فصل سوم

سیستم های مغناطیسی و ماشین های الکتریکی

سیستمهای مغناطیسی

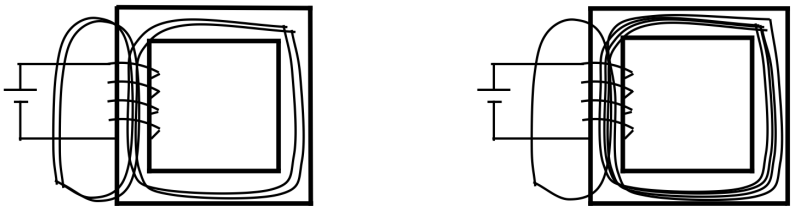
ماشینهای الکتریکی ابزارهای تبدیل انرژی از یک حالت به حالت دیگر هستند. این تبدیل انرژی شامل تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی (ژنراتورها)، الکتریکی به الکتریکی (ترانسفورماتورها) و الکتریکی به مکانیکی(موتورها) هستند. در این ماشین‌ها به‌منظور تبدیل انرژی از یک حالت به حالت دیگر از یک میدان واسطه استفاده می‌شود که این میدان واسطه میدان مغناطیسی است. بنابراین برای تحلیل انواع ماشینهای الکتریکی و به دست آوردن روابط این تبدیل انرژی در ابتدا سیستمهای مغناطیسی باید مورد مطالعه قرار گیرد که در این فصل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

دسته‌بندی مواد بر اساس خاصیت مغناطیسی:

مواد مختلف بر اساس ضریب نفوذپذیری مغناطیسی (μ) خود رفتارهای متفاوتی در برابر میدان مغناطیسی از خود نشان می‌دهند. ضریب نفوذپذیری از ضرب ضریب نفوذپذیری هوا μ_0 که برابر با $4\pi \times 10^{-7}$ است در ضریب نفوذپذیری نسبی μ_r بدست می‌آید ($\mu=\mu_0\mu_r$). مواد مختلف بر این اساس به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند:

- دیامغناطیس دارای ضریب نفوذپذیری مغناطیسی حدود ۱ و کمی کمتر از آن هستند. ($\mu_r \sim < 1$)
  مانند: مس، آب ، جیوه و...
- پارامغناطیس دارای ضریب نفوذپذیری مغناطیسی حدود ۱ و کمی بیشتر از آن هستند. ($\mu_r \sim > 1$)
  مانند: هوا ، پلاتین و....
- فرو مغناطیس دارای ضریب نفوذپذیری مغناطیسی بسیار بزرگ‌تر از یک هستند. ($\mu_r \gg 1$)
  مانند: آهن ، نیکل ، کبالت و...

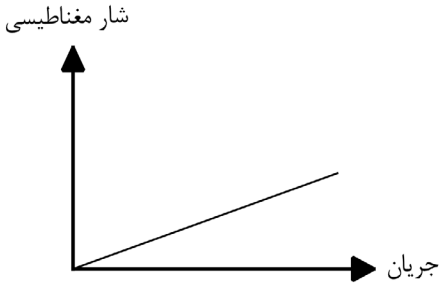
مواد فرومغناطیس به علت داشتن حوزه‌های مغناطیسی در ساختار مولکولی آن‌ها نفوذپذیری بالایی دارند. بنابراین شاری که از جریان الکتریکی تولید می‌شود بصورت پراکنده در فضا پخش می‌شود و برای متمرکز کردن یا جهت دادن آن باید از مواد فرو مغناطیس استفاده کرد. به شاری که از مسیر هسته عبور نمی‌کند **شار پراکندگی** گفته می‌شود.



خطوط شار در یک سیستم مغناطیسی شامل هسته فرومغناطیس در هسته جاری می‌شوند (سمت راست) اما اگر هسته غیر فرومغناطیس باشد به صورت پراکنده در هسته و هوا (سمت چپ) جاری می‌شوند.

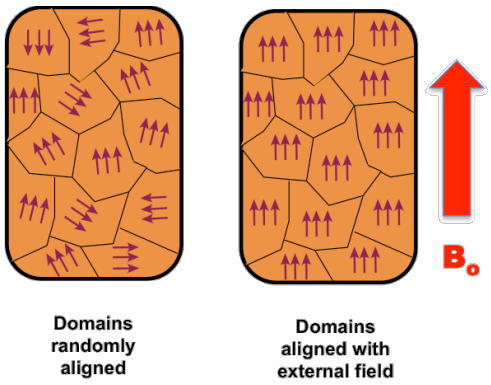
اشباع مغناطیسی و منحنی مغناطیس شوندگی:

مواد غیرمغناطیسی دارای ضریب نفوذپذیری پایین هستند و با افزایش جریان مقدار شارمغناطیسی بسیار اندک تغییر می‌کند. یعنی منحنی شار تولید شده در یک سیستم مغناطیسی با هسته غیر مغناطیسی به صورت خطی با شیب کم (متناسب با μ) افزایش می‌یابد.

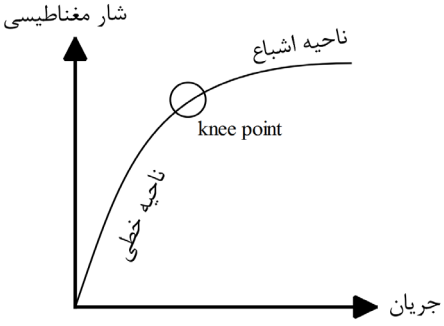


نمودار شار مغناطیسی برحسب جریان برای یک هسته غیر فرومغناطیسی که به صورت خطی است

اما ضریب نفوذپذیری مواد فرومغناطیسی مقدار ثابتی نیست و نمی‌توان مقدار معینی برای آن تعیین کرد. (البته در ناحیه خطی این مقدار ثابت است). علت آن این است که هر ماده فرومغناطیس دارای ظرفیت مشخصی از دوقطبی‌های مغناطیسی است و زمانی که در معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد دوقطبی‌های آن در هر حوزه مغناطیسی تغییر جهت داده و میدان محرک خود را تقویت می‌کنند.



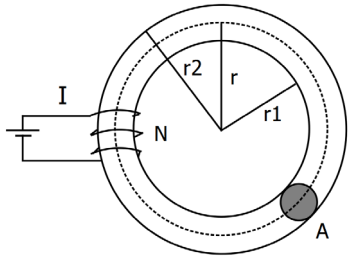
هنگامی‌که که تمام این دوقطبی‌ها هم‌جهت شوند میدان مغناطیسی دیگر با همان شیب سابق افزایش نمی‌یابد و می‌گوییم ماده فرومغناطیسی اشباع شده است منحنی اشباع یک ماده مغناطیسی در شکل (۴) نشان داده شده است. از آنجا به بعد برای افزایش شار مغناطیسی دیگر روی هسته نمی‌توان حساب کرد باید جریان سیم‌پیچ را افزایش داد. در زمان اشباع شارهای اضافی تولیدی از مسیرهایی غیر از هسته مغناطیسی جاری می‌شوند یعنی در زمان اشباع ماده مغناطیسی شبیه ماده غیر مغناطیسی عمل می‌کند.



نمودار شار مغناطیسی برحسب جریان برای یک هسته فرومغناطیسی که غیرخطی است

مدارهای مغناطیسی و مفهوم رلوکتانس:

همانند تعریف مقاومت الکتریکی، به مقدار مقاومتی که مواد فرومغناطیس در برابر عبور شار از خود نشان می‌دهند را مقاومت مغناطیسی یا *رلوکتانس* گفته می‌شود و با $\mathcal{R}$ نشان داده خواهد شد. شکل زیر یک سیستم مغناطیسی حلقوی با یک سیم‌پیچ را نشان می‌دهد. مقدار مقاومت مغناطیسی برای این سیستم محاسبه خواهد شد و یک رابطه کلی برای آن بدست خواهد آمد.



شعاع متوسط $r = \frac{r_1 + r_2}{2}$

$\oint H\,dl = NI$ اما با فرض کم بودن ضخامت هسته H

ثابت است و داریم $NI = HL$

طول هسته برابر با محیط متوسط حلقه است $L = 2\pi r$

$$\varphi = \oint B\,dA = BA \rightarrow B = \frac{\varphi}{A}$$

$$B = \mu H \rightarrow H = \frac{B}{\mu} \rightarrow NI = \frac{B}{\mu} L$$

$$NI = \varphi \frac{L}{\mu A} = \varphi \mathcal{R} \longrightarrow \mathcal{R} = \frac{L}{\mu A}$$

$\mathcal{R}$ یا رلوکتانس را مقاومت مغناطیسی گویند که به طول، جنس (که ضریب نفوذپذیری **μ** متفاوت را نتیجه می‌دهد) و سطح مقطع بستگی دارد. نکته مهم این است که این رابطه فقط زمانی معتبر است و می‌توان از آن استفاده کرد که **μ** ثابت باشد یعنی سیستم خطی باشد.

دوگان بین کمیت‌های الکتریکی و مغناطیسی و مدار معادل الکتریکی یک سیستم مغناطیسی

سیستم‌های مغناطیسی معمولاً شامل سیم‌پیچ حامل جریان و هسته فرومغناطیس هستند. اگر رفتار این سیستم‌ها خطی فرض شود، یعنی به اشباع نروند، می‌توان آنها را با استفاده از مدار معادل الکتریکی مدلسازی و تحلیل کرد و کمیت‌های مغناطیسی مانند شدت میدان مغناطیسی، شار و .... در آنها قابل محاسبه خواهد بود. مدارهای الکتریکی دارای سه جز اصلی منبع ولتاژ مقاومت و جریان عبوری هستند. علت این جایگزینی تشابه روابط الکتریکی و مغناطیسی به صورت زیر است:

$$R = \frac{\rho L}{A} \rightarrow V = IR$$

$$\mathcal{R} = \frac{L}{\mu A} \rightarrow MMF = NI = \varphi \mathcal{R}$$

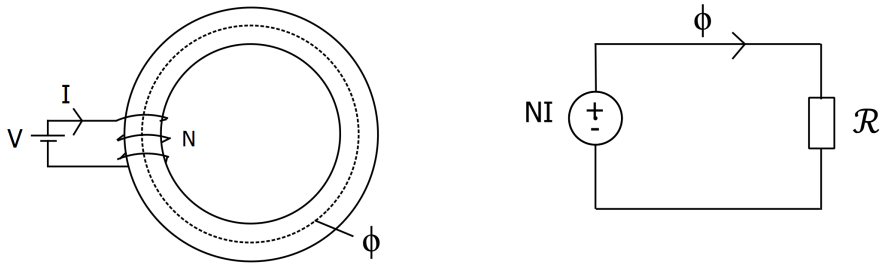
بنابراین MMF معادل ولتاژ، شار معادل جریان و رلوکتانس معادل مقاومت است.

$$MMF = NI \equiv V$$

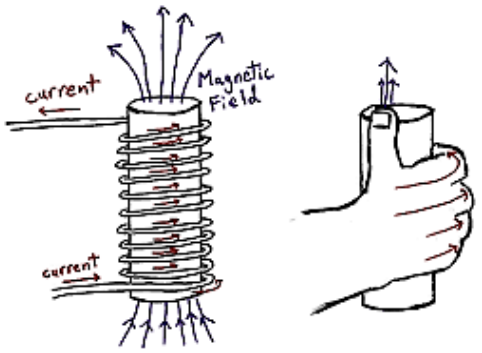
$$\varphi \equiv I$$

$$\mathcal{R} \equiv R$$

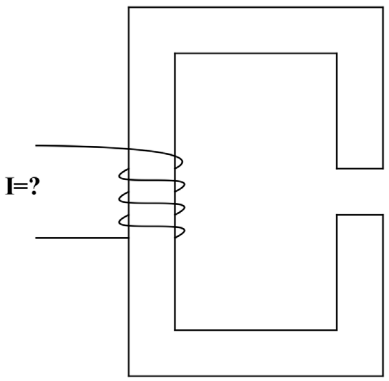
به مدار الکتریکی حاصل، مدار مغناطیسی می‌گویند. تحلیل یک مدار الکتریکی بسیار آسان‌تر از یک ساختار مغناطیسی است. برای ساخت مدار مغناطیسی، رلوکتانس های مسیر شار را با مقاومت الکتریکی، شار مغناطیسی را با جریان الکتریکی و نیروی محرکه مغناطیسی را با منبع ولتاژ مدل می‌کنند. با این مدلسازی می‌توان روابط مغناطیسی را با روابط مداری KVL و KCL جایگزین کرد. در شکل زیر این مدار معادل نشان داده شده است.



نکته: لازم به ذکر است که جهت شار و در واقع پلاریته نیرو محرکه مغناطیسی NI با استفاده از قانون دست راست بدست می‌آید. به این صورت که اگر انگشتان دست راست در جهت جریان سیم‌پیچ روی هسته مغناطیسی باشند انگشت شست پلاریته مثبت را نشان می‌دهد. شکل زیر قانون دست راست را به تصویر شده است.

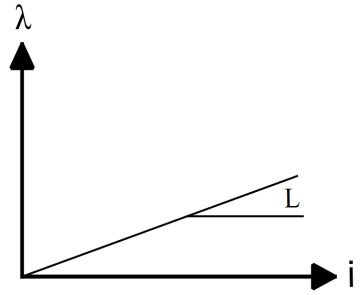


مثال ۱) در سیستم مغناطیسی زیر تعداد دور سیم‌پیچ ۱۰۰۰ دور، طول متوسط هسته ۵۰۰ میلی‌متر، طول فاصله هوایی ۱۰ میلی‌متر، ضریب نفوذپذیری نسبی هسته ۳۰۰ و سطح مقطع ۰.۰۰۰۱ میلی‌متر مربع است. اگر شار گذرنده از فاصله هوایی ۰.۱ میلی وبر باشد جریان سیم‌پیچ را بدست آورید.



ضریب خود القا (اندوکتانس) خودی و متقابل:

اندوکتانس نسبت شار به جریان را در یک سیستم خطی نشان می‌دهد. اگر سیم‌پیچ N دور داشته باشد چون هر دور آن شار تولید می‌کند شار برآید از ضرب N در شار هر دور بدست می‌آید که شار پیوندی نام دارد و با λ نشان داده می‌شود. اندوکتانس نسبت شار پیوندی به جریان تعریف می‌شود که شیب منحنی را نیز نشان می‌دهد.

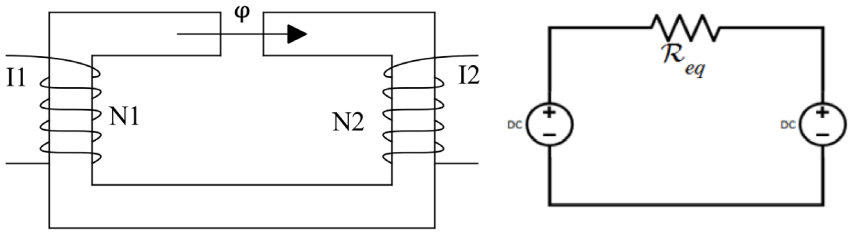


$$L \equiv \frac{\lambda}{I}$$

$$L = \frac{N\varphi}{I} \times \frac{N}{N} = \frac{N^2\varphi}{NI} \xrightarrow{NI = \mathcal{R}_{eq}\varphi} L = \frac{N^2}{\mathcal{R}}$$

- **اندوکتانس متقابل:**

اگر در سیستم مغناطیسی بیش از یک سیم‌پیچ داشته باشیم و شار تولیدی توسط یک سیم‌پیچ از سیم‌پیچ دیگر عبور کند، بین این دو سیم‌پیچ القای متقابل بوجود خواهد آمد که ناشی از تأثیر سیم‌پیچ دیگر در ایجاد شار پیوندی است و توسط اندوکتانس متقابل بین دو سیم‌پیچ بیان می‌شود. در شکل زیر یک سیستم مغناطیسی ساده با دو سیم‌پیچ و یک فاصله هوایی به طول g نشان داده شده است. با نوشتن شار تولیدی توسط هر سیم‌پیچ مشاهده می‌شود که ضریبی از جریان همان سیم‌پیچ (که اندوکتانس خودی نام دارد) و ضریبی از جریان سیم‌پیچ دیگر (که اندوکتانس متقابل نام دارد) در ایجاد شار نقش دارد. روابط مربوط به این ضرایب به صورت زیر است.



$$MMF = N_1 I_1 + N_2 I_2 = \mathcal{R}_{eq}\varphi = \frac{g}{\mu_0 A}\varphi \longrightarrow \varphi = (N_1 I_1 + N_2 I_2)\frac{g}{\mu_0 A}$$

شار پیوندی سیم‌پیچ اول $$\lambda_1 = N_1\varphi = (N_1^2 \frac{\mu_0 A}{g})I_1 + (N_1 N_2 \frac{\mu_0 A}{g})I_2 \rightarrow \lambda_1 = L_{11}I_1 + L_{12}I_2$$

شار پیوندی سیم‌پیچ دوم $$\lambda_2 = N_2\varphi = (N_2^2 \frac{\mu_0 A}{g})I_2 + (N_1 N_2 \frac{\mu_0 A}{g})I_1 \rightarrow \lambda_2 = L_{22}I_2 + L_{21}I_1$$

بنابراین درنهایت فرم ماتریسی اندوکتانس به صورت زیر خواهد شد.

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

- **عملکرد ژنراتوری: قانون فارادی و ولتاژ القایی ترانسفورمری و رلوکتانسی**

قانون القای فارادی بیان می‌کند که اگر شار متغیر با زمان داشته باشیم مشتق آن ولتاژ القایی را نتیجه می‌دهد.

$$e = -\frac{d(N\varphi)}{dt} = -\frac{d\lambda}{dt}$$

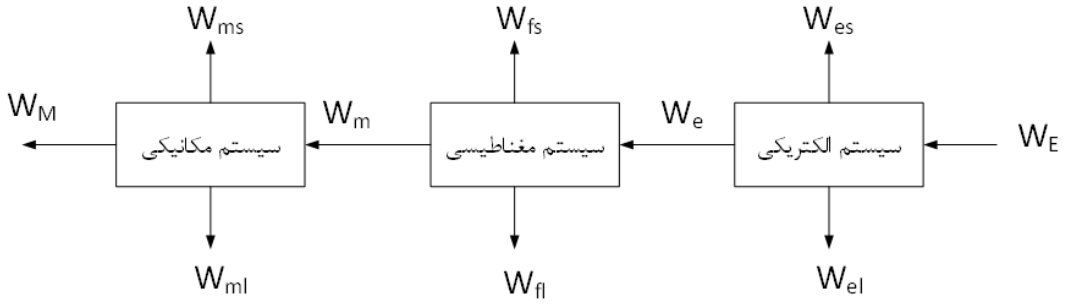
حال که مفهوم اندوکتانس بیان شد و با توجه به اینکه شار پیوندی حاصل‌ضرب جریان در اندوکتانس است، طبق رابطه زیر برای ولتاژ القایی دو جمله بوجود می‌آید که جمله اول ناشی از تغییرات جریان است و ولتاژ القایی ترانسفورمری نام دارد و جمله دوم ناشی از تغییرات اندوکتانس است که ولتاژ القایی رلوکتانسی نام دارد.

$$e = -\frac{d(N\varphi)}{dt} = -\frac{d\lambda}{dt} \xrightarrow{\lambda=Li} e = -\frac{d(Li)}{dt} = -(L\frac{di}{dt} + i\frac{dL}{dt})$$

به بیان دیگر برای تولید ولتاژ یا اندوکتانس باید متغیر باشد یا جریان

- **عملکرد موتوری: تبدیل انرژی و نیروی مکانیکی**

هر سیستم الکترومکانیکی مانند یک موتور شامل سیستم الکتریکی و مکانیکی است. ارتباط بین این دو سیستم از طریق میدان مغناطیسی صورت می‌گیرد. در دیاگرام زیر طبق اصل بقای انرژی همه انرژی‌ها در یک سیستم الکترومکانیکی نشان داده شده است.



WE انرژی الکتریکی ورودی

Wes انرژی ذخیره شده در سیستم الکتریکی (مانند انرژی دخیره شده در سلفها و خازنها)

Wel انرژی الکتریکی تلف شده (مانند تلفات حرارتی در مقاومت سیم پیچ ها)

We انرژی الکتریکی خالص ورودی به سیستم مغناطیسی

Wfs انرژی ذخیره شده در سیستم مغناطیسی

Wfl انرژی تلف شده در سیستم مغناطیسی (هیسترزیس و فوکو)

Wm انرژی مکانیکی ورودی به سیستم مکانیکی

Wms انرژی ذخیره شده در سیستم مکانیکی (مانند جابجایی جرم ها و فنرها)

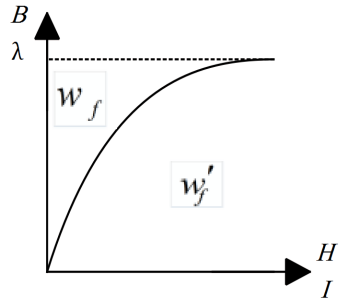
Wml انرژی مکانیکی تلف شده (مانند اصطکاک)

WM انرژی مکانیکی خروجی از سیستم مکانیکی

انرژی مغناطیسی

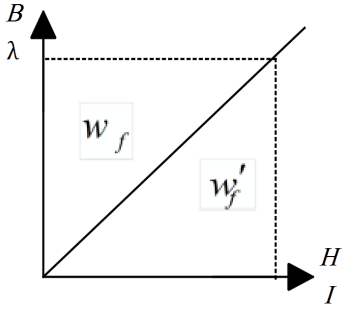
انرژی مغناطیسی سطح محصور بین منحنی مغناطیس شوندگی و محور عمودی است. انرژی برای دو حالت سیستم خطی و غیرخطی به صورت زیر بیان می‌شود.

