی محرکه مغناطیسی Ni ، افزایش زیاد شار را در پی دارد. پس از نقطه معینی هرچه نیروی محرکه مغناطیسی را بیشتر می کنیم، نرخ تغییرات شار کمتر می شود. سرانجام به جایی می رسیم که هرگونه افزایش در نیروی محرکه مغناطیسی تقریباً هیچ تغییری در شار ایجاد نمی کند. این قسمت از شکل که به صورت افقی درآمده ناحیه اشباع نامیده می شود. برعکس ناحیه ای که در آن تغییر شار سریع است ناحیه اشباع نشده (یا خطی) گفته می شود. گذر از ناحیه غیراشباع به ناحیه اشباع را زانوی منحنی می نامند. ضرب نفوذپذیری مغناطیسی در هر نقطه از منحنی مغناطیس شوندگی از رابطه $B = \mu H$ به دست می آید.

۹-۱- مقایسه روش های حل متفاوت

در این زیربخش، تحلیل ساختار مغناطیسی شکل ۷-۱ را از روش استفاده از قانون مداری آمپر و روش مدار معادل مغناطیسی مورد توجه قرار می دهیم :



شکل ۷-۱- ساختار مغناطیسی

روش استفاده از قانون مداری آمپر

: kvl

$$H_1 l_1 + H_3 (l_c - \delta_1) + H_{\delta_1} \delta_1 = N_1 i_1$$

(۱۵-۱)

$$H_{\delta_2} \delta_2 + H_2 (l_2 - \delta_2) - H_3 (l_3 - \delta_1) - H_{\delta_1} \delta_1 = N_2 i_2$$

: kcl

$$\varphi_1 = \varphi_2 + \varphi_3 \Rightarrow A_1 B_1 = A_2 B_2 + A_3 B_3 \quad (۱۶-۱)$$

روابط دیگر :

$$B_{\delta_1} = B_3 = \mu_o H_{\delta_1} \quad (۱۷-۱)$$

$$B_{\delta_2} = B_2 = \mu_o H_{\delta_2}$$

همچنین برای هسته آهنی داریم:

$$B_1 = \mathcal{F}(H_1)$$

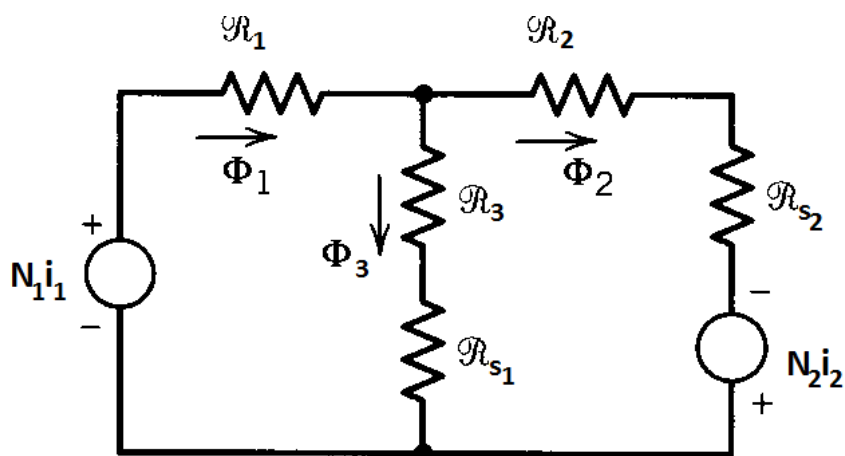
$$B_2 = \mathcal{F}(H_2) \quad (۱۸-۱)$$

$$B_3 = \mathcal{F}(H_3)$$

تعداد لازم معادله برای یافتن مجهولات وجود دارد.

روش مدار معادل مغناطیسی

مدار معادل مغناطیسی ساختار مزبور مطابق شکل ۸-۱ می باشد.



شکل ۸-۱- مدار معادل مغناطیسی ساختار مزبور

از kvl برای دوش در مدار معادل داریم:

$$-N_1 i_1 + R_1 \varphi_1 + R_3 \varphi_3 + R_{S_1} \varphi_3 = 0 \quad (19-1)$$

$$-R_{S_1} \varphi_3 - R_3 \varphi_3 + R_2 \varphi_2 + R_{S_2} \varphi_2 - N_2 i_2 = 0$$

بنابراین:

$$R_1 \varphi_1 + R_3 \varphi_3 + R_{S_1} \varphi_3 = N_1 i_1 \quad (20-1)$$

$$R_2 \varphi_2 + R_{S_2} \varphi_2 - R_3 \varphi_3 - R_{S_1} \varphi_3 = N_2 i_2$$

توجه داشته باشید با جایگذاری $R\varphi = Hl$ در دو معادله بالا به معادله های مشابه در (15-1) خواهیم رسید. در معادله های بالا، مقاومت های مغناطیسی (رلوکتانس ها) عبارتند از:

$$R_1 = \frac{l_1}{\mu A_1} \quad , \quad R_3 = \frac{l_3 - \delta_1}{\mu A_3} \quad , \quad R_{S_1} = \frac{\delta_1}{\mu_0 A_3} \quad (20-1)$$

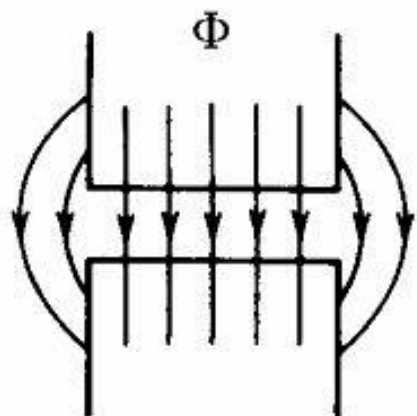
$$R_2 = \frac{l_2 - \delta_2}{\mu A_2} \quad , \quad R_{S_2} = \frac{\delta_2}{\mu_0 A_2}$$

برای یافتن مجهول ها در (20-1) $(\varphi_3, \varphi_2, \varphi_1)$ یک معادله دیگر نیاز داریم که همان kcl در گره مرکزی شکل ۸-۱ می باشد.

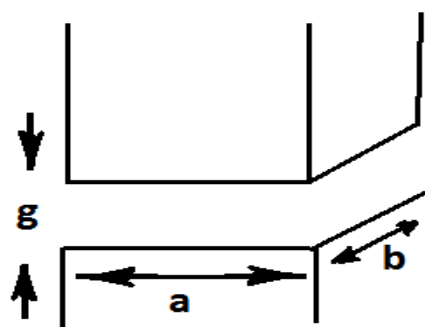
$$\varphi_1 = \varphi_2 + \varphi_3 \quad (21-1)$$

۱۰-۱- اثر خمیدگی شار در فاصله هوایی

چون مقاومت مغناطیسی فاصله هوایی بسیار بزرگ است، خطوط میدان مغناطیسی موقع مواجه شدن با آن سعی می کنند از مقطع بزرگتری عبور کنند. شکل ۹-۱ این مطلب را برای دو دندانه مقابل هم نشان می دهد.



(ب)



(الف)

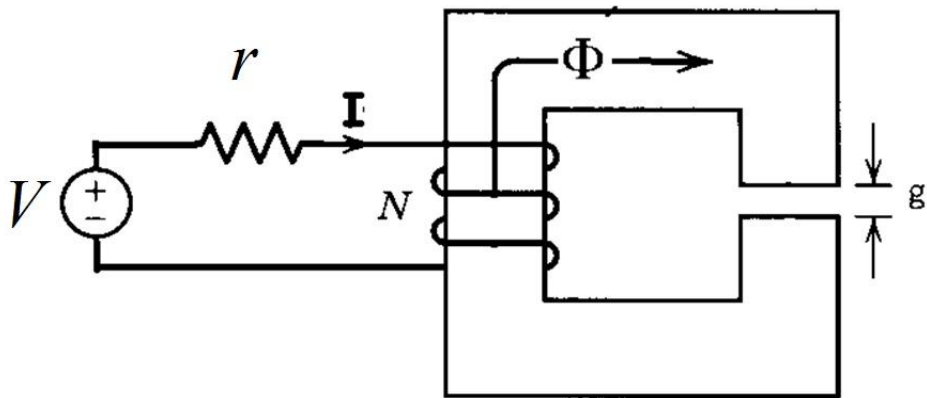
شکل ۱-۹- مدار معادل مغناطیسی ساختار مزبور: (الف) ساختار مغناطیسی دندانه، (ب) خطوط شار

همانطور که از شکل بالا مشاهده می شود، سطح مقطع عبور شار در فاصله هوایی بیشتر است. یک رابطه تجربی برای محاسبه سطح مقطع در این حالت بصورت زیر است:

$$A_g = (a + g)(b + g) \quad (۱-۲۲)$$

۱۱-۱- مفهوم اندوکتانس

موقعی که یک ساختار مغناطیسی در مدار الکتریکی به عنوان جزئی از آن مدار به کار می رود لازم است مدل الکتریکی آن در مدار تعریف شود. یک سیم پیچی به دور یک هسته (شکل ۱-۱۰) در حقیقت یک سلف است که می توان آن را با دو عنصر مقاومت و اندوکتانس به صورت سری باهم در نظر گرفت.



شکل ۱-۱۰- ساختار مغناطیسی یک سلف

طبق تعریف داریم:

$$\text{اندوکتانس} \triangleq \frac{\text{شار پیوندی با سیم پیچی}}{\text{جریان سیم پیچی}} \quad (۲۳-۱)$$

بنابراین:

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\phi}{i} \quad (۲۴-۱)$$

می توان اندوکتانس را برحسب رلوکتانس محاسبه کرد:

$$\phi = \frac{NI}{R} \Rightarrow L = \frac{N^2}{R} \quad (۲۵-۱)$$

شار پیوندی از جریان خود سیم پیچی به وجود می آید و بنابراین L اندوکتانس خودی نامیده می شود. همانطور که (۲۵-۱) نشان می دهد، اندوکتانس سیم پیچی به جریان آن بستگی ندارد و تابعی از پارامترهای هندسی، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی هسته و تعداد دور است.

۱۲-۱- قانون فارادی

طبق قانون فارادی، شار متغیر با زمان عبوری از یک حلقه ولتاژی در آن القاء می کند متناسب با آهنگ تغییرات شار نسبت به زمان :

$$e_{ind} = - \frac{d\varphi}{dt} \quad (۲۶-۱)$$

علامت منفی به خاطر قانون لنز است

شار اصلی ← ولتاژ القایی ← تولید جریان ← تولید شار جدید

قانون لنز می گوید که اگر شار اصلی در حال افزایش باشد، شار جدید با افزایش آن مخالفت می کند و برعکس.

می توان نشان داد که اندازه ولتاژ القایی در یک کلاف N دوری برابرست با:

$$E = N \frac{d\varphi}{dt} \quad (۲۷-۱)$$

برای اثبات این رابطه، طبق قانون فارادی اندازه ولتاژ القایی در دور i ام کلاف برابرست با:

$$e_i = \frac{d\varphi_i}{dt} \quad (۲۸-۱)$$

ولتاژ القایی در کلاف مجموع ولتاژهای القایی در حلقه های کلاف است:

$$\xrightarrow{\text{کلاف با } N \text{ دور}} E = \sum_{i=1}^N e_i = \sum_{i=1}^N \frac{d\varphi_i}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^N \varphi_i \right) \quad (۲۹-۱)$$

طبق تعریف:

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \varphi_i \quad (۳۰-۱)$$

در رابطه بالا λ شار پیوندی با کلاف نامیده می شود. از (۲۹-۱) و (۳۰-۱) داریم:

$$E = \frac{d\lambda}{dt} \quad (31-1)$$

اگر شار گذرنده از تمامی حلقه ها یکسان و برابر Φ باشد:

$$\lambda = N \Phi, \quad E = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (32-1)$$

۱-۱۳- نیروی اعمالی به سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی

بر سیم حامل جریان درون میدان مغناطیسی نیرو وارد می شود که اندازه آن از رابطه زیر بدست می آید:

$$\vec{F} = i(\vec{l} \times \vec{B}) \quad (33-1)$$

که در آن:

i : دامنه جریان

\vec{l} : بردار طول سیم (جهت بردار در جهت عبور جریان است)

\vec{B} : بردار چگالی شار مغناطیسی

θ : زاویه بین بردارهای \vec{l} و \vec{B}

قانون دست راست برای تعیین جهت نیرو:

انگشت اشاره در جهت بردار l و انگشت وسط در جهت بردار \vec{B} انگشت شست در جهت نیرو.

۱-۱۴- ولتاژ القایی در هادی متحرک در میدان مغناطیسی

روی سیم متحرک درون میدان مغناطیسی، ولتاژ القا می شود که اندازه آن از رابطه زیر بدست می آید:

$$e_{ind} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l} \quad (34-1)$$

که در آن:

\vec{v} : بردار سرعت سیم

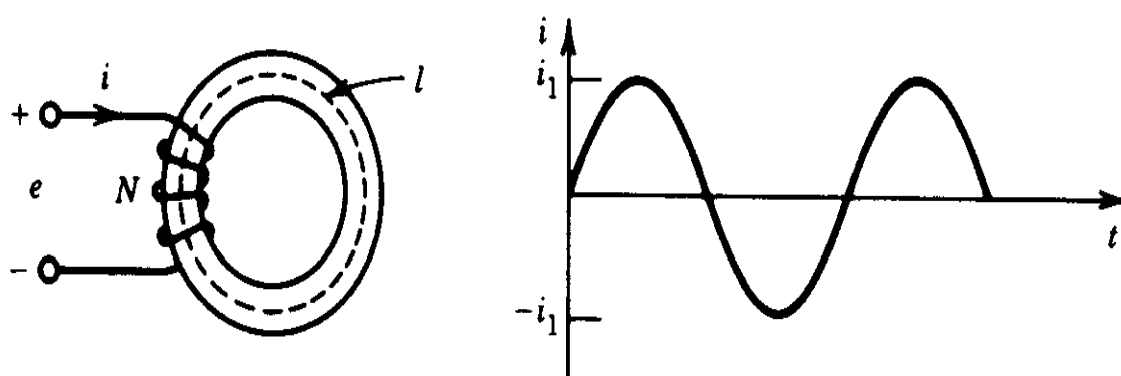
\vec{B} : بردار چگالی شار

\vec{l} : بردار طول هادی

بردار \vec{l} در راستای طول هادی است و جهت آن به گونه ای تعیین می شود که زاویه ای کوچکتر از 90° درجه با بردار $\vec{v} \times \vec{B}$ ایجاد کند.

۱-۱۵- پس ماند (هیستریزیس)

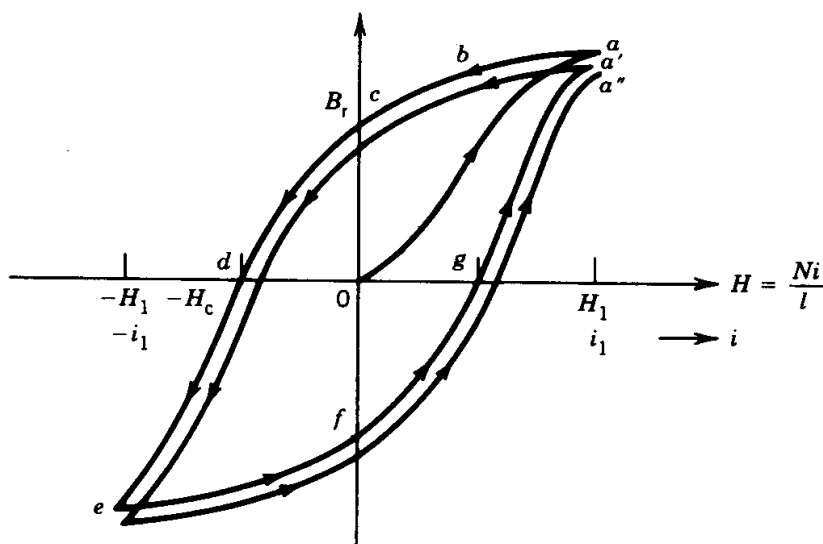
ساختار مغناطیسی نشان داده شده در شکل زیر (شکل ۱-۱۱) را در نظر بگیرید که سیم پیچی با جریان سینوسی تحریک می شود. تغییرات چگالی شار برحسب شدت میدان مغناطیسی برای دو سیکل جریان در شکل ۱-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۱- ساختار مغناطیسی و جریان سیم پیچی

با فرض شار پسماند صفر، با افزایش شدت میدان مغناطیسی توسط جریان، چگالی شار بر طبق مسیر oa تغییر می‌کند. اکنون اگر H کاهش یابد، منحنی $B-H$ مسیر دیگری (abc) را دنبال می‌کند. هنگامی که H صفر است، هسته چگالی شار B_r را حفظ می‌کند که به آن چگالی شار پسماند می‌گویند.

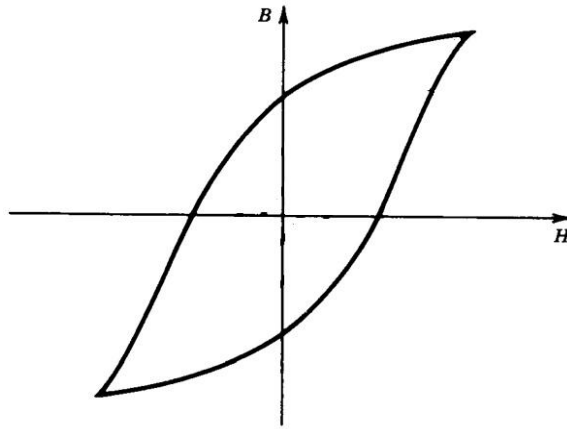
با وارونه کردن H (یا جریان)، شار در هسته کاهش می‌یابد تا در شدت میدان (H_c) چگالی شار پسماند از بین می‌رود. با کاهش بیشتر H ، چگالی شار متناظر با نقطه e خواهد بود. حال اگر H به صفر و سپس H_1 افزایش یابد، منحنی $B-H$ مسیر $efga'$ را طی می‌کند. اگر H برای یک سیکل کامل دیگر تغییر کند، نقطه انتهایی a'' است و فاصله a'' به a' کمتر از a' به a است.



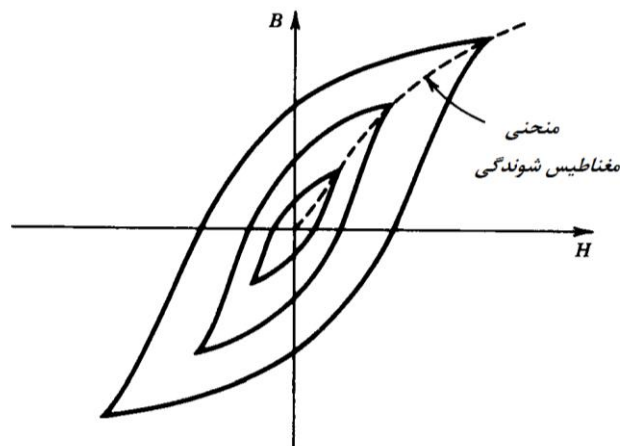
شکل ۱۲-۱- تغییرات چگالی شار بر حسب شدت میدان مغناطیسی

اگرچه هیچ یک از حلقه های مزبور بسته نیستند، ولی پس از چند سیکل حلقه مطابق شکل ۱-۱۳ تقریباً بسته می‌شود. این حلقه بسته، به حلقه پسماند یا هیستریزیس معروف است.

با تغییر دامنه جریان (تغییرات شدت میدان مغناطیسی)، دسته حلقه های هیستریزیس پدید می‌آیند (شکل ۱-۱۴). مکان هندسی نوک حلقه ها همان منحنی مغناطیس شوندگی است.



شکل ۱-۱۳- حلقه پس ماند (هیستریزیس)

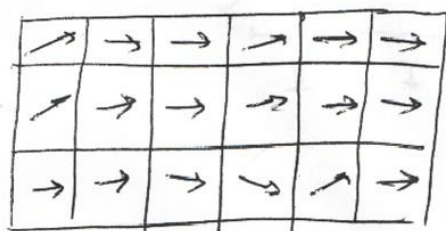


شکل ۱-۱۴- حلقه های پس ماند (هیستریزیس)

۱-۱۵-۱- توصیف هیستریزیس براساس تئوری حوزه های مغناطیسی

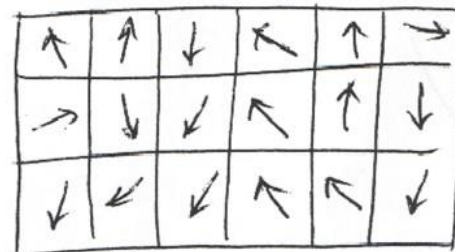
ناحیه های بسیار کوچکی درون ماده وجود دارد که در هریک از آنها تمامی اتم ها هم راستا شده اند و میدان مغناطیسی آن ها در یک جهت است. بنابراین هر حوزه به صورت یک ماده مغناطیسی دائم کوچک عمل می کند. در حالت عادی هیچ شاری درون ماده وجود ندارد، زیرا جهت حوزه های مغناطیسی به صورت اتفاقی شکل گرفته اند (شکل ۱-۱۵-الف). در حضور میدان مغناطیسی خارجی، تعداد حوزه ها در جهت میدان افزایش می یابد (شکل ۱-۱۵-ب). در این شکل میدان خارجی به سمت راست بوده و بنابراین درون ماده شار مغناطیسی در جهت راست

شکل می گیرد. با از بین رفتن میدان مغناطیسی خارجی، حوزه‌ها به حالت اول بر نمی‌گردند و یک میدان پسماندی درون ماده باقی می ماند. (پدیده پسماند)



میدان خارجی

(ب)



(الف)

شکل ۱-۱۵- حوزه های مغناطیسی درون ماده : (الف) در حالت عادی، (ب) در حضور یک میدان مغناطیسی به سمت راست

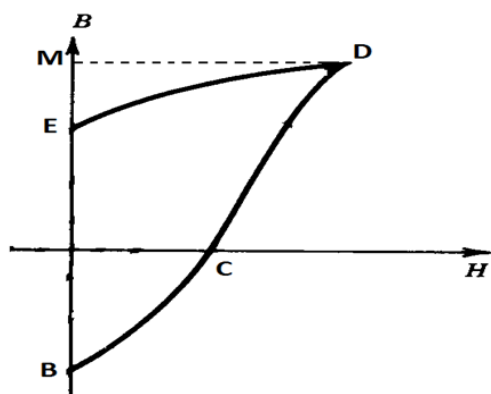
با تداوم افزایش شدت میدان خارجی، بیشتر حوزه ها هم راستا با میدان قرار می گیرند. افزایش بیشتر نیروی محرکه در این حالت فقط می تواند همان مقدار افزایش شاری را که در فضای آزاد امکانپذیر است (که مقدار آن ناچیز است)، در آهن برقرار کند. در این حالت اصطلاحاً گفته می شود آهن به اشباع رفته است زیرا دیگر نمی توان شار بیشتری درون آن برقرار کرد.

خنثی کردن خاصیت مغناطیسی شکل گرفته به دو طریق امکان پذیر است :

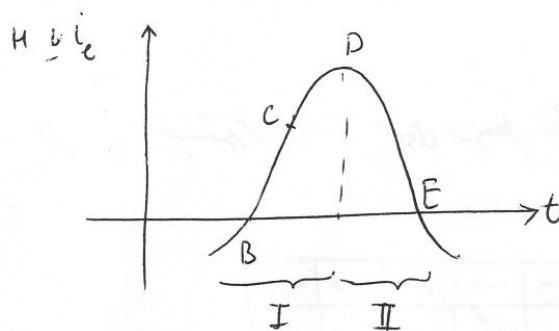
- ۱- اعمال نیروی محرکه مغناطیسی در جهت عکس
- ۲- ضربه مکانیکی بزرگ و گرما

۱-۱۵-۲- تلفات پسماند

سرعت فروپاشی و از بین رفتن نظم حوزه ها به اندازه سرعت نظم یافتن آن ها نیست. برای نیم سیکل مثبت جریان سینوسی (شکل ۱-۱۶)، تغییرات چگالی شار برحسب شدت میدان مغناطیسی مطابق شکل ۱-۱۷ می باشد. در هنگام تشکیل نظم شیب منحنی $B-H$ بیشتر از آن در هنگام فروپاشی نظم است. در فاصله B تا D انرژی برای نظم دادن حوزه ها صرف می شود و از D تا E انرژی حاصل از بی نظم شدن حوزه ها باز پس داده می شود.



شکل ۱۷-۱- حلقه هیستریزیس برای نیم سیکل مثبت جریان



شکل ۱۶-۱- نیم سیکل مثبت جریان سینوسی

انرژی در هریک از این مراحل از $\int H dB$ به دست می آید زیرا:

$$\begin{aligned} \text{انرژی انتقالی در فاصله زمانی } t_1 \text{ تا } t_2 : \int_{t_1}^{t_2} dt \text{ توان} \\ = \int_{t_1}^{t_2} e i dt \end{aligned}$$

$$e = N \frac{d\phi}{dt} \Rightarrow \int \frac{d\phi}{dt} N i dt = \int_{\phi_1}^{\phi_2} N i d\phi$$

$$\phi = BA, \quad i = \frac{Hl}{N} \Rightarrow W = \int_{B_1}^{B_2} N \cdot \frac{Hl}{N} A dB = lA \int_{B_1}^{B_2} H \cdot dB$$

$$\Rightarrow \text{انرژی انتقالی در واحد حجم} = \int H \cdot dB$$

بنابراین از شکل‌های ۱۶-۱ و ۱۷-۱ مشاهده می شود:

انرژی صرف شده در فاصله I برابر با مساحت سطح BCDEB

انرژی پس داده شده در فاصله II برابر با مساحت سطح DMED

تفاوت این دو انرژی، انرژی تلف شده در این نیم سیکل مثبت جریان است که معادل با مساحت سطح BCDEB می باشد.

با دنبال کردن روند مشابه برای نیم سیکل منفی جریان، نهایتاً نتیجه می شود که انرژی تلف شده در یک سیکل کامل جریان متناسب با مساحت سطح حلقه هیستریزیس است.

بنابراین تلفات انرژی هیستریزیس برابر با مساحت سطح داخل حلقه هیستریزیس می باشد. محققى به نام اشتینمتر با انجام آزمایش های متعدد نشان داد مساحت حلقه می تواند از رابطه تجربی $S = K_h B_{\max}^n$ به دست آید که در آن B_{\max} دامنه چگالی شار سینوسی و n ، K_h پارامترهای ثابت اند.

برای محاسبه تلفات توان هیستریزیس بایستی پارامتر زمان را در نظر گرفت:

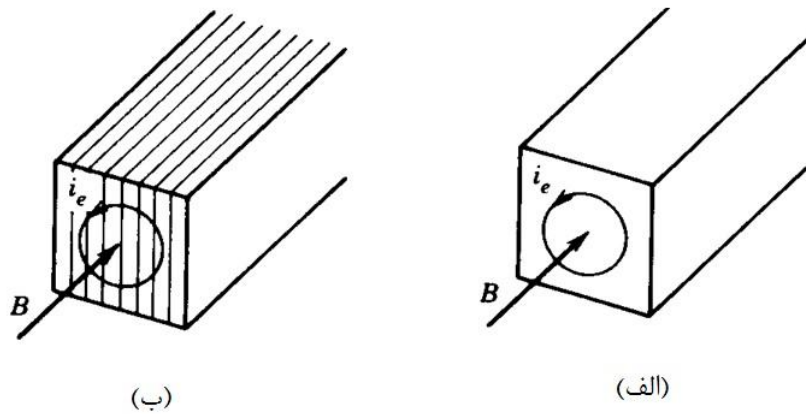
مساحت سطح داخل حلقه هیستریزیس \times فرکانس = تلفات توان هیستریزیس

بنابراین:

$$P_h = K_h f B_{\max}^n \quad 1.5 < n < 2.5 \quad (۳۵-۱)$$

۱-۱۶- تلفات جریان گردابی

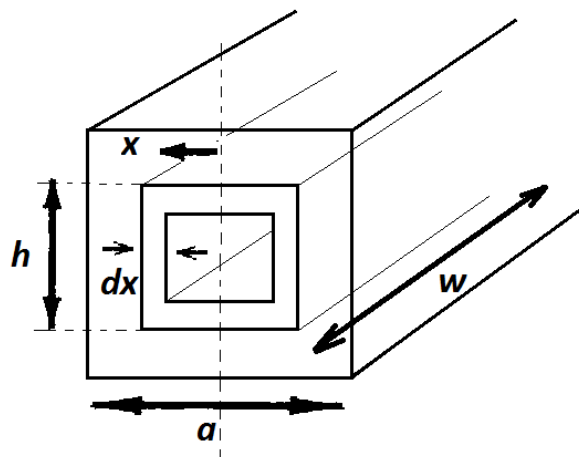
شار متغیر با زمان عبوری از یک هسته می تواند باعث القای ولتاژ در یک حلقه درون هسته گردد (شکل ۱-۱۸-الف). از آنجاییکه حلقه یک مسیر بسته است ولتاژ القایی جریان درون حلقه ایجاد می کند (i_e) که به جریان های گردابی معروف اند. این جریان می تواند باعث تلفات اهمی در هسته گردد چون مسیر مزبور دارای مقاومت است. برای کاهش تلفات جریان گردابی اضافه کردن درصد ناچیزی سیلیکون به آهن به منظور کم کردن مقاومت مسیر امکان پذیر است. اما روش کاربردی برای کاهش تلفات جلوگیری از شکل گرفتن جریان های گردابی، موزق کردن هسته در مسیر عبور شار مطابق شکل ۱-۱۸-ب می باشد. به این نوع هسته، هسته موزق گفته می شود.



شکل ۱۸-۱- شکل گیری جریان های گردابی درون هسته: (الف) هسته یکپارچه، (ب) هسته مورق

۱-۱۶-۱- محاسبه تلفات جریان گردابی

برای محاسبه تلفات جریان گردابی شکل زیر (شکل ۱۹-۱) را در نظر بگیرید:



شکل ۱۹-۱- شکل هندسی یک مکعب

مقاومت مسیر مستطیلی نشان داده شده در شکل و ولتاژ القایی درون آن به طریق زیر به دست می آیند:

$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{2(h+2x)}{Wdx}$$

$$e(t) = \frac{d\lambda}{dt}, \quad \lambda(t) = 2h x B_{\max} \sin \omega t \Rightarrow e(t) = 2hx B_{\max} \omega \cos \omega t$$

توان تلف شده در مسیر مزبور برابر است با:

$$dp = \frac{e^2(t)}{R} = \frac{2h^2 x^2 B_{max}^2 \omega^2 W \cos^2 \omega t dx}{\rho (h+2x)} \Rightarrow dp_{av} = \frac{h^2 x^2 B_{max}^2 \omega^2 W dx}{\rho (h+2x)}$$

$$\xrightarrow{a \ll h} dp_{av} = \frac{h x^2 B_{max}^2 \omega^2 W dx}{\rho}$$

$$h \times a \times w \text{ تلف شده در حجم } = P_{av} = \int_0^{a/2} dp_{av} = \frac{h a^3 B_{max}^2 \omega^2 W}{24 \rho}$$

$$\xrightarrow{\omega = 2\pi f} \frac{p_{av}}{haW} = \frac{\pi^2 a^2}{6\rho} B_{max}^2 f^2$$

بنابراین تلفات جریان گردابی در واحد حجم از رابطه زیر می تواند محاسبه شود:

$$P_e = K_e f^2 B_{max}^2 \quad (36-1)$$

تلفات هسته مجموعه تلفات هیستریزیس و تلفات جریان گردابی می باشد که در (35-1) و (36-1) روابط محاسبه آنها به دست آمد. بنابراین:

$$P_c = P_h + P_e = K_h f B_{max}^n + K_e f^2 B_{max}^2 \quad (37-1)$$

که در آن:

K_h, n, K_e : ثوابت اشتیمتز

f : فرکانس تغییرات شار سینوسی

B_{max} : دامنه چگالی شار سینوسی

ثوابت اشتیمتز از مدل کردن (37-1) با داده های تلفات هسته ورقه ها که توسط کارخانه سازنده برای شکل موج های شار سینوسی با دامنه و فرکانس های مختلف فراهم می شود، به دست می آیند.

