درس‌های: ماشین‌های الکتریکی سه فاز و ماشین‌های الکتریکی

مقطع: کاردانی

Lec.: *Hojat Moayedirad*, Ph.D. of Electrical Power Engineering, 2018, ***Email***: *hojatrad@yahoo.com*

Home pages:

https://scholar.google.com/citations?user=V28m4S4AAAAJ&hl=en

https://orcid.org/0000-0001-9803-9306

نکات مهم:

۱- با توجه به عدم برگزاری حضوری کلاس‌ها در سال ۹۸، دانشجویان بایستی مطالب درسی بارگذاری شده بر روی سایت را دانلود کرده و مطالعه نمایند و **تمرین‌ها** را انجام داده و در اولین جلسه‌ی حضوری در سال ۹۹ تحویل دهند.

۲- در دومین جلسه‌ی حضوری در سال ۹۹، از شش جلسه‌ی اول درس، کوئیزی در سطح آشنایی با مفاهیم شش جلسه‌ی اول گرفته می‌شود که نمره‌ی آن در نمره‌ی تمرین‌های تحویلی شش جلسه‌ی اول، **ضرب** می‌شود و نمره‌ی حاصل به عنوان نمره‌ی تمرین‌های تحویلی بخش اول، منظور می‌شود.

۳- با توجه به امکانات پیام رسان **Skype** (https://www.skype.com) نظیر ارتباط ویدئو کنفرانسی، دانشجویان تا زمان برگزاری حضوری کلاس‌ها می‌توانند از جهت رفع ابهام و توضیح بیشتر مطالب درس، در روزهای جمعه و دوشنبه‌ی هر هفته از ساعت ۳ الی ۴:۳۰ بعدازظهر از طریق اسکایپ با اینجانب ارتباط برقرار کنند. در صورت سوال، دانشجویان می‌توانند از طریق ایمیل با اینجانب در ارتباط باشند.

My Skype name: hojatrad

آرم دانشگاه فنی و حرفه ای: تصویر پروفایل

مراجع:

۱– مبانی ماشین های الکتریکی، مؤلف: چاپمن

۲– ماشین های الکتریکی (تحلیل، بهره‌برداری و کنترل)، مؤلف: پ. س. سن

۳– ماشین های الکتریکی (تئوری، عملکرد و کاربردها)، مؤلف: بیم بهارا

۴– ماشین های الکتریکی، مؤلف: ال هاواری

۵– ماشین های الکتریکی، مؤلف: فیتزجراد

بارم بندی:

بارم بندی				
پایان ترم	فعالیت های کلاسی (۵ نمره)			جمع بارم
	کوئیز	تمرین‌های تحویلی	پروژه	۲۰ نمره
۱۵نمره	۲ نمره	۲ نمره	۱ نمره	

توجه: نمره‌ی کوئیز دومین جلسه‌ی حضوری در سال ۹۹، جزو ۲ نمره‌ی کویز که در جدول بالا آمده است، نیست و آن کوئیز صرفاً برای راستی آزمایی تمرین‌های پاسخ داده شده توسط دانشجویان است.

توجه: در سومین جلسه‌ی حضوری در سال ۹۹، **اولین** کوئیز رسمی برگزار می‌شود که جزو ۲ نمره‌ی کویز که در جدول بالا آمده است، می‌باشد.

توجه: یک نمره از ۵ نمره‌ی سرکلاسی اختصاص به پروژه دارد. پروژه‌ها در اولین جلسه‌ی حضوری در سال ۹۹ تعیین می‌شوند.

فهرست مطالب

جلسه اول

فصل اول: آشنایی با مدارهای مغناطیسی

فصل دوم: ماشین‌های جریان مستقیم

فصل سوم: ماشین‌های الکتریکی سه فاز آسنکرون (القایی)

فصل چهارم: ماشین‌های الکتریکی سه فاز سنکرون

فصل پنجم: ترانسفورماتورها

جلسه اول

فصل اول: آشنایی با مدارهای مغناطیسی

۱-۱- آشنایی با اصطلاحات:

– شار (FLUX):

❖ شار در یک مدار مغناطیسی مشابه جریان در یک مدار الکتریکی است و واحد آن وبر (wb) است. شار یک مسیر بسته را طی می کند.

– چگالی شار :

❖ مقدار شاری است که از سطحی به مساحت A که عمود بر شار است عبور می‌کند.

$$B = \frac{\phi \, \mathrm{Wb}}{\mathrm{A} \, \mathrm{m}^2} \quad [\text{or tesla (T)}]$$

– نیروی محرکه‌ی الکتریکی (EMF):

❖ عامل بوجود آورنده‌ی جریان الکتریکی را نیروی محرکه الکتریکی می گویند که معادل ولتاژ است.

– نیروی محرکه‌ی مغناطیسی(MMF):

❖ خاصیتی است که در اثر عبور جریان الکتریکی از سیم پیچ، در فضای اطراف آن ایجاد می شود و بر عقربه‌ی مغناطیسی تاثیر گذاشته و باعث انحراف آن می گردد. عامل بوجود آورنده‌ی این خاصیت را نیروی محرکه‌ی مغناطیسی گویند.

فصل اول: آشنایی با مدارهای مغناطیسی

۱-۱- آشنایی با اصطلاحات:

– نیروی محرکه‌ی مغناطیسی(MMF):

❖ خاصیتی است که در اثر عبور جریان الکتریکی از سیم پیچ، در فضای اطراف آن ایجاد می شود و بر عقربه‌ی مغناطیسی تاثیر گذاشته و باعث انحراف آن می گردد. عامل بوجود آورنده‌ی این خاصیت را نیروی محرکه‌ی مغناطیسی گویند.

– مدار مغناطیسی:

❖ مسیر کامل و بسته خطوط شار، مدار مغناطیسی نامیده می شود.

– جریان تحریک :

❖ جریان لازم برای ایجاد شار در مدار مغناطیسی را جریان تحریک می‌نامند.

فصل اول: آشنایی با مدارهای مغناطیسی

* در یک مدار الکتریکی جریان بعلت وجود نیروی محرکه الکتریکی (emf) عبور می‌کند.
* در مغناطیس شار مغناطیسی در مدار مغناطیسی (mmf) بوجود می‌آید. (بجای آمپرات)
* mmf با جریان عبوری از یک یا چند دور سیم، حاصل می‌شود.

$$\overrightarrow{mmf} = NI$$

شدت میدان مغناطیسی (H): mmf بر واحد طول مدار مغناطیسی H نام دارد.

$$H = \frac{mmf}{l} = \frac{NI}{l}$$

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ← ضریب نفوذپذیری مغناطیسی

چگالی مغناطیسی (B): $B = \mu_0 . H$

مقاومت مغناطیسی (رلوکتانس): $Rm = \frac{l}{\mu . A}$ $\left(\frac{AT}{wb}\right)$ $\left(\frac{\text{آمپر-دور}}{\text{وبر}}\right)$

هدایت مغناطیسی (پرمانس): $P = \frac{1}{Rm}$ (Permeance) /PɜrmIəns/

شار مغناطیسی ≡ جریان الکتریکی

$$\begin{cases} I = \frac{emf\ (\text{ولتاژ})}{R} \\ \varphi = \frac{mmf}{Rm} \end{cases}$$

شار حلقه: $\lambda = N\varphi = L.i$

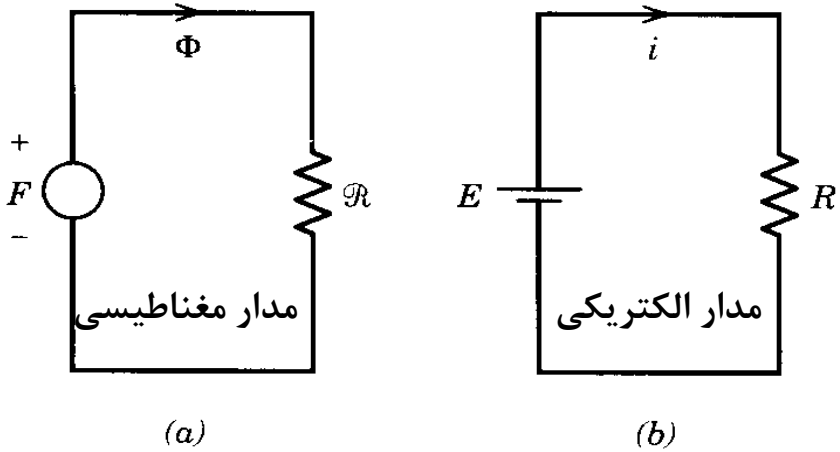
{ emf : نیروی محرکه الکتریکی واحدش ولت است.
mmf : مغناطیسی ″ ″ آمپر است. }

فصل اول: آشنایی با مدارهای مغناطیسی

۱-۲- تحلیل مدارهای مغناطیسی:

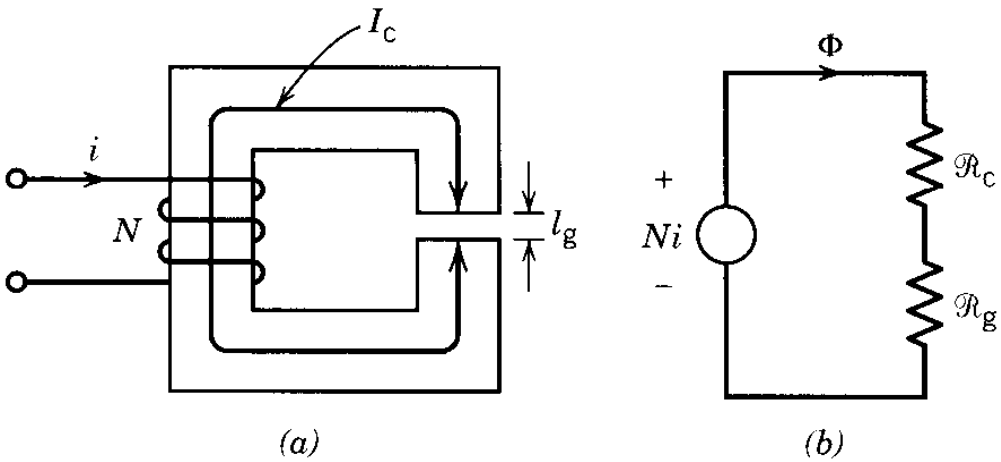
– تشابه میان مدار مغناطیسی و مدار الکتریکی:

نکته: عایق الکتریکی داریم اما عایق مغناطیسی وجود ندارد.



(a) (b)

– مدار مغناطیسی با فاصله هوایی:



(a) هسته مغناطیسی با فاصله هوایی

(b) مدار معادل مغناطیسی

- ✓ شکاف هوایی را با مقاومت مغناطیسی متناظر با آن مدل می‌کنیم.

$$\Phi = \frac{Ni}{\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g}$$

$$\mathcal{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g}$$

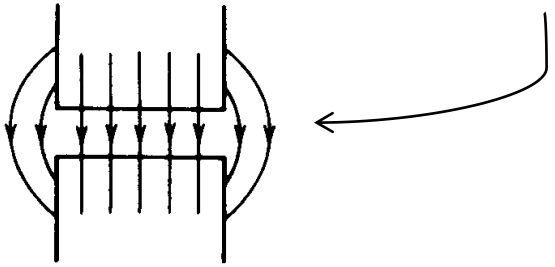
$$\mathcal{R}_c = \frac{l_c}{\mu_c A_c}$$

فصل اول: آشنایی با مدارهای مغناطیسی

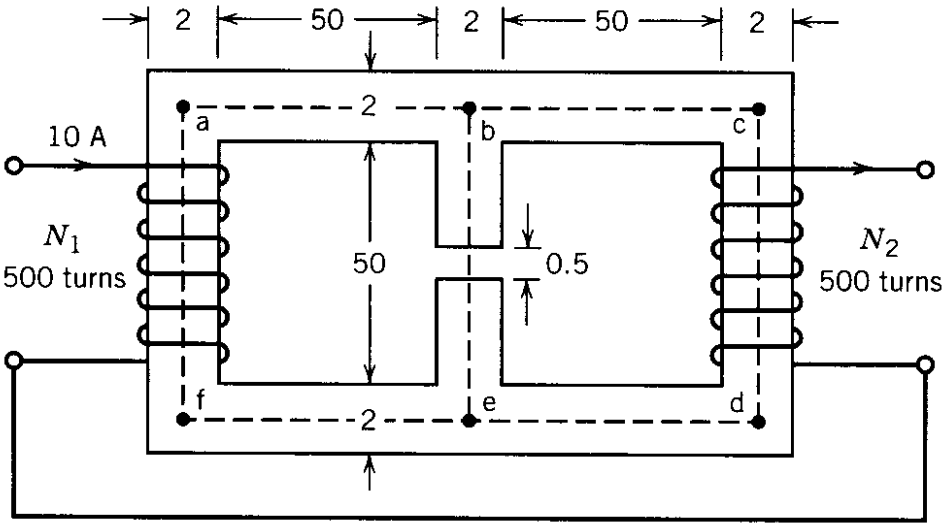
جلسه دوم

۱-۱- آشنایی با اصطلاحات:

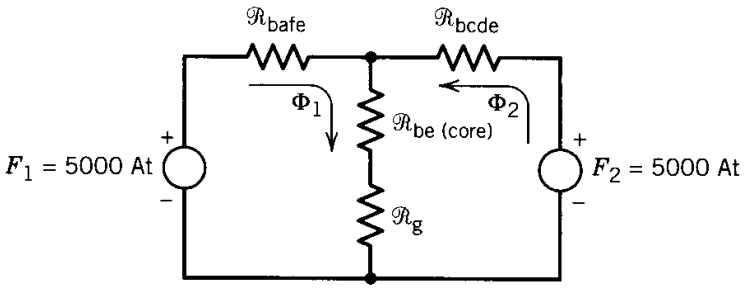
نکته: در فاصله هوایی خطوط شار اندکی به بیرون خمیده می‌شوند، این پدیده را خمیدگی شار یا نشتی شار می‌نامند.



مثال: مدار مغناطیسی شکل زیر مفروض است. مطلوب است محاسبه‌ی شار، چگالی شار و شدیت میدان مغناطیسی در فاصله هوایی. (ضریب نفوذپذیری هسته ۱۲۰۰ است.)



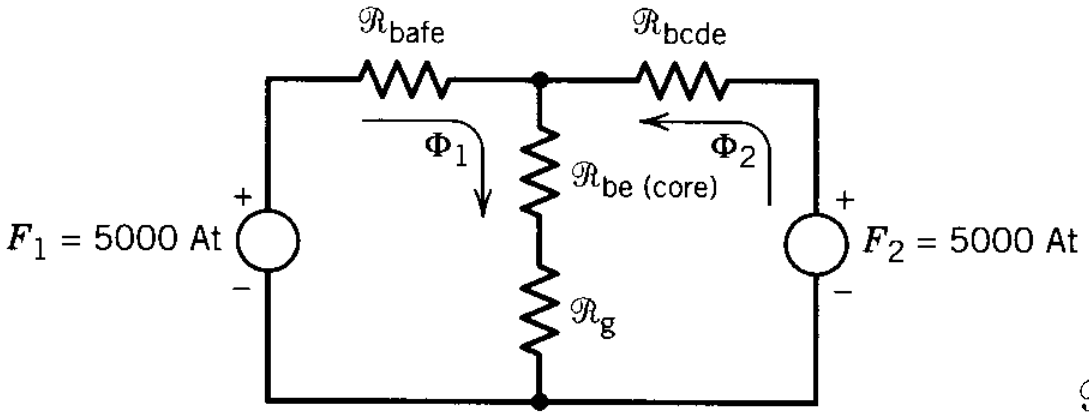
حل:



فصل اول: آشنایی با مدارهای مغناطیسی

۱-۲- تحلیل مدارهای مغناطیسی:

حل:



$$F_1 = N_1 I_1 = 500 \times 10 = 5000 \text{ At}$$

$$F_2 = N_2 I_2 = 500 \times 10 = 5000 \text{ At}$$

$$\mu_c = 1200\mu_0 = 1200 \times 4\pi 10^{-7}$$

$$\mathcal{R}_{bafe} = \frac{l_{bafe}}{\mu_c A_c}$$

$$= \frac{3 \times 52 \times 10^{-2}}{1200 \times 4\pi 10^{-7} \times 4 \times 10^{-4}}$$

$$= 2.58 \times 10^6 \text{ At/Wb}$$

$$\mathcal{R}_{bcde} = \mathcal{R}_{bafe}$$

$$\mathcal{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g}$$

$$= \frac{5 \times 10^{-3}}{4\pi 10^{-7} \times 2 \times 2 \times 10^{-4}}$$

$$= 9.94 \times 10^6 \text{ At/Wb}$$

$$\mathcal{R}_{be(core)} = \frac{l_{be(core)}}{\mu_c A_c}$$

$$= \frac{51.5 \times 10^{-2}}{1200 \times 4\pi 10^{-7} \times 4 \times 10^{-4}}$$

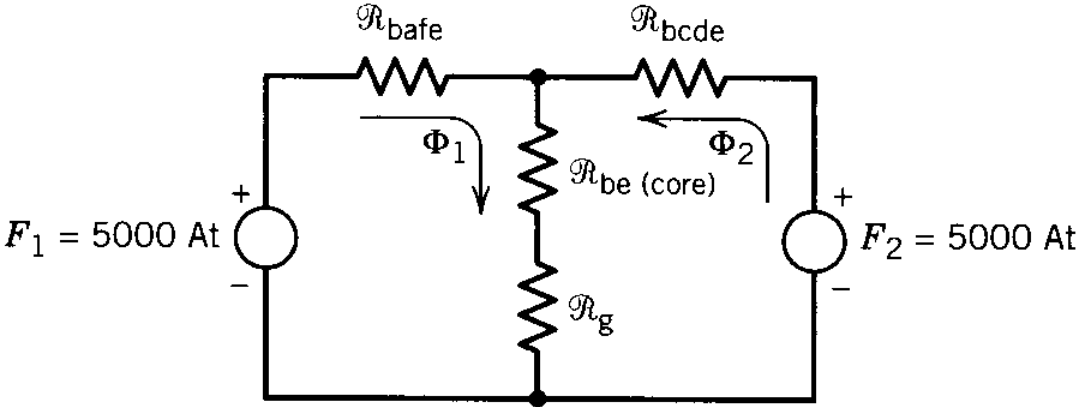
$$= 0.82 \times 10^6 \text{ At/Wb}$$

فصل اول: آشنایی با مدارهای مغناطیسی

۱-۲- تحلیل مدارهای مغناطیسی:

حل:

معادلات حلقه را می نویسیم:



$$\Phi_1(\mathcal{R}_{bafe} + \mathcal{R}_{be} + \mathcal{R}_g) + \Phi_2(\mathcal{R}_{be} + \mathcal{R}_g) = F_1$$

$$\Phi_1(\mathcal{R}_{be} + \mathcal{R}_g) + \Phi_2(\mathcal{R}_{bcde} + \mathcal{R}_{be} + \mathcal{R}_g) = F_2$$

$$\Phi_1(13.34 \times 10^6) + \Phi_2(10.76 \times 10^6) = 5000$$

$$\Phi_1(10.76 \times 10^6) + \Phi_2(13.34 \times 10^6) = 5000$$

$$\Phi_1 = \Phi_2 = 2.067 \times 10^{-4}\ \text{Wb} \qquad \Phi_g = \Phi_1 + \Phi_2 = 4.134 \times 10^{-4}\ \text{Wb}$$

$$B_g = \frac{\Phi_g}{A_g} = \frac{4.134 \times 10^{-4}}{4 \times 10^{-4}} = 1.034\ \text{T}$$

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_0} = \frac{1.034}{4\pi 10^{-7}} = 0.822 \times 10^6\ \text{At/m}$$

فصل اول: آشنایی با مدارهای مغناطیسی

۱-۲- تحلیل مدارهای مغناطیسی:

نکته: سیم پیچ به همراه هسته می تواند نماد یک عنصر مداری ایده آل بنام اندوکتانس باشد.

$$\lambda = N\Phi = L \cdot i \xrightarrow{H = \frac{Ni}{l}} L = \frac{\lambda}{i} = \frac{N\Phi}{i} = \frac{N \cdot B \cdot A}{i} = \frac{N\mu \cdot H \cdot A}{i}$$

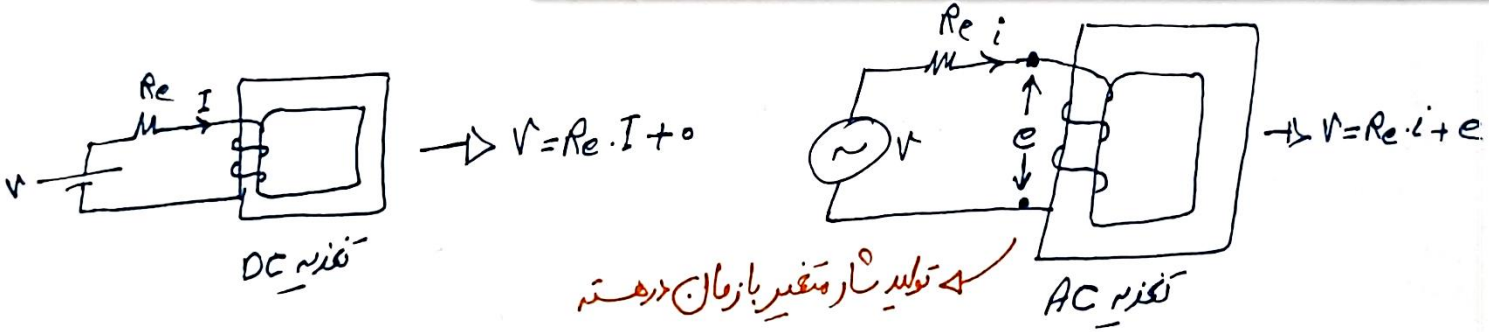
$$= \frac{N\mu H \cdot A}{H l / N} = \frac{N^2}{\frac{l}{\mu A}} = \frac{N^2}{R} \Rightarrow L = \frac{N^2}{R}$$

تمرین تحویلی ۱: شباهت ها و تفاوت های بین مدار الکتریکی و مدار مغناطیسی را بیان کنید.

مقایسه مدارهای مغناطیسی با منابع تحریک DC و AC:

- در حالت تحریک AC، حداکثر شار موجود در هسته به دامنه ولتاژ و فرکانس منبع تغذیه وابسته است.
- در حالت تحریک AC، اگر رلوکتانس هسته افزایش یابد، شار هسته ثابت باقی خواهد ماند ولی با افزایش رلوکتانس جریان سیم پیچی زیاد می شود و ممکن است بسوزد.
- در حالت تحریک DC، با افزایش رلوکتانس هسته، شار هسته کم می شود.

مقایسه مدارهای مغناطیسی با منابع تحریک DC و AC:



اگر $V = V_m \cdot \sin \omega t$ ← جریان متغیر در زمان جاری می‌شود که نتیجه‌ی آن تولید شار متغیر با زمان درهسته است. این شار در هر دور از سیم پیچ القاء می‌شود $(e = \frac{d\Phi}{dt})$ که نیروی محرکه‌ی کل در یک سیم پیچ N دور برابر است با:

$$e = N\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt}$$

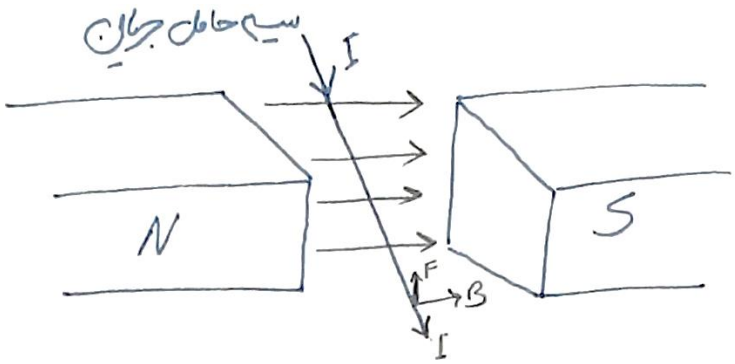
λ: شار در برگیرنده ← $\lambda = N\Phi$

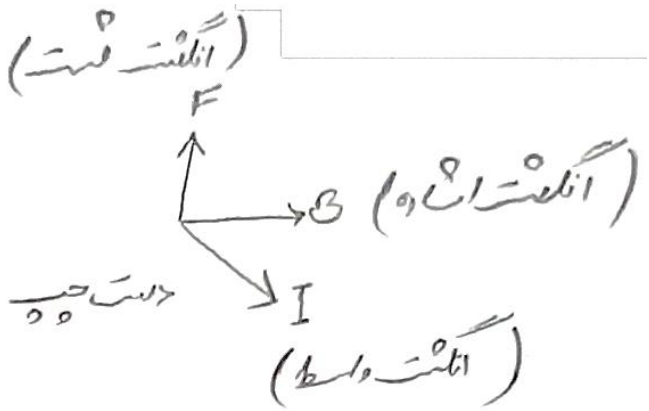
نکته: همه‌ی شار تولید شده توسط سیم پیچ از درون هسته نمی‌گذرد و مقدار جزئی آن در هوا پخش می‌شود که به آن شار پراکندگی می‌گویند.

فصل اول: آشنایی با مدارهای مغناطیسی

۱-۳- قوانین مغناطیسی:

قانون دست چپ:





قانون القای فارادی: هرگاه سیم پیچ متحرکی در یک میدان مغناطیسی ثابت یا یک سیم پیچ ثابت در یک میدان مغناطیسی متغیر قرار گیرد، بر اساس قانون القای فارادی، در سیم پیچ ولتاژی القاء می شود.

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

قانون لنز: در قانون القای فارادی چنانچه مدار الکتریکی بسته باشد، باعث جاری شدن جریان می شود و جهت جریان القای بوجود آمده به گونه ای است که با عامل بوجودآورنده آن مخالفت می کند.

تمرین تحویلی ۲: علامت منفی در فرمول قانون القای فارادی را چگونه توجیح می کنید؟

تمرین تحویلی ۳: طبق قانون فارادی، اگر شار سینوسی باشد، ولتاژ القایی از چه نوعی است؟

فصل اول: آشنایی با مدارهای مغناطیسی

۱-۳- خواص مغناطیسی مواد: مقدار ضریب نفوذ مغناطیسی هر ماده، تا حد زیادی خواص مغناطیسی آن را مشخص می کند.

۱- مواد فرو مغناطیسی با μی نسبی چند هزار مانند آهن بدون آلیاژ و ....

۲- مواد پارا مغناطیسی با μی نسبی بیشتر از واحد مانند هوا و ... .

۳- مواد دیا مغناطیسی با μی نسبی کمی کمتر از واحد مانند آب، نقره، جیوه و ....

* منحنی مغناطیس اجسام فرومغناطیس

در سیم پیچ با هسته آهنی بین شدت میدان مغناطیسی (H) و چگالی شار مغناطیسی (B) رابطه ساده

زیر وجود ندارد در حالیکه در سیم پیچ با هسته هوایی رابطه خطی $B=\mu_0 H$ همواره برقرار است.

رابطه بین B و H به کمک منحنی موسوم به منحنی مغناطیسی B-H نشان می دهند.

فصل اول: آشنایی با مدارهای مغناطیسی

جلسه سوم

۱-۳- خواص مغناطیسی مواد: مقدار ضریب نفوذ مغناطیسی هر ماده، تا حد زیادی خواص مغناطیسی آن را مشخص می کند.

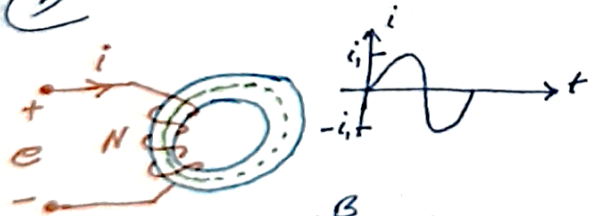
* انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی:

— به منظور ایجاد میدان مغناطیسی در یک سیم پیچ، باید جریان الکتریکی در آن برقرار شود که بتواند در مدار نهایی آن، زمان مشخص لازم است. بنابراین ایجاد این میدان مقداری کار انجام می گیرد که در میدان مغناطیسی بصورت انرژی ذخیره خواهد شد.

— انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی سیم پیچ مشابه انرژی ذخیره شده در میدان الکتریکی خازن است.

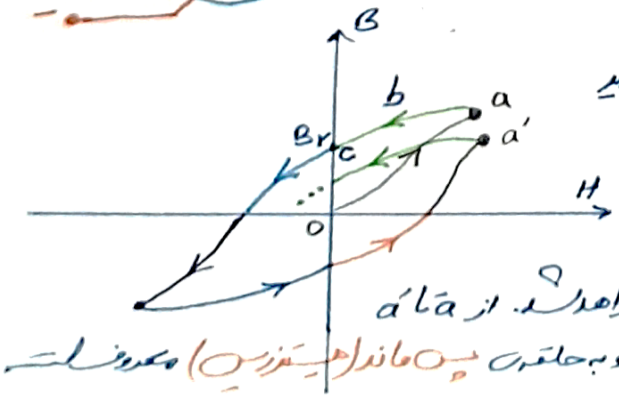
L: ضریب القایی سیم پیچ بر حسب هانری

$W = \frac{1}{2} L I^2$ (J) انرژی ذخیره شده در یک سیم پیچ بر حسب ژول



پس ماند (هیستزیس): فرض می شود هسته حلقوی در ابتدا مغناطیس نشده باشد.

* با افزایش شدت میدان مغناطیسی (H) توسط جریان i که به کویل اعمال می شود مطابق oa تا نقطه a چگالی شار (B) خواهیم داشت.
* حال اگر H به تدریج کاهش یابد مسیر برگشت متفاوت از مسیر رفت خواهد بود و مسیر جدید abc خواهد بود. این کاهش تا صفر شدن H ادامه می یابد.



با صفر شدن H، هسته Br را در خود نگه می دارد که به این Br چگالی شار پسماند می گویند.

* اگر H را به صورت ادامه دهیم Br از بین می رود و تا H ای خاص این پسماند صفر خواهد شد. از a تا a' یا سیکل کامل می شود. پس از چند سیکل حلقه (یا منحنی) پسماند (هیستزیس) معروف است.

فصل اول: آشنایی با مدارهای مغناطیسی

تلفات هسته:

۱- تلفات پس ماند (هیسترزیس): تلفات توان هسته بخاطر پدیده پس ماند به تلفات هیسترزیس معروف است.

۲- تلفات جریان گرداب: نیروهای محرکه القایی در آهن یکپارچه تولید جریان‌هایی گردشی می‌کنند که به جریان‌های گرداب یا فوکو معروف‌اند که این جریان‌ها باعث تلفات فوکو یا گرداب می‌کنند.

راه حل: ورقه ورقه ساختن هسته که هر لایه نسبت به لایه دیگر عایق است.

۲- افزایش مقاومت با افزودن درصد ناچیزی از سیلیکون به آهن

سؤال ۷) تلفات فوکو چه رابطه‌ای با ولتاژ احتمالی دارد؟ آیا تلفات فوکو به فرکانس بستگی دارد؟

جواب) متناسب با مجذور ولتاژ احتمالی است. خیر.

فصل اول: آشنایی با مدارهای مغناطیسی

۱-۴- تبدیل انرژی الکترومغناطیسی:

اصول تبدیل انرژی:

در هنگام تبدیل انرژی، انرژی از صورتی به صورت دیگر تبدیل می‌شود و بر طبق این اصل انرژی به خودی خود بوجود نمی‌آید و یا نابود نمی‌گردد و فقط می‌تواند از شکلی به شکل دیگر تبدیل گردد.

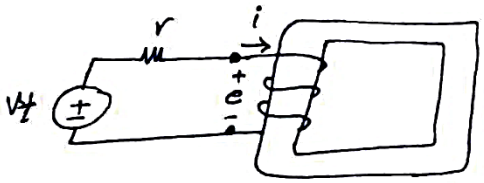
معادله موازنه انرژی:

حالت موتوری: کل انرژی تلف شده + کل انرژی ذخیره شده + انرژی مکانیکی خروجی = کل انرژی ورودی

حالت ژنراتوری: کل انرژی تلف شده + انرژی ذخیره شده + کل انرژی الکتریکی (ورودی) = کل انرژی مکانیکی (ورودی)

$$W_{elec}\ (\text{الکتریکی}) = W_{mech}\ (\text{مکانیکی}) + W_{fld}\ (\text{میدان})$$

سیستم مغناطیسی تک تحریکه:



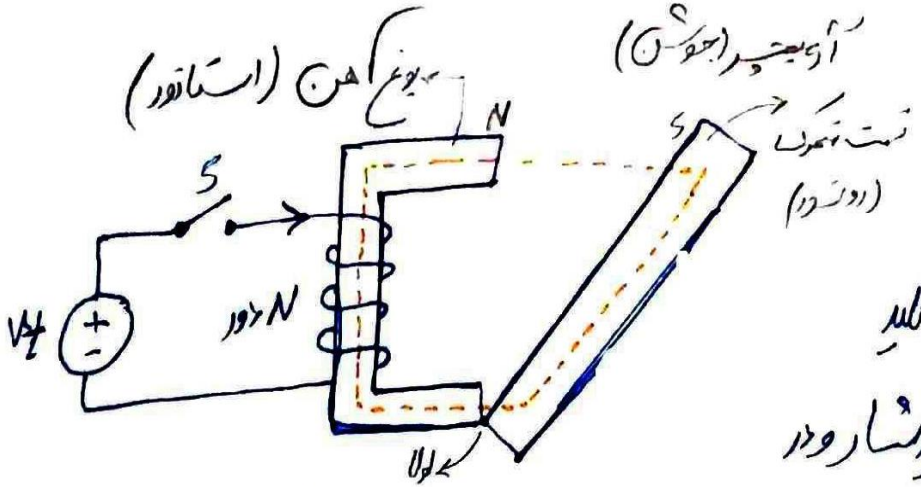
$$V_t = ri + e \qquad \lambda = N\Phi$$

$$V_t = ri + \frac{d\lambda}{dt} \qquad \lambda = Ni$$

$$W_{elec} = \int i\,d\lambda \qquad e = N\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt}$$

فصل اول: آشنایی با مدارهای مغناطیسی

۱-۴- تبدیل انرژی الکترومغناطیسی:



شکل مقابل یک رله مغناطیسی ساده را نشان می‌دهد.

ابتدا آرمیچر یا روتور در موقعیت باز قرار دارد. وقتی کلید S بسته می‌شود، جریان در سیم پیچ برقرار شده، تولید شار و در نهایت تولید نیروی مغناطیسی را خواهیم داشت که باعث جذب آرمیچر به یوغ آهنی خواهد شد

داریم: $W_{elec} = W_{mech} + W_{fld}$ ← از دو طرف دیفرانسیل می‌گیریم ← $dW_{elec} = dW_{mech} + dW_{fld}$

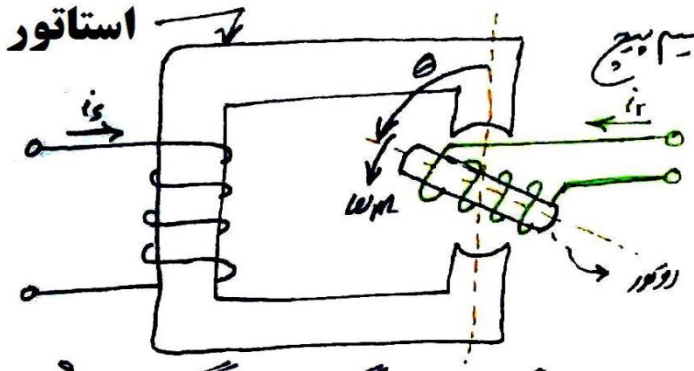
اگر آرمیچر به هر علتی حرکت نکند ← $W_{mech} = 0$ ← $dW_{elec} = dW_{fld}$ ←

* یعنی اگر در یک سری نیرویی از حرکت قسمتی که توانایی حرکت دارد جلوگیری شود، تمام **انرژی الکتریکی** ورودی در میدان مغناطیسی ذخیره می‌شود.

فصل اول: آشنایی با مدارهای مغناطیسی

۱-۴- تبدیل انرژی الکترومغناطیسی:

نکته: غالباً انرژی ذخیره شده در میدان شکاف فاصله هوایی، به مراتب از انرژی ذخیره شده در هسته بیشتر است.



سیستم مغناطیسی دو تحریکه: استاتور و روتور هردو حاوی سیم پیچ حامل جریان هستند.

در سیستم مغناطیسی دوار روبرو هردو قسمت ساکن و متحرک دارای سیم پیچ حامل جریان می باشند. این سیستم کاربردهای متنوع و وسیعی دارد. ونلاً در دستگاههای اندازه گیری، ماشین ها... کاربرد دارد.

ششم: تبدیل الکترومغناطیسی:

دو قانون مهم بیان تبدیل الکترومغناطیسی:

قانون ۱: اگر یک هادی در میدان مغناطیسی حرکت کند، در هادی ولتاژ القاء می گردد.

قانون ۲: اگر هادی حامل جریان در یک میدان مغناطیسی قرار گیرد، به آن هادی نیروی مکانیکی وارد می شود.

توجه: هرگاه انرژی از فرم الکتریکی به مکانیکی یا بالعکس تبدیل شود، دو پدیده فوق هم زمان رخ خواهد داد.

فصل اول: آشنایی با مدارهای مغناطیسی

۱-۴- تبدیل انرژی الکترومغناطیسی:

* تبدیل الکترومغناطیسی در موتورها: در حالت موتوری، از طریق سیم الکتریکی، جریان وارد هادی‌هایی می‌شود که در میدان مغناطیسی قرار گرفته‌اند. لذا طبق قانون (2) تبدیل الکترومغناطیسی برهم‌کنش‌هایی نیرو ایجاد می‌کنند. گشتاور حاصل شده قسمت متحرک که هادی‌ها بر روی آن قرار گرفته‌اند را تحت سرعت به حرکت درمی‌آورد. حال پس از حرکت هادی‌ها درمی‌یابیم که این هادی‌ها درون میدان مغناطیسی می‌چرخند، لذا طبق قانون (1) تبدیل الکترومغناطیسی درون آن‌ها ولتاژ القاء می‌گردد. لذا در حالت موتوری با نیرو و ولتاژ القاء شده روبرو هستیم.

* تبدیل الکترومغناطیسی در ژنراتورها: در هادی‌ها مکانیکی نسبت به موتور صورت می‌گیرد. یعنی قسمت متحرک ماشین توسط یک محرک اولیه مانند توربین به چرخش درمی‌آید. با چرخیدن قسمت متحرک که بر روی آن هادی‌های پیچیده شده است و نیز با وجود میدان مغناطیسی طبق قانون (1) تبدیل الکترومغناطیسی در هادی‌های روتور ولتاژ القاء می‌گردد. حال اگر بار الکتریکی به سیم پیچ حاصله توسط این هادی‌ها وصل گردد، جریان جاری می‌شود و توان به مصرف‌کننده تزریق می‌شود. پس از برقراری جریان طبق قانون (2) تبدیل الکترومغناطیسی گشتاور تولید می‌شود که جهت مخالف گشتاور اعمال شده توسط محرک اولیه یا توربین خواهد بود.

جلسه چهارم

فصل اول: آشنایی با مدارهای مغناطیسی

۱-۴- تبدیل انرژی الکترومغناطیسی:

نکته: به سیم پیچ‌هایی که در آنها ولتاژ القاء می‌شود، سیم پیچ آرمیچر گویند.

" " از آنها جریان می‌گذرد تا میدان مغناطیسی و شار اصلی را پدید آورند، سیم پیچ تحریک یا سیم پیچ میدان گفته می‌شود.

نقش هسته در ماشین‌ها: پیوند مغناطیسی که ناشی از سیم پیچ‌های استاتور و روتور است تقویت می‌کند.

آهن ربای دائم: آهن ربای دائم می‌تواند بدون اینکه نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) مدار بکار رود، میدان مغناطیسی پدید آورد.

تمرین تحویلی ۴: چگالی شدت میدان مغناطیسی در فاصله هوایی نسبت به هسته به مراتب بیشتر است؟

فصل اول: آشنایی با مدارهای مغناطیسی

مقدمه کلی از ماشین های الکتریکی

* دستگاه‌هایی که انرژی را از یک نوع به نوع دیگری تبدیل می‌کنند، بطور کلی ترانسدیوسر (Transducer) نامیده می‌شوند.

* مبدل های انرژی که نوع انرژی را تغییر نمی‌دهند، بلکه حالت و خصوصیات آن را تغییر می‌دهند به ترانسفورماتور معروف اند.

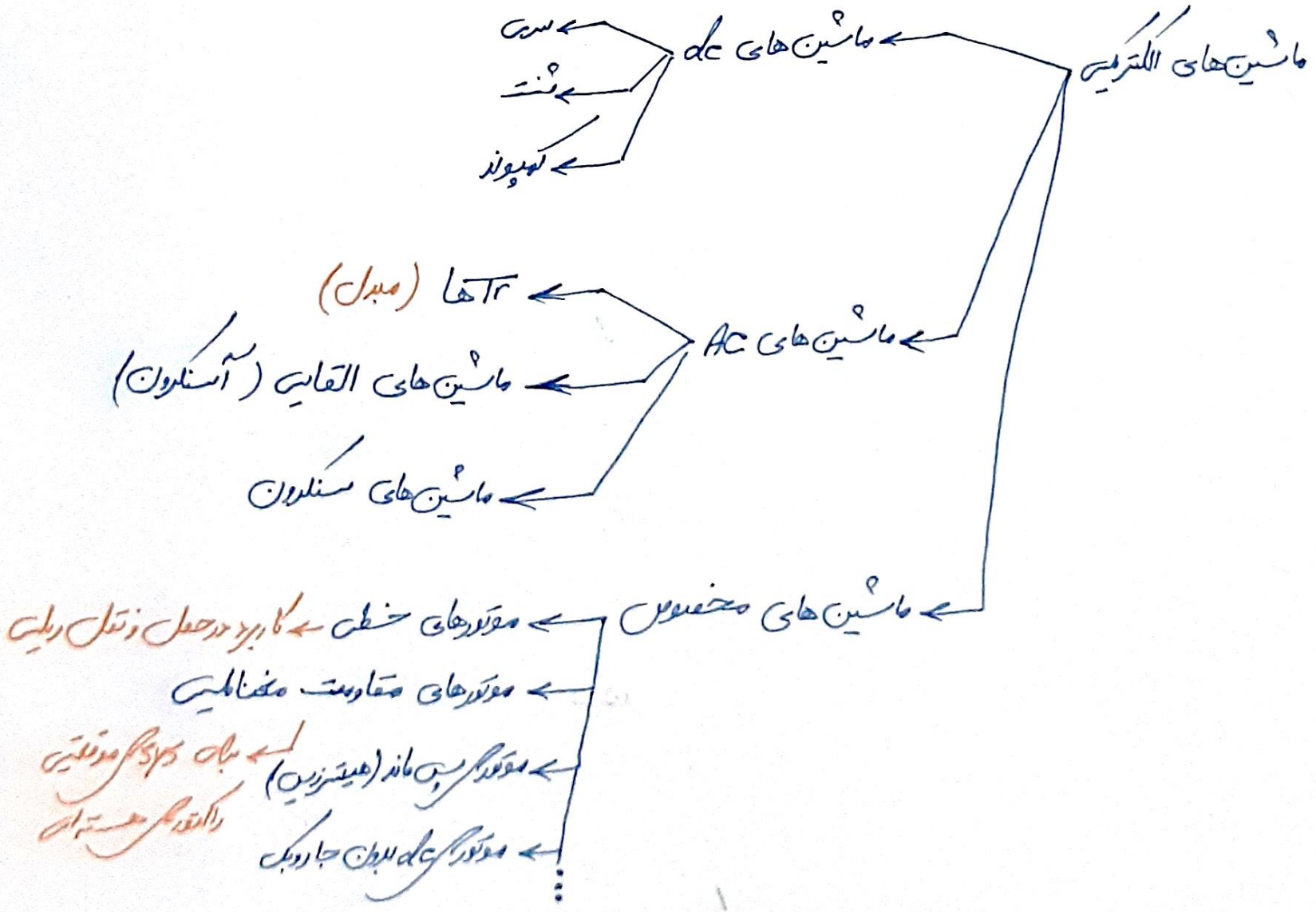
* ماشین های الکتریکی از نقطه نظر تبدیل انرژی به ۳ دسته تقسیم می‌شوند:

1- ماشین‌هایی که انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند، ژنراتور نامیده می‌شوند.
2- " " الکتریکی را به " مکانیکی " " موتور " .
3- " " تبدیل انرژی را انجام نمی‌دهند بلکه حالت و خصوصیات آن را تغییر دهند، ... نامیده می‌شوند.

راندمان: $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100$ که $P_{in} = P_o +$ تلفات

فصل اول: آشنایی با مدارهای مغناطیسی

مقدمه کلی از ماشین های الکتریکی



فصل اول: آشنایی با مدارهای مغناطیسی

مقدمه کلی از ماشین های الکتریکی

* یکی از خواص مهم ماشین های الکتریکی معکوس پذیری می باشد. یعنی:

* در حقیقت ماشین DC وجود خارجی ندارد و از دید خروجی DC می باشد و اصولاً همگی متناوب می باشند.

* تنها محیط واسط بعنوان محیط تبدیل انرژی، میدان مغناطیسی می باشد. لذا ارتباط بین سیستم الکتریکی و مکانیکی از طریق میدان مغناطیسی صورت می گیرد.

← لذا بر ماشین روابط الکترومغناطیسی حاکم است.

* ترانسفورماتورها وسایلی هستند که انرژی الکتریکی ابتدا به انرژی الکترومغناطیسی و سپس به انرژی الکتریکی تبدیل می شود. (درگاه‌ها)

پایان فصل اول

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

ماشینهای DC شبیه ماشینهای AC می باشند ، بدین صورت که در داخل هادیهای آنها ولتاژ و جریان AC تولید میشود و بخاطر عمل کموتاسیون این ولتاژ و جریان در خروجی بصورت DC ظاهر می شوند.

ساختار ماشین‌های الکتریکی

ماشینهای الکتریکی از دو بخش اساسی تشکیل شده‌اند :

الف : قسمت متحرک و دوار بنام رتور

ب : قسمت ساکن بنام استاتور

بایددانست‌بین‌این‌دوقسمت‌درون‌ماشین،شکاف هوائی وجوددارد

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

که:

۱- استاتور ساکن بوده و بخش بیرونی یا خارجی ماشین را تشکیل می‌دهد.

۲- رتور آزادانه حرکت می‌کند (می‌چرخد) و بخش درونی ماشین را شامل می‌شود.

۳- استاتور و رتور از مواد فرومغناطیسی ساخته می‌شوند.

۴- در بسیاری از ماشینها محیط داخلی استاتور و محیط بیرونی[۲] رتور حاوی شیارهای متعددی است

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

✓ در ساختمان های ماشین های الکتریکی از هسته آهن استفاده می شود.

۱- پیوند مغناطیسی بین کلافها حاصله از هادی های موجود در شیارهای روتور و استاتور را تقویت می کند.

۲- هسته آهن فرو مغناطیسی باعث می گردد که چگالی شار زیادتر شود و لذا اندازه و حجم ماشین کوچکتر می شود.

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

جلسه پنجم

سیم پیچ آرمیچر

به سیم پیچ هایی که در آنها ولتاژ القاء می شود.

سیم پیچ تحریک (میدان)

به سیم پیچ هایی که از آنها جریان می گذرد تا میدان مغناطیسی و شار اصلی پدید آیند.

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

سیم پیچ آرمیچر در ماشین DC

بر روی روتور قرار دارد.

سیم پیچ تحریک (میدان) DC

بر روی استاتور قرار دارد.

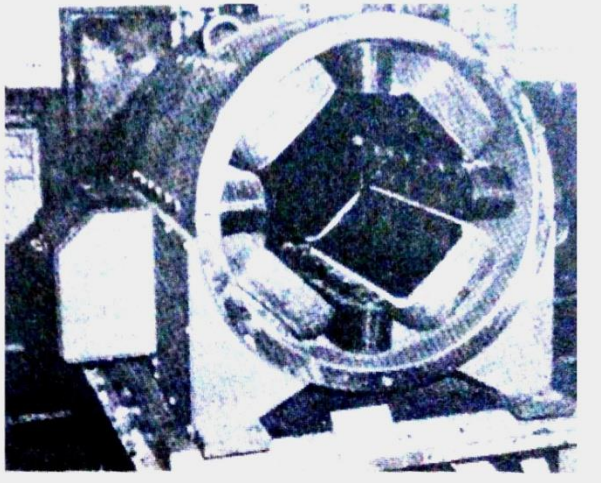
فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

- ✓ از سیم پیچ تحریک جریان dc می گذرد تا شار درون ماشین شکل گیرد.
- ✓ ولتاژ القاء شده در سیم پیچی آرمیچر، یک ولتاژ متناوب است.
- ✓ برای یکسو کردن ولتاژ متناوب در پایانه روتور (آرمیچر) از کموتاتور و جاروبک استفاده می شود.

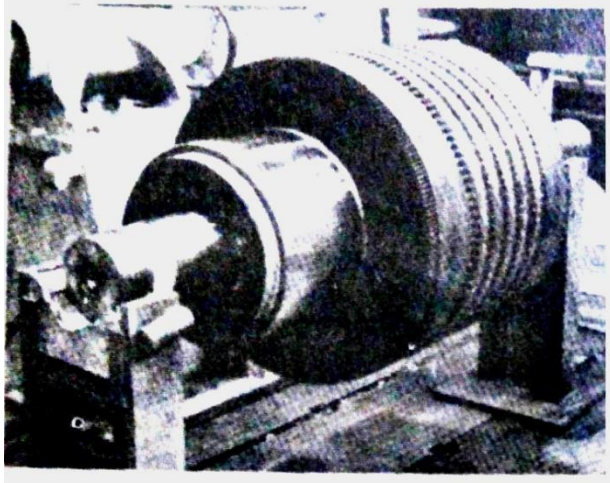
کموتاتور: تیغه های کموتاتور تیغه هایی مسی اند که با مواد عایقی از یکدیگر جدا می شوند.

تمرین تحویلی ۵: چرا ولتاژ القاء شده در سیم پیچی آرمیچر ماشین DC، یک ولتاژ متناوب است؟

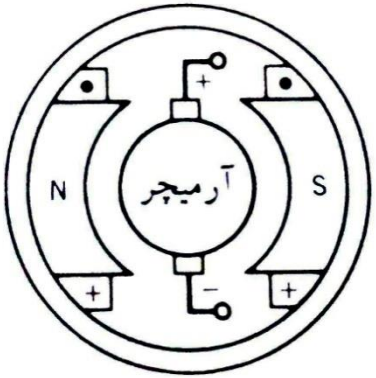
فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)



استاتور



روتور



یک شماتیک از ماشین جریان مستقیم

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

- ✓ ماشین های DC دارای قابلیت انعطاف زیاد می باشد و در صنعت کاربرد فراوانی دارد.
- ✓ در این ماشین با اتصالات مختلف مدار تحریک (سیم پیچ میدان) می توان به مشخصه های گوناگون گشتاور سرعت و نیز ولتاژ-جریان دست یافت.
- ✓ می توان از ماشین های DC در دو حالت موتوری و ژنراتوری استفاده کرد.
- ✓ با توجه به اینکه امروزه از سیستمهای الکترونیک قدرت برای ایجاد برق DC استفاده می شود.

لذا ژنراتورهای DC رفته رفته جای خود را در صنعت از دست می دهند.

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

- ✓ موتورهای DC برخلاف ژنراتورهای آن در صنعت کاربرد وسیعی می دارند.

بخاطر امکان کنترل سرعت راحت آنها

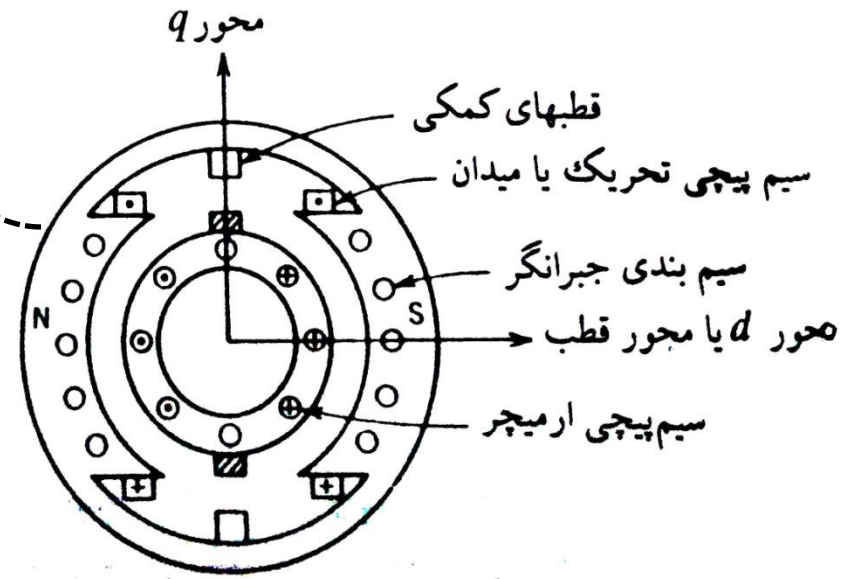
- ✓ موتورهای DC در سیستمهای حمل و نقل مانند مترو بسیار پرکاربرد است.

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

جلسه ششم

ساختمان ماشین های DC

استاتور حاوی دو قطب برجسته است.



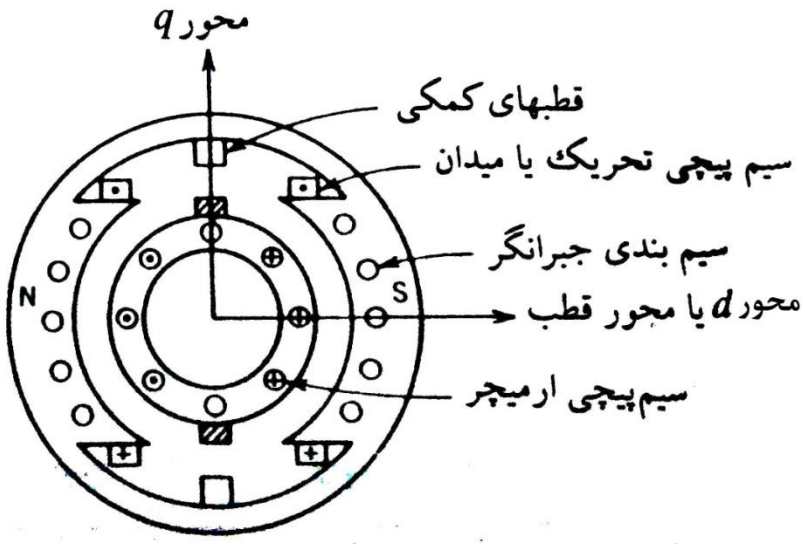
طرح واره یا شمای یک ماشین DC دو قطبی

- ✓ سیم پیچ آرمیچر ← روتور
- ✓ سیم پیچ تحریک ← استاتور

موازی (شنت) یا سری

توزیع شار در شکاف فاصله هوایی را ایجاد می کند.

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)



ساختمان ماشین های DC

- ✓ سیم پیچ آرمیچر ← روتور
- ✓ سیم پیچ تحریک ← استاتور

ماشین های DC می توانند شامل یک یا چند سیم پیچ میدان باشند.