۱- سیستم های غیرخطی:



$$W_f = \int I\,d\lambda = V\int H\,dB = \int NI\,d\varphi \xrightarrow{MMF=NI=\mathcal{F}} \int \mathcal{F}\,d\varphi$$
$$W_f' = \int \lambda\,dI = V\int B\,dH = \int \varphi\,d\mathcal{F}$$

۲- سیستم های خطی:



$$W_f = W_f' = \frac{1}{2}\lambda I = \frac{1}{2}LI^2$$
$$= \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu} = \frac{1}{2}BH$$
$$= \frac{1}{2}\varphi\mathcal{F} \xrightarrow{\mathcal{F}=\mathcal{R}\varphi} = \frac{1}{2}\mathcal{R}\varphi^2$$

نیروی مکانیکی

با استفاده از روابط زیر نیروی یک سیستم مغناطیسی بدست می آید

$$w_e = w_f + w_m \Rightarrow dw_e = dw_f + dw_m$$

$$dw_m = Fdx$$
$$dw_e = p.dt = ei.dt = id\lambda$$
$$dw_f = dw_e - dw_m = id\lambda - Fdx$$

با توجه به معادلات دیفرانسیل و قاعده مشتق زنجیره‌ای داریم

$$dw_f = \frac{\partial w_f}{\partial x}dx + \frac{\partial w_f}{\partial \lambda}d\lambda \equiv\equiv id\lambda - Fdx$$

$$F = -\frac{\partial w_f}{\partial x}$$
$$=> \qquad I = \frac{\partial w_f}{\partial \lambda}$$

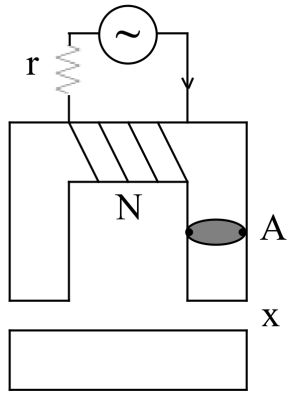
در حرکت دورانی به جای نیرو گشتاور خواهیم داشت که از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$x \to \theta,$$
$$F \to \mathrm{T}$$
$$\mathrm{T} = -\frac{\partial w_f}{\partial \theta}$$

نکته) اگر سیستم خطی باشد

$$F = \frac{\partial w_f}{\partial x} = \frac{1}{2}I^2\frac{dL(x)}{dx} = -\frac{1}{2}\varphi^2\frac{d\mathcal{R}(x)}{dx}$$

مثال۲) اگر جرم قسمت متحرک ۹۶ کیلو گرم باشد چه ولتاژی برای بالا کشیدن آن لازم است. مقاومت سیم‌پیچ ۲ اهم است و ضریب نفوذپذیری هسته بینهایت در نظر بگیرید.

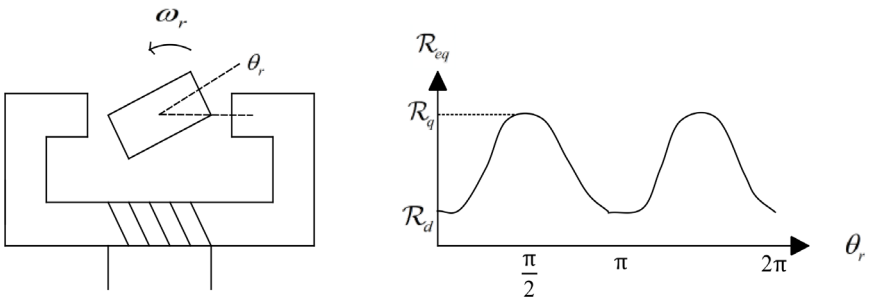


N=100 g=10 m/s^2 A=40 cm^2 x=1 mm π=3

جواب: ۱۷.۴ ولت

موتور یک تحریکه (موتور رلوکتانسی)

شکل زیر یک موتور رلوکتانسی را نشان می‌دهد. علت نام‌گذاری آن این است که رلوکتانس با چرخش تغییر می‌کند. این موتور دارای ۲ قسمت ساکن (استاتور) و متحرک (روتور) است. با حرکت روتور رلوکتانس تغییر می‌کند. ملاحظه می‌شود رلوکتانس به زاویه نسبی بین روتور و استاتور بستگی دارد. مقدار رلوکتانس در زاویه $\theta r=0, \pi, 2\pi$ مینیمم و در $\theta r=\pi/2, 3\pi/2$ ماکزیمم است.



ماشین یک تحریکه (رلوکتانسی) و نمودار رلوکتانس آن

رلوکتانس در حالت افقی کمترین مقدار است چون فاصله هوایی مینیمم است $\mathcal{R}_{eq} = \mathcal{R}_{\min} = \mathcal{R}_d$

رلوکتانس در حالت عمودی بیشترین مقدار است چون فاصله هوایی ماکزیمم است $\mathcal{R}_{eq} = \mathcal{R}_{\max} = \mathcal{R}_q$

بنابراین رابطه رلوکتانس با توجه به تغییر موقعیت روتور به صورت متناوب تغییر کرده و چون در یک دور کامل دوبار مینیمم و ماکزیمم میشود رابطه نهایی رلوکتانس برحسب زاویه به صورت زیر است.

$$\mathcal{R} = \frac{1}{2}(\mathcal{R}_d + \mathcal{R}_q) - \frac{1}{2}(\mathcal{R}_d - \mathcal{R}_q)\cos 2\theta r$$

اگر روتور با سرعت زاویه ای ω_r بچرخد و سیم‌پیچ با ولتاژ سینوسی با دامنه V و فرکانس ω تغذیه شود، با صرف نظر از مقاومت سیم‌پیچ $V_t=e$ بنابراین شار طبق رابطه زیر سینوسی است.

$$V_t = V \sin \omega t \xrightarrow{R=0} V_t = e = \frac{d\varphi}{dt} \rightarrow \varphi = \int e dt = \varphi_{\max} \cos \omega t$$

اگر روتور در لحظه صفر دارای زاویه δ باشد رابطه زاویه به صورت زیر خواهد بود و گشتاور نیز بدست خواهد آمد:

$$\omega_r = \frac{d\theta}{dt} \rightarrow \theta_r = \omega_r t + \delta_\circ$$

$$\mathrm{T} = -\frac{1}{2}\varphi^2 \frac{d\mathcal{R}}{d\theta}$$

$$\mathrm{T} = -\frac{1}{2}\varphi^2{}_{\max} \cos^2 \omega t . [\frac{1}{2}(\mathcal{R}_q - \mathcal{R}_d).2 \sin 2\theta r] = -\frac{1}{2}\varphi^2{}_{\max} \cos^2 \omega t . (\mathcal{R}_q - \mathcal{R}_d) \sin 2(\omega_r t + \delta_\circ)$$

$$\mathrm{T} = -\frac{1}{4}\varphi^2{}_{\max} (\mathcal{R}_q - \mathcal{R}_d)[\sin(2\omega_r t - 2\delta_\circ) + \frac{1}{2}\sin(2\omega_r t + 2\omega t - 2\delta_\circ) + \frac{1}{2}\sin(2\omega_r t - 2\omega t - 2\delta_\circ)]$$

از آنجاکه مقدار متوسط توابع سینوسی در دوره تناوب آن صفر می‌باشد، گشتاور متوسط نیز صفر می‌شود. به این معنی است که موتور گردشی ندارد و این خلاف خواست ماست. بنابراین باید بررسی کرد که در چه حالتی گشتاور صفر نمی‌شود تا موتور گردش داشته باشد. برای اینکه یک جمله سینوسی دارای مقدار متوسط غیر صفر باشد باید ضرائب t را صفر باشد؛

$$\mathrm{T_{av}}=0 \quad \Rightarrow \quad \text{ضرایب زمان در کمان جملات سینوسی} = 0 \quad \Rightarrow \quad \begin{pmatrix} 1) & 2\omega_r t = 0 \rightarrow \omega_r = 0 \\ 2) & 2\omega_r t + 2\omega t = 0 \rightarrow \omega_r = -\omega \\ 3) & 2\omega_r t - 2\omega t = 0 \rightarrow \omega_r = \omega \end{pmatrix}$$

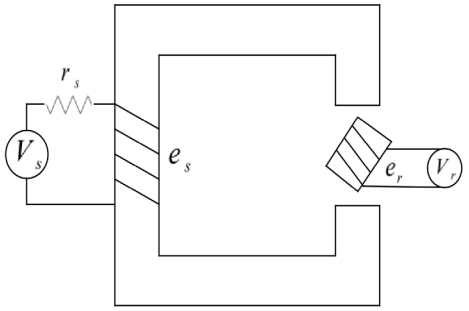
در **حالت اول** روتور سرعت زاویه ای ندارد و نمی‌چرخد که این خلاف خواست ماست.

در **حالت دوم و سوم** سرعت زاویه ای روتور با فرکانس زاویه ای منبع برابر می‌شود(به اصطلاح همزمان می‌شوند به همین دلیل این‌گونه ماشین‌ها را سنکرون (همزمان) می‌نامند) که در این صورت گشتاور متوسط غیر صفر خواهیم داشت و قسمت متحرک گردش دارد.

سوال: مزایا و معایب این موتور را توضیح دهید.

ماشین مغناطیسی با دو تحریک

ملاحظه شد که ماشین یک تحریکه تنها در سرعت سنکرون گشتاور متوسط غیر صفر داشت. برای اینکه در سایر سرعت ها گشتاور غیر صفر وجود داشته باشد باید بر روی روتور نیز سیم‌پیچ و در واقع تحریک وجود داشته باشد. بنابراین ماشین دو تحریکه شبیه شکل زیر خواهیم داشت.



ماشین ۲ تحریکه

همانطور که قبلا اشاره شد اگر سیستم مغناطیسی دو سیم‌پیچ حامل جریان داشته باشد با فرض خطی بودن آن علاوه بر اندوکتانس خودی، اندوکتانس متقابل نیز وجود خواهد داشت.

$$\lambda_s = L_s i_s + L_{sr} i_r$$
$$\lambda_r = L_r i_r + L_{sr} i_s$$

که i_s جریان استاتور، i_r جریان روتور، L_s اندوکتانس خودی استاتور، L_r اندوکتانس خودی روتور و L_{sr} اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ روتور و استاتور است.

انرژی هر سیم‌پیچ به صورت زیر بدست می‌آید و درنهایت انرژی کل سیستم مجموع آنها خواهد شد.

$$w_s = \frac{1}{2}\lambda_s i_s = \frac{1}{2}L_s {i_s}^2 + \frac{1}{2}L_{sr} i_r i_s$$
$$w_r = \frac{1}{2}\lambda_r i_r = \frac{1}{2}L_r {i_r}^2 + \frac{1}{2}L_{sr} i_s i_r$$
$$w_{tot} = w_s + w_r = \frac{1}{2}L_s {i_s}^2 + L_{sr} i_r i_s + \frac{1}{2}L_r {i_r}^2$$

گشتاور ایجاد شده شبیه آنچه که در قسمت قبل گفته شد با مشتق‌گیری از انرژی مغناطیسی ذخیره‌شده بدست می‌آید.

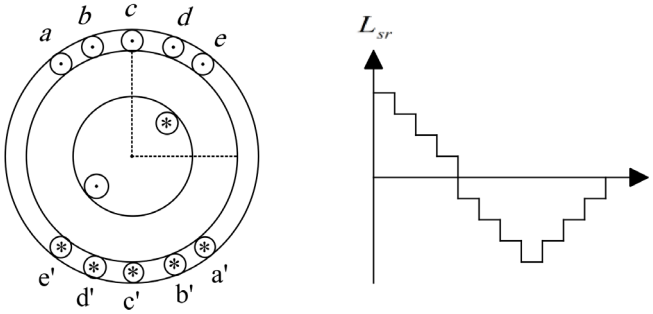
$$\mathrm{T} = \frac{dw}{d\beta} = \frac{1}{2}{i_s}^2 \frac{dL_s}{d\beta} + \frac{1}{2}{i_r}^2 \frac{dL_r}{d\beta} + i_s i_r \frac{dL_{sr}}{d\beta}$$

دو جمله اول اگر ماشین به صورت دوار و استوانه ای باشد برابر با صفر میشوند. چرا؟

برای اینکه اندوکتانس متقابل L_{sr} بصورت سینوسی تابعی از زاویه مکانی باشد (β) باید سیم‌پیچی‌های استاتور بصورت توزیع‌شده انجام شود و برای روتور هم همین کار را انجام می‌دهیم. به این صورت که سیم‌پیچ cc' باید دارای بیشترین دور مثلاً N باشد. سیم‌پیچ dd' و bb' دارای زاویه ۱۵ درجه نسبت به cc' هستند پس تعداد دور آنها Ncos(15) خواهد بود. سیم‌پیچ aa' و ee' دارای زاویه ۳۰ درجه نسبت به cc' هستند پس تعداد دور آنها Ncos(30) خواهد بود.

بنابراین اندوکتانس متقابل به شکل موج سینوسی نزدیک می‌شود و می‌توان به صورت زیر آن را نوشت.

$$L_{sr} = \overline{L_{sr}} \cos\beta$$



اگر جریان سیم‌پیچ استاتور و روتور ac باشد داریم:

$$L_{sr} = \hat{L}_{sr}\cos(\beta)$$
$$\beta = \omega_m t + \beta_\circ$$
$$i_r = I_r\cos(\omega_r + \alpha_r)$$
$$i_s = I_s\cos(\omega_s t)$$

که α_r فاز جریان روتور است که نسبت به فاز استاتور که صفر در نظر گرفته‌شده لحاظ می‌شود. رابطه گشتاور به صورت زیر خواهد بود:

$$\mathrm{T} = i_r i_s \frac{dL_{sr}}{d\beta} = -I_r I_s L_{sr}[\cos\omega_s \times \cos(\omega_r t + \alpha_r) \times \sin(\omega_m t + \beta_\circ)]$$

$$\begin{aligned}\mathrm{T} = -\frac{1}{4} I_r I_s L_{sr}[&\sin((\omega_m + \omega_s + \omega_r)t + \alpha + \beta_\circ) \\ &+ \sin((\omega_m - (\omega_s + \omega_r))t - \alpha + \beta_\circ) \\ &+ \sin((\omega_m + (\omega_s - \omega_r))t - \alpha + \beta_\circ) \\ &+ \sin((\omega_m - (\omega_s - \omega_r))t + \alpha + \beta_\circ)]\end{aligned}$$

شرط وجود گشتاور غیر صفر این است که ضریب t در کمان یکی از جملات سینوسی‌های بالا صفر باشد که ۴ حالت پیش می‌آید.

۱- حالت اول: $\omega_r = \omega_m = \omega_s = 0$ روتور و استاتور DC

$\omega_m = 0$ یعنی در این حالت روتور چرخشی نخواهد داشت و فقط به اندازه اینکه $\beta_\circ$ برابر صفر شود خواهد چرخید. اما برای داشتن حرکت دورانی مداوم می‌توان روتور را بگونه ای طراحی کرد که علیرغم چرخش دارای میدان ثابت باشد. ماشین بدست آمده از این روش ماشین DC خواهد بود.

۲- حالت دوم: $\omega_m = \omega_s - \omega_r$ سرعت چرخشی اختلاف استاتور و روتور باشد

این ماشین یک ماشین جریان متناوب خواهد بود. از آنجا که سرعت چرخش روتور با فرکانس زاویه ای هیچکدام از منابع برابر نیست ماشین بدست آمده ماشین آسنکرون می‌باشد.

۳- حالت سوم $\omega_r = 0, \omega_s \neq 0 \Rightarrow \omega_m = \omega_s$

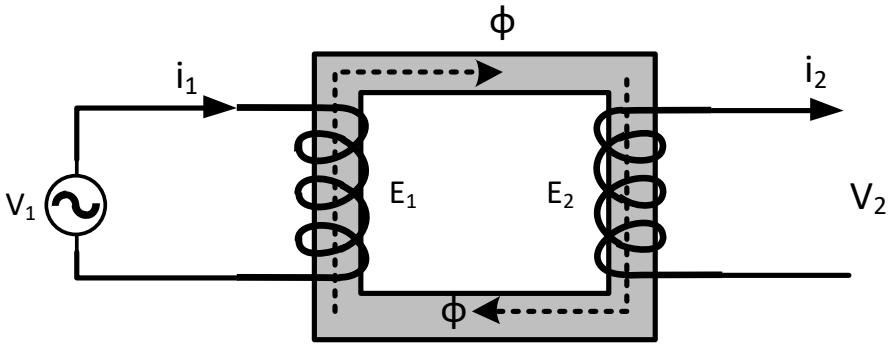
یعنی روتور با منبع DC تغذیه شود و سرعت چرخش روتور دقیقاً برابر با فرکانس زاویه منبع استاتور باشد که ماشین سنکرون را نتیجه می‌دهد.

۴- حالت چهارم $\omega_m = 0, \omega_r = \omega_s$

چرخش مداوم وجود و فقط به اندازه زاویه اولیه می‌چرخد.(کاربرد گسترده ندارد)

ترانسفورماتور

ترانسفورماتور (به اختصار ترانس) یکی از اجرای اصلی در سیستم های قدرت و صنعت است و در واقع یک سیستم الکترومغناطیسی است که در آن دو سیم‌پیچ به دور یک هسته فرومغناطیس پیچیده شده‌اند. اگر یک سیم‌پیچ به منبع جریان متناوب وصل شود در آن یک شار متغیر با زمان تولید می‌شود. این شار از مسیر هسته که ماده فرومغناطیس است هدایت می‌شود و از سیم‌پیچ دیگر نیز عبور می‌کند. شار گذرنده از سیم‌پیچ دوم طبق قانون فارادی $e = N \frac{d\Phi}{dt}$ یک ولتاژ در آن سیم‌پیچ‌ها متناسب با تعداد دور آن القا می‌کند. در واقع ترانسفورماتور انرژی الکتریکی دریافتی از سیم‌پیچ اولیه را به انرژی مغناطیسی تبدیل می‌کند، سپس این انرژی را مجدداً توسط سیم‌پیچ ثانویه به الکتریکی تبدیل می‌کند. در ادامه خواهیم دید که ولتاژ سیم‌پیچ‌ها با تعداد دور آنها متناسب است. به سیم‌پیچی که ولتاژ بالاتر دارد فشار قوی و به سیم‌پیچ دیگر فشار ضعیف گویند. شکل زیر یک ترانس با دو سیم‌پیچ و هسته آن را نشان می‌دهد.



هسته و سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور

ولتاژ القایی در سیم‌پیچ اول:

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \Rightarrow \quad \frac{e_2}{N_2} = \frac{d\Phi}{d\ t}$$

ولتاژ القایی در سیم‌پیچ دوم:

$$e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad \Rightarrow \quad \frac{e_2}{N_2} = \frac{d\Phi}{dt}$$

که می‌توان گفت:

$$\frac{e_2}{N_2} = \frac{e_1}{N_1} \Rightarrow \frac{e_2}{e_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

و اگر توان ورودی و خروجی با هم برابر باشند یعنی تلفات نداشته باشیم برای جریان‌ها داریم:

$$P_1 = P_2 \rightarrow e_2 i_2 = e_1 i_1 \rightarrow \frac{e_1}{e_2} = \frac{i_2}{i_{i1}} \rightarrow \frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

بنابراین طبق روابط بالا ولتاژ اولیه و ثانویه با نسبت دور سیم‌پیچ‌ها ($\frac{e_2}{e_1} = \frac{N_2}{N_1}$) و جریان اولیه و ثانویه با عکس نسبت دور سیم‌پیچ‌ها ($\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1}$) تغییر می‌کند.

اجزای اصلی ترانسفورماتور

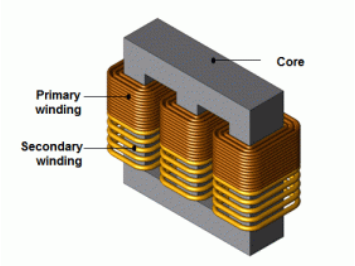
به طور کلی ترانسفورماتور از دو قسمت تشکیل شده است. ۱- هسته ۲- سیم پیچی

۱- هسته

با توجه به مقدار توان انتقالی، فرکانس و ولتاژ مورد استفاده، هسته‌ها در أنواع مختلفی از نظر جنس، شکل و ابعاد ساخته می‌شوند. به عنوان مثال در فرکانس برق شهر از هسته های آهنی استفاده و در فرکانس های چند ده کیلو هرتز از هسته هایی از جنس فریت استفاده می گردد. هرچه ابعاد هسته بزرگتر باشد، ترانسفورماتور قابلیت انتقال توان الکتریکی بیشتری را دارا است. به همین دلیل است که ترانسفورماتور استفاده شده در یک شارژر موبایل ابعاد بسیار کوچک و در شبکه انتقال قدرت ابعاد بسیار غول پیکری دارد. البته ابعاد یک ترانسفورماتور به فرکانس کاری آن نیز بستگی دارد.

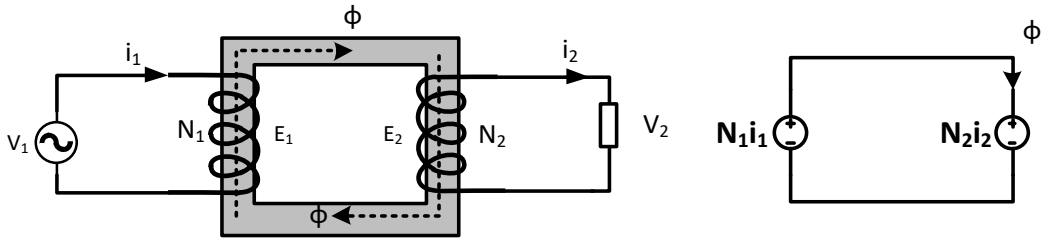
۲- سیم پیچ ترانسفورماتور

سیم پیچی ترانسفورماتورها در ساده ترین حالت به دو دسته تقسیم می شوند. به سیم پیچی که به ولتاژ ورودی متصل می شود اصطلاحاً «سیم پیچی اولیه» و به سیم پیچی که از آن ولتاژ مورد نظر (پس از عمل تبدیل ترانسفورماتور) به دست می آید «سیم پیچی ثانویه» گفته می شود. سیم پیچ ها بسته به نوع کاربرد ترانسفورماتور با توپولوژی های مختلفی بر روی هسته پیچیده می شوند. به عنوان مثال سیم پیچ ها می توانند بر روی ساق های جداگانه پیچیده شوند یا بر روی همدیگر و بر روی یک ساق باشند. سیم استفاده شده برای سیم پیچ از سیم های لاکی ۱۳هنا ستف بسیار کم گرفته تا کابل های ضخیم ولتاژ بالا می تواند باشد.