۱-۱۷- تحریک سینوسی

هسته ای که به دور آن یک سیم پیچی پیچیده شده است در نظر بگیرید و فرض می کنیم تغییرات شار درون هسته سینوسی است:

$$\varphi = \varphi_{\max} \sin \omega t \quad (۱-۳۸)$$

که در آن:

φ_{\max} : دامنه شار در هسته

$\omega = 2 \pi f$: فرکانس زاویه ای

با استفاده از قانون فارادی، ولتاژ القایی دو سر سیم پیچی برابر است با:

$$\xrightarrow{\text{قانون فارادی}} e(t) = N \frac{d\varphi}{dt} = N \varphi_{\max} \omega \cos \omega t = E_{\max} \cos \omega t$$

$$E_{\text{rms}} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{N \omega \varphi_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{N \times 2\pi f \times \varphi_{\max}}{\sqrt{2}} = 4.44 N f \varphi_{\max}$$

نهایتاً:

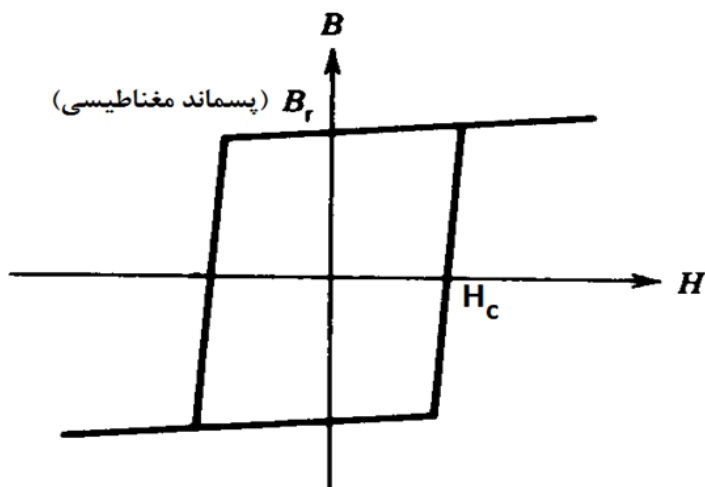
$$\Rightarrow E_{\text{rms}} = 4.44 N f \varphi_{\max} \quad (۱-۳۹)$$

این رابطه در تحلیل ماشین های AC کاربرد دارد.

۱-۱۸- مغناطیس دائم (آهن ربا)

در آهن نرم دوقطبی ها دارای استحکام مکانیکی نیستند. در نتیجه در اثر ارتعاشات مکانیکی، اعمال حرارت یا حضور یک میدان مغناطیسی معکوس کوچک، خاصیت مغناطیسی خود را از دست می دهند. در مواد مغناطیس دائم که معمولاً آلیاژهایی از مواد فرومگنتیک (آهن، نیکل و کبالت) هستند، ماده در دمای بالا و تحت میدان

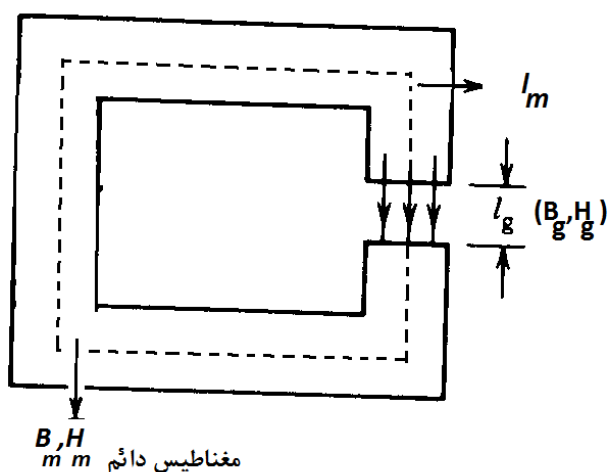
مغناطیسی قوی به صورت مغناطیس دائم درمی آیند و به سختی خاصیت مغناطیسی خود را از دست می دهند.
این گونه مواد دارای یک حلقه هیستریزیس پهن مطابق شکل ۲۰-۱ می باشند.



شکل ۲۰-۱- حلقه هیستریزیس در مواد مغناطیس دایم

۱-۱۷-۱- مغناطیس دائم با فاصله هوایی

هسته ای از جنس مغناطیس دایم با یک فاصله هوایی درون آن را مطابق شکل ۲۱-۱ در نظر بگیرید.



شکل ۲۱-۱- مغناطیس دایم با فاصله هوایی

با اعمال قانون مداری آمپر روی مسیر نقطه چین داریم:

$$H_m l_m + H_g l_g = 0$$

$$\Rightarrow H_m = \frac{-H_g l_g}{l_m} < 0$$

با صرفنظر کردن از اثر خمیدگی شار در فاصله هوایی می توان نتیجه گرفت:

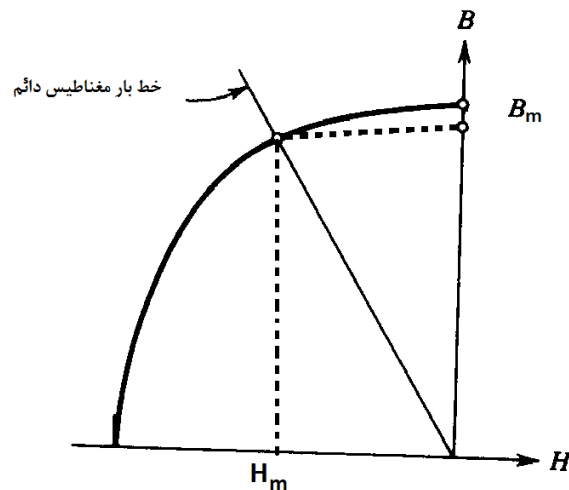
$$\begin{aligned} \varphi_g = \varphi_m &\Rightarrow B_g A_g = B_m A_m \Rightarrow B_m = \frac{B_g A_g}{A_m} = \frac{\mu_0 H_g A_g}{A_m} \\ &= \mu_0 \frac{-l_m H_m}{l_g} \frac{A_g}{A_m} = -\mu_0 \frac{A_g}{A_m} \times \frac{l_m}{l_g} H_m \end{aligned}$$

بنابراین:

$$\Rightarrow B_m = \left(-\mu_0 \frac{A_g}{A_m} \times \frac{l_m}{l_g}\right) H_m \quad (۴۰-۱)$$

معادله اخیر در حقیقت یک خط بار مغناطیسی را مشخص می نماید که از تقاطع آن با حلقه هیستریزیس مطابق

شکل ۱-۲۲، نقطه کار به دست می آید.



شکل ۱-۲۲- منحنی مغناطیسی شدن مغناطیس دائم با فاصله هوایی

فصل دوم: تبدیل انرژی در سیستم های الکترومکانیکی

۲-۱- مقدمه

مبدل های الکترومکانیکی از سه بخش تشکیل شده اند: سیستم الکتریکی، سیستم مکانیکی و میدان مغناطیسی رابط.

انرژی الکتریکی ورودی برابرست با مجموع انرژی مکانیکی خروجی، افزایش انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی رابط و تلفات انرژی.

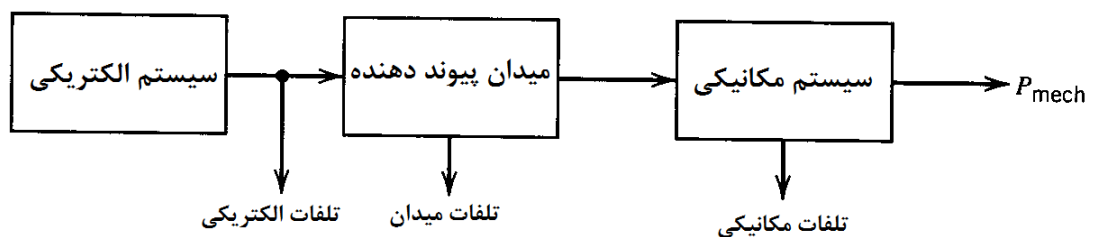
تلفات انرژی:

۱- تلفات مربوط به انرژی الکتریکی (تلفات مسی)

۲- تلفات مربوط به میدان مغناطیسی (تلفات هسته)

۳- تلفات مکانیکی شامل اصطکاک و بادزنی

بنابراین در یک سیستم الکترومکانیکی تبدیل انرژی از دیاگرام زیر طبیعت می کند.



شکل ۲-۱- سیستم الکترومکانیکی

از بحث بالا می توان نتیجه گرفت:

تفاضل انرژی الکتریکی ورودی و تلفات اهمی(مسی)	مجموع انرژی مکانیکی خروجی و تلفات مکانیکی (اصطکاک و بادزنی)	مجموع افزایش انرژی ذخیره شده در میدان پیوند دهنده و تلفات هسته
--	---	--

$$\Rightarrow d W_e = d W_m + d W_f \quad (1-2)$$

که در آن:

$d W_e$: افزایش جزئی انرژی الکتریکی خالص ورودی و برابر با تفاضل انرژی ورودی و تلفات مسی در فاصله زمانی dt

$d W_m$: افزایش جزئی انرژی مکانیکی و برابر با مجموع انرژی مکانیکی خروجی و تلفات مکانیکی در فاصله زمانی dt

$d W_f$: افزایش جزئی انرژی مغناطیسی و برابر با مجموع انرژی ذخیره شده در میدان رابط و تلفات هسته در فاصله زمانی dt

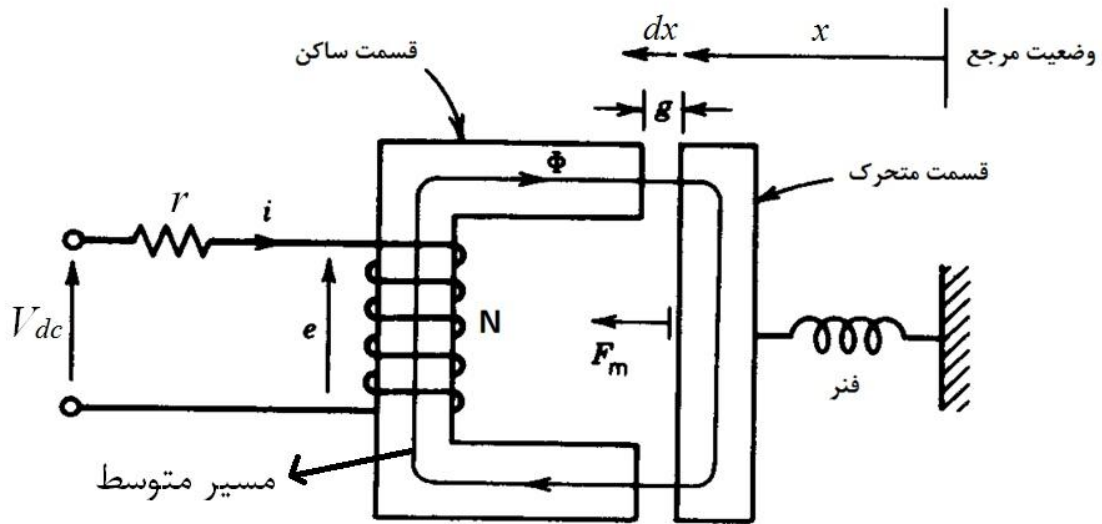
۲-۲- انرژی میدان مغناطیسی

سیستم الکترومکانیکی نشان داده شده در شکل ۲-۲ را در نظر بگیرید.

فرض کنید قسمت متحرک در حال سکون و طول فاصله هوایی g ثابت باشد. بنابراین تغییرات انرژی مکانیکی صفر

است ($d w_m = 0$) و از (۱-۲) داریم:

$$d W_e = d W_f \quad (2-2)$$



شکل ۲-۲- یک سیستم الکترومکانیکی نمونه

از طرف دیگر:

$$dW_e = e i dt = \frac{d\lambda}{dt} i dt = i d\lambda \quad (3-2)$$

از (۲-۲) و (۳-۲) نتیجه می شود:

$$dW_f = i d\lambda \Rightarrow W_f = \int_0^\lambda i d\lambda \quad (4-2)$$

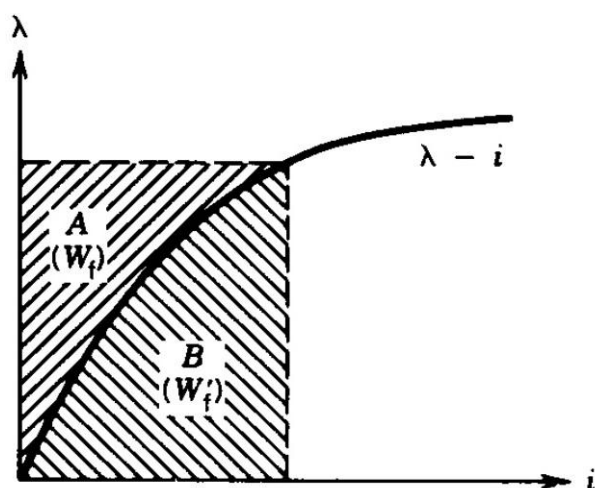
این رابطه نشان می دهد انرژی مغناطیسی ذخیره شده برابر سطح بالای نمودار $i - \lambda$ در شکل ۳-۲ می باشد. سطح زیر این نمودار را شبه انرژی (کوانرژی) می نامند.

$$W'_f = \int_0^i \lambda di = \lambda i - W_f \quad (5-2)$$

کوانرژی :

به علاوه، با توجه به شکل ۳-۲ مشاهده می شود که:

$$W'_f + W_f = \lambda i \quad (6-2)$$



شکل ۲-۳- مشخصه $\lambda-i$

در ادامه این زیربخش می خواهیم انرژی مغناطیسی ذخیره شده در ساختار مغناطیسی شکل ۲-۲ را به کمک رابطه (۴-۲) از روندی دیگر محاسبه نماییم. با نوشتن قانون آمپر روی مسیر متوسط در شکل مزبور داریم:

$$Ni = H_c l_c + H_g l_g \quad (۷-۲)$$

که در آن:

H_c و H_g : شدت میدان مغناطیسی در هسته و در فاصله هوایی

l_c و l_g : طول مسیر در هسته و در فاصله هوایی.

از طرف دیگر:

$$\lambda = N\phi = NAB \quad (۸-۲)$$

که در آن:

A : سطح مقطعی عبور شار

B : چگالی شار

از روابط (۴-۲)، (۷-۲) و (۸-۲) داریم:

$$W_f = \int i d\lambda = \int \frac{H_c l_c + H_g l_g}{N} N A dB = \int (H_c l_c + H_g l_g) A dB$$

در فاصله هوایی $B = \mu_0 H_g$ و بنابراین:

$$W_f = \left(\int H_c dB \right) A l_c + \int \frac{B}{\mu_0} l_g A dB = w_{fc} \times V_c + w_{fg} \times V_g$$

که در آن:

V_c و V_g : حجم ماده مغناطیسی و فاصله هوایی

$$w_{fc} = \int H_c \times dB \text{ : چگالی انرژی مغناطیسی ذخیره شده در هسته بر حسب } J/m^3$$

$$w_{fg} = \frac{B^2}{2\mu_0} \text{ : چگالی انرژی مغناطیسی ذخیره شده در فاصله هوایی بر حسب } J/m^3$$

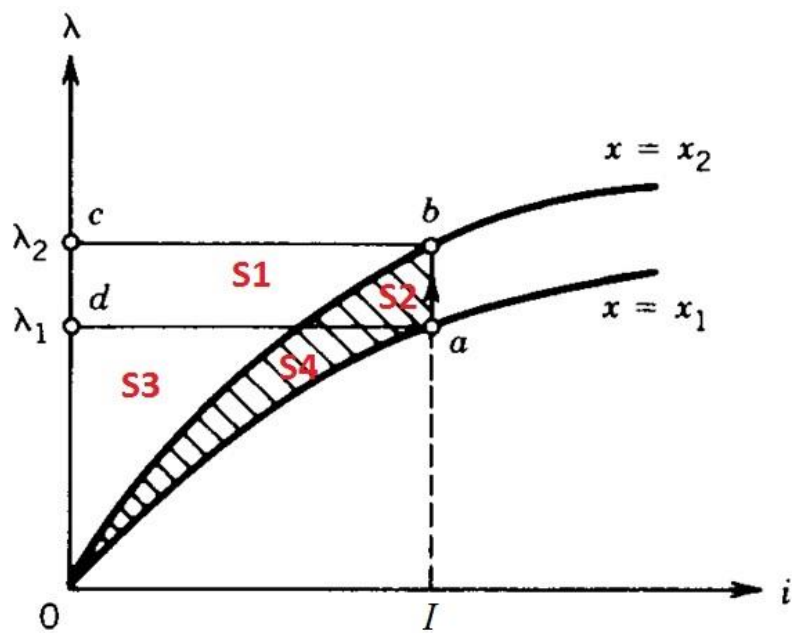
۲-۳- نیروی مکانیکی در سیستم های الکترومکانیکی

فرض کنید قطعه متحرک در شکل ۲-۲ حرکت می کند و از وضعیت $X = X_1$ به وضعیت $X = X_2$ می رود که $(X_2 > X_1)$. در انتهای این حرکت از آنجایی که طول فاصله هوایی در این موقعیت کم شده است، رلوکتانس کاهش یافته و در نتیجه اندوکتانس افزایش می یابد. بنابراین به ازای یک جریان ثابت چون شار متناسب با جریان است $(\lambda = L i)$ ، در وضعیت $X = X_2$ $(X_2 > X_1)$ شار بزرگتری داریم.

جریان سیم پیچی در حالت ماندگار در هر دو وضعیت X_1 و X_2 یکسان بوده و معادل $\frac{V_{dc}}{r}$ است. نقطه a مربوط به وضعیت X_1 و نقطه b مربوط به وضعیت X_2 است.

بررسی حرکت بی نهایت آرام

جریان در هر لحظه به مقدار حالت دائم خود می رسد، بنابراین مسیر حرکت مطابق شکل ۲-۴ می گردد.



شکل ۲-۴- حرکت بی نهایت آرام

$$dW_e = e idt = \frac{d\lambda}{dt} idt = id\lambda = I(\lambda_2 - \lambda_1) = abcd \text{ سطح} = s1 + s2$$

$$dW_f = oad, obc \text{ تفاضل سطوح} = (s1+s3)-(s3+s4)=s1-s4$$

با توجه به روابط بدست آمده داریم:

$$dW_m = dW_e - dW_f = S_{abcd} + S_{oad} - S_{obc} = s2 + s4 = S_{oab}$$

از (۲-۵) و شکل (۲-۴) واضح است که S_{oab} برابر با تغییرات کوانرژی است:

$$\Rightarrow dW_m = dW'_f \quad (۲-۹)$$

از رابطه مزبور و با توجه به اینکه $dW_m = Fdx$ می توان نتیجه گرفت:

$$F = \frac{dW'_f}{dx} = \left. \frac{\partial W'_f(i, x)}{\partial x} \right|_{i=const.} \quad (۲-۱۰)$$

بررسی حرکت بی نهایت سریع

برای این نوع حرکت، شار پیوندی در حین حرکت ثابت می ماند زیرا شار نمی تواند تغییرات ناگهانی داشته باشد و مسیر حرکت مطابق شکل ۵-۲ می گردد.

چون تغییرات شار صفر است بنابراین:

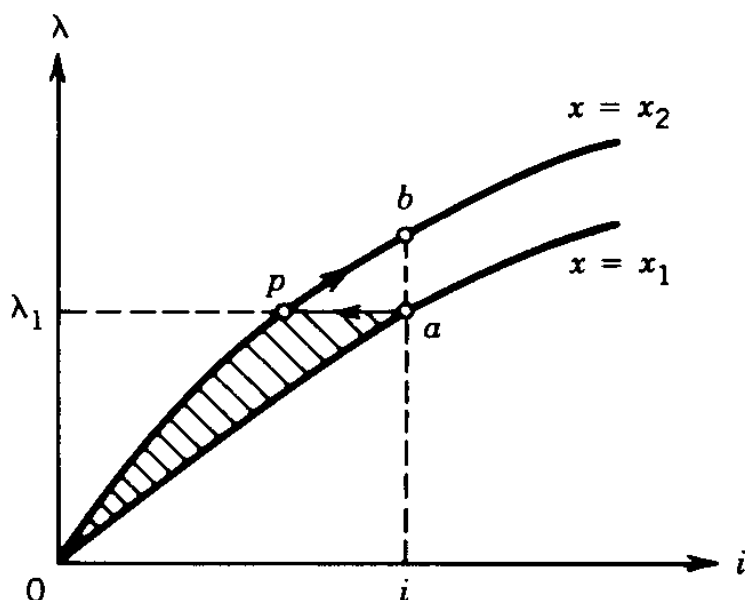
$$dW_e = i d\lambda = 0 = dW_f + dW_m \quad (۱۱-۲)$$

از (۱-۲) و (۱۱-۲) داریم:

$$\Rightarrow dW_m = -dW_f \quad (۱۲-۲)$$

این رابطه از شکل ۵-۲ نیز می تواند استنتاج شود که در آن تغییرات انرژی مکانیکی قسمت هاشورخورده می باشد. بنابراین:

$$F = -\frac{dW_f}{dx} = -\frac{\partial W_f(\lambda, x)}{\partial x} \Big|_{\lambda=const.} \quad (۱۳-۲)$$



شکل ۵-۲- حرکت بی نهایت سریع

رابطه مزبور به این معنی است که در حرکت بسیار سریع انرژی میدان مغناطیسی کاسته می شود و این کاهش انرژی مغناطیسی به کار تبدیل می گردد. به عبارت دیگر انرژی مکانیکی کلاً توسط انرژی میدان مغناطیسی تأمین می شود.

حرکت معمولی

برای حرکت معمولی مسیر حرکت مسیری بین دو مسیر نشان داده شده در شکل‌های ۴-۲ و ۵-۲ است که قابل پیش بینی نیست. با توجه به شکل های ۴-۲ و ۵-۲ تغییرات انرژی مکانیکی معادلی سطحی است که بین دو منحنی و مسیر حرکت احاطه شده است. از آنجائیکه در محاسبه نیرو، جابجایی بسیار کوچک است (به اندازه dx)، منحنی های نشان داده شده در شکل‌های مزبور خیلی بهم نزدیک هستند و مسیر حرکت روی اندازه سطح خیلی تاثیرگذار نیست. به عبارت دیگر، نیرو یا گشتاور به مسیر حرکت بستگی ندارد، بلکه به نقطه کار ابتدایی و انتهایی وابسته است. بنابراین محاسبه نیرو از هر دو روش کوانترژی (۲-۱۰) و انرژی (۲-۱۳) به جواب‌های یکسان می رسد.

مثال: مشخصه $i - \lambda$ یک سیستم الکترومکانیکی به قرار زیر است:

$$i = \left(\frac{\lambda g}{0.09}\right)^2 \quad 0 < i < 4^A, \quad 3^{\text{cm}} < g < 10^{\text{cm}}$$

که در آن g طول فاصله هوایی است.

نیروی مکانیکی اعمال شده به قطعه متحرک را در وضعیت $i = 3^A$ و $g = 5^{\text{cm}}$ به دست آورید.

روش اول: (حل به کمک (۲-۱۰))

$$\lambda = \frac{0.09 i^{\frac{1}{2}}}{g}$$

$$w'_f = \int_0^i \lambda di = \int_0^i \frac{0.09 i^{\frac{1}{2}}}{g} di = \frac{0.09}{g} \frac{2}{3} i^{3/2} \quad (J)$$

$$f_m = -\frac{\partial w'_f(i, x)}{\partial x} \Big|_{i = \text{const.}} \xrightarrow{x=g} f_m = -\frac{\partial w'_f(i, g)}{\partial g} \Big|_{i=\text{const.}} = -0.09 \frac{2}{3} i^{3/2} \frac{1}{g^2}$$

$$\xrightarrow{g=0.05, i=3} f_m = -0.09 \times \frac{2}{3} \times 3^{3/2} \times \frac{1}{0.05^2} = -124.7 \text{ N}$$

روش دوم: (حل به کمک رابطه (۲-۱۳))

$$w_f = \int_0^i i \, d\lambda = \int_0^i \left(\frac{\lambda g}{0.09}\right)^2 d\lambda$$

$$\Rightarrow w_f = \frac{g^2}{0.09^2} \frac{\lambda^3}{3}$$

$$f_m = -\frac{\partial w_f(\lambda, x)}{\partial x} \Big|_{\lambda=\text{cte}} \xrightarrow{x=g} = -\frac{\partial w_f(\lambda, g)}{\partial g} \Big|_{\lambda = \text{ثابت}}$$

$$\Rightarrow f_m = -\frac{\lambda^3 \times 2 \, g}{3 \times 0.09^2} \quad (*)$$

$$\lambda = \frac{0.09 \, i^{1/2}}{g} \quad \frac{i=3}{g=0.05} \Rightarrow \lambda = \frac{0.09 \times 3^{1/2}}{0.05} = 3.12 \text{ wb. turn}$$

$$\xrightarrow{(*)} f_m = -\frac{3.12^2 \times 2 \times 0.05}{3 \times 0.09^2} = -124.7 \text{ N}$$

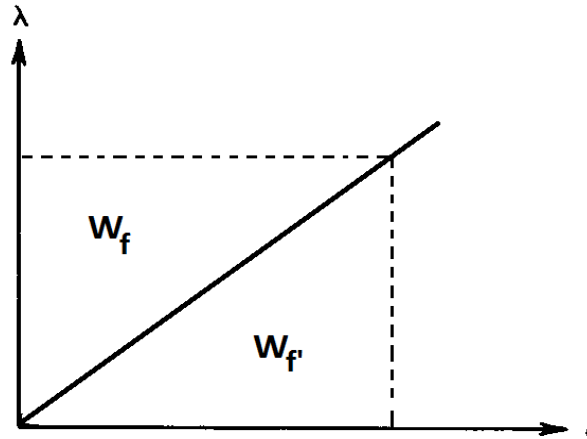
می بینیم از هر دو روش به جواب های یکسانی می رسیم.

استفاده از روش مناسب بستگی به مسئله دارد و ممکن است یکی از روش ها برای مسئله خاصی آسان تر باشد. علامت منفی در نیروی محاسبه شده به علت آنست که نیرو در جهت افزایش اندوکتانس یا کاهش رلوکتانس مثبت است.

۲-۴- سیستم خطی

اگر ساختار مغناطیسی دارای فاصله هوایی باشد و رلوکتانس فاصله هوایی در مقایسه با رلوکتانس هسته خیلی بزرگ باشد، شار کم و در نتیجه نقطه کار در قسمت پایین مشخصه $i - \lambda$ در شکل ۲-۳ می باشد. بنابراین می

توان این گونه فرض کرد که مشخصه $\lambda - i$ خطی است (شکل ۶-۲). به اینچنین ساختاری اصطلاحاً سیستم خطی گفته می شود.



شکل ۶-۲- نمودار $\lambda - i$ برای یک سیستم خطی

در یک سیستم خطی:

$$\lambda = L(x) i \quad (۱۴-۲)$$

که در آن $L(x)$ اندوکتانس سیم پیچی است که فقط به طول فاصله هوایی بستگی دارد نه به مقدار جریان.

برای یک سیستم خطی، انرژی مغناطیسی ذخیره شده در ساختار از (۴-۲) و (۱۴-۲) بدست می آید:

$$w_f = \int_0^i i \, d\lambda = \int_0^\lambda \frac{\lambda}{L(x)} \, d\lambda = \frac{1}{2} \frac{\lambda^2}{L(x)} = \frac{1}{2} L(x) i^2 \quad (۱۵-۲)$$

با داشتن انرژی مغناطیسی ذخیره شده بدست آمده در (۱۵-۲)، به کمک (۱۳-۲) نیروی وارده بر سیستم به صورت

زیر محاسبه می شود:

$$f_m = - \frac{\partial w_f(\lambda, x)}{\partial x} \Big|_{\lambda = \text{ثابت}} = \frac{\lambda^2}{2 L^2(x)} \frac{dL(x)}{dx} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx} \quad (۱۶-۲)$$

از شکل ۶-۲ واضح است که در یک سیستم خطی انرژی و کوانرژی برابرست و بنابراین از (۱۵-۲) داریم:

$$w_f = w'_f = \frac{1}{2} L(x) i^2 \quad (۱۷-۲)$$

حال از (۱۰-۲) و (۱۷-۲) می توان برای محاسبه نیرو رابطه ای دیگر علاوه بر (۱۶-۲) بدست آورد:

$$f_m = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(x)}{dx} \quad (۱۸-۲)$$

۲-۵- ماشین های الکتریکی دوار

ساختار مغناطیسی یک ماشین الکتریکی دوار نشان داده شده در شکل ۷-۲ را در نظر بگیرید. در حالت ایستا (سیستم انرژی مکانیکی خروجی ندارد)، انرژی الکتریکی ورودی کلاً در میدان مغناطیسی ذخیره می شود. در این حالت:

$$d W_f = d W_e = e_s i_s dt + e_r i_r dt \quad (۱۹-۲)$$

با توجه به $e = \frac{d\lambda}{dt}$ ، (۱۹-۲) به صورت زیر خلاصه می شود:

$$\xrightarrow{e = \frac{d\lambda}{dt}} d W_f = i_s d\lambda_s + i_r d\lambda_r \quad (۲۰-۲)$$

به خاطر وجود فاصله هوایی در ساختار مغناطیسی می توان فرض کرد که سیستم رفتار خطی دارد. بنابراین:

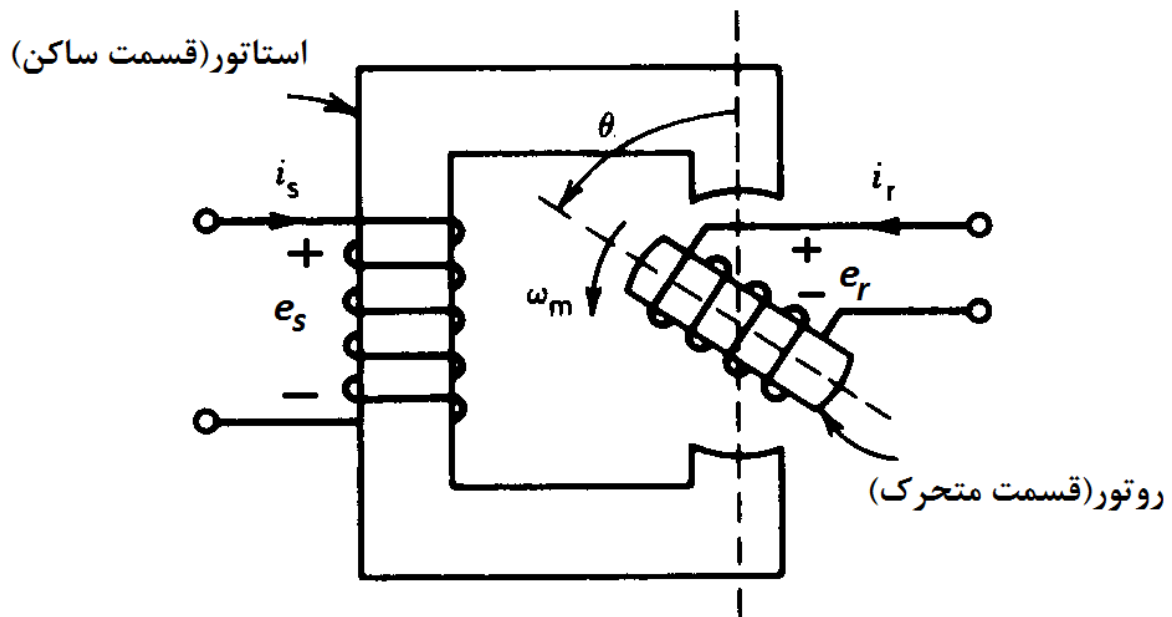
$$\lambda_s = L_{ss} i_s + L_{sr} i_r \quad (۲۱-۲)$$

$$\lambda_r = L_{rs} i_s + L_{rr} i_r$$

که در آن:

L_{ss} و L_{rr} : اندوکتانس های خودی سیم پیچ های استاتور و روتور

L_{rs} و L_{sr} : اندوکتانس های متقابل دو سیم پیچی



شکل ۷-۲- یک سیستم الکترومکانیکی دوار

اندوکتانس های داده شده در (۲۱-۲) در حقیقت تابعی از θ (زاویه بین محورهای مغناطیسی استاتور و رتور در شکل ۷-۲) هستند.

