

درس مبانی مهندسی برق ۲

مرجع اصلی درس:

کتاب ماشین های الکتریکی پ. س. سن، ترجمه دکتر عابدی از دانشگاه صنعتی امیرکبیر

Title: Principles of Electric Machines and Power Electronics, by P. C. Sen

سرفصل درس:

۱- مدارهای مغناطیسی و اصول تبدیل انرژی (انتخاب شده از فصول اول و سوم کتاب)

Chapter 1: Magnetic Circuits

Chapter 3: Electromechanical Energy Conversion

۲- ترانسفورماتور (انتخاب شده از فصل دوم کتاب)

Chapter 2: Transformers

۳- ماشین های جریان مستقیم (انتخاب شده از فصل چهارم کتاب)

Chapter 4: Direct Current (DC) Machines

۴- موتور القایی سه فاز (انتخاب شده از فصل پنجم کتاب)

Chapter 5: Induction (Asynchronous) Machine

نحوه ارزیابی:

امتحان میان ترم: ۸ نمره

امتحان پایان ترم: ۱۰ نمره

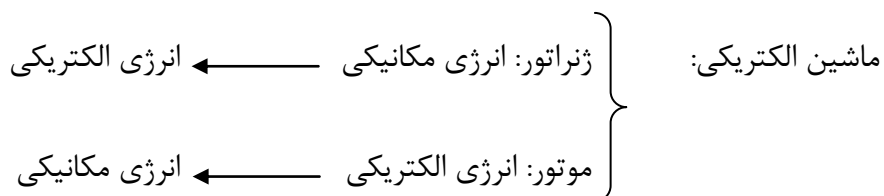
تکالیف: ۲ نمره

کارهای کلاسی: حضور غیاب، کوئیز و گزارش: حداقل ۲ نمره اضافه بر بیست

فصل اول: مدارهای مغناطیسی و اصول تبدیل انرژی

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 اصول تبدیل انرژی است.

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.

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

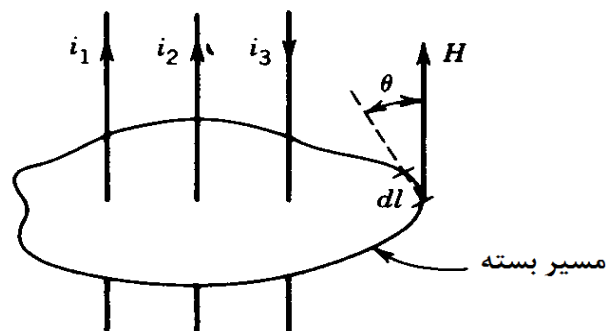
که در آن:

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 پیمایش انگشتان جهت شدت میدان مغناطیسی



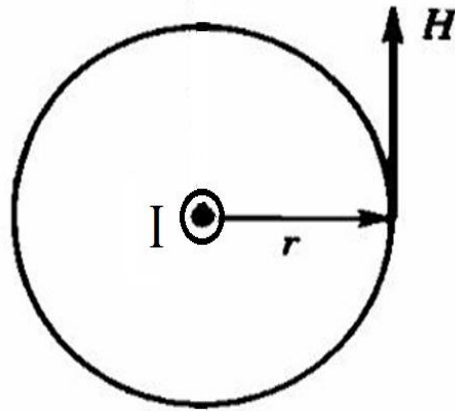
شکل ۱-۱- نمایش قانون مداری آمپر

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

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint H dl = H \oint dl = H \times 2\pi r = \sum i = I \quad (3-1)$$

و در نتیجه :

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (4-1)$$

۱-۳- 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:

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H \quad (\text{Wb/m}^2 \text{ یا } T) \quad (5-1)$$

که در آن:

μ : ضریب نفوذپذیری مغناطیسی (پرمابلیته) محیط بر حسب 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

{	$\mu_r = 1$	برای هادی های الکتریکی (مس)، عایق و هوا
	$\mu_r = 1000 - 6000$	برای مواد فرومغناطیسی به کار رفته در ماشین الکتریکی

۴-۱- رابطه بین شار و چگالی شار

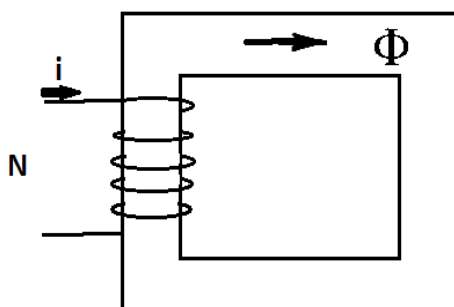
شار مغناطیسی (Magnetic flux) و چگالی شار مغناطیسی (Magnetic flux density) به صورت رابطه زیر به یکدیگر مربوط می شوند:

$$\varphi = B \times A \quad (\text{Wb}) \quad (۴-۱)$$

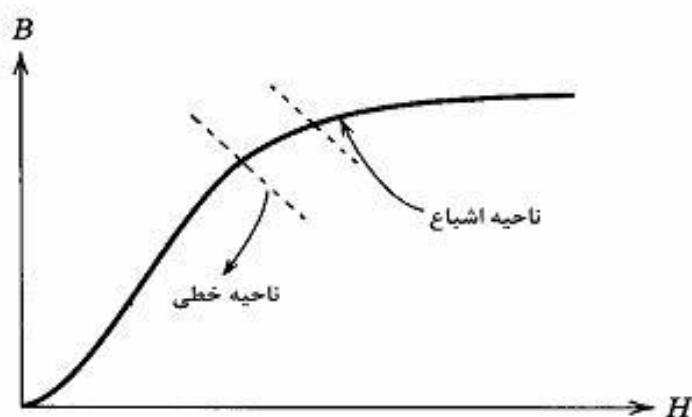
که در آن A سطح مقطع عبور شار است.

۵-۱- منحنی مغناطیس شونددگی

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



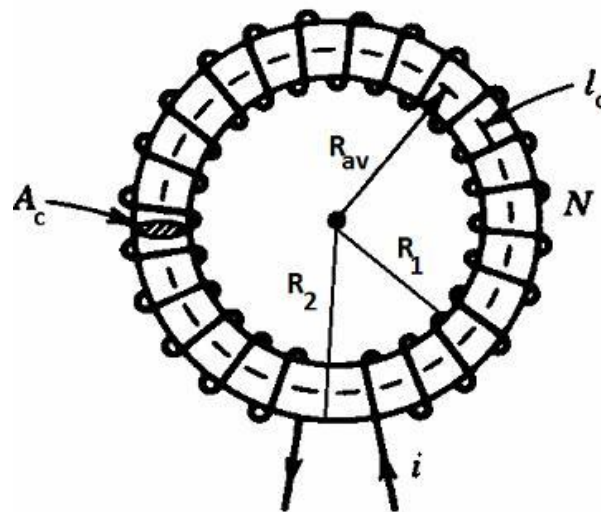
شکل ۱-۶- منحنی مغناطیس شونددگی

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.

ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در هر نقطه از منحنی مغناطیس شوندگی از رابطه $B = \mu H$ به دست می آید. با توجه به شکل ۱-۶، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در ناحیه خطی مقدار ثابتی دارد و برابر شیب خط می باشد.

۱-۶- 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، داریم:

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

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:

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

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.

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

$$\varphi = B A_c \quad (11-1)$$

از (۱۰-۱) و (۱۱-۱) داریم:

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

در نتیجه: $F = R\varphi$

در این رابطه :

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

که در آن :

R : مقاومت مغناطیسی (رلوکتانس)

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

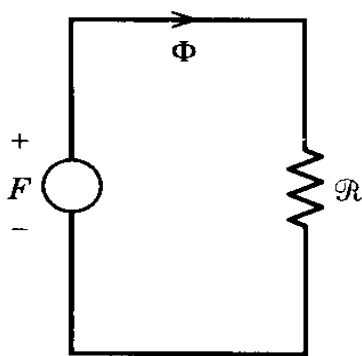
$$F = Ni = R \phi \quad (14-1)$$

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

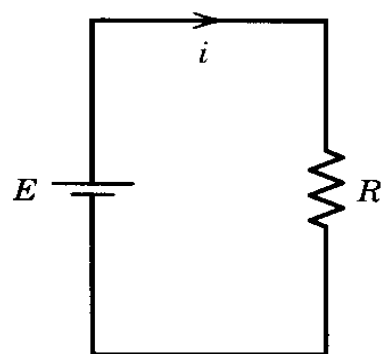
مدار الکتریکی : جریان (i) ولتاژ (V) مقاومت الکتریکی $R = \frac{l}{\sigma A}$

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

تشابه بین مدار الکتریکی و مدار معادل مغناطیسی در شکل زیر نشان داده شده است.

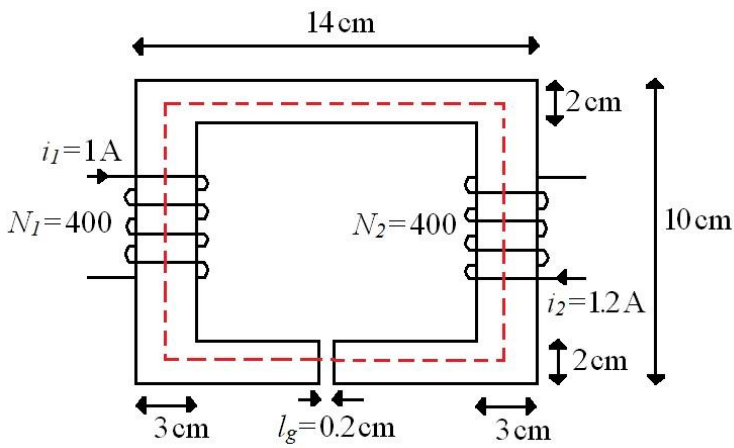


(ب)



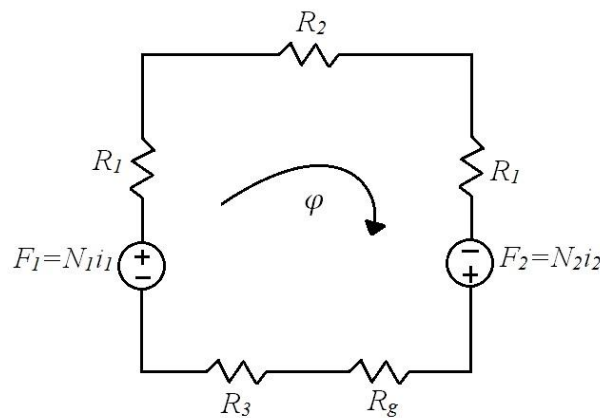
(الف)

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



مثال: در ساختار مغناطیسی شکل روبرو، شار عبوری از هسته را بدست آورید. ضخامت هسته 2 cm است و $\mu_r=1000$ می باشد.

حل: مدار معادل مغناطیسی ساختار فوق، مطابق شکل زیر است:



با استفاده از رابطه مربوط به محاسبه رلوکتانس ($R = \frac{l}{\mu_r \mu_0 A}$)، رلوکتانس های بخش های مختلف بدست می آیند:

$$R_1 = \frac{8 \times 10^{-2}}{1000 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 6 \times 10^{-4}} = 106103 \text{ At/Wb}$$

$$R_2 = \frac{11 \times 10^{-2}}{1000 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 4 \times 10^{-4}} = 218838 \text{ At/Wb}$$

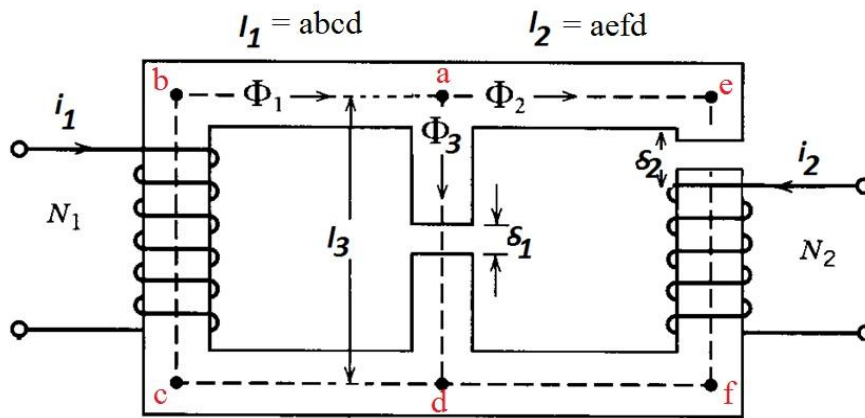
$$R_3 = \frac{(11-0.2) \times 10^{-2}}{1000 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 4 \times 10^{-4}} = 214859 \text{ At/Wb}$$

$$R_g = \frac{0.2 \times 10^{-2}}{1 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 4 \times 10^{-4}} = 3978873 \text{ At/Wb}$$

نهایتاً با توجه به kvl در حلقه داریم:

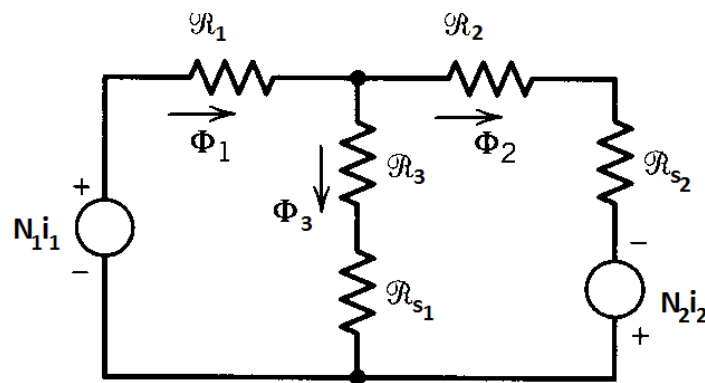
$$\varphi = \frac{N_1 i_1 + N_2 i_2}{2R_1 + R_2 + R_3 + R_g} = \frac{400 \times 1 + 400 \times 1.2}{2 \times 106103 + 218838 + 214859 + 3978873} = 0.19 \text{ mWb}$$

مثال: در اینجا، تحلیل ساختار مغناطیسی شکل ۷-۱ را از روش مدار معادل مغناطیسی مورد توجه قرار می‌دهیم.



شکل ۷-۱- ساختار مغناطیسی

مدار معادل مغناطیسی ساختار مزبور مطابق شکل ۸-۱ می‌باشد.



شکل ۸-۱- مدار معادل مغناطیسی ساختار مزبور

از kvl برای دوش در مدار معادل داریم:

$$-N_1 i_1 + R_1 \phi_1 + R_3 \phi_3 + R_{S_1} \phi_3 = 0 \quad (15-1)$$

$$-R_{S_1} \phi_3 - R_3 \phi_3 + R_2 \phi_2 + R_{S_2} \phi_2 - N_2 i_2 = 0$$

بنابراین:

$$R_1 \phi_1 + R_3 \phi_3 + R_{S_1} \phi_3 = N_1 i_1 \quad (16-1)$$

$$R_2 \phi_2 + R_{S_2} \phi_2 - R_3 \phi_3 - R_{S_1} \phi_3 = N_2 i_2$$

در معادله های بالا، مقاومت های مغناطیسی (رلوکتانس ها) عبارتند از:

$$R_1 = \frac{l_1}{\mu A_1} \quad , \quad R_3 = \frac{l_3 - \delta_1}{\mu A_3} \quad , \quad R_{s_1} = \frac{\delta_1}{\mu_0 A_3} \quad (17-1)$$

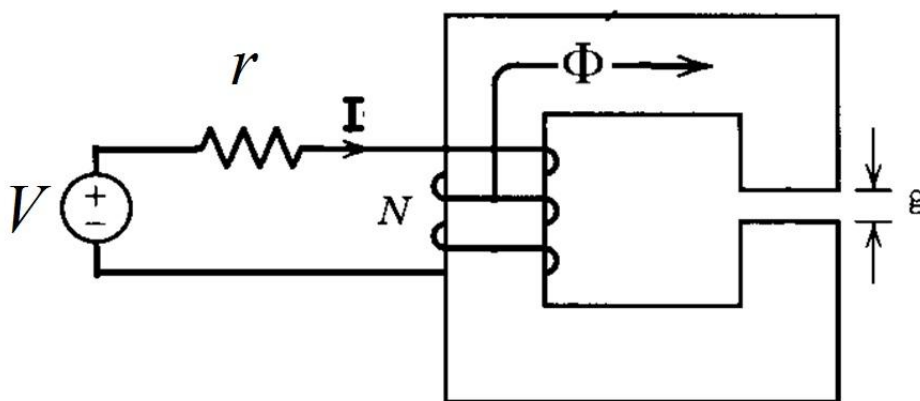
$$R_2 = \frac{l_2 - \delta_2}{\mu A_2} \quad , \quad R_{s_2} = \frac{\delta_2}{\mu_0 A_2}$$

برای یافتن مجهول ها در (۱۶-۱) $(\varphi_3, \varphi_2, \varphi_1)$ یک معادله دیگر نیاز داریم که همان kcl در گره مرکزی شکل ۸-۱ می باشد.

$$\varphi_1 = \varphi_2 + \varphi_3 \quad (18-1)$$

۷-۱- 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 ۹-۱) در حقیقت یک سلف است که می توان آن را با دو عنصر مقاومت و اندوکتانس به صورت سری باهم در نظر گرفت.



شکل ۹-۱- ساختار مغناطیسی یک سلف

طبق تعریف داریم:

$$\text{اندوکتانس} \triangleq \frac{\text{شار پیوندی با سیم پیچی}}{\text{جریان سیم پیچی}} \quad (19-1)$$

بنابراین:

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\phi}{i} \quad (20-1)$$

می توان اندوکتانس را برحسب رلوکتانس محاسبه کرد:

$$\phi = \frac{NI}{R} \Rightarrow L = \frac{N^2}{R} \quad (21-1)$$

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.

۸-۱- 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 :

$$e_{\text{ind}} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (22-1)$$

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:

$$E = N \frac{d\phi}{dt} \quad (23-1)$$

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

$$e_i = \frac{d\phi_i}{dt} \quad (24-1)$$

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

$$\xrightarrow{\text{کلاف با } N \text{ دور}} E = \sum_{i=1}^N e_i = \sum_{i=1}^N \frac{d\varphi_i}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^N \varphi_i \right) \quad (25-1)$$

طبق تعریف:

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \varphi_i \quad (26-1)$$

در رابطه بالا λ شار پیوندی با کلاف نامیده می شود. از (29-1) و (30-1) داریم:

$$E = \frac{d\lambda}{dt} \quad (27-1)$$

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

$$\lambda = N \varphi \quad , \quad E = N \frac{d\varphi}{dt} \quad (28-1)$$

۹-۱- 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:

$$\vec{F} = i(\vec{l} \times \vec{B}) = Bil \sin \theta \quad (29-1)$$

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 $\mathbf{B} \leftarrow$ انگشت شست در جهت نیرو

۱۰-۱- 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:

$$e_{\text{ind}} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l} \quad (30-1)$$

که در آن:

v : بردار سرعت سیم

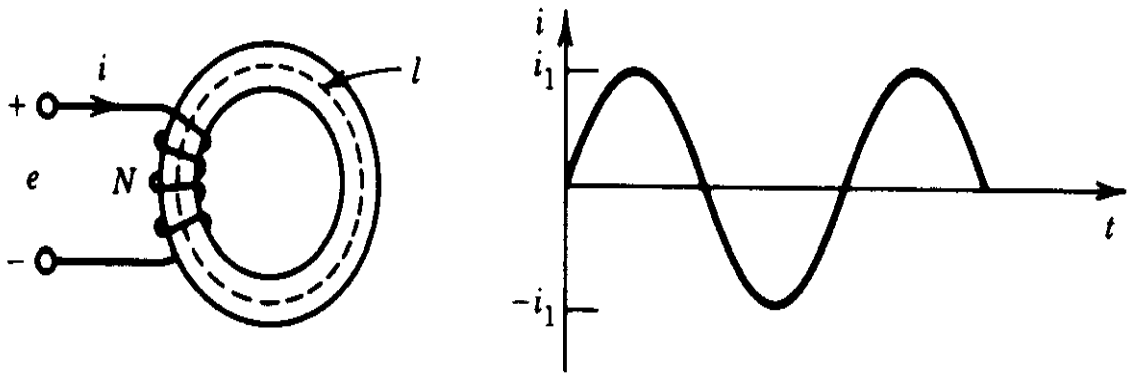
\vec{B} : بردار چگالی شار

\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. نوک بردار l پلاریته مثبت ولتاژ را نشان می دهد.

۱۱-۱- پس ماند (هیستریزیس)

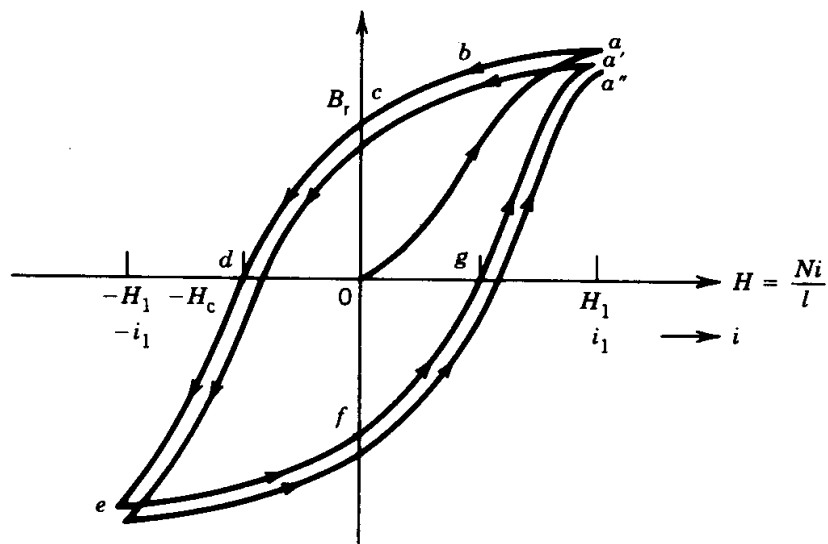
ساختار مغناطیسی نشان داده شده در شکل زیر (شکل ۱۰-۱) را در نظر بگیرید که سیم پیچی با جریان سینوسی تحریک می شود. تغییرات چگالی شار بر حسب شدت میدان مغناطیسی برای دو سیکل جریان در شکل ۱۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۰-۱- 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 می کند. اکنون اگر H کاهش یابد، منحنی $B-H$ مسیر دیگری (abc) را دنبال می کند. هنگامی که H صفر است، هسته چگالی شار B_r را حفظ می کند که به آن چگالی شار پسماند می گویند.

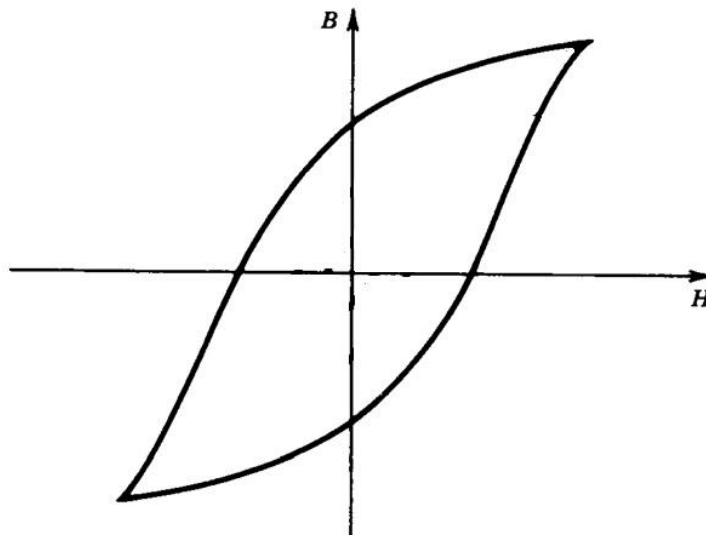
با وارونه کردن H (یا جریان)، شار در هسته کاهش می یابد تا در شدت میدان (H_c) چگالی شار پسماند از بین می رود. با کاهش بیشتر H ، چگالی شار متناظر با نقطه e خواهد بود.



شکل ۱۱-۱- تغییرات چگالی شار بر حسب شدت میدان مغناطیسی

حال اگر H به صفر و سپس H_1 افزایش یابد، منحنی $B-H$ مسیر $efga'$ را طی می کند. اگر H برای یک سیکل کامل دیگر تغییر کند، نقطه انتهایی a'' است و فاصله a'' به a' کمتر از a' به a است.

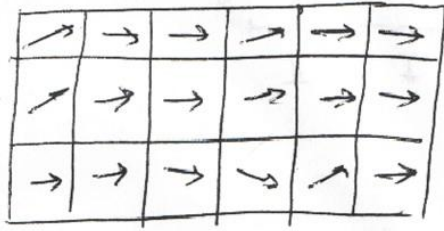
اگرچه هیچ یک از حلقه های مزبور بسته نیستند، ولی پس از چند سیکل حلقه تقریباً بسته می شود (مطابق شکل ۱۲-۱) که به آن حلقه پسماند یا هیستریزیس معروف است.