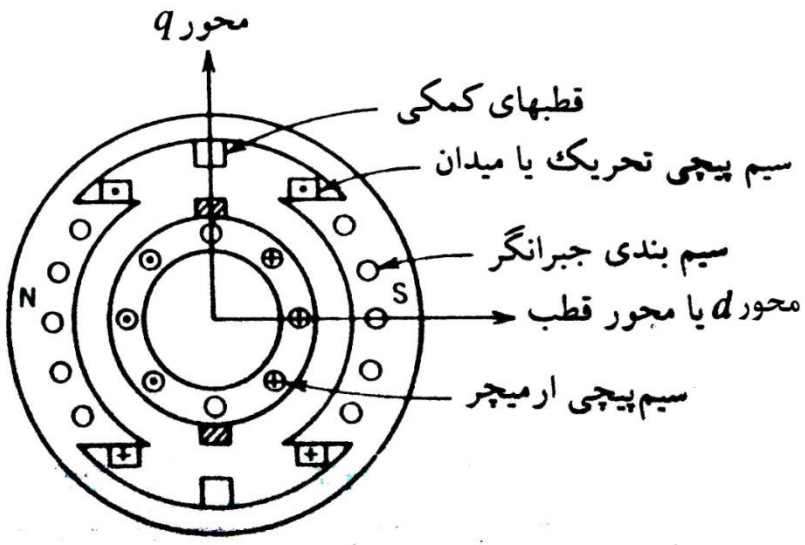
موازی (شنت) یا سری

توزیع شار در شکاف فاصله هوایی را ایجاد می کند.

نسبت به محور قطب متقارن است.

نامهای رایج محور قطب: ۱- محور میدان، ۲- محور مستقیم و ۳- محور d

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)



ساختمان ماشین های DC

- ✓ سیم پیچ آرمیچر ⟵ روتور
- ✓ سیم پیچ تحریک ⟵ استاتور

➢ ولتاژ القاء شده در حلقه های سیم پیچی آرمیچر ولتاژی متناوب است.

برای یکسو کردن ولتاژ، از کموتاتور و جاروبک استفاده می شود. (یکسوساز مکانیکی)

یکسوساز مکانیکی، موج mmf ناشی از جریان آرمیچر را نیز در فضا تثبیت می کند.

فرآیند کموتاسیون: معکوس شدن جریان در پیچک آرمیچر توسط جاروبک و تیغه های کموتاتور را فرآیند کموتاسیون گویند.

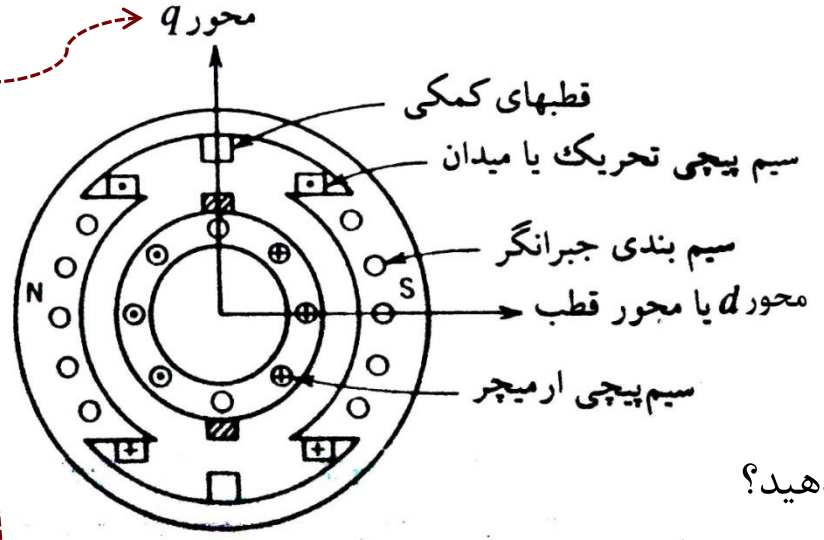
کموتاسیون خوب: در مدت کار دائم ماشین DC، هیچ جرقه ای در جاروبکها مشاهده نشد.

کموتاسیون بد: در مدت کار دائم ماشین DC، جرقه در جاروبکها مشاهده شود.

باعث می شود سطح کموتاتور آسیب ببیند.

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

ساختمان ماشین های DC



سوال: کموتاسیون بد تحت چه شرایطی بوجود می آید؟

سوال: انواع کموتاسیون را نام برده و بطور مختصر شرح دهید؟

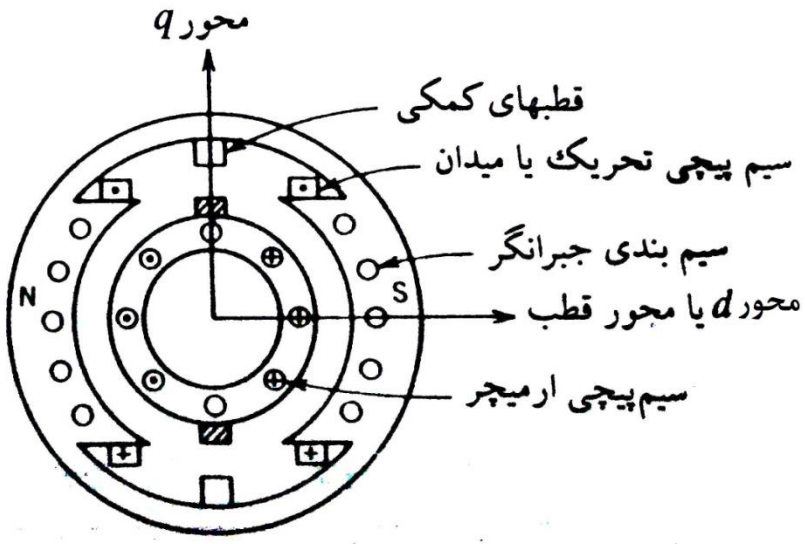
❖ جاروبکها برروی تیغه های کموتاتور به گونه ای قرار می گیرند تا جریان درون آنها به هنگام عبور لبه های یک حلقه آرمیچر از منطقه ی میان قطبها تغییر جهت دهد.

❖ این کار سبب می شود تا همگی هادیهای زیر یک قطب، حامل جریانی در یک جهت باشند.

نتیجه‌ی آن این است که نیروی محرکه ی مغناطیسی (mmf) حاصله از جریان آرمیچر، در راستای محور میانی دو قطب مجاور قرار گیرد.

محور متعامد یا محور q

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)



ساختمان ماشین های DC

- ✓ سیم پیچ آرمیچر ⟵ روتور
- ✓ سیم پیچ تحریک ⟵ استاتور

- جاروبکها بر روی محور q قرار می گیرند.

نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) آرمیچر ⟵ در راستای محور q

نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) میدان ⟵ در راستای محور d

نتیجه‌ی آن تولید گشتاور بیشتر است.

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

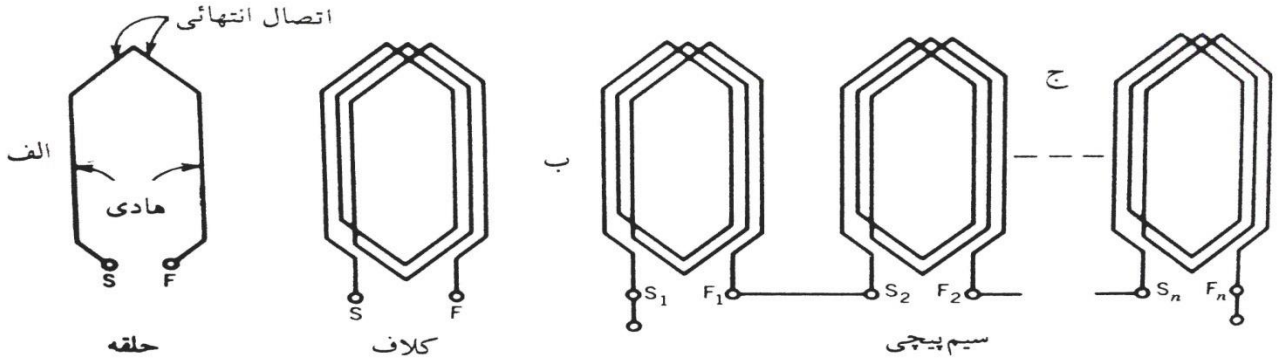
تعریف چند اصطلاح:

حلقه (Turn) ⟵ شامل دو هادی است که یک سر هادیها به کمک یک اتصال انتهایی بهم پیوسته اند.

کلاف یا پیچک (Coil) ⟵ از اتصال چندین حلقه بطور سری تشکیل می شود.

سیم پیچی (Winding) ⟵ از اتصال چندین کلاف بطور سری تشکیل می شود.

✓ آغاز یک حلقه یا یک کلاف با S و پایان آنها با علامت F مشخص شده است.



حلقه، کلاف، سیم پیچ الف : **حلقه از دو هادی تشکیل شده است.** ب : **کلاف از چند حلقه سری شده تشکیل می‌گردد.** ج: **سیم‌پیچی از چندین کلاف تشکیل می‌شود.**

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

تعریف چند اصطلاح:

گام قطبی (دهانه قطب) ← فاصله میان مراکز دو قطب مجاور را گویند.

گام کلاف ← فاصله بین دو لبه هر کلاف را گویند.

دو لبه هر کلاف در دو شیار که در سطح خارجی روتور قرار دارند جاسازی می شود.

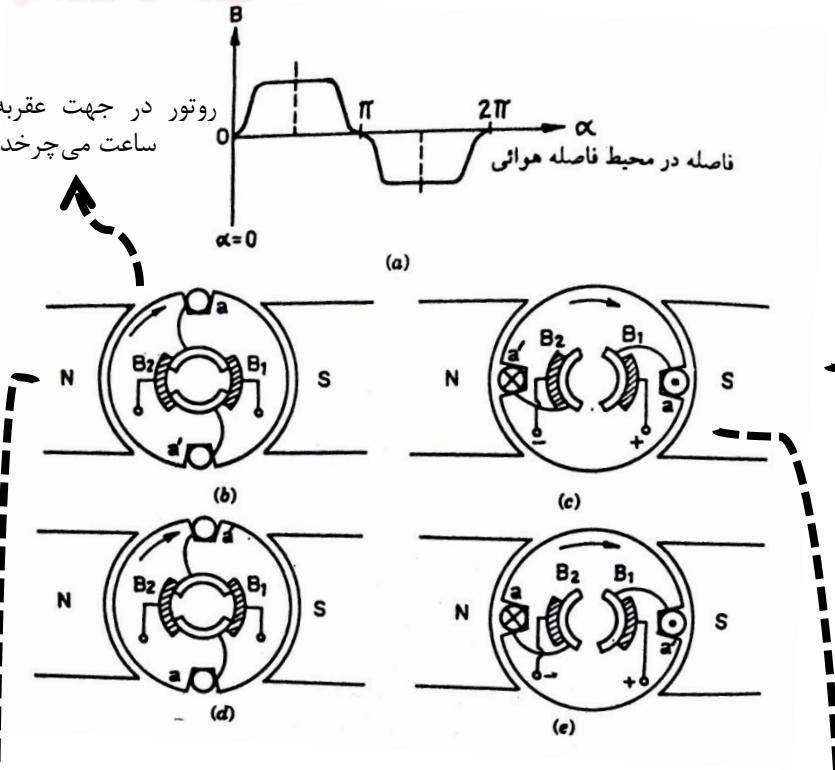
اگر گام کلاف = یک گام قطبی، آنگاه کلاف را کلاف با گام کامل می نامند. ← در ماشین های ac کاربرد دارد.

اگر گام کلاف < یک گام قطبی، آنگاه کلاف را کلاف با گام کوتاه یا گام کسری می نامند.

در ماشین های dc کاربرد دارد.

جلسه هفتم

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)



روتور در جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخد.

نرخ قطع شار حداکثر است.

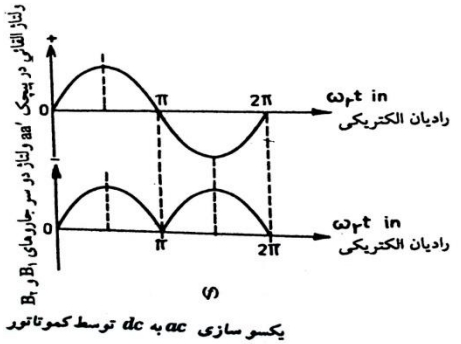
نیروی محرکه ایجاد شده در پیچک a و a' صفر است چون نرخ قطع شار صفر است.

جهت نیروی محرکه ی القایی در بازوهای پیچک a و a' با نقطه و ضرب در مشخص شده است.

اگر ترمینالهای خارجی به بار متصل باشند جریان از جاروبک B1 خارج شده و به جاروبک B2 وارد می شود.

در نتیجه پلاریته B1 مثبت و پلاریته B2 منفی خواهد بود.

فرآیند یکسو سازی بوسیله کموتاتور:

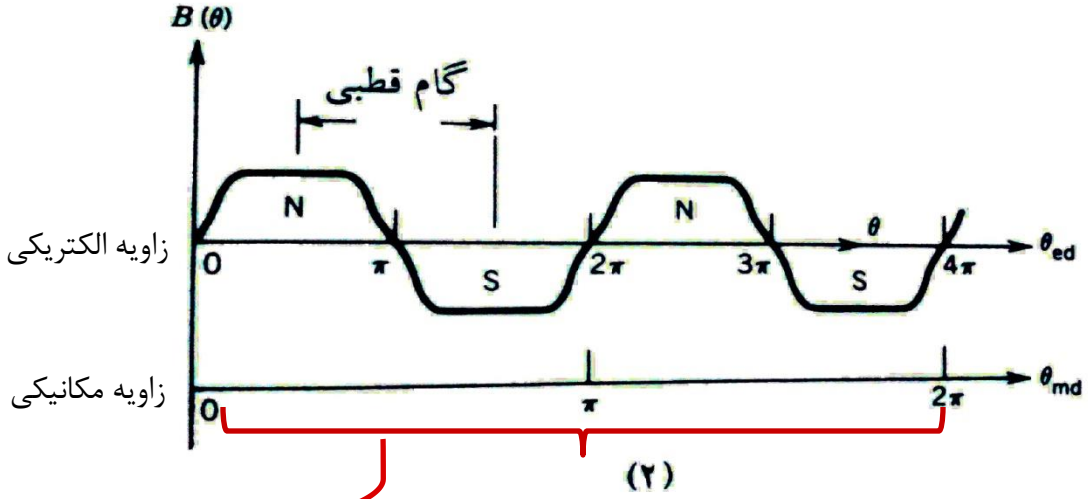


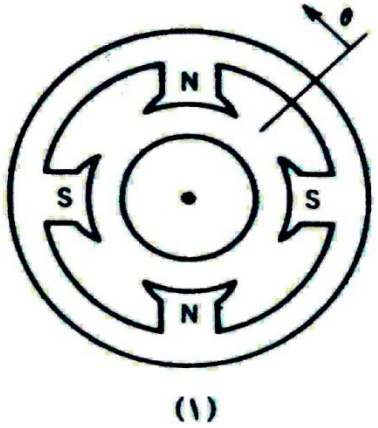
یکسو سازی ac به dc توسط کموتاتور

- ✓ جاروبک B1 همواره در تماس با آن ضلع پیچک که در زیر قطب S است، می باشد و جاروبک B2 همواره در تماس با آن ضلع پیچک که در زیر قطب N است، می باشد .

پلاریته جاروبکها همواره ثابت خواهد ماند.

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)





زاویه مکانیکی و زاویه الکتریکی ۱- ماشین DC چهار قطبی ۲- توزیع چگالی شار استاتور

سیکل (چرخه) کامل مکانیکی

در یک سیکل کامل مکانیکی با دو سیکل از تغییرات توزیع چگالی شار مواجه خواهیم شد.

زاویه مکانیکی $(P/2)$ = زاویه الکتریکی

P: تعداد قطبها

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

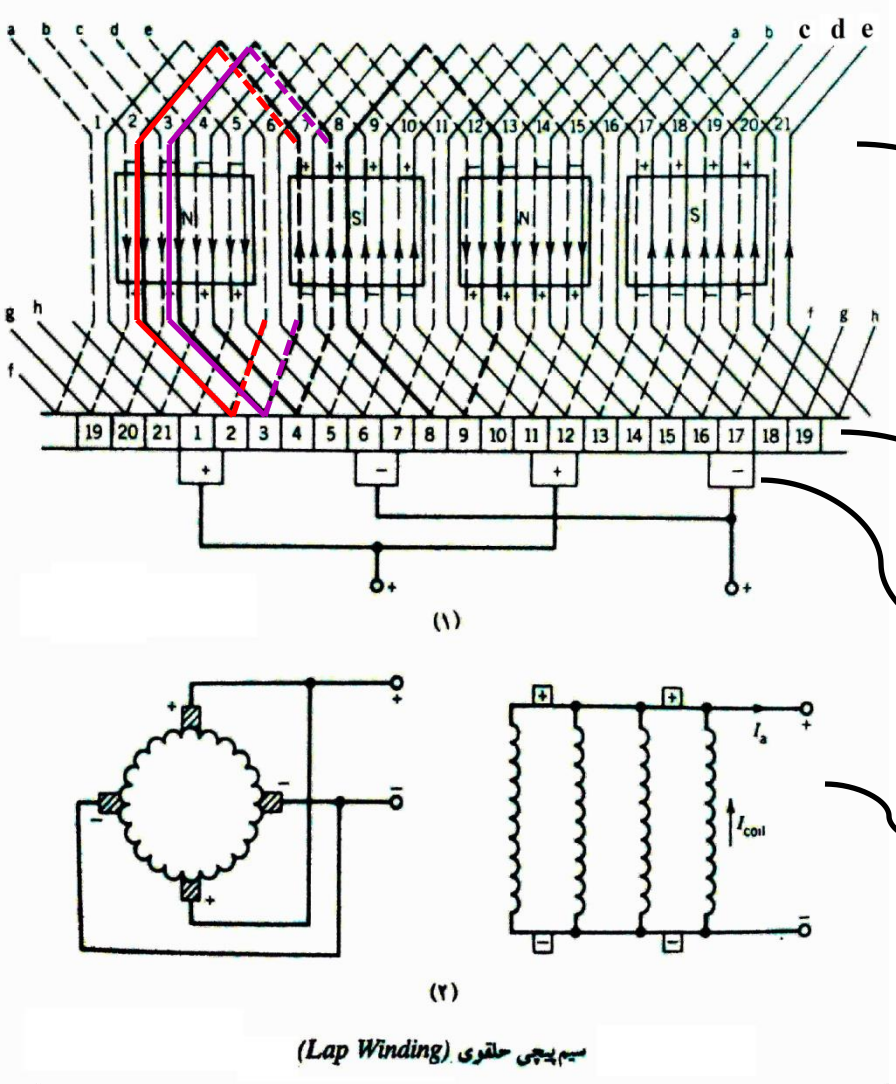
سیم پیچی آرمیچر:

- ✓ سیم پیچی میدان (تحریک) در استاتور تعبیه شده است.
  قطبها را پدید می آورد.
- ✓ سیم پیچی آرمیچر برروی روتور تعبیه شده است. به گونه ای که کموتاتور و جاروبکها بتوانند ولتاژ را یکسو کنند.
- ✓ سیم پیچی آرمیچر در ماشینهای dc باگام کامل صورت می گیرد.
- ✓ راههای گوناگونی برای اتصال کلافهای آرمیچر در ماشینهای dc وجود دارد.
- ✓اتصالهای معمول کلافها در ماشینهای dc
  - سیم پیچی حلقوی
  - سیم پیچی موجی

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

سیم پیچی آرمیچر:

۱- سیم پیچی حلقوی



شمای گسترده

تیغه های کموتاتور

جاروبک

توصیف معادلی از کلافها

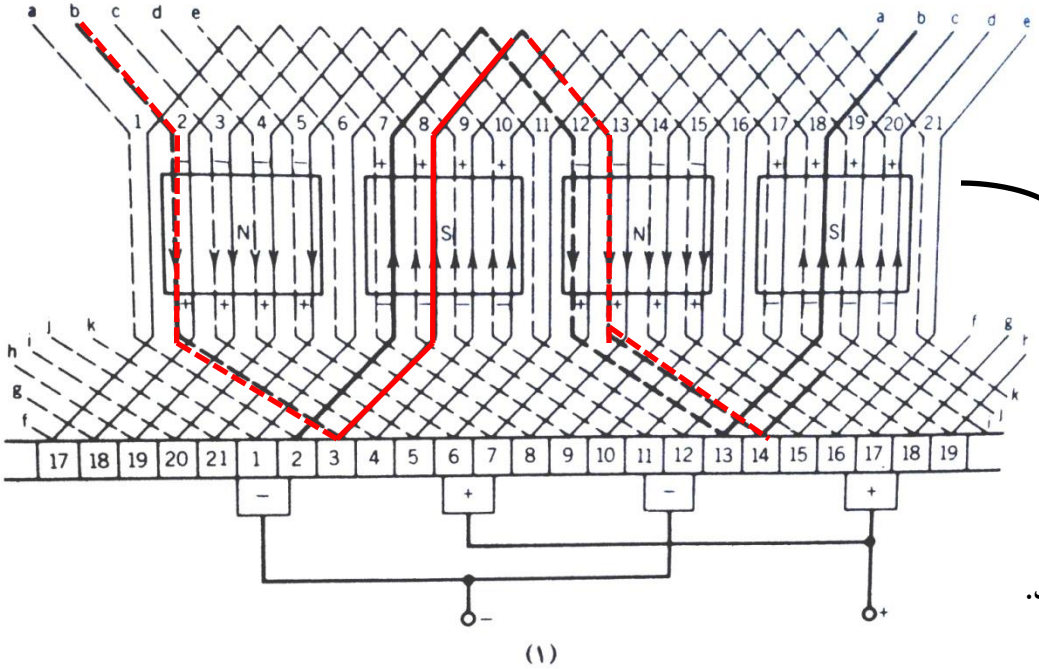
✓ جاروبکها در زیر مرکز قطبها قرار گرفته اند.

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

سیم پیچی آرمیچر:

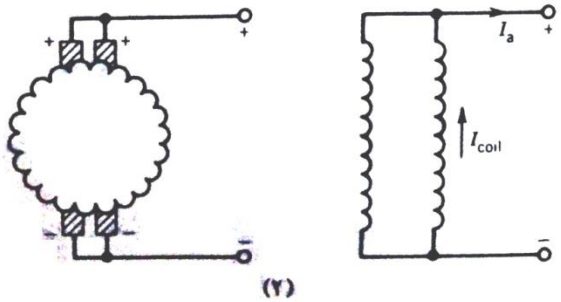
۲- سیم پیچی موجی

شمای گسترده



- ✓ کلافها در چهره یک موج در شیارها قرار گرفته اند.

توصیف معادلی از کلافها



سیم پیچی موجی (Wave Winding)

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

سیم پیچی آرمیچر:

مقایسه سیم بندی حلقوی و موجی:

الف) سیم پیچی حلقوی تعدادی مسیر موازی معادل تعداد قطبها و جاروبکها پدید می آورد.

لذا اینگونه سیم بندی برای ماشینهای با جریان زیاد و ولتاژ پائین مناسب است.

ب) سیم پیچی موجی دو مسیر موازی مهیا می سازد.

لذا اینگونه سیم بندی برای ماشینهای با جریان کم و ولتاژ بالا مناسب است.

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

جلسه هشتم

گشتاور ماشین های جریان مستقیم (DC)

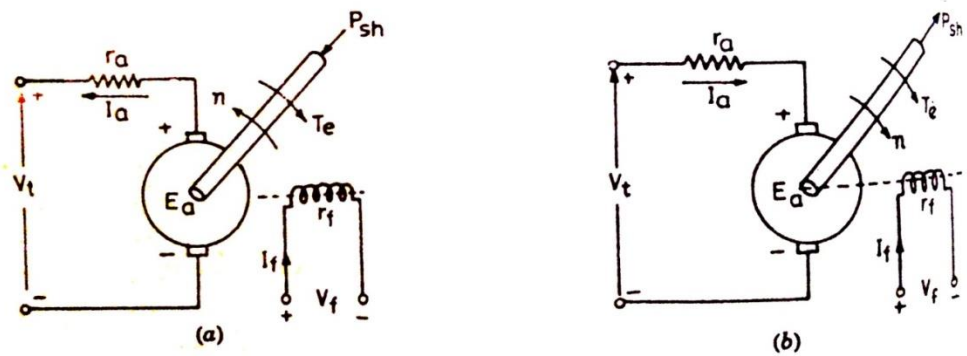
$Te = (1/Wm).Ea.Ia$

تولید گشتاور الکترومغناطیسی ← اثر متقابل ← شار میدان اصلی

تولید گشتاور الکترومغناطیسی ← نیروی محرکه مغناطیسی آرمیچر

مدل مداری ماشین های جریان مستقیم (DC)

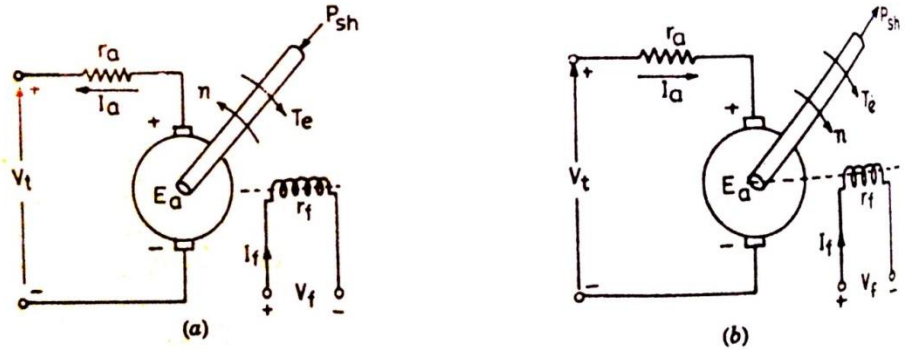
- ✓ ماشین های DC حاوی دو مدار جداگانه اند.
- ✓ یک مدار میدان مغناطیسی را تشکیل می دهد و مدار دوم همان سیم پیچی آرمیچر است.
- ✓ نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) ناشی از این دو مدار متعامد می باشد.



مدل مداری ماشین DC (a) حالت مولدی (b) حالت موتوری

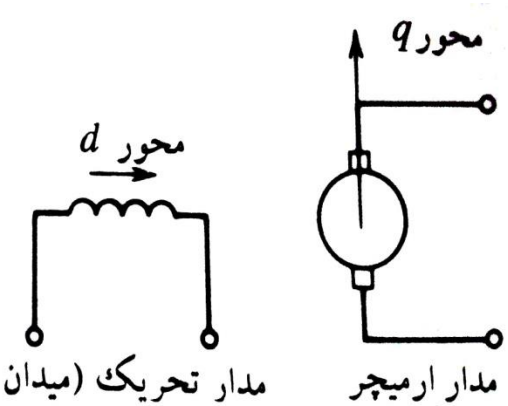
فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

مدل مداری ماشین های جریان مستقیم (DC)



مدل مداری ماشین DC (a) حالت مولدی (b) حالت موتوری

- ✓ در ماشین dc، شار هر قطب به عوامل زیر بستگی دارد:
  - ۱- mmf ناشی از هر قطب
  - ۲- رلوکتانس مسیر مغناطیسی

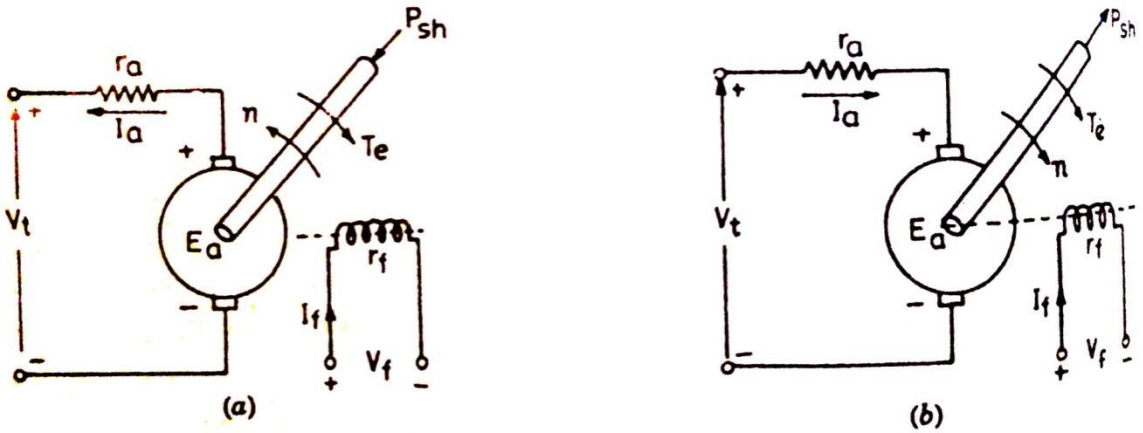


توصیف ساده‌ای از یک ماشین DC

- ✓ میدان ناشی از قطبها در امتداد محور d و mmf حاصله از آرمیچر در راستای محور q است.