به دلیل تقارن در ساختار مغناطیسی شکل ۷-۲، $L_{sr} = L_{rs}$ و از (۲۰-۲) و (۲۱-۲) داریم:

$$dW_f = i_s d(L_{ss} i_s + L_{sr} i_r) + i_r d(L_{sr} i_s + L_{rr} i_r)$$

$$= L_{ss} i_s di_s + L_{rr} i_r di_r + L_{sr} d(i_s i_r)$$

$$\Rightarrow W_f = L_{ss} \int_0^{i_s} i_s di_s + L_{rr} \int_0^{i_r} i_r di_r + L_{sr} \int_0^{i_s, i_r} d(i_s i_r)$$

بنابراین برای ساختار مغناطیسی شکل ۷-۲، انرژی مغناطیسی ذخیره شده از رابطه زیر می تواند محاسبه شود:

$$\Rightarrow W_f = 1/2 L_{ss} i_s^2 + 1/2 L_{rr} i_r^2 + L_{sr} i_s i_r \quad (22-2)$$

با توجه به شکل ۶-۲ برای یک سیستم خطی، $W_f' = W_f$ و در نتیجه:

$$W_f' = 1/2 L_{ss} i_s^2 + 1/2 L_{rr} i_r^2 + L_{sr} i_s i_r \quad (23-2)$$

برای یک حرکت دورانی در مقایسه با حرکت خطی:

$$f \text{ (نیرو)} \rightarrow T \text{ (گشتاور)}, \quad x \text{ (جابجایی)} \rightarrow \theta \text{ (زاویه دوران)}$$

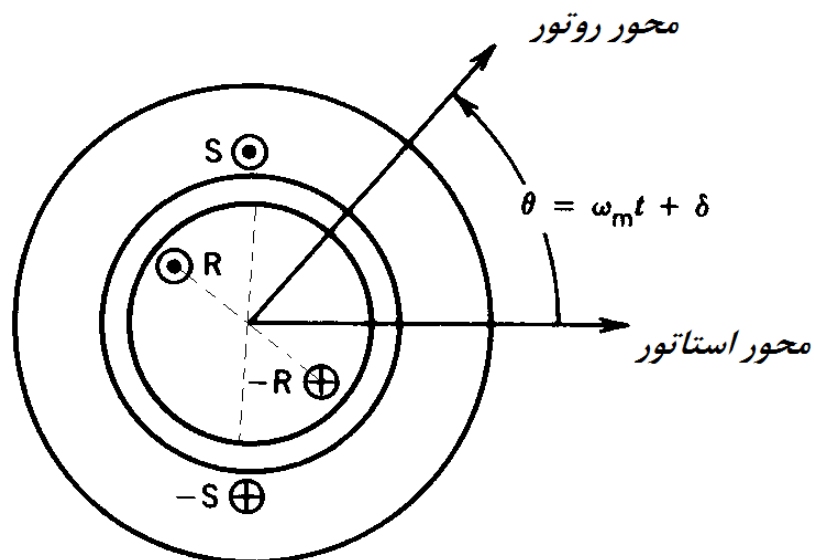
از (۱۰-۲) و (۲۳-۲) گشتاور تولیدی به دست می آید:

$$\Rightarrow T = 1/2 i_s^2 \frac{dL_{ss}}{d\theta} + 1/2 i_r^2 \frac{dL_{rr}}{d\theta} + i_s i_r \frac{dL_{sr}}{d\theta} \quad (24-2)$$

در این رابطه دو جمله اول تغییر اندوکتانس های خودی نسبت به وضعیت مکانی روتور (θ) می باشد و مجموع آن ها گشتاور رلوکتانسی نامیده می شود. جمله سوم به خاطر تغییرات اندوکتانسی متقابل بین رتور و استاتور بوجود می آید و ناشی از گشتاور الکترومغناطیسی است.

۶-۲- ماشین های الکتریکی دوار با روتور استوانه ای

سطح مقطعی از یک ماشین الکتریکی دوار ۲ قطبی ساده در شکل ۸-۲ نشان داده شده است.



شکل ۸-۲- سطح مقطع یک ماشین الکتریکی دوار دو قطبی با رتور استوانه ای

با صرف نظر از اثر شیارها، رلوکتانس مسیر به وضعیت مکانی θ بستگی ندارد و بنابراین اندوکتانس‌های خودی L_{ss} و L_{rr} در (۲۴-۲) توابعی مستقل از θ هستند. بنابراین این رابطه به صورت زیر ساده می‌شود:

$$T = i_s i_r \frac{dL_{sr}}{d\theta} \quad (25-2)$$

فرض می‌کنیم تغییرات اندوکتانس سینوسی باشد و جریان اعمالی به سیم پیچی‌ها نیز توابعی سینوسی باشند:

$$L_{sr} = M \cos \theta$$

$$i_s = I_{sm} \cos \omega_s t \quad (26-2)$$

$$i_r = I_{rm} \cos(\omega_r t + \alpha)$$

که در آن:

$$M: \text{مقدار ماکزیمم اندوکتانس متقابل}, \quad \omega_m: \text{سرعت زاویه ای رتور}, \quad \theta = \omega_m t + \delta$$

با جای گذاری (۲۶-۲) در (۲۵-۲) داریم:

$$\Rightarrow T = -I_{sm} I_{rm} M \cos \omega_s t \cos(\omega_r t + \alpha) \sin(\omega_m t + \delta) \quad (27-2)$$

گشتاور لحظه‌ای به‌دست‌آمده می‌تواند با استفاده از بسط مثلثاتی داده‌شده در (۲۸-۲) به چهار جمله مطابق (۲-۲۹) تبدیل شود.

$$\sin \alpha \cos \beta = 1/2 [\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)] \quad (28-2)$$

$$\begin{aligned} T = & -\frac{I_{sm}I_{rm}M}{4} [\sin\{(\omega_m + (\omega_s + \omega_r))t + \alpha + \delta\} \\ & + \sin\{(\omega_m - (\omega_s + \omega_r))t - \alpha + \delta\} \\ & + \sin\{(\omega_m + (\omega_s - \omega_r))t - \alpha + \delta\} \\ & + \sin\{(\omega_m - (\omega_s - \omega_r))t + \alpha + \delta\}] \end{aligned} \quad (29-2)$$

سرعت‌هایی که در آن امکان وجود گشتاور متوسط غیرصفر است عبارتند:

$$|\omega_m| = |\omega_s \pm \omega_r| \quad (30-2)$$

در ادامه دو حالت که داشتن گشتاور متوسط غیرصفر برای آنها امکان پذیر است، بررسی می‌نماییم.

الف: جریان روتور یک جریان DC (I_R) و سرعت چرخش همان سرعت سنکرون

$$\omega_r = 0, \quad \omega_m = \omega_s, \quad \alpha = 0$$

در این حالت گشتاور لحظه‌ای از (۲۹-۲) عبارت است از:

$$T = -\frac{I_{sm}I_R M}{2} \{\sin(2\omega_s t + \delta) + \sin\delta\} \quad (31-2)$$

و مقدار گشتاور متوسط برابرست با:

$$T_{av} = -\frac{I_{sm}I_R M}{2} \sin\delta \quad (32-2)$$

تبدیل انرژی دائماً در سرعت سنکرون صورت می‌گیرد. (اساس کار موتورهای سنکرون)

ب: عبور جریان های AC با فرکانسهای مختلف از سیم‌پیچی‌های استاتور و رتور و $\omega_m = \omega_s - \omega_r$

از (۲۹-۲) گشتاور لحظه‌ای برابر است با:

$$T = -\frac{I_{sm}I_{rm}M}{4} [\sin(2\omega_s t + \alpha + \delta) + \sin(-2\omega_r t - \alpha + \delta) \quad (۳۳-۲)$$

$$+\sin(2\omega_s t - 2\omega_r t - \alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta)]$$

و مقدار گشتاور متوسط عبارت است از:

$$T_{av} = -\frac{I_{sm}I_{rm}M}{4} \sin(\alpha + \delta) \quad (۳۴-۲)$$

در این حالت اصطلاحاً گفته می‌شود موتور تحت سرعت آسنکرون می‌چرخد. (اساس کار موتورهای آسنکرون)

۳-۱- مقدمه

دستگاه هایی که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی (یا برعکس) تبدیل می کند، ماشین های الکتریکی نامیده می شوند. فرآیند تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی یا برعکس را تبدیل انرژی الکترومکانیکی گویند. اگر سیستم الکتریکی AC باشد، ماشین الکتریکی نیز AC یا جریان متناوب گفته می شود و اگر DC باشد ماشین الکتریکی DC یا جریان مستقیم است.

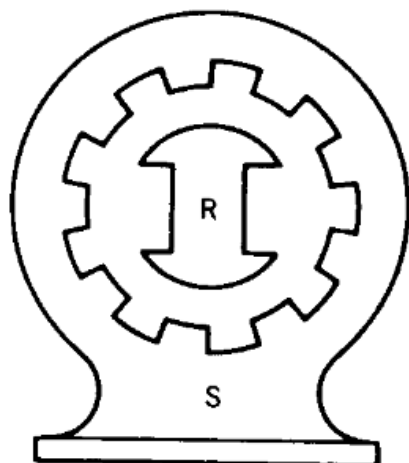
اگر ماشین الکتریکی انرژی را به انرژی مکانیکی تبدیل کند، موتور الکتریکی نامیده می شود و در صورتی که انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل کند ژنراتور گفته می شود.

در حالت موتوری از طریق سیستم الکتریکی جریان وارد هادی ها می شود. این هادی ها درون میدان مغناطیسی قرار گرفته اند و به این خاطر به آنها نیرو وارد می گردد و باعث حرکت هادی ها می شود. به علاوه، حرکت هادی ها درون میدان باعث القاء ولتاژ می گردد. بنابراین در حالت موتوری هم با نیرو و هم با ولتاژ القاء شده مواجه هستیم.

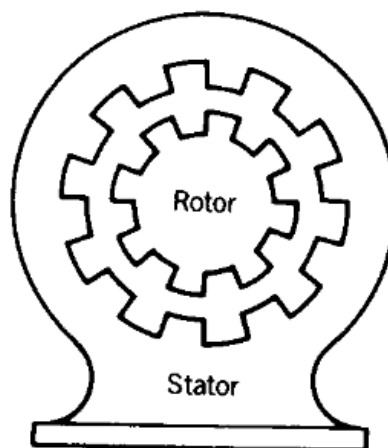
در حالت ژنراتوری، قسمت متحرک ماشین (رتور) توسط محرک اولیه چرخانده می شود. به خاطر وجود میدان در هادی های متحرک ولتاژ القاء می شود. در صورتی که پایانه های ژنراتور به بار وصل شود، جریان در سیم پیچی ها جاری می شود و در نتیجه گشتاوری در خلاف جهت گشتاور اعمالی به رتور وارد می شود.

۳-۲- ساختار ماشین های الکتریکی

دو بخش اساسی ماشین الکتریکی عبارتند از قسمت ساکن یا استاتور (Stator) و قسمت متحرک یا رتور (Rotor) که بین دو این قسمت فاصله هوایی وجود دارد. استاتور و رتور از مواد فرومغناطیسی هستند و به خاطر کاهش تلفات هسته به صورت مورق ساخته می شود. دو نوع رتور وجود دارد: رتور استوانه ای یا قطب صاف و رتور قطب برجسته که در شکل ۳-۱ تفاوت آنها مشاهده می شود.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۱ - انواع ماشین های الکتریکی از نظر ساختمان: (الف) رتور استوانه‌ای یا قطب صاف، (ب) رتور قطب برجسته

در اکثر ماشین های الکتریکی محیط داخلی استاتور و سطح خارجی رتور شیارهای متعددی تعبیه می شود، که درون آن ها هادی ها جاسازی می شود. با اتصال مناسب هادی ها سیم پیچی شکل می گیرد. در ماشین DC، به سیم پیچی هایی که در آنها ولتاژ القاء می شود سیم پیچی آرمیچر گفته می شود. به سیم پیچی هایی که از آن ها جریان می گذرد تا میدان مغناطیسی (شار اصلی) پدید آید، سیم پیچی تحریک یا میدان گفته می شود.

ماشین های الکتریکی دوار انواع مختلفی دارند:

ماشین های الکتریکی DC (موتور و ژنراتور)

ماشین سنکرون (موتور یا ژنراتور)

ماشین القایی (موتور یا ژنراتور)

ماشین های مخصوص :

آهن ربای دائم، ماشین های پله ای، سوئیچ رلوکتانس، هیستریزیس و ...

۳-۳- ماشین جریان مستقیم (DC)

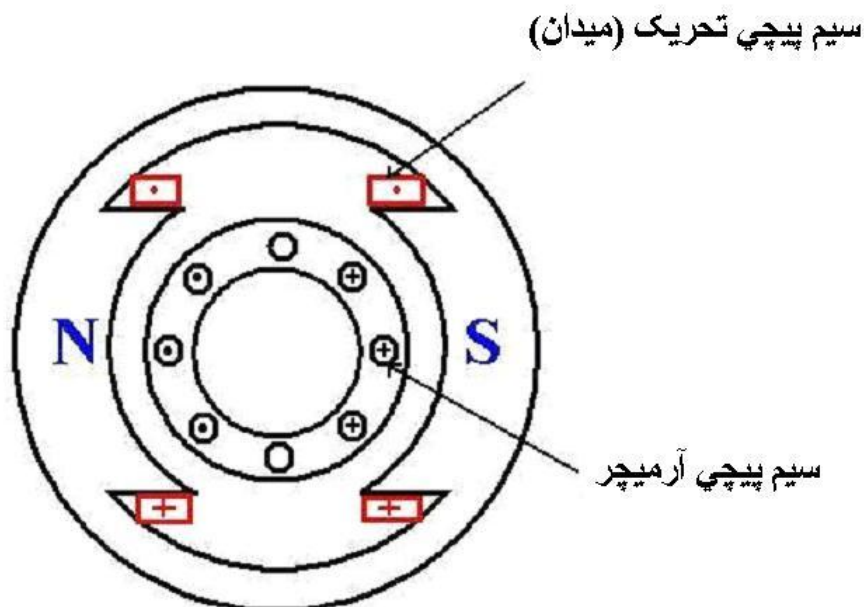
در این ماشین ها سیم پیچی تحریک (میدان) روی استاتور (قسمت ساکن ماشین) قرار دارد و رتور حاوی سیم پیچی آرمچر است. ولتاژ القاء شده در آرمچر ولتاژی است متناوب (AC) و برای یکسو کردن آن از مجموعه کموتاتور- جاروبک استفاده می شود. امروزه به خاطر وجود یکسوسازها ژنراتور DC کمتر مورد توجه قرار می گیرد ولی موتورهای DC به شدت در صنایع کاربرد دارد. (برای مثال سیستم حمل و نقل)

در شکل ۳-۲ که یک ماشین DC دوقطبی را نشان می دهد، استاتور حاوی دو قطب برجسته است که به دور آن ها سیم پیچی تحریک (میدان) پیچیده می شود. قطب ها می توانند شامل یک یا دو نوع سیم پیچی تحریک باشند:

۱- سیم پیچی تحریک موازی یا شنت

۲- سیم پیچی تحریک سری

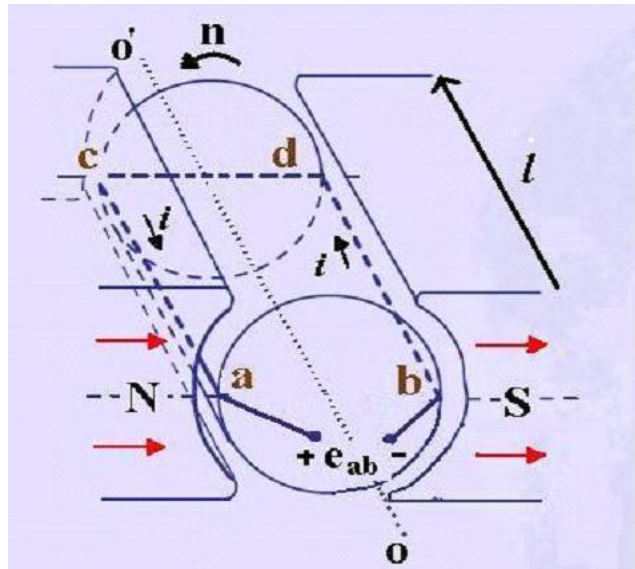
این سیم پیچی ها می توانند به روش های مختلفی تحریک شوند و به این ترتیب به مشخصه های گوناگون موتوری (گشتاور- سرعت) یا ژنراتوری (ولتاژ- جریان) دست یافت.



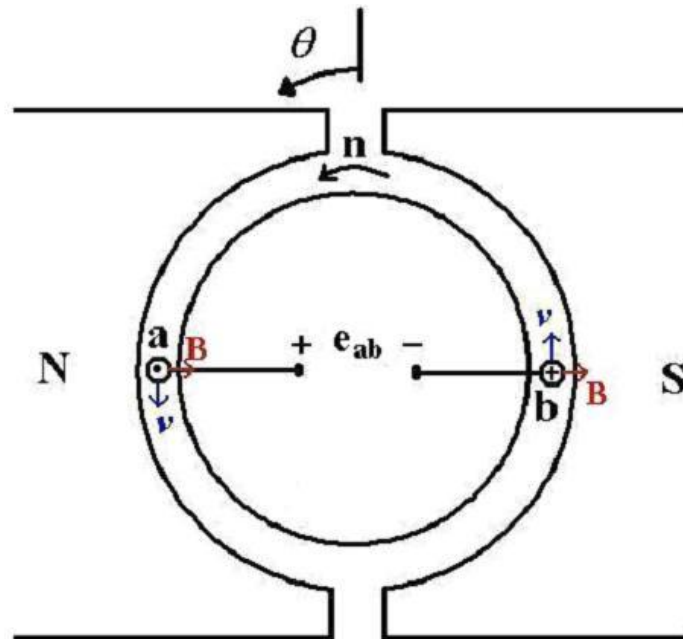
شکل ۳-۲- برش عرضی ماشین DC دوقطبی

۳-۴- ولتاژ القایی در حلقه گردان

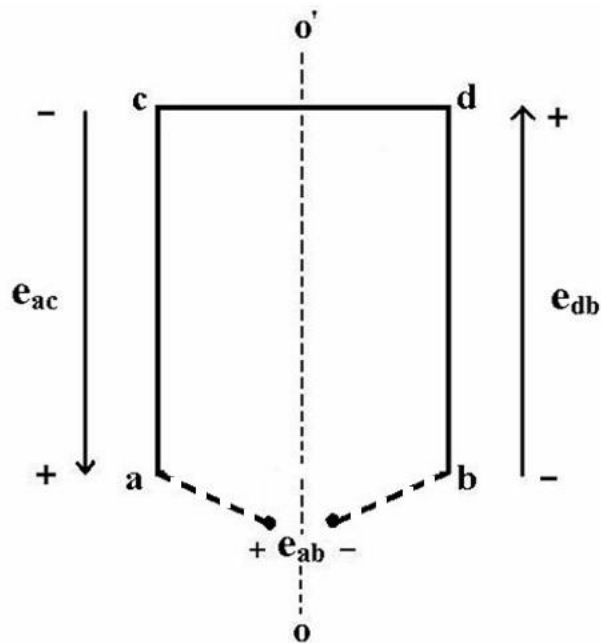
یک حلقه روی آرمیچر مطابق شکل ۳-۳ را در نظر بگیرید. این حلقه با نگاه به ماشین از جلو و از بالا مطابق شکل های ۳-۴ و ۳-۵ مشاهده می شود. توزیع چگالی شار در فاصله هوایی در شکل ۳-۶ نشان داده شده است و مشاهده می شود چگالی شار فقط مولفه شعاعی دارد و مقدار آن مادامی که زیر یک قطب هستیم ثابت است.



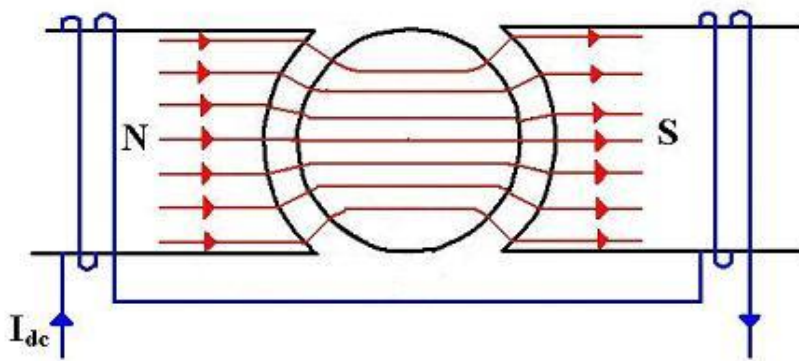
شکل ۳-۳- یک حلقه در ماشین دو قطبی



شکل ۳-۴- حلقه در موقعیت $\theta = 90^\circ$ با نگاه از راستای OO'



شکل ۳-۵- ولتاژهای القایی روی حلقه با نگاه به حلقه از بالای ماشین



شکل ۳-۶- توزیع چگالی شار در فاصله هوایی

برای موقعیت نشان داده شده در شکل ۳-۴ ، ولتاژ در هر قسمت از حلقه (شکل ۳-۵) بر پایه رابطه زیر می‌تواند محاسبه شود:

$$e = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l} \quad (۱-۳)$$

که در آن v بردار سرعت، B بردار چگالی شار و l بردار طول است. همانطور که در فصل اول بحث شد، بردار طول در راستای هادیست و جهت آن به گونه‌ای انتخاب می‌شود که زاویه ای کوچکتر از ۹۰ درجه با حاصل ضرب خارجی بردارهای سرعت و چگالی شار $(\vec{v} \times \vec{B})$ پیدا کند. در این صورت نوک بردار طول پلاریته مثبت ولتاژ القایی را

نشان می‌دهد. بر مبنای این قرارداد، ولتاژهای القایی روی سه هادی نشان داده شده در شکل ۳-۵ در ادامه بدست می‌آید.

قسمت db: حاصل ضرب برداری $(\vec{v} \times \vec{B})$ در شکل ۳-۴ برای هادی سمت راست، برداری است عمود بر صفحه به سمت داخل. بنابراین، پلار تیه ولتاژ القاء شده مطابق شکل ۳-۵ در طرف d مثبت است و اندازه آن ولتاژ برابر است با vBl

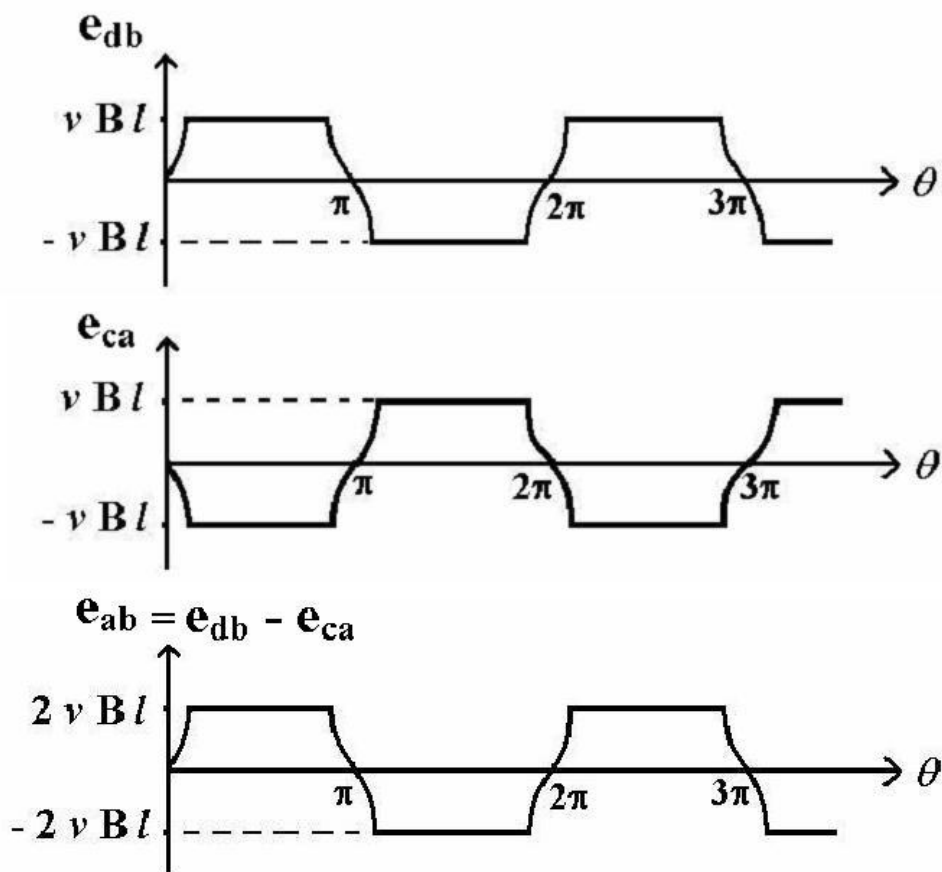
قسمت ca: برای هادی سمت چپ در شکل ۳-۴، حاصل ضرب برداری $(\vec{v} \times \vec{B})$ برداری است عمود بر صفحه و به سمت خارج. در نتیجه پلار تیه ولتاژ القاء شده مطابق شکل ۳-۵ برعکس آن برای قسمت db می‌گردد (اندازه ولتاژ در این حالت مشابه قسمت db است و برابرست با vBl)

قسمت dc: با توجه به شکل ۳-۴، برای این قسمت حاصل ضرب برداری $(\vec{v} \times \vec{B})$ برداری است عمود بر صفحه (راستای هادی) در حلیکه بردار l در راستای هادیست. بنابراین مقدار ولتاژ القاء شده روی آن برطبق (۳-۱) صفر است.

با توجه به ولتاژهای القایی در سه بخش مزبور و نوشتن kvl در حلقه داریم:

$$e_{ab} = e_{db} - e_{ca} = 2vBl \quad (۳-۲)$$

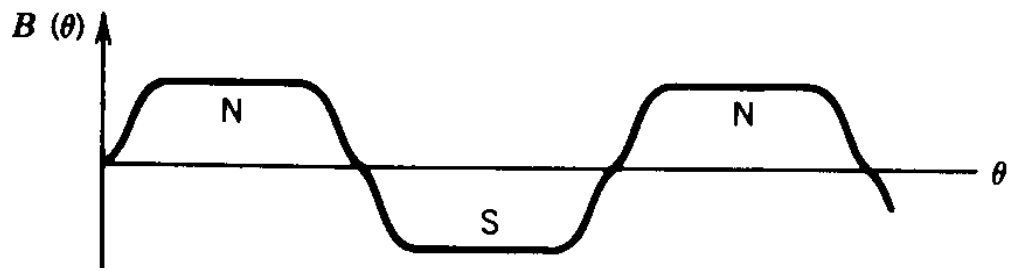
وقتی حلقه نشان داده شده در شکل ۳-۴ به اندازه 180° بچرخد، پلار تیه ولتاژ القاء شده در قسمت های مزبور برعکس می‌شوند. بنابراین ولتاژهای القایی بر حسب موقعیت روتور (θ) در بخش های مختلف و حلقه مطابق شکل ۳-۷ می‌گردد.



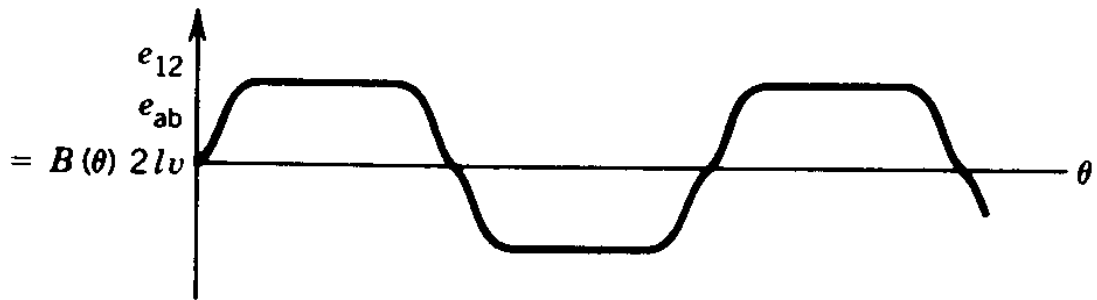
شکل ۳-۷- ولتاژهای القایی در قسمت db، ca و حلقه (e_{ab})

۳-۵- شکل گیری و تکامل ماشین های DC

ولتاژ القایی در حلقه ولتاژی متناوب (AC) است و شکل موجی همگون با شکل موج توزیع چگالی شار در فاصله هوایی دارد (شکل ۳-۸). برای بیرون کشیدن این ولتاژ متناوب از داخل ماشین می توان از مجموعه حلقه های لغزان و جاروبک مطابق شکل ۳-۹ استفاده کرد. در شکل ۳-۹، S_a و S_b حلقه های لغزان و B_1 و B_2 جاروبک های ساکن هستند. حلقه های لغزان که از جنس مس هستند روی محور ماشین نصب شده اند و با سرعت حرکت آرمیچر می چرخند. این حلقه ها با دو سیم مسی به سرهای a و b متصل شده اند. جاروبک های از جنس کربن هستند و یک تماس نرم با حلقه های دارند. جاروبک های در فضا ثابتند.