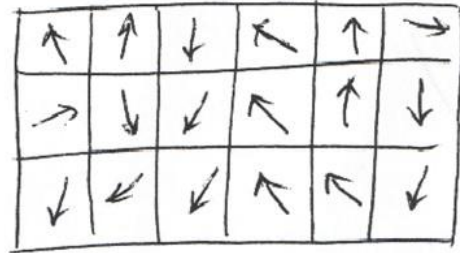
شکل ۱۲-۱- حلقه پس ماند (هیستریزیس)

۱-۱۱-۱- 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 ۱-۱۳-الف). در حضور میدان مغناطیسی خارجی، تعداد حوزه ها در جهت میدان افزایش می یابد (شکل ۱-۱۳-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، حوزه ها به حالت اول بر نمی گردند و یک میدان پسماندی درون ماده باقی می ماند. (پدیده پسماند)



(ب)



(الف)

شکل ۱-۱۳- حوزه های مغناطیسی درون ماده : (الف) در حالت عادی، (ب) در حضور میدان مغناطیسی

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

۱-۱۱-۲- تلفات پسماند

سرعت فروپاشی و از بین رفتن نظم حوزه ها به اندازه سرعت نظم یافتن آن ها نیست. برای نظم دادن حوزه ها انرژی صرف می شود و انرژی حاصل از بی نظم شدن حوزه ها باز پس داده می شود. این دو انرژی با یکدیگر برابر نیستند و تفاوت آنها تلفات انرژی هیستریزیس را شکل می دهد. اثبات می شود که تلفات انرژی هیستریزیس متناسب با مساحت حلقه هیستریزیس است.

محققی به نام اشتین متز 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 دامنه چگالی شار سینوسی و K_h, n پارامترهای ثابت اند.

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

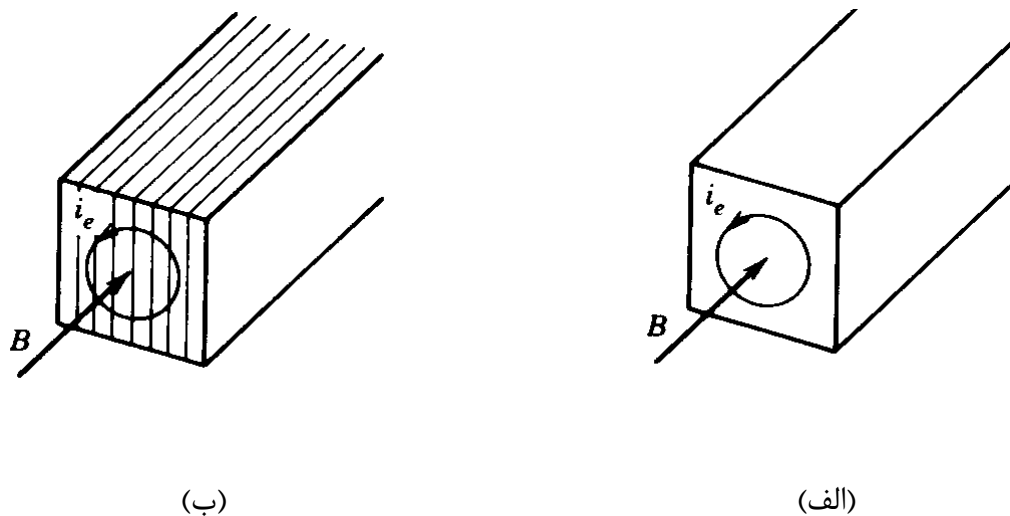
مساحت سطح داخل حلقه هیستریزیس \times فرکانس = تلفات توان هیستریزیس

بنابراین:

$$P_h = K_h f B_{max}^n \quad 1.5 < n < 2.5 \quad (31-1)$$

۱۲-۱- تلفات جریان گردابی

شار متغیر با زمان عبوری از یک هسته می تواند باعث القای ولتاژ در یک حلقه درون هسته گردد (شکل ۱-۱۴-۱ 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، مورق کردن هسته در مسیر عبور شار مطابق شکل ۱-۱۶-۱ ب می باشد. به این نوع هسته، هسته مورق گفته می شود.



شکل ۱-۱۴-۱- شکل گیری جریان های گردابی درون هسته: (الف) هسته یکپارچه، (ب) هسته مورق

۱-۱۲-۱- محاسبه تلفات جریان گردابی

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

$$P_e = K_e f^2 B_{\max}^2 \quad (۳۲-۱)$$

۱-۱۳-۱- تلفات هسته (آهن)

تلفات هسته مجموع تلفات هیستریزیس و تلفات جریان گردابی می باشد که در (۳۱-۱) و (۳۲-۱) روابط محاسبه آنها ارایه شد. بنابراین:

$$P_c = P_h + P_e = K_h f B_{\max}^n + K_e f^2 B_{\max}^2 \quad (۳۳-۱)$$

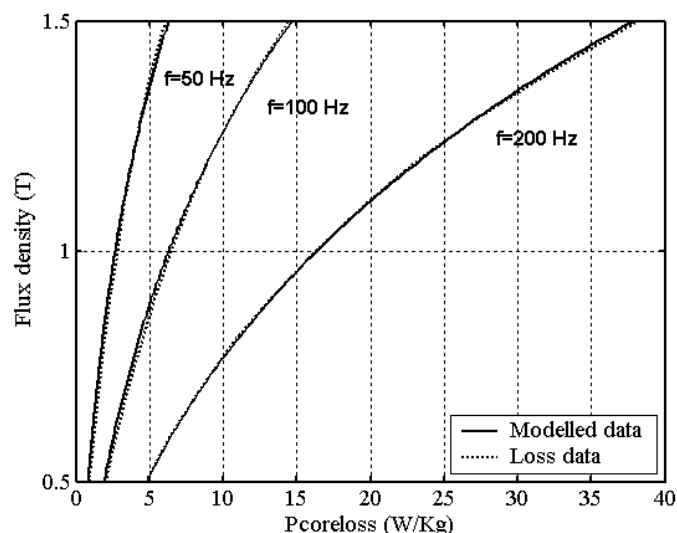
که در آن:

K_h, n, K_e : ثوابت اشتینمتر

f : فرکانس تغییرات شار سینوسی

B_{\max} : دامنه چگالی شار سینوسی

ثوابت اشتینمتر از مدل کردن (۳۳-۱) با داده های تلفات آهن اندازه گیری شده برای شکل موج های شار سینوسی با فرکانس و دامنه های ماکزیمم مختلف که توسط کارخانه سازنده تهیه می شوند، بدست می آیند. یک نمونه از این داده ها در جدول ۱-۱ آورده شد است. دقت شود داشتن داده های تلفات حداقل برای دو فرکانس مختلف برای تعیین ثوابت اشتینمتر ضروری است. چگونگی مدل کردن داده های این ورقه خاص با رابطه (۳۳-۱) به منظور تعیین ثوابت اشتینمتر برای ورقه مزبور در شکل ۱-۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۵- مدل کردن داده‌های تلفات اندازه‌گیری شده با رابطه اشتینمتر

جدول ۱-۱- مشخصات ورقه ورق فولاد M800-50 A در فرکانس های مختلف

f = 50 Hz										
\hat{J} T	\hat{H} A/m			T %	μ 0°/90°	P W/kg			T %	S VA/kg 0°/90°
	0°	90°	0°/90°			0°	90°	0°/90°		
0,5	111	181	146	24,2	2733	0,83	0,99	0,91	9,2	1,51
0,6	116	200	157	26,6	3047	1,12	1,32	1,22	8,3	1,95
0,7	120	219	168	29,1	3309	1,45	1,69	1,57	7,7	2,43
0,8	125	240	180	31,5	3536	1,80	2,08	1,94	7,2	2,94
0,9	130	264	194	33,9	3689	2,19	2,50	2,34	6,8	3,53
1,0	135	294	212	36,9	3756	2,61	2,97	2,79	6,4	4,20
1,1	142	331	234	39,8	3734	3,09	3,48	3,28	6,0	4,96
1,2	159	382	269	41,1	3551	3,62	4,04	3,83	5,5	5,91
1,3	198	462	329	40,0	3149	4,23	4,69	4,46	5,1	7,21
1,4	291	618	453	36,0	2458	4,95	5,42	5,19	4,5	9,38
1,5	559	1047	797	30,4	1499	5,77	6,29	6,02	4,3	14,65
1,6	1461	2353	1895	23,4	673	6,61	7,17	6,87	4,0	32,93
1,7	3755	5196	4476	16,1	303	7,33	7,90	7,61	3,8	84,81
1,8	7621	9571	8595	11,3	168	8,04	8,54	8,25	3,0	183,50
1,9	13168	15749	14510	8,9	105			8,78		342,72

f = 100 Hz				
\hat{J} T	\hat{H} A/m		P W/kg 0°/90°	S VA/kg 0°/90°
	0°/90°	0°/90°		
0,5	149	2668	2,00	3,14
0,6	162	2948	2,72	4,08
0,7	175	3187	3,50	5,12
0,8	189	3375	4,39	6,28
0,9	204	3517	5,36	7,59
1,0	220	3613	6,43	9,04
1,1	242	3625	7,65	10,77
1,2	271	3528	9,01	12,84
1,3	331	3123	10,62	15,74
1,4	454	2455	12,37	20,12
1,5	799	1495	14,38	30,51
1,6	1928	662	16,49	68,03
1,7	4560	298	18,61	175,68
1,8	7246	199		304,05
1,9				

f = 200 Hz				
\hat{J} T	\hat{H} A/m		P W/kg 0°/90°	S VA/kg 0°/90°
	0°/90°	0°/90°		
0,5	158	2512	4,66	6,72
0,6	175	2726	6,40	8,87
0,7	193	2892	8,36	11,28
0,8	211	3014	10,61	14,05
0,9	232	3084	13,28	17,37
1,0	254	3134	16,23	21,09
1,1	278	3152	19,54	25,37
1,2	305	3129	23,29	30,36
1,3	339	3053	27,69	36,77
1,4	457	2441	32,67	46,60
1,5	805	1484	38,11	67,93
1,6	1918	665	44,27	144,76
1,7	3409	398	51,53	269,33
1,8				
1,9				

۱-۱۴- 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:

$$\varphi = \varphi_{\max} \sin \omega t$$

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:

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

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

نهایتاً:

$$\Rightarrow E_{\text{rms}} = 4.44 Nf \varphi_{\max} \quad (۱-۳۴)$$

این رابطه در تحلیل ماشین های AC کاربرد دارد.

۱-۱۵- اصول تبدیل انرژی در سیستم های الکترومکانیکی

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.

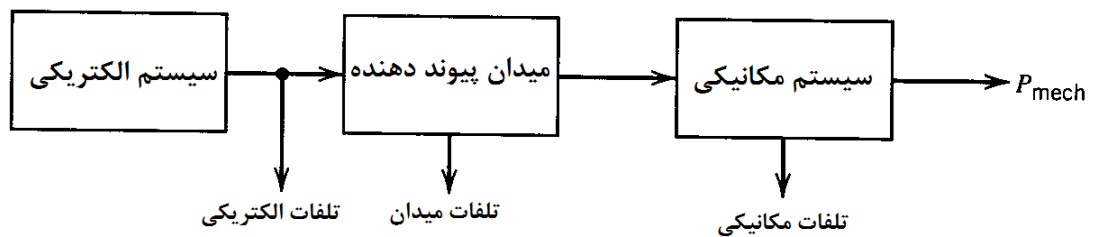
تلفات انرژی:

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 ۱-۱۶- سیستم الکترومکانیکی

از بحث بالا می توان نتیجه گرفت:

$$\boxed{\begin{array}{l} \text{تفاضل انرژی} \\ \text{الکتریکی ورودی و} \\ \text{تلفات اهمی (مسی)} \end{array}} = \boxed{\begin{array}{l} \text{مجموع انرژی مکانیکی} \\ \text{خروجی و تلفات مکانیکی} \\ \text{(اصطکاک و بادزنی)} \end{array}} + \boxed{\begin{array}{l} \text{مجموع افزایش انرژی ذخیره} \\ \text{شده در میدان پیوند دهنده و} \\ \text{تلفات هسته} \end{array}}$$

$$\Rightarrow dW_e = dW_m + dW_f \quad (35-1)$$

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

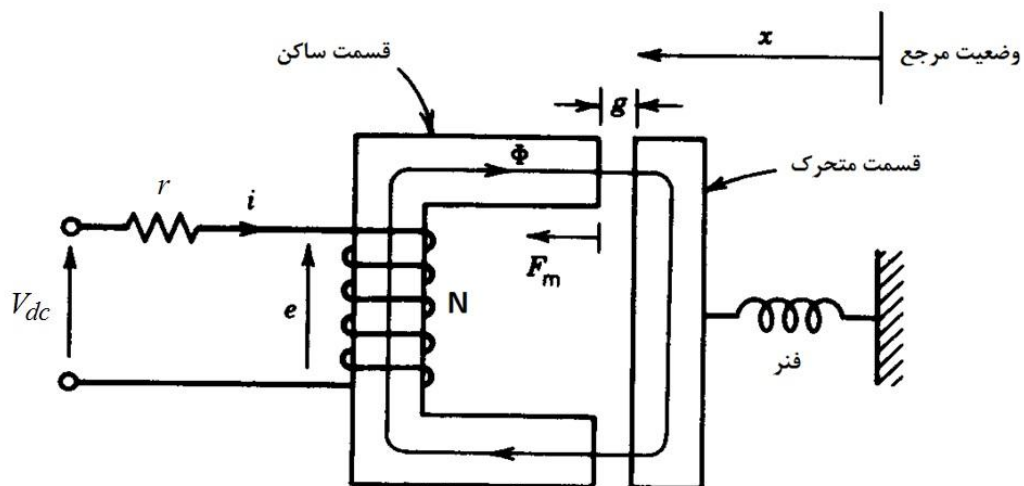
۱-۱۵-۱- انرژی میدان مغناطیسی

سیستم الکترومکانیکی نشان داده شده در شکل ۱۷-۱ 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 (۱-۳۵) داریم:

$$d W_e = d W_f \quad (۱-۳۶)$$



شکل ۱۷-۱- یک سیستم الکترومکانیکی نمونه

از طرف دیگر:

$$dW_e = e i dt = \frac{d\lambda}{dt} i dt = i d\lambda \quad (37-1)$$

از (36-1) و (37-1) نتیجه می شود:

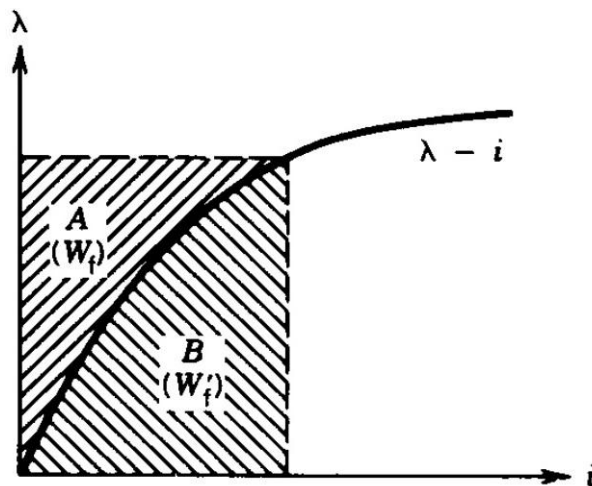
$$dW_f = i d\lambda \Rightarrow W_f = \int_0^\lambda i d\lambda \quad (38-1)$$

این رابطه نشان می دهد انرژی مغناطیسی ذخیره شده برابر سطح بالای نمودار $\lambda - i$ در شکل ۱۸-۱ می باشد. سطح زیر این نمودار را شبه انرژی (کوانرژی) می نامند.

$$W_f' = \int_0^i \lambda di \quad (39-1)$$

به علاوه، با توجه به شکل ۱۸-۱ مشاهده می شود که:

$$W_f' + W_f = \lambda i \quad (40-1)$$



شکل ۱۸-۱- مشخصه شار پیوندی بر حسب جریان

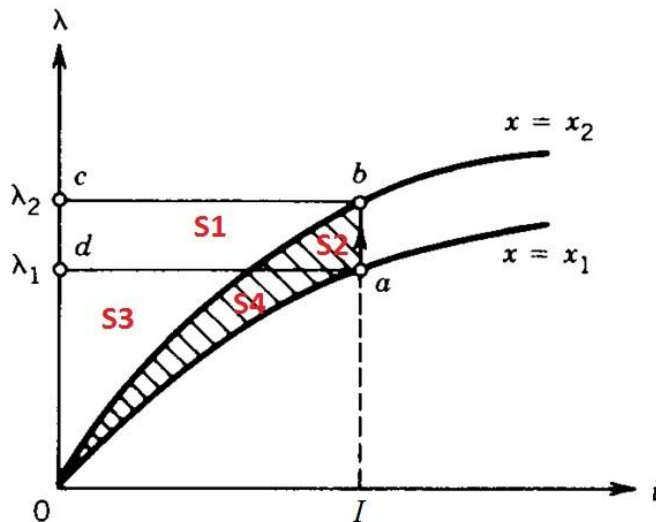
۱-۱۵-۲- نیروی مکانیکی در سیستم های الکترومکانیکی

فرض کنید قطعه متحرک در شکل ۱۷-۱ 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 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 ۱۹-۱ می گردد.



شکل ۱۹-۱- حرکت بی نهایت آرام

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

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

با توجه به روابط بدست آمده داریم:

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

از (۳۹-۱) و شکل (۱۹-۱) واضح است که S_{oab} برابر با تغییرات کوانرژی است:

$$\Rightarrow dW_m = dW'_f \quad (۴۱-۱)$$

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

$$F = \frac{dW'_f}{dx} = \frac{\partial W'_f(i, x)}{\partial x} \Big|_{i=const.} \quad (42-1)$$

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

$$i = \left(\frac{\lambda x}{0.09} \right)^2$$

نیروی اعمالی به قطعه متحرک را برای $i=3A$ و $x=5cm$ بدست آورید.

حل:

از رابطه داده شده در صورت مثال، داریم:

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

با توجه به رابطه (1-39)، کوانرژی به صورت زیر بدست می آید:

$$W'_f = \int \lambda di = \frac{0.09 i^{\frac{1}{2}}}{x} di = \frac{0.09}{x} \times \frac{2}{3} \times i^{\frac{3}{2}}$$

با داشتن کوانرژی، از رابطه (1-42) نیرو به صورت زیر محاسبه می شود:

$$F = -0.09 \times \frac{2}{3} \times i^{\frac{3}{2}} \times \frac{1}{x^2}$$

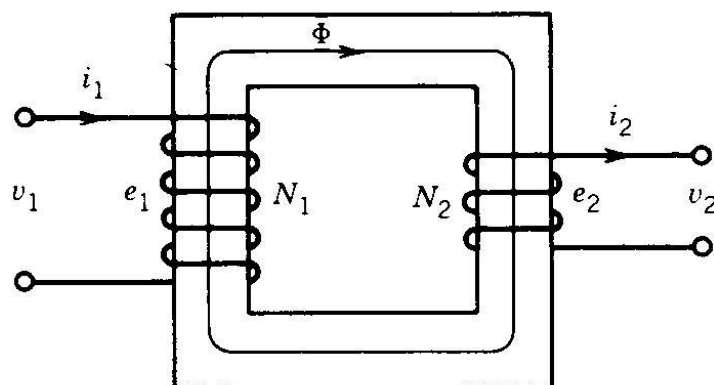
با جایگذاری $i=3A$ و $x=0.05m$ در رابطه فوق، اندازه نیروی تولیدی برابر است با $124/7$ نیوتن.

فصل دوم

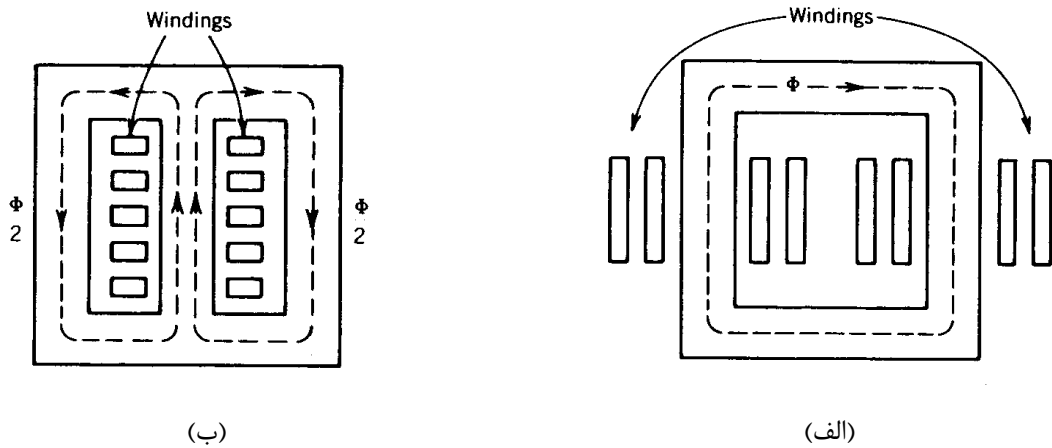
ترانسفورماتور

۱-۲- مقدمه

- ✓ یک ترانسفورماتور از دو یا چند سیم پیچ تشکیل می شود که توسط یک مدار مغناطیسی مشترک به هم پیوند داده می شوند.
 - ✓ فاقد قسمت دوار مشابه ماشین های الکتریکی می باشد.
 - ✓ جنس هسته از مواد فرومغناطیسی انتخاب می شود به خاطر برقراری یک پیوند مغناطیسی قوی بین سیم پیچی ها و ایجاد شار مغناطیسی بالا.
 - ✓ هسته در ترانس مورق است به خاطر کاهش تلفات جریان گردابی
- ساختمان یک ترانسفورماتور تکفاز دو سیم پیچه در شکل ۱-۲ و انواع مختلف هسته در شکل ۲-۲ نشان داده شده اند.

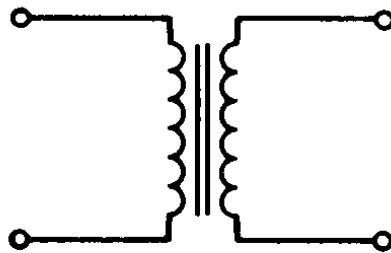


شکل ۱-۲- ساختمان یک ترانس تکفاز



شکل ۲-۲- ساختمان هسته ترانسفورماتور: (الف) نوع ستونی (ب) نوع زره ای

نحوه نمایش مداری یک ترانسفورماتور تک فاز دو سیم پیچه در شکل ۲-۳ مشاهده می شود. سیم پیچ اولیه به منبع ولتاژ متصل است و سیم پیچ ثانویه به بار یا مصرف کننده.

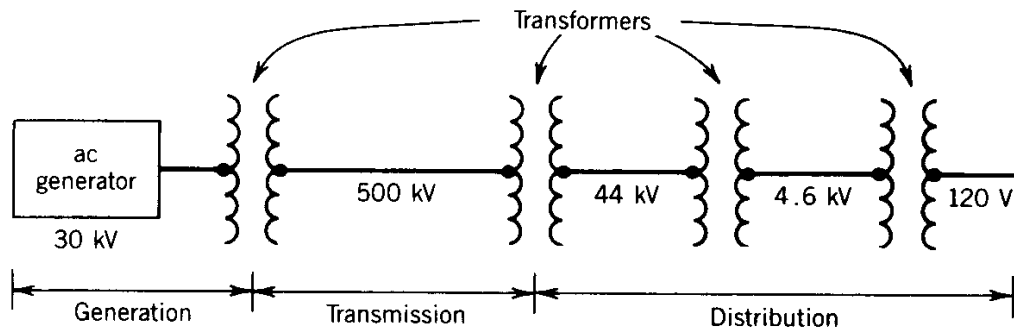


شکل ۲-۳- نمایش ترانس دو سیم پیچه

نام گذاری دیگر:

- سیم پیچی فشار قوی (HV) high voltage : سیم پیچی با تعداد دور بیشتر و متصل به ولتاژ بالاتر
- سیم پیچی فشار ضعیف (LV) low voltage : سیم پیچی با تعداد دور کمتر و متصل به ولتاژ پایین تر
- ✓ ترانسفورماتورهای افزایشدهنده: سطح ولتاژ را افزایش می دهند. (در طرف ثانویه)
- ✓ ترانسفورماتورهای کاهشدهنده: سطح ولتاژ را کاهش می دهند. (در طرف ثانویه)

برای انتقال انرژی الکتریکی در مسافت های طولانی با سطح ولتاژ بسیار بالا (230^{kv} , 400^{kv}) انتخاب می شود تا تلفات اهمی در انتقال انرژی از محل تولید نیروگاه (بخار، گازی، آبی) تا مصرف کاهش یابد. برای انجام اینکار از ترانسفورماتور مطابق شکل ۲-۴ استفاده می شود.



شکل ۲-۴- نمایش وضعیت ترانسفورماتورها در سیستمهای انتقال و توزیع انرژی

توان اکتیو سه فاز انتقالی از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \varphi = 3 V_{ph} I_L \cos \varphi$$

$$P = 300 \text{ MW} , V = 30^{kv} \rightarrow I_L = \frac{10}{\sqrt{3}} \text{ KA} \quad (\cos \varphi = 1) \quad \text{برای مثال:}$$

← تلفات RI^2 خیلی زیاد در صورت عدم استفاده از ترانسفورماتورها

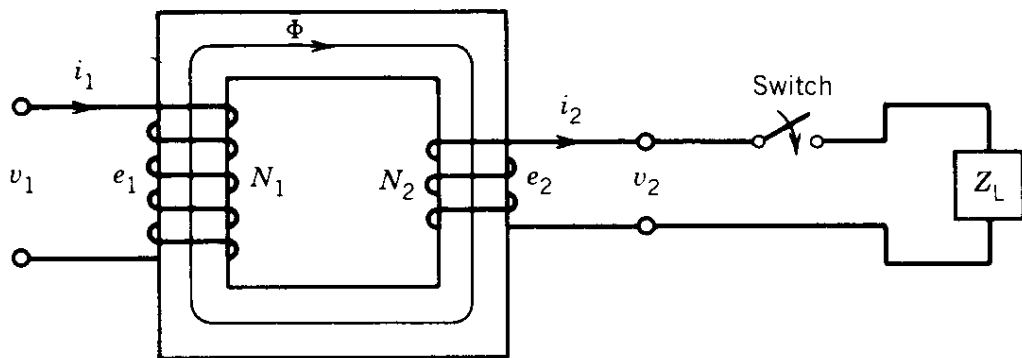
۲-۲- ترانسفورماتور تک فاز ایده آل

ترانس ایده آل: ۱- مقاومت سیم پیچی ها اعم از اولیه و ثانویه ناچیز و قابل چشم پوشی است.