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

مدل مداری ماشین های جریان مستقیم (DC)



مدل مداری ماشین DC (a) حالت مولدی (b) حالت موتوری

در حالت مولدی ← Vt < Ea

در حالت موتوری ← Vt > Ea

✓ وقتی جریان آرمیچر (Ia) در جهت نیروی محرکه الکتریکی تولیدی Ea باشد، ماشین DC بصورت مولد کار می کند.

$$Vt = Ea - ra.Ia$$

Vt: ولتاژ ترمینال آرمیچر

ra: مقاومت آرمیچر

$$Vt = Ea + ra.Ia$$

برای حالت موتوری

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

روشهای تحریک

یک ماشین DC بجز ماشین‌های DC کوچک که در آنها مغناطیس دائم بکار می رود، فقط وقتی می‌تواند بعنوان یک وسیله تبدیل انرژی کارکند که سیم پیچ میدان آن با جریان مستقیم تحریک شده باشد.

بطور کلی دو روش جهت تحریک کردن سیم پیچ میدان ماشینهای DC وجود دارد.

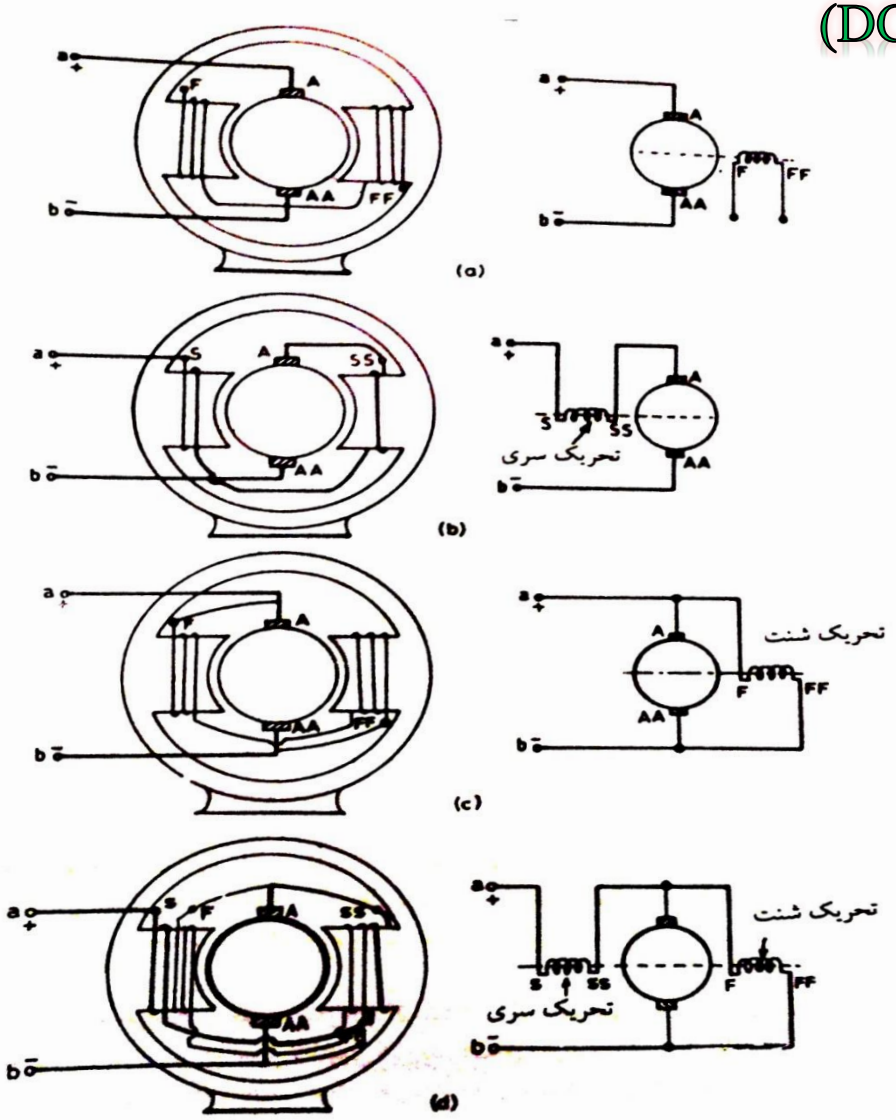
الف) تحریک جداگانه

ب) تحریک خودی

ماشین‌های DC ممکن است دارای یک یا چند سیم پیچ میدان باشند و روش تحریک کردن آنها از روی مشخصه‌های کاری این ماشینها مشخص می‌گردد. در سمت چپ نمودارهای شکل (A) اتصالات داخلی یک ماشین ۲ قطب بطور فیزیکی نشان داده شده است و در سمت راست، نمودارهای طرح واره، ماشینهای DC همراه با روشهای مختلف تحریک ماشینهای DC نشان داده شده است.

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

روش های تحریک



شکل (A) روشهای تحریک ماشینهای DC

(a) ماشین DC تحریک جداگانه
(b) ماشین DC تحریک سری
(c) ماشین DC تحریک شنت
(d) ماشین DC تحریک کمپوند

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

روش های تحریک

الف) تحریک جداگانه

پیچک تحریک جداگانه شامل صدها دور از سیم نازک می‌باشد که به منبع خارجی یا جداگانه متصل شده است (شکل A-(a)) ولتاژ منبع DC خارجی هیچگونه وابستگی با ولتاژ آرمیچر ندارد یعنی انرژی دار کردن پیچک میدان از یک منبع تغذیه جداگانه با هر ولتاژ مناسب صورت می‌گیرد.

ب) تحریک خودی

هنگامی که پیچک میدان توسط آرمیچر خودش تحریک شود به چنین ماشینی ماشین DC خود تحریک گویند. در این ماشینها قطب‌های میدان باید دارای پس ماند مغناطیسی باشند تا هنگامی که آرمیچر می چرخد ولتاژ پس ماندی در بین جاروبکها ایجاد شود. این ولتاژ پس ماند جریانی در سیم پیچ میدان ایجاد می کند به طوری که شار پس ماند تقویت گردد.

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

ماشین DC خود تحریک بصورت زیر تقسیم بندی می شود:

۱) **تحریک سری:** سیم پیچ میدان شامل تعداد دور کم از سیم‌های ضخیم می‌باشد که بطور سری با آرمیچر متصل شده است (مطابق شکل **(A-(b)**. به عبارت دیگر جریان میدان سری به جریان آرمیچر بستگی دارد و از این دیدگاه ممکن‌است میدان سری را سیم پیچ تحریک *جریانی* نامید.

۲) **تحریک شنت:** پیچک میدان شامل تعداد دور زیاد از سیم‌های نازک می‌باشد که به صورت موازی به آرمیچر متصل می‌شود (شکل **(A-(c)**. بنابراین ولتاژ دو سر آرمیچر برابر ولتاژ میدان شنت می‌باشد و به این دلیل سیم پیچی شنت را *میدان ولتاژی* می‌نامند. به خاطر داشته باشید که پیچک میدان سری و سیم پیچ میدان شنت به ترتیب دارای مقاومت کم و مقاومت زیاد است.

۳) **تحریک کمپوند:** تحریک کمپوند شامل هر دو سیم پیچ تحریک سری و سیم پیچ تحریک شنت است. در بعضی موارد سیم پیچ تحریک جداگانه می‌تواند بجای سیم پیچ تحریک شنت بکار رود. در اینجا ماشین کمپوند DC با سیم پیچ میدان سری و سیم پیچ میدان شنت بحث می‌شود. شکل **(A-(d)**.

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

ماشین DC کمپوند

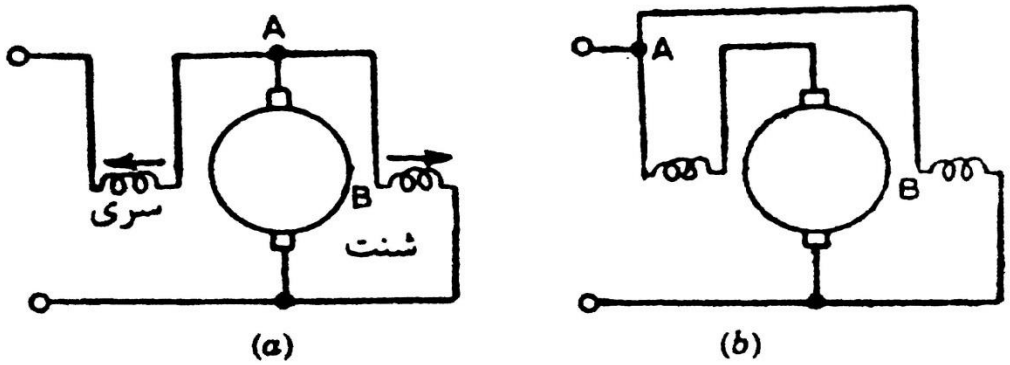
اگر شار میدان سری در جهت شار میدان شنت باشد به نحوی که شار فاصله هوایی هر قطب افزایش یابد به چنین ماشینی ماشین کمپوند *اضافی* گویند

اگر شار میدان سری مخالف شار میدان شنت باشد به نحوی که شار فاصلهٔ هوایی منتجه در هر قطب کاهش یابد ماشین را ماشین DC کمپوند نقصانی می گویند

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

ماشین DC کمپوند

از نظر اتصالات یک ماشین کمپوند DC می‌تواند دارای اتصال شنت بلند ویا شنت کوتاه باشد.



شکل (B). *ماشین کمپوند DC (a) اتصال شنت کوتاه و (b) اتصال شنت بلند*

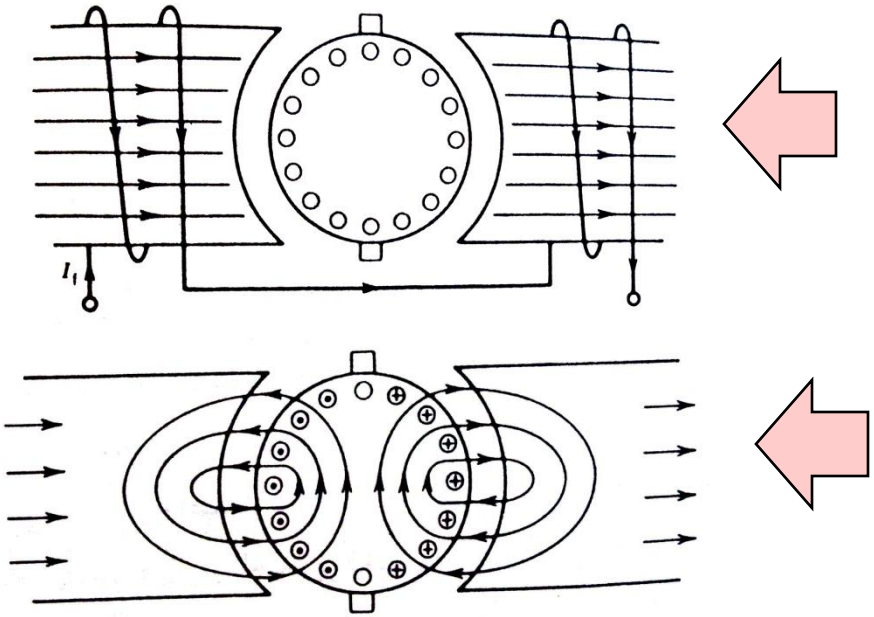
در اتصال شنت کوتاه شکل (B-(a). میدان تحریک شنت به دو سر آرمیچر متصل شده است. در اتصال شنت بلند سیم پیچ میدان شنت به دو سر ماشین یا ترمینالهای خط متصل می‌شود که در شکل (B-(b). نشان داده شده است. با کمی دقت در شکل (B) می‌توان به اختلاف بین اتصال شنت بلند و شنت کوتاه پی برد.

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

ماشین DC کمپوند

سوال: چه تفاوتی بین مشخصه ی کاری اتصال شنت بلند و کوتاه وجود دارد؟

عکس العمل آرمیچر:



- ✓ اگر از سیم پیچی آرمیچر جریان عبور نکند، در اینصورت شار در ماشین dc توسط mmf حاصله از جریان تحریک شکل می گیرد.
- ✓ اگر از سیم پیچی آرمیچر جریان عبور کند، در اینصورت آرمیچر نیز mmf و در نتیجه شار مخصوص به خود را تولید می کند که در جهت محور q عمل می نماید.
- ✓ mmf آرمیچر باعث می شود که ناحیه چگالی شار صفر از محور q فاصله بگیرد و این امر باعث می شود کموتاسیون ضعیفی رخ دهد و جرقه ایجاد شود.

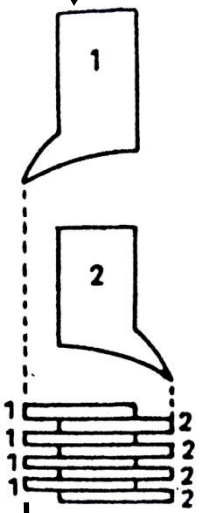
فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

روش های کاهش اثر عکس العمل آرمیچر:

۱- زیاد کردن مقاومت مغناطیسی لبه قطب

۱- ۱- با کفش قطبهای پخ شده یا قطبهای خارج از مرکز می‌توان طول فاصله هوایی کم در زیر محور مرکزی قطب و طول فاصله هوایی زیاد در نوک قطب را ایجاد کرد.

۱- ۲- استفاده از ورقه های قطب بصورت یک در میان



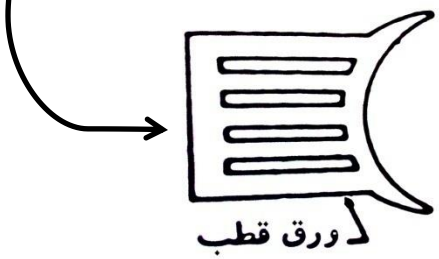
سطح آهن زیر قطبها تقریباً نصف می شود.

رلوکتانس زیر نوک قطبها افزایش می یابد.

سوال: استفاده از روشهای (۱- ۱) و (۱- ۲) چه تاثیری بر روی شار میدان اصلی دارند؟

۲- کاهش شار آرمیچر:

افزایش مقاومت مغناطیسی مسیر شار آرمیچر



سوال: استفاده از روش کاهش شار آرمیچر چه تاثیری بر روی شار اصلی دارد؟

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

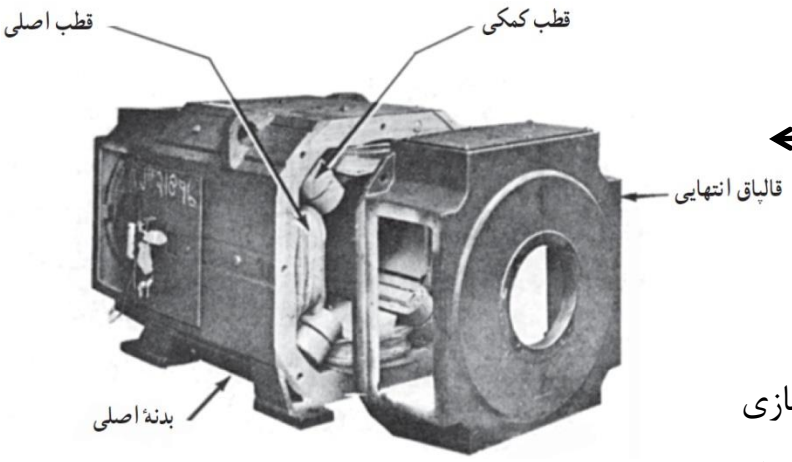
روش های کاهش اثر عکس العمل آرمیچر:

۳- شار اصلی قوی باشد.

در هنگام طراحی باید مطمئن باشیم که mmf میدان اصلی در مقایسه با mmf بار کامل آرمیچر باندازه ی کافی قوی است

۴- قطبهای کمکی (بین قطبی)

mmf قطب کمکی در ناحیه ای بین قطبهای اصلی، mmf ناشی از آرمیچر را خنثی می کند.



۴- سیم پیچ جبران کننده

سیم پیچ جبرانگر در شیارهایی در پیشانی قطبهای اصلی جاسازی می شوند. جریان در سیم پیچ جبرانگر به گونه ایست که mmf حاصله با mmf ناشی از آرمیچر مخالفت می کند.

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

سوال: اثر جابجایی جاروبکها در ماشین های DC را دو حالت مولدی و موتوری بررسی کنید.

سوال: قطبهای کمکی چه تاثیری برروی فرآیند کموتاسیون دارند؟

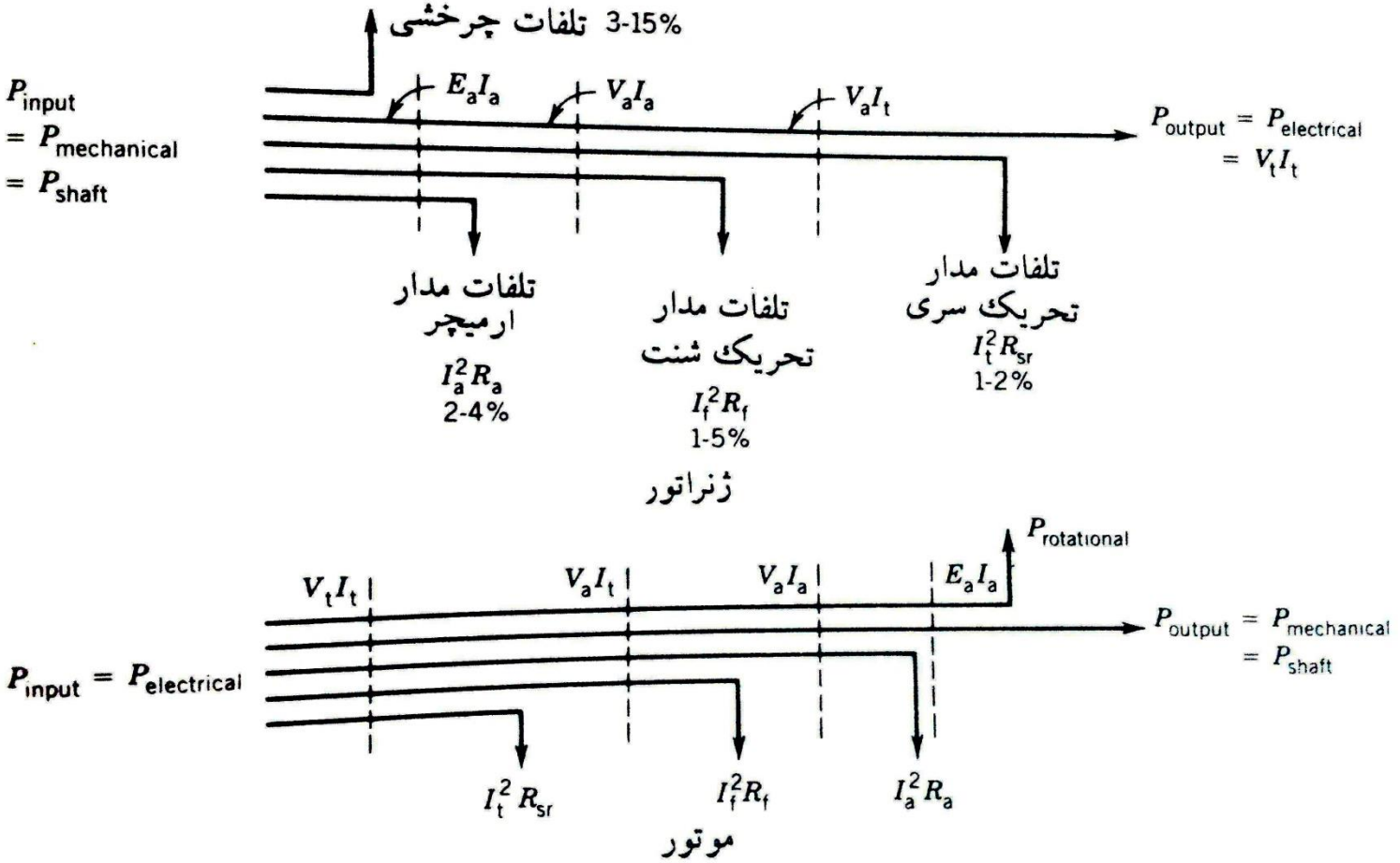
سوال: نام دیگر قطبهای کمکی چیست؟

سوال: سیم پیچی قطبهای کمکی نسبت به آرمیچر سری است یا موازی؟ چرا؟

سوال: به منظور جلوگیری از اشباع قطبهای کمکی چه اقدامی در حین طراحی انجام می شود؟

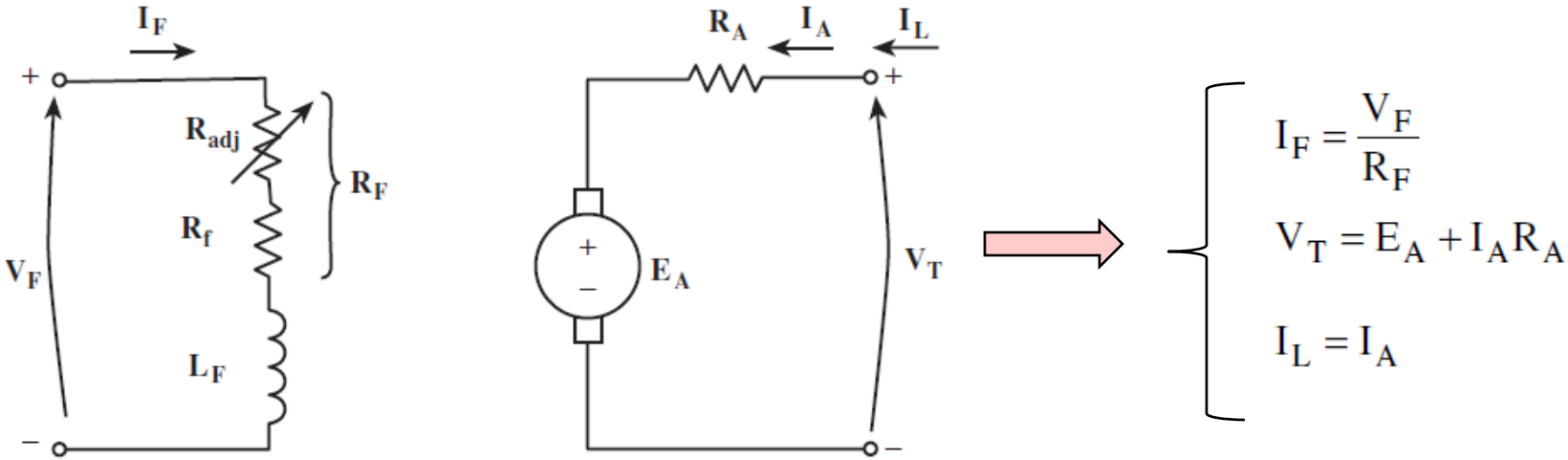
فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

دیاگرام پخش توان در ماشین DC



فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

مدار معادل و منحنی مشخصه های ماشینهای dc بر اساس نوع تحریک



مدار معادل موتور تحریک مستقل

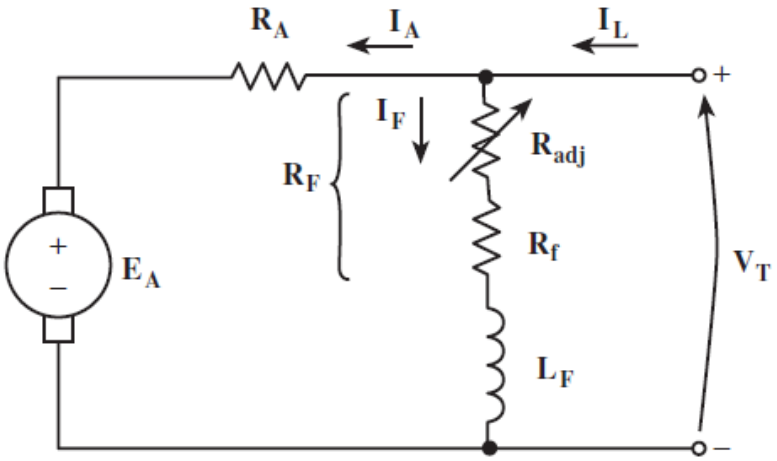
$$I_F = \frac{V_F}{R_F}$$

$$V_T = E_A + I_A R_A$$

$$I_L = I_A$$

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

مدار معادل و منحنی مشخصه های ماشینهای dc بر اساس نوع تحریک



مدار معادل موتور شنت

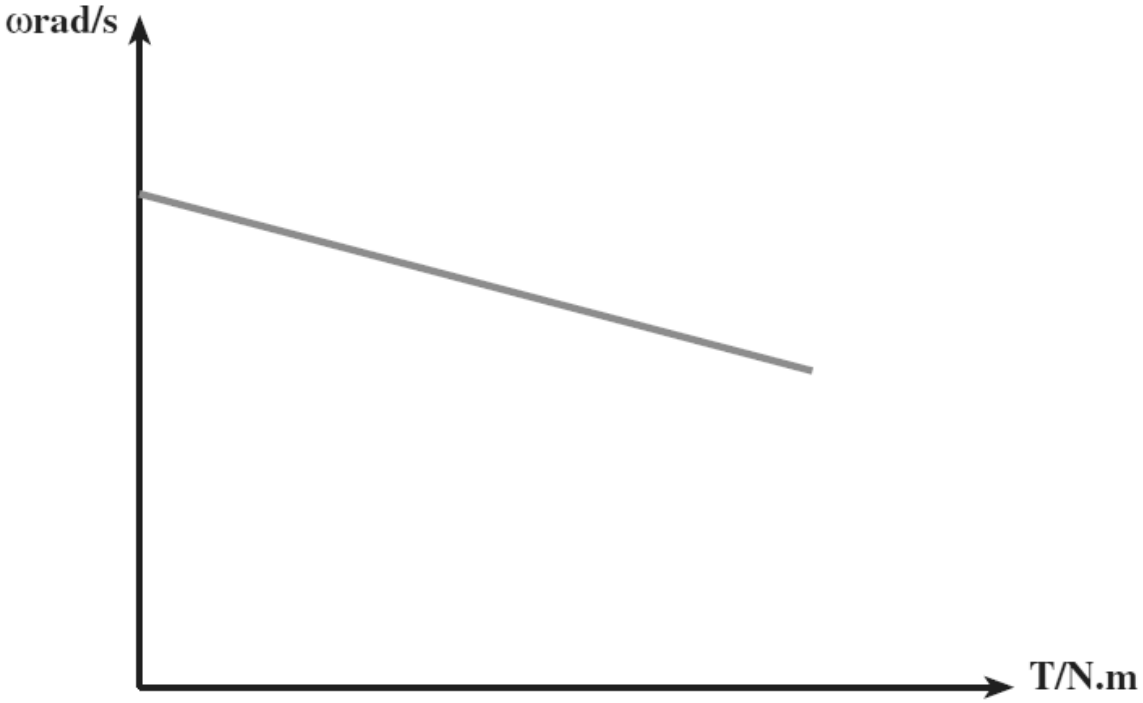
$$I_F = \frac{V_T}{R_F}$$

$$V_T = E_A + R_A I_A$$

$$I_L = I_A + I_F$$

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

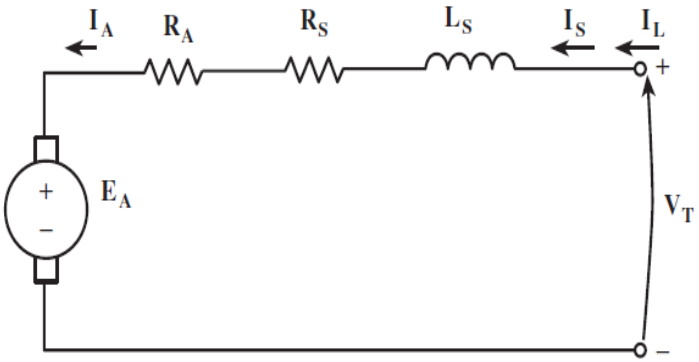
مدار معادل و منحنی مشخصه های ماشینهای dc بر اساس نوع تحریک