- **برابری آمپر دور در ترانس ایده‌آل دو سیم‌پیچه و چند سیم‌پیچه**

در ترانس ایده‌آل هسته دارای نفوذپذیری بی‌نهایت است، یعنی هیچ مقاومت مغناطیسی یا رلوکتانس آن صفر است. بنابراین طبق آنچه که در درس ماشین‌های الکتریکی ۱ برای مدار معادل گفته شد، مدار معادل مغناطیسی ترانس ایده‌آل به صورت زیر خواهد بود:



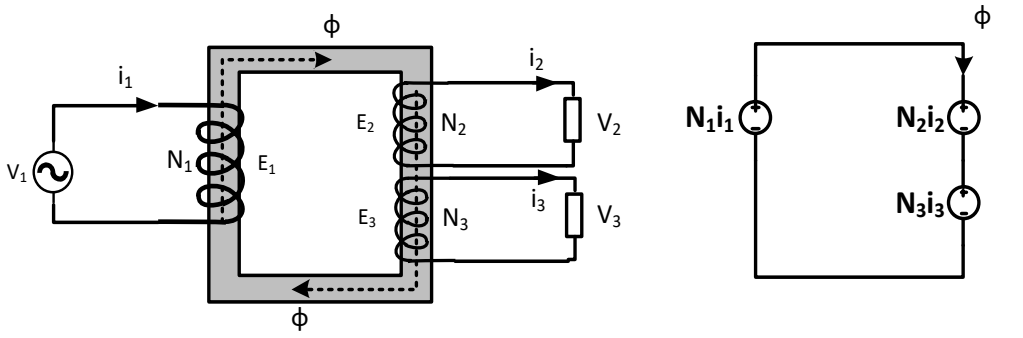
پلاریته منابع ولتاژ معادل در مدار مغناطیسی توسط قانون دست راست و جهت سیم‌پیچ مشخص می‌شود، که برای منبع N_1i_1 پلاریته مثبت رو به بالا است. پلاریته مثبت منبع N_2i_2 نیز رو به بالا بوده که این پدیده با استفاده از قانون لنز قابل بیان است. شار تولیدی توسط سیم‌پیچ دوم با عامل بوجود آورنده خود مخالفت می‌کند و خلاف جهت ϕ است یعنی پلاریته مثبت منبع N_2i_2 باید رو به بالا باشد.

طبق مدار معادل مغناطیسی و با استفاده از KVL نتیجه می‌شود:

$$N_1i_1 = N_2i_2$$

این رابطه برابر آمپر دور سیم‌پیچ‌ها در یک ترانس را نشان می‌دهد.

حال اگر در قسمت ثانویه ترانس، دو سیم‌پیچ وجود داشته باشد، به صورت مشابه قانون برابری آمپر دور به صورت زیر اثبات می‌شود:



برای ۲ سیم‌پیچ در ثانویه:

$$N_1i_1 = N_2i_2 + N_3i_3$$

برای n سیم‌پیچ در ثانویه:

$$N_1i_1 = N_2i_2 + N_3i_3 + \ldots + N_ni_n$$

با تقسیم رابطه بالا بر N_1 و مزدوج کردن عبارات:

$$i_1^* = \frac{N_2}{N_1}i_2^* + \frac{N_3}{N_1}i_3^* + \ldots + \frac{N_n}{N_1}i_n^*$$

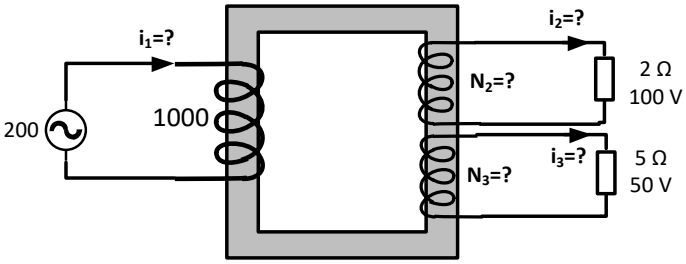
به جای نسبت تبدیل می‌توانیم نسبت ولتاژها را قرار دهیم و در V_1 ضرب کنیم:

$$i_1^* = \frac{V_2}{V_1}i_2^* + \frac{V_3}{V_1}i_3^* + \ldots + \frac{V_n}{V_1}i_n^* \Rightarrow [\times V_1] \Rightarrow V_1i_1^* = V_2i_2^* + V_3i_3^* + \ldots + V_ni_n^*$$

$$\Rightarrow S_1 = S_2 + S_3 + \ldots + S_n$$

رابطه آخر نشان می‌دهد در ترانس ایده‌آل، توان داده شده به ترانس برابر با مجموع توان همه سیم‌پیچ‌های دیگر است که به بار وصل شده‌اند.

مثال۳) یک ترانس مفروض است که ثانویه آن دارای دو سیم پیچ بوده و دو بار را در سطوح ولتاژ مختلف تغذیه می‌کند. اگر اولیه ترانس با تعداد دور ۱۰۰۰ به ولتاژ ۲۰۰ ولت متصل شود و لازم باشد بار اول که یک مقاومت ۲ اهمی است در ولتاژ ۱۰۰ ولت و بار دوم که یک مقاومت ۵ اهمی است در ولتاژ ۵۰ ولت تغذیه شود، تعداد دور هر سیم‌پیچ و جریان اولیه را بدست آورید؟

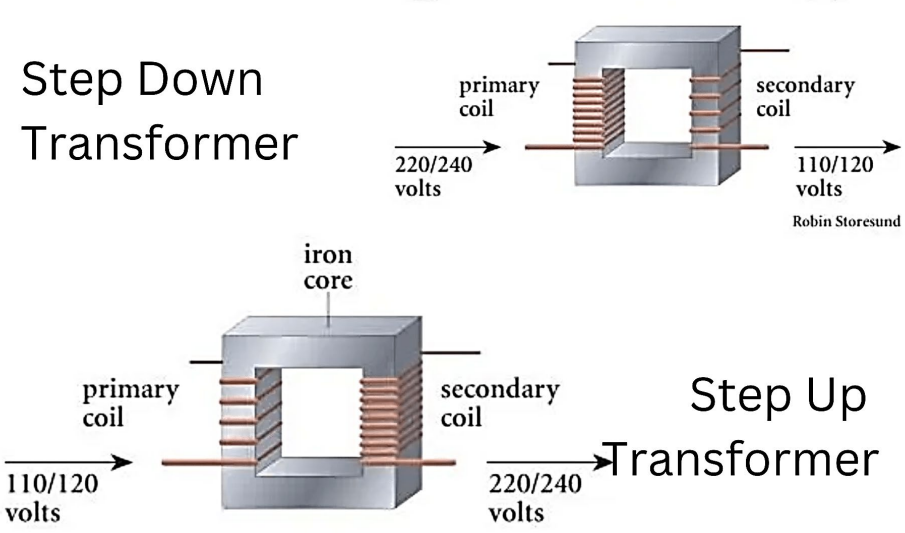


۲-۳- کاربردهای ترانسفورماتور

کاربرهای مختلفی برای ترانس وجود دارد که به چند نمونه از آنها اشاره می‌شود:

۱) کاهش یا افزایش سطح ولتاژ (با نسبت تعداد دور سیم‌پیچ‌ها)

با توجه به تعریف اصلی ترانسفورماتور میتوان کاهش یا افزایش سطح ولتاژ را اصلی ترین کاربرد آن دانست در شکل زیر به صورت کلی ترانس کاهنده و افزاینده نشان داده شده است.

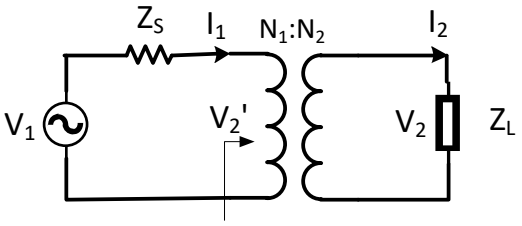


۲) تطبیق امپدانس جهت بدست آوردن بیشترین توان انتقالی

برای داشتن بیشترین توان انتقالی باید $Z_L = Z_S^*$ باشد بنابراین می‌توان درصورتی‌که امپدانس بار با امپدانس Z_s برابر نبود با تعیین تعداد دور اولیه و ثانویه Z_L' را طوری تعیین کرد که با Z_s برابر باشد.

$$Z_L' = \frac{V_2'}{I_1} \quad , \quad Z_L = \frac{V_2}{I_2} \quad , \quad V_2' = \frac{N_1}{N_2} V_2 \quad , \quad I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2$$

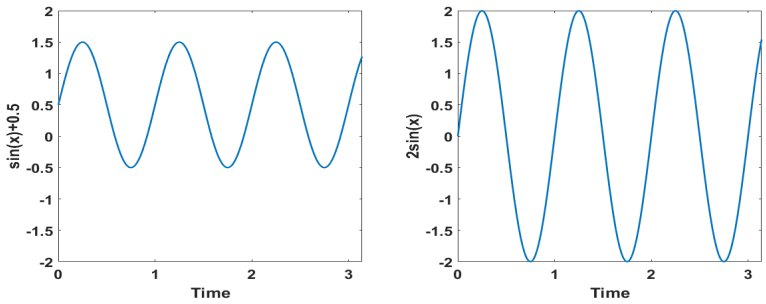
$$\Rightarrow Z_L' = \frac{V_2'}{I_1} = \frac{\frac{N_1}{N_2} V_2}{\frac{N_2}{N_1} I_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{V_2}{I_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_L$$



$Z_L' = (N_1/N_2)^2 * Z_L$

۳) تفکیک جریان DC

شار باید متغیر با زمان باشد تا با توجه به قانون فارادی ولتاژ القایی که مشتق شار می‌شود غیر صفر شود و در و در سیم‌پیچ دوم ولتاژ القا شود. حال اگر ولتاژ DC به اولیه ترانس اعمال شود شار ثابت است و مشتق آن صفر می‌شود و در سیم‌پیچ دوم هیچ ولتاژی القا نخواهد شد. اگر شکل موج شامل یک مقدار DC و یک مقدار متناوب باشد، قسمت DC در ثانویه به دلیل گفته شده حذف خواهد شد. یعنی اگر ولتاژ $V=\sin\omega t+C$ به اولیه اعمال شود عدد ثابت که مقدار DC را نشان می‌دهد در ثانویه وجود نخواهد داشت. ترانسفورماتور باعث می‌شود که عدد ثابت حذف شود و ولتاژ کاملاً AC شود. در شکل زیر مقدار DC برابر با ۰.۵ در نمودار سمت چپ وجود داشته اما نمودار سمت راست خروجی ترانس است که این مقدار حذف شده و نسبت تبدیل ۲ باعث شده که دامنه شکل موج سینوسی نیز ۲ برابر شود.



شکل سمت چپ ولتاژ اعمالی به اولیه شامل مقدار DC، شکل سمت راست مقدار DC حذف شده و دامنه ۲ برابر شده چون فرض شده نسبت تبدیل ۲ باشد

۴) ایزوله کردن مدارهای الکتریکی

ازآنجاکه بین سیم‌پیچ‌ها در ترانس هیچ‌گونه اتصال الکتریکی وجود ندارد برای ایزوله کردن دو قسمت مدار می‌توان از ترانس استفاده کرد.

أنواع ترانسفورماتور

ترانسفورماتورها را بر اساس مولفهٔ گوناگون می توان دسته بندی کرد. این مولفه ها شامل فرکانس، توان، جنس هسته، ساختار هسته و سیم پیچی، جنس عایق، کاربرد، تک فاز یا سه فاز، افزاینده یا کاهنده، سطح ولتاژ و نوع خنک کنندگی می شوند. أنواع ترانسفورماتور بر اساس این مولفه ها به این گونه است:

۱- ترانسفورماتور بر اساس فرکانس:

فرکانس یکی از عوامل مهم در تعیین جنس و ابعاد هسته است. از فرکانس برق شهر که ۵۰ یا ۶۰ هرتز است تا فرکانس های کلیدزنی که تا چندصد کیلو هرتز هم می رسد از ترانسفورماتورها با هسته های متفاوتی استفاده می شود. در فرکانس برق شهر از هسته های آهنی استفاده می شود. به این ترانسفورماتورها ترانسفورماتور فرکانس پایین (یا برق شهر یا شبکهٔ قدرت) گفته می شود. در فرکانس های بالاتر از پودر آهن و در فرکانس های سوئیچینگ از فریت استفاده می شود که به آن‌ها ترانسفورماتور فرکانس بالا یا ترانسفورماتور سوئیچینگ می‌گویند. در شکل زیر سمت راست ترانس فرکانس بالا و شکل سمت چپ ترانس فرکانس پایین نمایش داده شده است.

۲- ترانسفورماتور بر اساس توان

بسته به محل استفاده از ترانسفروماتور توان آن می تواند از چند میلی وات تا چند مگاوات باشد. در نتیجه ترانسفورماتور را براساس حداکثر توان عبوری از آن به ترانسفورماتورهای توان پایین، توان متوسط و توان بالا دسته‌بندی می‌کنند.

ترانسفورماتور توان پایین ترانسفورماتور توان متوسط ترانسفورماتور توان بالا

۳- ترانسفورماتور بر اساس عایق

در ترانسفورماتورهای ولتاژ بالا، سیم پیچی که ولتاژ بالایی دارد باید از نقاط دیگر ترانسفورماتور و حتی از نقاط دیگر خود آن سیم پیچ عایق شود. در ترانسفورماتورهای ولتاژ بالا از عایق هایی با جنس های متفاوت استفاده می شود. هوا، گازSF_6 ، روغن و أنواع عایق های جامد نمونه هایی از این عایق ها هستند.

ترانسفورماتور با عایق روغنی

ترانسفورماتور با عایق گاز SF_6

ترانسفورماتور با عایق هوا و مواد جامد

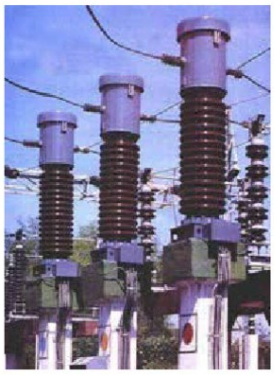
۴- ترانسفورماتورهای اندازه گیری

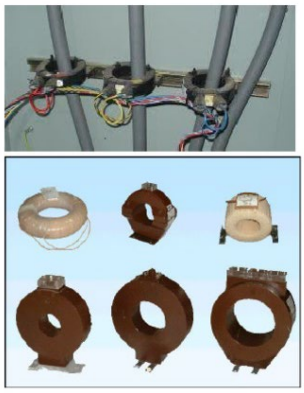
برای اندازه‌گیری کردن ولتاژ و جریان در سطوح بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این نوع مبدل با کاهش ولتاژ و جریان محدوده‌ای ایمن به‌وجود می‌آید. سپس به آسانی و به‌وسیله ابزارهای اندازه‌گیری رایج می‌توان سنجش را به‌عمل آورد. این گروه از ترانس‌ها خود به از دو زیر شاخه دیگر تشکیل می‌شوند:

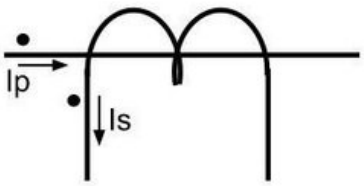
- ترانس جریان CT
- ترانس ولتاژ PT

ترانسفورماتور جریان (CT)

نوعی از ترانسفورماتور اندازه گیری و ابزار دقیق است که برای کاهش سطح جریان بالا به پایین برای اندازه گیری با آمپرمتر معمولی استفاده میشود. برای اندازه گیری جریان بالا در خطوط برق‌استفاده میشود. ترانسفورماتور جریان یک ترانسفورماتور افزایشی‌است که جریان را کاهش می‌دهد اما ولتاژ را افزایش می‌دهد و جریان را به چند آمپر کاهش می‌دهد. این جریان را می‌توان به راحتی با آمپرمتر معمولی ما اندازه‌گیری کرد. اما ولتاژ ثانویه بسیار زیاداست به همین دلیل ثانویه CT نباید باز باشد زمانی که جریانی از طریق اولیه آن جریان دارد.





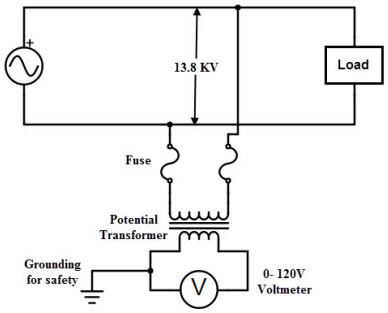


Symbol of CT

ترانسفورماتور ولتاژ (PT)

نوعی ترانسفورماتور اندازه گیری و ابزار دقیق است که ولتاژ بالا را برای اندازه‌گیری با یک ولت متر معمولی به سطح پایین کاهش می‌دهد. برای اندازه‌گیری ولتاژ بالا در خطوط برق‌استفاده‌می‌شود. یک PT یک ترانسفورماتور

کاهنده‌است که ولتاژ بالا را که در ۱۰۰ ثانیه kV است تا ۱۰۰-۲۲۰ ولت کاهش می‌دهد. این ولتاژ را می‌توان به راحتی با ولت متر معمولی اندازه‌گیری کرد. به دلیل ولتاژ ثانویه کم، پایانه‌های ثانویه PT را می‌توان باز گذاشت.



۳-۳- مدار معادل ترانسفورماتور واقعی

تراسفورماتوری که تا کنون بررسی شد ایده آل بوده یعنی ۴ تقریب زیر انجام شده است.

۱) از مقاومت سیم‌پیچ‌ها صرف‌نظر شود.

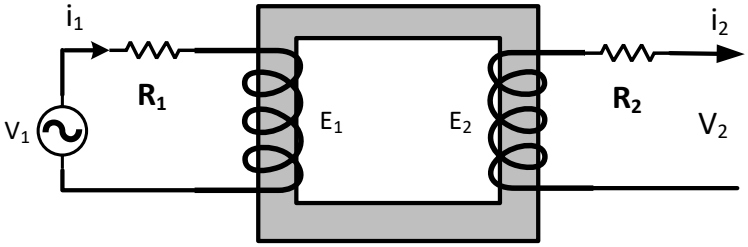
۲) تمام شار تولید شده در هسته جاری شود (شار پراکندگی نداشته باشیم).

۳) از تلفات هسته (فوکو و هیسترزیس) صرف‌نظر شود.

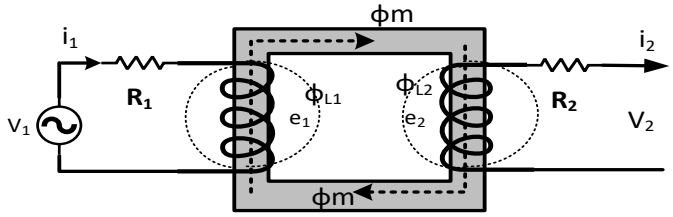
۴) ضریب نفوذپذیری هسته بی‌نهایت باشد ($\mu \leftarrow \infty$)

برای مدل‌سازی ترانس واقعی (غیر ایده آل) باید ۴ شرط زیر در نظر گرفته شوند، بنابراین خواهیم داشت:

۱) از مقاومت سیم‌پیچ‌ها صرف‌نظر نشود و آنها را به یک مقاومت فشرده مدل می‌کنیم. مقاومت R_1 برای سیم‌پیچ اولیه و R_2 برای سیم‌پیچ ثانویه.



۲) شار پراکندگی وجود داشته باشد. یعنی مقداری از شار تولیدی از طریق مسیر هوای عبور کند و وارد هسته نشود (ϕ_{L2}, ϕ_{L1}) و شار هسته که شار مغناطیس کنندگی نام دارد نیز با ϕ_m نشان داده می‌شود.



$$\lambda_1 = N_1\varphi_1 = N_1(\varphi_{\ell 1} + \varphi_m)$$
$$\lambda_2 = N_2\varphi_2 = N_2(-\varphi_{\ell 2} + \varphi_m)$$

منفی به دلیل جهت عکس شار پراکندگی سیم‌پیچ دوم

$$KVL: \qquad V_1 = R_1 i_1 + e_1 \Rightarrow$$

$$e_1 = N_1 \frac{d\varphi_1}{dt}, \qquad \varphi_1 = \varphi_m + \varphi_{\ell 1}$$

$$V_1 = R_1 i_1 + N_1 \frac{d\varphi_{\ell 1}}{dt} + N_1 \frac{d\varphi_m}{dt}$$

$$L_{\ell 1} = \frac{N_1 \varphi_{\ell 1}}{i_1} \Rightarrow$$

$$L_{\ell 1} i_1 = N_1 \varphi_{\ell 1} \Rightarrow$$

$$L_{\ell 1} \frac{di_1}{dt} = N_1 \frac{d\varphi_{\ell 1}}{dt}$$

رابطه اخیر نشان می‌دهد که می‌توان شار پراکندگی را با یک افت ولتاژ سلفی که مقدار آن برابر با مقدار اندوکتانس سلف در مشتق جریان است نشان داد.