۲- کل شار در هسته بماند و شار نشتی نداشته باشیم.

۳- تلفات هسته ناچیز است.

۴- ضریب نفوذپذیری مغناطیسی هسته بی نهایت است.



شکل ۲-۵- ترانس تکفاز ایده‌آل

از مقاومت سیم پیچی‌های صرف نظر می‌کنیم. بنابراین:

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

ولتاژ القایی ناشی از ϕ در سیم پیچی اولیه

شار ϕ در ثانویه ولتاژ القاء می‌کند و داریم:

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

$$\rightarrow \frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (1)$$

a : نسبت دور یا نسبت تبدیل

با نوشتن قانون مداری آمپر روی مسیر متوسط داریم:

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = \text{mmf خالص} = 0$$

به خاطر ایده آل بودن هسته برای برقراری شار درون آن به هیچ آمپر دوری نیاز نداریم.

$$\mu = \infty \rightarrow R = \frac{\ell}{\mu A} = 0 \rightarrow \text{mmf خالص} = Hl = R\phi = 0$$

بنابراین:

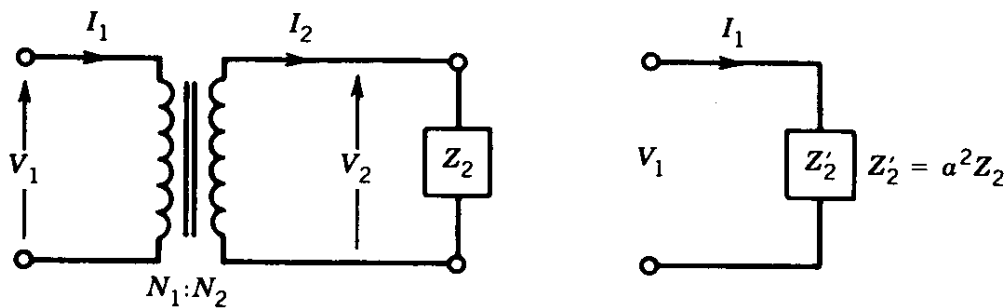
$$N_1 i_1 = N_2 i_2 \rightarrow \frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad (2)$$

از (۱) و (۲) داریم:

$$v_1 i_1 = v_2 i_2$$

توان لحظه ای ورودی به ترانسفورماتور ایده آل تک فاز با توان لحظه ای خروجی مساوی است زیرا کل تلفات درون ترانس صفر است.

۲-۳- انتقال امپدانس



شکل ۲-۶- انتقال امپدانس در یک ترانس ایده آل

$$Z'_2 = a^2 Z_2$$

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2}$$

$$\text{امپدانس ورودی ترانس: } Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{a V_2}{I_2/a} = a^2 \frac{V_2}{I_2} = a^2 Z_2$$

$$Z_1 = a^2 Z_2 = Z'_2$$

در نتیجه:

با انتقال امپدانس حذف پیوند مغناطیسی \Leftarrow ساده سازی محاسبات

مثال ۱-۱- یک بلندگوی 9Ω به یک منبع ولتاژ AC ده ولتی با مقاومت داخلی یک اهم متصل است.

الف- توان مصرفی بلندگو را حساب کنید.

ب- اگر بخواهیم توان ماکزیمم به بلندگو برسد یک ترانسفورماتور با نسبت تبدیل ۱ به ۳ بین منبع و بلندگو

استفاده می کنیم. توان مصرفی بلندگو را در این حالت حساب کنید.

الف- با توجه به اولین شکل نشان داده شده در شکل ۷-۲ داریم:

$$I = \frac{10}{1+9} = 1^A$$

$$P = RI^2 = 9 \times 1^2 = 9 \text{ W}$$

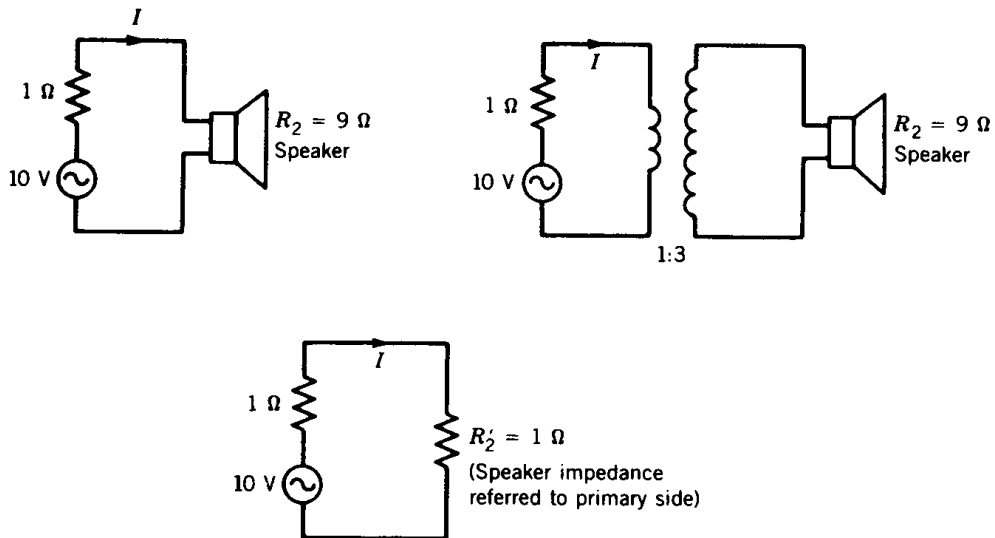
ب- با توجه به شکل ۷-۲، امپدانس بلندگو که به اولیه ترانس ارجاع داده شده است برابر است با:

$$R'_2 = 1^{\Omega}$$

$$I = \frac{10}{1+1} = 5^A$$

در این حالت داریم:

$$P = R'_2 I^2 = 1 \times 5^2 = 25 \text{ W}$$



شکل ۷-۲- شکل مثال ۱-۲

۴-۲- پلاریته

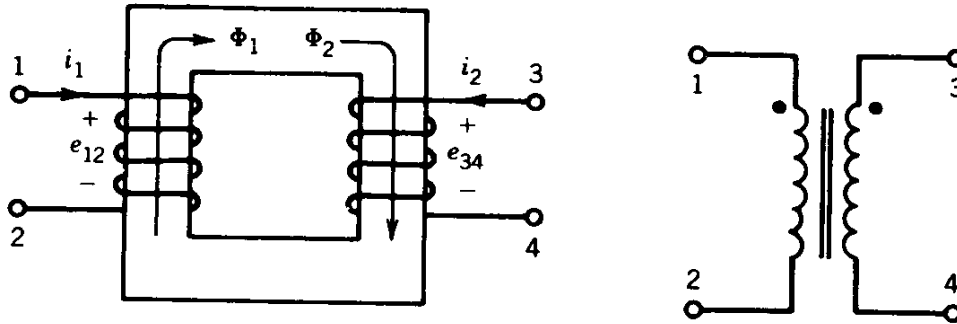
روش تشخیص سرهای هم پلاریته:

سرهای ۱ و ۳ در شکل ۸-۲ هم پلاریته هستند چون جریان‌های واردشونده به آنها شارهای هم جهت در هسته

تولید می‌کنند. (همینطور سرهای ۲ و ۴)

در اتصال مداری سرهای هم پلاریته توسط دو نقطه توپر نشان داده می‌شوند.

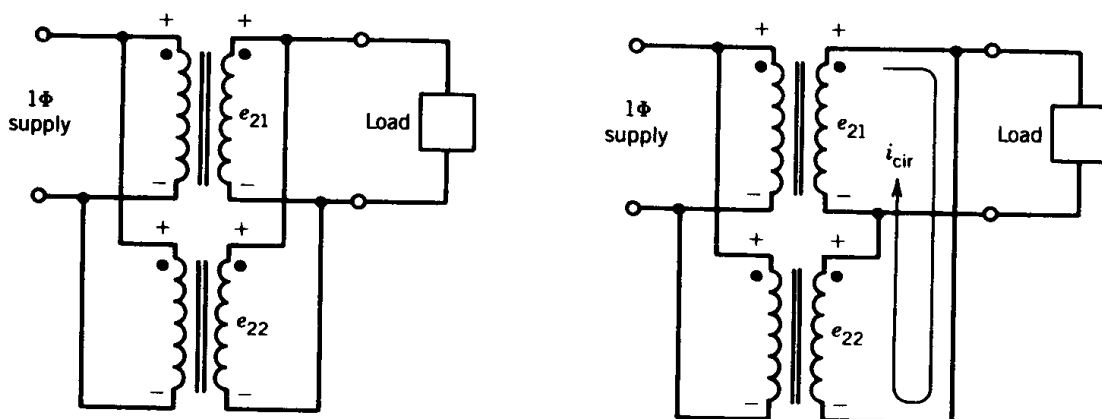
در صورت عبور شار متغیر با زمان از هسته و در نتیجه القاء ولتاژ ac در دو سیم پیچی، هر لحظه که پتانسیل سر ۱ نسبت به ۲ مثبت باشد در همان لحظه سر ۳ نسبت به سر ۴ مثبت است. به علاوه، اگر در یک لحظه جریان به سر نقطه دار اولیه وارد شود در همان لحظه جریان از سر نقطه دار ثانویه خارج می شود.



شکل ۲-۸- تعیین پلاریته

اهمیت سرهای هم پلاریته در بحث موازی کردن ترانس ها

اتصال غلط مطابق شکل ۲-۹ (شکل سمت راست) باعث جاری شدن جریان چرخش (I_{cir}) بسیار بزرگ داخل ترانس به خاطر کوچک بودن مقاومت سیم پیچی ها می گردد که می تواند به ترانس صدمه برساند.



شکل ۲-۹- موازی کردن دو ترانس

۲-۵- ترانسفورماتور واقعی

۱- در ترانسفورماتور واقعی سیم پیچی های اولیه و ثانویه مقاومت دارند.

۲- در ترانسفورماتور واقعی علاوه بر شار اصلی، شار نشتی مربوط به اولیه و ثانویه نیز داریم.

۳- ضریب نفوذپذیری مغناطیسی هسته بی نهایت نیست.

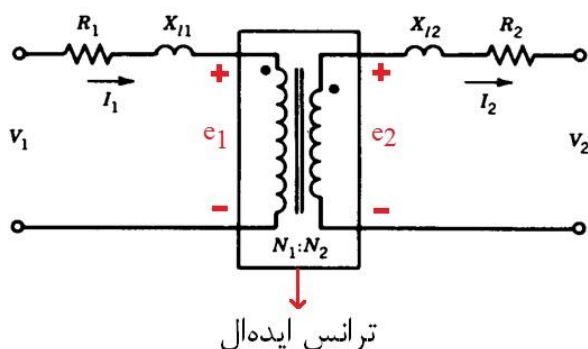
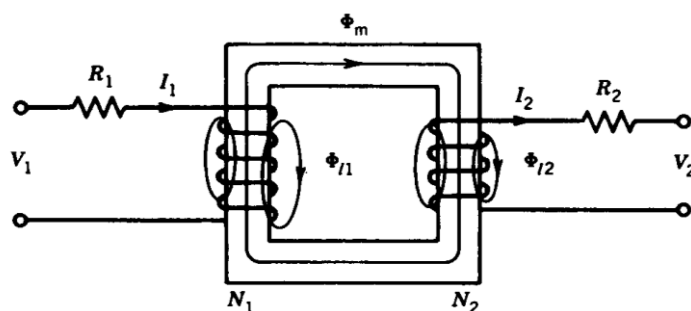
۴- تلفات هسته داریم.

بنابراین مدل ترانسفورماتور ایده آل به دست آمده بایستی با در نظر گرفتن بندهای فوق به ترتیب بسط داده شود.

تحقق بند یک:

مقاومت سیم پیچی ها به صورت یک عنصر فشرده در شکل مدل شده است. بنابراین سیم پیچی های نشان داده شده

در شکل ۲-۱۰ بدون مقاومت می باشند.



$$e_1 = N_1 \frac{d\phi_m}{dt} \quad \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi_m}{dt} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$

شکل ۲-۱۰- نحوه بدست آوردن مدار معادل ترانس

تحقق بند دو:

شار پراکندگی از حلقه های مختلف یکسان نیست. برای مدل سازی فرض می کنیم برای همه ی حلقه ها شار یکسان

است و متوسط آن را در نظر می گیریم.

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_m + \varphi_{\ell_1} \\ \varphi_2 = \varphi_m - \varphi_{\ell_2} \end{cases}$$

φ_{ℓ_1} : شار پراکندگی مربوط به سیم‌پیچی اولیه

φ_{ℓ_2} : شار پراکندگی مربوط به سیم‌پیچی ثانویه

$$\begin{cases} \lambda_1 = N_1 \varphi_1 = N_1 \varphi_m + N_1 \varphi_{\ell_1} \\ \lambda_2 = N_2 \varphi_2 = N_2 \varphi_m - N_2 \varphi_{\ell_2} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{ولتاژ القایی در اولیه ترانس ایده آل (e}_1\text{)} \\ \uparrow \end{array}$$

$$v_1 = R_1 i_1 + \frac{d\lambda_1}{dt} = R_1 i_1 + \frac{d}{dt}(N_1 \varphi_{\ell_1}) + \frac{d}{dt}(N_1 \varphi_m)$$

$$L_{\ell_1} \triangleq \frac{N_1 \varphi_{\ell_1}}{i_1}$$

به دلیل آنکه قسمت اعظم شار ناشی از هوا عبور می‌کند، بنابراین شارهای ناشی با جریان رابطه خطی دارند. به عبارت دیگر L_{ℓ_1} به زمان بستگی ندارد و مقدار آن ثابت است.

$$\Rightarrow v_1 = R_1 i_1 + \frac{d}{dt}(L_{\ell_1} i_1) + e_1 = R_1 i_1 + L_{\ell_1} \frac{di_1}{dt} + e_1$$

به طریق مشابه با $L_{\ell_2} \triangleq \frac{N_2 \varphi_{\ell_2}}{i_2}$ داریم:

$$\begin{aligned} v_2 &= -R_2 i_2 + \frac{d\lambda_2}{dt} = -R_2 i_2 - \frac{d}{dt}(N_2 \varphi_{\ell_2}) + \frac{d}{dt}(N_2 \varphi_m) \\ &= -R_2 i_2 - L_{\ell_2} \frac{di_2}{dt} + e_2 \end{aligned}$$

تا اینجا مدل ترانس ایده آل مطابق شکل ۲-۱۰ بسط داده شد و بندهای یک و دو در نظر گرفته شدند.

$$X_{\ell_1} = \omega L_{\ell_1} = 2\pi f L_{\ell_1} \quad \text{راکتانس ناشی اولیه}$$

$$X_{\ell_2} = \omega L_{\ell_2} = 2\pi f L_{\ell_2} \quad \text{راکتانس ناشی ثانویه}$$

برای تحقیق بندهای ۳ و ۴ لازم است ابتدا مقدمه ذیل از بخش ۱-۳ کتاب پ. س. سن گفته شود.

۲-۵-۱- جریان تحریک

در صورت اتصال سیم پیچی به منبع ولتاژ سینوسی، برای ایجاد شار سینوسی درون هسته بایستی جریان از سیم پیچی $Ni = R\phi$ بگذرد. این جریان، جریان تحریک نامیده می شود.

$$\phi = \phi_{max} \sin \omega t$$

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = N \phi_{max} \omega \cos \omega t = E_{max} \cos \omega t$$

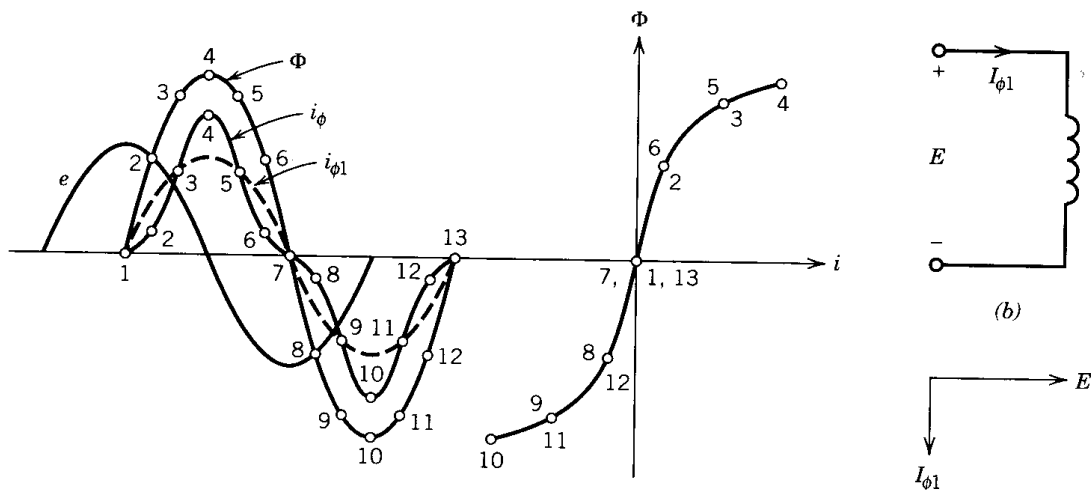
← ولتاژ القایی ۹۰ درجه از شار عقب تر است.

الف: بدون پسماند (هیستریزیس)

چون مشخصه B-H غیر خطی باشد، جریان تحریک $i\phi$ غیر سینوسی خواهد بود.

$i\phi_1$: مؤلفه اصلی (هارمونیک اول) جریان $i\phi$

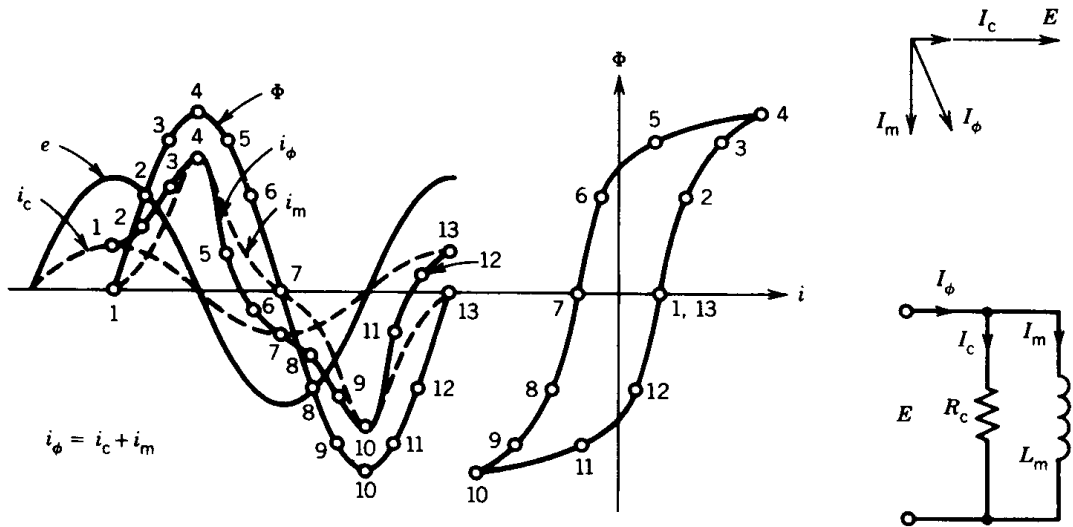
با توجه به شکل ۲-۱۱، جریان تحریک $i\phi_1$ به اندازه 90° از ولتاژ عقب تر است و بنابراین سیم پیچی تحریک با یک اندوکتانس خالص (L_m) مدل می شود.



شکل ۲-۱۱- جریان تحریک هنگامی که از حلقه پسماند صرفنظر شده است

ب: با حلقه پسماند (هیستریزیس)

با دنبال کردن روند مشابه در حالتی که حلقه هیستریزیس در نظر گرفته شود (شکل ۲-۱۲) مشاهده می شود جریان در این حالت مجموع دو جریان یکی 90° عقب تر از e و یکی هم فاز با e می گردد.



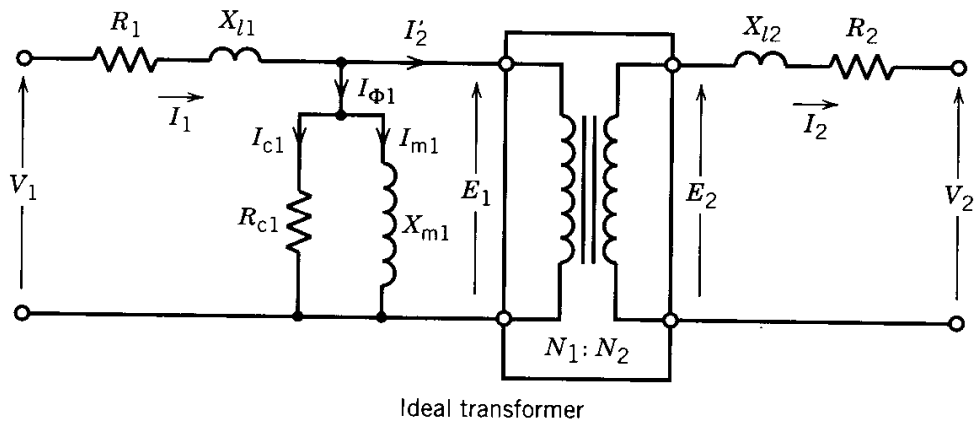
شکل ۲-۱۲- جریان تحریک هنگامی با در نظر گرفتن حلقه پسماند

لذا سیم پیچی تحریک در این حالت با یک مقاومت R_c موازی با اندوکتانس L_m می تواند مدل می گردد.

$$i_\phi = i_m + i_c$$

تحقق بندهای سه و چهار:

با توجه به مطالب گفته شده در آخر بخش ۲-۵-۱، برای در نظر گرفتن بندهای سه و چهار مدار معادل به دست آمده در شکل ۲-۱۰ به صورت شکل ۲-۱۳ توسعه می یابد.



شکل ۲-۱۳- مدار معادل با در نظر گرفتن بندهای سه و چهار

که در آن:

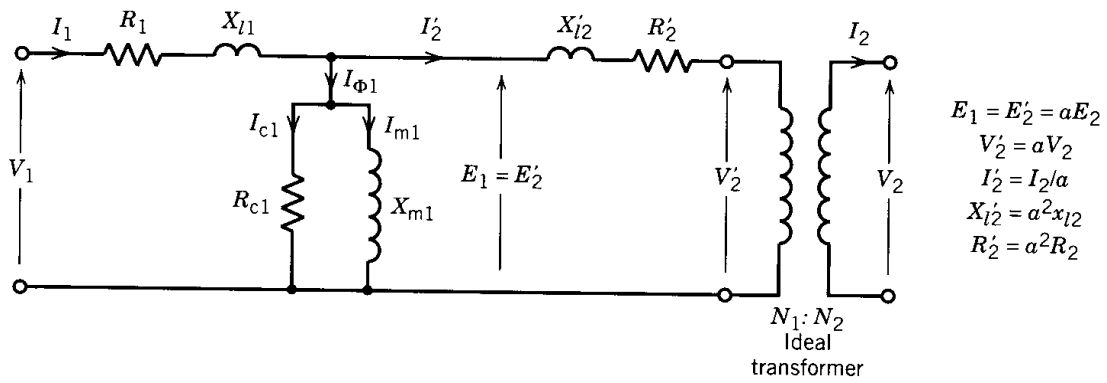
$$\begin{cases} \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \\ \frac{I'_2}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \end{cases}$$

مغناطیس شوندگی: $X_m = \omega L_{m1}$ راکتانس

شاخه موازی می تواند در هر یک از طرفین ترانس ایده آل گذاشته شود. اما از آنجائیکه معمولاً طرف اول به منبع متصل است و سهمی از جریان منبع بایستی صرف برقراری شار در هسته و تلفات هسته گردد، شاخه مزبور در طرف اولیه قرار داده شده است. اندیس ۱ در پارامترهای شاخه موازی اشاره به طرف اولیه می کند.