مشخصه گشتاور ــ دور موتور تحریک مستقل و موتور شنت

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

مدار معادل و منحنی مشخصه های ماشینهای dc بر اساس نوع تحریک



مدار معادل موتور سری

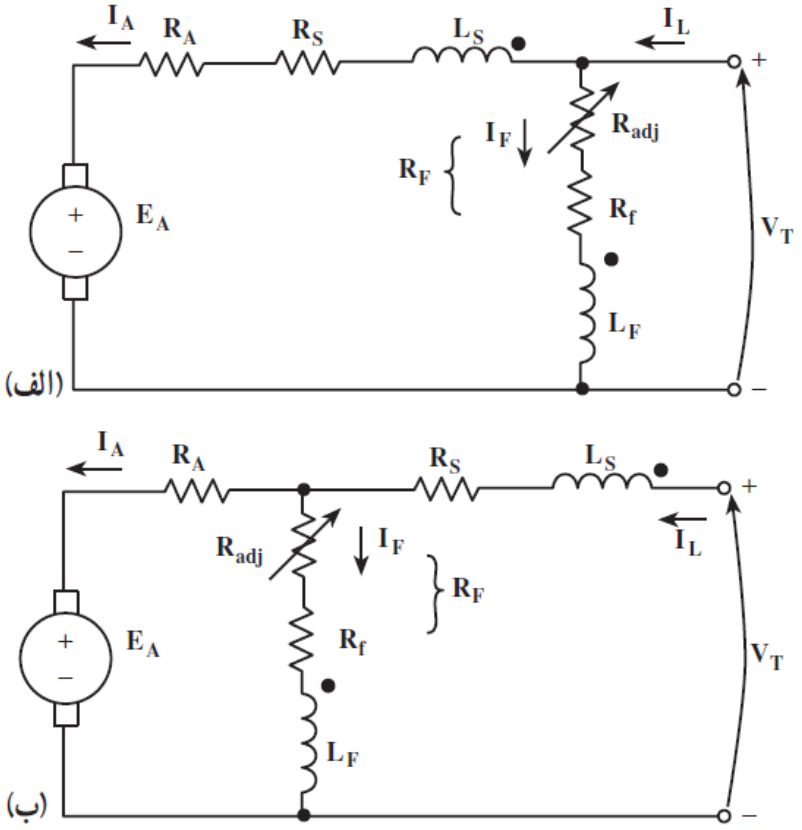
$$\begin{cases} I_A = I_S = I_L \\ V_T = E_A + I_A(R_A + R_S) \end{cases}$$

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

مشخصه گشتاور ــ دور موتور سری

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

مدار معادل و منحنی مشخصه های ماشینهای dc بر اساس نوع تحریک



معادل موتور مختلط (کمپوند)
الف) با انشعاب بلند ب) با انشعاب کوتاه

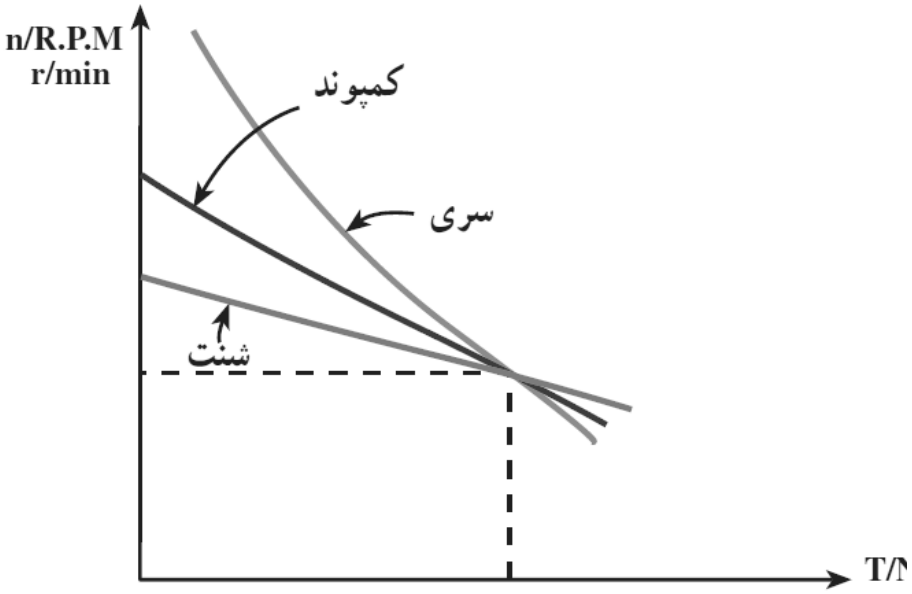
$$I_F = \frac{V_T}{R_F}$$

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

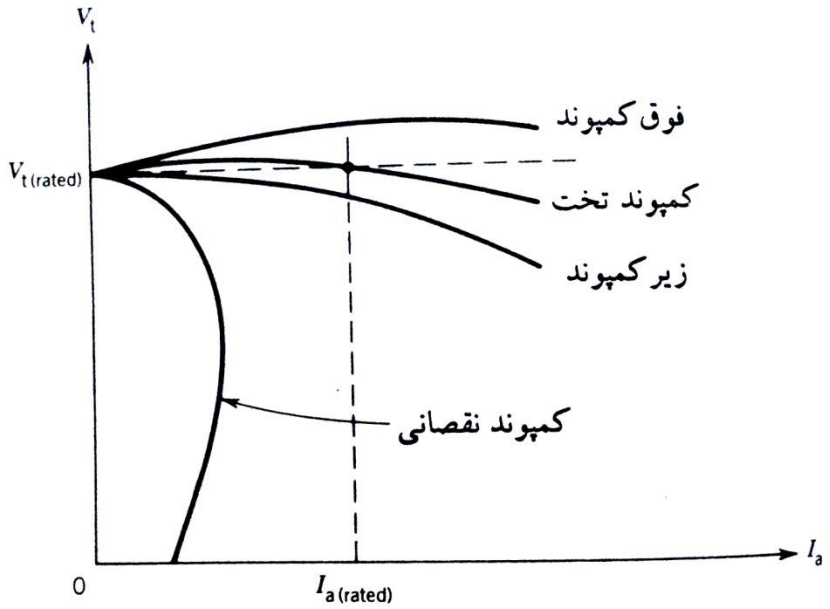
$$I_L = I_A + I_F$$

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

مدار معادل و منحنی مشخصه های ماشینهای dc بر اساس نوع تحریک



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



مشخصه V - I (ولتاژ - جریان) در ژنراتورهای DC کمپوند

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

راه اندازها در ماشینهای dc

✓ اگر موتور dc مستقیماً به شبکه DC متصل شود جریان راه اندازی بالای خطرناکی را از شبکه می کشد.

$$Ia = (Vt - Ea) / Ra$$

مقدار کوچکی است.

در لحظه راه اندازی Ea صفر است. چون Ea متناسب با سرعت است.

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

راه اندازها در ماشینهای dc

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

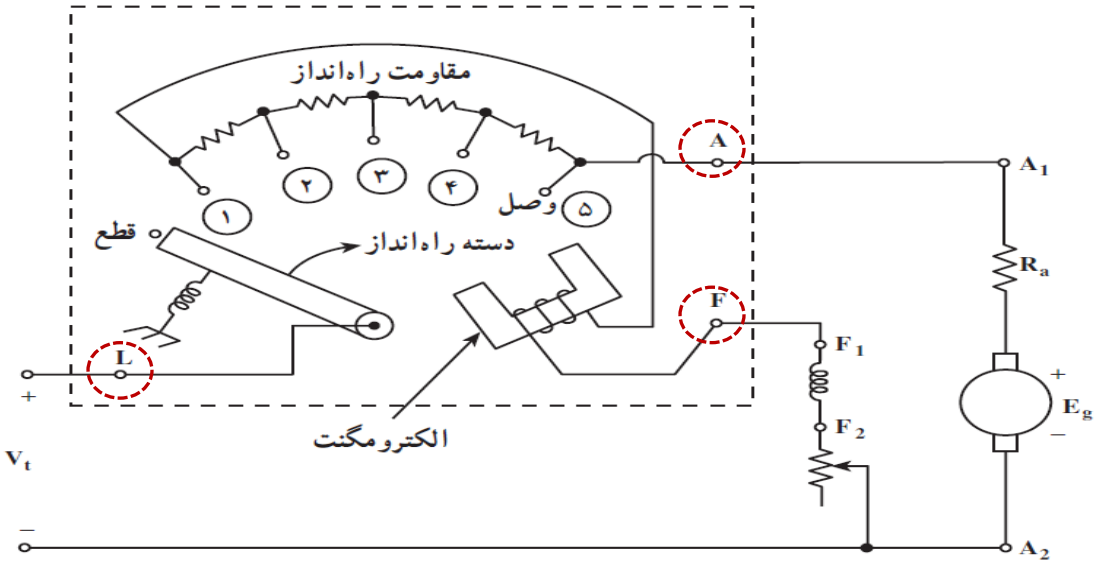
برای حل مشکلات ناشی از راه‌اندازی و جریان زیاد آن در موتورهای صنعتی معمولاً از مقاومتهای پرقدرتی (به عنوان راه‌انداز[1]) استفاده می‌شود.

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

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

راه اندازها در ماشینهای dc

- ✓ این نوع راه‌انداز دارای سه ترمینال L، A و F است و به همین دلیل سه نقطه‌ای نامیده می‌شود.
- ✓ راه‌اندازی سه نقطه‌ای برای موتورهای با تنظیم دور وسیع و نیاز به دورهای زیاد مناسب نیست.
- ✓ قطع جریان تحریک (به هر علت) باعث از بین رفتن خاصیت مغناطیسی هسته U شکل شده، با برگشت راه‌انداز به حالت اوّلیه قطع مدار آرمیچر هم از شبکه جدا خواهد شد.

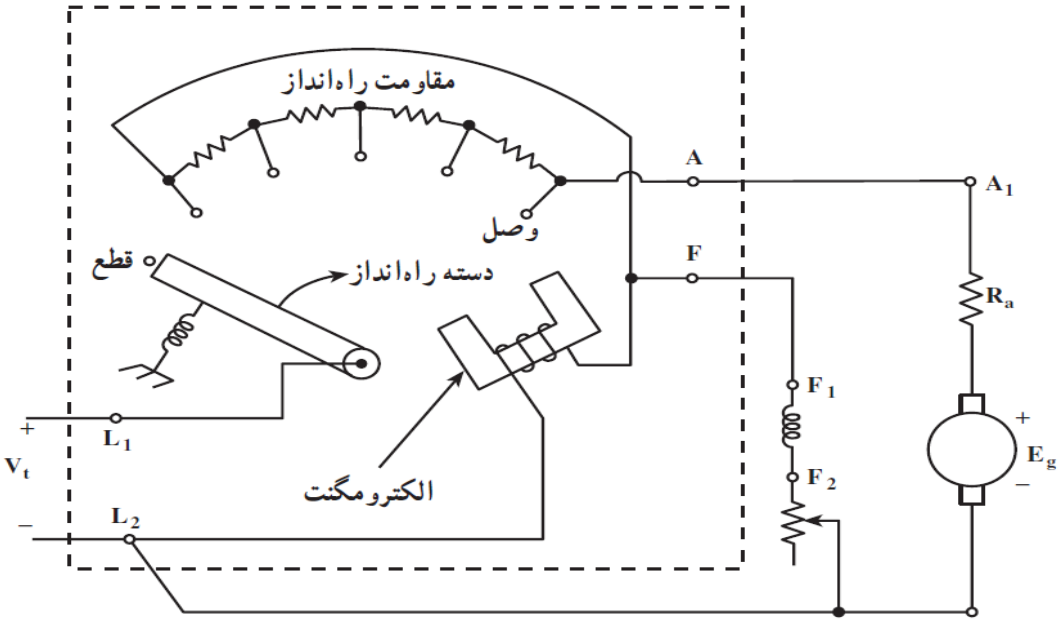


راه‌انداز سه نقطه‌ای موتور DC

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

راه اندازها در ماشینهای dc

- ✓ در این نوع راه‌اندازی امکان افزایش دور در محدوده وسیعتری وجود دارد.
- ✓ قطع مدار تحریک موجب قطع راه‌انداز نخواهد شد



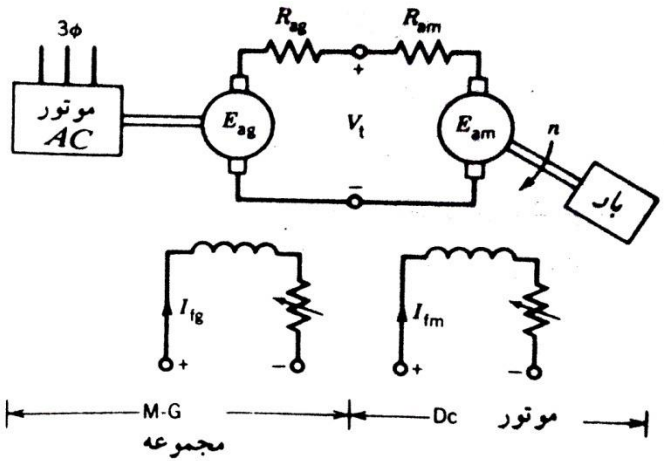
راه‌انداز ۴ نقطه‌ای موتور DC

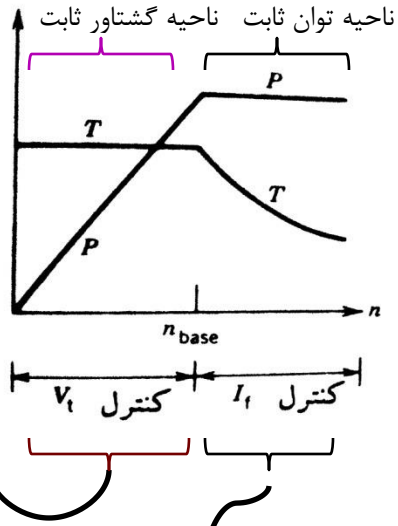
فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

کنترل سرعت موتورهای DC

- ✓ کنترل سرعت موتور در صنعت از اهمیت بالایی برخوردار است.
- ✓ اولین سیستم کنترل سرعت موتور dc به سیستم کنترل وارد لئونارد معروف است.

این سیستم از یک مجموعه موتور و ژنراتور تشکیل یافته است.





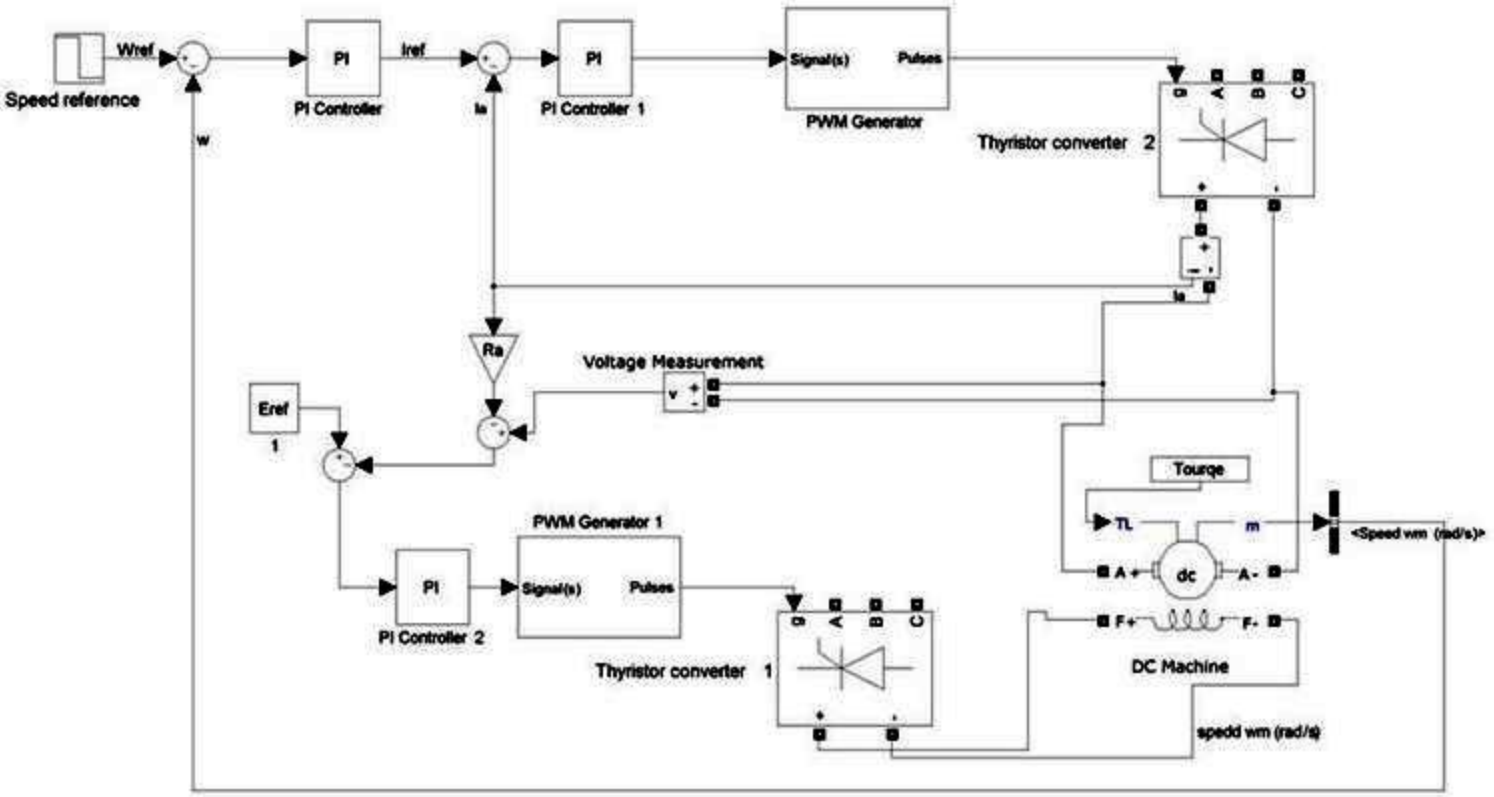
در حالت کنترل ولتاژ آرمیچر، جریان تحریک ثابت نگه داشته می شود. آنگاه جریان تحریک ژنراتور به گونه ای تغییر می نماید که Vt از صفر تا مقدار اسمی تغییر کند، در این صورت سرعت موتور از صفر تا سرعت مبنا تغییر خواهد کرد.

در این حالت ولتاژ آرمیچر (Vt) ثابت نگه داشته می شود و جریان تحریک موتور را کاهش می دهیم. در این حالت به کنترل سرعت بیش از سرعت مبنا دست خواهیم یافت.

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

کنترل سرعت موتورهای DC

✓ امروزه جهت کنترل سرعت از مبدلهای الکترونیکی استفاده می شود.



فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

شبیه سازی نرم افزاری موتور DC در نرم افزار متلب

- ✓ شبیه سازی نرم افزاری هر پدیده ای در محیط نرم افزار بر اساس روابط و معادلات دیفرانسیلی آن پدیده یا سیستم صورت می گیرد.
- ✓ برای توصیف رفتار موتور DC در محیط نرم افزاری باید روابط حاکم بر رفتار موتور را پیاده سازی کنیم.
- ✓ معادلات موتور در واقع توصیفگر رابطه‌ی بین جریانها، ولتاژها، سرعت، گشتاور موتور و غیره می باشد.
- ✓ هر موتوری از دو بخش الکتریکی و مکانیکی تشکیل یافته است.

پس دو دسته معادله الکتریکی و مکانیکی خواهیم داشت.

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

شبیه سازی نرم افزاری موتور DC در نرم افزار متلب

- ✓ شبیه سازی نرم افزاری هر پدیده ای در محیط نرم افزار بر اساس روابط و معادلات دیفرانسیلی آن پدیده یا سیستم صورت می گیرد.
- ✓ برای توصیف رفتار موتور DC در محیط نرم افزاری باید روابط حاکم بر رفتار موتور را پیاده سازی کنیم.
- ✓ معادلات موتور در واقع توصیفگر رابطه‌ی بین جریانها، ولتاژها، سرعت، گشتاور موتور و غیره می باشد.
- ✓ هر موتوری از دو بخش الکتریکی و مکانیکی تشکیل یافته است.

پس دو دسته کلی معادله الکتریکی و مکانیکی خواهیم داشت.

معادله مکانیکی:

- ➢ پارامترهای مکانیکی موتور شامل: اصطکاک، گشتاور تولیدی در موتور، گشتاوری که بار به موتور اعمال می کند و سرعت روتور

$$J\frac{d\omega}{dt} = T_e - T_L - B_m\omega - T_f$$

از دو طرف معادله انتگرال بگیریم
سرعت بدست می آید.

$$\omega = \frac{1}{J}\int (T_e - T_L - B_m.\omega - T_f)$$

where J = inertia, B_m = viscous friction coefficient, and T_f = Coulomb friction torque.

NAmE /ɪˈnɜːrʃə/

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

شبیه سازی نرم افزاری موتور DC در نرم افزار متلب

معادلات الکتریکی:

$E = K_E \omega$ K_E is the voltage constant and ω is the machine speed.

$K_E = L_{af} I_f$ the voltage constant K_E is proportional to the field current I_f:

$T_e = K_T I_a$ where K_T is the torque constant

$T_e , T_L > 0$: Motor mode
$T_e , T_L < 0$: Generator mode

$K_T = K_E$.

L_{af} :اندوکتانس متقابل آرمیچر و میدان

T_e : گشتاور الکترو مغناطیسی

T_L : گشتاور بار

I_a : جریان آرمیچر

I_f : جریان میدان (تحریک)

E : ولتاژی که در اثر تحریک در سیم پیچ آرمیچر ایجاد می شود.

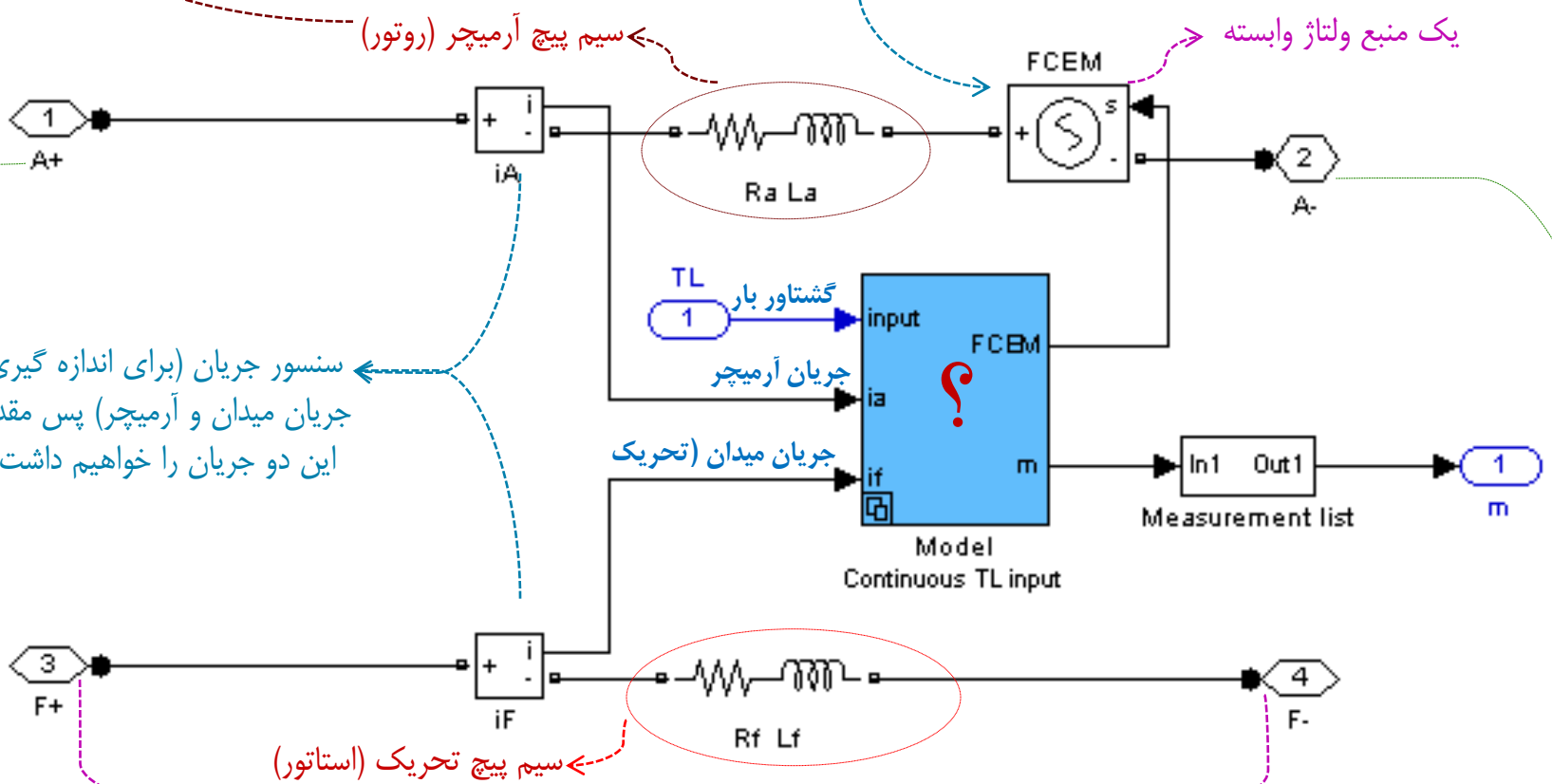
فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

شبیه سازی نرم افزاری موتور DC در نرم افزار متلب

پیاده سازی معادلات الکتریکی:

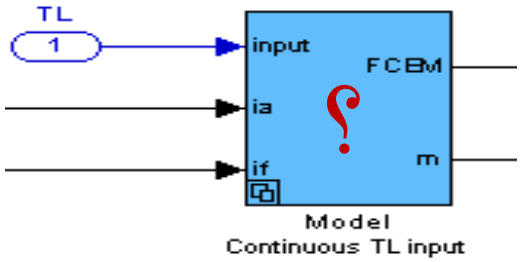
پس برای معادل سازی آن باید یک منبع ولتاژ به مقدار E را با سیم پیچ آرمیچر سری کنیم.

می دانیم که در سیم پیچ آرمیچر ولتاژ القاء می شود.