مقدار جدید ولتاژ القایی که این بار تنها ناشی از شار مغناطیس کنندگی است به صورت زیر خواهد بود:

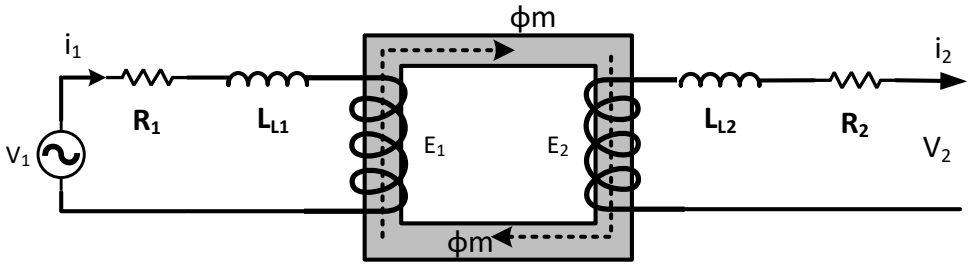
$$e_1' = N_1 \frac{d\varphi_m}{dt}$$

درنهایت رابطه KVL به صورت زیر خواهد بود که جمله وسط نشان‌دهنده افت ولتاژ سلفی است، بنابراین شار پراکندگی را با یک سلف معادل مدل‌سازی خواهیم کرد.

$$V_1 = R_1 i_1 + L_{\ell 1} \frac{di_1}{dt} + e_1'$$

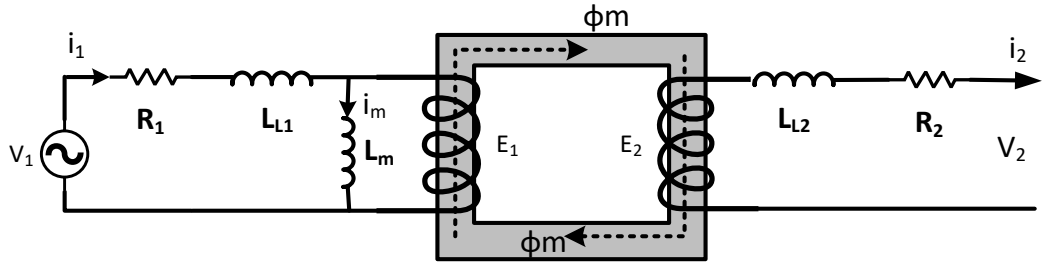
$$V_2 = R_2 i_2 - L_{\ell 2} \frac{di_2}{dt} + e_2'$$

مدل کامل‌تر با در نظر گرفتن سلف به‌عنوان شار پراکندگی:



۳) هسته از لحاظ مغناطیسی ایده آل نباشد

چون هسته ایده آل نیست برای ایجاد شار φ_m جریان i_m لازم است، یعنی اگر سیم‌پیچ دوم باز هم باشد این جریان در سمت اولیه باز وجود دارد که جریان مغناطیس کنندگی نام دارد. چون جریان i_m شار مغناطیس کنندگی را تولید می‌کند. این جریان در یک مدار سلفی برقرار است، بنابراین مدل واقعی آن به صورت زیر می‌باشد:



نکته: طبق روابط پایین می‌بینیم که هرچه تعداد دور سیم‌پیچ ترانس بیشتر باشد اندوکتانس مغناطیس شوندگی بالاتر و جریان مغناطیس کنندگی کمتر خواهد بود.

$$L_m = \frac{N_1^2}{\Re_m}$$

$$i_1 = \frac{\lambda_m}{L_m}$$

از این نکته این اصل مهم برداشت می‌شود که برای دو برابر کردن ولتاژ در ثانویه کافیست تعداد دور سیم‌پیچ ثانویه ۲ برابر اولیه باشد مثلاً ثانویه ۲ دور و اولیه ۱ دور. اما معمولاً نسبت تبدیل ۲ را با تعداد دورها بالا با نسبت ۲ مثلاً ۱۰۰۰ و ۵۰۰ ایجاد می‌کنند. چون با تعداد دور بالا طبق نکته گفته شده جریان مغناطیس کنندگی کم شده و تلفات در سلف L_m نخواهیم داشت.

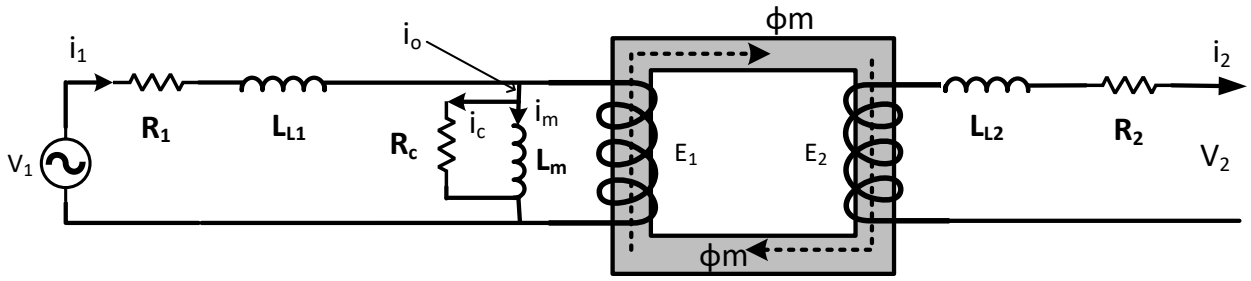
نکته: اندوکتانس L_m غیر خطی است. چرا؟

۴) در نظر گرفتن تلفات هسته:

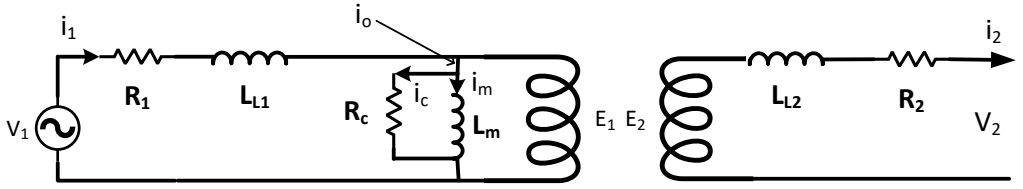
در یک ترانس واقعی تلفات هسته که شامل دو بخش فوکو و هیسترزیس می‌شود در حالت واقعی وجود دارد. یعنی اگر ترانس حتی بی‌بار و سیم‌پیچ دوم باز باشد باز هم یک مقدار جریان برای تأمین تلفات هسته از سمت اولیه کشیده می‌شود که این جریان نشان‌دهنده تلفات هسته است که با i_c نشان داده می‌شود. بنابراین با افزودن یک مقاومت موازی با اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی تلفات هسته مدل می‌شود که این مقاومت با R_c نشان داده می‌شود. بنابراین جریان حالت بی‌بار ترانس i_o مجموع جریان تلفات هسته و جریان مغناطیس کنندگی خواهد بود

$$i_o = i_c + i_m$$

مدل نهایی ترانس بعد از لحاظ کردن تلفات هسته:



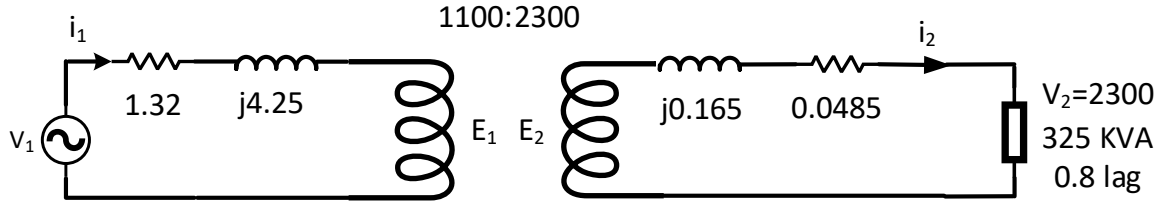
برای ساده‌تر شدن شکل هسته نمایش داده نمی‌شود و به جای آن تنها ۲ سیم‌پیچ رسم می‌شود:



مدار معادل ترانس واقعی

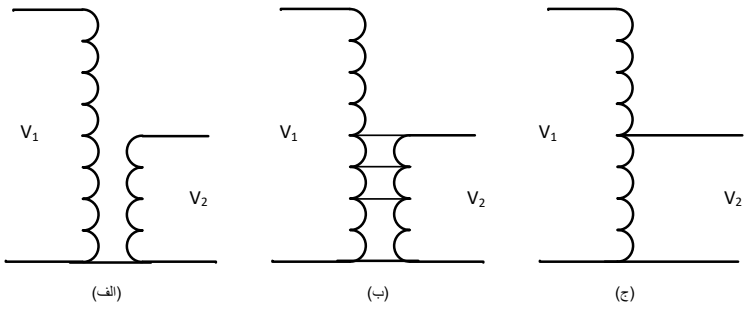
نکته: اگر منبع تغذیه سینوسی باشد می‌توان تمام محاسبات را به صورت فازوری نوشت. بنابراین به جای L، jX_L قرار می‌دهیم.

مثال۴) ترانسفورماتوری با مشخصات 325 KVA، 1100/2300 اگر بار نامی با ضریب توان ۰.۸ پس فاز را در ولتاژ ۲۳۰۰ تغذیه کند مقدار ولتاژ منبع چقدر است؟ (ولتاژ خروجی به‌عنوان ولتاژ مبنا در نظر گرفته شود).



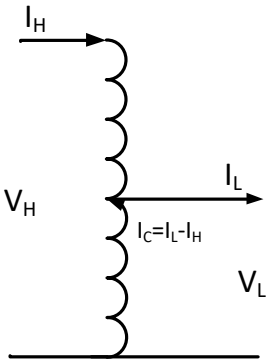
اتوترانس

اگر انتهای سیم‌پیچ اول و دوم در یک ترانس به هم متصل شود، این نقاط هم پتانسیل خواهند شد و از محل اتصال هیچ جریانی برقرار نخواهد شد و عملکرد ترانس تغییری نمی‌کند (شکل الف). با توجه به اینکه از دو ترانس شار مشترک عبور می‌کند، ولت بر دور دو سیم‌پیچ یعنی $\frac{e}{N}=\frac{d\Phi}{dt}$ با هم برابر است، یعنی در هر دور سیم‌پیچ ولتاژ برابر القا می‌شود. بنابراین چنانچه در هر دور از کل سیم‌پیچ‌ها نقاط متناظر به یکدیگر وصل شوند (شکل ب) هیچ تغییری در کار ترانس رخ نخواهد داد. لذا می‌توان از یک سیم‌پیچ استفاده کرد و خروجی ترانس را از تعداد دور دلخواه گرفت (شکل ج). ترانس حاصل اتو ترانس نام دارد که تفاوت اصلی آن وجود تنها یک سیم‌پیچ برخلاف ترانس معمولی است و سیم‌پیچ ثانویه حذف شده و انشعاب لازم از سیم‌پیچ اولیه گرفته می‌شود. بنابراین در ترانس معمولی بین سیم‌پیچ‌ها اتصال الکتریکی وجود دارد درصورتی‌که در ترانس معمولی چنین نیست.



- **انتقال توان الکتریکی در اتوترانس**

در اتوترانس توان الکتریکی انتقالی شامل دو قسمت می‌شود. قسمت اول توان ترانسفورمری که مانند ترانس معمولی توسط سیستم مغناطیسی انتقال می‌یابد. قسمت دوم توان هدایتی نام دارد که به دلیل اتصال الکتریکی سیم‌پیچ‌ها ایجاد شده است. در اتوترانس ولتاژ و جریان طرف فشار قوی V_H و I_H و سمت فشار ضعیف V_L و I_L نام دارند. روابط اتو ترانس به صورت زیر است.



$0 < K < 1$ با تعریف پارامتر

$$K = \frac{V_L}{V_H} = \frac{I_H}{I_L} = \frac{N_L}{N_H}$$

$$\frac{S_C}{S_{Auto}} = \frac{V_L I_H}{V_L I_L} = K \qquad \frac{S_{Tr}}{S_{Auto}} = \frac{V_L (I_L - I_H)}{V_L I_L} = 1 - K$$

مقایسه ترانسفورماتور معمولی با اتوترانس :

۱) در اتو ترانس به دلیل اینکه از سیم‌پیچ کمتری استفاده می‌شود وزن مس بکار رفته در آن کمتر خواهد بود که با رابطه زیر بدست می‌آید. بنابراین مقدار صرفه‌جویی در مس با نسبت تبدیل (K) ارتباط دارد و هرچه K به یک نزدیک‌تر باشد صرفه‌جویی بیشتر انجام می‌شود.

$$\frac{M_{(Cu\ Auto)}}{M_{(cu\ Tr)}} = 1 - K$$

۲) هسته موردنیاز برای اتو ترانس از ترانس معمولی، کوچک‌تر خواهد بود و سیم‌پیچی کمتری دارد که از لحاظ اقتصادی به‌صرفه است .

۳) به علت کاهش در تعداد سیم‌پیچ‌ها و کوچک شدن هسته تلفات اتو ترانس کمتر، راندمان آن افزایش می‌یابد.

۴) به علت استفاده از سیم‌پیچ کمتر در اتو ترانس، تنظیم ولتاژ بهتری خواهیم داشت.

۵) با توجه به اینکه در اتو ترانس بین سیم‌پیچ اولیه و ثانویه ارتباط الکتریکی وجود دارد در زمان قطع شدن سیم‌پیچ مشترک، ولتاژ فشار قوی در سمت فشار ضعیف ظاهر می‌شود. بنابراین باید از حفاظت مناسب استفاده شود.

مثال۵) یک اتوترانس با اولیه ۲۵۰ ولت و دو خروجی با ولتاژهای ۱۰۰ و ۲۰۰ ولت، یک بار ۴ کیلووات با ضریب توان ۰.۸ پس فاز را در ولتاژ ۲۰۰ ولت تأمین می‌کند، و بار اهمی خالص دیگری به قدرت ۲ کیلووات را در ولتاژ ۱۰۰ ولت تغذیه می‌کند. اگر ترانس ایده‌آل باشد جریان کشیده شده از منبع چقدر است؟

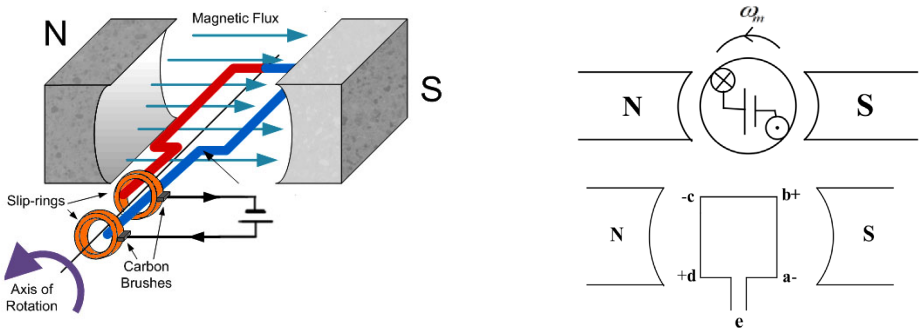
ماشین‌های جریان مستقیم DC

ماشین جریان مستقیم وسیله‌ای الکتریکی است که انرژی الکتریکی جریان مستقیم را به انرژی مکانیکی و یا بلعکس تبدیل می‌کند. این نوع ماشین به خاطر توانایی تولید گشتاور راه‌اندازی بالا کاربرد بسیاری در صنعت دارد. ماشینهای DC در سایز کوچک در ابزارآلات، اسباب بازی‌ها و تجهیزات زیادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. موتورهای DC در ابعاد بزرگتر در صنعت، وسائل نقلیه، بالابرها و ... استفاده می‌شوند. همچنین این نوع ماشین در کاربردهای صنعتی که کنترل دقیق سرعت و گشتاور مورد نیاز است، استفاده‌های فراوان دارد. این نوع ماشین‌ها شبیه اغلب ماشین‌های الکتریکی از دو قسمت استاتور و روتور تشکیل شده‌اند. استاتور این ماشین‌ها میدان مغناطیسی اصلی را تولید می‌کند که در نمونه‌های کوچک‌تر که نیازی به کنترل میدان ندارند توسط آهنربای دائم تولید می‌شود. البته در نمونه‌های بزرگتر بر روی استاتور سیم‌پیچی وجود دارد و میدان مغناطیسی اصلی توسط برق‌دار کردن سیم‌پیچ استاتور تولید می‌شود. در شکل زیر روتور ماشین DC استاتور سیم‌پیچی شده و استاتور با آهنربای دائم نشان داده‌شده است.

به ترتیب از راست: روتور، استاتور سیم‌پیچی شده و استاتور با آهنربای دائم یک ماشین DC

اصول اولیه عملکرد ماشین DC

ساده‌ترین نوع ماشین DC در شکل زیر دیده می‌شود. که شامل یک استاتور با آهنربای دائم و قطب‌های N و S و یک روتور که دو میله‌ی رسانا روی آن می‌باشد. این دو میله از انتها به یکدیگر متصل شده و یک کلاف تشکیل داده و دو سر ابتدایی آنها به منبع DC متصل می‌شود. همانطور که در شکل پایین مشاهده می‌شود، ازآنجاکه روتور در حال چرخش است به‌منظور اتصال الکتریکی سیم‌پیچ‌ها به منبع از دو حلقه لغزان استفاده می‌شود که علیرغم چرخش روتور اتصال الکتریکی برقرار باشد.



یک موتور DC ابتدایی با روتور یک حلقه شامل ۴ میله رسانا و استاتور شامل یک قطب N و S.

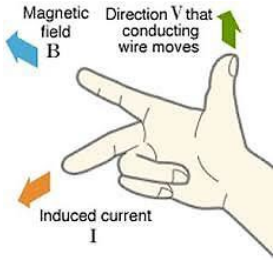
شکل راست نمای دو بعدی از روبرو بالا و شکل چپ نمای سه بعدی

- **تولید ولتاژ در ماشین DC (عملکرد ژنراتوری)**

روتور یک حلقه دارد که شامل ۴ قسمت میله‌ای است و با حروف abcd نام‌گذاری شده است. اگر روتور ماشین توسط عامل خارجی به چرخش درآید، میله‌های رسانا ab و cd در فضای زیر قطب‌ها عمود بر خطوط میدان مغناطیسی هستند و آنها را قطع کرده و طبق رابطه زیر ولتاژ در آنها القا می‌شود.

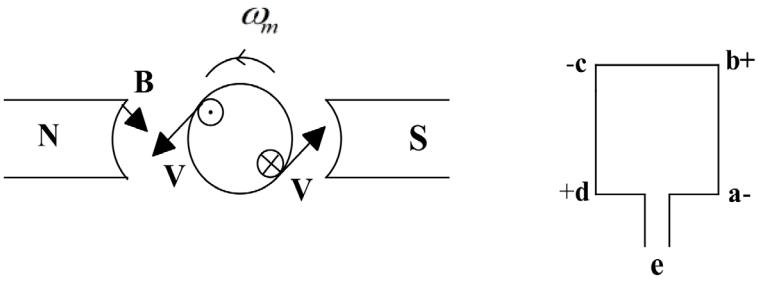
$$e = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{dBA}{dt} = \frac{dBLx}{dt} = BL\frac{dx}{dt} = BLV$$

که L طول هر میله، B چگالی میدان مغناطیسی بین دو قطب و V سرعت خطی میله‌ها است.
جهت V در جهت چرخش، جهت B از قطب N به S و جهت L که در طول میله‌ها است با توجه به جهت مثبت ولتاژ القا شده و در واقع جریان جاری شده از قانون دست راست طبق شکل (۳) بدست می‌آید.



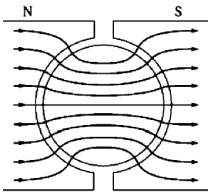
قانون دست راست برای بدست آوردن جریان القا شده در هادی

با قاعده دست راست، میله ab جهت جریان رو به داخل صفحه خواهد داشت و در شکل زیر به صورت درونسو میله cd جهت جریان برونسو دارد و پلاریته ولتاژ القایی نیز طبق شکل (۴) مشخص می‌شود.



جهت ولتاژ (و جریان) القا شده با توجه به جهت میدان و سرعت طبق قانون دست راست در دو میله روتور ماشین DC مقدمانی

وقتی روتور می‌چرخد تا میله‌های رسانا ab و cd درست در بالا و پایین یعنی بین دو قطب قرار گیرند، چون خطوط میدان در ناحیه بین دو قطب وجود ندارد، بنابراین در آنها ولتاژی القا نمی‌شود. این القا نشدن ولتاژ فقط یک‌لحظه رخ می‌دهد چون میله‌ها در حال حرکت هستند و لحظه بعد به زیر قطب‌ها می‌روند. وجود نداشتن میدان بین دو قطب در شکل زیر نشان داده‌شده است.



رابطه e=BLV در واقع ضرب خارجی است یعنی باید این سه کمیت بر یکدیگر عمود باشند.

$$e = L(V \times B)$$

میله‌های رسانا ad و bc همیشه در راستای میدان هستند و بر آن عمود نیستند و در آنها ولتاژی القا نمی‌شود.

میله‌ها در زیر قطب‌ها $e_{ab} = e_{dc} = LVB$

میله‌ها در ناحیه بین قطب‌ها (میله‌های ab و cd درست در بالا و پایین باشند) $e_{ab} = e_{dc} = 0$

میله‌های ad و bc هم‌راستای میدان هستند و همیشه ولتاژ القایی صفر است) $e_{ad} = e_{bc} = 0$

به‌طورکلی ولتاژ القا شده در کل حلقه در یک دور کامل جمع ولتاژ میله‌ها است.

$$e_{tot} = 2LVB$$

مساحت سطح خارجی روتور که استوانه است $2\pi rL$ و اگر از فاصله بین دو قطب صرف‌نظر کنیم سطح زیر هر قطب یک نیم استوانه است که دارای مساحت πrL می‌باشد.