۲-۵-۲- مدار معادل ترانسفورماتور تک فاز واقعی ارجاع داده شده به طرف اولیه

کمیت های طرف ثانویه ترانسفورماتور ایده آل در مدار معادل می تواند بر اساس قانون انتقال امپدانس که در بخش ۲-۳ گفته شد، مطابق شکل ۲-۱۴ به طرف اولیه ارجاع داده شوند.



$$\begin{aligned}
 E_1 &= E'_2 = aE_2 \\
 V'_2 &= aV_2 \\
 I'_2 &= I_2/a \\
 X'_{l2} &= a^2x_{l2} \\
 R'_2 &= a^2R_2
 \end{aligned}$$

شکل ۲-۱۴- ارجاع امپدانسهای به اولیه ترانس

$$E_1 = E'_2 = a E_2$$

$$X'_{l2} = a^2 X_{l2}$$

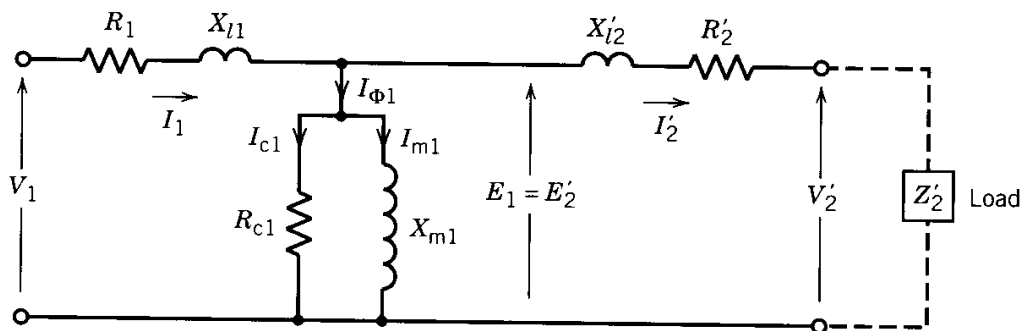
که در آن:

$$V'_2 = a V_2$$

$$R'_2 = a^2 R_2$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{a}$$

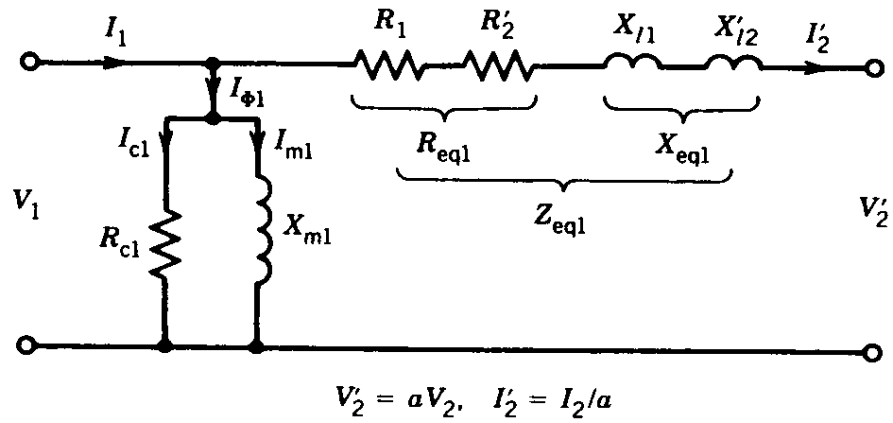
با در نظر گرفتن مدار معادل از ابتدا تا دو سر اولیه ترانس ایده ال در شکل ۲-۱۴ مدار معادل نشان داده شده در شکل ۲-۱۵ نتیجه می شود.



شکل ۲-۱۵- مدار معادل ارجاع داده شده به طرف اولیه

۲-۵-۳- مدار معادل تقریبی

جریان شاخه موازی درصد کمی از جریان اسمی ترانس فورماتور است (به دلیل بزرگ بودن R_{c1} و X_{m1}) و بنابراین می توان آن را به ابتدای مدار منتقل کرد و به مدار معادل شکل ۲-۱۶ رسید.



شکل ۲-۱۶- مدار معادل تقریبی (شاخه موازی در ابتدای مدار)

که در آن:

$$\begin{cases} R_{eq1} = R_1 + R'_2 \\ X_{eq1} = X_{e1} + X'_{\ell 2} \end{cases}$$

$$V'_2 = a V_2 \quad , \quad I'_2 = \frac{I_2}{a}$$

مثال ۲-۲- یک ترانسفورماتور تک فاز ۶۰ HZ و ۴۴۰/۲۲۰ V و ۲۵ KVA با پارامترهای زیر مفروض است:

$$R_1 = 0.16 \, \Omega \quad , \quad X_{\ell 1} = 0.32 \, \Omega \quad R_2 = 0.04 \, \Omega \quad X_{\ell 2} = 0.08 \, \Omega$$

$$R_{c1} = 270 \, \Omega \quad , \quad X_{m1} = 100 \, \Omega$$

ترانسفورماتور بار ۲۰ KW را تحت ولتاژ ۲۲۰^v و ضریب توان ۰.۸ پس فاز تغذیه می‌کند. ولتاژ منبع را بیابید.

$$a = \frac{V_1}{V_2} = \frac{440}{220} = 2$$

$$V_2 = 220 \angle 0 \quad \rightarrow \quad V'_2 = a V_2 = 2 \times 220 \angle 0 = 440 \angle 0$$

$$|I_2| = \frac{P}{V_2 \cos \varphi} = \frac{20000}{220 \times 0.8} = 113.64$$

$$\angle I_2 = -\cos^{-1} \text{PF} = -\cos^{-1} 0.8 = -36.9^\circ$$

$$\rightarrow I_2 = 113.64 \angle -36.9^\circ \text{ A}$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{a} = 56.82 \angle -36.9^\circ \text{ A}$$

$$R'_2 = a^2 R_2 = 0.16 \Omega \quad X'_{\ell 2} = a^2 X_{\ell 2} = 0.32 \Omega$$

$$E_1 = V'_2 + (R'_2 + j X'_{\ell 2}) I'_2$$

$$= 440 \angle 0 + (0.16 + j 0.32)(56.82 \angle -36.9^\circ)$$

$$= 458.3 \angle 1^\circ \text{ V}$$

$$I_{c1} = \frac{E_1}{R_{c1}} = 1.7 + j 0.03 \text{ A}$$

$$I_{m1} = \frac{E_1}{j X_{m1}} = 0.09 - j 4.58 \text{ A}$$

$$I_{\phi 1} = I_{c1} + I_{m1} = 1.79 - j 4.55 \text{ A}$$

$$I_1 = I_{\phi 1} + I'_2 = 61.04 \angle -36.3^\circ \text{ A}$$

$$V_1 = E_1 + (R_1 + j X_{\ell 1}) I_1 = 478.4 \angle 2.2^\circ \text{ V}$$

$$P_{\text{cu}} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 = R_1 I_1^2 + R'_2 I'^2_2 = R_{\text{eq}1} I_1^2$$

$$= 0.16 \times 61.04^2 + 0.04 \times 113.64^2 = \dots$$

$$P_c = R_{c1} I_{c1}^2 = \dots$$

$$P_{\text{out}} = V_2 I_2 \cos \varphi = 220 \times 113.64 \times 0.8 = \dots$$

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + P_{\text{cu}} + P_c} = \dots$$

۲-۶- مشخصات اسمی ترانس فورماتور

توان ظاهری (MVA, KVA) و ولتاژهای اسمی (نامی) اولیه و ثانویه روی پلاک ترانس حک شده است. برای مثال:

$$10 \text{ KVA} , \quad 1100/110 \text{ V}$$

$$\text{نسبت تبدیل } a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{1100}{110} = 10$$

$$\text{جریان اسمی اولیه (فشار قوی)} : I_{HV} = \frac{S}{V} = \frac{10\,000}{1100} = 9.09 \text{ A}$$

$$\text{جریان اسمی ثانویه (فشار ضعیف)} : I_{LV} = \frac{10\,000}{110} = 90.9 \text{ A}$$

۲-۷- اتوترانس فورماتور تک فاز

✓ وجود پیوند الکتریکی بین دو سیم پیچی علاوه بر پیوند مغناطیسی

⇐ علت کیلوولت آمپر تحویلی بیشتر نسبت به ترانس مشابه (مزیت)

عیب: وجود اتصال الکتریکی بین سیم پیچی ها مطابق شکل ۲-۱۸-الف

با توجه به شکل ۲-۱۸-ب، جریان I_1 به سر نقطه دار اولیه وارد می شود ← جریان $I_2 - I_1$ از سر نقطه دار

ثانویه خارج می شود. مقدار $I_2 - I_1$ بایستی حداکثر برابر جریان نامی ثانویه در ترانس دو سیم پیچه باشد.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1 + N_2}{N_2} = a$$

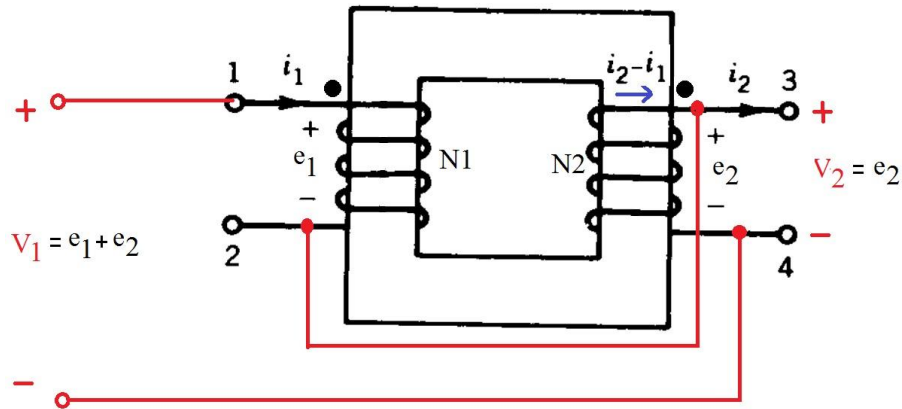
$$F_u = N_1 I_1 \quad \text{(بین نقاط a و b)}$$

$$F_L = N_2 (I_2 - I_1) \quad \text{(بین نقاط b و c)}$$

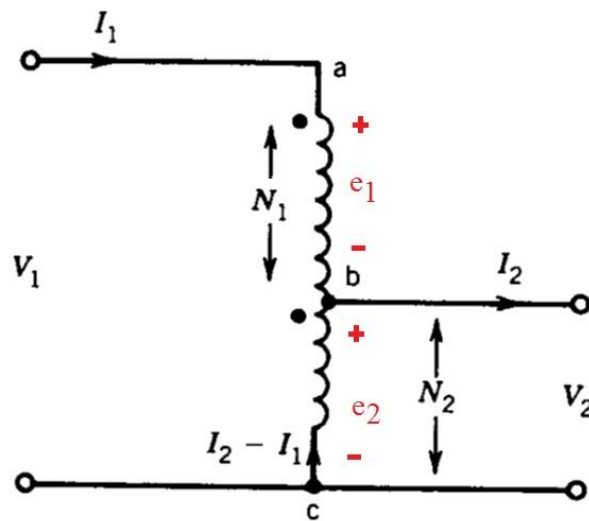
$$F_u = F_L \Rightarrow N_1 I_1 = N_2 (I_2 - I_1)$$

$$\rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1 + N_2} = \frac{1}{a}$$

⇐ وجود روابط مشابه در اتوترانس



(الف)

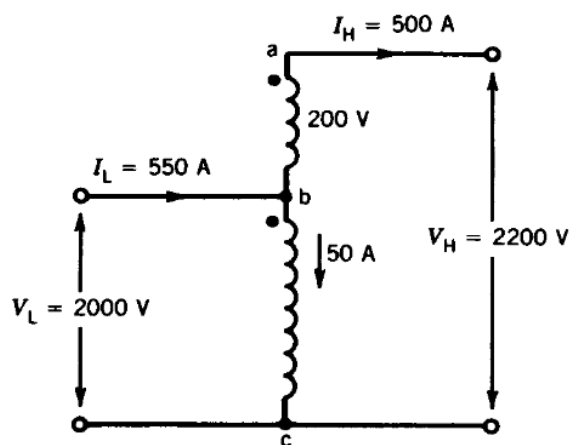


(ب)

شکل ۱۸-۲- اتوترانسفورماتور، (الف) ساختمان فیزیکی، (ب) نمایش مداری

✓ وجود حلقه لغزان در نقطه b در شکل ۱۸-۲-ب باعث امکان داشتن ولتاژ متغیر در خروجی (مزیت)

مثال ۲-۴- یک ترانس دو سیم پیچی $2000/200\text{ V}$, 100 KVA مفروض است و آن را مطابق شکل زیر به صورت اتوترانس فورماتور در می آوریم تا بتوان در ورودی 2000 V و در خروجی 2200 V ایجاد نمود. کیلوولت آمپر اسمی (KVA اسمی) اتوترانسفورماتور را بیابید.



$$I_{ab} = \frac{100000}{200} = 500 \text{ A}$$

جریان اسمی سیم پیچی ها:

$$I_{bc} = \frac{100000}{2000} = 50 \text{ A}$$

جریان سیم پیچی ها در اتصال اتو ترانس نباید از این مقادیر بیشتر شود.

$$I_H = 500 \text{ A}$$

برای اتوترانس در شرایط نامی داریم:

$$I_L = 500 + 50 = 550 \text{ A}$$

و برای ولتاژها:

$$V_L = 2000 \text{ V}$$

$$V_H = 2000 + 200 = 2200 \text{ V}$$

$$KVA|_L = \frac{2000 \times 550}{1000} = 1100$$

$$KVA|_H = \frac{2200 \times 500}{1000} = 1100$$

۸-۲- ترانسفورماتورهای سه فاز

۲-۸-۱- ترانس سه فاز سه پارچه

از سه ترانس تک فاز تشکیل شده که اولیه و ثانویه به طرق مختلف به هم مربوط می شوند:

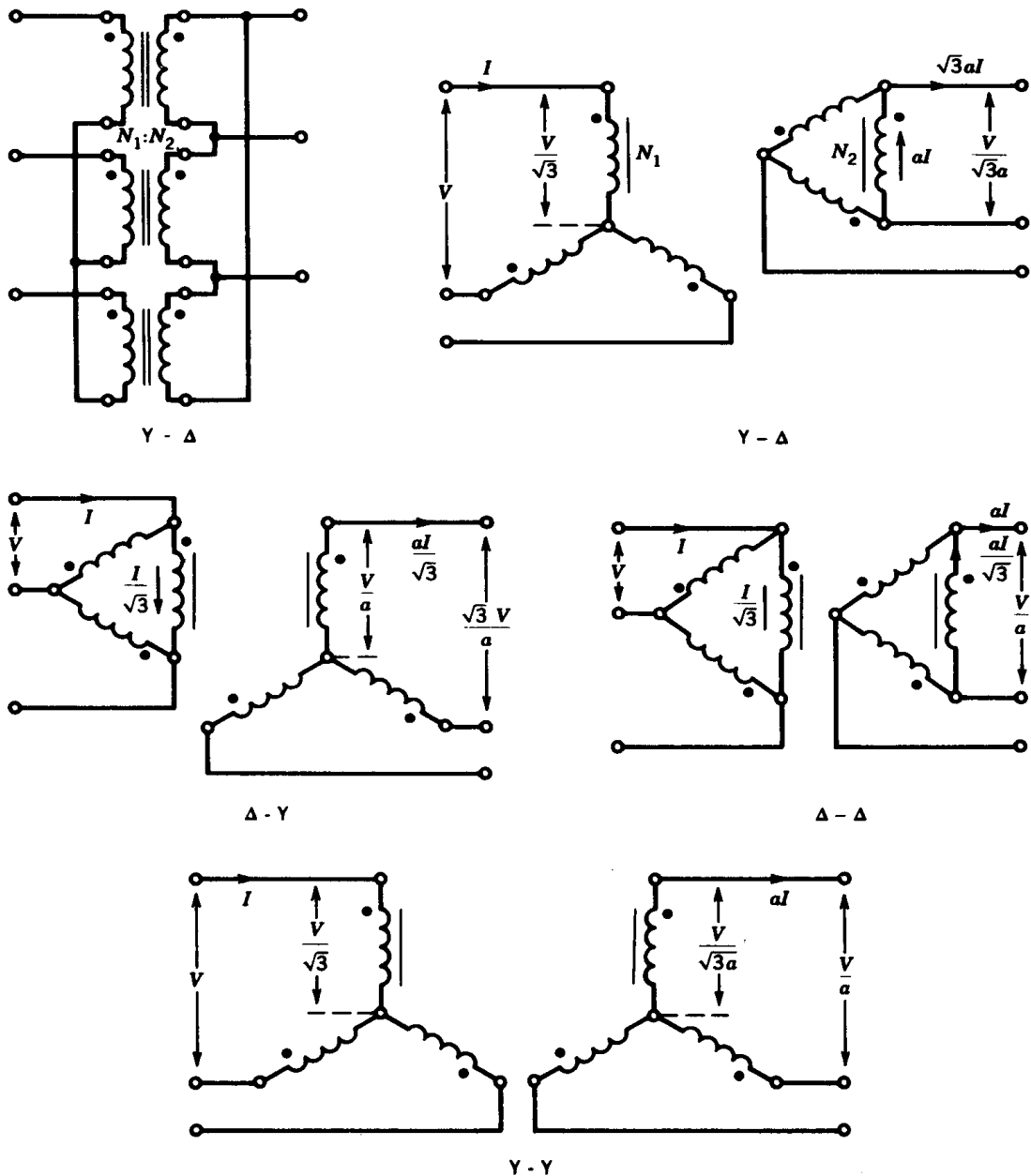
الف: ستاره-ستاره (Y - Y): سه سیم پیچی اولیه به صورت ستاره و سه سیم پیچی ثانویه به صورت ستاره به هم متصل شده اند.

ب: ستاره- مثلث (Y - Δ): سه سیم پیچی اولیه به صورت ستاره و سه سیم پیچی ثانویه به صورت مثلث به هم متصل شده اند.

ج: مثلث-ستاره (ΔY): سه سیم پیچی اولیه به صورت مثلث و سه سیم پیچی ثانویه به صورت ستاره به هم متصل شده اند.

د: مثلث-مثلث ($\Delta \Delta$): سه سیم پیچی اولیه به صورت مثلث و سه سیم پیچی ثانویه به صورت مثلث به هم متصل شده اند.

نحوه اتصالات برای انواع فوق در شکل ۱۹-۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱۹-۲- اتصالات ترانس سه فاز

۲-۸-۲- ترانس فورماتور سه فاز یک پارچه

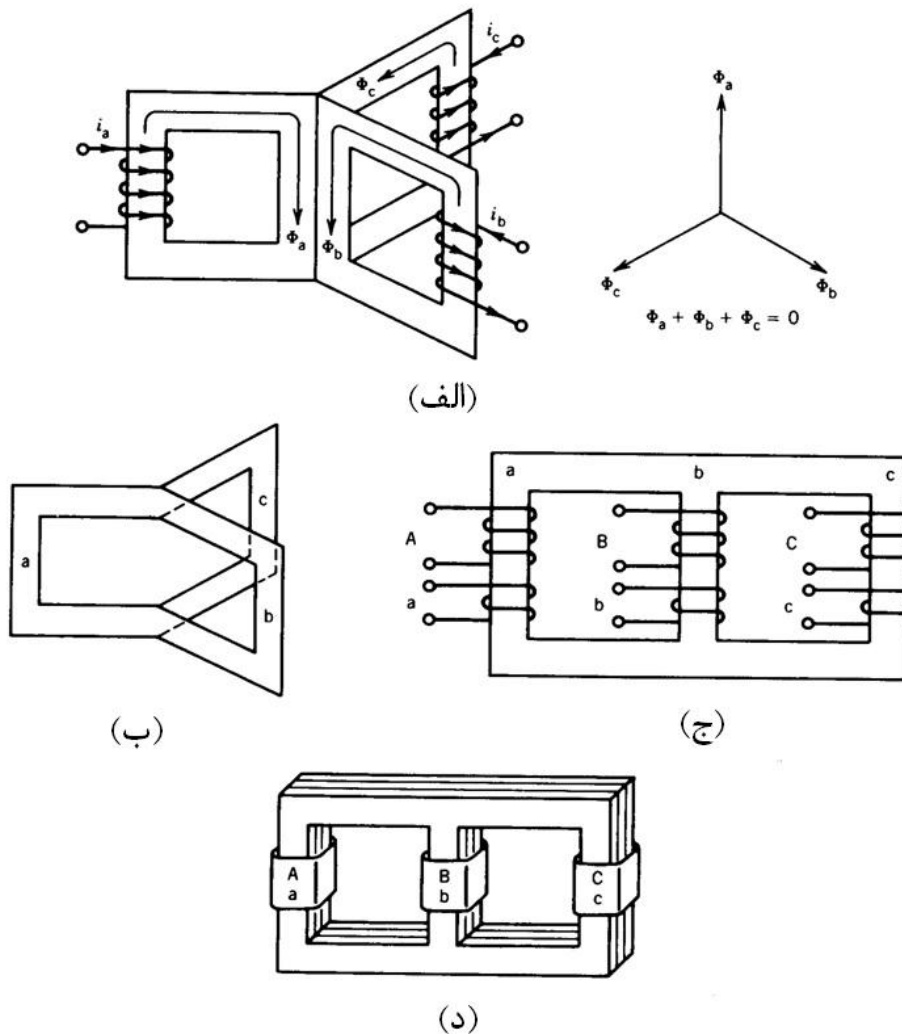
در یک سیستم متعادل داریم:

برای ولتاژهای سه فاز متعادل \Leftarrow شارها نیز متعادل و سینوسی \Leftarrow شار عبوری از پایه وسط در ساختار نشان داده شده در شکل ۲-۲۰-الف صفر است و می توان آن را مطابق شکل ۲-۲۰-ب حذف کرد.

ساخت هسته نشان داده شده در شکل ۲-۱۹-ب مشکل است و بنابراین ساختار شکل ۲-۲۰-ج پیشنهاد می شود.

به منظور کاهش تلفات هسته ، همانطور که در شکل ۲-۲۰-د نشان داده شده است هسته ترانس های سه فاز به صورت مورق (Laminated core) ساخته می شود.

دقت شود برای هر فاز، سیم پیچی ثانویه و اولیه روی هم پیچیده می شوند.



شکل ۲-۲۰-۲ ایجاد ترانس سه فاز

۳-۱- مقدمه

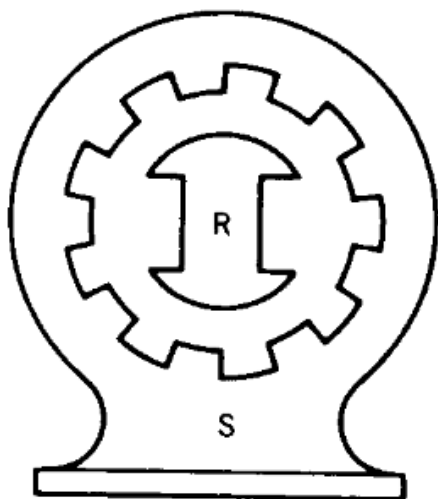
دستگاه هایی که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی (یا برعکس) تبدیل می کند، ماشین های الکتریکی نامیده می شوند. فرآیند تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی یا برعکس را تبدیل انرژی الکترومکانیکی گویند. اگر سیستم الکتریکی AC باشد، ماشین الکتریکی نیز AC یا جریان متناوب گفته می شود و اگر DC باشد ماشین الکتریکی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

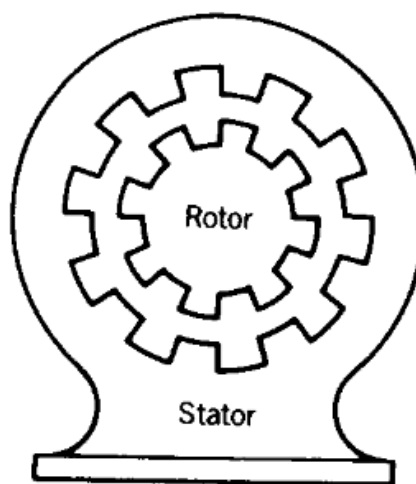
۳-۲- ساختار ماشین های الکتریکی

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 موزق 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.

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.



(ب)



(الف)

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

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

...

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)

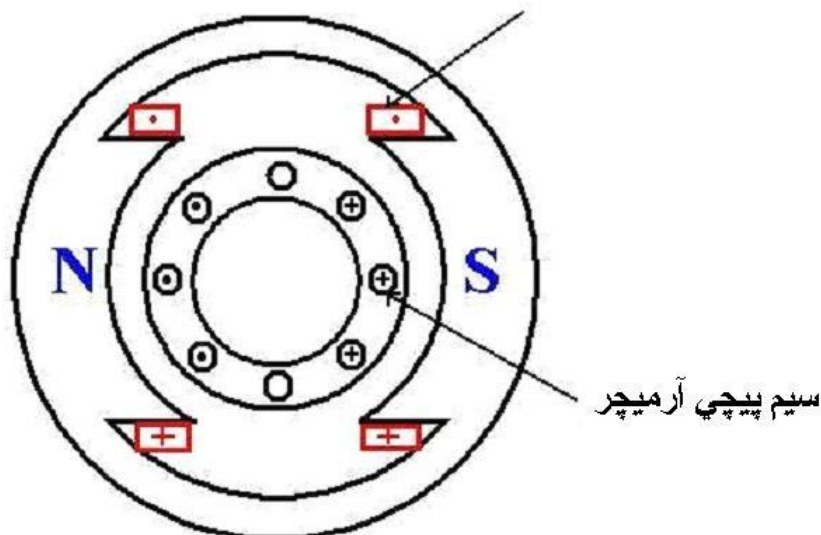
در شکل ۳-۲ که یک ماشین DC دوقطبی را نشان می دهد، استاتور حاوی دو قطب برجسته است که به دور آن ها سیم پیچی تحریک (میدان) پیچیده می شود. قطب ها می توانند شامل یک یا دو نوع سیم پیچی تحریک باشند:

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.