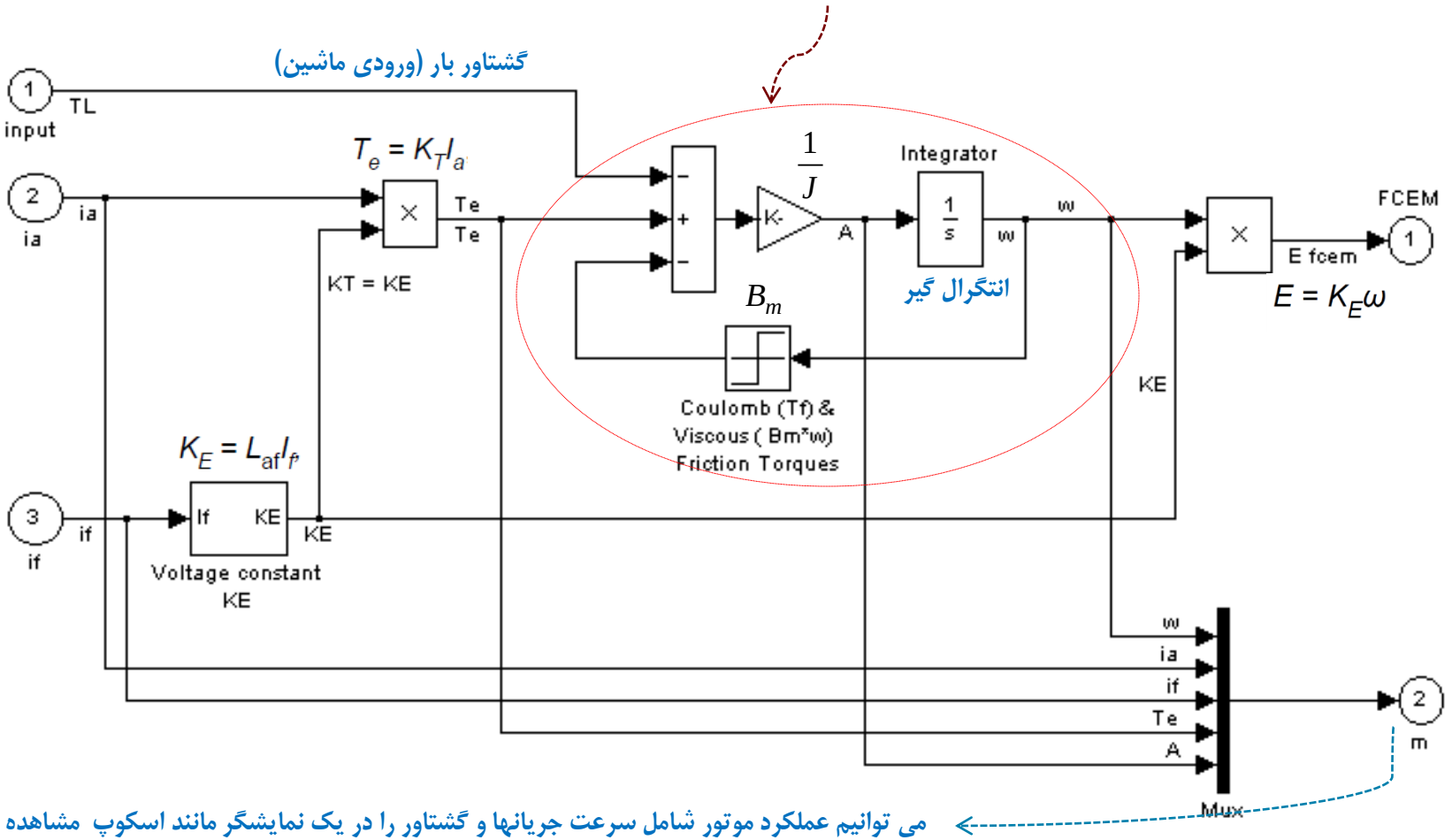
فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

شبیه سازی نرم افزاری موتور DC در نرم افزار متلب



پیاده سازی معادله مکانیکی:

$$\omega = \frac{1}{J}\int (T_e - T_L - B_m.\omega - T_f)$$

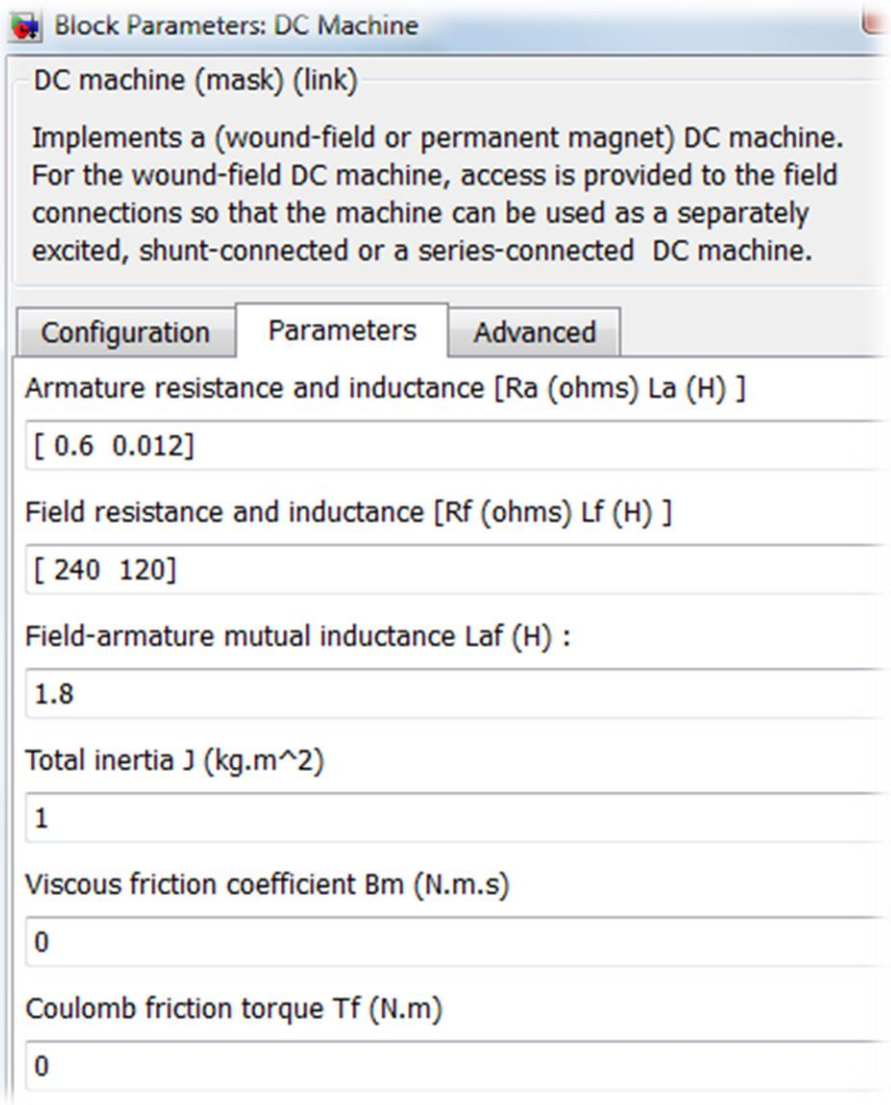


می توانیم عملکرد موتور شامل سرعت جریانها و گشتاور را در یک نمایشگر مانند اسکوپ مشاهده کنیم.

فصل دوم: ماشین های جریان مستقیم (DC)

شبیه سازی نرم افزاری موتور DC در نرم افزار متلب

اطلاعات ورودی شبیه سازی نرم افزاری موتور dc:



فصل سوم: ماشین های الکتریکی آسنکرون (القایی)

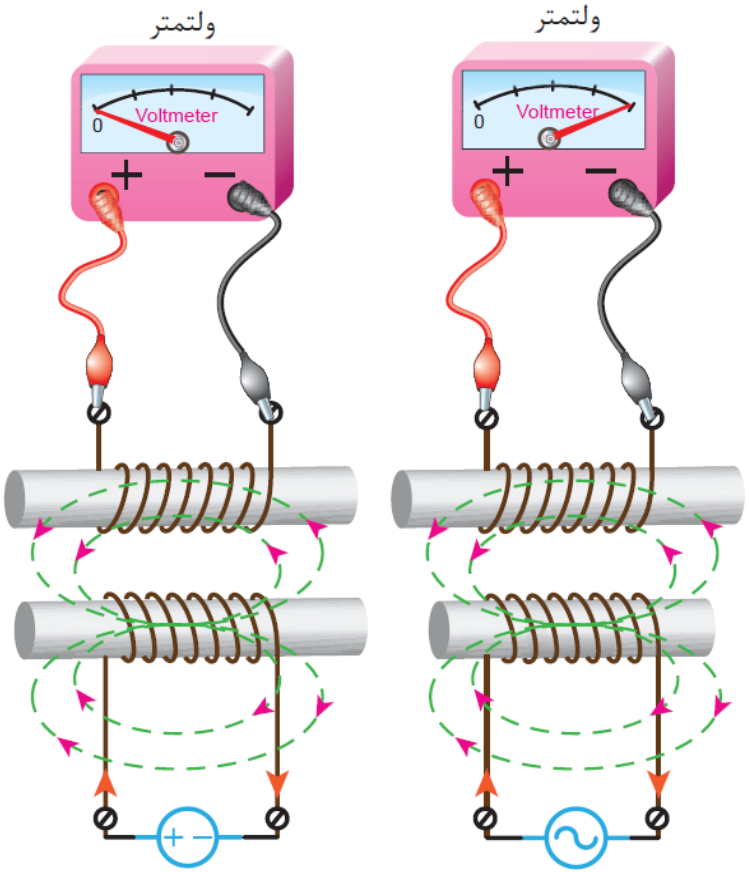
مقدمه:

- ✓ موتورهای القایی سه فاز، پرکاربردترین موتورهایی هستند که در صنعت استفاده می شوند.
- ✓ طراحی ساده و مستحکم، قیمت ارزان، هزینه نگهداری پایین و اتصال آسان به منبع سه فاز امتیازات اصلی موتورهای القایی هستند.
- ✓ موتورهای القایی به علت سادگی و هزینه کم نسبت به ماشین های جریان مستقیم برتری دارند و لذا کنترل این موتورها از اهمیت بالایی برخوردار می باشد.
- ✓ کنترل ماشین های القایی به طرز چشمگیری پیچیده تر از کنترل ماشین های جریان مستقیم بوده و چنانچه کارایی بالایی نیز از ماشین انتظار رود بر این پیچیدگی افزوده خواهد شود. در حقیقت این پیچیدگی به علت ساختار چند متغیره و غیر خطی موتور القایی است.

فصل سوم: ماشین های الکتریکی آسنکرون (القایی)

مفهوم القایی در ماشین های آسنکرون

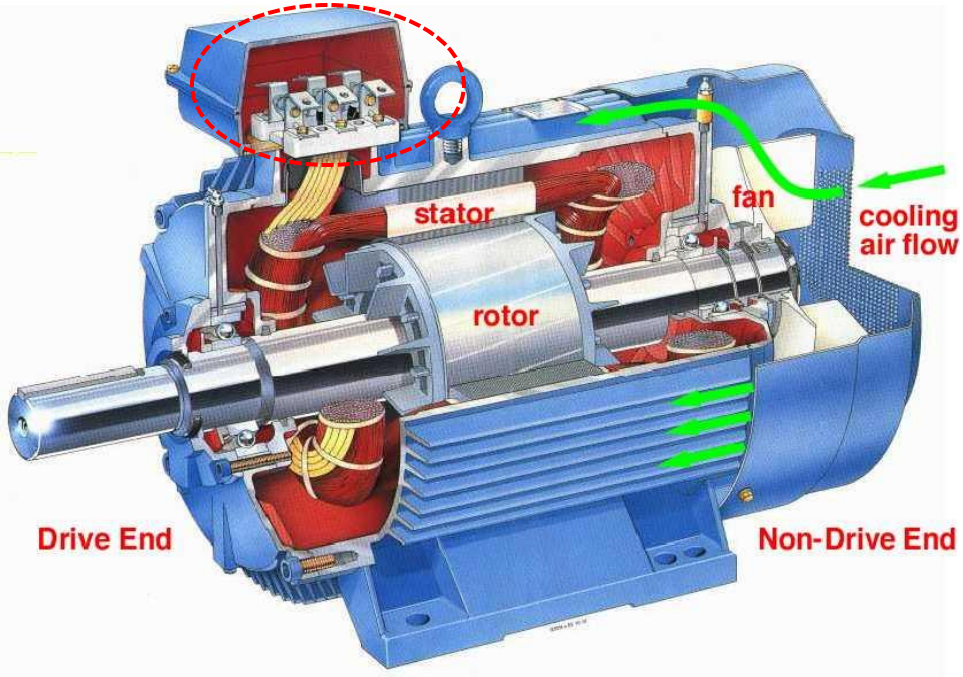
تغییرات فوران عامل ایجاد نیروی محرکه القایی در سیم‌پیچ است. از آنجاکه جریان DC فوران با مقدار ثابت تولید می‌کند لذا سیم‌پیچ حامل جریان DC در سیم‌پیچ مجاور خود نیروی محرکه القا نمی‌کند.



ایجاد ولتاژ القایی باولتاژ متناوب (سمت راست) عدم ایجاد ولتاژ القایی با ولتاژ جریان مستقیم(سمت چپ)

فصل سوم: ماشین های الکتریکی آسنکرون (القایی)

ساختمان ماشین های القایی



به‌طور کلی هر ماشین القایی (موتور یا مولد القایی) از دو بخش استاتور و رتور تشکیل شده است. استاتور بخش ثابت و رتور بخش متحرک ماشین می‌باشد.

به علاوه دو درپوش و یاتاقان‌های طرفین ماشین به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که قسمت متحرک ماشین (رتور) به‌راحتی در داخل استاتور بچرخد و تکیه‌گاه مکانیکی مناسبی برای رتور فراهم شود. این بخش در ساختار الکتریکی ماشین نقشی ندارد و جزو تجهیزات مکانیکی ماشین به‌حساب می‌آید.

روتور

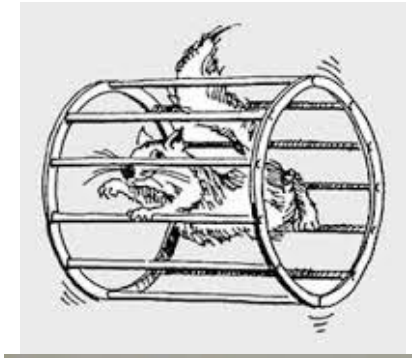
- رتور قفسی: از تعدادی میله های مسی یا آلومینیومی تشکیل یافته است. این میله‌ها از هر دو طرف توسط دو حلقه هم‌جنس با میله‌ها (آلومینیوم یا مس) به هم متصل شده‌اند.
- رتور سیم‌پیچی شده

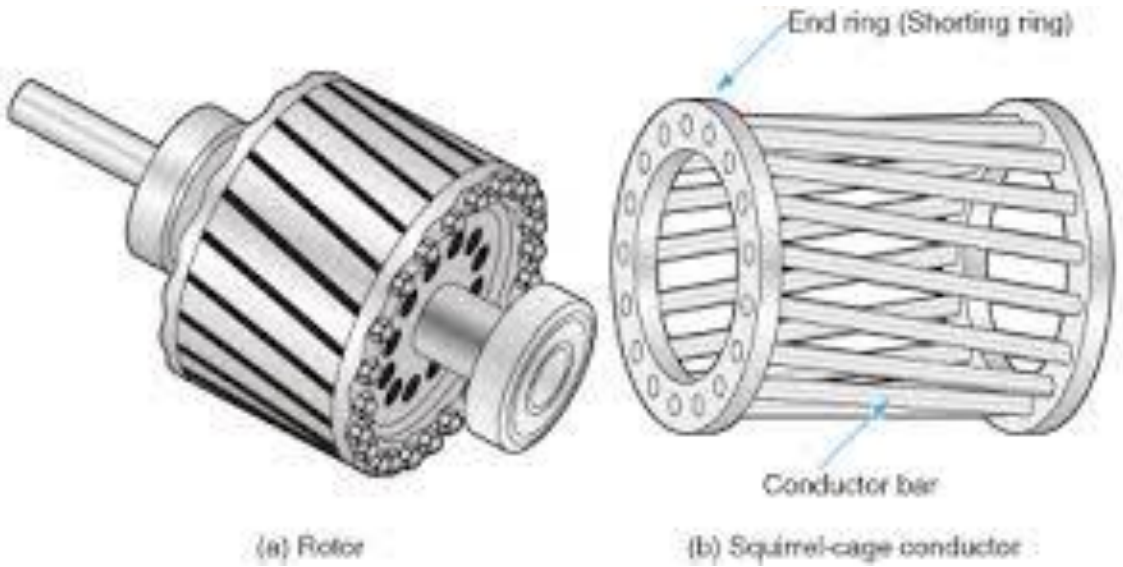
فصل سوم: ماشین های الکتریکی آسنکرون (القایی)

ساختمان ماشین های القایی

روتور

- رتور قفسی ← از تعدادی میله های مسی یا آلومینیومی تشکیل یافته است.
- رتور سیم‌پیچی شده ← این میله‌ها از هر دو طرف توسط دو حلقه هم‌جنس با میله‌ها (آلومینیوم یا مس) به هم متصل شده‌اند.





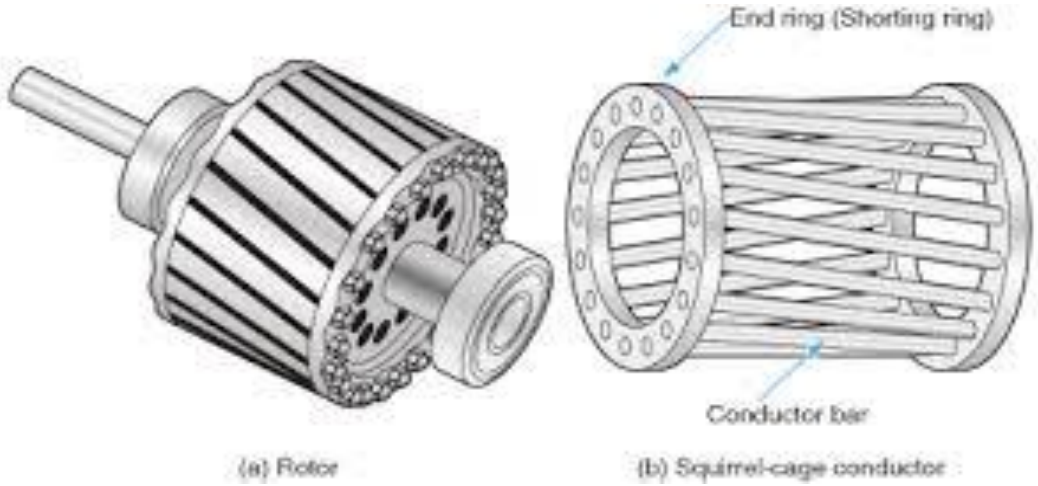
فصل سوم: ماشین های الکتریکی آسنکرون (القایی)

ساختمان ماشین های القایی

روتور

- رتور قفسی ← از تعدادی میله های مسی یا آلومینیومی تشکیل یافته است.
- رتور سیم‌پیچی شده ← این میله‌ها از هر دو طرف توسط دو حلقه هم‌جنس با میله‌ها (آلومینیوم یا مس) به هم متصل شده‌اند.

سؤال: چرا میله های روتور قفس سنجابی نسبت به محور روتور انحراف دارند؟



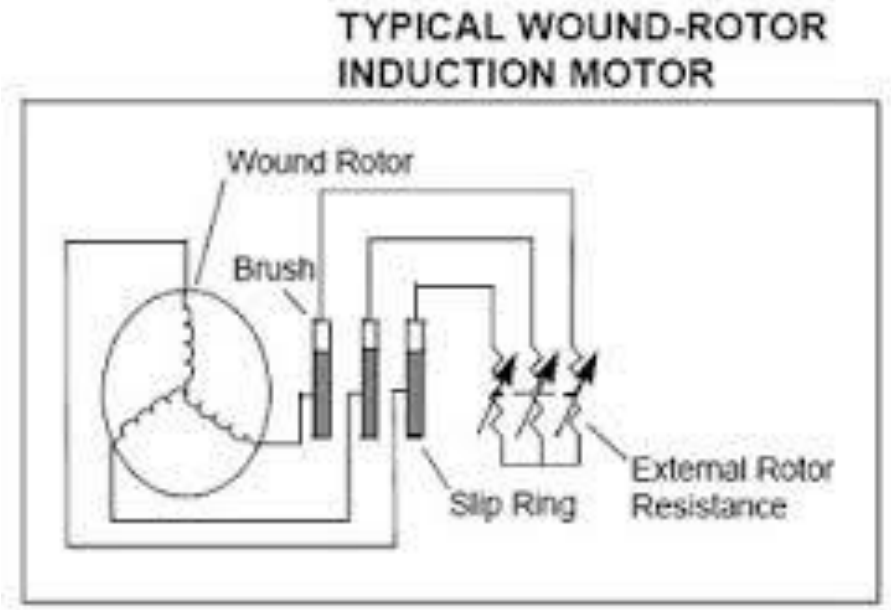
فصل سوم: ماشین های الکتریکی آسنکرون (القایی)

ساختمان ماشین های القایی

روتور

- رتور قفسی
- رتور سیم‌پیچی شده

بر روی این نوع رتور سه دسته سیم‌پیچ با اختلاف مکانی ۱۲۰° درجه مانند استاتور ماشین القایی سه فاز با همان تعداد قطب پیچیده می‌شوند. این سیم‌پیچ‌ها نسبت به بدنه رتور عایق شده است.



مدار الکتریکی رتور سیم پیچی

فصل سوم: ماشین های الکتریکی آسنکرون (القایی)

ساختمان ماشین های القایی

روتور

- رتور قفسی
- رتور سیم‌پیچی شده

بر روی این نوع رتور سه دسته سیم‌پیچ با اختلاف مکانی ۱۲۰° درجه مانند استاتور ماشین القایی سه فاز با همان تعداد قطب پیچیده می‌شوند. این سیم‌پیچ‌ها نسبت به بدنه رتور عایق شده است.

تعداد قطب‌های سیم پیچی رتور باید برابر با تعداد قطب‌های سیم‌پیچی استاتور باشد.

سیم پیچ‌های رتور اغلب با اتصال ستاره به هم وصل می‌شوند و سه سر دیگر سیم پیچ‌ها توسط حلقه‌های لغزان و جاروبک به بیرون رتور جهت اتصال به مقاومت راه‌انداز انتقال داده می شوند.

فصل سوم: ماشین های الکتریکی آسنکرون (القایی)

اساس کار ماشین های القایی

✓ مدار الکتریکی موتور القایی سه فاز رتور سیم پیچی شده مانند یک ترانسفورماتور سه فاز است. در واقع هر دو از اثر القای نیروی محرکه در سیم پیچ طرف دیگر استفاده می کنند لذا به این موتورها، موتورهای القایی گفته می‌شود.

✓ در ساختار موتور القایی بین سیم استاتور (اولیه) و روتور (ثانویه) علاوه بر هسته مغناطیسی، فاصله هوایی نیز وجود دارد.

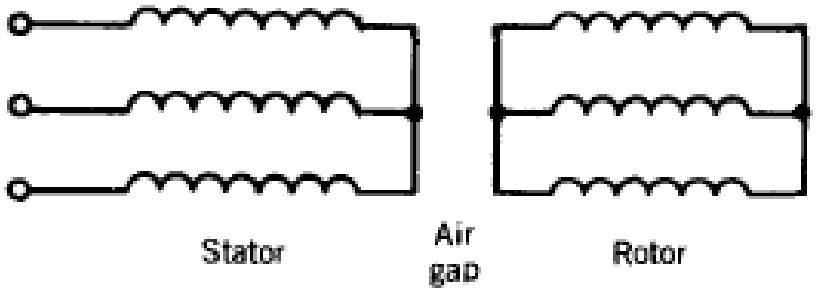


FIGURE 5.12 Three-phase wound-rotor induction motor.

فصل سوم: ماشین های الکتریکی آسنکرون (القایی)

اساس کار ماشین های القایی

سیم پیچ آرمیچر

به سیم پیچ هایی که در آنها ولتاژ القاء می شود.

سیم پیچ تحریک (میدان)

به سیم پیچ هایی که از آنها جریان می گذرد تا میدان مغناطیسی و شار اصلی پدید آیند.

فصل سوم: ماشین های الکتریکی آسنکرون (القایی)

اساس کار ماشین های القایی

- ✓ سیم پیچی تحریک یک سیم پیچ سه فاز متعادل است که بر روی استاتور بسته می شود. چنانچه این سیم پیچی ها از منبع ولتاژ سه فاز متقارن تغذیه شوند، جریان سه فاز سینوسی درون این سیم پیچی ها جاری می شود.

در اثر عبور این جریان های سه فاز سینوسی، سه میدان مغناطیسی ایجاد می شود که با یکدیگر ۱۲۰ درجه اختلاف فاز خواهد داشت.

مقدار میدان برآیند ثابت است و با سرعت سنکرون گردش می کند.

فصل سوم: ماشین های الکتریکی آسنکرون (القایی)

اساس کار ماشین های القایی

- ✓ میدان گردان استاتور یک ولتاژ سه فاز متعادل در سیم پیچی روتور القا می کند که به دلیل اتصال کوتاه بودن سیم پیچی و یا میله های روتور، یک جریان در روتور جاری می شود این جریان یک میدان گردان تولید می کند که نسبت به میدان استاتور ثابت و نسبت به استاتور و روتور در حال گردش است. در اثر تقابل این دو میدان، گشتاور ایجاد می شود اگر تعداد قطبهای ماشین های القایی P و فرکانس ولتاژ اعمالی به استاتور fs باشد آنگاه سرعت سنکرون بر حسب r.p.m برابر است با:

$$n = \frac{2}{p} f 60 = \frac{120f}{\mathrm{p}}$$

$$\times \left(\frac{\pi}{30}\right)$$

بر حسب Rad/s

فصل سوم: ماشین های الکتریکی آسنکرون (القایی)

اساس کار ماشین های القایی

✓ وقتی روتور ساکن است، میدان گردان با سرعت سنکرون سیم پیچهای روتور را قطع می کند اما اگر روتور با سرعت سنکرون در جهت میدان مغناطیسی گردان بچرخد، میدان گردان با سرعت $n_s - n$ سیم پیچهای روتور را قطع می کند. بنابراین ولتاژ القا شده به سرعت نسبی بین میدان گردان و روتور بستگی دارد. از این رو کمیتی به نام لغزش بصورت زیر برای یک ماشین القایی تعریف می شود:

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

n=0در لحظه راه اندازی ← s=1

s=0 ← n=nsدر سرعت سنکرون

فرکانس ولتاژ القاء شده در سیم پیچهای (یا میله های) روتور برابر است با: $f_r = S.f_s$

فصل سوم: ماشین های الکتریکی آسنکرون (القایی)

جلسه دوازدهم

اساس کار ماشین های القایی

سرعت میدان گردان روتور به صورت مقابل خواهد بود: $n_r=(120.f_r)/P=S.n_s$

سرعت میدان گردان استاتور نسبت به روتور عبارت است از: n_s-n

سرعت میدان گردان روتور نسبت به روتور عبارت است از: n_r

سرعت میدان گردان روتور نسبت به استاتور عبارت است از: $n_r+ n$

سؤال: سرعت میدان گردان استاتور نسبت به میدان گردان روتور چند است؟

فصل سوم: ماشین های الکتریکی آسنکرون (القایی)

اساس کار ماشین های القایی

- ✓ روتور یک موتور القایی هرگز نمی تواند به سرعت سنکرون برسد. در صورتیکه سرعت روتور به مقدار سنکرون برسد، هادی های روتور نسبت به میدان مغناطیسی گردان ساکن خواهد بود.

در نتیجه در هادی های روتور هیچ ولتاژی القا نخواهد شد و بنابراین گشتاوری بوجود نخواهد امد. لذا بایستی همواره سرعت گردش روتور از سرعت سنکرون کمتر باشد تا گشتاور تولید شود.