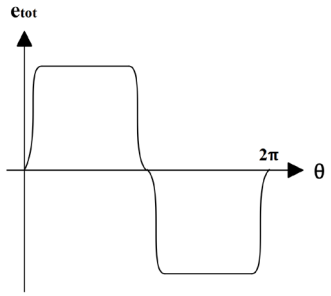
سطح زیر هر قطب $= \dfrac{2\pi rL}{2} = \pi rL \Rightarrow A_p = \pi rL$

$$e = LVB = \frac{A_p}{\pi r} r\omega \frac{\varphi_p}{A_p} = \frac{1}{\pi}\varphi_p \omega$$

$$\Rightarrow e_{tot} = \frac{2}{\pi}\varphi_p \omega$$

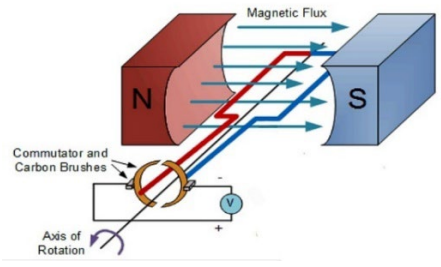
مشاهده می‌شود ولتاژ القایی به **سرعت چرخش** و **شار** زیر هر قطب و یک ضریب ثابت وابسته است.

با چرخش روتور و آمدن میله‌ای که جریان برونسو داشت به زیر قطب S، جهت سرعت زاویه‌ای نسبت به B تغییر می‌کند (که در شکل (۴) مشاهده می‌شود)، بنابراین در هر نیم دور جهت ولتاژ هر میله تغییر کرده و پلاریته کل نیز به صورت متناوب شکل پایین خواهد بود.



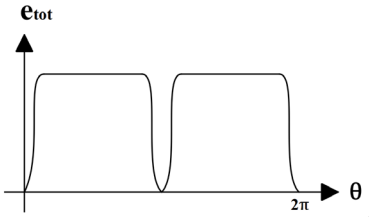
ولتاژ القایی دوسر میله‌ای چرخان که متناوب است

اما برای داشتن ولتاژ DC می‌توان با تغییر در حلقه‌های لغزان متصل به روتور ولتاژ را یک‌سویه کرد، که طرح ساده آن در شکل زیر نشان داده‌شده است. یعنی به‌جای استفاده از دو حلقه کامل از دو نیم حلقه که هرکدام به یک میله متصل هستند استفاده کرد. این دو نیم حلقه از یکدیگر عایق بوده و همراه روتور دوران می‌کنند. به‌این‌ترتیب پلاریته ولتاژ نیم حلقه‌ای که زیر قطب N قرار دارد همیشه مثبت است. پلاریته ولتاژ کل نیز ثابت می‌ماند.



موتور DC ابتدایی که برای یک‌سویه کردن ولتاژ از دو نیم حلقه استفاده شده

این نیم حلقه‌ها توسط دو جاروبک (ذغال از جنس گرافیت) ولتاژ یک‌سویه شده را طبق شکل زیر به بار الکتریکی منتقل می‌کند.



ولتاژ القایی دوسر جارو بک‌ها که یک‌سویه شده است

- **گشتاور تولیدی در ماشین DC (عملکرد موتوری)**

چنانچه یک منبع ولتاژ DC به مدار روتور متصل شود جریانی از میله‌های روتور عبور می‌کند و چون این سیم‌پیچ‌ها در میدان مغناطیسی قرار دارند به آنها نیروی F=iLB وارد می‌شود. این نیرو گشتاوری ایجاد می‌کند که باعث چرخش روتور می‌شود. این رابطه در واقع ضرب خارجی است یعنی باید این سه کمیت بر یکدیگر عمود باشند.

$$F = i\,(L \times B)$$

میله‌ها در زیر قطب‌ها $F_{ab} = F_{dc} = iLB \xrightarrow{T=r\times F} T_{ab} = T_{dc} = iLBr$

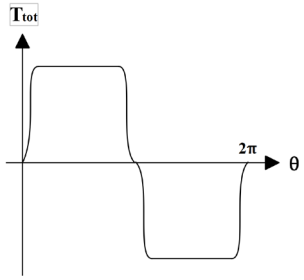
میله‌ها در ناحیه بین قطب‌ها (میله‌های ab و cd درست در بالا و پایین) $F_{ab} = F_{dc} = 0 \xrightarrow{T=r\times F} T_{ab} = T_{dc} = 0$

میله‌های ad و bc هم‌راستای میدان هستند و همیشه نیرو صفر است $F_{ad} = F_{bc} = 0 \xrightarrow{T=r\times F} T_{ad} = T_{bc} = 0$

به‌طورکلی گشتاور تولید شده در یک دور کامل جمع گشتاور میله‌ها است.

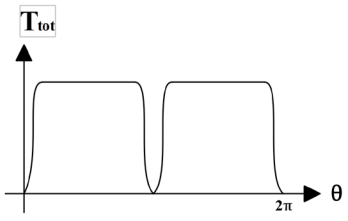
$$\mathrm{T}_{tot} = 2riLB = \frac{2}{\pi}\varphi i$$

مشاهده می‌شود گشتاور به **جریان** و **شار** زیر هر قطب و یک ضریب ثابت وابسته است. (با قوی‌تر کردن میدان یا آهنرباها گشتاور بیشتر می‌شود). در این حالت جهت گشتاور با رفتن سیم‌پیچ به زیر قطب دیگر تغییر می‌کند. بنابراین در یک سیکل نمودار گشتاور به‌صورت زیر است.



گشتاور تولیدی میله‌های چرخان که متناوب است

گشتاور در نیم سیکل مثبت و در نیم سیکل دیگر منفی است، درنتیجه روتور نمی‌تواند حرکت مداوم در یک‌جهت داشته باشد و متوقف می‌شود. با استفاده از نیم‌حلقه‌ها (کموتاتور) می‌توان جهت جریان را در هر نیم سیکل تغییر داد. به تغییر جهت جریان در هر نیم سیکل **کموتاسیون** گفته می‌شود. بنابراین جهت گشتاور نیز تغییر می‌کند و درنهایت گشتاور مثبت طبق شکل زیر به سیم‌پیچ‌ها وارد می‌شود که باعث می‌شود حرکت مداوم داشته باشد.



جارو بک‌ها جهت جریان را تغییر داده‌اند و گشتاور یک‌سویه شده است

روابط اساسی در ماشین DC

در ماشین DC ساده که ابتدای فصل بررسی شد دیده شد که ولتاژ القایی در حالت ژنراتوری به سرعت چرخش و شار زیر قطب و ضریب $2/\pi$ بستگی داشت. همچنین گشتاور تولیدی در حالت موتوری به جریان و شار زیر قطب و ضریب $2/\pi$ بستگی دارد. حال اگر تعداد سیم‌پیچی‌ها و یا تعداد قطب‌ها افزایش یابد روابط کلی ولتاژ القایی و گشتاور به صورت زیر خواهد بود.

Z تعداد هادی‌ها در شیارهای روتور
P تعداد قطب‌ها
a تعداد مسیرهای موازی: برای سیم‌پیچ روی هم برابر با تعداد قطب P ، و برای سیم‌پیچ موجی برابر با ۲
r شعاع متوسط روتور
L طول محوری روتور
V سرعت خطی روتور
ω_m سرعت زاویه‌ای روتور برحسب rad/s
N_m سرعت روتور برحسب دور بر دقیقه rpm
A_p مساحت زیر هر قطب
φ_p شار زیر هر قطب

$$k \equiv \frac{ZP}{2\pi a}$$

$$e = k\,\varphi_p\,\omega_m$$

رابطه نهایی ولتاژ القایی که وابسته به شار و سرعت و یک ضریب ثابت است

نکته اینکه سرعت باید برحسب rad/s باشد. اگر برحسب دور بر دقیقه بیان شود با رابطه زیر قابل تبدیل است.

$$\omega_m = \frac{2\pi}{60} N_m$$

$$\mathrm{T} = k\,\varphi_p\,i_a$$

رابطه نهایی گشتاور که وابسته به شار و جریان و یک ضریب ثابت است

انواع ماشین DC

همانطور که گفته شد، هر ماشین DC دارای سیم‌پیچی روی استاتور به نام سیم‌پیچی میدان است که شار مورد نیاز زیر قطب را تأمین می‌کند و سیم‌پیچی روی روتور به نام سیم‌پیچی آرمیچر است. برای تأمین تغذیه این دو سیم‌پیچ آنها را به طرق مختلف می‌توان به منبع ولتاژ DC متصل کرد و انواع مختلف ماشین DC ایجاد می‌شود که هر یک دارای قابلیت‌ها و مزایای مختلفی هستند. بنابراین انواع ماشین DC بر مبنای اتصالات نام‌گذاری می‌شوند که شامل موارد زیر هستند و به صورت جداگانه در این بخش بررسی خواهند شد.

۱. ژنراتورهای DC: تحریک مستقل، تحریک شنت، تحریک سری و تحریک کمپوند
۲. موتورهای DC: تحریک مستقل، تحریک شنت، تحریک سری و تحریک کمپوند

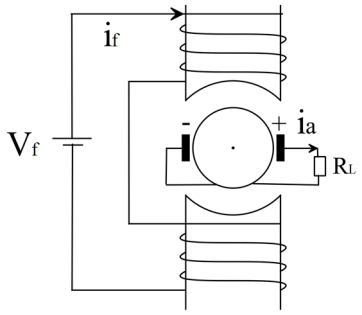
ژنراتورهای DC

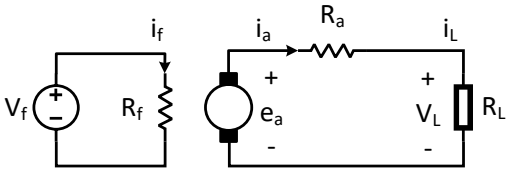
ژنراتور یا مولد با چرخش روتور توسط عامل خارجی انرژی الکتریکی تولید می‌کند و به ۴ دسته تقسیم می‌شود.

الف) ژنراتور تحریک مستقل :

این ژنراتور نقش مولد و منبع تغذیه را دارد و دو سر سیم‌پیچ روتور به بار R_L برای تغذیه آن متصل می‌شود و جهت جریان آرمیچر i_a از سیم‌پیچ روتور به سمت بار است. برای ایجاد شار زیر قطب‌ها سیم‌پیچ استاتور باید به یک منبع تغذیه جداگانه متصل شود. یعنی این مولد علی‌رغم اینکه بار را توسط سیم‌پیچی روتور تأمین می‌کند

ولی سیم‌پیچی استاتور آن به یک منبع نیاز دارد. شکل استاتور و روتور این نوع ژنراتور و دیاگرام مداری آن در زیر نشان داده‌شده است.





V_f	منبع ولتاژ تحریک
i_f	جریان سیم‌پیچی استاتور (جریان تحریک)
R_f	مقاومت سیم‌پیچی استاتور
e_a	ولتاژ القا شده داخلی
R_a	مقاومت سیم‌پیچی روتور (آرمیچر)
i_a	جریان آرمیچر
R_L	مقاومت بار
V_L	ولتاژ بار

- معادلات حاکم بر ژنراتور تحریک جداگانه

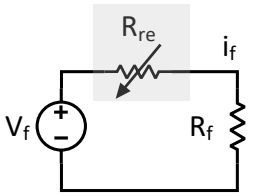
روابط مداری با استفاده از KVL,KCL

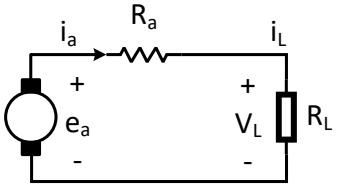
$$V_f = R_f I_f$$
$$e_a = R_a I_a + V_L$$
$$V_L = I_L R_L, I_a = I_L$$

روابط اساسی برای همه ماشین‌ها

$$e = k \varphi_p \omega_m$$
$$T = k \varphi_p i_a$$

نکته: در ژنراتور تحریک مستقل برای تنظیم جریان میدان i_f یک مقاومت متغیر یا رئوستا R_{re} در مدار میدان به‌صورت سری قرار داده می‌شود. با تنظیم این مقاومت جریان میدان تغییر کرده و به تبع آن شار زیر قطب‌ها تغییر می‌کند و درنهایت ولتاژ تولیدی ژنراتور e_a تنظیم می‌شود.





تغییر معادله بعد از اضافه کردن رئوستا

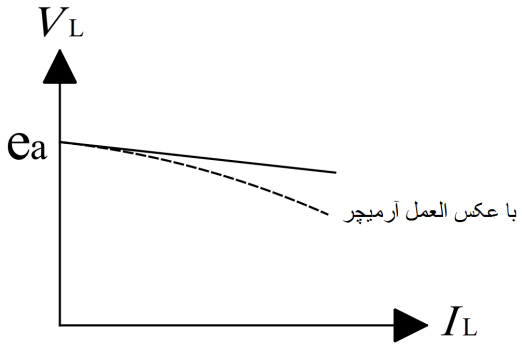
$$V_f = (R_f + R_{re}) i_f$$

مشخصه خارجی (V_L-i_L) ژنراتور تحریک مستقل

در ژنراتورهای DC نحوه تغییرات ولتاژ خروجی به جریان خروجی دارای اهمیت است. زیرا نشان‌دهنده مقدار افت ولتاژ خروجی با افزایش بارگذاری است. منبع ولتاژی مناسب است که با افزایش بارگذاری ولتاژ خروجی آن اصلاً تغییر نکند یا تغییر اندک داشته باشد. این مشخصه با استفاده از معادله KVL بدست می‌آید.

$$KVL: V_L = e_a - R_a i_L$$

معادله برحسب V_L-i_L به صورت بالا خواهد شد. لازم به ذکر است اگر عکس‌العمل آرمیچر در نظر گرفته شود شار زیر قطب کم شده و باعث کاهش ولتاژ داخلی و درنهایت کاهش ولتاژ خروجی می‌شود.



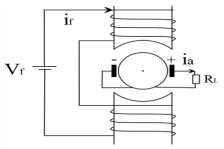
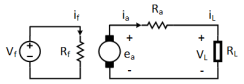
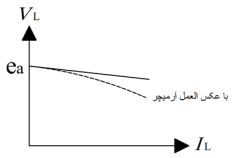
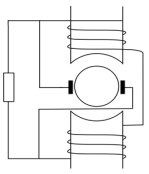
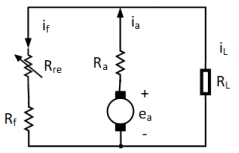
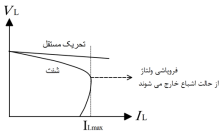
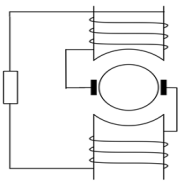
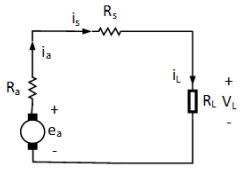
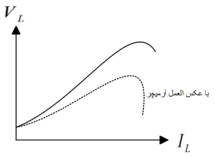
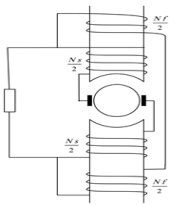
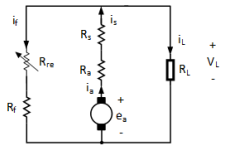
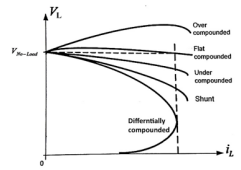
مثال۶) یک ژنراتور DC تحریک جداگانه برای تأمین میدان اصلی به منبع ۲۰۰ ولتی متصل شده است. مقاومت آرمیچر ۰.۲ اهم است.

الف) ولتاژ داخلی باید روی چه عددی تنظیم شود تا جریان خروجی ۱۰۰ آمپر باشد و باری را در ولتاژ ۵۰۰ ولت تأمین کند؟

ب) اگر سرعت ۸۰ درصد شود و جریان بار ثابت بماند ولتاژ خروجی چقدر خواهد شد؟

نکته: ژنراتورهای تحریک مستقل به دلیل اینکه از یک منبع DC جداگانه برای تأمین میدان استفاده می‌کنند هزینه را افزایش می‌دهند. یک راه حل این است که از ولتاژ تولیدی خود ژنراتور به‌عنوان منبع میدان استفاده شود. به این نوع ژنراتورها **خود تحریک** گفته می‌شود که به سه دسته شنت (موازی)، سری و کمپوند دسته بندی میشوند. علت این نامگذاری طریقه اتصال سیم پیچ تحریک به سیم پیچ آرمیچر است. در جدول زیر به طور خلاصه این نوع ژنراتورها با هم مقایسه شده اند.

جدول مقایسه انواع مختلف ژنراتور DC

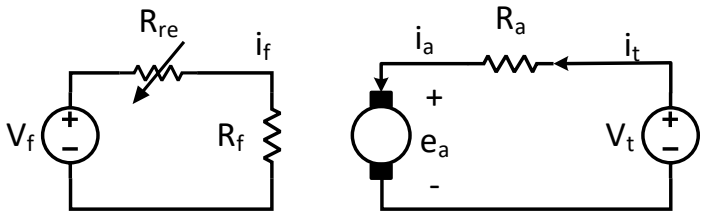
نوع ژنراتور	ساختمان داخلی	مدار معادل	روابط حاکم	مشخصه ولتاژ جریان خروجی
تحریک مستقل			روابط مداری با استفاده از KVL,KCL $V_f = R_f I_f$ $e_a = R_a I_a + V_L$ $V_L = I_L R_L , I_a = I_L$ روابط اساسی برای همه ماشین‌ها $e = k\varphi_p \omega_m$ $T = k\varphi_p i_a$	
شنت			$KCL: I_a = I_f + I_L$ $KVL: e_a - R_a I_a = (R_f + R_{re}) I_f$ $KVL: e_a - R_a I_a = R_L I_L$ $e_a = k\varphi_p \omega_m$ $T = k\varphi_p i_a$	
سری			$KCL: I_a = I_s = I_L$ $KVL: e_a - (R_a + R_s) I_a = V_L$ $e_a = k\varphi_p \omega_m$ $T = k\varphi_p i_a$	
کمپوند			$KCL: I_a = I_f + I_L , I_a = I_s$ $KVL: e_a - (R_a + R_s) I_a = V_L$ $KVL: (R_f + R_{re}) I_f = V_L$ $e_a = k(\varphi_{pf} \pm \varphi_{ps})\omega_m$ $T = k(\varphi_{pf} \pm \varphi_{ps}) i_a$	

موتورهای DC

موتورهای DC نیز همانند ژنراتورها به ۴ نوع مختلف، یعنی موتور تحریک مستقل، موتور شنت، موتور سری و موتور کمپوند تقسیم می‌شوند. تفاوت موتور با ژنراتور در این است که در موتورها به مدار آرمیچر یک منبع DC متصل می‌شود، بنابراین جهت جریان به سمت روتور است و باعث تولید گشتاور شده و روتور را می‌چرخاند. مشابه ژنراتور که مشخصه خارجی V_L-I_L اهمیت داشت برای موتور مشخصه خارجی سرعت گشتاور ω_m-T مهم است.

الف) موتور تحریک مستقل

در این موتور یک منبع به مدار تحریک و یک منبع دیگر به مدار آرمیچر متصل می‌شود.



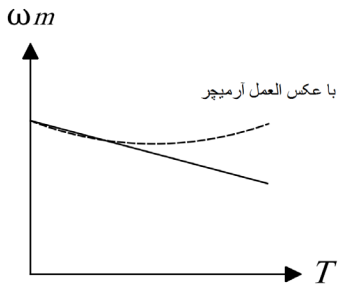
$$KVL: V_f = (R_f + R_{re}) I_f \qquad e_a = k\varphi_p \omega_m$$
$$KVL: V_t - R_a I_a = e_a \qquad T = k\varphi_p i_a$$

مشخصه گشتاور- سرعت در موتور تحریک مستقل:

اگر در روابط بالا i_a , e_a را حذف کنیم رابطه سرعت برحسب گشتاور بدست می‌آید.

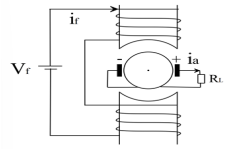
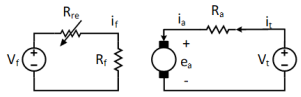
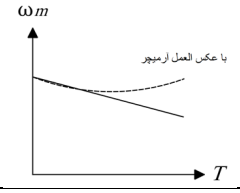
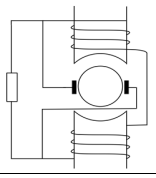
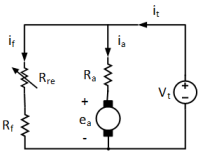
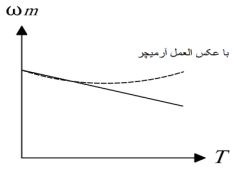
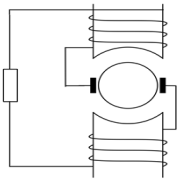
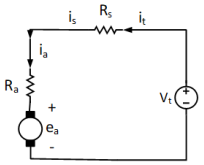
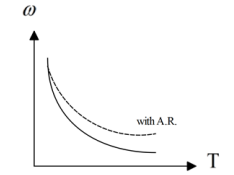
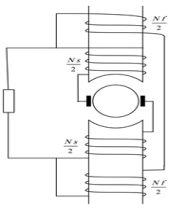
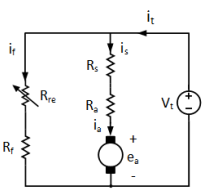
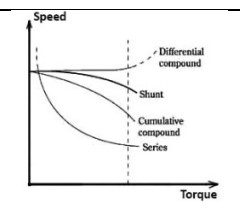
$$\omega_m = \frac{V_t}{k\varphi_p} - \frac{R_a T}{(k\varphi_p)^2}$$

با رسم این رابطه شکل زیر حاصل می‌شود.