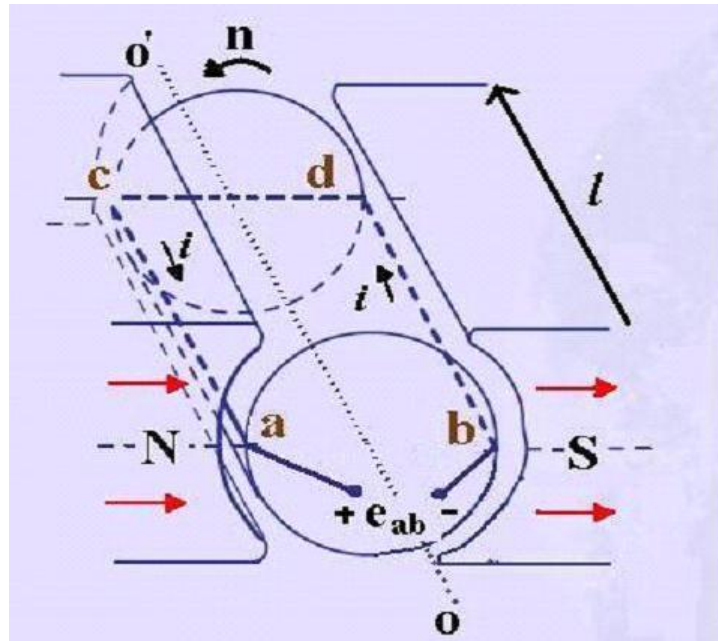
سیم پیچی تحریک (میدان)



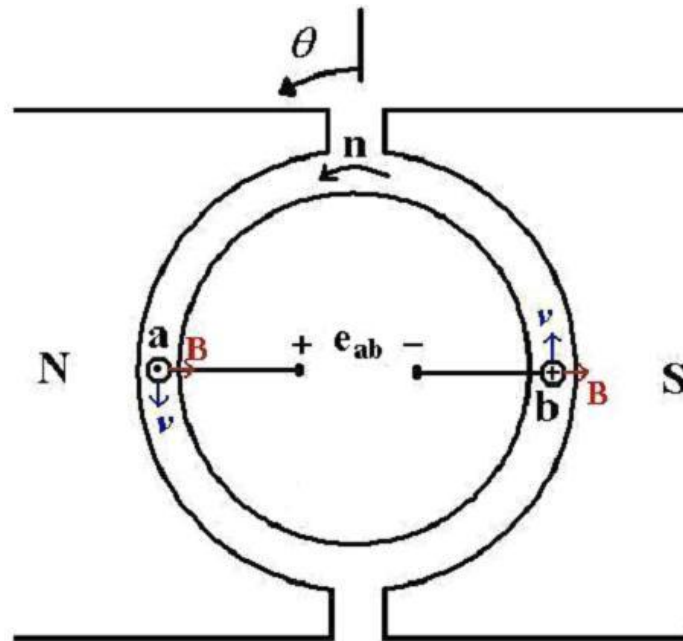
شکل ۳-۲- برش عرضی ماشین DC دوقطبی

۳-۴- ولتاژ القایی در حلقه گردان

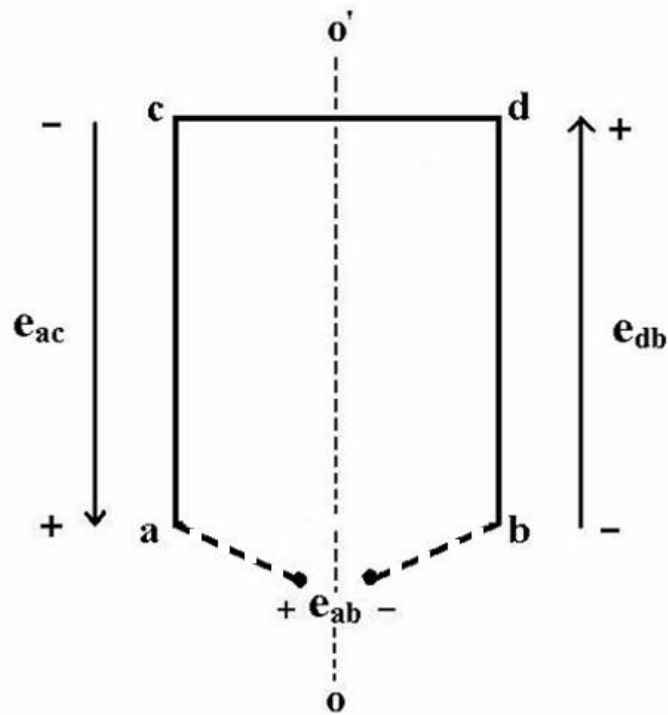
یک حلقه روی آرمیچر مطابق شکل ۳-۳ را در نظر بگیرید. این حلقه با نگاه به ماشین از جلو و از بالا مطابق شکل‌های ۳-۴ و ۳-۵ مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۳- یک حلقه در ماشین دو قطبی

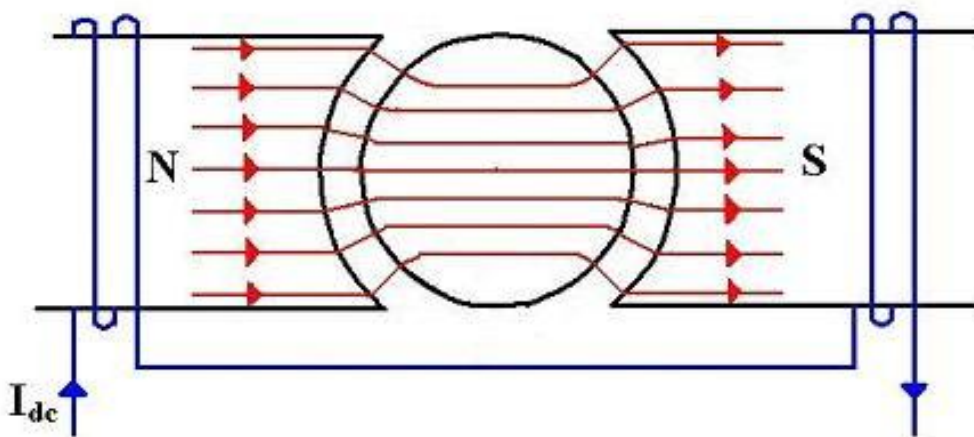


شکل ۳-۴- حلقه در موقعیت $\theta = 90$ با نگاه از راستای OO'



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

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 ۳-۶- 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 می تواند محاسبه شود:

$$e = (\bar{v} \times \bar{B}) \cdot \bar{l} \quad (1-3)$$

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 90° درجه با حاصل ضرب خارجی بردارهای سرعت و چگالی شار $(\bar{v} \times \bar{B})$ 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 $(\bar{v} \times \bar{B})$ در شکل ۳-۴ برای هادی سمت راست، برداری است عمود بر صفحه به سمت داخل. بنابراین، پلاریته ولتاژ القاء شده مطابق شکل ۳-۵ در طرف d مثبت است و اندازه آن ولتاژ برابر است با vBl .

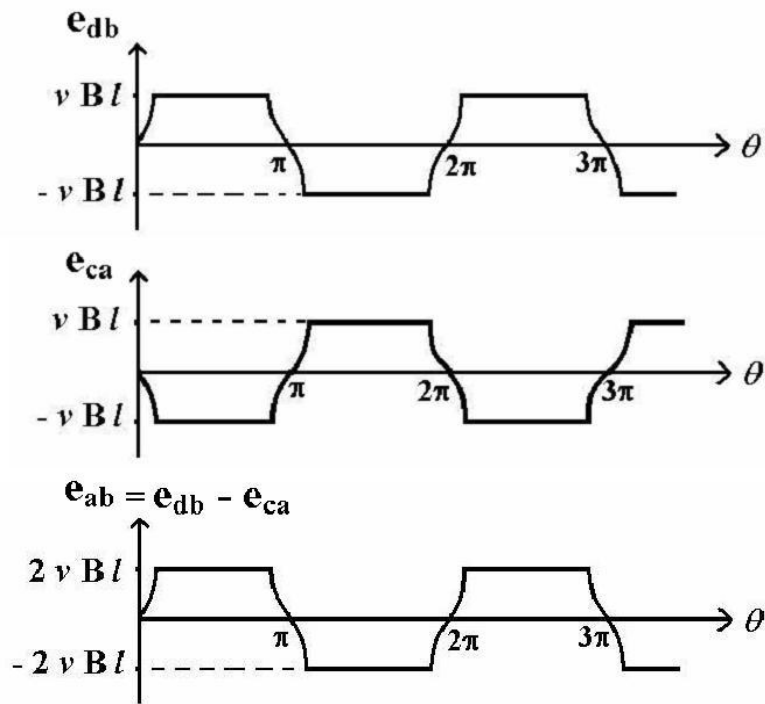
قسمت ca: برای هادی سمت چپ در شکل ۳-۴، حاصل ضرب برداری $(\bar{v} \times \bar{B})$ برداری است عمود بر صفحه و به سمت خارج. در نتیجه پلاریته ولتاژ القاء شده مطابق شکل ۳-۵ برعکس آن برای قسمت db می‌گردد (اندازه ولتاژ در این حالت مشابه قسمت db است و برابرست با vBl).

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

با توجه به ولتاژهای القایی در سه بخش مزبور و نوشتن kvl در حلقه نشان داده شده در شکل ۳-۵ داریم:

$$e_{ab} = e_{db} - e_{ca} = 2vBl \quad (2-3)$$

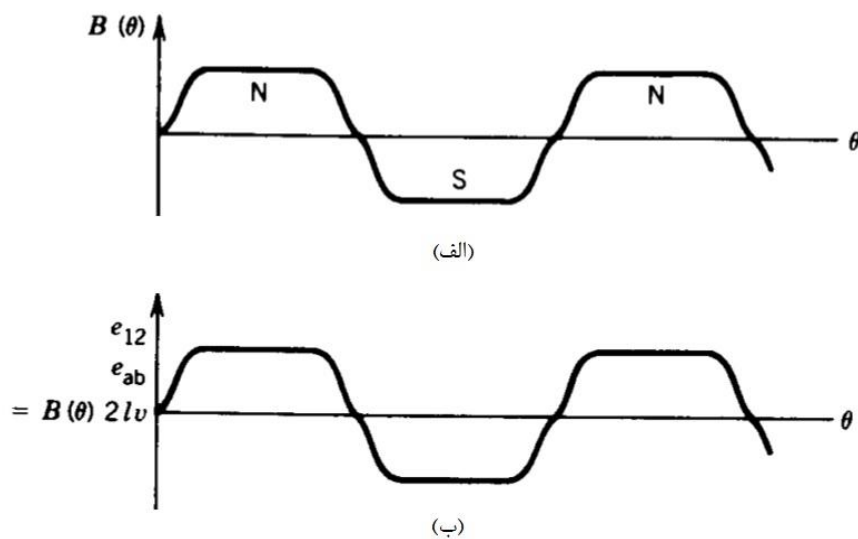
وقتی حلقه نشان داده شده در شکل ۳-۴ به اندازه 180° بچرخد، پلاریته ولتاژ القاء شده در قسمت‌های مزبور برعکس می‌شوند. بنابراین ولتاژهای القایی برحسب موقعیت روتور (θ) در بخش‌های مختلف و حلقه مطابق شکل ۳-۷ می‌گردد.



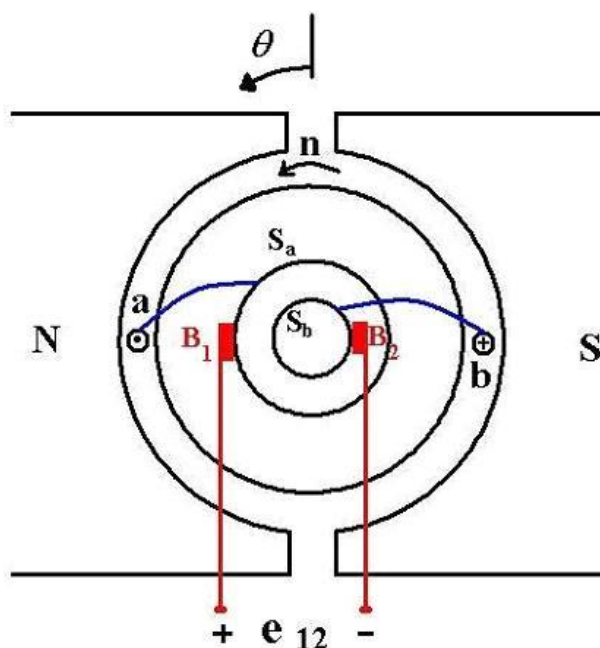
شکل ۳-۷- ولتاژهای القایی در قسمت db، ca و حلقه (e_{ab})

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.



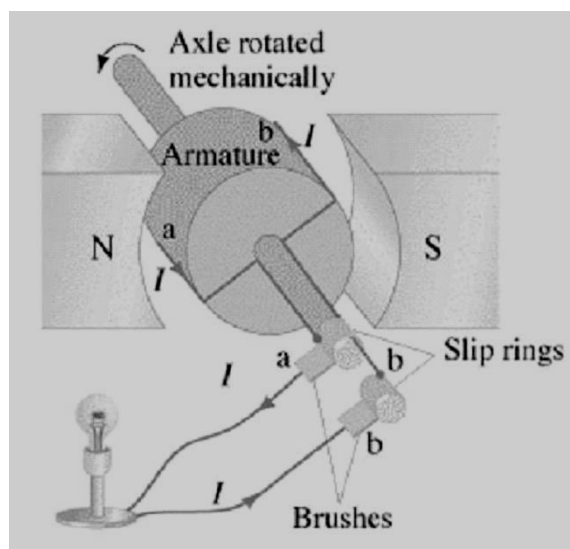
شکل ۳-۸- شکل موج توزیع چگالی شار در فاصله هوایی و ولتاژ القایی درون حلقه: (الف) توزیع چگالی شار، (ب) ولتاژ القایی



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

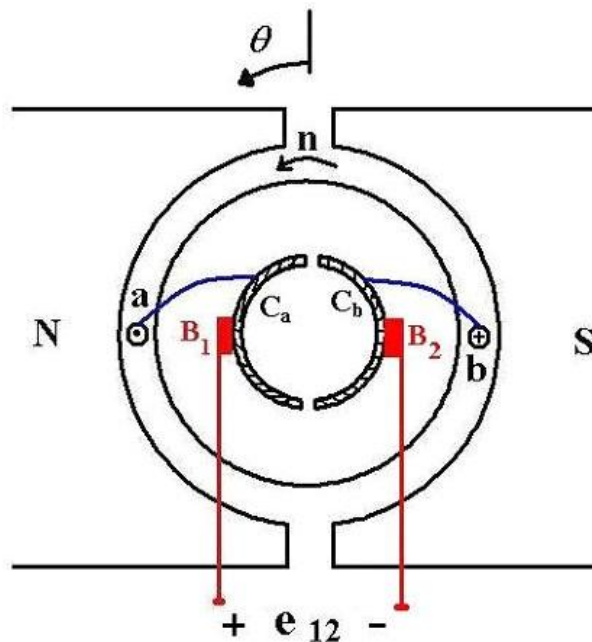
حلقه های لغزان: S_a , S_b جاروبک های ساکن: B_1 , B_2

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 ها از جنس کربن هستند و یک تماس نرم با حلقه ها دارند. جاروبک ها در فضا ثابتند. شکل ۳-۱۰ تصویر بهتری از موقعیت حلقه ها و جاروبک ها نشان می دهد.



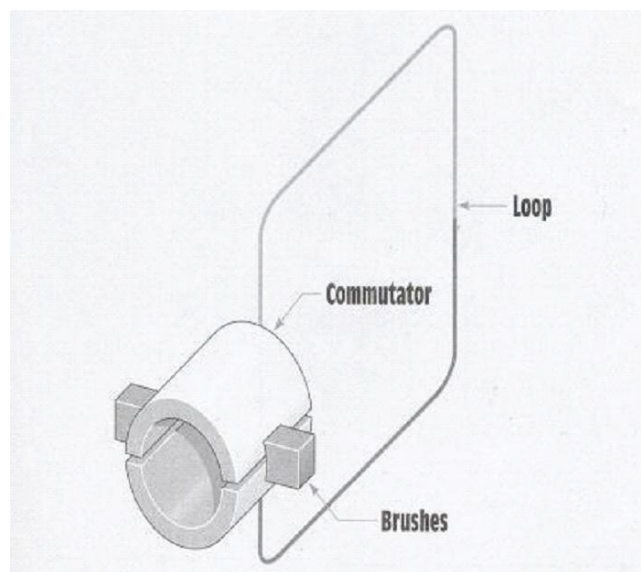
شکل ۳-۱۰- نمایشی از حلقه های لغزان و جاروبک ها

برای یکسوکردن ولتاژ القایی به جای حلقه‌های لغزان، مطابق شکل ۱۱-۳ از تیغه‌های کموتاتور (C_a و C_b) استفاده می‌شود.



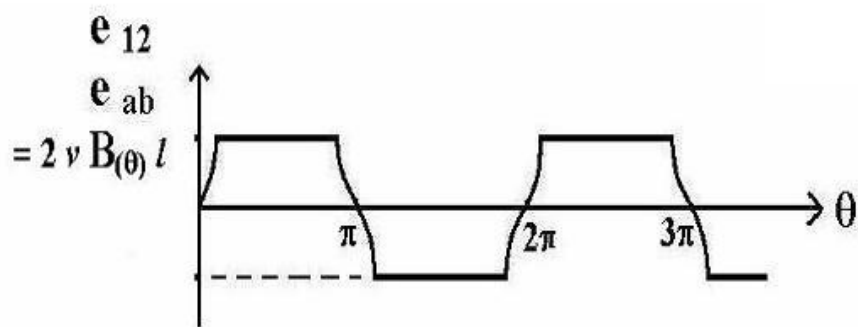
شکل ۱۱-۳- برش عرضی ماشین دوقطبی با یک حلقه به همراه کموتاتور و جاروبک

تیغه‌های کموتاتور قطعه‌هایی از مس هستند که به وسیله موادی عایقی از یکدیگر جدا شده‌اند. شکل ۱۲-۳ با ارایه نمایش سه بعدی درک بهتری از موقعیت جاروبک‌ها ایجاد می‌نماید.

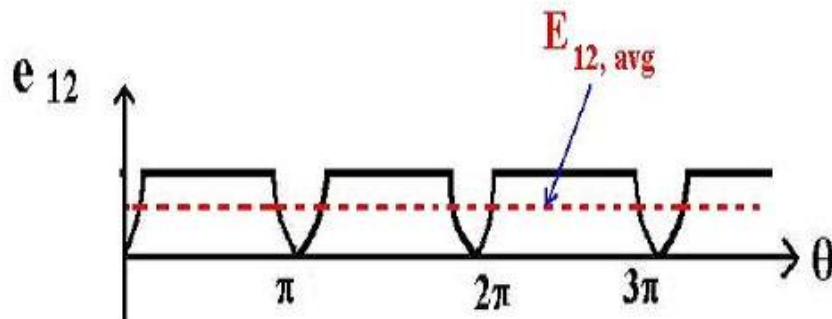


شکل ۱۲-۳- نمایشی از تیغه‌های کموتاتور و جاروبک‌ها برای یک حلقه

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 کموتورها 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_1 به سر منفی حلقه متصل است و بنابراین ولتاژ استخراجی همواره مثبت است.



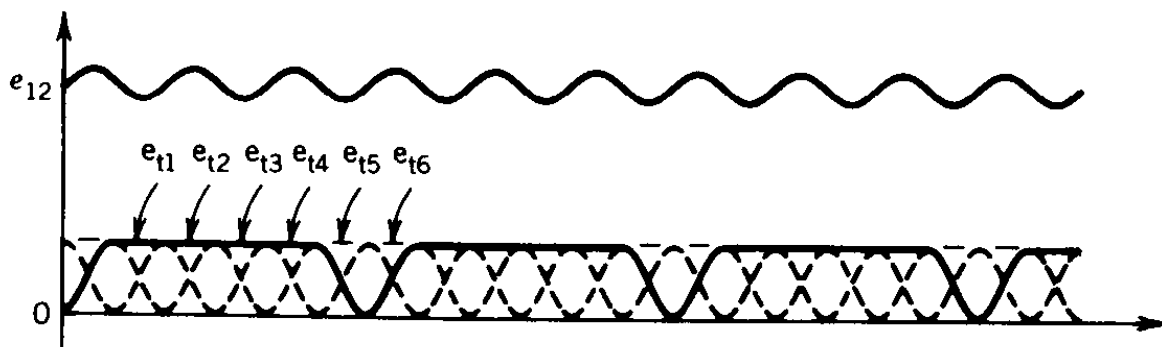
(الف)



(ب)

شکل ۳-۱۳- ولتاژ بدست آمده از دو روش مختلف: (الف) با حلقه های لغزان، (ب) با تیغه های کموتاتور

این شکل موج ولتاژ به شدت اعوجاج دارد و دندانه دندانه است. در ماشین DC واقعی تعداد زیادی از حلقه ها در شیارهای گوناگون پیرامون رتور (آرمیچر) قرار داده می شوند و با اتصال آن ها به کمک تیغه های کموتاتور سیم پیچی آرمیچر شکل می گیرد. با این کار مطابق شکل ۳-۱۴ ولتاژ DC نسبتاً مطلوبی در دو سر جاروبک ها حاصل می گردد.



شکل ۳-۱۴- ولتاژ تولیدی به کمک چندین حلقه

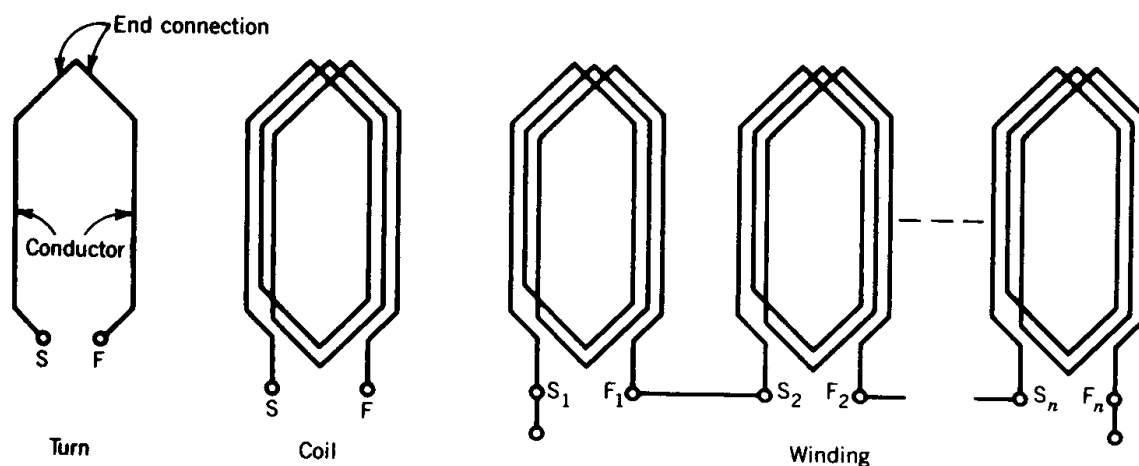
۳-۶- سیم پیچی آرمیچر

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 می‌آید.

سیم پیچی (Winding): از اتصال چند کلاف به صورت سری با یکدیگر، سیم پیچی حاصل می‌شود.

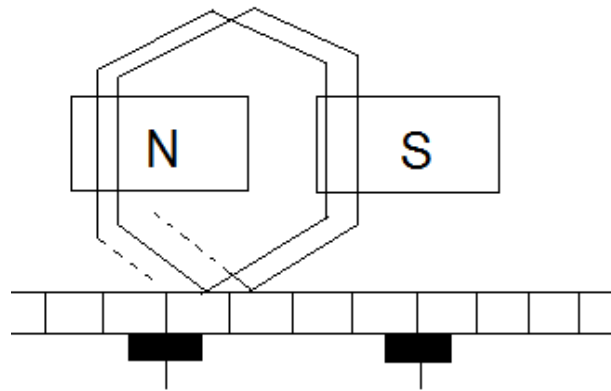


شکل ۳-۱۵- حلقه، کلاف و سیم پیچی

کلاف‌های آرمیچر می‌توانند به روش‌های مختلفی به یکدیگر متصل شوند تا سیم‌پیچی آرمیچر شکل گیرد. یکی از انواع مرسوم سیم‌پیچی آرمیچر اتصال حلقوی یا رویهم (Lab Winding) می‌باشد که در ادامه معرفی می‌شوند.

۳-۶-۱- سیم پیچ حلقوی

به اتصالی حلقوی گفته می‌شود که مطابق شکل ۳-۱۶ هر دو کلاف سری‌شده زیر یک جفت قطب مجاور قرار گیرند.