فصل سوم: ماشین های الکتریکی آسنکرون (القایی)

اساس کار ماشین های القایی

یکی از کمیت‌های شبکه برق متناوب، فرکانس f است که با دوره تناوب T نسبت عکس دارد. پس می توان نتیجه گرفت یکی از عوامل مؤثر بر سرعت میدان دوار، فرکانس شبکه برق می‌باشد ولی از آنجا که فرکانس متناسب با عکس زمان تناوب است، بنابراین با کاهش فرکانس، سرعت چرخش میدان دوار، کم می‌شود و با افزایش فرکانس، سرعت چرخش میدان دوار زیاد می‌شود.

سرعت میدان دوار ماشین القایی را با n_s نمایش می‌دهند و آن را سرعت سنکرون می‌نامند.

سرعت میدان دوار متناسب با فرکانس است بنابراین می‌نویسیم :

$$n_s \propto f$$

فصل سوم: ماشین های الکتریکی آسنکرون (القایی)

اساس کار ماشین های القایی

رتور موتور القایی پس از راه‌اندازی دور می‌گیرد و سرعت آن به تدریج افزایش می‌یابد. با زیاد شدن سرعت رتور، اختلاف سرعت رتور با سرعت میدان دوار کم می‌شود. این افزایش سرعت تا جایی که نزدیک به سرعت سنکرون است می‌تواند ادامه یابد. زیرا اگر سرعت رتور با میدان دوار برابر شود، میدان استاتور هم نمی‌تواند هادی‌های رتور را قطع نماید و در نتیجه نیرویی به رتور وارد نمی‌شود. با وجود وزن خود رتور و نیروی اصطکاک یاتاقان‌ها و هوا، سرعت رتور هرگز به سرعت سنکرون نمی‌رسد بلکه در نزدیک آن پایدار می‌شود. از آنجا که در موتورهای القایی بین سرعت میدان دوار و سرعت رتور همواره اختلاف وجود دارد در نتیجه به آنها موتورهای آسنکرون[1] نیز گفته می‌شود.

فصل سوم: ماشین های الکتریکی آسنکرون (القایی)

اساس کار ماشین های القایی

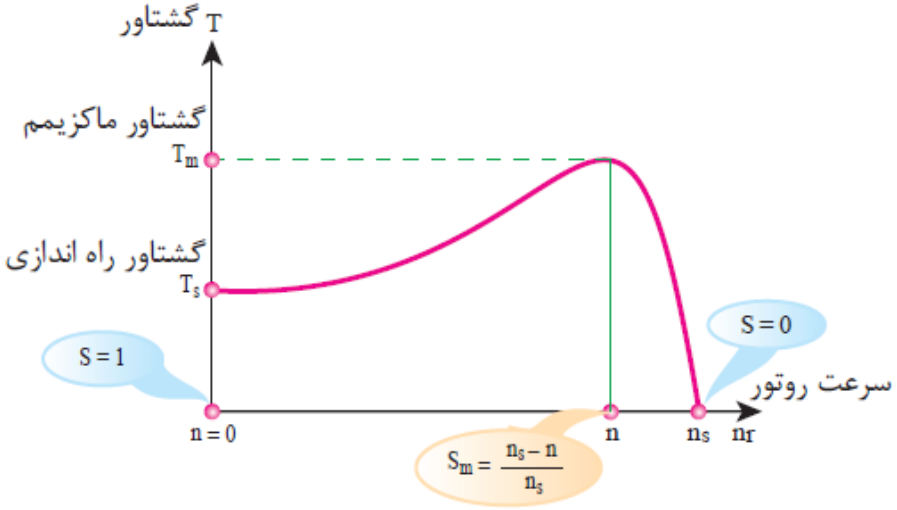
موتور القایی مانند ترانسفورماتوری است که سیم پیچ اولیه آن سیم‌پیچ استاتور و ثانویه آن هادی‌های رتور است. اما مهم‌ترین تفاوتی که بین آنها وجود دارد یکسانی فرکانس برق در دو سمت ترانسفورماتور و تفاوت فرکانس برق در استاتور و رتور موتورهای القایی است. زیرا با توجه به امکان گردش رتور موتورهای القایی، فرکانس ولتاژ القایی مدار رتور یعنی (f_r) تغییر نموده و تابع سرعت رتور ماشین می‌باشد.

در واقع تنها در صورت ساکن بودن رتور، فرکانس ولتاژ استاتور و رتور برابر است و با افزایش سرعت رتور چون سرعت لغزش کاهش می یابد، فرکانس ولتاژ القایی رتور نیز کم می‌شود[1].

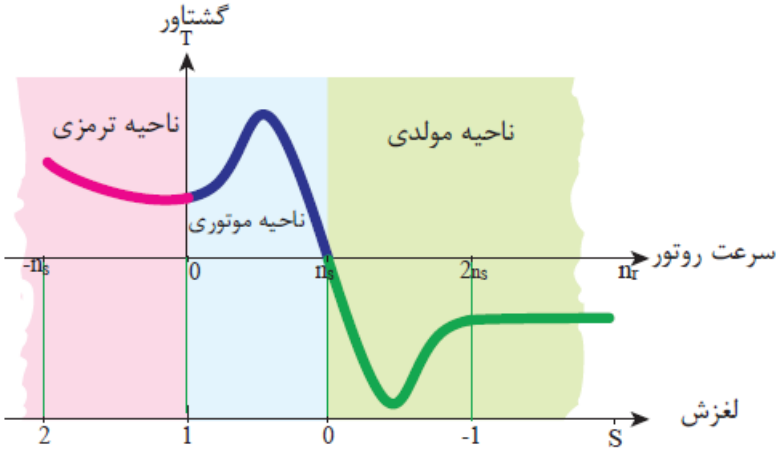
فصل سوم: ماشین های الکتریکی آسنکرون (القایی)

اساس کار ماشین های القایی

منحنی گشتاور ــ دور موتور القایی



نواحی مختلف ماشین القایی



فصل سوم: ماشین های الکتریکی آسنکرون (القایی)

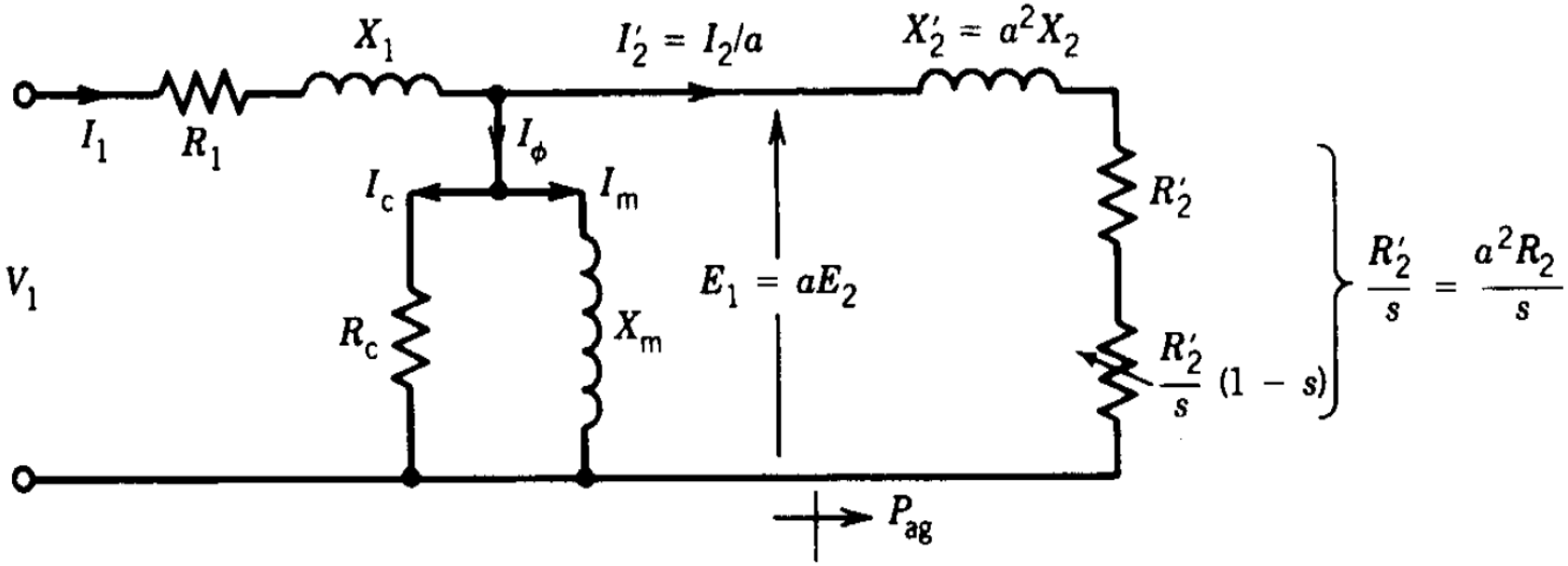
اساس کار ماشین های القایی

در زمان راه‌اندازی ضریب قدرت موتور بسیار کم است ولی با افزایش سرعت، مقدار آن افزایش یافته و پس از عبور از لغزش بحرانی مقدار آن رو به کاهش می گذارد و در سرعت سنکرون صفر می‌شود.

فصل سوم: ماشین های الکتریکی آسنکرون (القایی)

مدار معادل ماشین های القایی:

سوال: تاثیر مقدار فاصله هوایی بر مصرف انرژی الکتریکی موتور القایی چگونه است؟



جلسه سیزدهم

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

منابع:

-درس ماشین های الکتریکی ۳ دکتر حلوایی

-ماشین های الکتریکی_ فیتزجراد (مترجم:دکتر قهرمان)

-ماشین های الکتریکی- تحلیل، بهره برداری و کنترل _پ. س. سن

(مترجم: دکتر عابدی)

-بررسی سیستمهای قدرت (جلد اول،هادی سعادت)

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

کلیات ماشین سنکرون

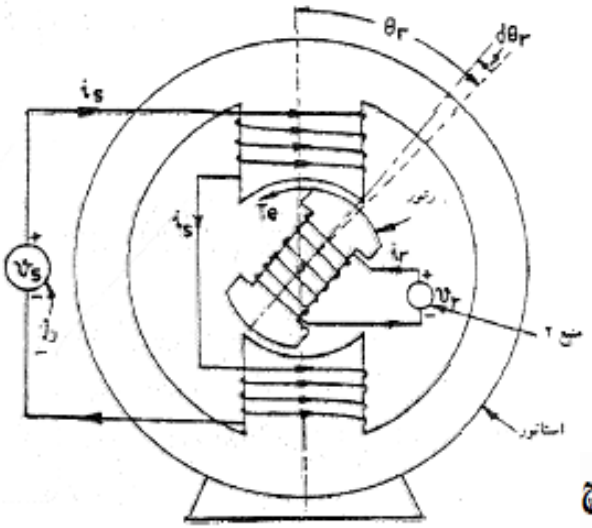
مروری بر اصول کار ماشین‌های الکتریکی گردان

انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی یک سیستم خطی:

$$W_{fld} = \frac{1}{2} i_s^2 L_s + \frac{1}{2} i_r^2 L_r + M_{sr} i_s i_r$$

رابطه کلی گشتاور الکترومغناطیسی در سیستم خطی:

$$T_e = \frac{\partial W_{fld}}{\partial \theta_r}$$



سیستم مغناطیسی دو تحریکه

گشتاور الکترومغناطیسی تولید شده در سیستم گردان دوتحریکه:

$$T_e = \frac{1}{2} i_s^2 \frac{dL_s}{d\theta_r} + \frac{1}{2} i_r^2 \frac{dL_r}{d\theta_r} + i_s i_r \frac{dM_{sr}}{d\theta_r}$$

ویژگیهای ماشین‌های سنکرون

- **تعریف ماشین سنکرون:** ماشین AC دوتحریکه‌ای است که سیم‌پیچ میدان آن از منبع DC تغذیه می شود و سیم پیچ آرمیچرش به منبع AC متصل است.

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

- ماشین سنکرون:
  - ژنراتور (آلترناتور)
  - موتور
- محدوده قدرت ژنراتورها:
  - حداکثر قدرت در ایران: 400 MW
  - حداکثر قدرت در جهان: 1700 MW
- ولتاژ ژنراتورها: با افزایش قدرت ژنراتورها، ولتاژ آنها نیز افزایش می یابد. اما به ندرت از ۳۳ kV فراتر می‌رود.

- ژنراتورهای سنکرون منبع اصلی تولید انرژی الکتریکی در دنیا می‌باشند.
- موتورهای سنکرون در توان‌های بالا در صنایع فولاد، نورد، سیمان و غیره کاربرد زیادی دارند.

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

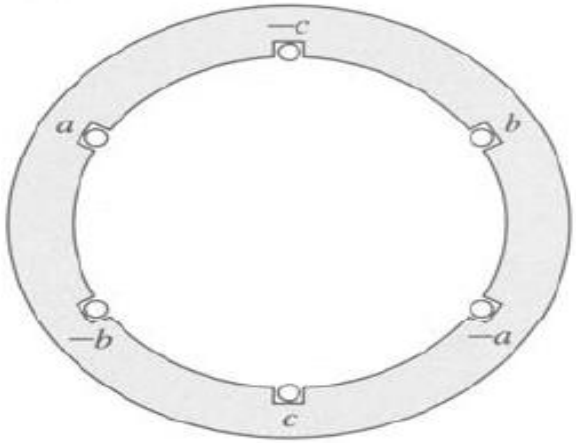
اجزای تشکیل دهنده ماشین‌های سنکرون

- ماشین سنکرون از دو قسمت تشکیل شده است:

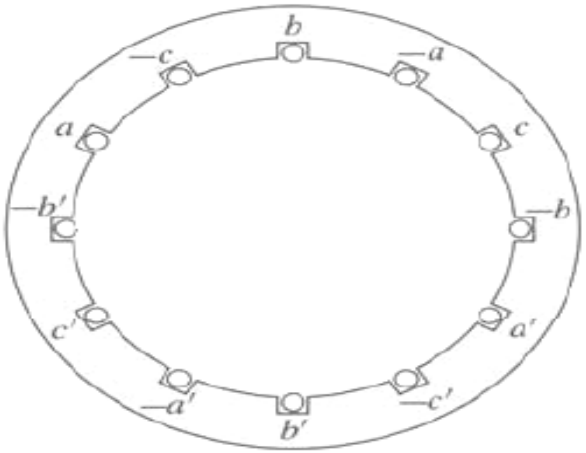
استاتور (آرمیچر) { ۱- هسته مغناطیسی ؛ ۲- سیم پیچی (اکثرا سه‌فاز)

روتور (تحریک) { ۱- هسته ؛ ۲- سیم پیچی تغذیه شده توسط جریان DC

- استاتور (آرمیچر) ماشین سنکرون همانند استاتور ماشین القایی است. سیم پیچی استاتور در ژنراتورهای سنکرون، اتصال سه‌فاز استاتور همواره به صورت ستاره است و مرکز ستاره زمین می شود.



(a) استاتور ماشین سه‌فاز دو قطبی

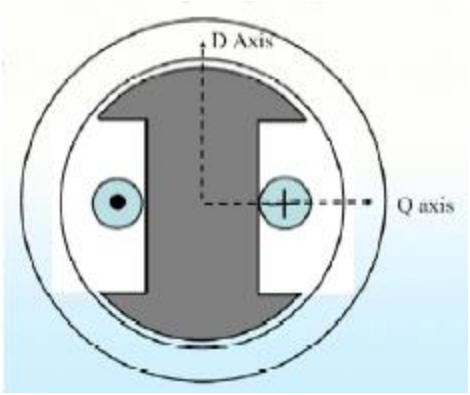


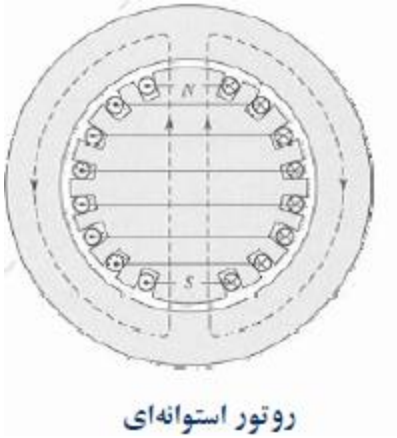
(b) استاتور ماشین سه‌فاز چهارقطبی

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

اجزای تشکیل دهنده ماشین‌های سنکرون

تحریک ماشین سنکرون سیم‌پیچی با تغذیه DC است که در اغلب ژنراتورهای سنکرون روی بخش دوار (روتور) قرار دارد.





روتور استوانه‌ای

روتور قطب برجسته

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

اجزای تشکیل دهنده ماشین‌های سنکرون

حلقه‌های لغزان وظیفه هدایت جریان DC به سیم پیچی تحریک واقع بر روی روتور را به عهده دارند.

- دسته‌بندی ماشین‌های سنکرون با توجه به شکل روتور: ۱- ماشین‌های با قطب برجسته ۲- ماشین‌های با قطب صاف

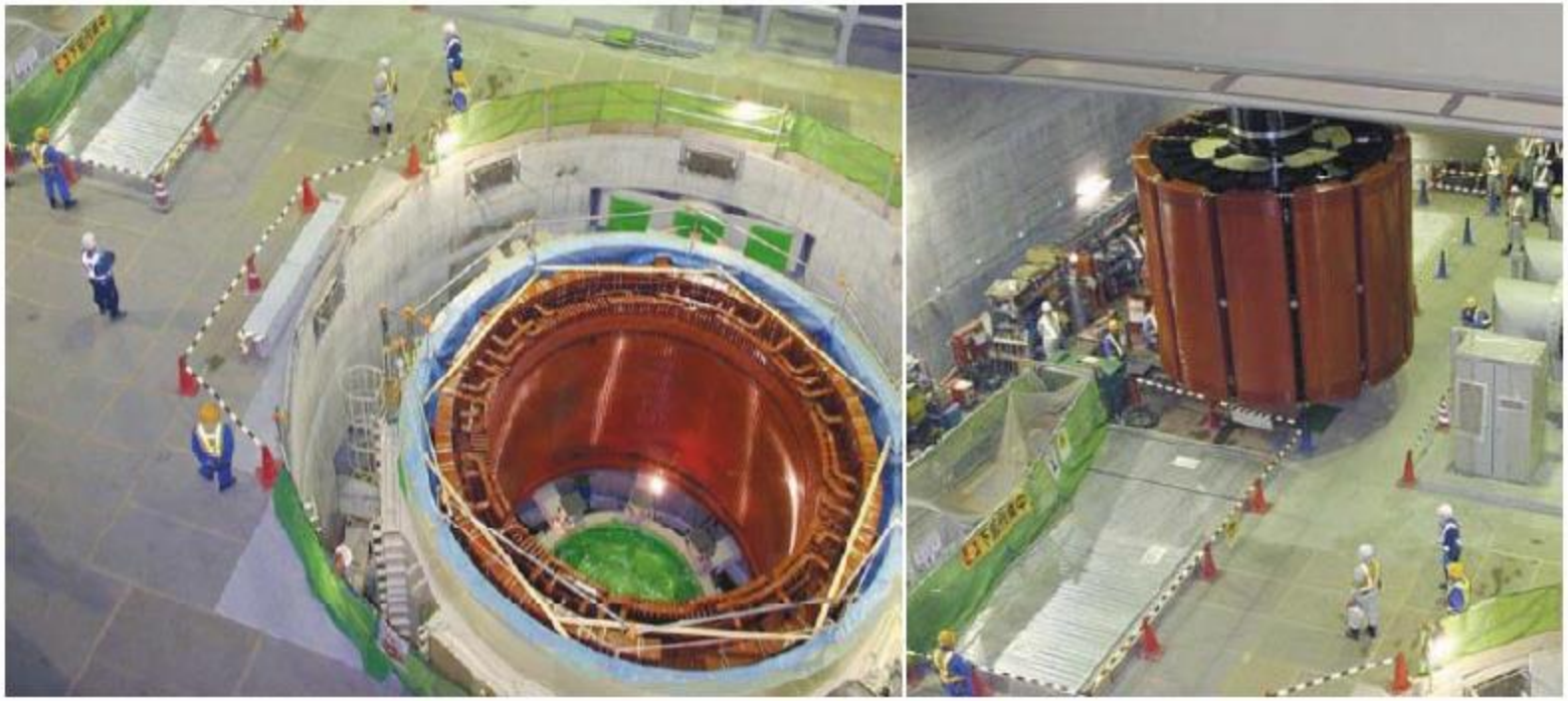
تعداد قطب‌ها در ماشین‌های سنکرون: به سرعت چرخش روتور و فرکانس تغذیه استاتور بستگی دارد.

- کاربرد ماشین‌های با قطب برجسته: در ژنراتورهای نیروگاههای آبی به‌کار می‌روند – دارای سرعت پائین بین (۵۰ تا ۵۰۰ دور بر دقیقه) هستند – برای ایجاد فرکانس ۵۰ Hz نیاز به تعداد زیادی قطب دارند

- کاربرد ماشین‌های با قطب صاف: با توربین‌های با سرعت بالا کار می‌کنند – دارای سرعت بالا (۱۵۰۰ تا ۳۶۰۰ دور بر دقیقه) هستند - برای ایجاد فرکانس ۵۰ Hz نیاز به تعداد دو یا چهار قطب هستند. – دارای کارایی بالاتری هستند.

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

اجزای تشکیل دهنده ماشین‌های سنکرون



ژنراتور نیروگاه آبی کاناگووا در کشور ژاپن:
۵۲۵ MVA، ۱۸ kV، ضریب توان ۹۵/۰ – ۹۰/۰، ۵۰ Hz، با سرعت دورانی ۵۰۰ rpm

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

اجزای تشکیل دهنده ماشین‌های سنکرون

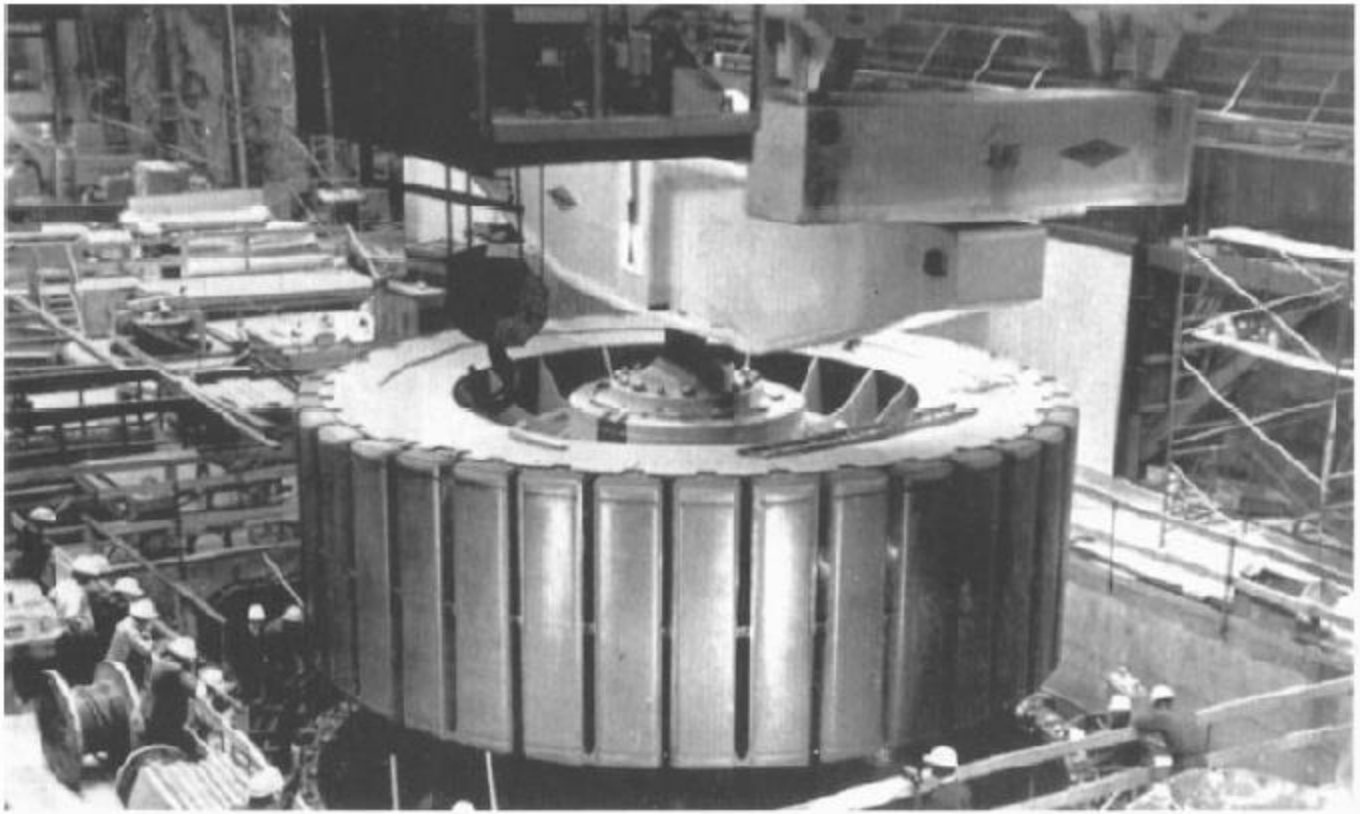


Figure 16.4
This 36-pole rotor is being lowered into the stator shown in Fig. 16.2. The 2400 A dc exciting current is supplied by a 330 V, electronic rectifier. Other details are: mass: 600 t; moment of inertia: 4140 t·m^2; air gap: 33 mm.
(*Courtesy of Marine Industrie*)

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

اجزای تشکیل دهنده ماشین‌های سنکرون

ماده ایده‌آل برای جنس هسته: ۱- ضریب نفوذپذیری بسیار بالا، ۲- چگالی شار اشباع بالا ۳- تلفات هسته بسیار پائین

- آهن نرم
- آهن سیلیکون‌دار
- فولاد

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

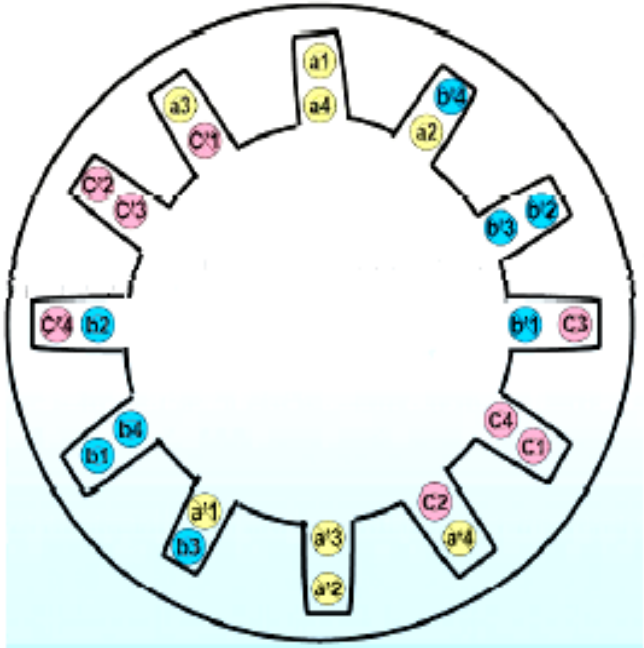
انواع سیم‌پیچی استاتور

❖ **انواع سیم‌پیچی استاتور ماشین‌های AC:**

۱- سیم‌پیچهای یک طبقه

۲- سیم پیچ‌های دو طبقه

تفاوت این دو نوع سیم پیچی در ترتیب اتصالات پیشانی آنهاست.



سیم‌پیچی دوطبقه

❖ **مزایای سیم پیچی دوطبقه نسبت به یک طبقه:**

(الف) ساخت آنها ساده‌تر و هزینه پیچک‌ها کمتر است.

(ب) استفاده از سیم پیچی گام کوتاه ممکن است.