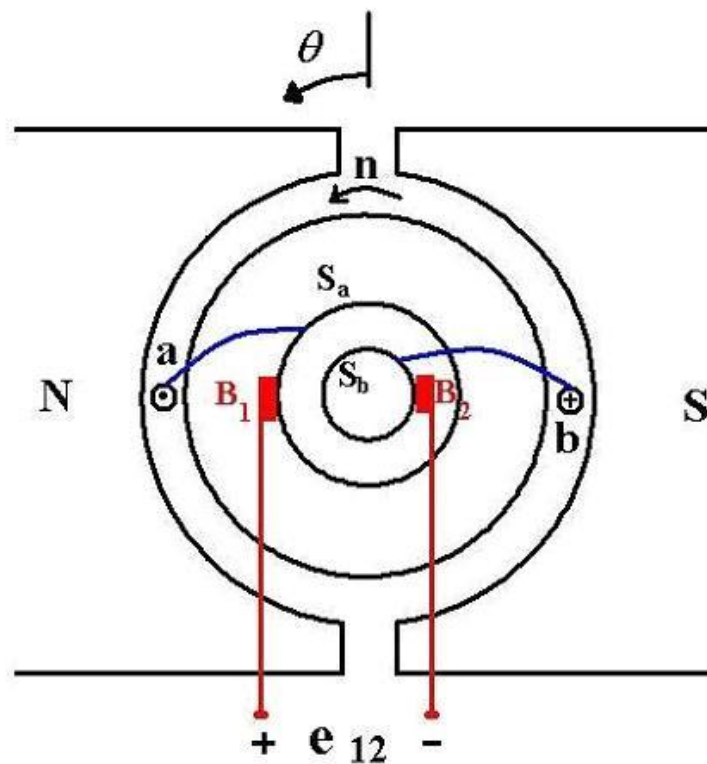


(الف)



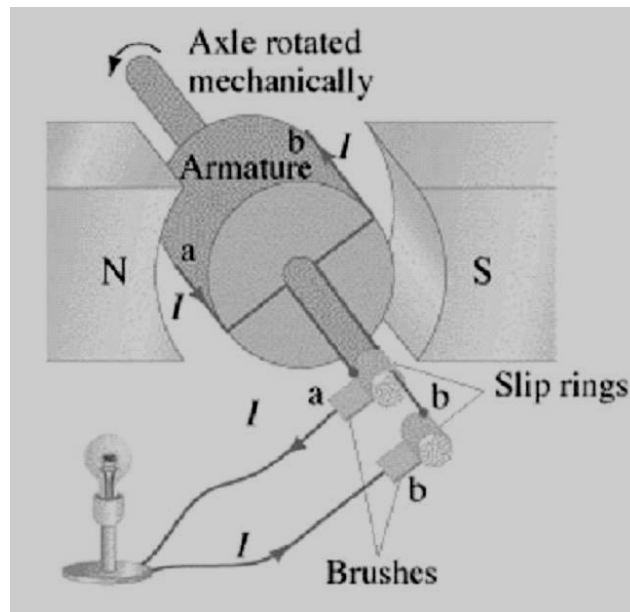
(ب)

شکل ۳-۸- شکل موج توزیع چگالی شار در فاصله هوایی و ولتاژ القایی درون حلقه: (الف) توزیع چگالی شار، (ب) ولتاژ القایی



شکل ۳-۹- برش عرضی ماشین دوقطبی با یک حلقه به همراه حلقه های لغزان و جاروبک

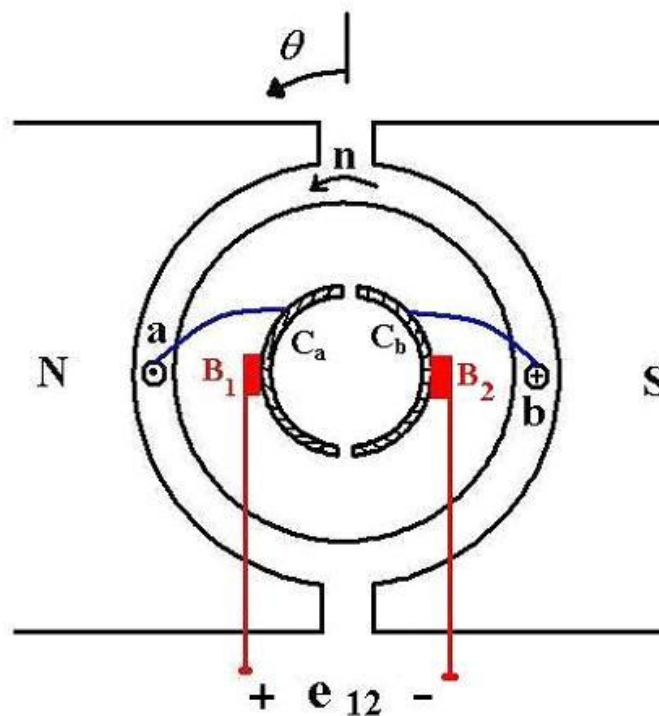
شکل ۳-۱۰ تصویر بهتری از موقعیت این حلقه ها و جاروبک ها نشان می دهد.



شکل ۳-۱۰- نمایشی از حلقه های لغزان و جاروبک ها

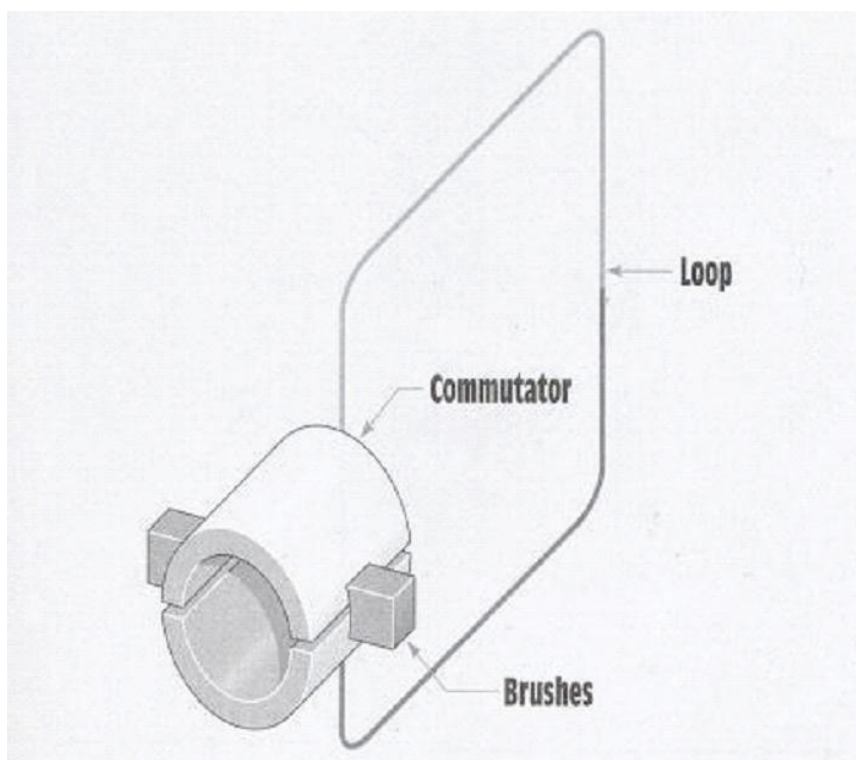
برای یکسو کردن ولتاژ القایی به جای حلقه های لغزان مطابق شکل ۳-۱۱ از تیغه های کموتاتور استفاده می شود.

(تیغه های کموتاتور : C_a , C_b)



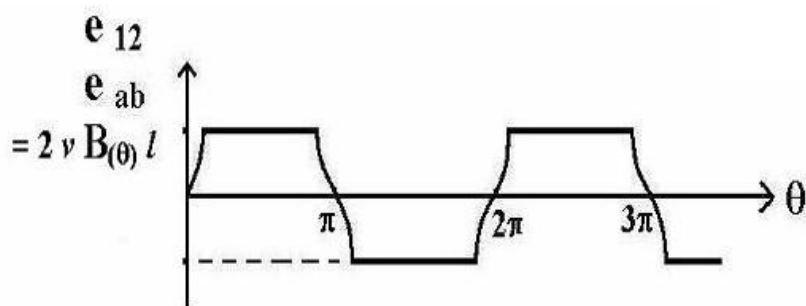
شکل ۳-۱۱- برش عرضی ماشین دوقطبی با یک حلقه به همراه کموتاتور و جاروبک

تیغه های کموتاتور قطعه هایی از مس هستند که به وسیله موادی عایقی از یکدیگر جدا شده اند. شکل ۳-۱۲ با ارایه نمایش سه بعدی درک بهتری از موقعیت جاروبک های ایجاد می نماید.

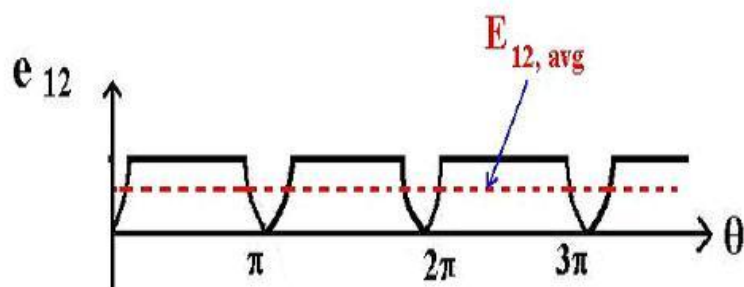


شکل ۳-۱۲- نمایشی از تیغه های کموتاتور و جاروبک ها برای یک حلقه

اگرچه ولتاژ القایی در حلقه e_{ab} ولتاژی است AC ولی ولتاژ پایانه های جاروبک ها (e_{12}) یکسویه یا DC است (شکل ۳-۱۳). اتصال جاروبک ها به کموتاتورها به گونه ایست که با چرخش آرمیچر ولتاژ در یک نیم دور چرخش $(0-\pi)$ برابر e_{ab} و در نیم دور بعدی $(\pi, 2\pi)$ برابر با e_{ba} که معادل $-e_{ab}$ است. به عبارت دیگر برای چرخش رتور در خلاف جهت عقربه های ساعت (CCW) همواره پایانه جاروبک B_1 به سر مثبت حلقه و پایانه جاروبک B_2 به سر منفی حلقه متصل است و بنابراین ولتاژ استخراجی همواره مثبت است.



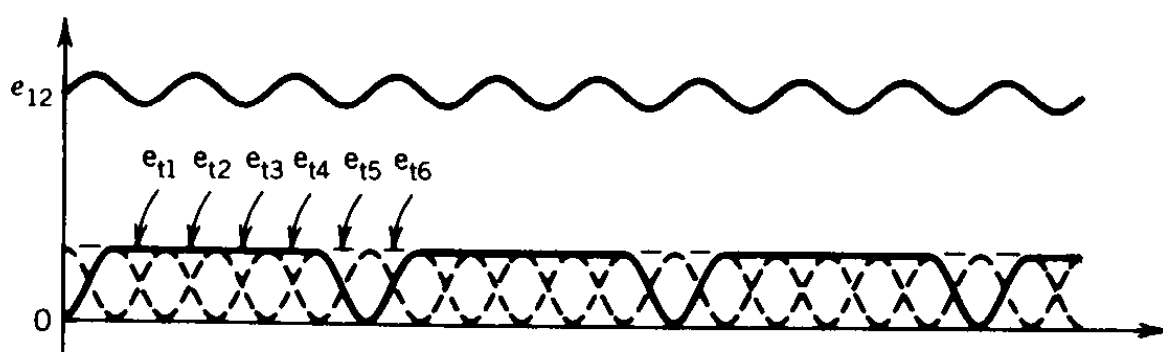
ولتاژ استخراچی با
حلقه های لغزان



ولتاژ استخراچی با
تیغه های کموتاتور

شکل ۳-۱۳- ولتاژهای تولیدی با دو روش متفاوت

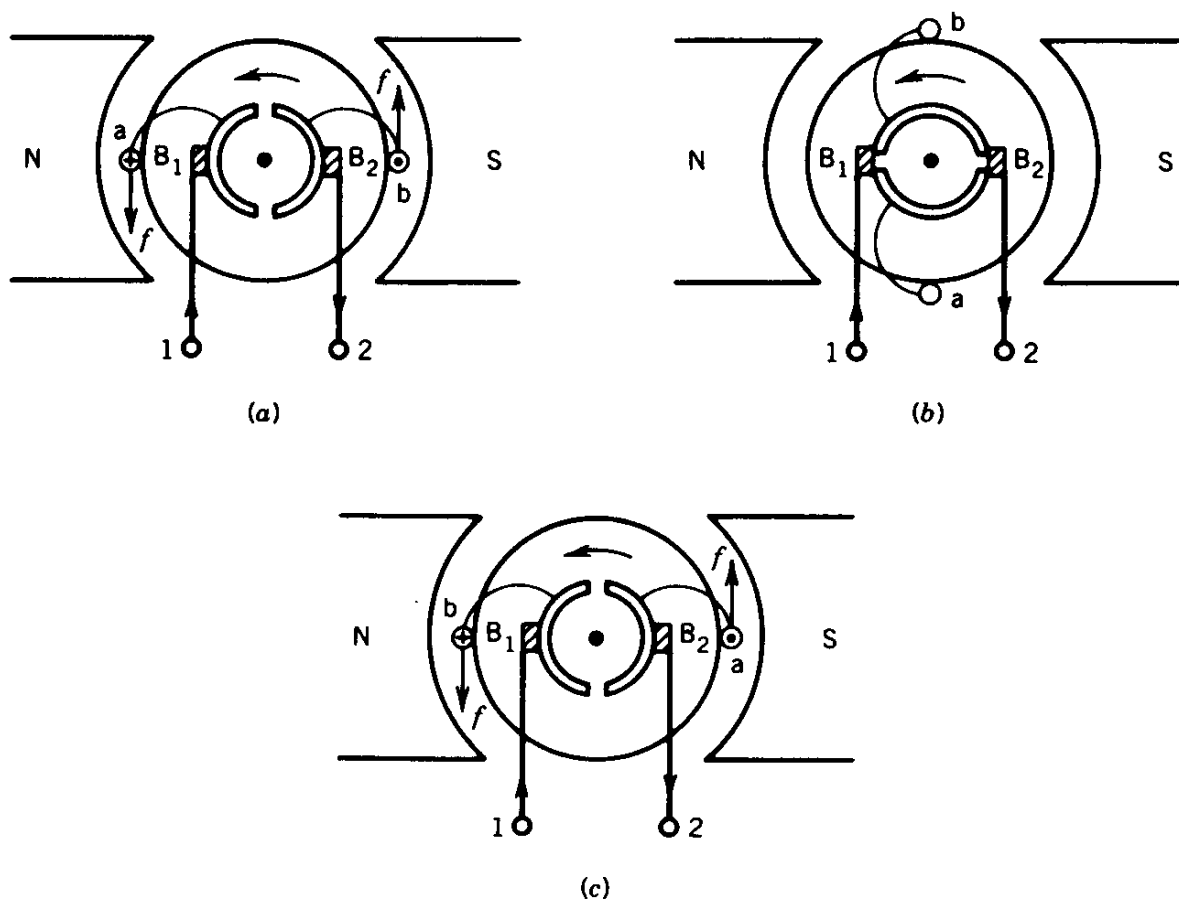
این شکل موج ولتاژ به شدت اعوجاج دارد و دندانه دندانه است. در ماشین DC واقعی تعداد زیادی از حلقه‌ها در شیارهای گوناگون پیرامون رتور (آرمیچر) قرار داده می‌شوند و با اتصال آن‌ها به کمک تیغه‌های کموتاتور سیم‌پیچی آرمیچر شکل می‌گیرد. با این کار مطابق شکل ۳-۱۴ ولتاژ DC نسبتاً مطلوبی در دو سر جاروبک‌ها حاصل می‌گردد.



شکل ۳-۱۴- ولتاژ تولیدی به کمک چندین حلقه

توجه شود در موتورهای DC جریان توسط جاروبک‌ها به سیم‌پیچی آرمیچر تزریق می‌شود. در حالی که در ژنراتورهای DC جریان از طریق جاروبک‌ها به مصرف‌کننده (بار) هدایت می‌شود. به علاوه، یک حلقه وقتی که

لبه‌هایش از منطقه میان دو قطب می‌گذرد، توسط جاروبک‌ها اتصال کوتاه می‌شود زیرا در این محل ولتاژ القایی در هادی‌ها صفر است. شکل ۳-۱۴ تأیید می‌کند محل جاروبک‌ها بایستی زیر قطب‌های اصلی باشد.



شکل ۳-۱۵ - جابجایی جریان در یک حلقه بوسیله ی کموتاتور و جاروبک‌ها: (a) حرکت جریان از a به b درون حلقه، (b) حلقه در ناحیه ی خنثی و اتصال کوتاه شدن آن، (c) حرکت جریان از b به a درون حلقه

۳-۶- سیم پیچی آرمیچر

هادی‌های جاسازی‌شده در شیارهای رتور به روش‌های مختلفی می‌توانند به یکدیگر مرتبط شوند تا سیم‌پیچی آرمیچر شکل گیرد. قبل از بیان بعضی از این روش‌ها آشنایی با واژه‌های حلقه، کلاف و سیم‌پیچی لازم است.

حلقه (Turn) :

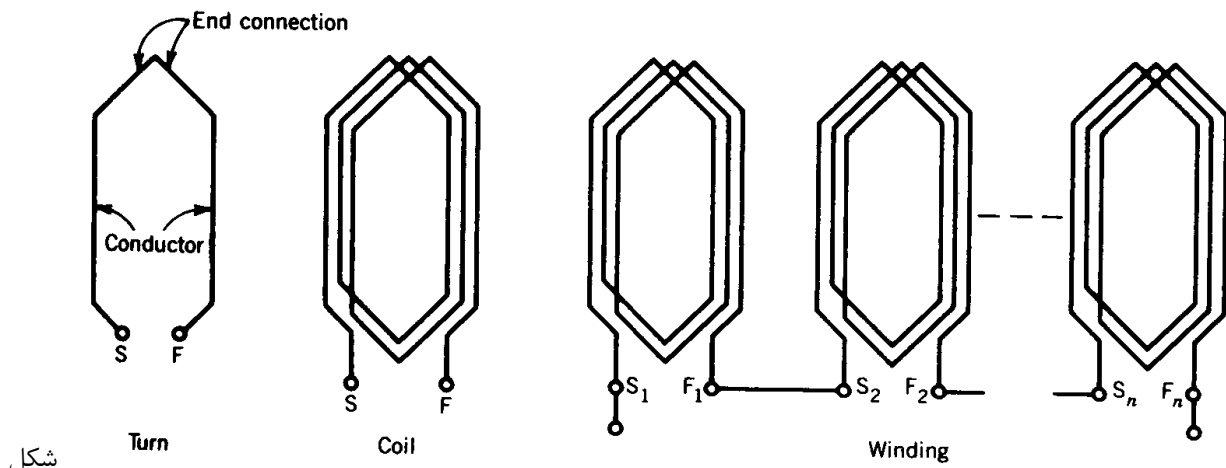
حلقه مشتمل بر دو هادی است که یک سر آنها به کمک اتصال انتهایی به یکدیگر متصل شده‌اند.

کلاف (Coil) :

از اتصال چند حلقه به صورت سری با یکدیگر به وجود می آید.

سیم پیچی (Winding) :

از اتصال چند کلاف به صورت سری با یکدیگر، سیم پیچی حاصل می شود.

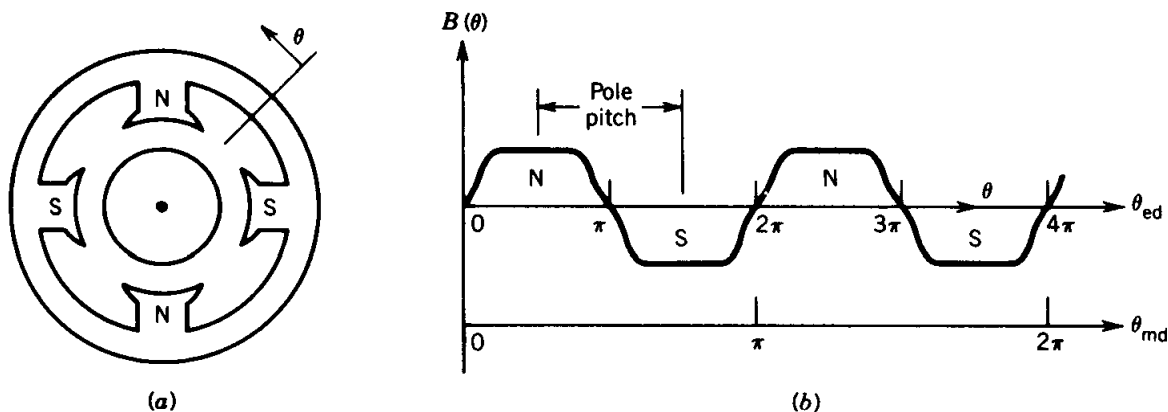


۳-۱۵- حلقه ، کلاف و سیم پیچی

تعریف زوایای الکتریکی و مکانیکی

ماشین های DC بزرگ معمولاً بیش از دو قطب دارند و برای انجام بحث ها نیاز به تعریف زاویه الکتریکی داریم. زاویه اندازه گیری در فضا درجه مکانیکی نامیده می شود و با θ_{md} نشان داده می شود. در مقابل زاویه اندازه گیری در دوره های تناوب ولتاژ القایی، درجه الکتریکی نامیده می شود و با θ_{ed} نمایش داده می شود. شکل ۳-۱۶ تفاوت این دو درجه بندی را برای یک ماشین چهار قطبی نشان می دهد. در حالت کلی، برای یک ماشین P قطبی ارتباط بین این درجه ها با رابطه زیر بیان می شود:

$$\theta_{ed} = \frac{P}{2} \theta_{md} \quad (3-3)$$



شکل ۳-۱۶- زاویه ی مکانیکی و الکتریکی: (a) ماشین چهار قطبی، (b) توزیع چگالی شار

فاصله میان دو قطب مجاور گام قطب (Pole Pitch) نامیده می شود و داریم:

$$\text{یک گام قطبی} = \frac{360^\circ \text{ md}}{p} \quad (3-4)$$

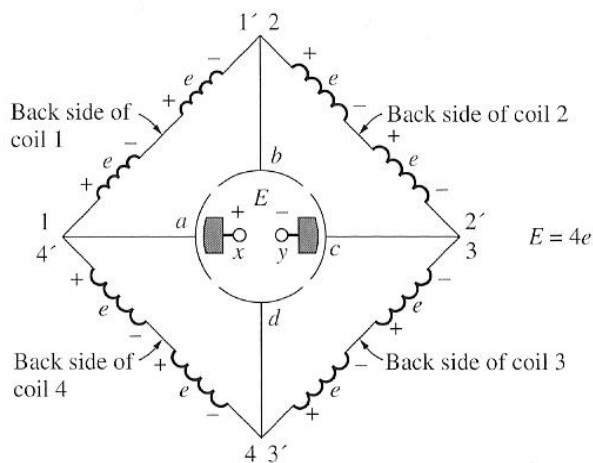
دو لبه هر کلاف در دو شیار (Slot) روی سطح خارجی رتور جاسازی شده است. فاصله لبه هر کلاف گام کلاف (Coil Pitch) گفته می شود.

کلاف با گام کامل (Full Pitch) \rightarrow یک گام قطبی = یک گام کلاف

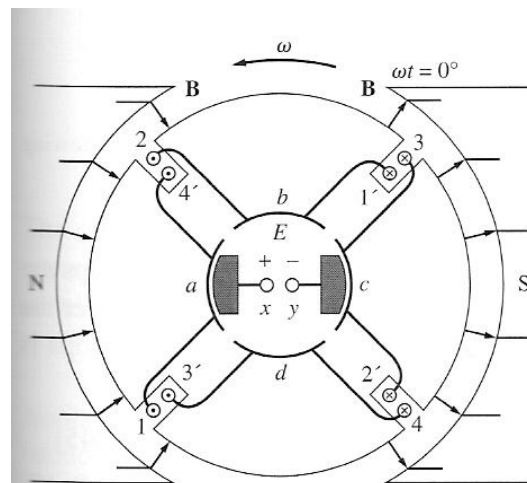
کلاف با گام کسری یا کوتاه (Short Pitch) \rightarrow یک گام قطبی < یک کلاف گام

استفاده از گام کسری در ماشین های AC مرسوم است.

برای آشنایی بیشتر با سیم پیچی آرمیچر ماشین DC دوقطبی با چهار حلقه در شکل ۳-۱۷ را در نظر بگیرید. اتصال مداری هادی ها به همراه ولتاژ القایی روی آنها در شکل ۳-۱۸ نشان داده شده است. ولتاژ تولیدی در یک لحظه که بین دو جاروبک ظاهر می شود $E = 4e$ می باشد که بزرگتر از آن در ماشین با یک حلقه (شکل ۳-۱۱) است. به علاوه، از این شکل مشاهده می شود که کلاف ها در دو مسیر موازی جریان در هر لحظه مرتب می شوند.

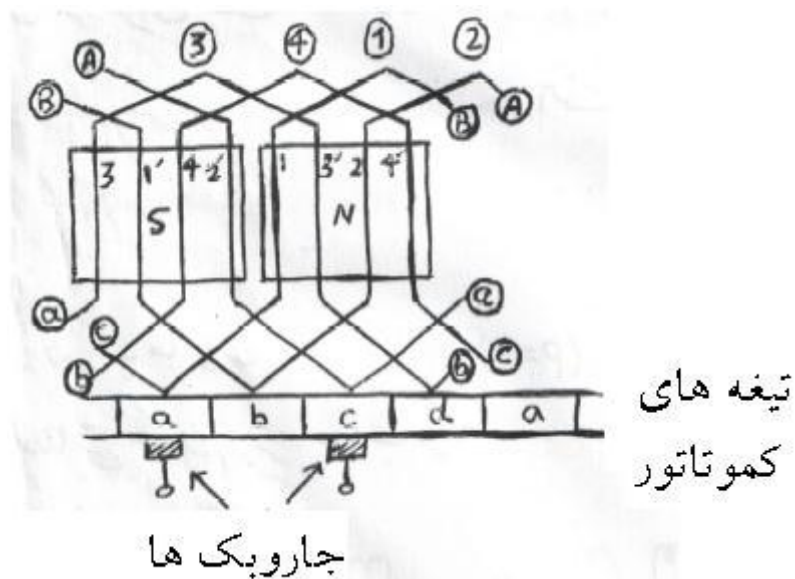


شکل ۳-۱۸- اتصال مداری هادی ها



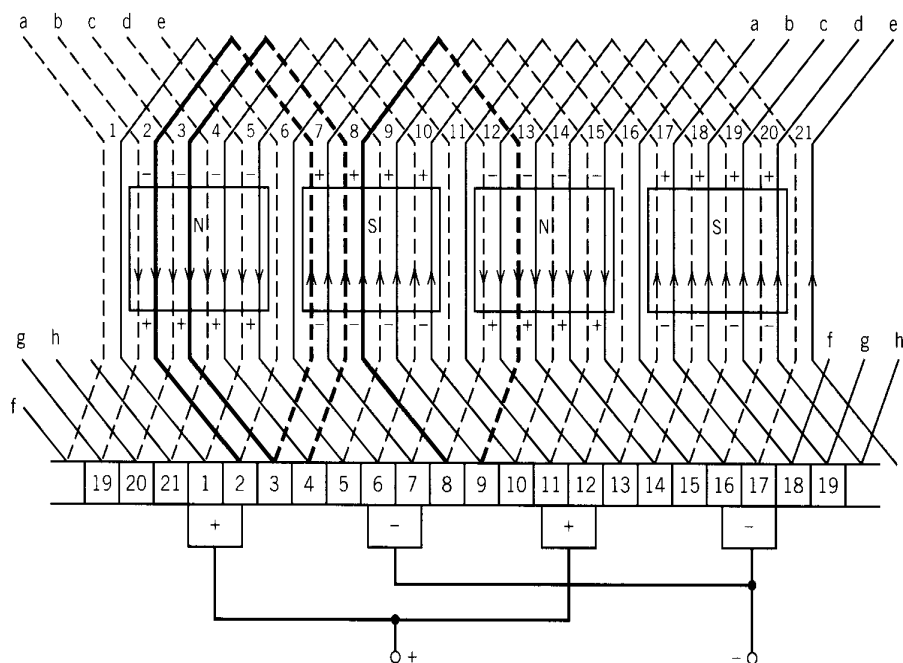
شکل ۳-۱۷- برش عرضی ماشین دوقطبی با چهار حلقه

برای بررسی عملکرد ماشین مرسوم است که نمایش دیگری از سیم پیچی ها مطابق شکل ۳-۱۹ مدنظر قرار می گیرد. در این شکل به جای حرکت دورانی هادی ها در شکل ۳-۱۷، آنها حرکت خطی دارند و به همراه کموتاتورها از مقابل قطب ها که ثابتند عبور می کنند.



شکل ۳-۱۹- شمای گسترده سیم پیچی ماشین نشان داده شده در شکل ۳-۱۷

همانطور که قبلاً اشاره شد، در یک ماشین واقعی تعداد زیادی هادی درون شیارهای آرمیچر جاسازی می شوند که دیگرام نشان داده شده در شکل ۳-۲۰ نحوه اتصال آنها را در یک ماشین نمونه با ۲۱ شیار نشان می دهد.

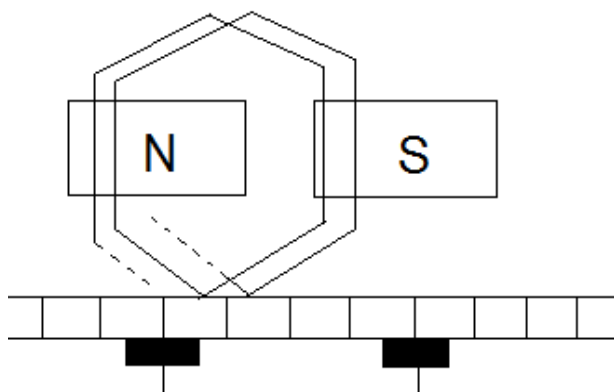


شکل ۳-۲۰- شمای گسترده سیم پیچی در یک ماشین واقعی

کلاف‌های آرمیچر می‌توانند به روش‌های مختلفی به یکدیگر متصل شوند تا سیم پیچی آرمیچر شکل گیرد. در ادامه به دو نوع مرسوم به نام‌های اتصال حلقوی یا رویهم (Lab Winding) و اتصال موجی (Wave Winding) اشاره می‌کنیم.

۳-۶-۱- سیم پیچ حلقوی

به اتصالی حلقوی گفته می‌شود که مطابق شکل ۳-۲۱ هر دو کلاف سری شده زیر یک جفت قطب مجاور قرار گیرند.