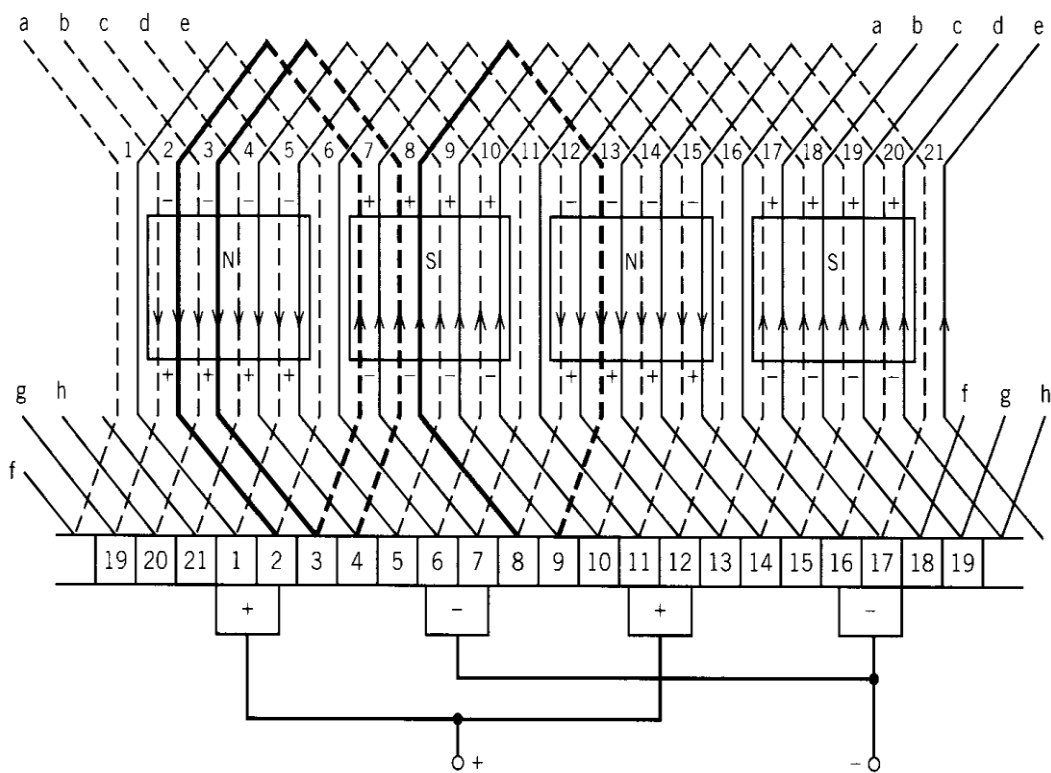


شکل ۳-۱۶- سیم پیچی حلقوی

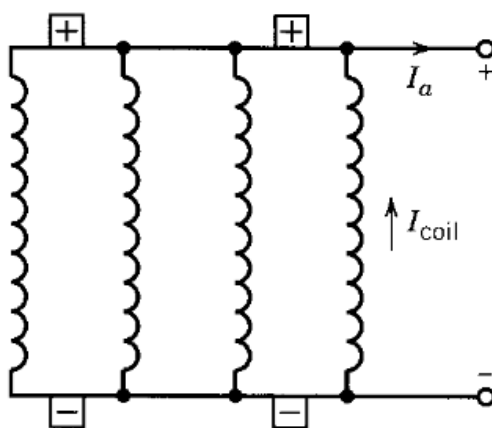
در سیم پیچ حلقوی بین دو تیغه کموتاتور مجاور یک کلاف (حلقه) وجود دارد. به علاوه، همواره در ماشین DC بین دو جاروبک مجاور $\frac{1}{p}$ تعداد تیغه‌های کموتاتور قرار می‌گیرد (P تعداد قطب‌هاست). بنابراین در این نوع اتصال $\frac{1}{p}$ کلاف‌ها (حلقه‌ها) بین دو جاروبک مجاور با یکدیگر سری می‌شوند و مجموع ولتاژهای القاء شده روی آن‌ها میان دو جاروبک آشکار می‌شود. بنابراین، در این نوع اتصال می‌توان گفت تعداد مسیره‌های موازی جریان که به وسیله اتصال کلاف‌ها در سیم پیچی آرمیچر شکل می‌گیرد، برابر با تعداد قطب‌ها است.

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

نمایش گسترده سیم پیچی در یک ماشین DC چهار قطبی با سیم پیچی از نوع حلقوی ساده در شکل ۳-۱۷ ارایه شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۳-۱۷- شمای گسترده سیم پیچی در یک ماشین DC چهار قطبی با سیم پیچی حلقوی: (الف) هادی ها، (ب) اتصال مداری

۳-۷- روابط اساسی ماشین DC

۳-۷-۱- ولتاژ آرمیچر

ولتاژ القاء شده در یک حلقه عبارت است از:

$$e_t = 2B(\theta) l v = 2B(\theta) l r \omega_m \quad (5-3)$$

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

$$\bar{e}_t = 2 \bar{B}(\theta) l r \omega_m \quad (6-3)$$

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

$$\bar{B}(\theta) = \frac{\phi}{A} = \frac{\phi P}{2 \pi r l} \quad (7-3)$$

با جایگذاری $\bar{B}(\theta)$ در (6-3) داریم:

$$\bar{e}_t = \frac{\phi P}{\pi} \omega_m \quad (8-3)$$

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:

$$E_a = \frac{N}{a} \bar{e}_t \quad (9-3)$$

که در آن N تعداد کل حلقه های سیم پیچی آرمیچر و a تعداد مسیرهای موازی جریان است. با جایگذاری (8-3)

در (9-3) داریم:

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

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

$$E_a = K_a \phi \omega_m, \quad K_a = \frac{NP}{\pi a} = \frac{zP}{2\pi a} \quad (10-3)$$

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 می آید:

$$T_c = f_c r \Rightarrow \bar{T}_c = \bar{B}(\theta) l \frac{I_a}{a} r \quad (۱۲-۳)$$

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

$$\bar{T}_c = \frac{\varphi P I_a}{2\pi a} \quad (۱۳-۳)$$

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

$$T = z \bar{T}_c = z \frac{\varphi P I_a}{2\pi a} = \frac{zP}{2\pi a} \varphi I_a = K_a \varphi I_a$$

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

$$T = K_a \varphi I_a \quad (۱۴-۳)$$

با توجه به روابط مهم بدست آمده در این قسمت، می توان نوشت:

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

بنابراین:

$$E_a I_a = T \omega_m \quad (۱۵-۳)$$

مثال: ماشین DC چهار قطبی با شعاع متوسط آرمیچر 12.5 cm و طول محوری آرمیچر 25 cm مفروض است. قطب ها ۷۵٪ محیط آرمیچر را پوشانده اند 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.

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

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

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

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

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

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

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

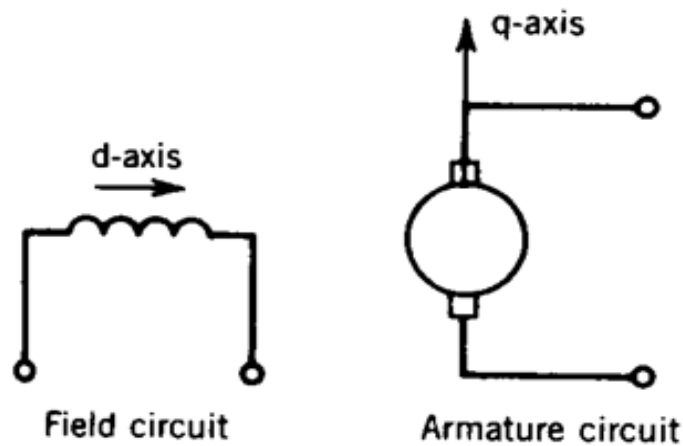
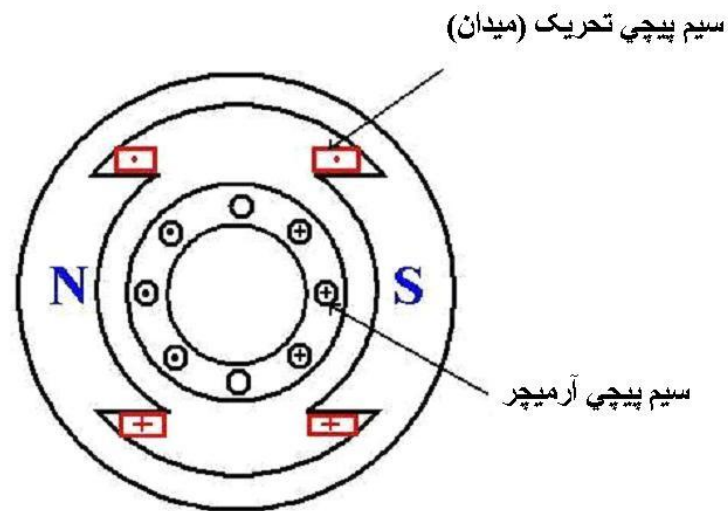
$$= T \times \omega_m = 811.8 \times \frac{1000}{60} \times 2\pi = 85 \text{ kW}$$

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 ۳-۱۸ در فضا متعامد هستند:

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

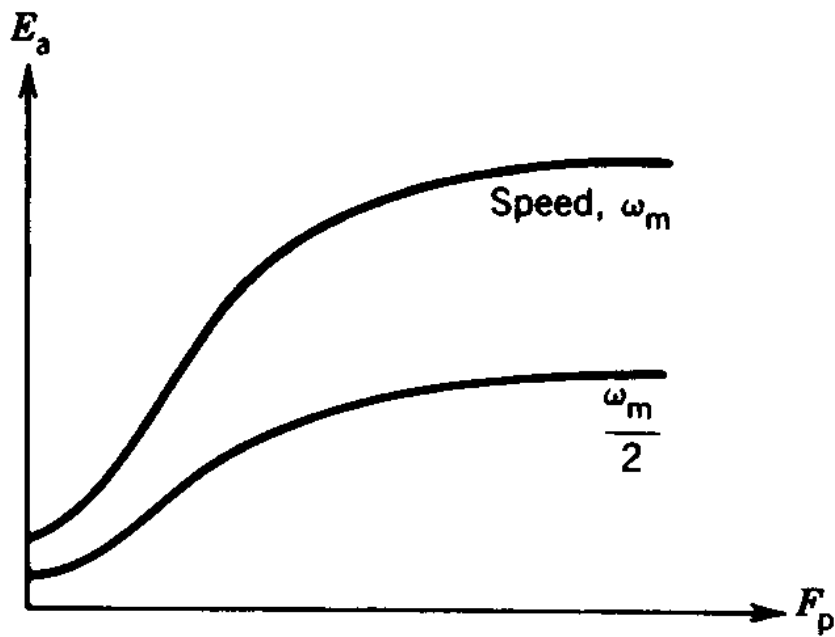
✓ نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) ناشی از سیم پیچی آرمیچر در راستای محور عمود (quadrature)



شکل ۳-۱۸- 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 (۳-۱۶) واضح است که این منحنی برای یک سرعت خاص داده می شود. شکل ۳-۱۹ منحنی مغناطیس شونددگی یک ماشین DC نمونه را برای دو سرعت مختلف نشان می دهد.

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



شکل ۳-۱۹- منحنی مغناطیس شوندگی

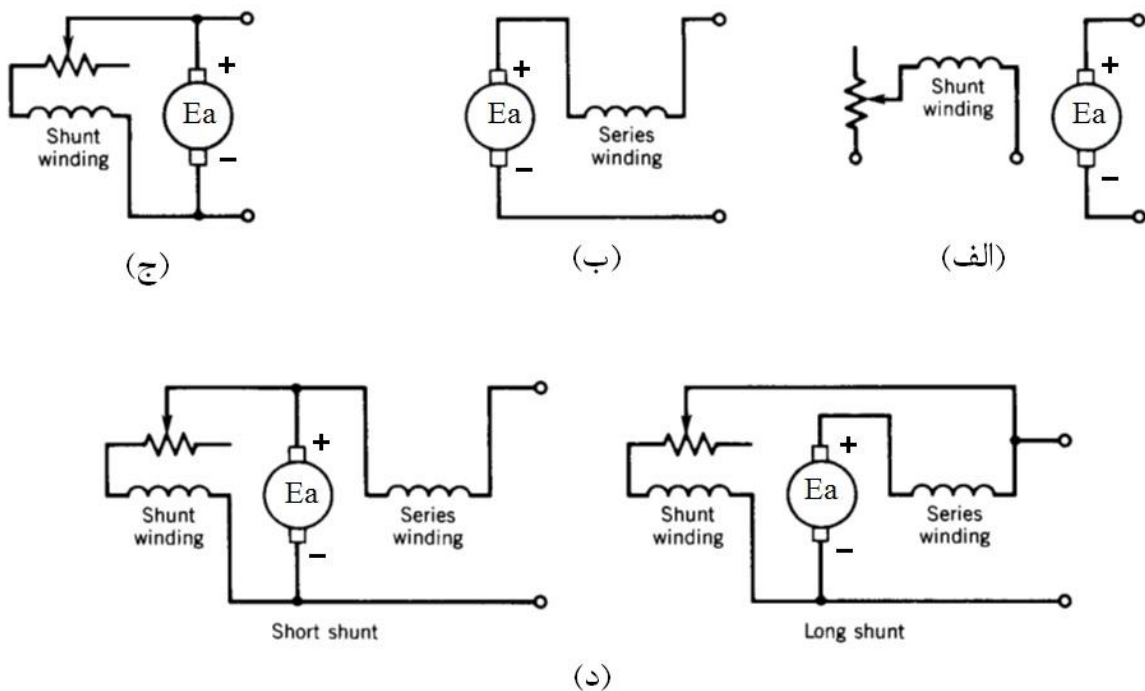
۳-۹- طبقه بندی ماشین های DC

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 ۳-۲۰ اتصال مداری انواع ماشین DC را نشان می دهد.

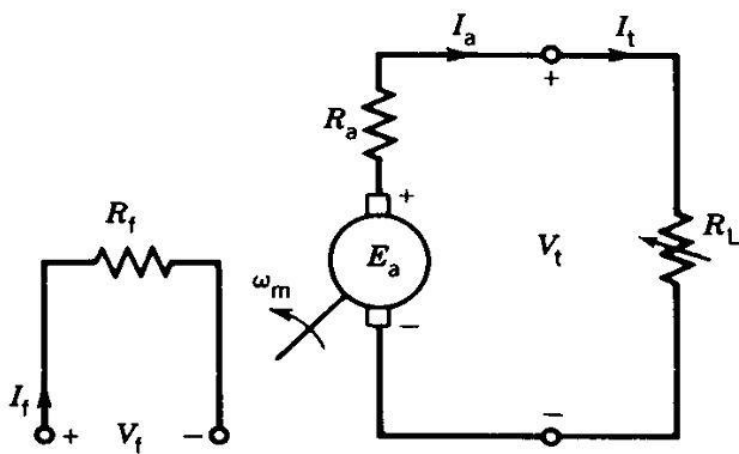


شکل ۳-۲۰- انواع ماشین DC: (الف) تحریک مستقل یا جداگانه، (ب) سری، (ج) شنت و (د) کمپوند از نوع شنت بلند و شنت کوتاه

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 ۳-۲۱ 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 ۳-۲۱- ژنراتور DC تحریک مستقل

پارامترهای نشان داده شده در مدار شکل ۳-۲۱ 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

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

با توجه به مدار نشان داده شده در شکل ۳-۲۱ معادلات حاکم بر عملکرد حالت ماندگار (Steady state) ژنراتور تحریک مستقل به شکل زیر می باشند:

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

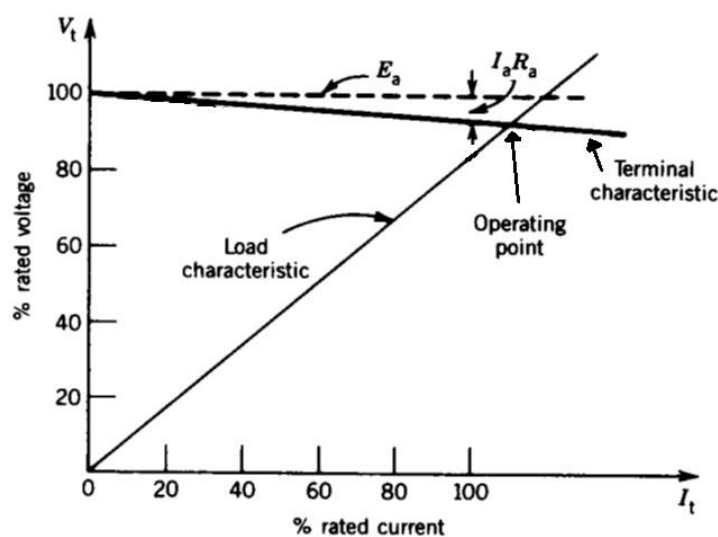
۳-۱۰-۱-۲- مشخصه ی خارجی ژنراتور DC تحریک جداگانه

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.

$$V_t = E_a - R_a I_a \quad (۱۷-۳)$$

$$I_t = I_a$$

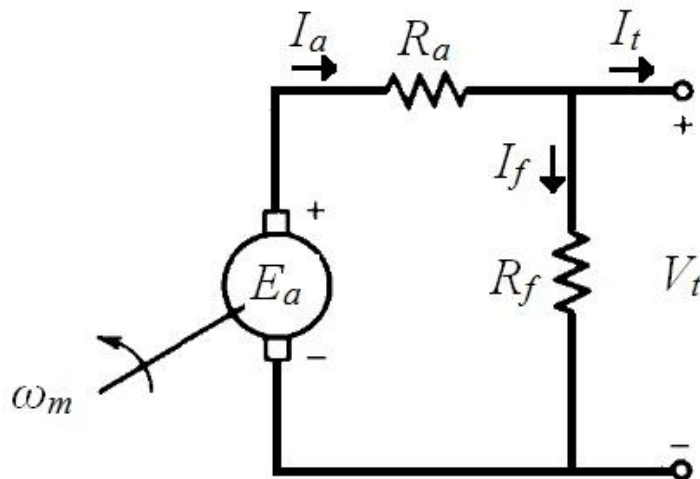
با توجه به (۱۷-۳)، اگر E_a با تغییر جریان پایانه ثابت بماند، تغییرات ولتاژ پایانه برحسب جریان پایانه به صورت منحنی نشان داده شده در شکل ۳-۲۲ می گردد. از تقاطع این مشخصه با منحنی بار، نقطه کار حاصل می شود.



شکل ۳-۲۲- مشخصه ی خارجی ژنراتور DC

۳-۱۰-۲- ژنراتور DC شنت

مدار معادل این ژنراتور در شکل ۳-۲۳ 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.

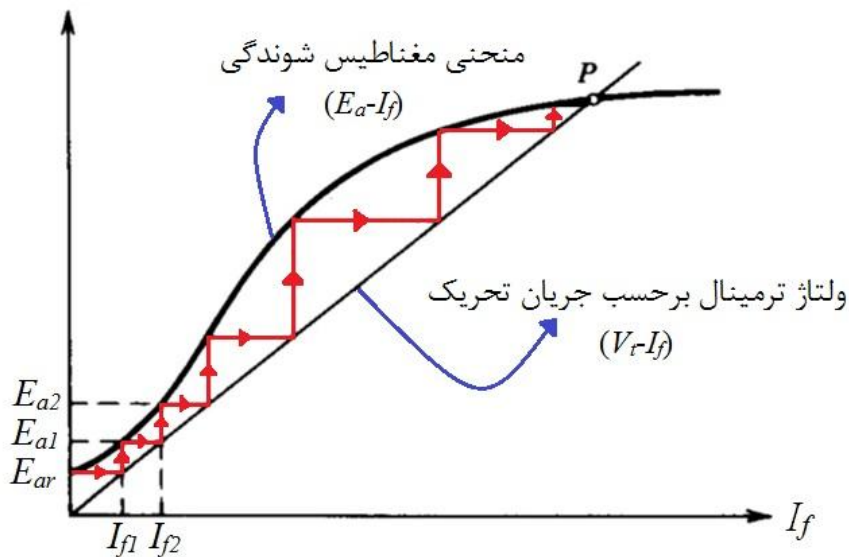


شکل ۳-۲۳- ژنراتور DC شنت

۳-۱۰-۲-۱- طریقه ولتاژسازی در ژنراتور شنت

منحنی مغناطیس شونددگی $(E_a - I_f)$ به همراه خط بار ولتاژ پایانه برحسب جریان تحریک $(V_t - I_f)$ در شکل ۳-۲۶ رسم شده اند. با توجه به مدار شکل ۳-۲۳، در حالت بی باری $(I_t = 0)$ ، جریان آرمیچر با جریان مدار تحریک که مقدار آن کم است برابرست و می توان از افت ولتاژ $R_a I_a$ صرف نظر کرد و در نتیجه $E_a \approx V_t$.

اگر ماشین دارای شار پسماند باشد، وقتی آرمیچر به چرخش در می آید ولتاژ تولیدی کوچکی تولید می شود که در شکل ۳-۲۴ با E_{ar} نمایش داده شده است. با توجه به خط بار ولتاژ پایانه برحسب جریان تحریک، این ولتاژ کوچک تولید جریان تحریک کمی تولید 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 (P) ادامه می یابد و نهایتاً ولتاژ قابل ملاحظه ای در دو سر آرمیچر ظاهر می گردد.

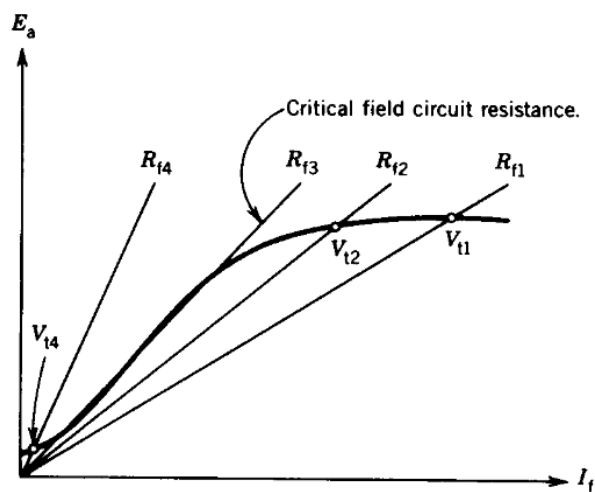


شکل ۳-۲۴- روند ولتاژسازی در ژنراتور DC شنت

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

- ✓ وجود شار پسماند در مدار مغناطیسی ماشین
- ✓ تقویت شار پسماند توسط شار ناشی از مدار تحریک
- ✓ مقاومت مدار تحریک کمتر از مقاومت بحرانی (شیب قسمت خطی منحنی مغناطیس‌شوندگی) مطابق

شکل ۳-۲۵



شکل ۳-۲۵- تغییر مقاومت مدار تحریک

۳-۱۰-۲- معادلات حاکم در حالت ماندگار

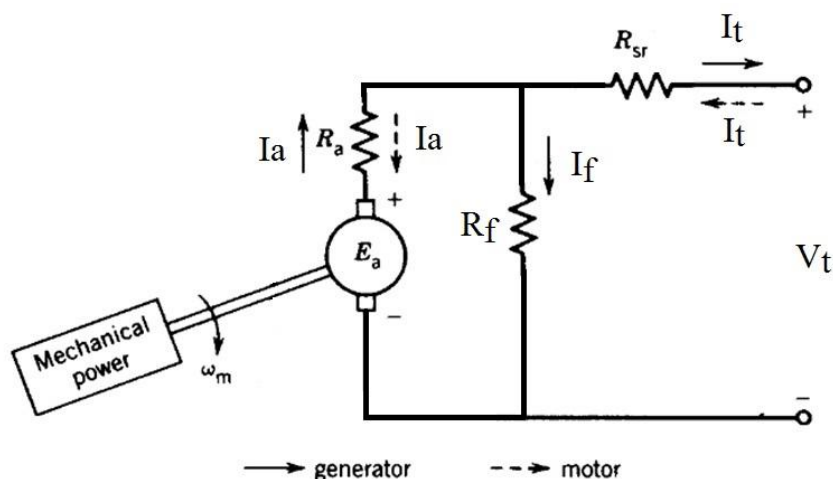
با توجه به مدار نشان داده شده در شکل ۳-۲۳، معادلات حاکم بر عملکرد حالت ماندگار ژنراتور شنت عبارتند از:

$$\begin{cases} E_a = V_t + R_a I_a \\ E_a = K_a \varphi \omega_m = f(I_f) \\ V_t = R_f I_f = R_L I_t \\ I_a = I_t + I_f \end{cases}$$

۳-۱۱- موتورهای جریان مستقیم (DC)

۳-۱۱-۱- پخش توان و بازده

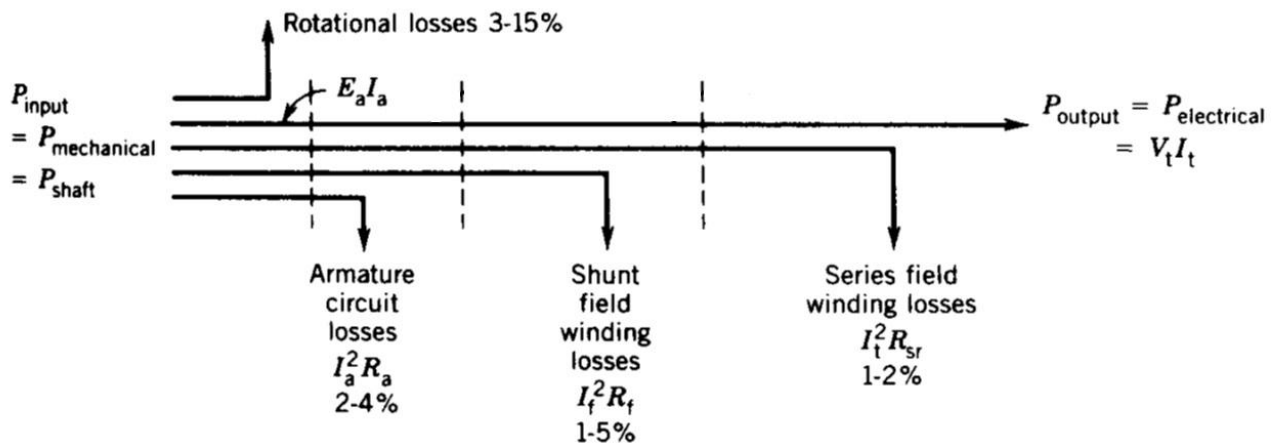
تشریح مسئله برای ماشین DC کمپوند از نوع شنت کوتاه که مدار آن در شکل ۳-۲۶ نشان داده شده است انجام می‌گردد. توجه شود در حالت موتوری جهت جریان به سمت داخل است و در حالت ژنراتوری برعکس.