مشخصه به صورت خطی کاهش می‌یابد و اگر عکس‌العمل آرمیچر در نظر گرفته شود به علت کاهش شار طبق رابطه بالا مخرج کم شده و شیب منفی کوچک‌تر می‌شود، یعنی با افزایش گشتاور بار سرعت کمتر کاهش می‌یابد. چون مشخصه با عکس‌العمل آرمیچر دارای عرض از مبدأ یکسان است، در گشتاور صفر جریان هم صفر و عکس‌العمل آرمیچر ناچیز است.

سایر موتورهای DC در جدول زیر با هم مقایسه شده اند.

نوع ژنراتور	ساختمان داخلی	مدار معادل	روابط حاکم	مشخصه ولتاژ جریان خروجی
تحریک مستقل			$KVL: V_t - R_a I_a = e_a$ $KVL: V_t = (R_f + R_{re}) I_f$ $e_a = k\varphi_p \omega_m$ $T = k\varphi_p i_a$	
شنت			$KCL: I_t = I_a + I_f$ $KVL: V_t - R_a I_a = e_a$ $KVL: V_t = (R_f + R_{re}) I_f$ $e_a = k\varphi_p \omega_m$ $T = k\varphi_p i_a$	
سری			$KCL: I_t = I_a = I_s$ $KVL: V_t = e_a + (R_a + R_s) I_a$ $e_a = k\varphi_p \omega_m$ $T = k\varphi_p i_a$ به صورت تقریبی $\varphi_p = C i_a$ $T = k\varphi_p i_a = kC i_a i_a \Rightarrow T = K_C i_a^2$	
کمپوند			$I_t = I_a + I_f, I_s = I_a$ $V_t = e_a + (R_a + R_s) I_a$ $V_t = (R_f + R_{re}) I_f$ $e_a = k(\varphi_{pf} \pm \varphi_{ps})\omega_a$ $T = k(\varphi_{pf} \pm \varphi_{ps}) i_a$	

مثال۷) یک موتور DC تحریک جداگانه ۲۵۰v و۱.۵kw و ۱۰۰۰rpm دارای مقاومت آرمیچر ۲.۵Ω است و در بار نامی جریان ۸A از منبع می‌کشد. اگر از تلفات بی‌باری صرف‌نظر شود، سرعت بی‌باری چقدر است؟

تنظیم سرعت در موتور DC

تنظیم سرعت یکی از مباحث کاربردی و ضروری برای یک موتور است. در کاربردهای مختلف لازم می‌شود که سرعت یک موتور قابل تغییر باشد. این کار در موتورهای DC ساده‌تر از موتورهای ac است. به همین دلیل موتورهای DC علیرغم ساختمان پیچیده‌تری که نسبت به موتور ac دارند اما هنوز هم مورد توجه هستند. برای بدست آوردن راهی برای تنظیم سرعت موتور باید رابطه آن را بدست آورد و با استفاده از پارامترهای دخیل در آن به تغییر آنها پرداخت. با استفاده از رابطه KVL در مدار آرمیچر یک موتور DC داریم:

$$\begin{aligned} V_t &= e_a + R_a i_a \\ e_a &= k\,\varphi_p\,\omega_m \end{aligned} \qquad \Rightarrow \omega_m = \frac{V_t - R_a i_a}{k\,\varphi_p}$$

از رابطه سرعت مشاهده می‌شود که ولتاژ ترمینال V_t، شار زیر قطب φ_p و مقاومت آرمیچر R_a بر روی سرعت تأثیر دارند.

مثال۸) یک موتور DC شنت ۲۰۰ ولتی با مقاومت آرمیچر ۱ اهمی باری را می‌چرخاند، گشتاور بار متناسب با سرعت موتور است. اگر جریان تحریک ۱ آمپر و جریان کشیده شده از شبکه ۱۱ آمپر باشد سرعت ۱۱۵۰ rpm خواهد بود. با تغییر رئوستای مدار تحریک جریان میدان به نصف کاهش می‌یابد، در این حالت سرعت را بدست آورید. مشخصه را خطی فرض کنید.

راه‌اندازی موتور DC

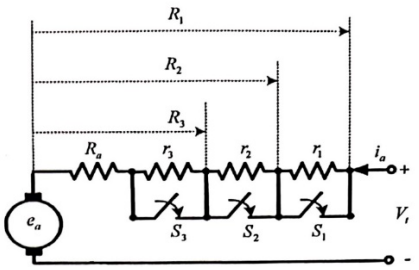
در لحظه راه‌اندازی موتور ساکن و سرعت آن صفر است. بنابراین ولتاژ القایی $e_a = k\,\varphi_p\,\omega_m$ صفر است. طبق رابطه $I = \frac{V_t - e_a}{R_a}$ به علت صفر بودن e_a در لحظه راه‌اندازی، جریان راه‌اندازی بیشترین حالت را دارد و تا چند برابر جریان نامی می‌رسد. برای آسیب نرسیدن به سیم‌پیچ‌های ماشین باید این جریان محدود شود. برای محدود کردن جریان راه‌اندازی طبق رابطه بالا با استفاده از تنظیم ولتاژ ترمینال و مقاومت روتور دو راه وجود دارد.

الف) راه‌اندازی با استفاده از کاهش ولتاژ ترمینال

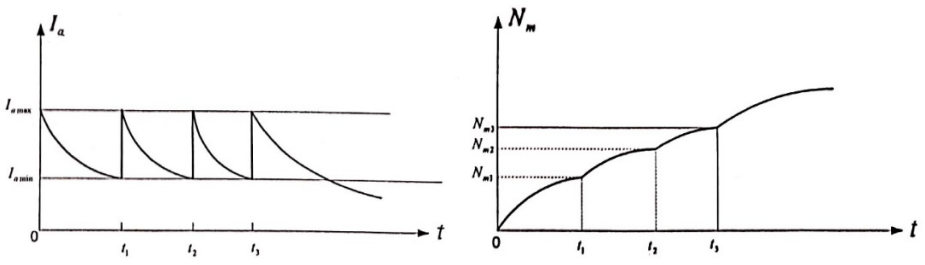
برای این کار باید یک منبع ولتاژ متغیر استفاده کرد به‌طوری که در ابتدا ولتاژ کم است و با سرعت گرفتن موتور ولتاژ را افزایش می‌دهند. اما این روش به یک منبع متغیر DC نیاز دارد.

ب) راه‌اندازی به کمک مقاومت‌های پله‌ای

رایج‌ترین روش راه‌اندازی موتورهای DC است. به این صورت که از یک مقاومت چند پله‌ای استفاده می‌شود که در لحظه راه‌اندازی همه پله‌ها در مدار هستند و جریان را محدود می‌کنند. با گذشت زمان و سرعت گرفتن موتور پله‌های مقاومت از مدار خارج می‌شوند. این پله‌های مقاومتی به‌طوری محاسبه می‌شوند تا جریان موتور بعد از خارج شدن هر پله بین جریان مینیمم I_{min} که همان جریان نامی است و جریان ماکزیمم I_{max} که دو برابر جریان نامی است محدود شود. در شکل زیر یک مقاومت راه‌انداز پله‌ای به موتور DC اضافه شده است. در ابتدا همه پله‌های مقاومت راه‌انداز در مدار هستند و جریان راه‌اندازی را محدود می‌کنند. در لحظه t_1 کلید S_1 بسته می‌شود. این کلید مقاومت r_1 را اتصال کوتاه کرده و از مدار خارج می‌کند. در این لحظه که یک پله خارج شده است جریان طبق شکل زیر ناگهانی افزایش یافته اما باید به I_{max} محدود شود و سرعت نیز افزایش می‌یابد. در مرحله بعد مقاومت r_2 از مدار خارج می‌شود و روند بالا تکرار می‌شود و سرعت به مقدار نامی و جریان نیز به مقدار نامی می‌رسد. محاسبات اینکه هر پله چه مقدار باشد به این صورت است که جریان اولیه I_{max} باشد و در هر مرحله تا رسیدن به مقدار نامی از این مقدار بیشتر نشود.



مقاومت راه‌انداز ۳ پله‌ای

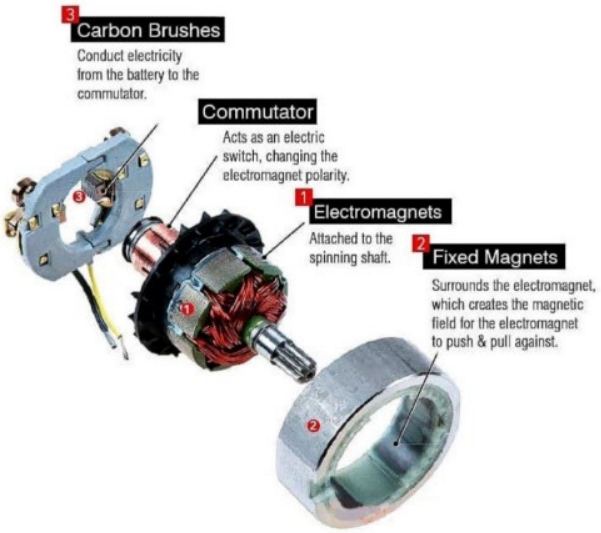


نمودار جریان و سرعت برحسب زمان در راه‌انداز مقاومتی پله‌ای

سایر موتورهای DC

۱- موتور با آهنربای دائم

در کاربردهایی که به تنظیم سرعت توسط شار لازم نیست و میدان مغناطیسی خیلی قوی نیز مورد نیاز نیست به‌جای سیم‌پیچ میدان از آهنربای دائم استفاده می‌شود. با این کار شار زیر قطب همیشه ثابت خواهد بود. این نوع موتورها در توان‌های پایین و برای مصارف کوچک مانند اسباب‌بازی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل زیر اجزای داخلی این موتور را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که به‌جز قسمت آهنربای دائم، سایر قسمت‌های آن مشابه دیگر موتورها است. یعنی روتور سیم‌پیچی شده است و کموتاتور و جاروبک دارند.



اجزای مختلف یک ماشین DC با آهنربای دائم

۲- موتور یونیورسال

گشتاور در موتور سری با توان دوم جریان رابطه مستقیم دارد. بنابراین اگر جریان متناوب که در یک سیکل هم مثبت و هم منفی می‌شود به موتور سری اعمال شود گشتاور در یک سیکل مثبت خواهد بود و مقدار متوسط مثبت نیز خواهد داشت. بنابراین موتور یونیورسال در واقع موتور DC سری است که با تغذیه ac کار می‌کند. علت استفاده این موتورها این است که معمولاً برق ac در دسترس تر است. این موتورها دارای گشتاور راه‌اندازی بالا هستند و اکثراً در ابزار برقی قابل حمل مانند دریل، یا لوازم برقی خانگی مانند جاروبرقی، مخلوط‌کن و ... استفاده می‌شود. در عمل موتور بایستی به صورت خاصی طراحی شود تا با جریان ac سازگاری داشته باشد (راکتانس بایستی مدنظر قرار گیرند) و موتور نهایی عموماً دارای کارایی کمتری نسبت به یک موتور معادل DC خالص خواهد بود. وقتی‌که این موتور با منبع ac کار می‌کند کموتاسیون آن بسیار ضعیف‌تر از حالتی است که با منبع DC کار می‌کند. به علت عمل ترانسفورماتوری که در سیم‌پیچ‌های در حال کموتاسیون ولتاژ القا می‌کند، در جاروبک ها جرقه‌های اضافی ایجاد می‌شود.

۳- موتور بدون جاروبک Brushless

در موتورهای DC معمولی، براش یعنی جاروبک وجود دارد وظیفه‌ی جاروبک‌ها انتقال جریان به روتور علی‌رغم چرخش آن است. مشکل جاروبک (براش‌های) ذغالی این است که ساییده می‌شوند. در موتورهای براشلس دیگر

جاروبک وجود ندارد، بلکه چندین سیم‌پیچ ثابت روی استاتور وجود دارد که به ترتیب برق‌دار می‌شوند. کار تقسیم ولتاژ بین سیم‌پیچ‌ها را کنترل کننده سرعت موتور یا ESC انجام می‌دهد. وقتی این سیم‌پیچ‌ها برق‌دار می‌شوند میدانی به وجود می‌آورند که باعث چرخش روتور می‌شوند و نیازی به جاروبک برای انتقال جریان به روتور نیست.

استاتور موتور بدون جاروبک:

استاتور موتور DC بدون جاروبک با سیم‌پیچی که در شیارهای آن قرار گرفته به صورت شکل زیر ساخته شده است. بیشتر موتورهای بدون جاروبک دارای سه سیم‌پیچ در استاتور هستند. هرکدام از این سیم‌پیچی‌ها در محیط استاتور توزیع شده‌اند. و تعداد زوجی از قطب‌ها را تشکیل داده‌اند. استاتور با منبع دی‌سی تغذیه می‌شوند که توسط اینورتر مجتمع برای تغذیه سیم‌پیچ‌ها به پالس تبدیل می‌شود و به ترتیب آنها را برق‌دار می‌کند. سنسورها و قطعات الکترونیکی دیگری نیز خروجی اینورتر را کنترل می‌نمایند.

استاتور یک موتور بدون جاروبک و تغذیه سیم‌پیچ‌های آن

روتور موتور بدون جاروبک:

روتور از مغناطیس دائم ساخته می‌شود و از دو تا هشت قطب، متغیر است که این قطب‌ها یک در میان قطب‌های شمال و جنوب هستند. بر مبنای چگالی شار مورد نیاز در روتور، ماده مغناطیسی مناسب مانند فریت در گذشته و با پیشرفت تکنولوژی، مغناطیس‌های آلیاژی کمیاب که چگالی شار بیشتری دارند مقبولیت یافته‌اند.

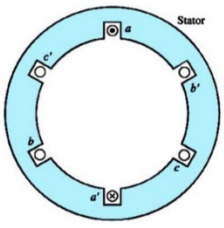
مقایسه موتور بدون جاروبک و موتور معمولی

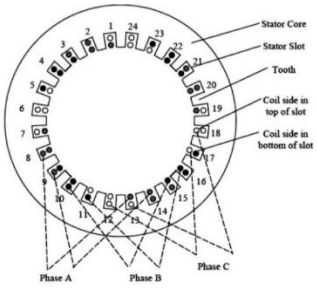
ماشین‌های القایی (آسنکرون)

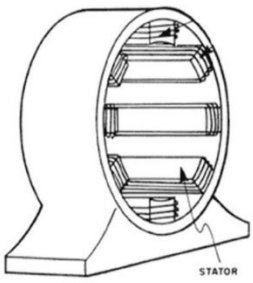
با گسترش شبکه‌های جریان برق متناوب (ac) استفاده از ماشین‌هایی که تغذیه ac دارند نسبت به نمونه‌های DC رایج‌تر شده است. از طرفی ماشین‌های ac دارای ساختمان ساده‌تر، عمر بیشتر، قیمت کمتر، هزینه نگهداری کمتر و .... هستند. در این فصل با ماشین‌های ac یا آسنکرون آشنا خواهیم شد. علت این نام‌گذاری این است که سرعت چرخش روتور هم‌زمان با فرکانس تغذیه نیست لذا به آنها ماشین آسنکرون (غیرهمزمان) گویند. در ساختمان این ماشین‌ها دو سیم‌پیچی روتور و استاتور وجود دارد اما برخلاف سایر ماشین‌ها نیازی به تحریک هردوی آنها نیست، بلکه تنها سیم‌پیچ‌های استاتور به منبع وصل می‌شوند و یک میدان دوار ایجاد می‌کنند. این میدان دوار هادی‌های روتور را قطع می‌کند و در آنها ولتاژ القا می‌کند، به همین دلیل به این ماشین‌ها، ماشین القایی نیز گفته می‌شود. بعد از القا شدن ولتاژ در سیم‌پیچ‌های روتور جریانی در آنها جاری می‌شود که یک میدان گردان دیگر به وجود می‌آورد. تأثیر میدان اولیه توسط استاتور و این میدان القایی در روتور باعث به حرکت درآمدن روتور می‌شود. در ادامه عملکرد این نوع ماشین‌ها تشریح خواهد شد.

ساختمان استاتور

استاتور یک استوانه‌ی توخالی است که در راستای محور طولی دارای شیارهایی برای قرار دادن سیم‌پیچ‌ها می‌باشد. یعنی برای هر فاز حداقل دو شیار یکی برای مسیر رفت و دیگری برای مسیر برگشت وجود دارد. برای ایجاد یک میدان سینوسی در فضای داخلی استاتور که باید به‌صورت توزیع‌شده باشند، تعداد شیارها بیشتر است و شکل زیر به ترتیب از چپ به راست نمونه ساده استاتور، نمونه کامل‌تر با تعداد شیارهای بیشتر، شکل سه‌بعدی استاتور و شکل واقعی آن را نشان می‌دهد. هسته‌ی استاتور از جنس فرومغناطیس و به صورت ورقه‌ای ساخته می‌شود تا تلفات فوکو کاهش یابد.



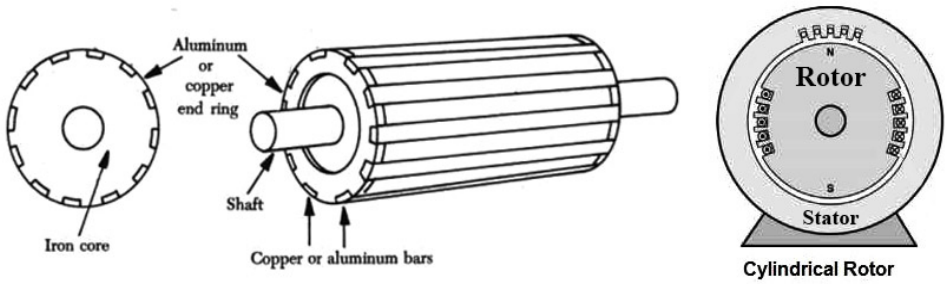




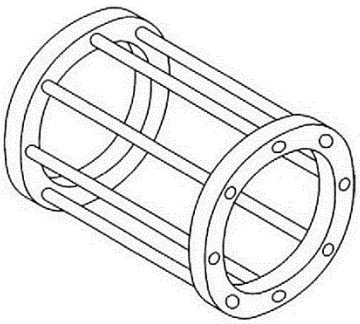
ساختمان روتور

روتور ماشین القایی نیز به شکل استوانه است که در دو نوع ساخته می‌شود:

۱- روتور سیم‌پیچی شده: که در راستای طولی محور روتور شیارهایی به جهت قرار دادن سیم‌پیچ‌ها وجود دارد، که درنهایت برای هر فاز دو سیم موجود است، یعنی ۶ سر سیم در دسترس است. این سیم‌ها معمولاً به صورت ستاره بسته می‌شوند، یعنی یک سر همه سیم‌پیچ‌ها به یکدیگر و سر دیگر آزاد است. سر آزاد سیم‌پیچ‌ها هم می‌تواند اتصال کوتاه شود و یا اینکه توسط حلقه‌های لغزان به مقاومت یا منبع دیگر متصل شود. در شکل زیر به ترتیب از چپ به راست سطح مقطع روتور استوانه‌ای، شکل سه‌بعدی روتور استوانه‌ای و قرارگیری روتور در استاتور نشان داده شده است.

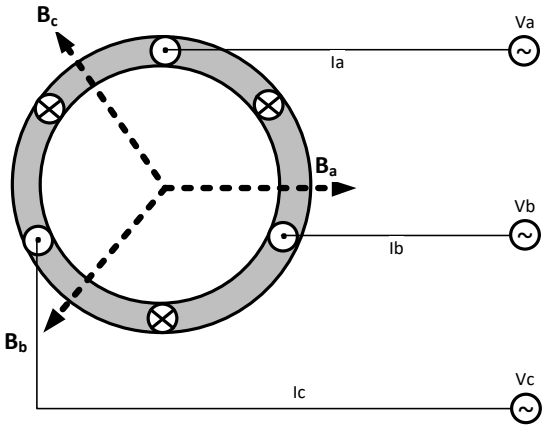


۲- روتور قفس سنجابی: ساختمان کلی آن شبیه قفس است و میله‌های آن نقش هادی‌ها (سیم‌پیچ‌ها) را دارند و درنهایت هم اتصال کوتاه شده‌اند. در شکل زیر یک نمونه روتور قفس سنجابی نشان داده شده است که در انتهای آن حلقه‌های موجود میله‌ها را اتصال کوتاه کرده‌اند.



تحلیل ریاضی میدان دوار

اگر سیم‌پیچ‌های استاتور با منبع سه فاز متقارن با فرکانس ω_s و اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه تغذیه شود جریان هرکدام از سیم‌پیچ‌ها به‌صورت زیر خواهد بود:



$$I_a = I_m Cos(\omega_s t)$$

$$I_b = I_m Cos(\omega_s t - 120)$$

$$I_c = I_m Cos(\omega_s t - 240)$$

جریان‌ها سه فاز متقارن و میدان متناظر با هر جریان نیز متقارن خواهد بود.