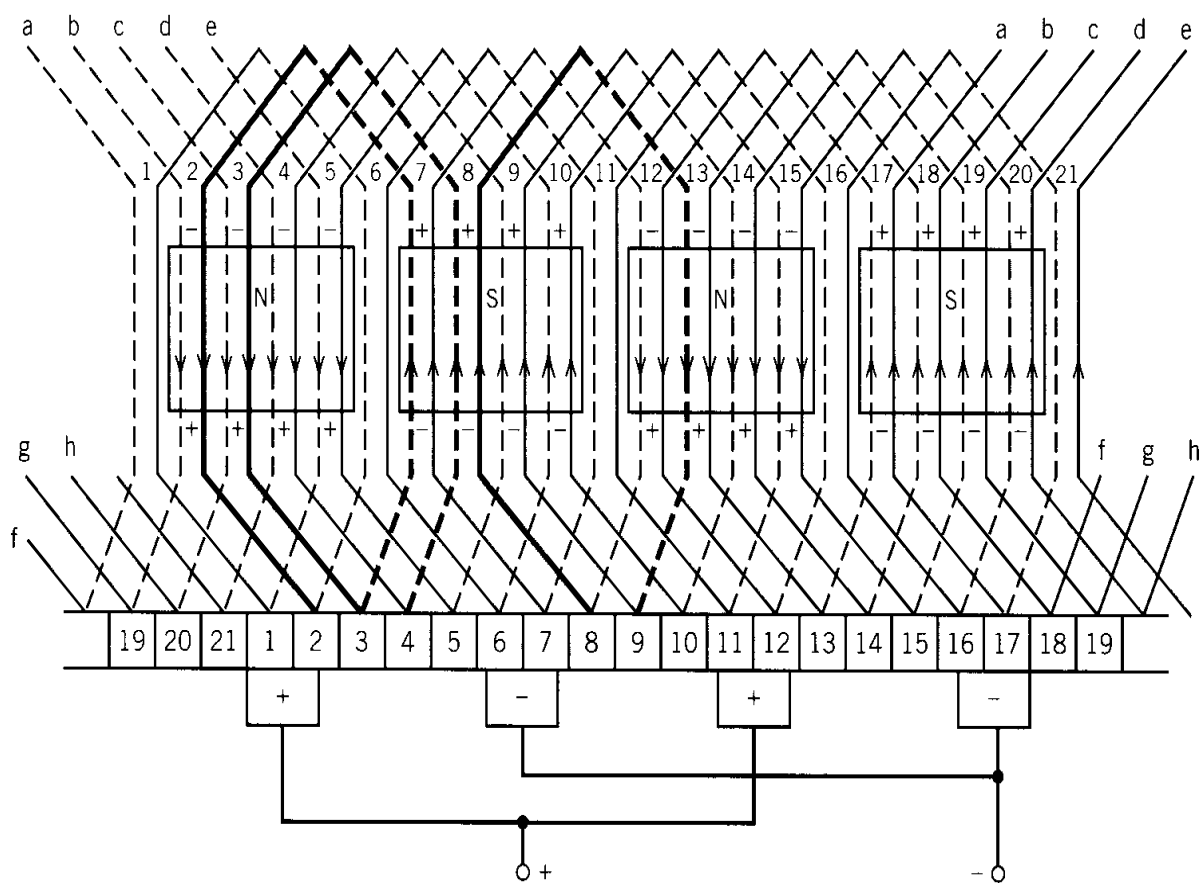


شکل ۳-۲۱- سیم پیچی حلقوی

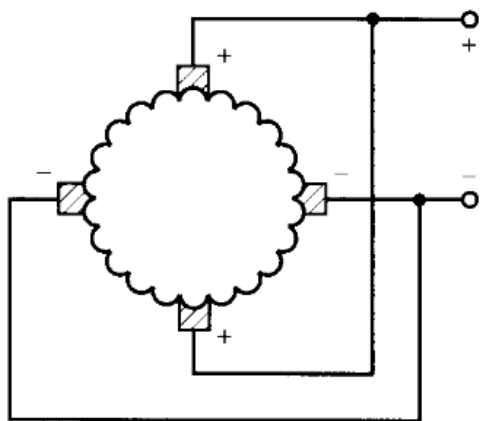
در سیم پیچ حلقوی بین دو تیغه کموتاتور مجاور یک کلاف (حلقه) وجود دارد. به علاوه، همواره در ماشین DC بین دو جاروبک مجاور $\frac{1}{p}$ تعداد کل تیغه های کموتاتور قرار می گیرد (P تعداد قطبهاست). بنابراین در این نوع اتصال $\frac{1}{p}$ کلافها (حلقهها) بین دو جاروبک مجاور با یکدیگر سری می شوند و مجموع ولتاژهای القاءشده روی آنها میان دو جاروبک آشکار می شود. بنابراین، در این نوع اتصال می توان گفت تعداد مسیرهای موازی جریان که به وسیله اتصال کلافها در سیم پیچی آرمیچر شکل می گیرد، برابر با تعداد قطبها است.

$$a = p : \text{تعداد مسیرهای موازی جریان}$$

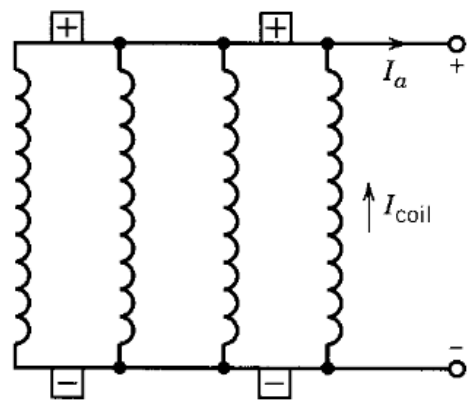
نمایش گسترده سیم پیچی در یک ماشین DC چهار قطبی با سیم پیچی از نوع حلقوی ساده در شکل ۳-۲۲ ارایه شده است.



(الف)



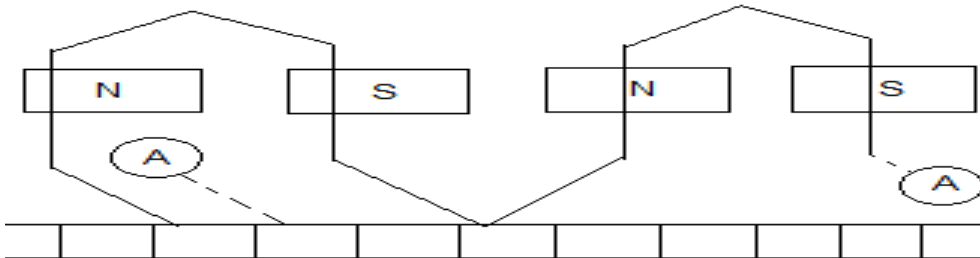
(ب)



شکل ۳-۲۲- شمای گسترده سیم پیچی در یک ماشین DC چهار قطبی با سیم پیچی حلقوی: (الف) هادی ها، (ب) اتصال مداری

۳-۶-۲- سیم پیچی موجی

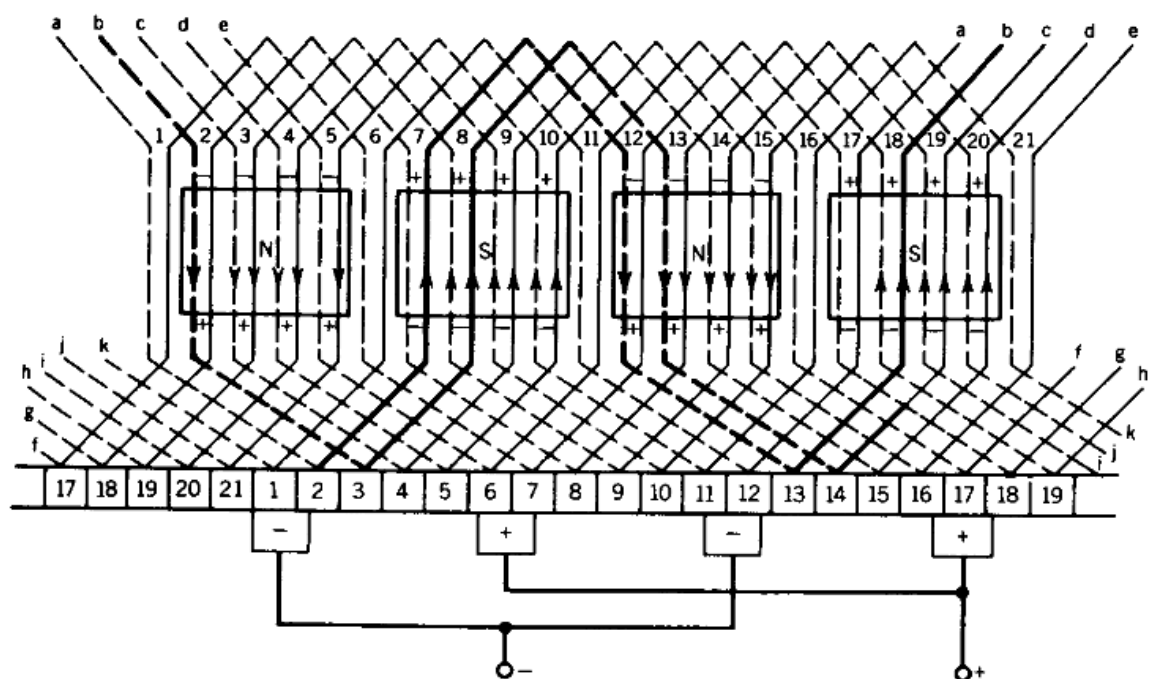
به اتصالی موجی گفته می شود که هر دو کلاف (حلقه) سری شده متعلق به دو زوج قطب مختلف باشند. برای نمونه، شکل ۳-۲۳ این نوع اتصال را در یک ماشین ۴ قطبی نشان می دهد.



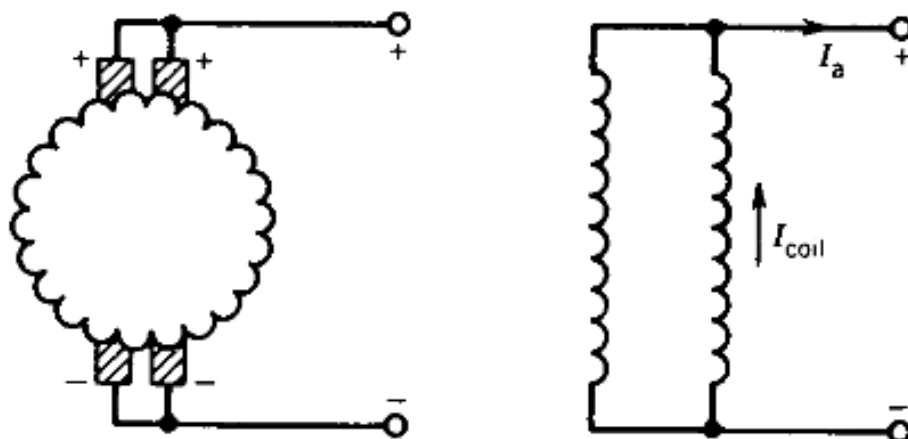
شکل ۳-۲۳- سیم پیچی موجی

در این نوع اتصال بین دو تیغه کموتاتور مجاور، $P/2$ تعداد کلاف ها با یکدیگر سری می شوند. برای مثال در شکل بالا که برای یک ماشین ۴ قطبی است مشاهده می شود که ۲ کلاف (حلقه) بین دو تیغه مجاور با یکدیگر سری شده اند. از آنجایی که بین دو جاروبک مجاور همواره $\frac{1}{p}$ تعداد کل تیغه های کموتاتور قرار دارد، می توان گفت در این اتصال بین دو جاروبک مجاور $\frac{1}{2} \times \frac{P}{2} = \frac{1}{2}$ از کلاف ها با یکدیگر سری می شوند. بنابراین در اتصال موجی تعداد مسیرهای موازی جریان صرفنظر از تعداد قطب های ماشین همواره برابر با ۲ است ($a = 2$) و تنها به دو جاروبک نیاز است.

از آنجایی که بین دو جاروبک مثبت و منفی تعداد زیادی از کلاف ها سری می شوند، ممکن است چگالی جریان در محل جاروبک ها افزایش یابد و به آن ها صدمه برساند. به این خاطر در ماشین های DC بزرگ تعداد جاروبک ها به تعداد قطب ها در نظر گرفته می شوند، علی رغم آنکه تنها به دو جاروبک نیاز است. نمایش گسترده سیم پیچی در یک ماشین DC چهار قطبی با سیم پیچی موجی به همراه اتصال مداری در شکل ۳-۲۴ ارایه شده است.



(الف)

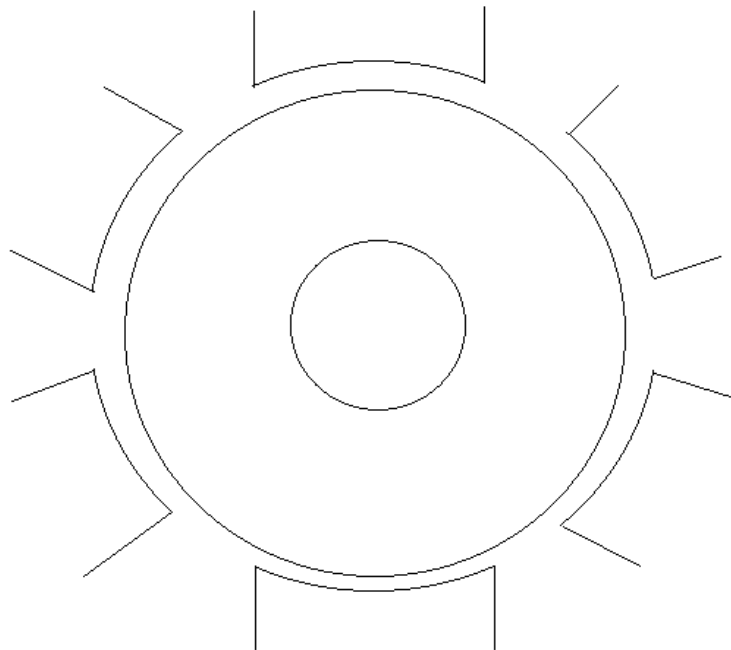


(ب)

شکل ۳-۲۴- شمای گسترده سیم پیچی در یک ماشین DC چهار قطبی با سیم پیچی موجی: (الف) هادی ها، (ب) اتصال مداری

۳-۶-۳- سیم پیچی مرکب

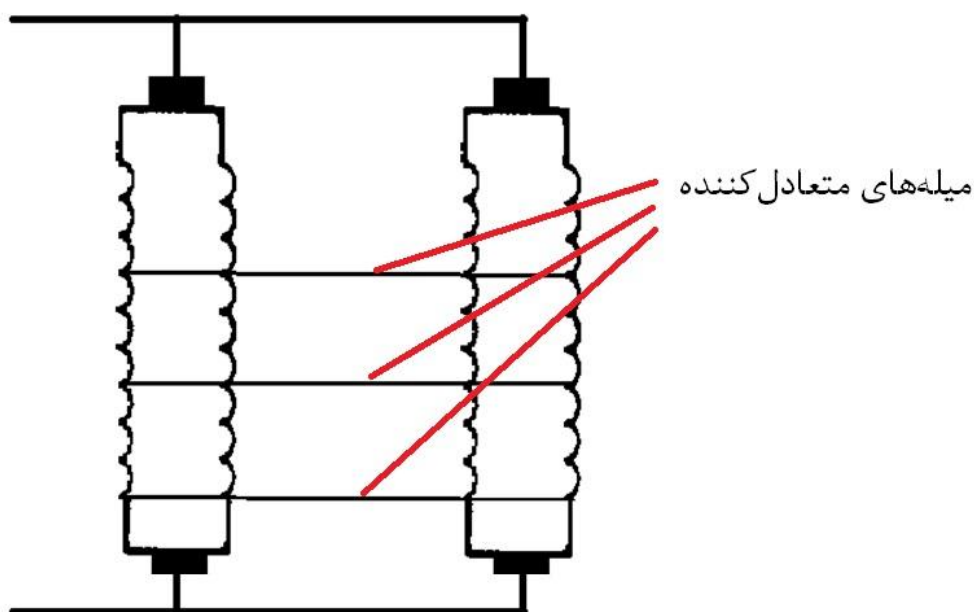
به دلیل کار مداوم ماشین، ممکن است بلبرینگ ها از یک طرف سائیده شده و نازکتر شوند، به این خاطر هادی هایی که در قسمت پائین قرار می گیرند در مقایسه با هادی هایی که در بالا هستند به سطح قطب مطابق شکل ۳-۲۵ نزدیک ترند.



شکل ۳-۲۵- برش عرضی یک ماشین DC شش قطبی

بنابراین در مسیرهای موازی جریان ولتاژ بیشتری روی هادی های که در قسمت پائینی قرار می گیرند در مقایسه با هادی های بالایی القاء می شود. چون تمام مسیرها با یکدیگر موازی شده اند، این باعث می شود جریان از بعضی جاروبک ها خارج شود و از طریق بعضی دیگر برگشته و مسیر خود را ببندد. از آنجایی که مقاومت سیم پیچی رتور بسیار کوچک است، تفاوت ولتاژ در مسیرهای موازی جریان باعث به وجود آمدن جریان چرخشی بزرگی می شود که برای عملکرد ماشین خوب نیست. این مشکل با استفاده از متعادل کننده ها تا حدودی برطرف می شود.

متعادل کننده ها میله هایی هستند که روی رتور قرار می گیرند و نقاط هم پتانسیل مسیرهای موازی را مطابق شکل ۳-۲۶ به هم اتصال کوتاه می کنند. با این کار جریان چرخشی در قسمت های کوتاه تری از سیم پیچی برقرار می شوند.



شکل ۳-۲۶- نمایش میله‌های متعادل کننده برای یک ماشین چهارقطبی با سیم پیچی حلقوی

اگر تعداد لایه ها m باشد:

$$a = \begin{cases} m p & \text{سیم پیچ حلقوی} \\ 2 m & \text{سیم پیچ موجی} \end{cases}$$

۳-۷-۱- ولتاژ آرمیچر

ولتاژ القاء شده در یک حلقه عبارت است از:

$$e_t = 2B(\theta) l v = 2B(\theta) l r \omega_m \quad (۵-۳)$$

که در آن l طول هادی، ω_m سرعت زاویه ای رتور و r شعاع حلقه است. مقدار متوسط این ولتاژ برابر است با:

$$\bar{e}_t = 2 \bar{B}(\theta) l r \omega_m \quad (۶-۳)$$

اگر φ شار هر قطب و $A = \frac{2\pi rl}{p}$ مساحت به ازای هر قطب باشد داریم:

$$\bar{B}(\theta) = \frac{\varphi}{A} = \frac{\varphi P}{2\pi r l} \quad (۷-۳)$$

با جایگذاری $\bar{B}(\theta)$ در (۶-۳) داریم:

$$\bar{e}_t = \frac{\varphi P}{\pi} \omega_m \quad (۸-۳)$$

مقدار متوسط ولتاژ پایانه (E_a) که بین جاروبک های مثبت و منفی ظاهر می شود، برابرست با مجموع ولتاژهای القاء شده در همه کلاف های سری شده در یک مسیر موازی جریان:

$$E_a = \frac{N}{a} \bar{e}_t \quad (۹-۳)$$

که در آن N تعداد کل حلقه های سیم پیچی آرمیچر و a تعداد مسیرهای موازی جریان است. با جایگذاری (۸-۳) در (۹-۳) داریم:

$$E_a = \frac{NP}{\pi a} \varphi \omega_m = K_a \varphi \omega_m$$

که در آن K_a ثابت سیم پیچی نامیده می شود. در نتیجه ولتاژ تولیدی برابرست با:

$$E_a = K_a \varphi \omega_m, \quad K_a = \frac{NP}{\pi a} = \frac{zP}{2\pi a} \quad (۱۰-۳)$$

که در آن z تعداد کل هادی هاست.

۳-۷-۲- گشتاور تولیدی

نیروی اعمالی بر هر هادی روی محیط خارجی آرمیچر از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$f_c = B(\theta) l i_c = B(\theta) l \frac{I_a}{a} \quad (۱۱-۳)$$

که در آن i_c جریان هادی و I_a جریان پایانه آرمیچر است. گشتاور حاصله توسط هادی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T_c = f_c r \Rightarrow \bar{T}_c = \bar{B}(\theta) l \frac{I_a}{a} r \quad (12-3)$$

در (۷-۳) اثبات شد $\bar{B}(\theta) = \frac{\varphi p}{2\pi r l}$ و در نتیجه داریم:

$$\bar{T}_c = \frac{\varphi p I_a}{2\pi a} \quad (13-3)$$

تمامی هادی‌ها در تولید گشتاور به یک اندازه سهم دارند. بنابراین:

$$T = 2N \bar{T}_c = \frac{N \varphi p}{\pi a} I_a = K_a \varphi I_a$$

که K_a ثابت سیم‌پیچی است و در (۱۰-۳) معرفی شده است. در نتیجه گشتاور تولیدی برابرست با:

$$T = K_a \varphi I_a \quad (14-3)$$

با توجه به روابط مهم بدست‌آمده در این قسمت، می‌توان نوشت:

$$\text{توان مکانیکی خروجی} = T \omega_m = E_a I_a = K_a \varphi \omega_m I_a = \text{توان الکتریکی ورودی}$$

بنابراین:

$$E_a I_a = T \omega_m \quad (15-3)$$

مثال: ماشین DC چهار قطبی با شعاع متوسط آرمیچر 12.5 cm و طول محوری آرمیچر 25 cm مفروض است. قطب‌ها ۷۵٪ محیط آرمیچر را پوشانده‌اند و سیم پیچی آرمیچر از ۳۳ کلاف تشکیل شده که هر کلاف ۷ حلقه دارد، چگالی شار متوسط زیر هر قطب 0.75 T است و سیم پیچی آرمیچر از نوع حلقوی ساده است.

الف: اگر آرمیچر با سرعت 1000 rpm بچرخد، ولتاژ القاء شده در آرمیچر را محاسبه کنید.

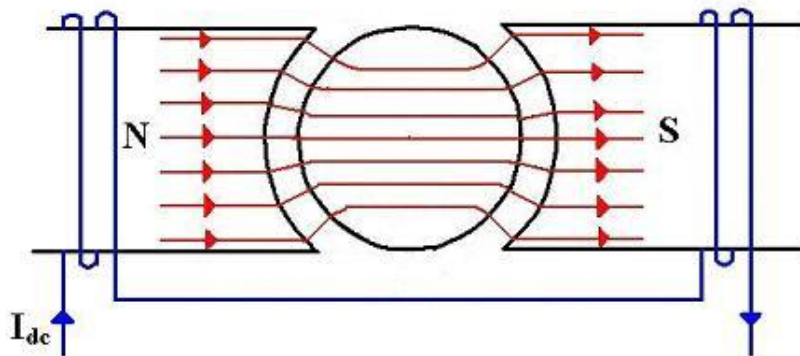
ب: اگر جریان آرمیچر 400 A باشد، گشتاور و توان تولیدی را به دست آورید.

$$z = 33 \times 7 \times 2 = 462, \quad a = p = 4$$

$$K_a = \frac{zP}{2\pi a} = \frac{462 \times 4}{2 \times \pi \times 4} = 73.53$$

$$A_p = \frac{2\pi \times 0.125 \times 0.25 \times 0.75}{4} = 36.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

سطح زیر هر قطب



$$\phi = A_p \times B = 36.8 \times 10^{-3} \times 0.75 = 0.0276 \text{ Wb}$$

$$E_a = K_a \phi \omega_m = 73.53 \times 0.0276 \times \frac{1000}{60} \times 2\pi = 212.5 \text{ V}$$

$$T = K_a \phi I_a = 73.53 \times 0.0276 \times 400 = 811.8 \text{ Nm}$$

$$p = E_a I_a = 212.5 \times 400 = 85 \text{ kW}$$

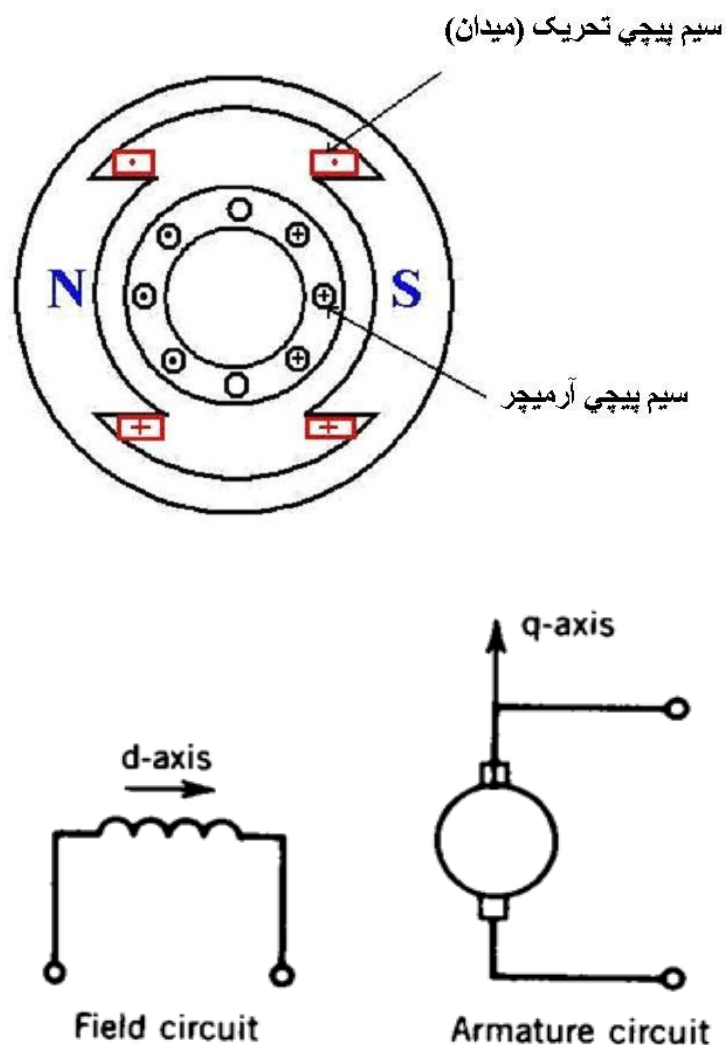
$$= T \times \omega_m = 811.8 \times \frac{1000}{60} \times 2\pi = 85 \text{ kW}$$

۳-۸- منحنی مغناطیس شوندگی در ماشین DC

ماشین DC حاوی دو مدار جداگانه است: مدار تحریک یا میدان و مدار سیم پیچی آرمیچر. دو نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) ناشی از این دو مدار وجود دارد که مطابق شکل ۳-۲۷ در فضا متعامد هستند:

✓ نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) ناشی از سیم پیچی قطب های اصلی در امتداد محور مستقیم (direct)

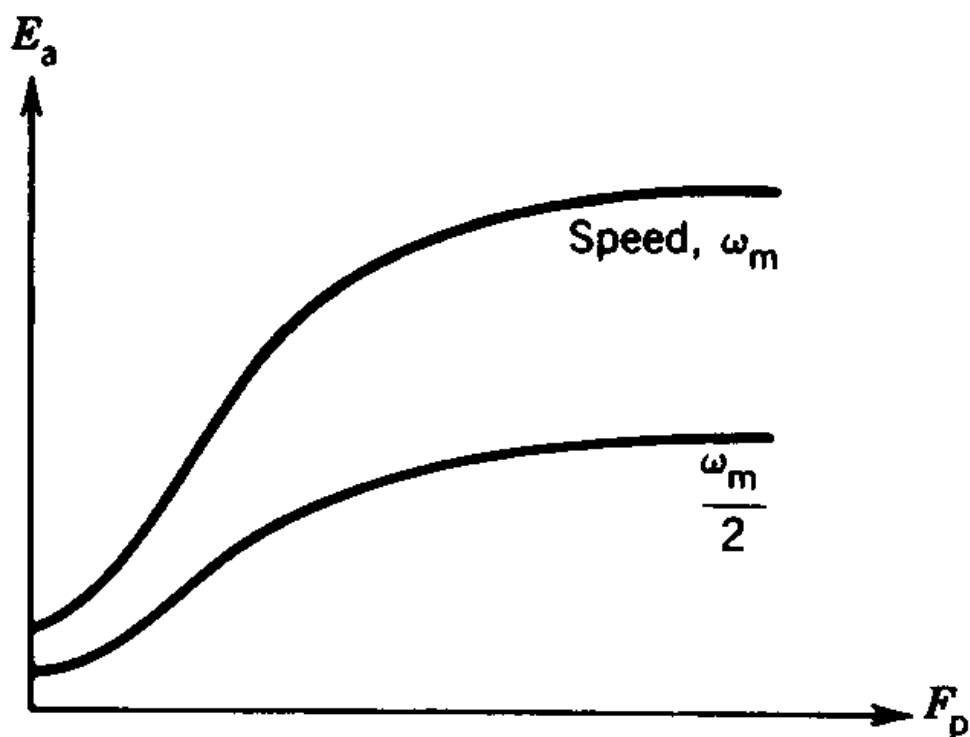
✓ نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) ناشی از سیم پیچی آرمیچر در راستای محور عمود (quadrature)



شکل ۳-۲۷- نمایش آرمیچر

ارتباط بین ولتاژ تولیدی آرمیچر و نیروی محرکه مغناطیسی یا آمپر دور ناشی از قطب های اصلی به نام منحنی مغناطیس شونددگی ماشین DC معروف است. از (۱۶-۳) واضح است که این منحنی برای یک سرعت خاص داده می شود. شکل ۳-۲۸ منحنی مغناطیس شونددگی یک ماشین DC نمونه را برای دو سرعت مختلف نشان می دهد.

$$E_a = K_a \phi \omega_m \quad , \quad \phi = f(I_f) \quad (۱۶-۳)$$



شکل ۳-۲۸- منحنی مغناطیس شونده

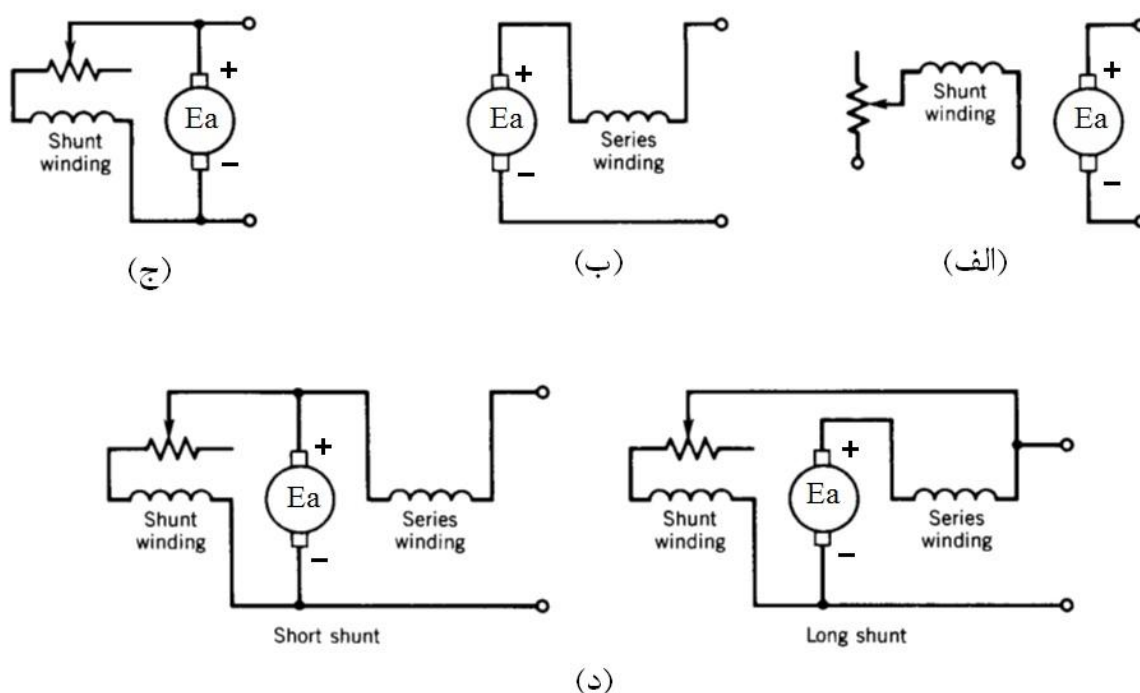
۳-۹- طبقه بندی ماشین های DC

مدار تحریک (میدان) و مدار آرمیچر می توانند به روش های متفاوتی به یکدیگر مربوط شوند و با این کار به مشخصه های عملکرد مختلف دست یافت.