شکل ۳-۲۶- شمای ماشین DC کمپوند شنت کوتاه

حالت ژنراتوری

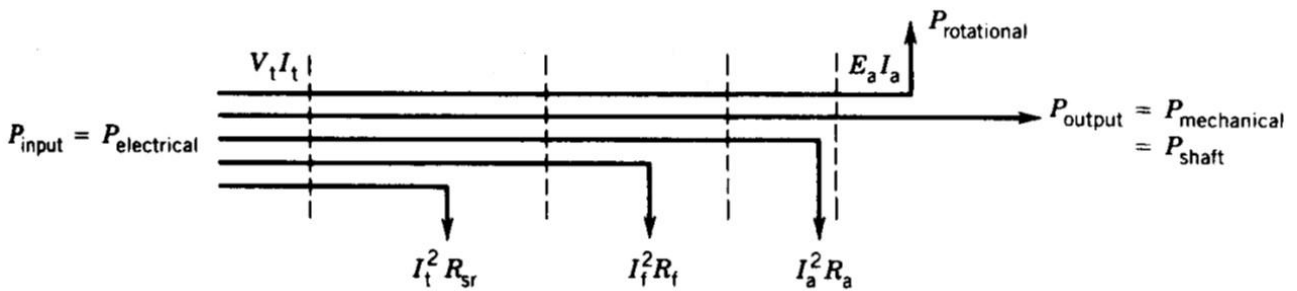
توان ورودی به ماشین به صورت توان مکانیکی است و همان توان روی محور است. توان خروجی به صورت توان الکتریکی است. نمودار پخش توان برای حالت ژنراتوری در شکل ۳-۲۷ مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۲۷- 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 ۳-۲۸ مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۲۸- حالت موتوری

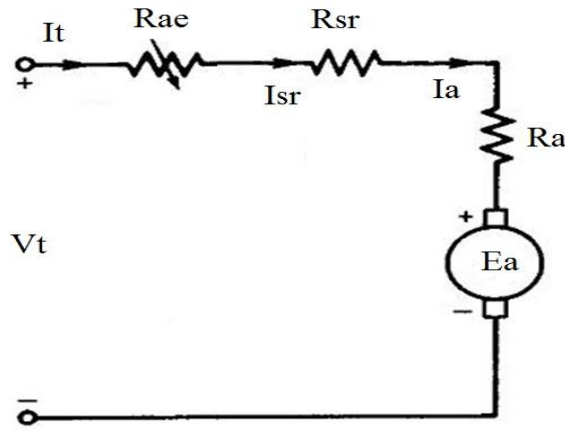
نسبت توان خروجی به توان ورودی بازده یا راندمان نامیده می‌شود:

$$E_{ff} = \frac{P_{output}}{P_{input}} = \frac{P_{output}}{P_{output} + P_{loss}} \quad (۱۸-۳)$$

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

۳-۱۱-۲- موتور DC سری

مدار این موتور در شکل ۳-۲۹ نشان داده شده است که در آن مقاومت R_{ae} به منظور کنترل سرعت استفاده می‌شود.



شکل ۳-۲۹- مدار موتور DC سری

که در آن مقاومت اضافه شده در مدار آرمیچر به منظور کنترل سرعت، R_a مقاومت مدار آرمیچر و R_{sr} مقاومت سیم پیچی تحریک سری است. با فرض سیستم خطی (هسته به اشباع نمی رود):

$$K_a \phi = K_{sr} I_a \quad (۱۹-۳)$$

با توجه به (۱۹-۳) داریم:

$$E_a = K_a \phi \omega_m = K_{sr} I_a \omega_m \quad (۲۰-۳)$$

$$T = K_a \phi I_a = K_{sr} I_a I_a = K_{sr} I_a^2 \quad (۲۱-۳)$$

از طرف دیگر، با توجه به مدار معادل موتور نشان داده شده در شکل ۳-۲۹ داریم:

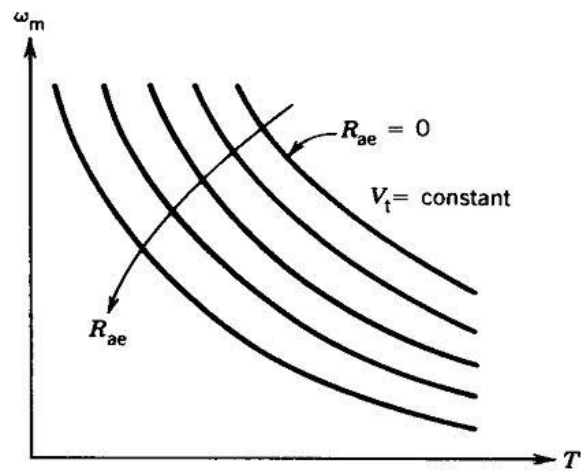
$$E_a = V_t - (R_a + R_{sr} + R_{ae}) I_a \quad (۲۲-۳)$$

از (۲۰-۳)، (۲۱-۳) و (۲۲-۳)، نهایتاً رابطه بین سرعت و گشتاور به صورت معادله زیر نتیجه می شود:

$$\omega_m = \frac{V_t}{\sqrt{K_{sr}} \sqrt{T}} - \frac{R_a + R_{sr} + R_{ae}}{K_{sr}} \quad (۲۳-۳)$$

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

راه‌انداز بسیار زیاد احتیاج دارد، فراوان است. شکل ۳-۳۰ نحوه تغییر مشخصه گشتاور-سرعت با تغییر مقاومت اضافه‌شونده در مدار آرمیچر (R_{ae}) را نشان می‌دهد.



۳-۳۰- 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:

$$V_t = E_a + R_a I_a \Rightarrow I_a = \frac{V_t - E_a}{R_a} \quad (۲۴-۳)$$

که در آن:

$$E_a = K_a \varphi \omega_m \quad (۲۵-۳)$$

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

روش‌های مختلف راه‌اندازی:

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 راه‌اندازی

فصل چهارم

ماشین های القایی (آسنکرون) سه فاز

Induction (Asynchronous) Machines

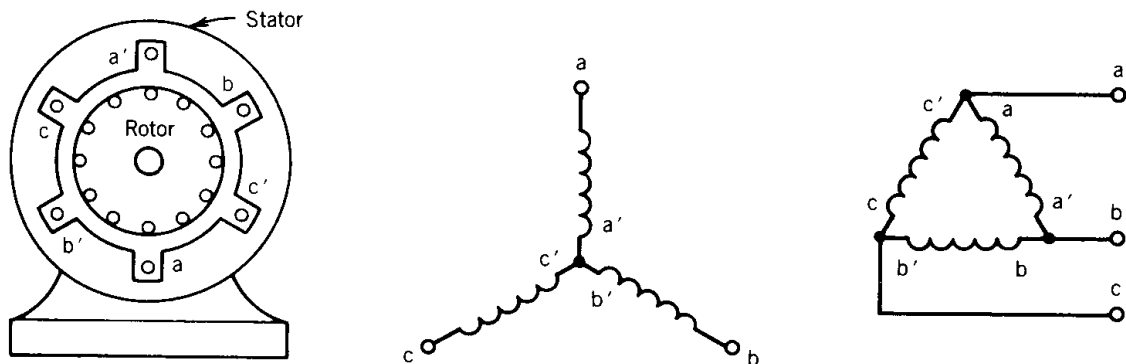
۴-۱- ساختمان موتورهای القایی سه فاز

تحریک فقط روی استاتور (برق سه فاز) و القاء جریان در هادی های رتور (قانون فارادی)

← لفظ موتور القایی

هسته استاتور از جنس فولاد مرغوب به صورت مورق (به خاطر کاهش تلفات هسته) دارای یک دسته سیم پیچی سه فاز و رتور از جنس مواد فرومغناطیسی می باشد.

سیم پیچی سه فاز استاتور درون شیارهای تعبیه شده در سطح داخلی استوانه بیرونی (یوغ استاتور) قرار داده می شود و در عمل به صورت گسترده (Distributed Winding) است. برای جلوگیری از شلوغی شکل و سادگی بحث، مطابق شکل ۴-۱ مدل سازی سیم پیچی به صورت متمرکز (Concentrated) نشان داده می شود.



شکل ۴-۱- ماشین القایی سه فاز

اتصال سیم پیچی رتور می تواند ستاره یا مثلث باشد. رتور دو نوع است:

الف- رتور سیم بندی شده (درون شیارهای تعبیه شده روی سطح خارجی رتور یک دسته سیم پیچی سه فاز با اتصال ستاره اتصال کوتاه شده قرار دارد).

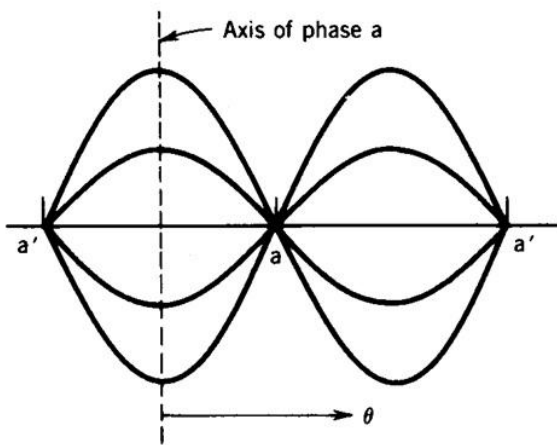
ب- رتور قفس سنجابی: میله های آلومینیومی یا مسی درون شیار که از دو طرف توسط دو حلقه اتصال کوتاه شده اند (شبیه قفس سنجاب). این نوع رتور کاربرد بیشتر دارد.

۲-۴- میدان مغناطیسی گردان یا دوار

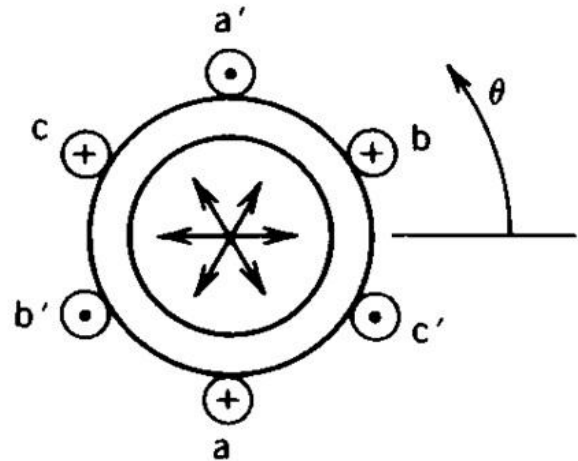
نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) تولیدی ناشی از جریان فاز a در نقاط مختلف فاصله هوایی (θ های مختلف) در حقیقت تصویر mmf فاز در آن موقعیت می باشد:

$$F(\theta) = N i_a \cos \theta$$

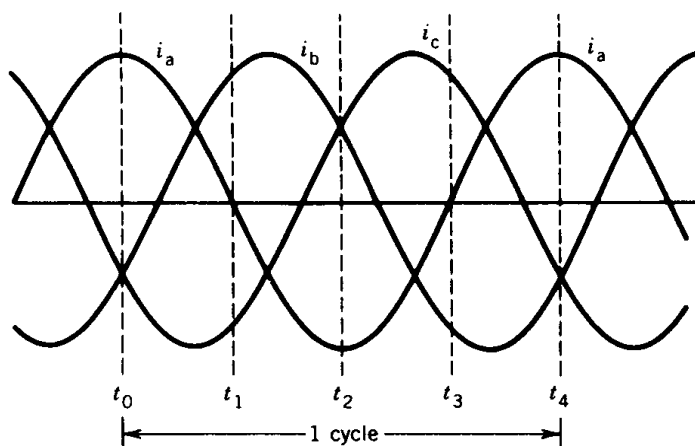
نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) تولیدی ناشی از جریان فاز a یک موج ضربانی یا نوسانی است و به خاطر متغیربودن جریان ($i_a = I_m \cos \omega t$)، دامنه mmf در لحظات مختلف یکسان نیست (مطابق شکل ۲-۴-ب).



(ب)



(د)



(ج)

شکل ۲-۴- استاتور موتور القایی سه فاز، (الف) ساختار هندسی، (ب) نیروی محرکه مغناطیسی ضربانی فاز a، (ج) جریان های سه فاز

به طریق مشابه آنچه در شکل ۴-۲-ب مشاهده می شود، تولید mmf های با توزیع سینوسی توسط سیم پیچی های فاز b و c نیز اتفاق می افتد.

⇐ وجود سه mmf سینوسی مربوط به سه فاز که محورهای آنها 120° اختلاف فاز مکانی دارند.

از طرف دیگر مطابق شکل ۴-۲-ج، جریان های اعمالی به سیم پیچی استاتور، سه فاز متغیر با زمان هستند (سینوسی اند) و دارای اختلاف فاز زمانی 120° هستند.

$$\begin{cases} i_a = I_m \cos \omega t \\ i_b = I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \\ i_c = I_m \cos(\omega t - 240^\circ) \end{cases}$$

اعمال سه جریان سینوسی با اختلاف فاز زمانی 120° به سه سیم پیچی a و b و c که محورهای مغناطیسی آنها در فضا 120° اختلاف فاز مکانی دارند باعث شکل گرفتن mmf منتهجه (برآیند سه mmf مربوط به سه فاز) در فاصله هوایی می گردد که در ادامه اثبات می شود mmf منتهجه یک موج دوار است و با سرعت سنکرون در فاصله هوایی می چرخد.

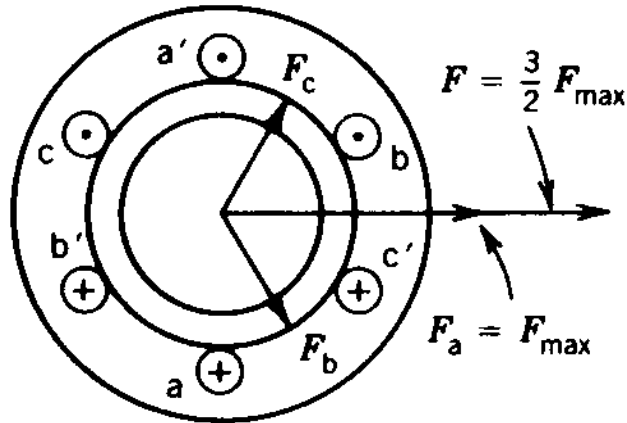
گردان بودن میدان:

ارزیابی مقدار و جهت mmf منتهجه در لحظات مختلف نشان داده شده در شکل ۴-۲-ج در ادامه انجام می شود.

لحظه t_0 :

$$\begin{cases} i_a = I_m & \text{از سیم پیچی فاز a حداکثر جریان مثبت می گذرد.} \\ i_b = -\frac{I_m}{2} & \text{از سیم پیچی فاز b حداکثر جریان مثبت می گذرد.} \\ i_c = -\frac{I_m}{2} & \text{از سیم پیچی فاز c حداکثر جریان مثبت می گذرد.} \end{cases} \longrightarrow |F| = \frac{3}{2} F_{\max}$$

همانطور که از شکل ۴-۳ واضح است mmf منتهجه در لحظه t_0 در جهت محور مغناطیسی فاز a می باشد.



شکل ۴-۳- نیروی محرکه منتجه (برآیند) در لحظات $t=t_0$ و $t=t_4$

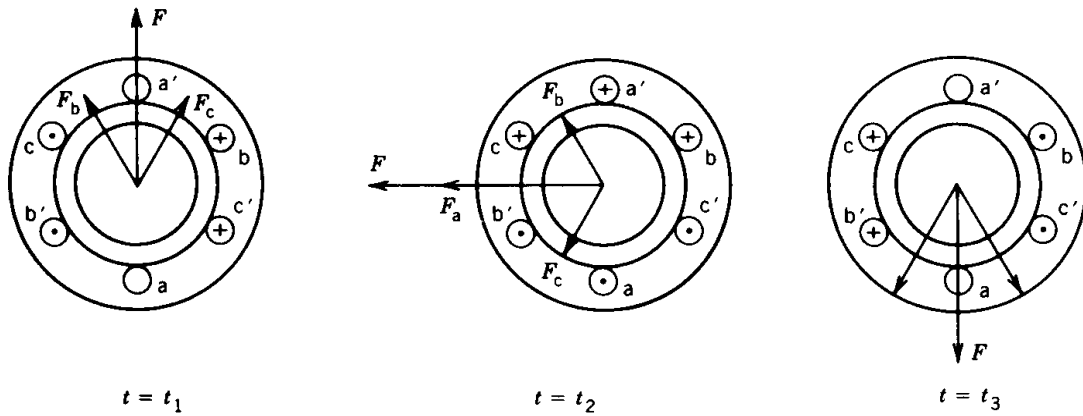
برای لحظات دیگر جریان ها و نیروی محرکه های مغناطیسی تولیدی فازها عبارتند از:

$$t = t_1 : \begin{cases} i_a = 0 \\ i_b = I_m \sin 60 = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m \Rightarrow F_b = \frac{\sqrt{3}}{2} F_{\max} \\ i_c = -I_m \sin 60 = -\frac{\sqrt{3}}{2} I_m \end{cases}$$

$$t = t_2 : \begin{cases} i_a = -I_m \\ i_b = i_c = \frac{1}{2} I_m \end{cases}$$

$$t = t_3 : \begin{cases} i_a = 0 \\ i_b = -\frac{\sqrt{3}}{2} I_m \\ i_c = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m \end{cases}$$

برای این لحظه ها، نیروی محرکه منتجه (برآیند) در شکل ۴-۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۴- نیروی محرکه منتجه (برآیند) در لحظات $t=t_0$ و $t=t_4$

با توجه به شکل های ۳-۴ و ۴-۴ مشاهده می شود که مقدار mmf منتجه همواره $F_{max} \frac{3}{2}$ است و جهت آن دائماً عوض می شود.

با کامل شدن یک دوره تناوب فاز a، mmf منتجه یک دور زده است. در صورتیکه فرکانس منبع تغذیه f باشد در یک ثانیه f دوره تناوب جریان داریم سپس mmf منتجه f دور در ثانیه می زد.

$$\text{سرعت mmf منتجه} = f \text{ (rps)}$$

بحث فوق برای یک ماشین ۲ قطبی است. در یک ماشین ۴ قطبی با کامل شدن یک دوره تناوب جریان موج mmf منتجه نصف دور می زند.

بنابراین در یک ثانیه که f دوره تناوب جریان کامل می شود، mmf منتجه $f/2$ دور می زند. به عبارت دیگر:

$$\text{سرعت mmf منتجه} = f/2 \text{ (rps)}$$

به طور کلی در یک ماشین P قطبی:

$$\text{سرعت mmf منتجه} = \frac{2}{p} f \text{ (rps)} = \frac{2}{p} f \times 60 \text{ (rpm)} = \frac{120 f}{p} \text{ (rpm)}$$

سرعت میدان گردان (mmf منتجه)، سرعت سنکرون نامیده می شود و از رابطه زیر بدست می آید:

$$\text{سرعت سنکرون} : n_s = \frac{120 f}{p}$$

۴-۳- عملکرد موتور القایی سه فاز در شرایط مختلف

الف- حالت سکون

موتور القایی سه فاز با رتور از نوع سیم بندی شده را در نظر بگیرید که مدار رتور باز است (جریان القایی نداریم) میدان گردان در فاصله هوایی به خاطر تحریک سیم پیچی های سه فاز استاتور با سرعت سنکرون سیم پیچی های استاتور و رتور را قطع می کنند و در آنها ولتاژهایی با فرکانس یکسان القاء می شود.

$$E_1 = 4.44 N_1 f \phi_{\max} K_{w1}$$

مقدار مؤثر ولتاژ القایی در سیم پیچی استاتور

$$E_2 = 4.44 N_2 f \phi_{\max} K_{w2}$$

مقدار مؤثر ولتاژ القایی در سیم پیچی رتور

که در آن:

N_1 : تعداد دور سیم پیچی استاتور در هر فاز

N_2 : تعداد دور سیم پیچی رتور در هر فاز

ب- حالت کاری عادی (چرخش)

سیم پیچی رتور اتصال کوتاه ← ولتاژ القایی باعث جاری شدن جریان در رتور ← تولید گشتاور ناشی از تقابل میدان گردان استاتور و جریان رتور ← چرخش رتور با سرعت n ✓ همواره سرعت رتور (n) از سرعت میدان گردان استاتور (n_s) کمتر است.

در صورت تساوی سرعت ها القاء ولتاژ و جریان در رتور نداریم. (علت اطلاق لفظ موتور آسنکرون)

$$s \triangleq \frac{n_s - n}{n_s}$$

لغزش : s

n_s : سرعت میدان گردان استاتور بر حسب دور بر دقیقه (rpm)

n : سرعت رتور بر حسب دور بر دقیقه (rpm)

$$s = \frac{n_s}{n_s} = 1 \quad \Leftrightarrow \quad n = 0$$

در حالت سکون:

$$s = \frac{n_s - n_s}{n_s} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad n = n_s$$

برای سرعت سنکرون:

$$0 < s \leq 1$$

بنابراین در حالت عملکرد موتوری:

فرکانس ولتاژ و جریان القایی در رتور با سرعت نسبی بین رتور و میدان گردان متناسب است:

$$\text{فرکانس رتور} : f_2 = \frac{p}{120} (n_s - n) = \frac{p}{120} s \quad n_s = s f_1$$

f_1 : فرکانس ولتاژ استاتور

ولتاژ القایی در رتور:

$$E_{2s} = 4.44 N_2 f_2 \varphi_{\max} K_{w_2}$$

$$= 4.44 N_2 s f_1 \varphi_{\max} K_{w_2} = s E_2$$

$$\rightarrow E_{2s} = s E_2$$

مثال ۴-۱- موتور القایی سه فاز 4 قطب 460 V , 100 hp , 60 Hz مفروض است و توان اسمی را در لغزش

5% تحویل می دهد. مطلوب است:

الف- سرعت سنکرون میدان گردان استاتور و سرعت موتور

ب- فرکانس مدار رتور

حل:

$$\text{الف:} \quad n_s = \frac{120 f}{p} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

$$\text{سرعت رتور} : n = (1 - s)n_s = (1 - 0.05) \times 1800 = 1710 \text{ rpm}$$

$$\text{ب:} \quad f_2 = s f_1 = 0.05 \times 60 = 3 \text{ Hz}$$

۴-۴- مدل مدار معادل

هدف: به دست آوردن مدار معادل موتور القایی سه فاز در حالت کار ماندگار (Steady State (SS)

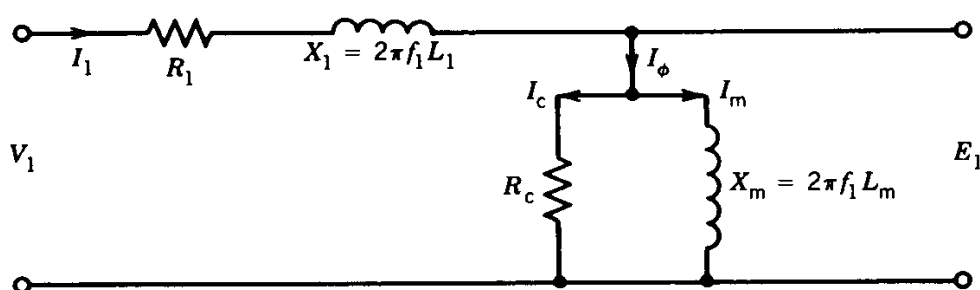
فرضیات: رتور از نوع سیم بندی شده باشد.

(برای رتور قفس سنجایی، هادی ها به صورت یک دسته سیم پیچی سه فاز اتصال کوتاه شده مدل می شوند)

- ✓ میدان گردان استاتور با سرعت سنکرون n_s در فاصله هوایی می چرخد.
- ✓ میدان گردان رتور با سرعت سنکرون n_s در فاصله هوایی می چرخد.
- ✓ منتجه میدان های استاتور و رتور با سرعت n_s در فاصله هوایی می چرخد.

الف- سیم پیچی استاتور

مدار معادل یک فاز استاتور موتور القایی سه فاز در شکل ۴-۵ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۵- مدل یک فاز استاتور

V_1 : ولتاژ فاز در پایانه استاتور

R_1 : مقاومت هر فاز سیم پیچی استاتور

X_1 : راکتانس نشتی سیم پیچی استاتور (یک فاز)

R_c : مقاومت مدل کننده تلفات هسته استاتور ($R_c I_c^2$) معادل تلفات هسته در استاتور به خاطر عبور شار متغیر با

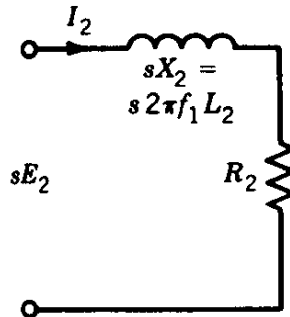
زمان از مدار استاتور)

X_m : راکتانس مغناطیس کنندگی استاتور ($N_1 I_m$) آمپر دور مورد نیاز برای برقراری شار در هسته استاتور)

E_1 : ولتاژ القایی در سیم پیچی استاتور به خاطر شار منتجه فاصله هوایی

ب- مدار رتور (مدار معادل یک فاز رتور)

✓ مدار معادل رتور از دیدگاه رتور به صورت ساده با یک مقاومت و راکتانس پراکنندگی به طور سری با یکدیگر مطابق شکل ۴-۶ مدل شده است.