اما ازآنجاکه هرکدام از سیم‌پیچ‌ها با یکدیگر اخلاف زاویه ۱۲۰ درجه مکانی در فضای استاتور دارند، هرکدام از میدان‌های ایجاد شده علاوه بر اختلاف ۱۲۰ درجه زمانی به علت سه فاز بودن، با یکدیگر اختلاف مکانی ۱۲۰ درجه نیز دارند، که در رابطه آنها متغیر $\omega_s t$ نشان‌دهنده اختلاف زمانی به علت سه فاز بودن و متغیر θ نشان‌دهنده اختلاف مکانی میدان هر سیم‌پیچ به علت مکان سیم‌پیچ‌ها است.

$$B_a = B_m \cos(\omega_s t)\cos(\theta)$$

$$B_b = B_m \cos(\omega_s t - 120)\cos(\theta - 120)$$

$$B_c = B_m \cos(\omega_s t - 240)\cos(\theta - 240)$$

برآیند میدان کل در استاتور از جمع سه میدان بالا به دست می‌آید و استفاده از تبدیلات مثلثاتی به دست می‌آید که به صورت زیر خواهد بود. این میدان برآیند دارای دامنه ثابت است، اما با گذشت زمان یعنی افزایش t زاویه آن در استاتور تغییر می‌کند. لذا به این میدان میدان ثابت چرخان گفته می‌شود که با سرعت ثابت ω_s در حال چرخش است.

$$B_{eq} = B_a + B_b + B_c$$
$$= B_m \cos(\omega_s t)\cos(\theta) + B_m \cos(\omega_s t - 120)\cos(\theta - 120) + B_m \cos(\omega_s t - 240)\cos(\theta - 240)$$
$$= \frac{B_m}{2}\cos(\omega_s t - \theta) + \underline{\frac{B_m}{2}\cos(\omega_s t + \theta)} + \frac{B_m}{2}\cos(\omega_s t - \theta) + \underline{\frac{B_m}{2}\cos(\omega_s t + \theta - 240)}$$
$$+ \frac{B_m}{2}\cos(\omega_s t - \theta) + \underline{\frac{B_m}{2}\cos(\omega_s t + \theta + 240)} =$$
$$\Rightarrow B_{eq} = \frac{3}{2} B_m \cos(\omega_s t - \theta)$$

عباراتی که زیر آنها خط کشیده شده یک سه فاز را نشان می‌دهند که جمع جبری آنها صفر می‌شود.

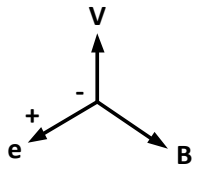
(θ) زاویه مکانیکی جابجایی در سطح استاتور است که ۳۶۰ درجه یک دور کامل می‌شود. یعنی وقتی یک سیکل تغذیه داریم $0<\omega_s<2\pi$ بردار میدان (چون زاویه آن از θ کم شده است) یک دور کامل می‌چرخد که سرعت چرخش آن به فرکانس تغذیه یعنی ω_s بستگی دارد. برای توضیح بیشتر می‌توان شبیه درس مدار این عبارت کسینوسی را یک‌فازور در نظر گرفت که دامنه ثابت دارد که چون زاویه آن در حال تغییر است یعنی در حال چرخش است.

گشتاور القایی

طبق رابطه‌ی کلی گشتاور $T = -B_s B_r \sin\delta$ دو میدان گردان روتور و استاتور که با سرعت یکسان ω_s در حال چرخش هستند و با یکدیگر اختلاف زاویه δ دارند گشتاوری الکترومغناطیسی تولید می‌کنند. سرعت چرخش روتور نیز ω_m در نظر گرفته می‌شود.

برای بررسی راه‌اندازی یعنی لحظه ابتدایی شروع حرکت در موتور القایی گشتاور وارد شده بر روتور در یک سیکل را بررسی می‌کنیم و مشاهده خواهیم کرد که گشتاور متوسط در یک سیکل غیر صفر خواهد بود و باعث می‌شود روتور شروع به حرکت بکند. ضمناً روتور اگر سیم‌پیچی شده باشد سیم‌پیچ‌ها در انتها اتصال کوتاه شده‌اند.

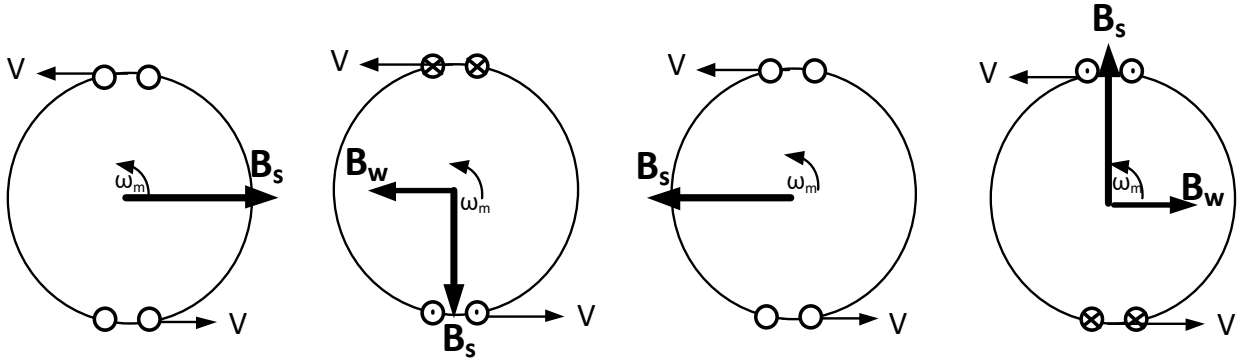
شکل (الف) شروع حرکت است. میدان مغناطیسی چرخان B_s با حرکت پادساعت‌گرد در سیم‌پیچ‌های ولتاژی طبق رابطه‌ی $e = (V \times B).L$ القا می‌کند، که جهت جریان طبق شکل زیر در میله‌های بالا برونسو و در میله‌های پایین درون‌سو است. سیم‌پیچ‌های روی روتور دارای جریان می‌شوند، بنابراین میدان B_w را طبق قانون دست راست تولید می‌کنند. لذا طبق رابطه‌ی $T = -B_s B_w Sin\delta$ یک گشتاور پادساعت‌گرد تولید می‌شود.



در **شکل (ب)** میدان B_s ۹۰ درجه چرخیده است درحالی‌که روتور به علت لختی که دارد فرصت چرخش نداشته است چون سرعت چرخش میدان بسیار زیاد است. در این لحظه ولتاژ القا شده به علت اینکه V و B_s موازی هستند صفر است. بنابراین جریانی هم در سیم‌پیچ‌ها القا نمی‌شود و درنهایت گشتاور T صفر خواهد بود.

در **شکل (ج)** B_s ۹۰ درجه دیگر چرخیده و طبق رابطه‌ی $e = (V * B).L$ ولتاژ القا شده و جریان ناشی از آن در سیم‌پیچ‌های بالا درون‌سو و در سیم‌پیچ‌های پایین برونسو است. بنابراین میدان B_w طبق قانون دست راست تولید می‌شود که ۹۰ درجه از B_s عقب‌تر است. طبق رابطه‌ی $T = -B_s B_w Sin\delta$ گشتاور پاد ساعت‌گرد ایجاد می‌شود.

درنهایت در **شکل (د)** مجدداً V و B_s هم‌جهت بوده و ولتاژ و جریان القایی صفر و T نیز صفر است.



t=3T/4	t=T/2	t=T/4	t=0
δ=-	δ=90	δ=-	δ=90
sinδ=-	sinδ=1	sinδ=-	sinδ=1
Te=0	$Te=-kB_sB_w$	Te=0	$Te=-kB_sB_w$
(د)	(ج)	(ب)	(الف)

شکل: یک سیکل در زمان راه‌اندازی موتور القایی

مشاهده شد در یک سیکل گشتاور یا صفر است یا پاد ساعت‌گرد که مقدار متوسط آن پادساعت‌گرد بوده و باعث حرکت روتور و راه‌اندازی آن می‌شود. در این حالت اگرچه روتور می‌چرخد اما هیچ‌گاه به سرعت B_s (سرعت سنکرون) نمی‌رسد، چون اگر به سرعت سنکرون برسد B_s در سیم‌پیچ‌ها ولتاژ و جریانی القا نمی‌کند و گشتاور صفر می‌شود. بنابراین سرعت چرخش روتور همیشه کمتر از سرعت میدان است.

مفهوم لغزش و سرعت میدان و سرعت چرخش در ماشین القایی:

وقتی روتور ساکن است میدان گردان با سرعت (n_s) سیم‌پیچ‌های روتور را قطع می‌کند و در روتور جریان القا می‌شود. این جریان‌ها یک میدان گردان (n_r) که برابر با (n_s) است به وجود می‌آورد که به علت وجود این ۲ میدان روتور گشتاور مثبت وارد می‌شود و روتور با سرعت (n_m) که کمتر از سرعت سنکرون است می‌چرخد.

روابط زیر بیان‌کننده‌ی کمیت‌های سرعت است:

$n_s = \frac{120}{P} f_s$ سرعت سنکرون میدان استاتور

p تعداد قطب

f_s فرکانس تغذیه استاتور

$n_s = n_r$ سرعت چرخش میدان روتور نسبت به بدنه ساکن استاتور:

$n_r = n'_r + n_m$ سرعت چرخش میدان روتور نسبت به خود روتور که در حال چرخش است n'_r

n_m سرعت چرخش روتور

بنابراین سرعت روتور بعلاوه سرعت میدان روتور نسبت به خود روتور ثابت است. یعنی سرعت روتور می‌تواند تغییر کند و سرعت میدان روتور نسبت به خود روتور نیز تغییر می‌کند. این قضیه مانند فردی در قطار درحال حرکت است. سرعت فرد شبیه سرعت چرخش روتور و سرعت قطار شبیه سرعت میدان روتور نسبت به خود است. درنهایت سرعت فرد نسبت به زمین ساکن که همان استاتور است، برابر با مجموع دو سرعت گفته شده است.

لغزش(s): لغزش یک معیار برای نشان دادن سرعت چرخش روتور نسبت به میدان استاتور است. هر چه بزرگ‌تر باشد یعنی سرعت روتور کمتر و هر چه کوچک‌تر باشد یعنی سرعت روتور بیشتر است. لغزش با روابط زیر بیان می‌شود. لغزش صفر یعنی سرعت برابر سرعت سنکرون و لغزش یک یعنی سرعت صفر (لحظه راه‌اندازی).

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s}$$

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s}$$

$$n_m = (1-s) n_s$$

$$n'_r = \frac{120}{P} f_r = n_s - n_m = s n_s = f_r = s f_s$$

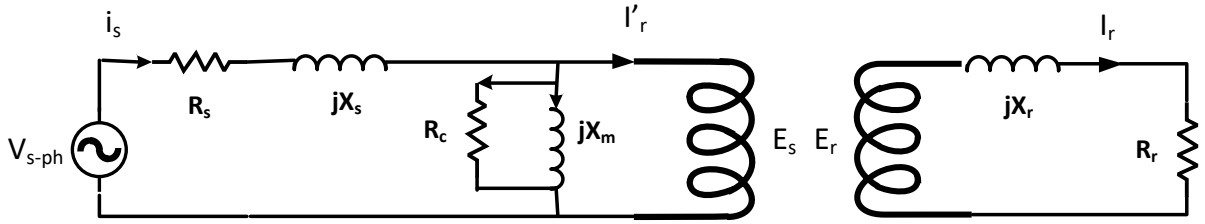
مثال۹) یک موتور القایی سه فاز ۵۰ هرتز دارای سرعت بار کامل 950 rpm است. تعداد قطب، لغزش و سرعت‌های مختلف را بدست آورید.

مدار معادل ماشین القایی

مدار معادل هر فاز موتور القایی شبیه ترانسفورماتور تکفاز است، البته با ۳ تفاوت زیر:

۱) بین اولیه و ثانویه فاصله هوایی وجود دارد.
۲) ثانویه (روتور) همیشه اتصال کوتاه است.
۳) فرکانس اولیه و ثانویه برابر نیست.

بنابراین مدار معادل یک‌فاز ماشین القایی به صورت زیر خواهد بود:



مدار معادل ماشین القایی

R_r مقاومت اهمی سیم‌پیچ روتور
X_r راکتانس پراکندگی سیم‌پیچ روتور
E_r ولتاژ القایی در سیم‌پیچ روتور
I_r جریان روتور
I'_r جریان روتور ارجاع شده به استاتور
X_m راکتانس مغناطیس شوندگی (کوچک‌تر از ترانس است چون به علت فاصله هوایی تزویج کمتر است)
R_c تلفات هسته (به علت فاصله هوایی بیشتر از ترانس)
R_s مقاومت اهمی سیم‌پیچ استاتور
X_s راکتانس پراکندگی سیم‌پیچ استاتور
I_s جریان استاتور (منبع)
$V_{s\text{-}ph}$ ولتاژ منبع (برای هر فاز)

با استفاده از مدار معادل جریان روتور (I_r) بدست می‌آید:

$$I_r = \frac{E_r}{R_r + jX_r}$$

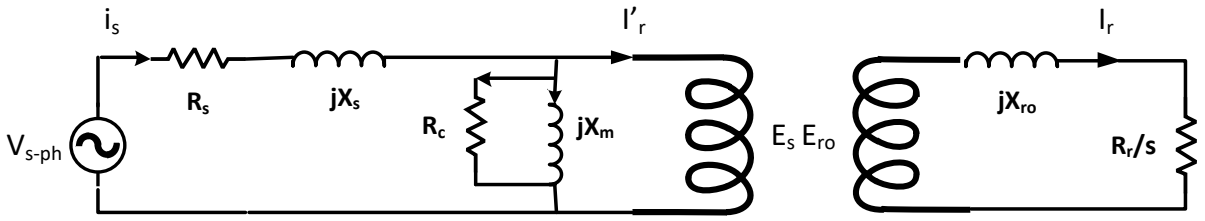
ولتاژ القایی روتور در حالت سکون (E_{ro}) را به این‌صورت تعریف کنیم $E_r = sE_{ro}$

$$I_r = \frac{sE_{ro}}{R_r + jsX_{ro}}$$

با تقسیم رابطه‌ی بالا بر s

$$I_r = \frac{E_{ro}}{\frac{R_r}{s} + jX_{ro}}$$

با استفاده از رابطه اخیر جریان می‌توان مدار معادل را به صورت زیر رسم کرد که راکتانس پراکندگی و ولتاژ روتور در حالت سکون هستند و مقاومت روتور وابسته به لغزش است. بنابراین این مقاومت متغیر می‌تواند نشان‌دهنده بار مکانیکی روی موتور باشد چون توان مصرف می‌کند و به سرعت وابسته است.

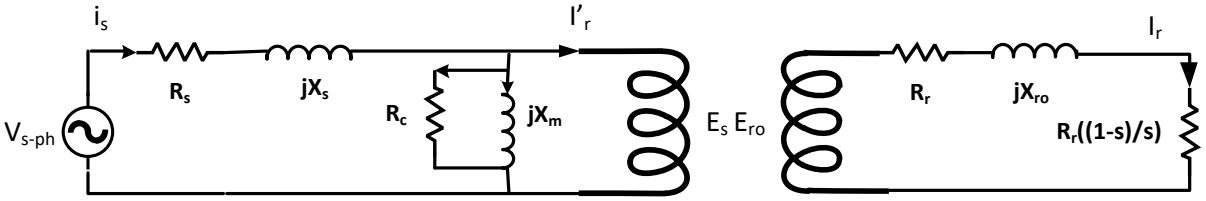


در مدل بالا مقاومت روتور دیگر وجود ندارد. اگر ($\frac{R_r}{s}$) با روابط ریاضی به‌صورت زیر نوشته شود، دو جمله بدست می‌آید که جمله اول همان مقاومت روتور و جمله‌ی دوم نشان‌دهنده‌ی توان مکانیکی است. مدار معادل نهایی به صورت زیر خواهد بود.

$$\frac{R_r}{s} = R_r + \frac{(1-s)}{s} R_r$$

$P_{cur} = R_r I_r^{\,2}$ توان تلفاتی روتور

$$P_m = \frac{(1-s)}{s} R_r I_r^{\,2}$$



نکته) ملاحظه می‌شود که توان مکانیکی متناظر با $\frac{1-s}{s}$ است. یعنی اگر s منفی باشد، این مقدار منفی شده و توان مکانیکی نیز منفی می‌شود. به‌عبارت‌دیگر توان تولید می‌کند که به این حالت، مد ژنراتوری گفته می‌شود و زمانی رخ می‌دهد که s منفی باشد. با استفاده از رابطه‌ی لغزش $s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s}$ مشاهده می‌شود زمانی s منفی است که $\omega_m > \omega_s$ باشد. بنابراین برای تولید توان توسط ماشین القایی باید روتور آن با سرعتی بیش از سرعت سنکرون **چرخانده** شود.

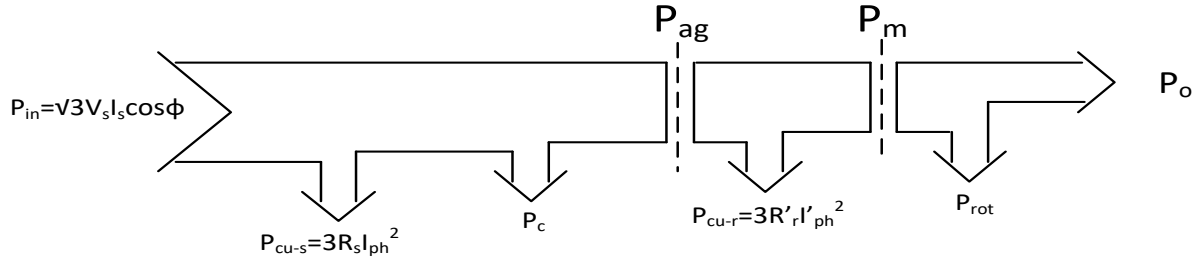
معادلات توان و بازده در موتورهای القایی:

توان ورودی به موتور القایی با استفاده از ولتاژ خط ورودی، جریان خط کشیده شده از منبع و ضریب توان به صورت ۳ فاز با استفاده از رابطه زیر بیان می‌شود:

$$P_{in} = \sqrt{3} V_s I_s \cos\varphi$$

مقداری از این توان در سیم‌پیچ‌های استاتور به علت مقاومت آنها و مقداری در هسته تلف می‌شود که P_{cus} و P_c نام دارند. قدرت مفید بعد از کم شدن این دو مقدار که در فاصله هوایی به روتور منتقل می‌شود با P_g یا P_{ag} بیان می‌شود. این توان از فاصله هوایی عبور کرده و مقداری از آن به صورت تلفات سیم‌پیچ روتور P_{cur} یعنی هدر می‌رود. باقی‌مانده

توان انتقال یافته به روتور به توان مکانیکی P_m تبدیل می‌شود. از این توان نیز توان تلفاتی گردشی P_{rot} کم شده و درنهایت توان خروجی P_o حاصل می‌شود. شکل زیر دیاگرام این تبدیل توان را نشان می‌دهد.



$$P_g = P_{in} - P_{cus} - P_c$$

$$P_g = P_{cur} + P_m \Rightarrow P_g = 3R'_r I'^2_r + 3R'_r (\frac{1-s}{s}) I'^2_r = 3\frac{R'_r}{s} I'^2_r$$

$$P_m = P_o + P_{rot}$$

علاوه بر روابط بالا چند رابطه برای ارتباط این کمیت‌ها نیز به صورت زیر قابل اثبات است:

$$P_{cur} = sP_g$$

$$P_m = (1-s)P_g$$

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

$$\Rightarrow P_m = \frac{\omega_m}{\omega_s} P_g$$

مثال۱۰) یک موتور القایی سه فاز ۵۰۰ ولت ۵۰ هرتز و شش قطب با سرعت ۹۵۰ دور در دقیقه و ضریب توان $\frac{\sqrt{3}}{3}$ قدرت خروجی ناخالص ۱۹ کیلووات را تحویل می‌دهد. اگر تلفات کل استاتور ۵۰۰ وات باشد، جریان گرفته شده از منبع چقدر است؟

نکته: تلفات گردشی داده نشده است بنابراین قدرت خروجی ناخالص P_m است.

بازده

بازده یک دستگاه به نسبت توان خروجی به توان ورودی آن و نشان‌دهنده درصد تبدیل انرژی ورودی به خروجی است:

$$\eta\% = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{P_o}{P_o + P_{loss}} \times 100 = \frac{P_o}{P_o + P_{cus} + P_c + P_{cur} + P_{rot}} \times 100$$

نکته) اگر موتور بی‌بار کار کند همه‌ی توان ورودی آن صرف تلفات هسته می‌شود بنابراین می‌توان گفت تلفات بی‌باری با تلفات هسته برابر است.

مثال۱۱) توان ورودی یک موتور القایی سه فاز ۵۰ هرتز ۶ قطب در سرعت ۹۷۰ دور در دقیقه برابر ۵۰ کیلووات است. اگر تلفات اهمی استاتور یک کیلووات و تلفات گردشی ۱.۶ کیلووات باشد، راندمان این موتور چقدر است؟

گشتاور ماشین القایی

گشتاور توانایی ماشین را برای به چرخش درآوردن اجسام با توجه به وزن جسم مشخص می‌کند. نکته دیگر اینکه گشتاور در حرکت‌های چرخشی مطرح است و در حرکت خطی صرفاً نیرو معنا دارد. به‌عبارت‌دیگر گشتاور کمیتی برداری است و مقدار آن از حاصل‌ضرب بزرگی نیرو در فاصله از مرکز به دست می‌آید. واحد آن در سیستم SI نیوتن متر N.m می‌باشد. همان‌طور که در حرکت خطی توان برابر با ضرب نیرو در سرعت می‌شود، در حرکت چرخشی توان برابر با حاصل‌ضرب گشتاور در سرعت زاویه‌ای است که به صورت زیر بیان می‌شود.

برای گشتاور الکترومغناطیسی داریم:

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_m}$$

$$T_e = \frac{(1-s)P_g}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_g}{\omega_s}$$

و برای گشتاور خروجی یا گشتاور روی محور:

$$T_e = \frac{P_o}{\omega_m} = \frac{P_o}{(1-s)\omega_s}$$

نکته) در روابط بالا ω_m و ω_s باید برحسب rad/s باشند.