روی قطب های اصلی ماشین دو سری سیم پیچی به نام های سیم پیچی شنت یا موازی (Shunt winding) و سیم پیچی سری (Series winding) وجود دارد. تعداد حلقه های سیم پیچی شنت بسیار زیاد و جریان آن کم است. برعکس تعداد حلقه های سیم پیچی سری کم و جریان آن زیاد است. با توجه به رابطه $Ni = R\phi$ ، هر دو می توانند باعث تولید شار یکسانی شوند.

مدار سیم پیچی شنت (موازی) با سیم پیچی آرمیچر موازی بسته می شود، در حالی که سیم پیچی سری با مدار آرمیچر سری می شود. اگر هر دو سیم پیچی شنت و سری تحریک شوند، ماشین DC نوع کمپوند داریم. اگر سیم پیچی تحریک (میدان) توسط منبع DC جداگانه ای تغذیه شود، ماشین DC نوع تحریک جداگانه (مستقل) داریم.

در ماشین DC نوع کمپوند اگر سیم پیچی شنت با مدار آرمیچر موازی بسته شود و مجموعه با سیم پیچی سری به صورت سری متصل شود، کمپوند از نوع شنت کوتاه داریم. در صورتی که سیم پیچی سری با مدار آرمیچر سری شود و سپس مجموعه با سیم پیچی شنت موازی بسته شوند، کمپوند از نوع شنت بلند داریم. در نهایت در ماشین DC کمپوند اگر سیم پیچی سری mmf سیم پیچی شنت را تقویت کند، کمپوند اعم از شنت بلند یا کوتاه کمپوند اضافی نامیده می شود و اگر تضعیف کنند کمپوند نقصانی داریم. شکل ۳-۲۹ اتصال مداری انواع ماشین DC را نشان می دهد.

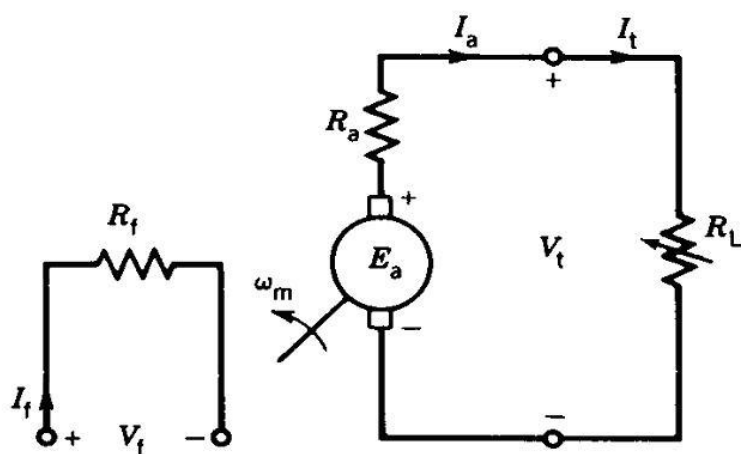


شکل ۳-۲۹- انواع ماشین DC: (الف) تحریک مستقل یا جداگانه، (ب) سری، (ج) شنت و (د) کمپوند از نوع شنت بلند و شنت کوتاه

۳-۱۰- ژنراتورهای جریان مستقیم (DC)

۳-۱۰-۱- ژنراتور DC تحریک مستقل (جداگانه)

مدارهای سیم پیچی های تحریک و آرمیچر ژنراتور تحریک مستقل در حالت دائمی که سلف سیم پیچی های اتصال کوتاه می شوند، در شکل ۳-۳۰ نشان داده شده اند. همانطور که گفته شد سیم پیچی تحریک در این نوع ژنراتور به صورت جداگانه توسط یک منبع DC تحریک می شود.



شکل ۳-۳۰- ژنراتور DC تحریک مستقل

پارامترهای نشان داده شده در مدار شکل ۳-۳۰ عبارتند از:

R_f : مقاومت مدار تحریک

R_a : مقاومت مدار آرمیچر

R_L : مقاومت بار

V_f و I_f : ولتاژ اعمالی به مدار تحریک و جریان تحریک

E_a و I_a : ولتاژ و جریان آرمیچر

V_t و I_t : ولتاژ و جریان پایانه (ترمینال) ژنراتور

۳-۱۰-۱- معادلات حاکم در حالت ماندگار

با توجه به مدار نشان داده شده در شکل ۳-۳۰ معادلات حاکم بر عملکرد حالت ماندگار (Steady state) ژنراتور تحریک مستقل به شکل زیر می باشند:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_f = R_f I_f \\ E_a = V_t + R_a I_a \\ E_a = K_a \phi \omega_m \\ V_t = R_L I_t \\ I_a = I_t \end{array} \right.$$

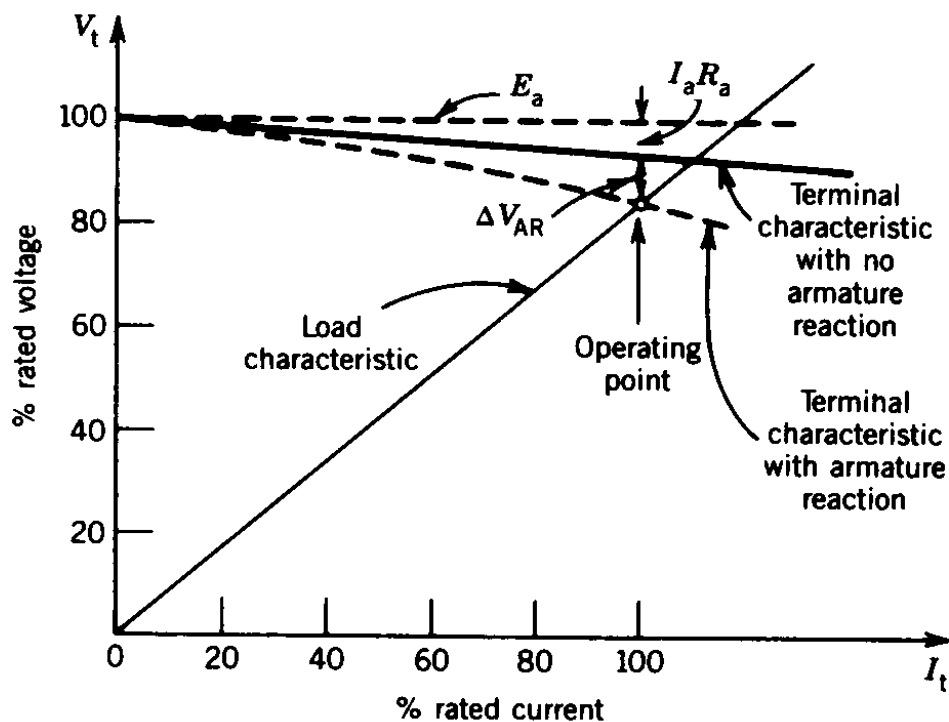
۳-۱۰-۱-۲- مشخصه ی خارجی ژنراتور DC تحریک جداگانه

این مشخصه در مورد ژنراتور DC منحنی تغییرات ولتاژ خروجی برحسب جریان بار است و روش به دست آوردن آن از معادلات حاکم است که در ادامه توصیف می شود.

$$V_t = E_a - R_a I_a \quad (۱۷-۳)$$

$$I_t = I_a$$

با توجه به (۱۷-۳)، اگر E_a با تغییر جریان پایانه ثابت بماند (حالتی که از اثر عکس العمل آرمیچر صرف نظر می شود)، نحوه تغییرات ولتاژ پایانه برحسب جریان پایانه به صورت منحنی نشان داده شده در شکل ۳-۳۱ می گردد. در زیر بخش بعدی با اثر عکس العمل آرمیچر آشنا می شویم و مشاهده می کنیم با افزایش جریان پایانه، اثر عکس العمل آرمیچر باعث کاهش E_a می گردد و در نتیجه ولتاژ پایانه مطابق شکل مزبور با شدت بیشتری هنگام افزایش جریان پایانه کم می شود.



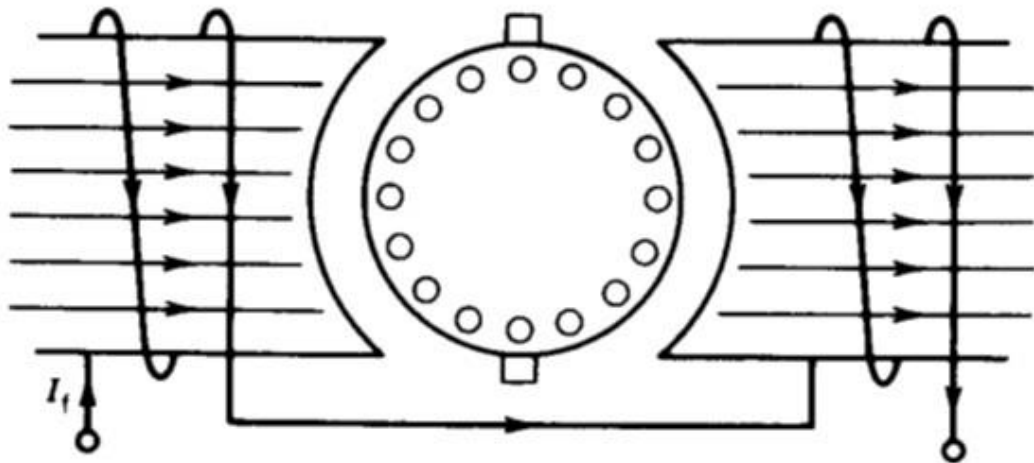
شکل ۳-۳۱- مشخصه ی خارجی ژنراتور DC

۳-۱۰-۲- اثر عکس العمل آرمیچر

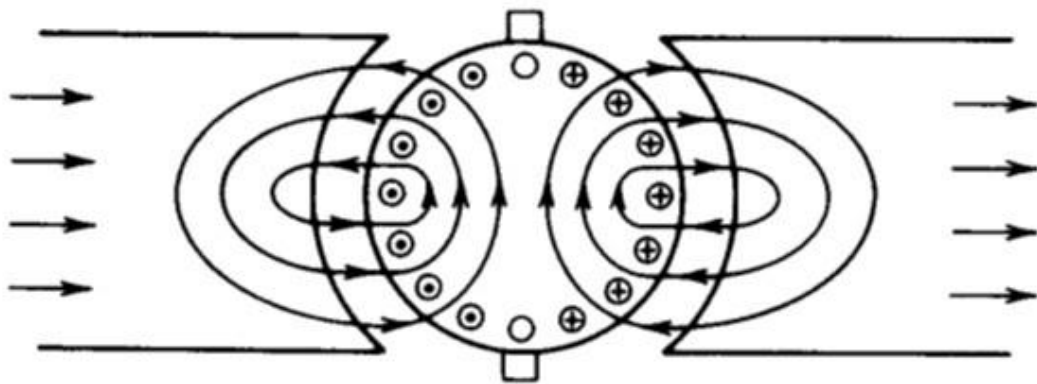
توصیف اثر عکس العمل آرمیچر با استفاده از منحنی چگالی شار برحسب آمپر دور آرمیچر

وقتی پایانه های ماشین DC مدار باز باشند و جریان آرمیچر صفر باشد شار درون ماشین فقط توسط mmf حاصله از جریان تحریک (I_f) شکل می گیرد. این حالتی است که اثر عکس العمل آرمیچر در نظر گرفته نمی شود. وقتی از مدار آرمیچر جریان بگذرد، اثر عکس العمل آرمیچر در نظر گرفته می شود و شار حاصله توسط mmf آرمیچر (F_a) شار اصلی را در نیمی از ناحیه زیر قطب تقویت و در نیمی دیگر تضعیف می کند. اگر ماشین در زانوی منحنی اشباع کار کند، اثر این افزایش و کاهش شار همچنان که شکل ۳-۳۲ نشان می دهد نهایتاً کم شدن شار زیر قطب را نتیجه می دهد. این به آن علت است که اگرچه آمپر دور ناشی از سیم پیچی آرمیچر، آمپر دور اصلی که شار زیر قطب را به وجود می آورد به یک سهم افزایش و کاهش می دهد (به اندازه ΔF_a)، اما شکل مزبور نشان می دهد به خاطر پدیده اشباع شار نمی تواند هرچه بخواهد بالا رود. کاهش شار ناشی از اثر عکس العمل آرمیچر باعث کم شدن ولتاژ تولیدی می گردد زیرا:

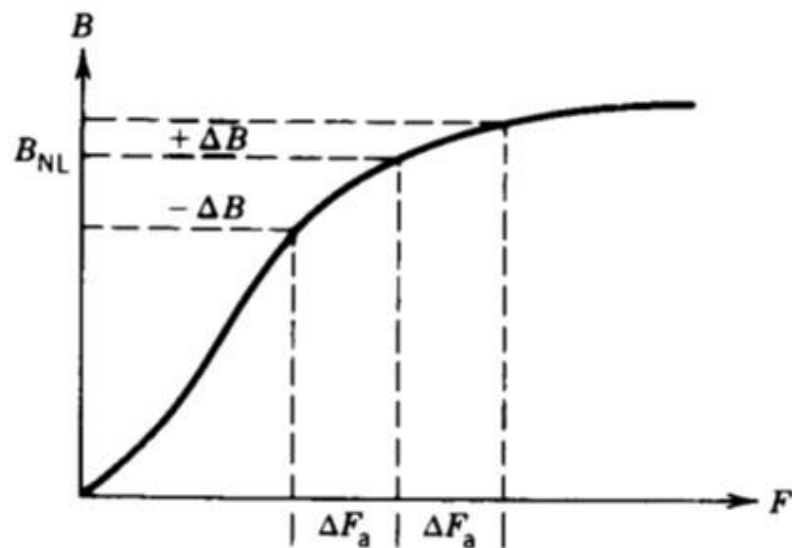
$$E_a = K_a \phi \omega_m \quad (۳-۱۸)$$



(الف)



(ب)

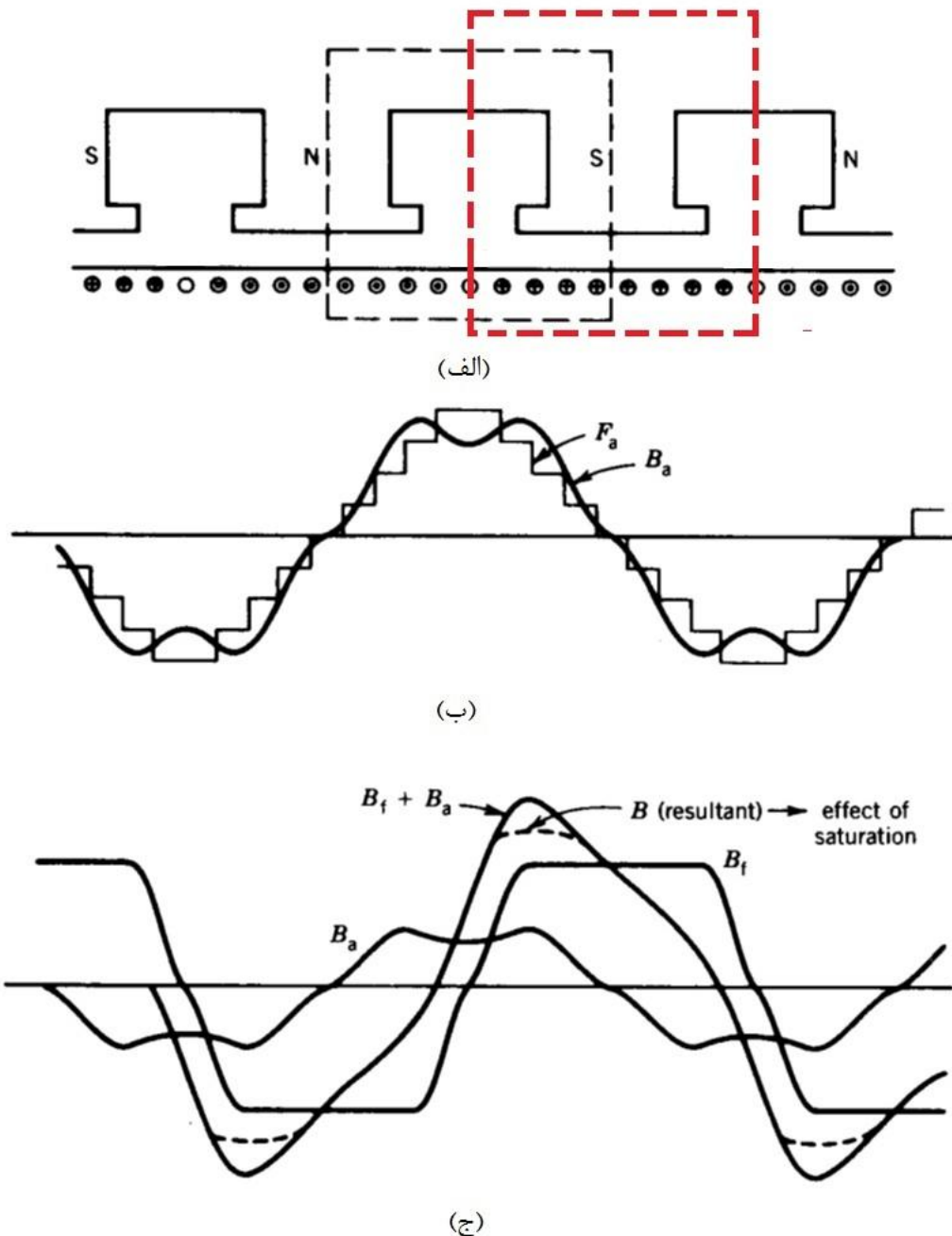


(ج)

شکل ۳-۳۲- بررسی اثر عکس العمل آرمیچر: (الف) خطوط شار وقتی جریان آرمیچر صفر است، (ب) خطوط شار وقتی جریان آرمیچر داریم، (ج) افزایش و کاهش چگالی شار ناشی از آمپردور سیم پیچی آرمیچر

توصیف اثر عکس العمل آرمیچر براساس توزیع mmf و چگالی شار در فاصله هوایی

با رجوع به قانون مداری آمپر توصیف شده در فصل اول، برای مسیر بسته (نقطه چین مشکی) نشان داده شده در شکل ۳-۳۳-الف، نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) یا آمپر دور خالص تولید شده توسط جریان آرمیچر صفر است زیرا در این مسیر جریان های رفت و برگشت یکسانند. با حرکت دادن مسیر بسته مزبور در طرف راست، توزیع mmf آرمیچر (F_a) به دست می آید و در شکل ۳-۳۳-ب نشان داده شده است.



شکل ۳-۳۳- توزیع mmf مربوط به آرمیچر و منحنی چگالی شارها در فاصله هوایی: (الف) ساختمان ماشین، (ب) نیروی محرکه و

چگالی شار تولیدی آرمیچر، (ج) منحنی های توزیع چگالی شار در فاصله هوایی

توزیع چگالی شار ناشی از جریان آرمیچر از روی توزیع mmf آرمیچر قابل تعیین است زیرا $F=R\phi$. به خاطر آن که رلوکتانس فاصله هوایی در ناحیه بین قطب ها (ناحیه خنثی) ناگهان بزرگ می شود، منحنی چگالی شار شکل زینی پیدا می کند. توجه شود در بقیه جاها مقدار رلوکتانس ثابت است.

توزیع چگالی شار در فاصله هوایی از برآیند چگالی شار ناشی سیم پیچی تحریک روی قطب های اصلی (که مولفه غالب است) و چگالی شار ناشی از جریان آرمیچر به دست می آید (شکل ۳-۳۳-ج). همانطور که از این شکل واضح است، از نظر ریاضی چگالی شار ناشی از جریان آرمیچر (B_a) باعث افزایش و کاهش چگالی شار ناشی سیم پیچی تحریک (B_f) به یک اندازه می گردد. اگر اشباع رخ ندهد، افزایش و کاهش شار هر قطب ناشی از اثر عکس العمل آرمیچر یکسان است ولی در صورتی که اشباع داشته باشیم، میزان کاهش یافتن چگالی شار بیشتر از افزایش آن است و در نتیجه شار هر قطب به خاطر عکس العمل آرمیچر کاهش می یابد.

توجه شود در شکل مزبور ناحیه چگالی شار صفر (ناحیه خنثی) به خاطر عکس العمل آرمیچر جابجا می شود که می تواند مشکلاتی را در فرایند کموتاسیون (جابجایی جریان در کلاف) منجر شود.

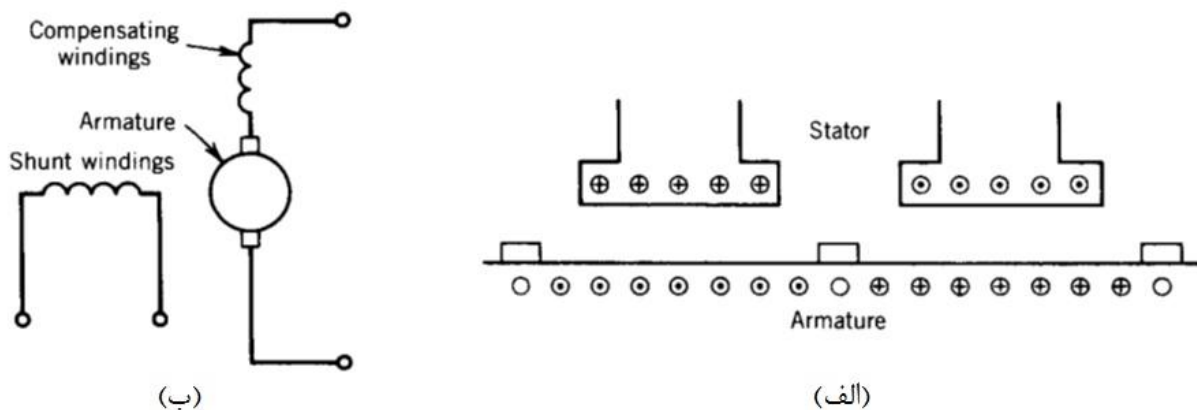
۳-۱۰-۲-۱- سیم پیچی جبرانگر

نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) ناشی از سیم پیچی آرمیچر در توزیع چگالی شار اعوجاج ایجاد می کند و دو اثر نامطلوب منجر می شود:

✓ اثر تضعیف شار زیر قطب اصلی که باعث کاهش ولتاژ تولیدی می گردد (اثر اصلی)

✓ جابجایی صفحه خنثی که ایجاد مشکل برای عمل کموتاسیون می نماید

روش مقابله با اثر عکس العمل آرمیچر، استفاده از سیم پیچی جبران گر است که در پیشانی قطب های اصلی ماشین نصب می شوند و مدار آن با مدار آرمیچر سری می شوند. با توجه به شکل ۳-۳۴ مشاهده می گردد که این سیم پیچی باعث می شود آمپردوری درست مشابه آمپردور ناشی از سیم پیچی آرمیچر ولی در خلاف جهت آن ایجاد شود و به این ترتیب عکس العمل آرمیچر را خنثی کند.



شکل ۳-۳۴- سیم پیچی جبرانگر: (الف) چگونگی نصب آن، (ب) اتصال مداری

هزینه ساخت این سیم پیچی جبران گر زیاد است و به این خاطر فقط در ماشین های بزرگ و مواقعی که جریان بار تغییرات زیاد دارد، مورد استفاده قرار می گیرد.

۳-۱۰-۲-۲- مدل کردن اثر عکس العمل آرمیچر

با توجه به شکل ۳-۳۵ مشاهده می شود که کاهش E_a در هنگام در نظر گرفتن اثر عکس العمل آرمیچر را می توان با کاهش جریان تحریک مدل کرد:

$$I_{f(eff)} = I_{f(actual)} - I_{f(AR)} \quad (۳-۱۹)$$

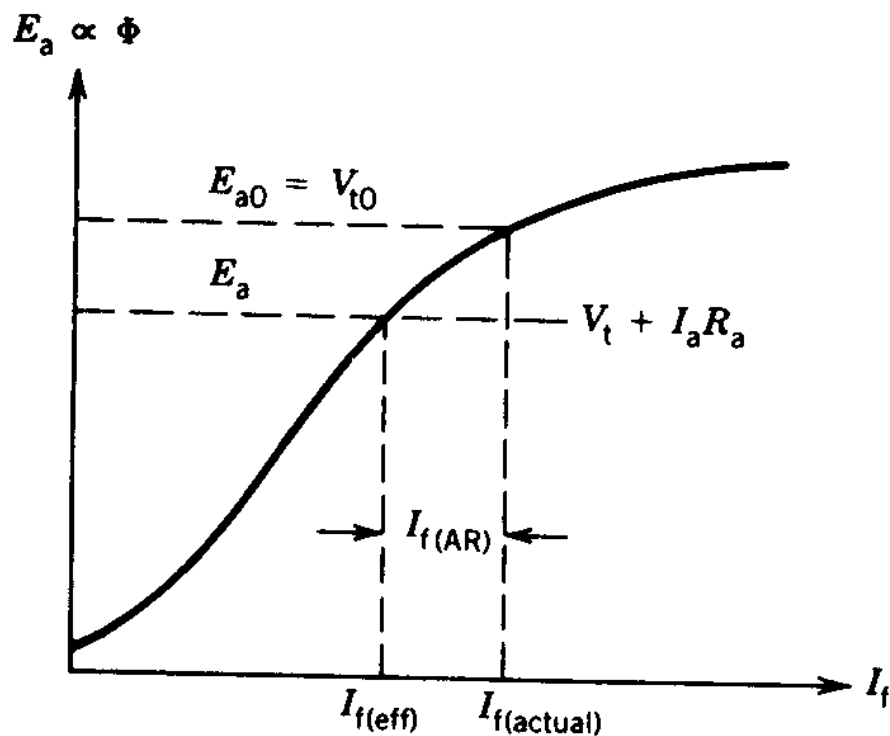
که در آن:

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

$I_{f(eff)}$: جریان مؤثر مدار تحریک

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

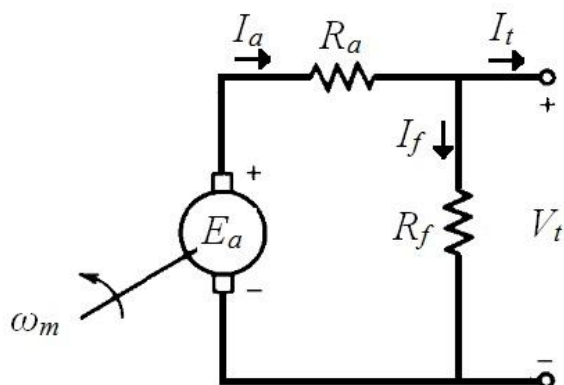
در شکل مزبور E_{a0} ولتاژ بدون در نظر گرفتن عکس العمل آرمیچر است و E_a ولتاژ با در نظر گرفتن عکس العمل آرمیچر می باشد.



شکل ۳-۳۵- مدل کردن اثر عکس العمل آرمیچر با کاهش جریان تحریک

۳-۱۰-۳- ژنراتور DC شنت

مدار معادل این ژنراتور در شکل ۳-۳۶ مشاهده می شود. سیم پیچی تحریک با مدار آرمیچر موازی بسته می شود و به منبع جداگانه ای برای تحریک نیاز نیست. به عبارت دیگر از ولتاژ تولیدی ژنراتور برای تحریک استفاده می شود. به این خاطر به آن ژنراتور خودتحریک شنت (موازی) نیز گفته می شود.

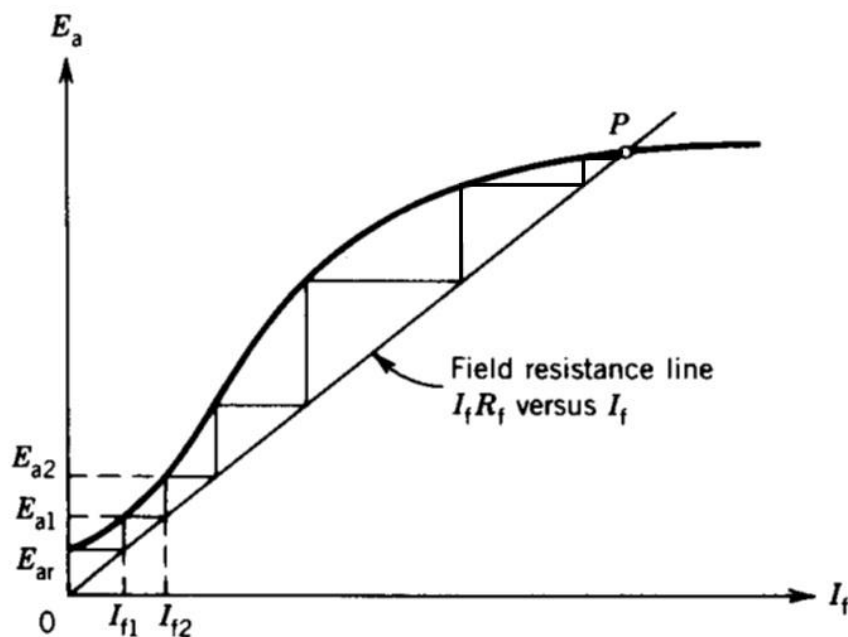


شکل ۳-۳۶- ژنراتور DC شنت

۳-۱۰-۳-۱-طریقه ولتاژسازی در ژنراتور شنت

منحنی مغناطیس‌شوندگی (E_a-I_f) به همراه خط بار ولتاژ پایانه برحسب جریان تحریک (V_t-I_f) در شکل ۳-۳۷ رسم شده‌اند. با توجه به مدار شکل ۳-۳۶، در حالت بی باری ($I_t=0$)، جریان آرمیچر با جریان مدار تحریک که مقدار آن کم است برابرست و می‌توان از افت ولتاژ $R_a I_a$ صرف‌نظر کرد و در نتیجه $E_a \simeq V_t$.

اگر ماشین دارای شار پسماند باشد، وقتی آرمیچر به چرخش در می آید ولتاژ تولیدی کوچکی تولید می شود که در شکل ۳-۳۷ با E_{ar} نمایش داده شده است. با توجه به خط بار ولتاژ پایانه برحسب جریان تحریک، این ولتاژ کوچک تولید جریان تحریک کمی می نماید (I_{f1}). شار حاصل از این جریان تحریک اگر شار پسماند را تقویت کند، ولتاژ بزرگتری حاصل می شود (E_{a1}) که به طبع جریان (I_{f2}) را نتیجه می دهد. این کار تا نقطه کار نهایی ادامه می یابد و نهایتاً ولتاژ قابل ملاحظه ای در دو سر آرمیچر ظاهر می گردد.