شکل ۴-۶- مدار رتور از دیدگاه رتور

E_{2s} : ولتاژ القایی در رتور در حالت چرخش رتور تحت لغزش s

E_2 : ولتاژ القایی در رتور در حالت سکون

$$X_{2s} = 2\pi f_2 L_2 = s 2\pi f_1 L_2$$

دقت شود فرکانس مدار رتور $f_2 = s f_1$ است و بنابراین:

$$\text{راکتانس پراکنندگی (نشستی)} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi (s f_1) L_2 = s \times 2\pi f_1 L_2 = s X_2$$

از مدار فوق، جریان رتور عبارت است از:

$$I_2 = \frac{s E_2}{R_2 + j s X_2} \quad (*)$$

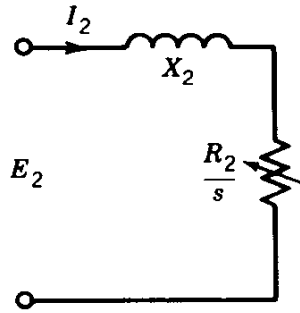
$$P_2 = R_2 I_2^2 \quad \text{: تلفات مسی رتور}$$

رابطه (*) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\rightarrow I_2 = \frac{E_2}{R_2/s + j X_2}$$

با توجه به رابطه فوق مدار معادل هر فاز رتور می تواند به صورت شکل ۴-۷ در نظر گرفته شود (فرکانس در این

مدار f_1 است).



شکل ۴-۷- مدار رتور از دیدگاه استاتور

$$E_2 = 4.44 f_1 N_2 \phi_p k w_2$$

جریان رتور در دو مدار نشان داده شده برای رتور (شکل های ۴-۶ و ۴-۷) برابر است.

توان اکتیو در مدار شکل ۴-۷ برای رتور عبارت است از:

$$P_{ag} = \frac{R_2}{s} I_2^2 = \frac{P_2}{s}$$

P_2 : تلفات مسی رتور در مدار شکل ۴-۶ برای رتور است. در حالت کار موتوری، لغزش (s) عددی مثبت و مقدار

کوچکی دارد (بین صفر و یک) و در نتیجه:

$$(توان تلف شده در مدار شکل ۴-۶) \quad P_{ag} > P_2 \quad (توان اکتیو در مدار شکل ۴-۷)$$

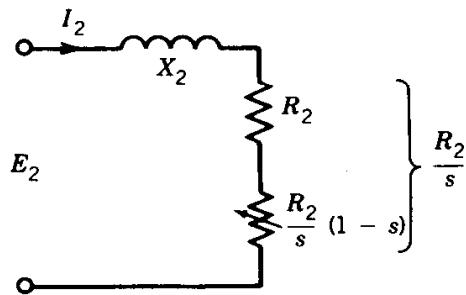
P_{ag} توان عبوری از فاصله هوایی نامیده می شود که وارد رتور می شود. (از استاتور)

تفاوت P_{ag} و P_2 به توان مکانیکی (ظاهر شده روی محور رتور) تبدیل می شود.

$$P_{ag} = \frac{R_2}{s} I_2^2 = \underbrace{R_2 I_2^2}_{P_2} + \underbrace{\frac{R_2(1-s)}{s} I_2^2}_{P_{mech}} \quad (**)$$

$$P_{mech} = \text{توان مکانیکی حاصله} \quad P_2 = \text{تلفات مسی رتور}$$

با توجه به رابطه (***) مدار معادل رتور از دیدگاه استاتور می تواند به صورت شکل ۴-۸ در نظر گرفته شود.



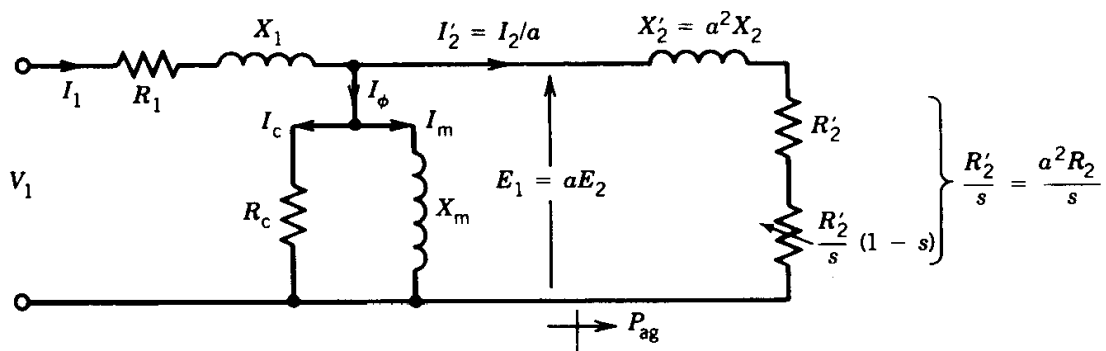
شکل ۴-۸- مدار رتور از دیدگاه استاتور (اصلاح شده)

توان مکانیکی حاصله در حقیقت توان تلف شده در مقاومت $\frac{R_2(1-s)}{s}$ مدل شده است:

$$P_{\text{mech}} = I_2^2 \frac{R_2}{s} (1-s) = (1-s) P_{\text{ag}}$$

ج- مدار معادل کامل

هر دو مدار به دست آمده برای استاتور (شکل ۴-۵) و برای رتور (شکل ۴-۸) در فرکانس f_1 هستند و بنابراین امکان ارجاع مدار معادل رتور به طرف استاتور و الحاق دو مدار به منظور ایجاد مدار معادل کامل موتور مطابق شکل ۴-۹ وجود دارد.



شکل ۴-۹- مدار معادل موتور القایی سه فاز

پارامترهای نشان داده شده در شکل ۴-۹ عبارتند از:

$$I_2' = I_2/a$$

$$X_2' = a^2 X_2$$

$$R_2' = a^2 R_2$$

که در آن: $a = \frac{N_1}{N_2}$ و P_{ag} توان عبوری از فاصله هوایی است.

۴-۵- مدار معادل پیشنهادی توسط IEEE

Institute of Electrical and Electronics Engineering (IEEE)

I triple E

آی تریپلی

اگر V_1 و f_1 ثابت باشند که معمولاً نیز اینچنین است تلفات هسته استاتور ثابت است. $P_c = K V^\alpha f^\beta$

در سرعت های بالا فرکانس رتور $f_2 = s f_1$ بسیار کوچک است و تلفات هسته رتور ناچیز است.

از طرف دیگر تلفات اصطکاک و بادزنی در سرعت های زیاد قابل توجه است.

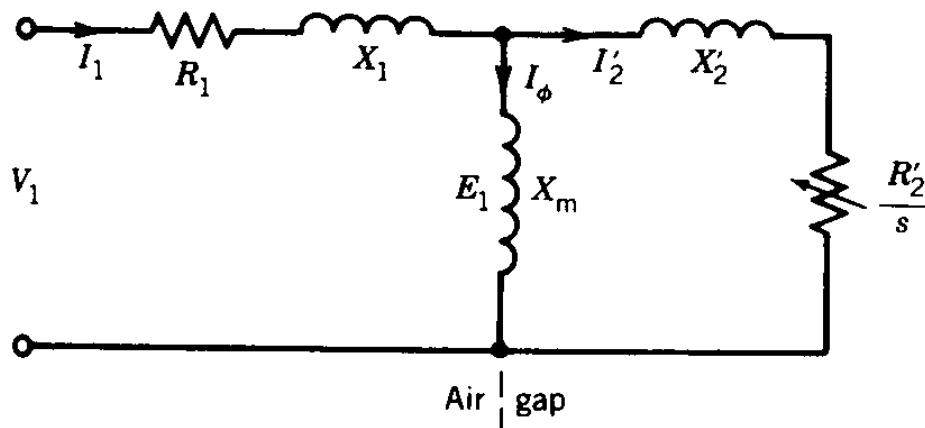
در سرعت های پائین تلفات هسته رتور قابل ملاحظه است ولی تلفات مکانیکی (اصطکاک و بادزنی) قابل اغماض.

← مجموع تلفات هسته استاتور، رتور، اصطکاک و بادزنی برای سرعت های مختلف ثابت است و آنرا تلفات

چرخش می نامیم.

بنابراین مقاومت R_c از مدار معادل حذف می شود و در تلفات چرخشی P_{rot} در نظر گرفته می شود و به این ترتیب

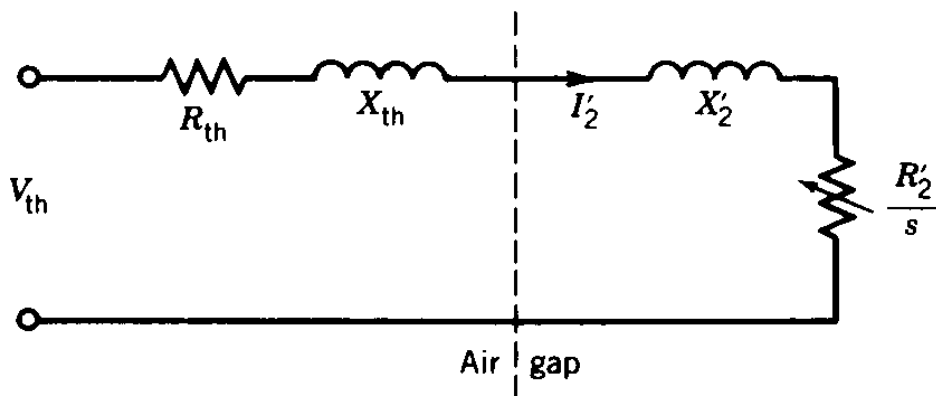
مدار معادل نشان داده در شکل ۴-۱۰ بدست می آید.



شکل ۴-۱۰- مدار معادل پیشنهادی IEEE

۴-۶- مدار معادل تونن

معادل تونن مدار نشان داده شده در شکل ۴-۱۰ به صورت زیر می باشد:



شکل ۴-۱۱- مدار معادل تونن

که در آن:

$$V_{th} = \frac{X_m}{(R_1^2 + (X_1 + X_m)^2)^{1/2}} V_1$$

$$Z_{th} = R_{th} + j X_{th} = j X_m \parallel (R_1 + j X_1) = \frac{j X_m (R_1 + j X_1)}{R_1 + j (X_1 + X_m)}$$

۴-۷- مشخصه های موتورهای القایی سه فاز

ω_m : سرعت زاویه ای رتور

توان مکانیکی حاصله: $P_{mech} = T \omega_m = \frac{R'_2 (1-s)}{s} I'_2{}^2$

$$\rightarrow T = \frac{R'_2}{s} I'_2{}^2 \frac{(1-s)}{\omega_m}$$

$$\omega_m = (1-s) \omega_s$$

از تعریف لغزش داریم:

ω_s : سرعت سنکرون

$$\Rightarrow T = \frac{R'_2}{s} I'_2{}^2 \times \frac{1}{\omega_s} \Rightarrow T \omega_s = \frac{R'_2}{s} I'_2{}^2 = P_{ag}$$

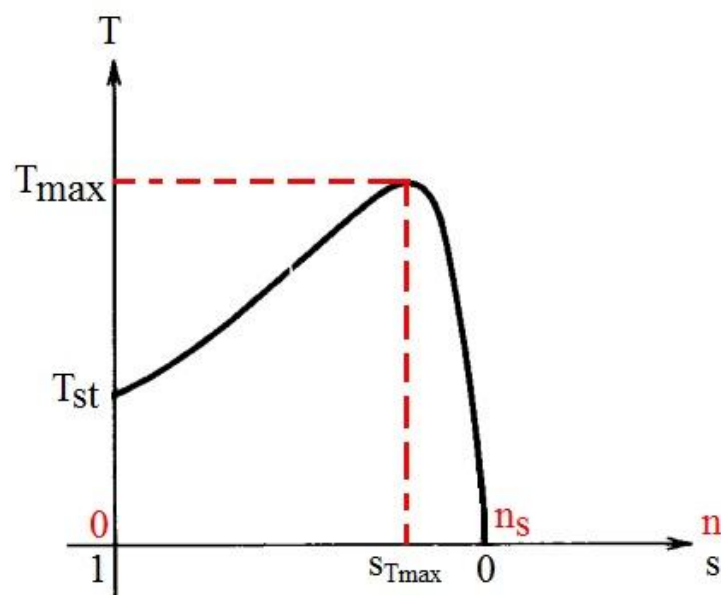
توان عبوری از فاصله هوایی:

$$\rightarrow T = \frac{P_{ag}}{\omega_s} = \frac{1}{\omega_s} \frac{R'_2}{S} I'_2{}^2$$

$$\rightarrow I'_2 = \frac{V_{th}}{\sqrt{(R_{th} + R'_2/s)^2 + (X_{th} + X'_2)^2}}$$

$$\Rightarrow T = \frac{1}{\omega_s} \times \frac{R'_2}{s} \times \frac{V_{th}^2}{(R_{th} + R'_2/s)^2 + (X_{th} + X'_2)^2} \quad (\text{گشتاور تولیدی مربوط به یک فاز})$$

گشتاور تولیدی کل سه برابر مقدار فوق است. (موتور سه فاز)



شکل ۴-۱۲- منحنی تغییرات گشتاور سرعت در حالت عملکرد موتوری

گشتاور ماکزیمم:

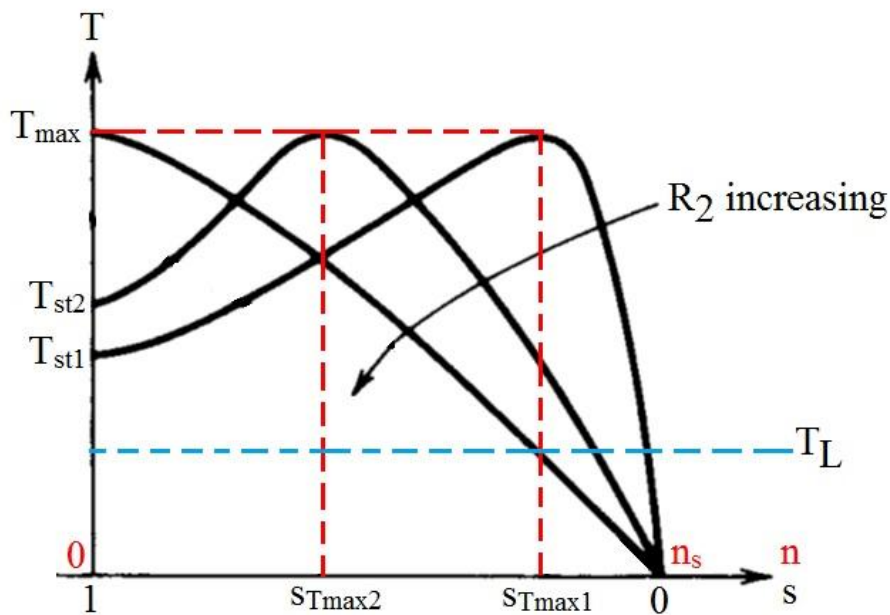
T_{max} : گشتاور ماکزیمم

$s_{T_{max}}$: لغزشی که در آن گشتاور ماکزیمم رخ می دهد.

$$\text{گشتاور موتور: } T = \frac{3}{\omega_s} \times \frac{V_{th}^2}{(R_{th} + R'_2/s)^2 + (X_{th} + X'_2)^2} \times \frac{R'_2}{s}$$

$$\frac{dT}{ds} = 0 \rightarrow \begin{cases} s_{T_{max}} = \frac{R'_2}{(R_{th}^2 + (X_{th} + X'_2)^2)^{1/2}} \\ T_{max} = \frac{3}{2 \omega_s} \times \frac{V_{th}^2}{R_{th} + [R_{th}^2 + (X_{th} + X'_2)^2]^{1/2}} \end{cases}$$

از روابط فوق مشهود است که گشتاور ماکزیمم مستقل از مقاومت رتور (R'_2) است ولی لغزشی که در آن گشتاور ماکزیمم رخ می دهد ($S_{T_{max}}$) متناسب با مقاومت رتور است. هرچه مقاومت افزایش یابد، $S_{T_{max}}$ بزرگتر می شود.



شکل ۴-۱۳- اثر مقاومت رتور روی مشخصه گشتاور

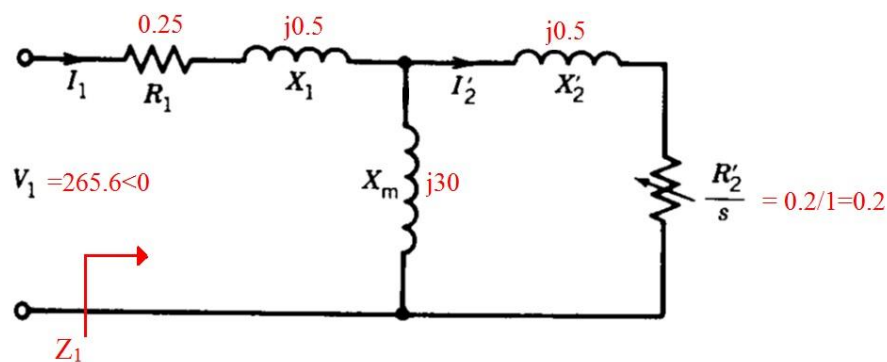
مثال ۴-۲- موتور القایی سه فاز ۴ قطب 60 Hz و 1740 rpm و $460V$ دارای پارامترهای زیر مفروض است:

$$R_1 = 0.25 \quad X_1 = X_2' = 0.5 \quad R_2' = 0.2 \quad X_m = 30 \Omega$$

رتور از نوع سیم‌بندی شده و از دو طرف اتصال کوتاه شده است. موتور به ولتاژ نامی متصل است و تلفات چرخشی ۱۷۰۰ وات می باشد.

الف- جریان راه اندازی ؟

$$n=0 \Rightarrow s=1$$



شکل ۴-۱۴- مدار معادل در حالت سکون ($s=1$)

$$V_1 = \frac{460}{\sqrt{3}} = 265.6 \text{ V}$$

$$Z_1 = 0.25 + j 0.5 + \frac{j 30(0.2 + j 0.5)}{0.2 + j 30.5} = 1.08 \angle 66^\circ \Omega$$

$$I_{st} = \frac{265.6}{1.08 \angle 66^\circ} = 245.9 \angle -66 \text{ A}$$

ب- گشتاور راه انداز؟

$$n_s = \frac{120 f}{p} = \frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

$$\omega_s = 1800 \times \frac{2\pi}{60} = 188.5 \text{ rad/s}$$

$$V_{th} = \frac{X_m}{X_1 + X_m} V_1 = \frac{j 30}{j 30.5 + 0.25} \times 265.6 \approx 261.3 \text{ V}$$

$$Z_{th} = \frac{j 30(0.25 + j 0.5)}{0.25 + j 30.5} = 0.55 \angle 63.9^\circ = 0.24 + j 0.49$$

\downarrow
 R_{th}

\downarrow
 X_{th}

$$\begin{cases} R_{th} = 0.24 \Omega \\ X_{th} = 0.49 \Omega \approx X_1 \end{cases}$$

$$T = \frac{3}{\omega_s} \times \frac{V_{th}^2}{(R_{th} + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_{th} + X'_2)^2} \times \frac{R'_2}{s}$$

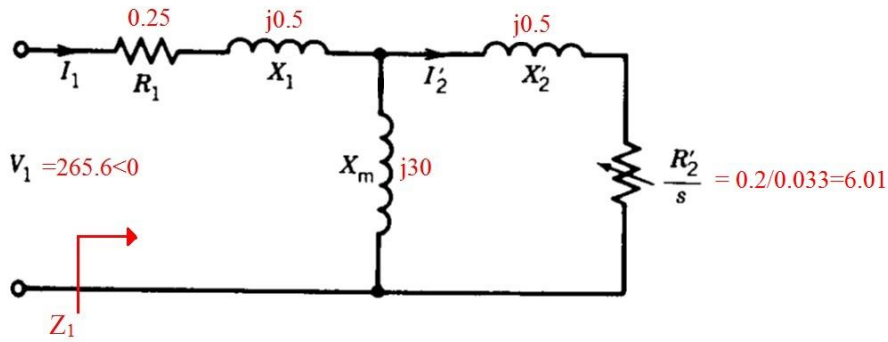
$$\xrightarrow{s=1} T_{st} = \frac{3}{188.5} \times \frac{261.3^2}{(0.24 + 0.2)^2 + (0.49 + 0.5)^2} \times \frac{0.2}{1} = 185.2 \text{ N.m}$$

$$s = \frac{1800 - 1740}{1800} = 0.033$$

ج- لغزش در شرایط اسمی؟

د- جریان اسمی؟

Rated conditions $\rightarrow s=0.033$



شکل ۴-۱۵- مدار معادل در شرایط نامی ($s=0.033$)

$$Z_1 = 0.25 + j 0.5 + j 30 \parallel (j 0.5 + 6.01) = 6.2 \angle 19.7^\circ \Omega$$

$$I_{FL} = \frac{V_1}{Z_1} = \frac{265.6}{6.2 \angle 19.7^\circ} = 42.7 \angle -19.7^\circ \text{ A}$$

ه- نسبت جریان راه اندازی به اسمی ؟

$$\frac{I_{st}}{I_{FL}} = \frac{245.9}{42.7} = 5.7$$

و- ضریب توان در شرایط اسمی ؟

$$\text{PF} = \cos 19.7^\circ = 0.94 \text{ پس فاز}$$

ز- گشتاور در شرایط اسمی ؟

$$T = \frac{3}{188.5} \times \frac{261.3^2}{(0.24 + 6.01)^2 + (0.49 + 0.5)^2} \times 6.01 = 163.1 \text{ N.m}$$

ح- بازده ؟

$$\text{توان عبوری از فاصله هوایی} : P_{ag} = T \omega_s = 163.1 \times 188.5 = 30.7 \text{ kW}$$

$$\text{تلفات مسی رتور} : P_2 = s P_{ag} = 0.033 \times 30.7 = 1.02 \text{ kW}$$

$$\text{توان مکانیکی حاصله} : P_{mech} = (1 - s)P_{ag} = (1 - 0.033) \times 30.7 = 29.7 \text{ kW}$$

$$\text{توان خروجی} : P_{out} = P_{mech} - P_{rot} = 29.7 - 1.7 = 28 \text{ kW}$$

$$\text{توان ورودی} : P_{in} = 3 V I \cos \theta = 3 \times 265.6 \times 42.7 \times 0.94 = 32 \text{ kW}$$

$$\text{بازده} : E_{ff} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{28}{32} \times 100 = 87.5 \%$$

ت- گشتاور ماکزیمم و لغزشی که در آن گشتاور ماکزیمم رخ می دهد؟

: لغزشی که در آن گشتاور ماکزیمم رخ می دهد

$$S_{T_{\max}} = \frac{R'_2}{(R_{th}^2 + (X_{th} + X'_2)^2)^{1/2}} = \frac{0.2}{(0.24^2 + (0.49 + 0.5)^2)^{1/2}} = 0.19$$

: گشتاور ماکزیمم

$$T_{\max} = \frac{3}{2 \omega_s} \times \frac{V_{th}^2}{R_{th} + [R_{th}^2 + (X_{th} + X'_2)^2]^{1/2}} = \frac{3}{2 \times 188.5} \times \frac{261.3^2}{0.24 + [0.24^2 + (0.49 + 0.5)^2]^{1/2}} =$$

431.6 N.m

ی: مقاومت اضافه شونده در رتور برای حصول گشتاور ماکزیمم در لحظه راه اندازی.

$$S_{T_{\max}} = 1 = \frac{R'_2 + R_{ext}}{[R_{th}^2 + (X_{th} + X'_2)^2]^{1/2}} = \frac{0.2 + R_{ext}}{[0.24^2 + (0.49 + 0.5)^2]^{1/2}}$$

$$\rightarrow R_{ext} = 0.8$$

۴-۸- کنترل سرعت

$$n_s = \frac{120 f}{p}$$

الف- تغییر تعداد قطب ها

امکان تغییر قطب ها از نسبت ۲ به ۱ با تغییر اتصالات کلاف های استاتور و در نتیجه تغییر پله ای سرعت وجود دارد. تعداد قطب های استاتور و رتور بایستی همواره مساوی باشند. بنابراین در رتور سیم بندی شده هنگام تغییر تعداد قطب های استاتور، تغییر آرایش سیم پیچی رتور به طوری که تعداد قطب های رتور و استاتور برابر گردند نیز لازم است.

توجه: در رتور قفس سنجانی نیاز به تغییر آرایش رتور نیست.

$$n_s = \frac{120 f}{p}$$

ب- تغییر فرکانس

تغییر فرکانس توسط یک اینورتر (مبدل DC-AC) و در نتیجه امکان کنترل سرعت نرم برای بازه گسترده سرعت وجود دارد.