با توجه به مدار معادل ماشین القایی که مقادیر روتور به سمت استاتور ارجاع داده شده‌اند، جریان روتور ارجاع داده شده به سمت استاتور برابر با ولتاژ ورودی تقسیم بر کلیه امپدانس‌های موجود در مدار است:

$$I'_r = \frac{V}{(R_s + \frac{R_r}{s}) + j(X_s + X'_r)}$$

از طرفی داریم:

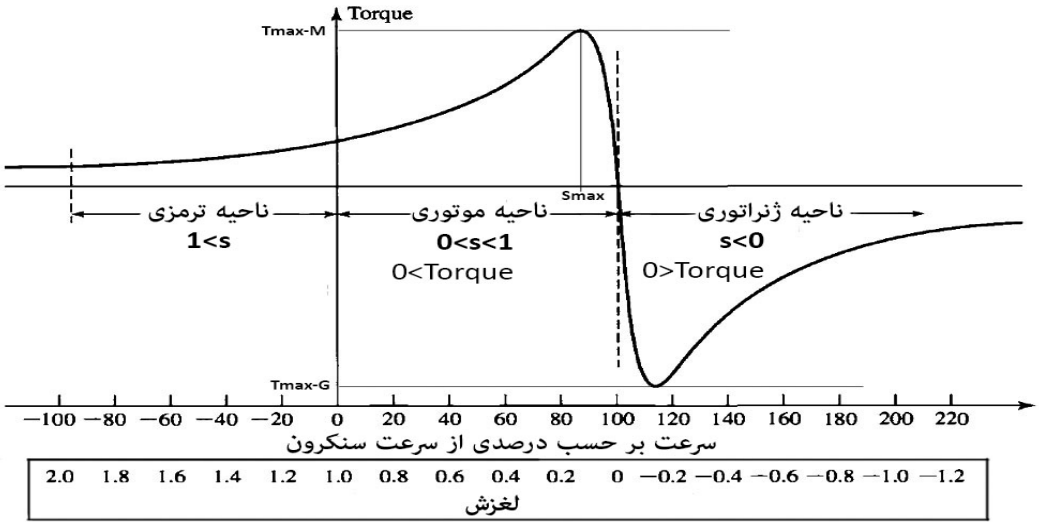
$$T_e = \frac{P_g}{\omega_s} = \frac{1}{\omega_s} 3 \frac{R'_r}{s} I'^2_r$$

با جایگذاری جریان روتور در رابطه بالا

$$T_e = \frac{3}{\omega_s} \frac{R'_r}{s} \frac{V^2}{(R_s + \frac{R'_r}{s})^2 + (X_s + X'_r)^2}$$

رابطه بالا فرمول گشتاور نام دارد که متغیر آن سرعت $\omega_m = (1-s)\omega_s$ یا لغزش s است. اگر این رابطه را برحسب این دو کمیت رسم کنیم منحنی گشتاور به صورت زیر بدست می‌آید.

جایی که گشتاور مثبت است حالت موتور خواهد بود که در بازه لغزش بین صفر تا ۱ بدست می‌آید. گشتاور منفی حالت ژنراتوری را نشان می‌دهد که در لغزش منفی یعنی کوچک‌تر از صفر رخ می‌دهد. برای لغزش‌های بزرگ‌تر از ۱ حالت کار ترمزی را خواهیم داشت.



شکل (۴-۸): نمودار گشتاور- سرعت (لغزش) ماشین القایی

✓ چند رابطه مهم با صرف‌نظر از امپدانس استاتور

درصورتی‌که از امپدانس استاتور صرف‌نظر شود روابط ساده‌تر شده و در حل مسائل مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱- مقدار لغزش گشتاور ماکزیمم: $s_{T\max} = \pm \frac{R'_r}{X'_r}$

۲- رابطه گشتاور حداکثر: $T_{\max} = \frac{3}{2\omega_s} \frac{V^2}{X'^2_r}$

۳- نسبت گشتاور در لغزش دلخواه به گشتاور ماکزیمم: $\frac{T_e}{T_{\max}} = \frac{2}{\frac{s_{T\max}}{s} + \frac{s}{s_{T\max}}}$

کنترل مشخصه گشتاور- سرعت موتور القایی

روش‌های مختلفی به‌منظور کنترل گشتاور تولیدی و سرعت چرخش موتور القایی وجود دارد که در این بخش به ۳ روش اصلی آن اشاره خواهد شد.

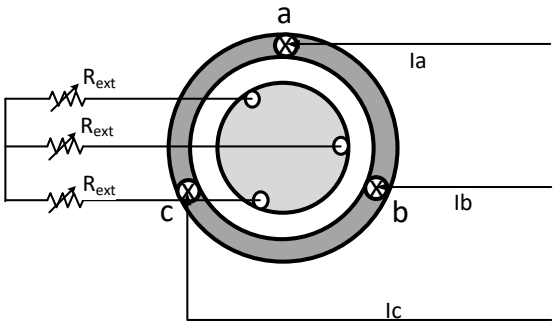
۱- اضافه کردن مقاومت در مدار روتور

۲- تغییر ولتاژ ورودی

۳- تغییر فرکانس

۱- استفاده از مقاومت در مدار روتور

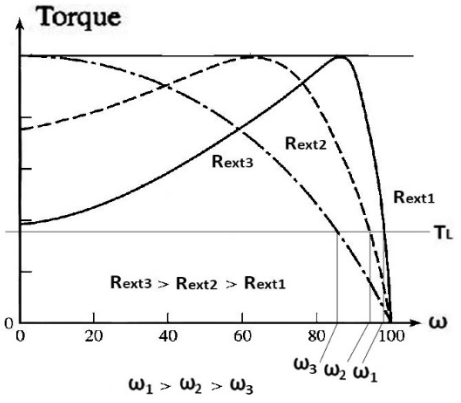
با استفاده از ۳ رِئوستا و حلقه لغزان و جاروبک، ۳ مقاومت خارجی طبق شکل زیر به مدار روتور افزوده می‌شود. لازم به ذکر است این کار تنها برای روتور سیم‌پیچی شده قابل انجام است و این روش برای روتور قفس سنجابی قابلیت استفاده ندارد.



اضافه کردن مقاومت به مدار روتور

با این کار مقدار مقاومت روتور از R_r به R_r+R_{ext} تغییر کرده و مشخصه گشتاور- سرعت نیز تغییر می‌کند. یعنی هم گشتاور راه‌اندازی و هم سرعت چرخش در بار ثابت تغییر می‌کند. رابطه گشتاور با اضافه کردن مقاومت به روتور و منحنی گشتاور برای سه مقدار مختلف در شکل زیر رسم شده است.

$$T_e = \frac{3}{\omega_s}\frac{R'_r+R'_{ext}}{s}\frac{V^2}{(R_s+\frac{R'_r+R'_{ext}}{s})^2+(X_s+X'_r)^2}$$



تغییر مشخصه گشتاور-سرعت با اضافه کردن مقاومت به مدار روتور

با افزایش مقاومت روتور s_{Tmax} افزایش می‌یابد و به یک نزدیک می‌شود. این بدان معنی است که می‌توان گشتاور راه‌اندازی را افزایش داد و با افزایش مقاومت کاری کرد که گشتاور حداکثر در لحظه راه‌اندازی رخ دهد. برای این کار باید $s_{Tmax}=1$ شود. بنابراین مقدار مقاومت به صورت زیر بدست می‌آید:

$$s_{T\max}=1\Rightarrow\frac{R'_r+R'_{ext}}{\sqrt{R_s{}^2+(X_s+X'_r)^2}}=1\rightarrow R'_{ext}=?$$

R'_{ext} مقاومت ارجاع شده به استاتور

با صرف‌نظر از امپدانس استاتور

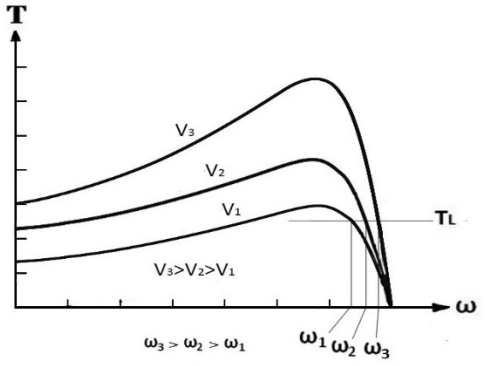
$$s_{T\max}=1\Rightarrow\frac{R'_r+R'_{ext}}{X'_r}=1\rightarrow R'_{ext}=?$$

نکته) لازم به ذکر است که R_{ext} مقاومت اضافه شده به روتور و R'_{ext} مقاومت ارجاع شده به استاتور است که در روابط ظاهر می‌شود و از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$R'_{ext}=\frac{N_s}{N_r}R_{ext}$$

۲- تغییر ولتاژ ورودی

با توجه به اینکه گشتاور با مجذور سرعت رابطه مستقیم دارد، با افزایش ولتاژ گشتاور نیز افزایش می‌یابد. البته با توجه با محدودیت‌های ماشین و عایق آن و مقدار شار تولیدی که با ولتاژ رابطه دارد نمی‌توان بیش از ۲۰ درصد ولتاژ را افزایش داد. علاوه بر این مشاهده می‌شود سرعت نیز با افزایش ولتاژ بیشتر می‌شود. همچنین با افزایش ولتاژ گشتاور ماکزیمم و گشتاور راه‌اندازی نیز افزایش می‌یابند. در شکل زیر افزایش ولتاژ برای ۳ ولتاژ مختلف و نمودار گشتاور متناظر هرکدام نشان داده شده است.

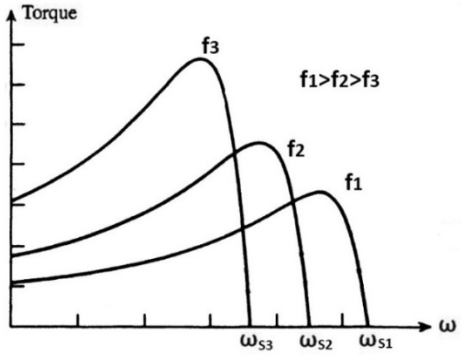


تغییر مشخصه گشتاور-سرعت با افزایش ولتاژ

نکته) سرعت سنکرون با دو روش قبل تغییری نمی‌کند، چون تنها به فرکانس و تعداد قطب بستگی دارد.

۳- تغییر فرکانس

مشخصه گشتاور- سرعت با فرکانس رابطه عکس دارد. بنابراین با تغییر فرکانس می‌توان مشخصه را تغییر داد و سرعت و گشتاور را کنترل کرد. با افزایش فرکانس سرعت سنکرون افزایش می‌یابد و ممکن است موتور توانایی سرعت‌های بالا از لحاظ مکانیکی را نداشته باشد. با کاهش فرکانس سرعت سنکرون و به‌تبع آن سرعت چرخش کاهش می‌یابد و گشتاور ماکزیمم و گشتاور راه‌اندازی افزایش خواهد یافت که در شکل زیر قابل مشاهده است.



تغییر مشخصه گشتاور-سرعت با کاهش فرکانس

نکته مهم) ازآنجاکه فرکانس و ولتاژ موجب تغییر شار می‌شود و آثار نامطلوبی مانند اشباع برای ماشین دارد طبق رابطه‌ی زیر اگر ولتاژ و فرکانس به‌طور هم‌زمان تغییر کند مقدار شار ثابت می‌ماند.

$$V = 4.44N\varphi F \longrightarrow \varphi = \frac{V}{F}\frac{1}{4.44N} \longrightarrow \varphi \sim \frac{V}{F}$$

بنابراین برای کنترل سرعت و گشتاور نسبت V/F توأمان تغییر داده می‌شود که اثر دو مورد قبل را به صورت هم‌زمان خواهد داشت و توسط درایو قابل انجام است.

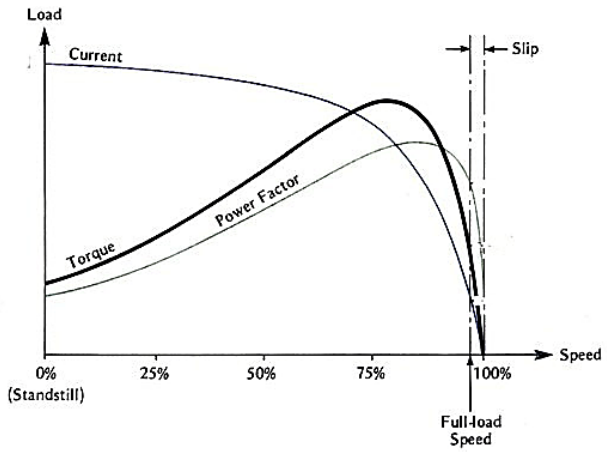
۱۳-۴- راه‌اندازی موتور القایی:

طبق معادله جریان که از مدار معادل بدست آمده است در زمان کارکرد عادی موتور سرعت نزدیک سرعت سنکرون و لغزش نزدیک به صفر است. در این حالت مخرج رابطه جریان بزرگ بوده و جریان کوچک و مقدار نامی است.

در لحظه راه‌اندازی سرعت صفر و لغزش برابر ۱ است بنابراین مخرج کوچک و جریان در این لحظه مقدار بزرگی دارد که ممکن است به موتور آسیب برساند. بنابراین باید توسط روش‌هایی این جریان راه‌اندازی بالا را محدود کنیم، که در ادامه به چند روش اشاره خواهد شد.

$$I'_r = \frac{V}{(R_s + \frac{R_r}{s}) + j(X_s + X'_r)}$$

در حالت کار عادی لغزش کوچک، $\frac{R'_r}{s}$ بزرگ و جریان کم است. در راه‌اندازی لغزش بزرگ، $\frac{R'_r}{s}$ کم و جریان زیاد است. در شکل زیر جریان در لحظه راه اندازی را نشان میدهد.



۱- راه‌اندازی مستقیم

در این حالت از هیچ روشی استفاده نمی‌شود و موتور مستقیماً به منبع متصل است، بنابراین جریانی بین ۵ تا ۷ برابر جریان نامی از منبع می‌کشد.

رابطه‌ی بین گشتاور و جریان در لحظه راه‌اندازی و لغزش دلخواه به صورت زیر است.

$$\frac{T_{st}}{T} = \left(\frac{I_{st}}{I}\right)^2 s$$

اگر در این حالت ولتاژ نامی موتور اعمال شود جریان راه‌اندازی برابر جریان اتصال کوتاه یا همان جریان روتور قفل شده است.

$$I_{st} = I_{SC} = I_{br} = \frac{V_{br}}{Z_{br}}$$

اما اگر ولتاژ نامی اعمال نشود و ولتاژ اعمالی k برابر ولتاژ نامی باشد، جریان راه‌اندازی k برابر جریان اتصال کوتاه یا جریان روتور قفل شده خواهد بود.

$$V = kV_n \Rightarrow I_{st} = kI_{SC} = kI_{br} = \frac{kV_n}{Z_{br}}$$

۲- راه‌اندازی به کمک اتو ترانس

در این حالت ابتدا با استفاده از یک اتوترانس با نسبت تبدیل کوچک‌تر از یک $k < 1$ ولتاژ را کم کرده و به موتور اعمال می‌شود.

$$V_{st} = kV_n$$

چون ولتاژ کاهش یافته جریان نیز به همان نسبت کاهش می‌یابد.

$$I_{st} = kI_n$$

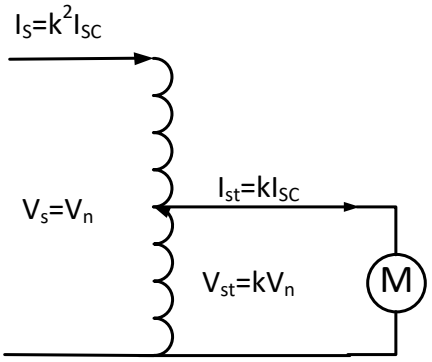
و گشتاور در این حالت

$$\frac{T_{st}}{T} = k^2\left(\frac{I_{st}}{I}\right)^2 s$$

بنابراین با وجود اینکه برای جلوگیری از صدمه دیدن موتور جریان راه‌اندازی کم می‌شود اما گشتاور راه‌اندازی نیز با مجذور نسبت تبدیل کاهش می‌یابد که باعث می‌شود موتور کندتر سرعت بگیرد.

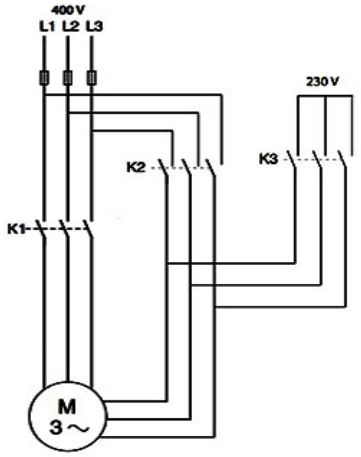
$$\frac{T_{st-AUTO}}{T_{st-Direct}} = k^2$$

نکته) در این حالت گفته شد جریان راه‌اندازی $k < 1$ برابر جریان راه‌اندازی حالت مستقیم می‌شود. همچنین در این روش جریان کشیده شده از منبع چون در طرف اولیه اتو ترانس است یک بار دیگر k برابر شده و k^2 برابر کاهش می‌یابد.



۳- راه‌اندازی به روش ستاره مثلث

پایانه‌های سیم‌پیچ‌های استاتور موتور در ابتدا ستاره بسته می‌شود تا راه‌اندازی شود، سپس به مثلث تغییر داده می‌شوند. بنابراین ولتاژ اعمالی به هر فاز در ابتدا در اتصال ستاره $\frac{1}{\sqrt{3}}$ برابر ولتاژ خط است. درنتیجه جریان راه‌اندازی $\frac{1}{\sqrt{3}}$ برابر جریان راه‌اندازی مستقیم می‌شود. بعدازاینکه موتور راه‌اندازی شد اتصال آن را به حالت مثلث تغییر می‌دهیم. در واقع می‌توان گفت این روش شبیه اتوترانس است که نسبت تبدیل آن $k=\frac{1}{\sqrt{3}}$ است. در شکل زیر اتصالات این روش با استفاده از ۳ کنتاکتور سه فاز نشان داده شده است. کنتاکتور اول تغذیه اصلی را وصل می‌کند، کنتاکتور شماره ۲ اگر وصل باشد اتصال مثلث و کنتاکتور شماره ۳ اگر وصل باشد اتصال ستاره خواهد بود.



روابط جریان و گشتاور نیز به صورت زیر است:

$$\frac{T_{st}}{T}=\frac{1}{3}\left(\frac{I_{st}}{I}\right)^2 s$$

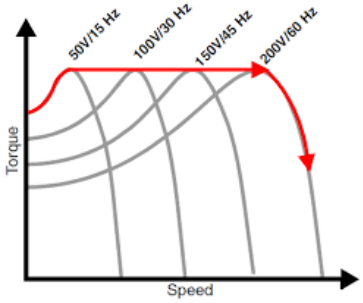
$$I_{st}=\frac{1}{\sqrt{3}}I_{SC}$$

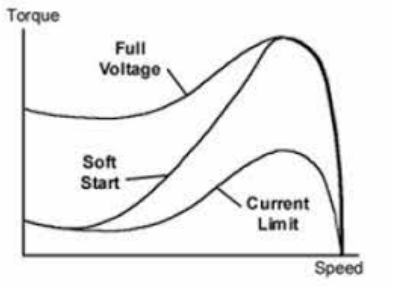
۴- راه اندازی به کمک سافت استارتر و درایو

سافت استارتر و درایو از تجهیزات جدید برای راه اندازی و کنترل موتورهای القایی هستند. در این دو تجهیز به کمک سویچ های الکترونیک قدرت ولتاژ تنظیم میشود. سافت استارتر فقط در زمان راه‌اندازی و توقف موتور در مدار است ولی درایو می‌تواند کنترل صفر تا صد موتور را بر عهده بگیرد. در واقع سافت استاتر با کنترل ولتاژ در زمان استارت گشتاور را کنترل کرده و از افزایش ناگهانی جریان جلوگیری میکند اما درایو با کنترل ولتاژ و فرکانس کنترل بیشتری بر روی موتور و گشتاور تولیدی آن دارد. نمودار گشتاور سرعت موتور بعد از استفاده از این دو تجهیز در شکل زیر نشان داده شده است.

VFD
Variable Frequency Drive

SOFT
Starter





مثال۱۲) یک موتور القایی سه فاز ۶۰هرتز، ۶قطب، ۶۳کیلووات و ۴۲۰ولت دارای لغزش 4% و بازده 80% و ضریب توان $\frac{\sqrt{3}}{2}$ پس فاز در بار کامل است. جریان راه‌اندازی این موتور ۷ برابر جریان نامی است.

الف) اگر این موتور با اتوترانس راه‌اندازی شود ولتاژی که باید به موتور اعمال نمود تا گشتاور راه‌اندازی برابر گشتاور نامی شود چقدر است؟

ب) جریان راه‌اندازی چقدر است؟

- پلاک یک موتور القایی

جدول: توضیحات موارد نوشته شده روی پلاک موتور القایی

توضیحات	کد روی پلاک
ولتاژ اسمی پایانه	Volts
نوع موتور	Type
جریان تغذیه اسمی	Amps
خروجی اسمی موتور به واحد اسب بخار	H.P.
سرعت در بار نامی (دور بر دقیقه)	R.P.M
فرکانس تغذیه	Hretz
ابعاد فیزیکی خارجی موتور طبق استانداردهای NEMA	Frame
حالت کار موتور. در شکل بالا یعنی مداوم و پیوسته.	Duty
تاریخ ساخت.	Date
کلاس عایقی که برای ساختمان موتور بکار رفته است. (حداکثر دمای قابل تحمل)	Class Insulation
کلاس طراحی NEMA را مشخص می‌کند.	NEMA Design
ضریبی است که مشخص می‌کند موتور چقدر میتواند اضافه بار داشته باشد	Service Factor
بازده در بار نامی	Nom. Eff.
تعداد فازهای استاتور موتور را مشخص می کند.	PH
تعداد قطبهای موتور را مشخص می کند.	Pole
استاندارد ایمنی موتور	
نوع سیم‌پیچی ستاره یا مثلث: Y ستاره	Y