شکل ۳-۳۷- روند ولتاژسازی در ژنراتور DC شنت

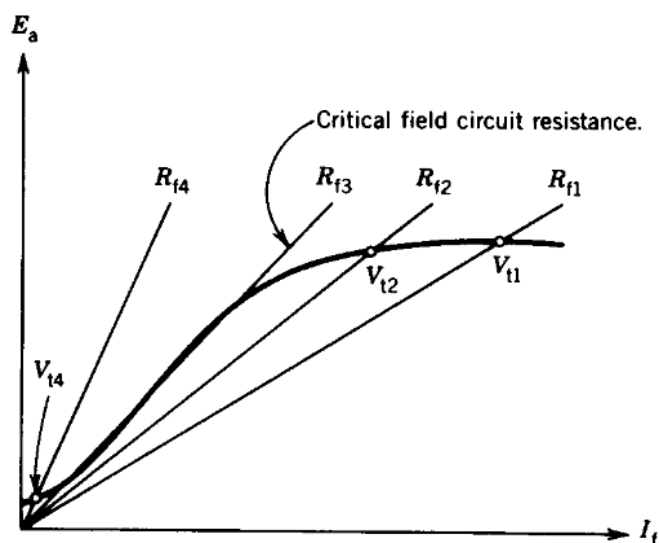
به اختصار شرایط لازم برای ولتاژسازی در ژنراتور DC شنت عبارتند از:

✓ وجود شار پسماند در مدار مغناطیسی ماشین

✓ تقویت شار یسماند توسط شار ناشی از مدار تحریک

✓ مقاومت مدار تحریک کمتر از مقاومت بحرانی (شیب قسمت خطی منحنی مغناطیس شوندگی) مطابق

شکل ۳-۳۸



شکل ۳-۳۸- تغییر مقاومت مدار تحریک

۳-۱۰-۳- معادلات حاکم در حالت ماندگار

با توجه به مدار نشان داده شده در شکل ۳-۳۶، معادلات حاکم بر عملکرد حالت ماندگار ژنراتور شنت عبارتند از:

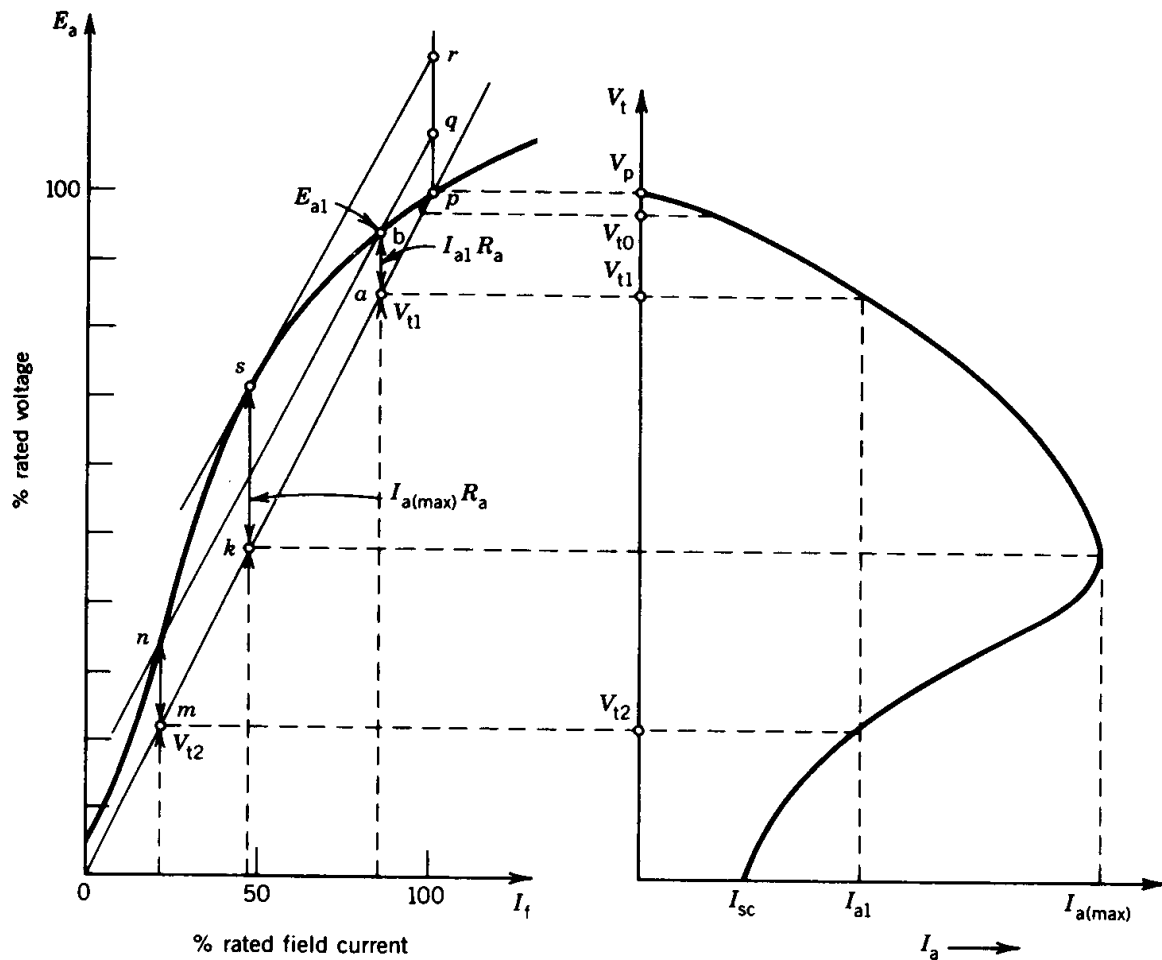
$$\left\{ \begin{array}{l} E_a = V_t + R_a I_a \\ E_a = K_a \varphi \omega_m \\ V_t = R_f I_f = R_L I_t \\ I_a = I_t + I_f \end{array} \right.$$

۳-۳-۱۰-۳- مشخصه ی خارجی ژنراتور DC شنت

این مشخصه را می توان از منحنی مغناطیس شوندگی ($E_a - I_f$) به همراه خط بار ولتاژ پایانه برحسب جریان تحریک ($V_t - I_f$) آنگونه که در شکل ۳-۳۹ نشان داده شده است، به دست آورد. با توجه به معادلات حاکم داده شده در زیربخش ۳-۳-۱۰-۲ داریم:

$$E_a - V_t = R_a I_a \quad (۳-۲۰)$$

با توجه به (۳-۲۰)، فاصله عمودی بین منحنی مغناطیس شوندگی و خط بار مدار تحریک، افت ولتاژ $R_a I_a$ را مشخص می سازد. مشخصه خارجی در حقیقت ارتباط بین ولتاژ پایانه (V_t) و جریان پایانه (I_t) است. توجیه آنکه چرا در به دست آوردن مشخصه خارجی ژنراتور شنت (که در سمت راست شکل ۳-۳۹ مشاهده می شود) محور افقی مشخصه خارجی به جای جریان پایانه (I_t)، جریان آرمیچر (I_a) نمایش داده شده است، آن است که جریان تحریک در مقایسه با جریان پایانه و آرمیچر کوچک است و با تقریب قابل قبولی می توان دو جریان مزبور را برابر فرض کرد. در به دست آوردن مشخصه خروجی یک جریان آرمیچر در نظر گرفته می شود برای مثال I_{a1} . افت ولتاژ روی مقاومت آرمیچر ناشی از این جریان $R_a I_{a1}$ مشخص است و بنابراین پاره خطی که طبق (۳-۲۰) بین منحنی مغناطیس شوندگی و خط بار مدار تحریک بایستی قرار گیرد معلوم است. به این ترتیب ولتاژ پایانه متناظر روی خط بار مدار تحریک تعیین می شود. با ادامه روند برای جریان های آرمیچر متفاوت ولتاژهای پایانه متناظر به دست می آیند و مشخصه خارجی پیش بینی می شود.



شکل ۳-۳۹- مشخصه ی پایانه ی یک ژنراتور DC تحریک مستقل

برای هر جریان آرمیچر دو جواب برای ولتاژ پایانه وجود دارد چون طبیعت منحنی ها به گونه ایست که پاره خط معادل افت ولتاژ $R_a I_a$ در دو محل می توان قرار داد آنچنان که برای I_{a1} در شکل ۳-۳۹ انجام شده است. توجه شود که برای ماکزیمم جریان آرمیچر ($I_{a,max}$) تنها یک جواب وجود دارد.

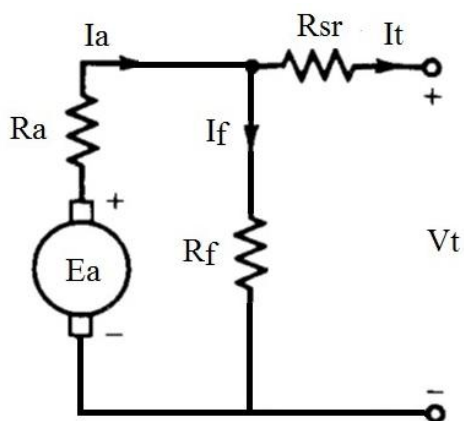
در حالت بی باری $I_t = 0$ و در نتیجه $I_a = I_f$ است و افت ولتاژ $R_a I_a$ چون R_a کوچک است قابل اغماض است و بنابراین ولتاژ بی باری همان ولتاژ در نقطه P است. در حالت اتصال کوتاه جریان تحریک با توجه به شکل ۳-۳۶ مقدار صفر است و ولتاژ تولیدی آرمیچر (E_{ar}) فقط ناشی از شار پسماند است که مقدار کوچکی دارد. جریان آرمیچر در این حالت برابرست با $I_{sc} = E_{ar}/R_a$.

روشی ساده تر برای تعیین مشخصه خارجی ژنراتور شنت آن است که از نقطه P خطی عمود بر محور افقی رسم نماییم و روی آن پاره خط هایی معادل افت ولتاژهای $R_a I_a$ تحت جریان های مختلف مشخص کنیم. مثلاً پاره خط pq معادل افت ولتاژ $R_a I_{a1}$ است. از نقطه q خطی موازی op رسم می کنیم تا منحنی مغناطیس شوندگی را در دو نقطه b و n قطع نماید. به این ترتیب دو ولتاژ پایانه متناظر با جریان I_{a1} حاصل می شود.

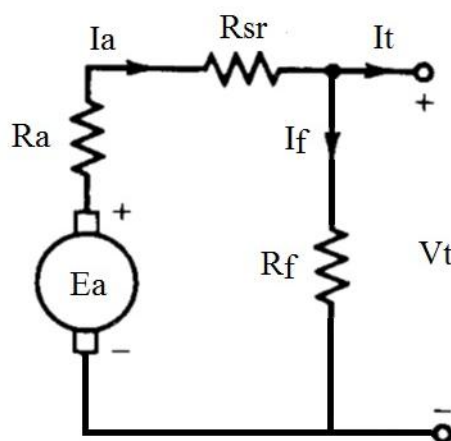
با افزایش جریان پایانه، افت ولتاژ در ژنراتور DC شنت شدیدتر از تحریک جداگانه است. علت این امر آن است که با افزایش جریان پایانه، افت ولتاژ $R_a I_a$ بیشتر شده و باعث کاهش ولتاژ پایانه و در نتیجه جریان تحریک می گردد که به نوبه خود E_a را نیز کاهش می دهد. این کاهش E_a دوباره V_t را کاهش می دهد. این روند در تحریک جداگانه نبود زیرا E_a مستقل از جریان آرمیچر است.

۳-۱۰-۴ ژنراتور DC کمپوند

همانطور که قبلاً اشاره شد در ماشین کمپوند دو نوع سیم پیچی تحریک شنت و سری مورد استفاده قرار می گیرند که مدار ژنراتور کمپوند در شکل ۳-۴۰ نشان داده شده است. در این مدار R_f مقاومت سیم پیچی تحریک شنت و R_{sr} مقاومت سیم پیچی تحریک سری می باشد. توجه داشته باشید اگرچه هر دو سیم پیچی شنت و سری تحریک می شوند اما سیم پیچی شنت به عنوان سیم پیچی تحریک اصلی در نظر گرفته می شود.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۴۰ ژنراتور کمپوند: (الف) نوع شنت بلند، (ب) نوع شنت کوتاه

معادلات حاکم در حالت ماندگار

با توجه به مدار نشان داده شده در شکل ۳-۴۰ معادلات حاکم بر عملکرد حالت ماندگار ژنراتور کمپوند عبارتند از:

شنت کوتاه

$$V_t = E_a - R_a I_a - R_{sr} I_t$$

$$I_t = I_a - I_f$$

شنت بلند

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

$$I_t = I_a - I_f$$

$$V_t = R_f I_f$$

برای هر دو اتصال داریم:

$$E_a = K_a (\varphi_{sh} \pm \varphi_{sr}) \omega_m \quad (۳-۲۱)$$

که در آن:

φ_{sh} : شار حاصله توسط سیم پیچی شنت

φ_{sr} : شار حاصله توسط سیم پیچی سری

اگر هر دو شار همدیگر را تقویت کنند کمپوند اعم از شنت بلند و کوتاه، کمپوند اضافی نامیده می شود و در صورت تضعیف، کمپوند نقصانی.

$$F_{eff} = F_{sh} \pm F_{sr} - F_{AR} \quad \text{کل mmf مؤثر هر قطب}$$

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

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

که در آن:

$I_{f(AR)}$: جریان معادل برای مدل کردن اثر عکس العمل آرمیچر

N_f : تعداد دورهای سیم پیچی تحریک شنت

N_{sr} : تعداد دورهای سیم پیچی تحریک سری

I_f : جریان سیم پیچی تحریک شنت

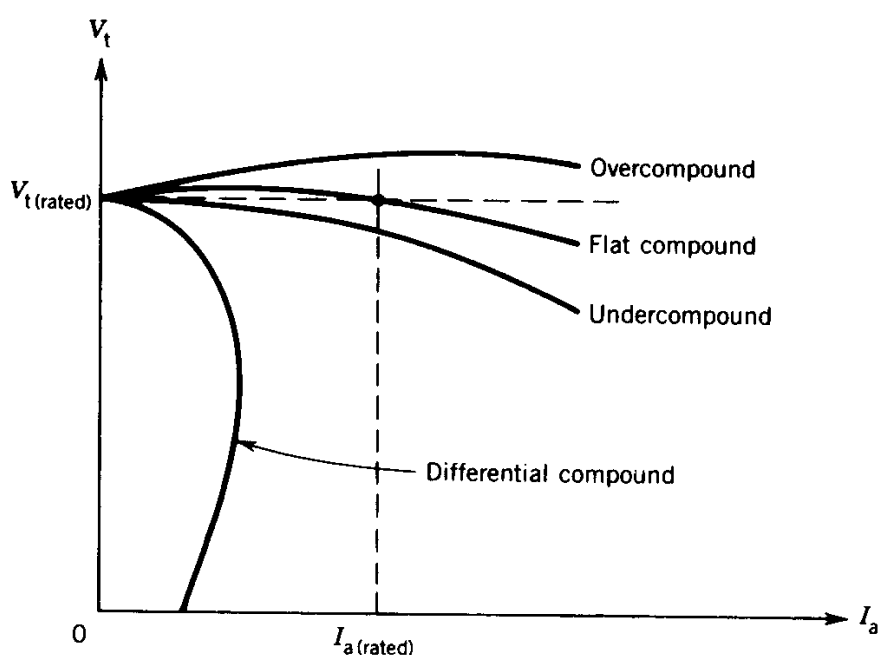
I_{sr} : جریان سیم پیچی تحریک سری

در محاسبه آمپردور مربوط به جریان مؤثر و عکس العمل آرمیچر، تعداد دور N_f مدنظر قرار گرفته است زیرا همان طور که گفته شد سیم پیچی شنت با تعداد دور N_f سیم پیچی تحریک اصلی محسوب می شود.

مشخصه ی خارجی ژنراتور DC کمپوند

مشخصه خارجی ژنراتور کمپوند در شکل ۳-۴۱ نمایش داده شده اند. برای کمپوند اضافی (شار دو سیم پیچی شنت و سری همدیگر را تقویت می کنند) سه نوع فوق کمپوند، زیر کمپوند و کمپوند تخت یا مسطح مطرح می شود و این انواع به تعداد دور سیم پیچی تحریک سری بستگی دارد. اگر آمپردور سیم پیچی سری در مقایسه با آمپردور سیم پیچی تحریک شنت کوچک باشد (زیر کمپوند)، مشخصه به سمت مشخصه ژنراتور شنت میل می کند. در صورتی که قابل ملاحظه باشد (فوق کمپوند) مشخصه شکل مشخصه ژنراتور سری (که در بخش بعدی معرفی می شود) را پیدا می کند. با انتخاب مناسب تعداد دورها (کمپوند تخت) این امکان وجود دارد که در جریان نامی همان ولتاژ بی باری را داشته باشیم که در بعضی کاربردها این بسیار ارزشمند است

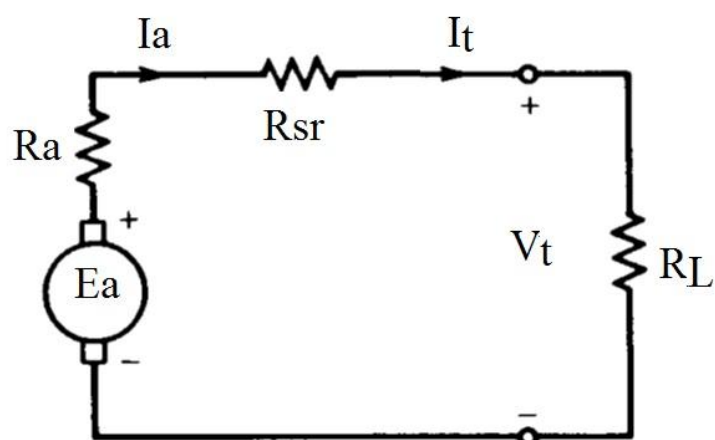
در کمپوند نقصانی با افزایش جریان آرمیچر ولتاژ پایانه سریعاً سقوط می کند و در این مشخصه اساساً جریان آرمیچر ثابت است. (کاربرد در جوشکاری)



شکل ۳-۴۱- مشخصه ی خروجی ژنراتور DC

۳-۱۰-۵- ژنراتور DC سری

مدار این ژنراتور در شکل ۳-۴۲ نشان داده شده است و مشاهده می شود سیم پیچی تحریک سری مورد استفاده قرار می گیرد و مدار آن با مدار آرمیچر سری می شود.



شکل ۳-۴۲- مدار معادل یک ژنراتور DC سری

۳-۱۰-۵-۱- معادلات حاکم در حالت ماندگار

با توجه به مدار نشان داده شده در شکل ۳-۴۲ معادلات حاکم بر عملکرد حالت ماندگار ژنراتور سری عبارتند از:

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

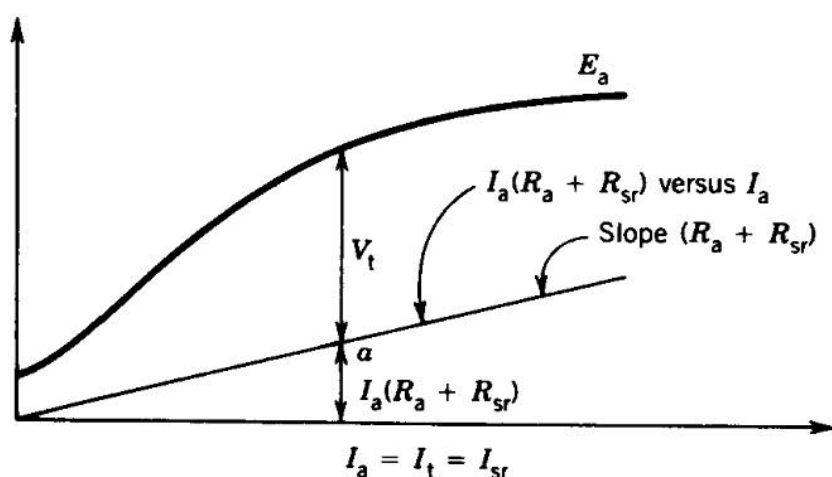
$$I_t = I_a = I_{sr}$$

۳-۱۰-۵-۲- مشخصه ی خارجی ژنراتور DC سری

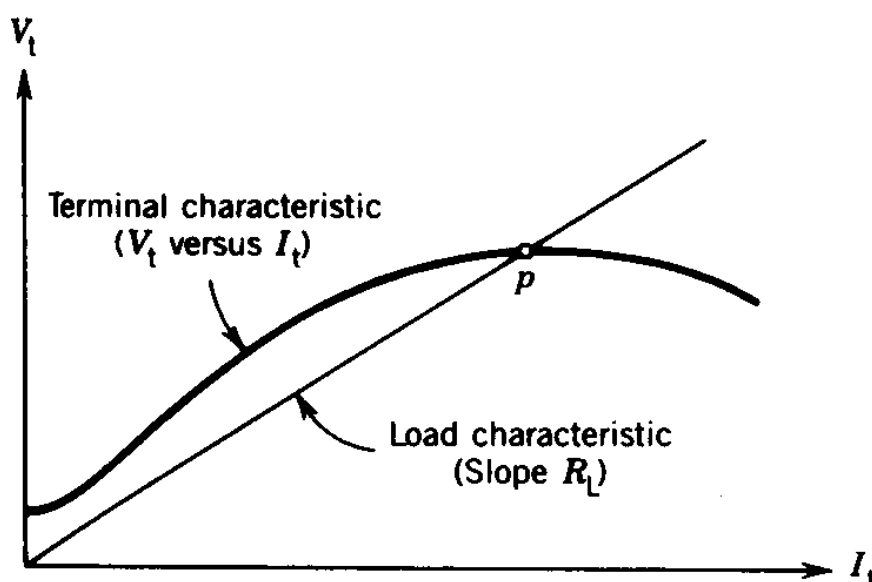
با توجه به مدار شکل ۳-۴۲ داریم:

$$E_a - V_t = (R_a + R_{sr}) I_a \quad (۳-۲۲)$$

روش به دست آوردن مشخصه به این ترتیب است که منحنی مغناطیس شونده و خط بار افت ولتاژ $(R_a + R_{sr}) I_a$ برحسب I_a مطابق شکل ۳-۴۳ در یک صفحه رسم می کنیم. از (۳-۲۲) واضح است به ازای هر جریان پایانه که مساوی I_a است، افت ولتاژ $(R_a + R_{sr}) I_a$ معلوم است. پاره خطی با اندازه این افت فقط در یک محل بین منحنی و خط بار قرار می گیرد و بنابراین ولتاژ پایانه متناظر پیدا می شود. مشخصه خارجی ژنراتور DC سری در شکل ۳-۴۴ نشان داده شده است. نقطه کار P از تلاقی این مشخصه با مشخصه بار به دست می آید.



شکل ۳-۴۳- منحنی مغناطیس شونده و خط بار افت ولتاژ $(R_a + R_{sr}) I_a$ برحسب I_a



شکل ۳-۴۴- مشخصه ی خروجی ژنراتور DC

۳-۱۰-۶- قطب های کمکی

در ماشین DC مجموعه کموتاتور جاروبک وظیفه وارنه کردن جریان دون کلاف را دارند که به این عمل فرآیند کموتاسیون گفته می شود.

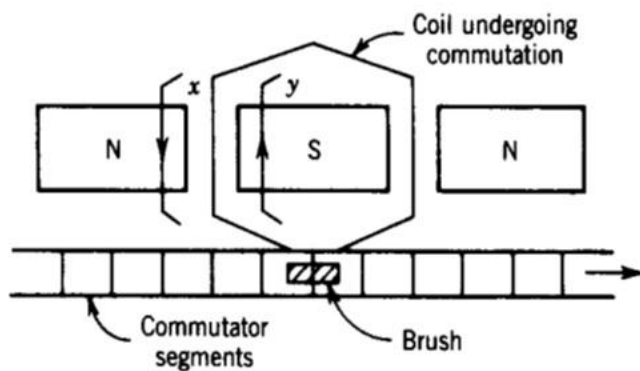
ولتاژ راکتانسی

حلقه (کلافی) که با کموتاسیون مواجه است در قلمرو بین قطب های اصلی یا ناحیه قطب های کمکی قرار می گیرد. به این ناحیه، ناحیه خنثی نیز گفته می شود. در معرفی اثر عکس العمل آرمیچر نیز گفته شد که نیروی محرکه مغناطیس آرمیچر شاری در ناحیه خنثی پدید می آید (شکل ۳-۴۵-الف و ۳-۴۵-ب). حرکت کلاف در این ناحیه به خاطر وجود شار باعث القاء ولتاژ می گردد که ولتاژ راکتانسی نامیده می شود. در حقیقت این ولتاژ راکتانسی باعث تأخیر در تغییر جریان می گردد و نمی گذارد جریان مطابق شکل ۳-۴-ج به صورت خطی هنگام کموتاسیون تغییر کند. از یک دیدگاه دیگر می توان اینچنین گفت که حلقه (کلافی) که با فرآیند کموتاسیون مواجه می شود در ناحیه خنثی قرار دارد و به خاطر وجود شار ناشی از اثر عکس العمل آرمیچر دارای اندوکتانس است و این پارامتر سبب تأخیر در تغییر جریان می گردد. زمان جابجایی جریان در کلاف مشخص و یک مقدار ثابتی است که به

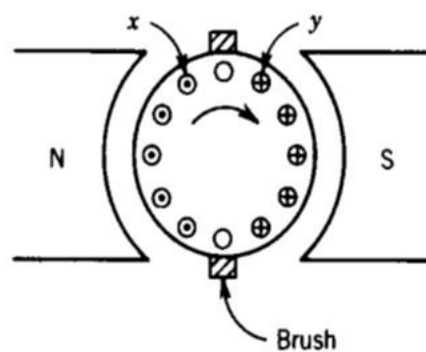
سرعت رتور بستگی دارد. بنابراین ممکن است تاخیر در تغییر جریان مطابق شکل ۳-۴۵-د باعث پرش جریان و جرقه گردد که پدیده مطلوبی نیست.

برای مقابله با این مشکل از قطب های کمکی استفاده می شود (شکل ۳-۴۵-ه). مدار سیم پیچی روی قطب های کمکی مطابق شکل ۳-۴۵-و با مدار آرمیچر سری می شوند و شاری پدید می آورند، در جهت مخالف شار آرمیچر که باعث تضعیف آن می شود. با این کار شار در محدوده ی قطب های کمکی صفر می شود و ولتاژ حرکتی به وجود نمی آید.

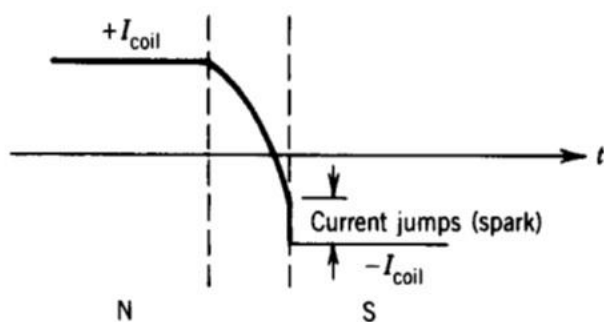
سیم پیچی جبران گر در پیشانی قطب های اصلی قرار می گیرند و برای حل مشکل تضعیف شار زیر قطب اصلی ناشی از اثر عکس العمل آرمیچر مورد استفاده قرار می گیرند. سیم پیچی روی قطب های کمکی برای از بین بردن شار در محدوده قطب های کمکی کاربرد دارند که نمی تواند به وسیله سیم پیچی جبران گر به صورت کامل حذف شود. لازم به ذکر است در ماشین های بزرگ هر دو سیم پیچی جبران گر و قطب های کمکی برای بهبود عملکرد ماشین DC ضروری اند.



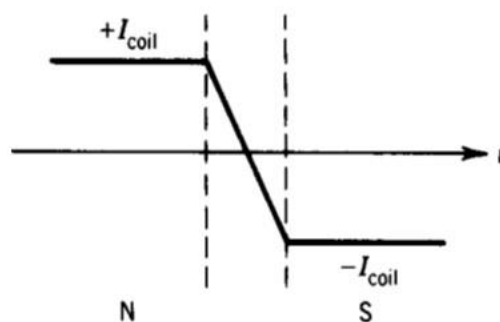
(ب)



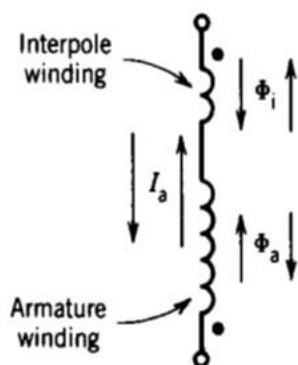
(الف)



(د)

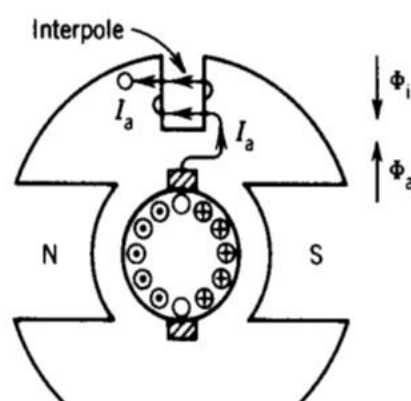


(ج)



Φ_a, Φ_i oppose each other, irrespective of direction of I_a .

(و)

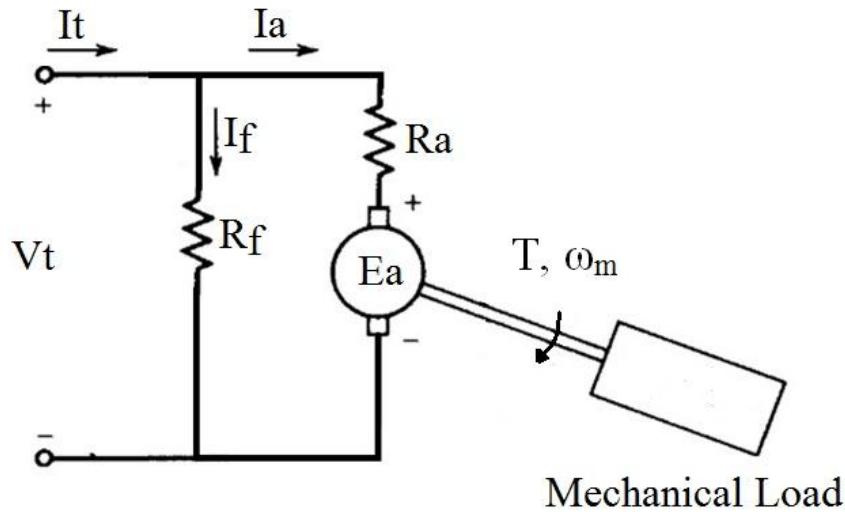


(ه)

شکل ۳-۴۵ - کموتاسیون در ماشین DC : (الف) برش عرضی ماشین، (ب) نگاه از بالا به حلقه ای که با فرآیند کموتاسیون مواجه است، (ج) جابجایی جریان در حلقه زمانی که حلقه فقط با یک مقاومت مدل شود، (د) جابجایی جریان در حلقه زمانی که حلقه با مقاومت و سلف مدل شود، (ه) محل قطب های کمکی، (و) چگونگی تغذیه سیم پیچی قطب های کمکی

۳-۱۱- موتورهای جریان مستقیم (DC)

۳-۱۱-۱- موتور DC شنت



شکل ۳-۴۶- مدار معادل موتور dc شنت

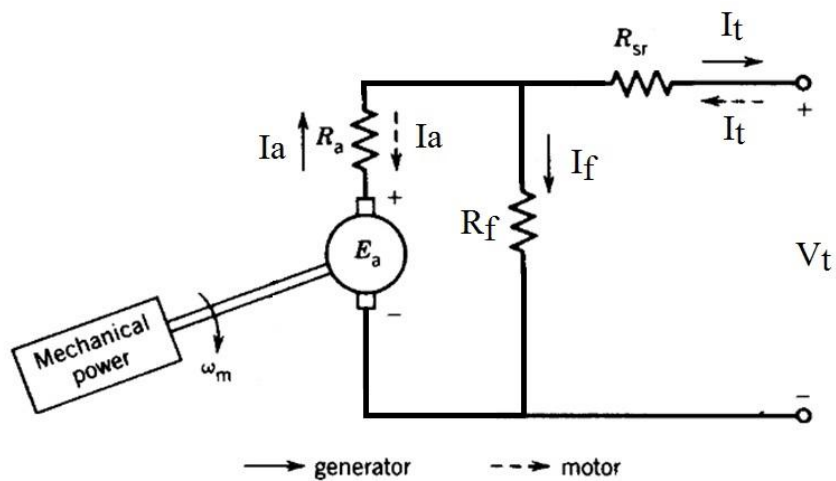
معادلات حاکم در حالت ماندگار

با توجه به مدار نشان داده شده در شکل ۳-۴۶ معادلات حاکم در حالت دائمی عبارتند از:

$$\begin{cases} V_t = E_a + R_a I_a \\ I_t = I_a + I_f \\ E_a = K_a \phi \omega_m \end{cases}$$

۳-۱۱-۲- پخش توان و بازده

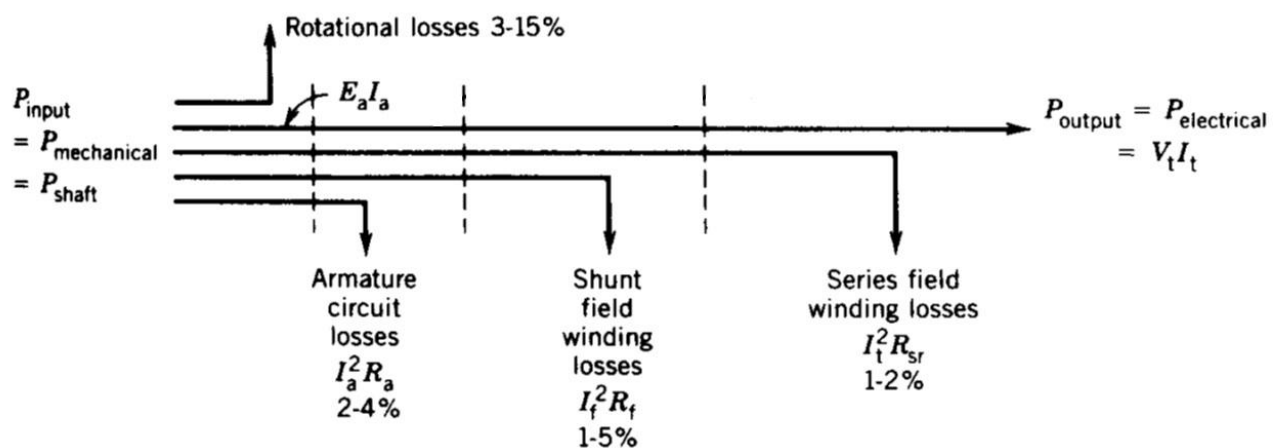
تشریح مسئله برای ماشین DC کمپوند از نوع شنت کوتاه که مدار آن در شکل ۳-۴۷ نشان داده شده است انجام می گردد. توجه شود در حالت موتوری جهت جریان به سمت داخل است و در حالت ژنراتوری برعکس.



شکل ۳-۴۷- شمای ماشین DC کمپوند شنت کوتاه

حالت ژنراتوری

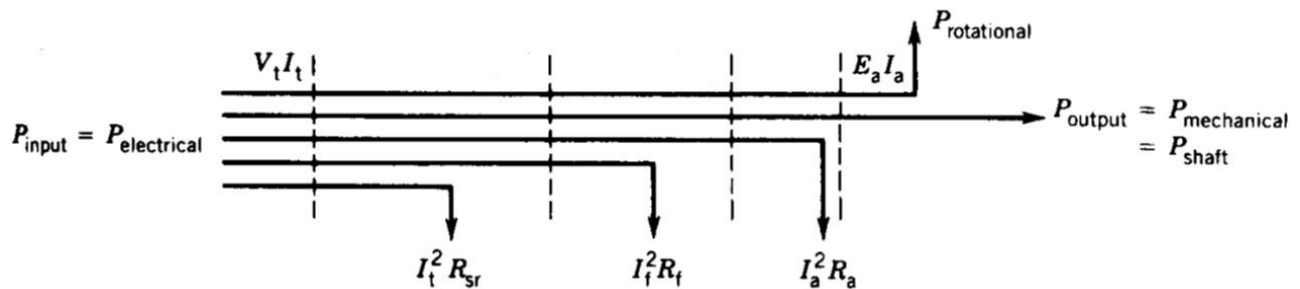
توان ورودی به ماشین به صورت توان مکانیکی است و همان توان روی محور است. توان خروجی به صورت توان الکتریکی است. نمودار پخش توان برای حالت ژنراتوری در شکل ۳-۴۸ مشاهده می شود.



شکل ۳-۴۸- حالت ژنراتوری

حالت موتور

در این حالت توان ورودی به ماشین توان الکتریکی است و توان خروجی به صورت توان مکانیکی ظاهر می‌شود. نمودار پخش توان برای حالت ژنراتوری در شکل ۳-۴۹ مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۴۹- حالت موتوری

نسبت توان خروجی به توان ورودی بازده یا راندمان یا بهره نامیده می‌شود:

$$E_{ff} = \frac{P_{output}}{P_{input}} = \frac{P_{output}}{P_{output} + P_{loss}} \quad (۳-۲۳)$$

که در آن P_{loss} مجموع تلفات اهمی و چرخشی است.

۳-۱۱-۳- مشخصه ی گشتاور – سرعت

در حالت عملکرد موتوری این مشخصه از اهمیت زیادی برخوردار است. یک موتور DC تحریک مستقل را که مدار آن در شکل ۳-۵۰ نمایش داده شده است، در نظر بگیرید.

می‌دانیم:

$$E_a = K_a \phi \omega_m \quad (۳-۲۴)$$

به علاوه، از مدار شکل ۳-۵۰ داریم:

$$E_a = V_t - R_a I_a \quad (۳-۲۵)$$

از (۳-۲۴) و (۳-۲۵) نتیجه می‌شود:

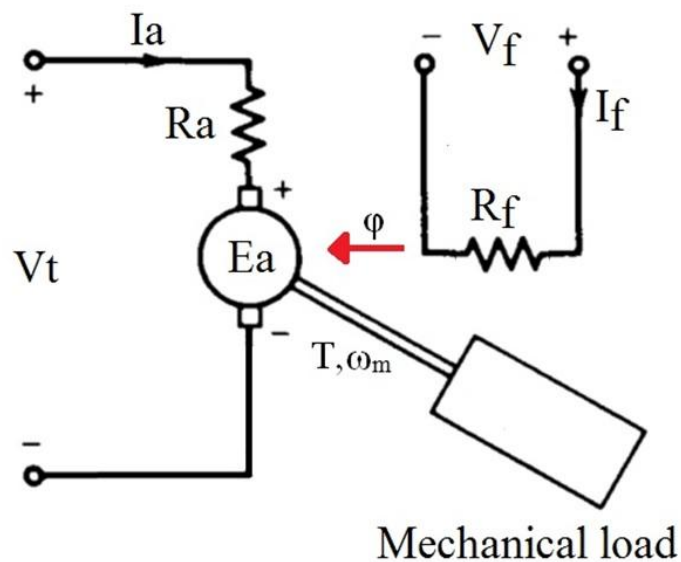
$$\omega_m = \frac{V_t - R_a I_a}{K_a \phi} \quad (26-3)$$

به علاوه می دانیم:

$$T = K_a \phi I_a \quad (27-3)$$

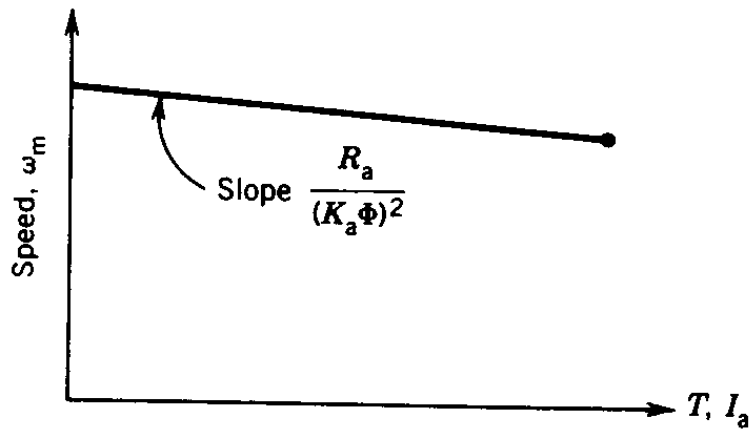
بنابراین از (26-3) و (27-3) داریم:

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a \phi} - \frac{R_a}{(K_a \phi)^2} T \quad (28-3)$$



شکل ۳-۵۰- موتور dc تحریک مستقل

اگر ولتاژ پایانه (V_t) و شار (ϕ) ثابت بمانند مشخصه با توجه به (28-3) به شکل 3-51 می باشد.



شکل ۳-۵۱- ولتاژ پایانه و شار ثابت

تغییر سرعت در اثر افزایش بار ناچیز است در ماشین واقعی عکس العمل آرمیچر شار را کاهش می دهد و در نتیجه کاهش سرعت مزبور کمتر نیز می شود. بنابراین در موتور DC تحریک جداگانه عکس العمل آرمیچر تنظیم سرعت را بهبود می بخشد.

کنترل سرعت موتور DC تحریک جداگانه به سه صورت امکان پذیر است:

۱- کنترل ولتاژ آرمیچر (V_t)

۲- کنترل شار (ϕ)

۳- کنترل مقاومت آرمیچر (R_a)

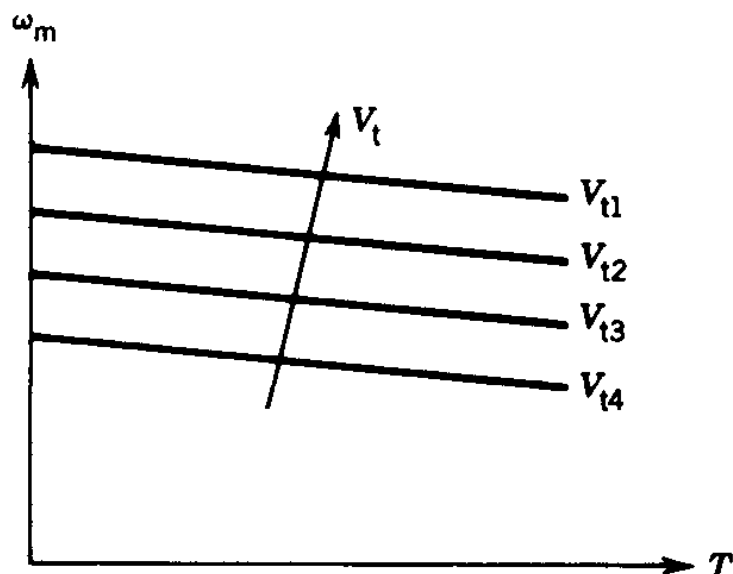
کنترل ولتاژ آرمیچر:

در این روش کنترلی کنترل سرعت با ولتاژ آرمیچر انجام می شود و شار و مقاومت آرمیچر در (۳-۲۸) ثابت اند:

$$\omega_m = K_1 V_t - K_2 T \quad (۳-۲۹)$$

$$\text{که در آن } K_1 = \frac{1}{K_a \phi} \quad , \quad K_2 = \frac{R_a}{(K_a \phi)^2}$$

برطبق (۳-۲۹) کنترل سرعت مشابه آن در شکل ۳-۵۲ می گردد که $V_{t_3} > V_{t_2} > V_{t_1}$.



شکل ۳-۵۲ - تنظیم سرعت

در کاربردهای عملی هرگاه کنترل سرعت به وسیله تغییر V_t انجام می پذیرد، جریان آرمیچر روی مقدار نامی ثابت نگه داشته می شود تا حداکثر گشتاور حاصل شود ($T = K_a \phi I_a$) و موتور به سرعت دور بگیرد.

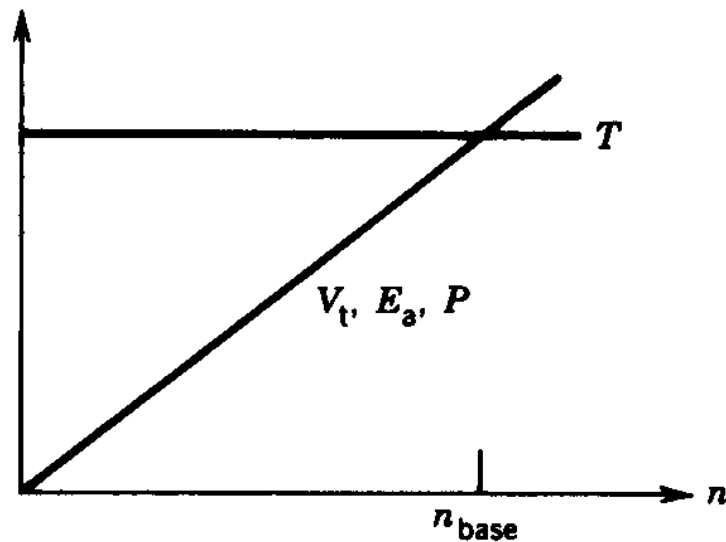
$$E_a = V_t - R_a I_a \quad (۳-۳۰)$$

$$E_a = K_a \phi \omega_m \quad (۳-۳۱)$$

با افزایش ولتاژ V_t سرعت موتور بیشتر می شود ولی طبق (۳-۳۱) ولتاژ ضدمحرکه E_a نیز بالا می شود. بنابراین با توجه به (۳-۳۰) این امکان وجود دارد که حین افزایش سرعت همواره جریان آرمیچر روی مقدار نامی ثابت نگه داشته شود.

با ثابت بودن I_a ، از (۳-۳۰) مشاهده می شود که E_a متناسب با V_t است. به علاوه، از (۳-۳۱)، E_a متناسب با سرعت است چون شار ثابت است. بنابراین، با افزایش V_t سرعت به طور خطی افزایش می یابد.

اگر جریان آرمیچر ثابت باشد، طبق رابطه $T = K_a \phi I_a$ ، گشتاور نیز ثابت است (ناحیه گشتاور ثابت). حین افزایش سرعت با بیشتر کردن ولتاژ پایانه (V_t)، توان ورودی از منبع ($P = V_t I_a$)، چون I_a ثابت است، به صورت خطی افزایش می یابد. بنابراین تغییرات گشتاور و سرعت در این روش کنترل سرعت مطابق شکل ۳-۵۳ است.



شکل ۳-۵۳- عملکرد با افزایش ولتاژ

سرعت پایه n_{base} ، سرعتی است که تحت ولتاژ اسمی (نامی) پایانه حاصل می شود. توجه شود این روش کنترل سرعت گران است زیرا به منبع ولتاژ متغیر پرهزینه نیاز داریم.

کنترل میدان:

در این حالت کنترلی موتور شنت در نظر گرفته می شود ولی بحث کلی است و درباره انواع دیگر موتور DC برای مثال موتور تحریک مستقل نیز صادق است. با دنبال کردن روند مشابه می توان به رابطه ای یکسان با (۳-۲۸) برای گشتاور- سرعت در موتور شنت دست یافت. با فرض سیستم خطی (ماشین به اشباع نمی رود) داریم

$$K_a \varphi = K_f I_f \text{ و در نتیجه:}$$

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a I_f} - \frac{R_a}{(K_a I_f)^2} T \quad (۳-۳۲)$$

در حالت بی باری ($T = 0$) و لذا:

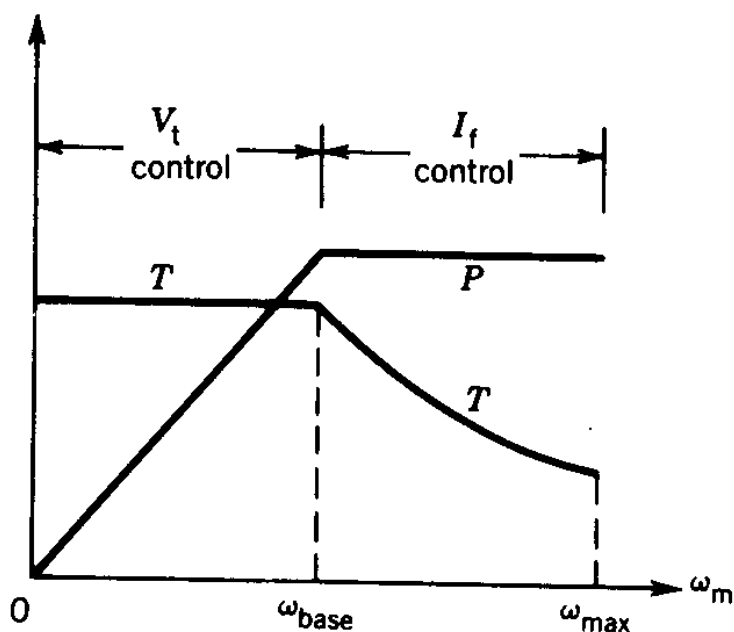
$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a I_f} \quad (۳-۳۳)$$

در این حالت اگر در مدار تحریک پارگی رخ دهد ($I_f = 0$) سرعت به طرز خطرناکی افزایش می یابد. از (۳-۳۳) مشاهده می شود با کاهش I_f سرعت می تواند افزایش یابد و از سرعت پایه نیز بیشتر شود.

در این روش کنترلی نیز جریان آرمیچر روی مقدار نامی خود ثابت نگه داشته می شود. از آنجایی که با کاهش شار، سرعت افزایش می باید طبق (۳-۳۱) ولتاژ ضدمحرکه E_a ثابت می ماند. ولتاژ آرمیچر نیز روی مقدار نامی خود ثابت است و در نتیجه با توجه به (۳-۳۰) این امکان وجود دارد که حین افزایش سرعت همواره جریان آرمیچر روی مقدار نامی ثابت نگه داشته شود.

مزیت ثابت نگه داشتن جریان آرمیچر روی مقدار نامی آن است که طبق رابطه $T = K_a \phi I_a$ اگرچه شار کاهش می یابد ولی حداقل جریان آرمیچر روی ماکزیمم مقدار خود ثابت نگه داشته شده و گشتاور پایین نمی آید.

از آنجاییکه ولتاژ و جریان آرمیچر در ناحیه کنترل میدان روی مقدار نامی خود ثابت اند و توان ورودی $P = V_t I_a$ نیز ثابت است (ناحیه توان ثابت). به علاوه ، با توجه به $T = K_a \phi I_a$ چون شار کاهش می یابد، گشتاور با افزایش سرعت افت می کند. شکل ۳-۵۴ نحوه تغییرات گشتاور و سرعت در این روش کنترل سرعت نشان می دهد.



شکل ۳-۵۴- کنترل سرعت (نواحی گشتاور ثابت و توان ثابت)

کنترل میدان نسبتاً ارزان است اما به خاطر اندوکتانس زیاد مدار تحریک تغییر جریان تحریک برای تغییر دادن شار به کندی صورت می‌پذیرد ($\tau = \frac{L}{R}$) ، لذا این سیستم کنترلی کند و لخت است.

کنترل مقاومت آرمیچر

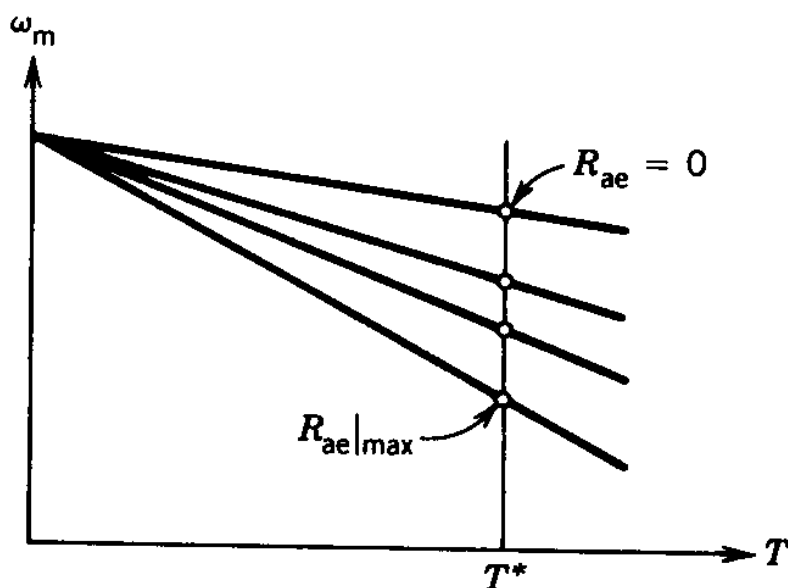
موتور DC تحریک جداگانه را در نظر بگیرید که رابطه گشتاور سرعت آن در (۳-۲۸) داده شد. اگر ولتاژ آرمیچر و جریان تحریک ثابت باشند، کنترل سرعت می‌تواند توسط تغییر مقاومت آرمیچر (R_a) انجام پذیرد :

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a \phi} - \frac{R_a + R_{ae}}{(K_a \phi)^2} T \quad (۳-۳۴)$$

که در آن:

R_{ae} : مقاومت اضافه شده در مدار آرمیچر برای کنترل سرعت

همانطور که از شکل ۳-۵۵ واضح است، مقاومت R_{ae} می‌تواند برای حصول سرعت های مختلف تحت گشتاور ثابت T^* تنظیم شود.

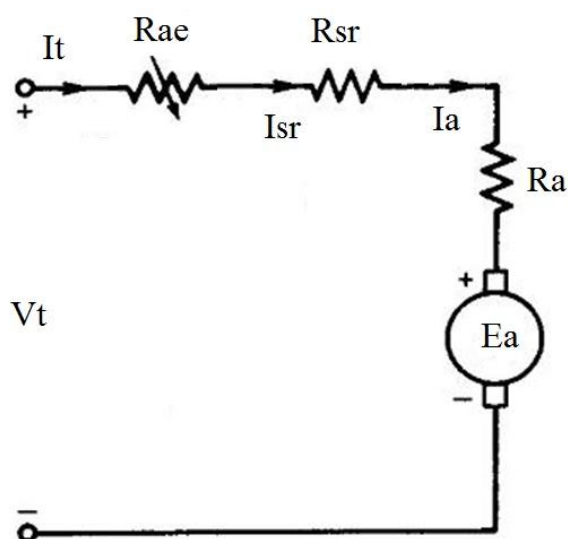


شکل ۳-۵۵- کنترل مقاومت آرمیچر

این سیستم کنترل سرعت ساده است ولی به خاطر تلفات مسی زیاد در رثوستا (R_{ae}) ، بازده (راندمان) کاهش می‌یابد. از آنجایی که جریان آرمیچر از این رثوستا می‌گذرد هزینه ساخت آن نیز زیاد است.

۳-۱۱-۲- موتور DC سری

مدار این موتور در شکل زیر نشان داده شده است که در آن مقاومت R_{ae} به منظور کنترل سرعت استفاده می‌شود.



شکل ۳-۵۶- مدار موتور DC سری

که در آن:

R_{ae} : مقاومت اضافه شده در مدار آرمیچر به منظور کنترل سرعت

R_a : مقاومت مدار آرمیچر

R_{sr} : مقاومت سیم پیچی تحریک سری

با فرض سیستم خطی (هسته به اشباع نمی رود):

$$K_a \varphi = K_{sr} I_a \quad (35-3)$$

با توجه به (35-3) داریم:

$$E_a = K_a \varphi \omega_m = K_{sr} I_a \omega_m \quad (36-3)$$

$$T = K_a \varphi I_a = K_{sr} I_a I_a = K_{sr} I_a^2 \quad (37-3)$$

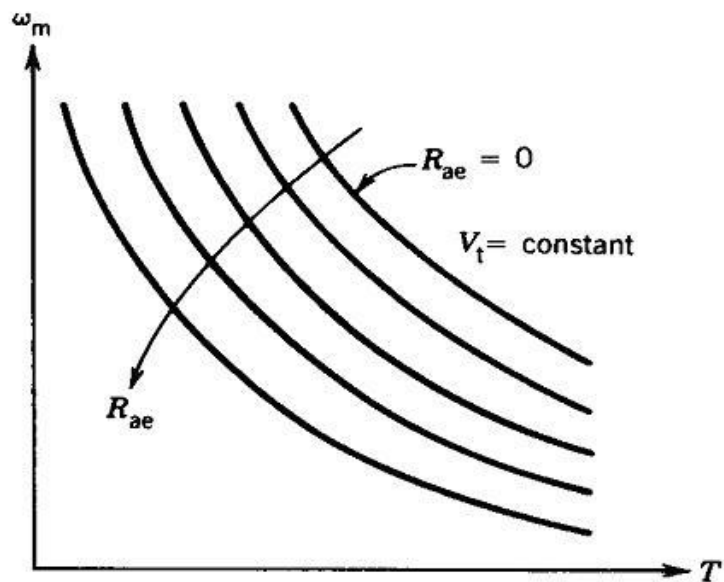
از طرف دیگر، با توجه به مدار معادل موتور نشان داده شده در شکل ۵۶-۳ داریم:

$$E_a = V_t - (R_a + R_{sr} + R_{ae}) I_a \quad (38-3)$$

از (36-3)، (37-3) و (38-3)، نهایتاً رابطه بین سرعت و گشتاور به صورت معادله زیر نتیجه می شود:

$$\omega_m = \frac{V_t}{\sqrt{K_{sr}} \sqrt{T}} - \frac{R_a + R_{sr} + R_{ae}}{K_{sr}} \quad (39-3)$$

با توجه به معادله گشتاور- سرعت به دست آمده مشاهده می شود که برای موتور DC سری گشتاور زیاد در سرعت کم داریم. به خاطر این خصوصیت منحصر به فرد آن، کاربرد موتور سری در سیستم حمل و نقل که به گشتاور راه انداز بسیار زیاد احتیاج دارد، فراوان است. شکل ۵۷-۳ نحوه تغییر مشخصه گشتاور- سرعت با تغییر مقاومت اضافه شونده در مدار آرمیچر (R_{ae}) را نشان می دهد.



۳-۵۷- مشخصه گشتاور سرعت موتور DC سری برای مقادیر مختلف مقاومت R_{ae}

۳-۱۱-۳- راه اندازی موتورهای DC

موتور تحریک جداگانه را در نظر بگیرید:

$$V_t = E_a + R_a I_a \Rightarrow I_a = \frac{V_t - E_a}{R_a} \quad (۳-۴۰)$$

که در آن:

$$E_a = K_a \varphi \omega_m \quad (۳-۴۱)$$

در لحظه راه اندازی $\omega_m = 0 \Leftarrow E_a = 0$ و جریان راه اندازی به طرز خطرناکی افزایش می یابد.

روش های مختلف راه اندازی:

۱- اضافه کردن مقاومت در مدار آرمیچر : این مقاومت با سرعت گرفتن موتور در چند مرحله از مدار بایستی

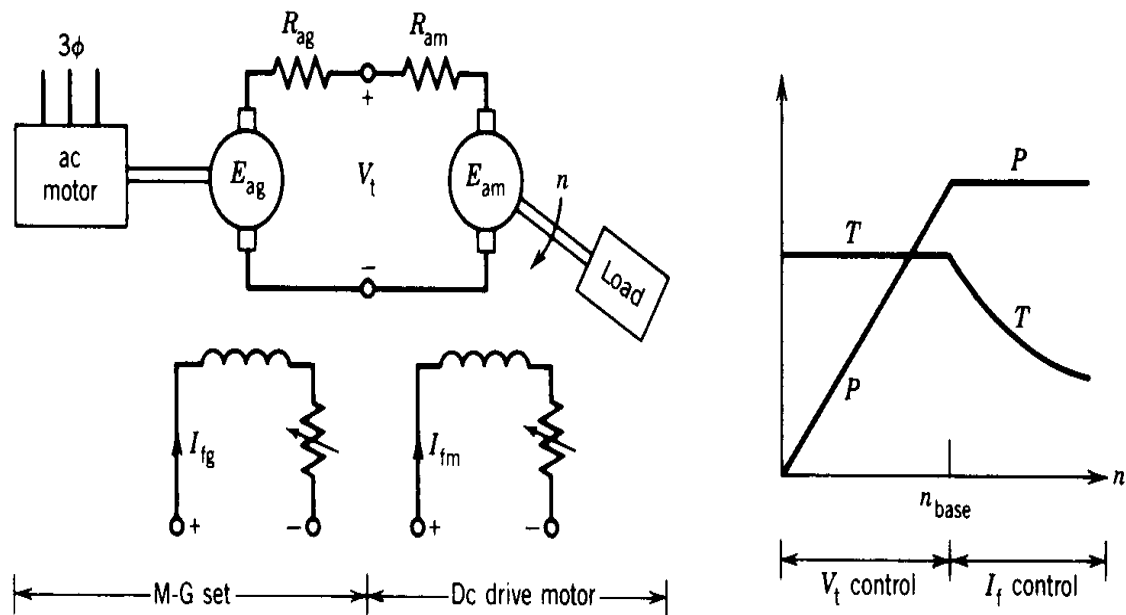
خارج شود.

۲- کاهش V_t در لحظه راه اندازی

۳-۱۱-۴- کنترل سرعت

سیستم وارد لئونارد :

این سیستم همانطور که در شکل ۵۸-۳ نشان داده شده است، از یک مجموعه موتور ژنراتور M-G تشکیل شده است که ژنراتور از نوع DC است و موتور از نوع AC تحت سرعت ثابت.



شکل ۵۸-۳ - سیستم وارلئونارد

۱- کنترل V_t : جریان تحریک موتور DC (I_{fm}) ثابت نگه داشته می شود. با کنترل جریان تحریک ژنراتور

DC (I_{fg}) ، ولتاژ تولیدی ژنراتور (E_{ag}) و به طبع ولتاژ ورودی موتور (V_t) بر طبق روابط زیر در محدوده صفر تا مقدار نامی (اسمی) خود تغییر می کند.

$$V_t = E_{ag} - R_{ag}I_a$$

$$E_{ag} = K_a \phi_g \omega_m$$

۲- کنترل I_f : در این حالت دیگر نمی توان ولتاژ ورودی موتور را افزایش داد، زیرا به مقدار اسمی خود رسیده

است. با کاهش I_{fm} به سرعت های بیشتر از سرعت مبنا می رسیم. (ناحیه تضعیف میدان)