(ج) ماشین راکتانس نشتی کمتری خواهد داشت.

(د) در ژنراتورها شکل موج emf بهتری خواهیم داشت.

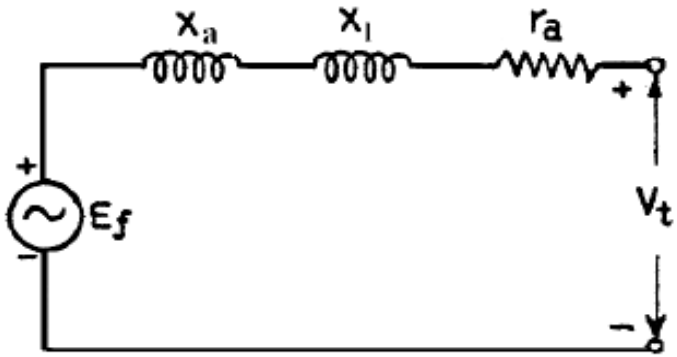
در اغلب ماشین‌های سنکرون (و برای تمام ماشینهای با توان بیش از ۵ kW) از سیم پیچی دو طبقه استفاده می‌شود.

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

مدل ژنراتور سنکرون با روتور استوانه‌ای

مدار معادل ژنراتور سنکرون استوانه‌ای

✓ برای پیش‌بینی رفتار ماشین سنکرون به مدار معادل آن نیاز داریم.



مدار معادل ماشین سنکرون

- اثراتی که در مدار معادل باید در نظر گرفته شود، عبارتند از:
  ۱- ولتاژ القایی بی‌باری (E_a یا E_f)
  ۲- اثر عکس‌العمل آرمیچر (X_a)
  ۳- اثر شارهای پراکندگی (X_l)
  ٤- مقاومت آرمیچر (r_a)

۱- ولتاژ القایی بی‌باری:

ولتاژ القایی بی‌باری با یک منبع ولتاژ مدل می‌شود.

$$E_f = \sqrt{2}\pi k_w f N_{ph} \varphi \qquad (۱)$$

$$k_w = k_p \times k_d \qquad (۲)$$

$$\Rightarrow \boxed{E_f = K \varphi \omega} \qquad (۳)$$

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

اجزای مدار معادل:

۲- اثر عکس‌العمل آرمیچر:

عکس‌العمل آرمیچر بواسطه عبور جریان از سیم‌پیچ های آرمیچر بوجود می‌آید که در نتیجه آن ولتاژ القایی بی‌باری ناشی از تحریک دچار دگرگونی می شود. اثر عکس‌العمل آرمیچر را با یک راکتانس سلفی (X_a) نمایش می‌دهند.

چرا اثر عکس‌العمل آرمیچر با راکتانس سلفی نمایش داده می شود؟

اولا، ولتاژ E_a ناشی از عکس‌العمل آرمیچر در زاویه‌ای قرار دارد که ۹۰ درجه عقب‌تر از صفحه F_a جریان I_a است.

ثانیا دامنه ولتاژ بوجود آمده متناسب با دامنه شار و یا نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) و در نتیجه جریان است.

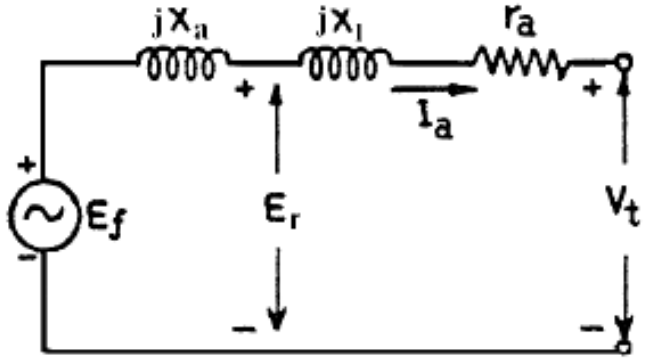
لذا عکس‌العمل آرمیچر را می توان با رابطه زیر بیان کرد:

$$\vec{E}_a = -jX_a\vec{I}_a \qquad (٤)$$

$$\vec{E}_r = \vec{E}_f - jX_a\vec{I}_a \qquad (٥)$$

$$\vec{E}_r = \vec{V}_t + (jX_l + r_a)\vec{I}_a \qquad (٦)$$

$$\vec{V}_t = \vec{E}_f - j(X_a + X_l)\vec{I}_a - r_a\vec{I}_a \qquad (٧)$$



مدار معادل ژنراتور سنکرون

E_a - ولتاژ ناشی از عکس‌العمل آرمیچر یا F_a

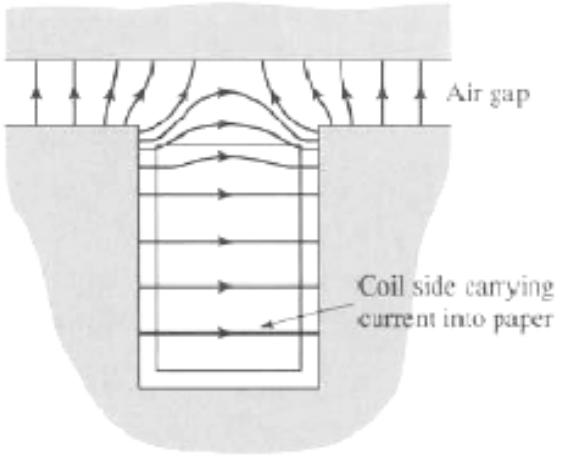
E_r - ولتاژ بیرونی یا ولتاژ ناشی از شار فاصله هوایی φ_r

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

اجزای مدار معادل:

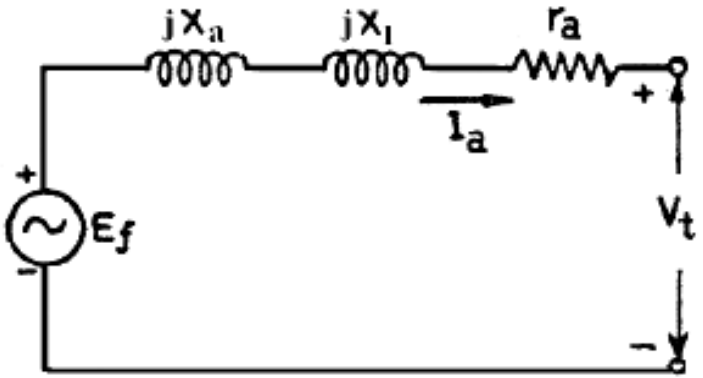
۳- اثر شارهای پراکندگی:

شار پراکندگی یا نشتی شاری است که فقط در سیم‌پیچ بوجود آورنده خود را در بر می‌گیرد و روتور را در بر نمی‌گیرد. عموما آن را با یک سلف که مبین افت ولتاژ است مدل می‌کنند.



٤- مقاومت آرمیچر:

سیم‌پیچ‌های استاتور دارای مقاومت اهمی هستند که باعث افت ولتاژ و اتلاف توان می‌گردد.

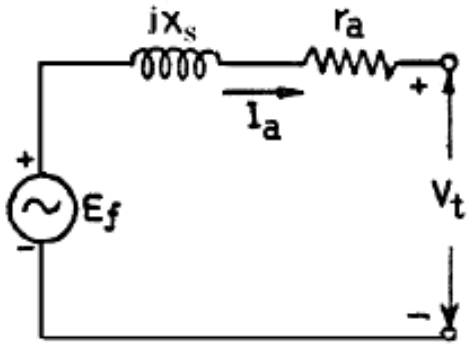


فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

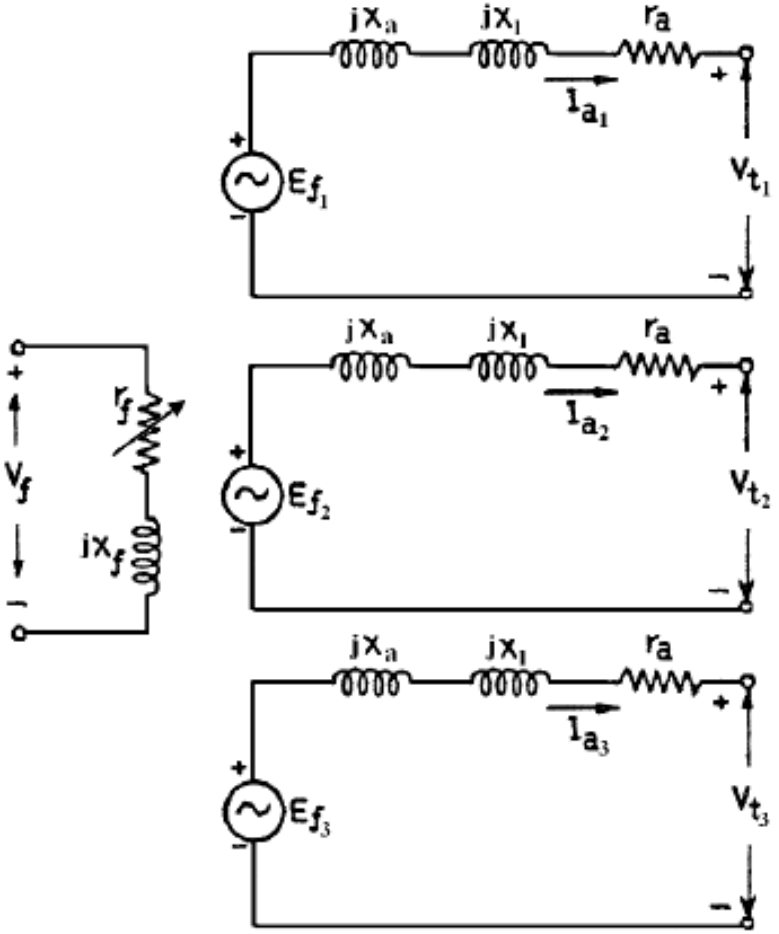
مدار معادل ژنراتور سنکرون استوانه‌ای

به مجموع راکتانس ناشی از عکس‌العمل آرمیچر و راکتانس نشتی هر فاز، راکتانس سنکرون گفته و با X_s نمایش می‌دهند.

$$X_S = X_a + X_l \qquad (10)$$



مدار معادل مختصر شده ژنراتور سنکرون سه فاز



مدار معادل کامل ژنراتور سنکرون سه فاز

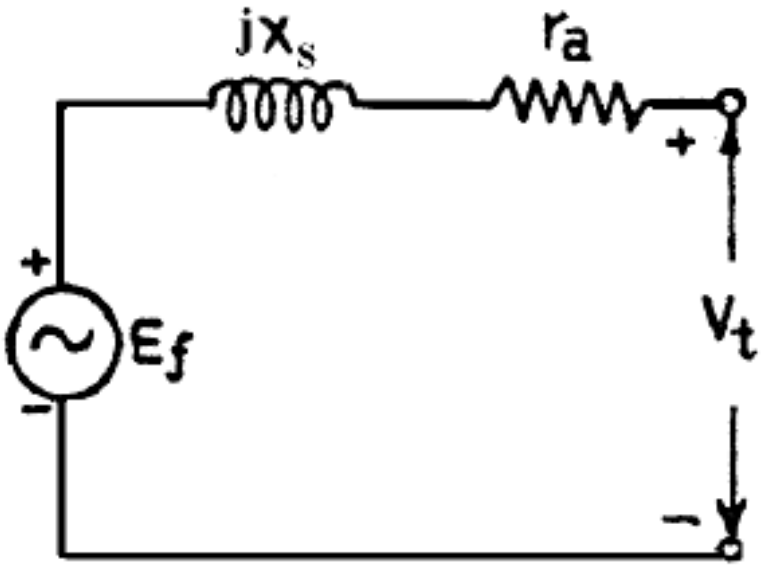
جلسه چهاردهم

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

چگونگی محاسبه پارامترهای ماشین سنکرون سه‌فاز:

۱- مقاومت اهمی استاتور (r_a): به روش ولت‌متر – آمپرمتر و یا با استفاده از اهم‌متر

۲- راکتانس سنکرون: با استفاده از منحنی‌های اتصال کوتاه و بی باری محاسبه می‌شود.

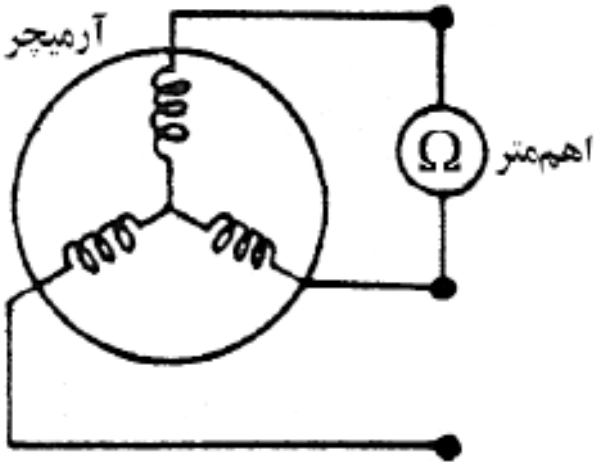


مدار معادل مختصر شده ماشین سنکرون

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

چگونگی محاسبه پارامترهای ماشین سنکرون سه‌فاز:

اندازه‌گیری مقاومت اهمی:



اندازه‌گیری مقاومت با اهم‌متر

در حالت اتصال ستاره:

$$r_{dc} = \frac{1}{2} \times \frac{\text{ولتاژ خوانده شده}}{\text{جریان خوانده شده}} \qquad (11)$$

در حالت اتصال مثلث:

$$r_{dc} = \frac{3}{2} \times \frac{\text{ولتاژ خوانده شده}}{\text{جریان خوانده شده}} \qquad (12)$$

با درنظر گرفتن اثر حرارت و پوستی:

$$r_a = (1.2 \sim 1.5) \times r_{dc} \qquad (13)$$

(برای فرکانسهای پائین تر از ۱۰۰ هرتز)

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

چگونگی محاسبه پارامترهای ماشین سنکرون سه‌فاز:

اندازه‌گیری مقاومت اهمی:

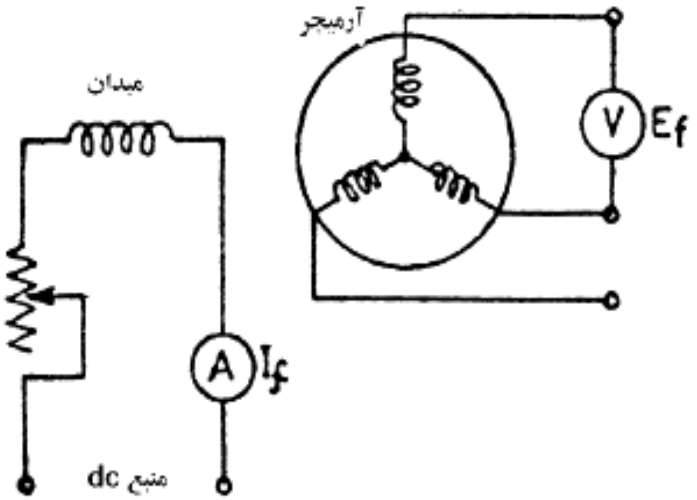
تعریف منحنی مدار باز : رابطه بین ولتاژ ترمینال در حالت بی‌باری (E_f) برحسب جریان تحریک (I_f).

مراحل بدست آوردن منحنی مدار باز :

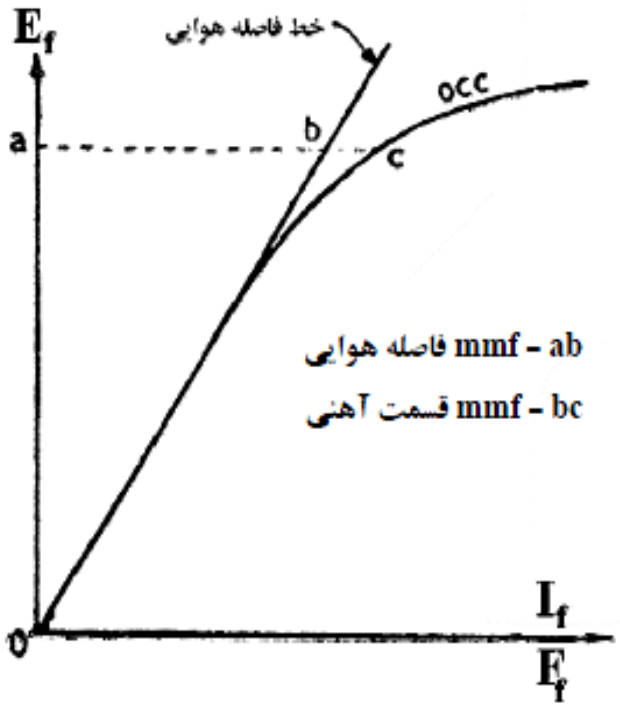
۱- روتور در سرعت نامی می‌چرخد.

۲- جریان تحریک به تدریج از صفر افزایش می‌یابد.

۳- ولتاژ دو ترمینال در حالت مدار باز اندازه‌گیری می شود.



الف- مدار برای رسم منحنی OCC



ب- منحنی OCC

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

منحنی اتصال کوتاه (SCC):

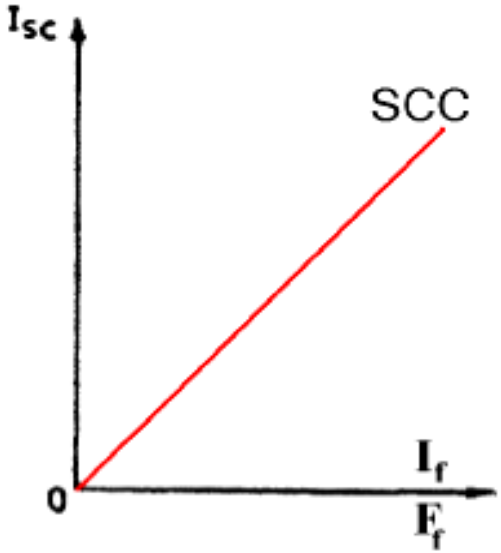
تعریف منحنی اتصال کوتاه : رابطه بین جریان آرمیچر ($I_{a,SC}$) برحسب جریان تحریک (I_f) در شرایط اتصال کوتاه.

مراحل بدست آوردن منحنی اتصال کوتاه:

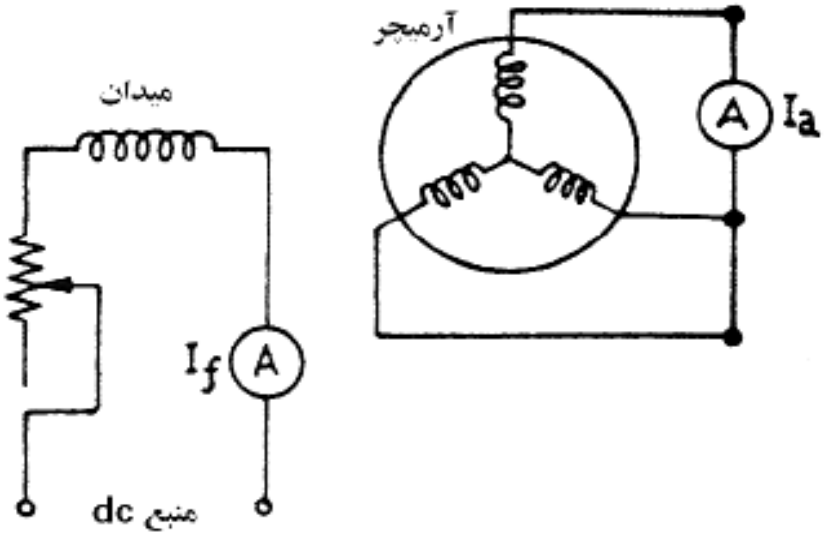
۱- روتور در سرعت نامی می‌چرخد.

۲- جریان تحریک به تدریج از صفر افزایش می‌یابد.

۳- جریان ترمینال اتصال کوتاه شده اندازه‌گیری می شود. جریان آرمیچر نباید از حد ۱۲۵ تا ۱۵۰٪ نامی بیشتر شود و قرائت‌ها باید سریع انجام گردد.



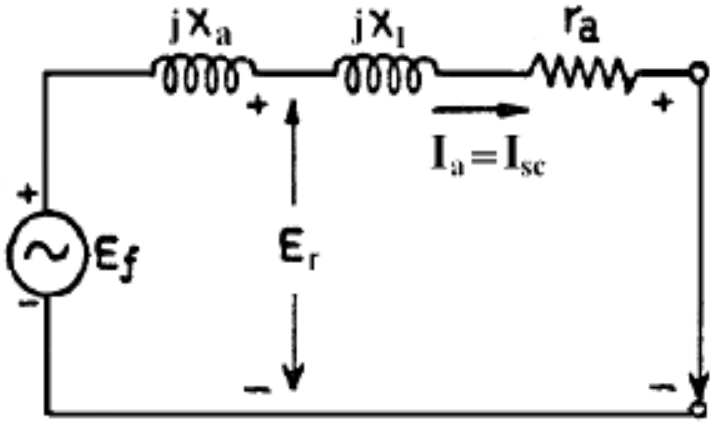
منحنی اتصال کوتاه



مدار برای رسم منحنی SCC

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

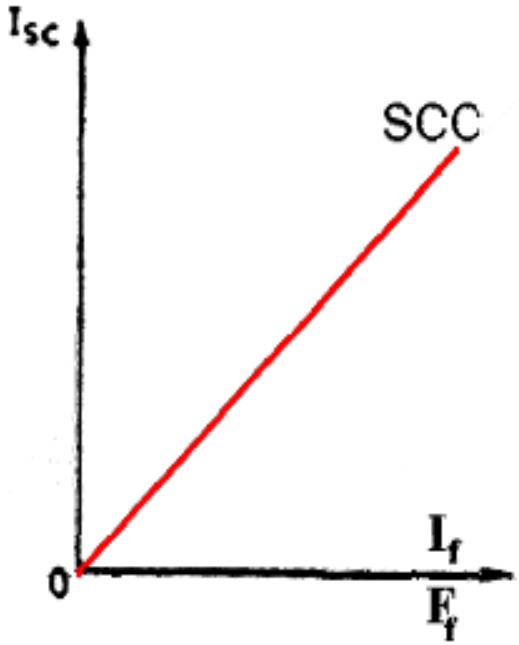
محاسبه راکتانس سنکرون (X_s):



$$|Z_s| = \left.\frac{E_f}{I_{SC}}\right|_{I_f=\text{rated}} \qquad (١٤)$$

$$Z_s = r_a + j(X_a + X_l) = r_a + jX_s \qquad (١٥)$$

با داشتن مقدار r_a و محاسبه Z_s، مقدار X_s بدست می‌آید.



منحنی اتصال کوتاه

$$\vec{E}_r = (jX_l + r_a)\vec{I}_a \qquad (١٦)$$

- مقدار X_l بین ۰/۱ تا ۰/۲ پریونیت است. مقدار r_a نیز خیلی کوچک است. با توجه به در حد نامی‌بودن جریان اتصال کوتاه، مقدار ولتاژ E_r و یا شار فاصله هوایی متناظر با آن یعنی φ_r کمتر از مقدار نامی آن بوده و لذا آزمایش اتصال کوتاه در شرایط غیر اشباع کار می‌کند. بنابراین منحنی SCC یک منحنی خطی است.

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

میدان‌های موجود در فضای داخلی ماشین:

۱- میدان ناشی از شار روتور (میدان تحریک)

۲- میدان ناشی از شار استاتور (عکس‌العمل آرمیچر)

میدان ناشی از شار استاتور یا عکس‌العمل آرمیچر به دو فاکتور وابسته است:

۱- دامنه جریان استاتور

۲- زاویه ضریب توان بار ($\cos \varphi$)

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

بسته به اینکه جریان، پیش‌فاز و یا پس‌فاز باشد، ولتاژ ترمینال ژنراتور (V_t) می‌تواند، کوچکتر، مساوی یا بزرگ‌تر از ولتاژ القایی (E_f) باشد.

- رگولاسیون یا تنظیم ولتاژ شاخصی برای سنجش تغییرات ولتاژ ترمینال از بی‌باری تا بار کامل می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می شود که در آن اندازه ولتاژها درنظر گرفته می‌شوند:

$$\%R = \frac{E_f - V_t}{V_t} \times 100 \qquad (1)$$

سوال: روش های بدست آوردن رگولاسیون ولتاژ در ماشین های سنکرون را بنوسید.

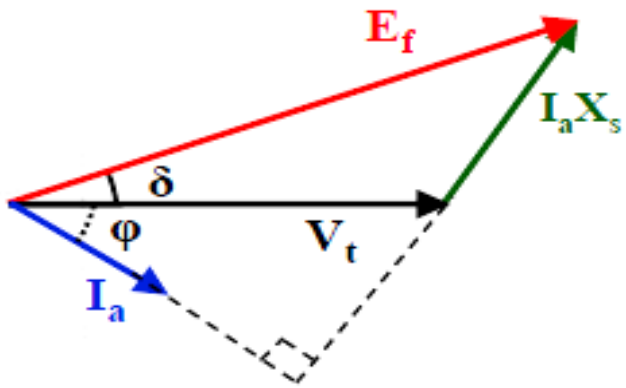
فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

توان ژنراتور سه‌فاز:

$$P = \frac{3V_t E_f}{X_s} \sin\delta$$

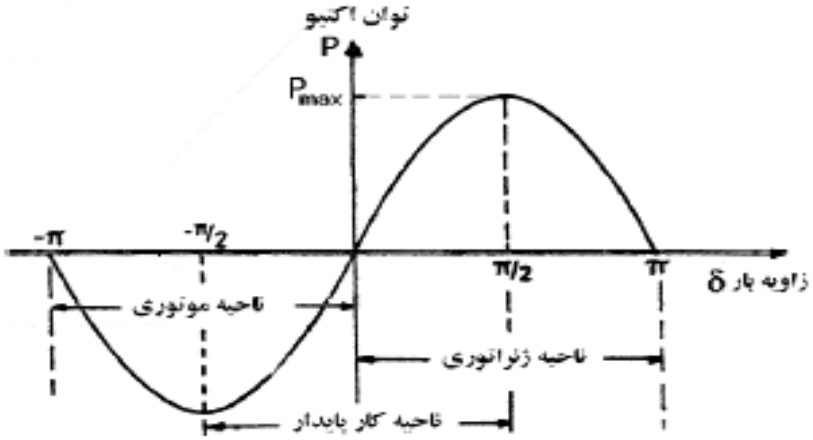
توان خروجی حداکثر:

$$P_{max} = \frac{3V_t E_f}{X_s}$$



نمودار برداری ژنراتور سنکرون استوانه‌ای با فرض $r_a = 0$

با فرض صفر بودن مقاومت آرمیچر



تغییرات توان اکتیو برحسب زاویه بار

$$Q = \frac{3V_t}{X_s}(E_f \cos\delta - V_t)$$

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

- اگر $E_f \cos\delta - V_t > 0$ باشد (ژنراتور فوق تحریک): در این حالت Q مثبت بوده و بنابراین توان راکتیو به بیرون تحویل می دهد. در این حالت ضریب توان ژنراتور پس فاز است.

- اگر $E_f \cos\delta - V_t = 0$ باشد (تحریک نرمال): در این حالت Q صفر بوده و بنابراین ژنراتور نه توان راکتیو تحویل می‌دهد و نه جذب می کند. در این حالت ضریب توان ژنراتور برابر واحد است.

- اگر $E_f \cos\delta - V_t < 0$ باشد (ژنراتور زیرتحریک): در این حالت Q منفی بوده و بنابراین توان راکتیو جذب می کند. در این حالت ضریب توان ژنراتور پیش‌فاز است.

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

کنترل ضریب توان

مقایسه رفتار دو ژنراتور مجزا و ژنراتور متصل به شین بی‌نهایت

- به فرض A_1 ژنراتور مجزا و A_2 ژنراتور متصل به شین بی‌نهایت باشد:

(۱) **تحریک میدان:** در A_1، با افزایش تحریک، E_f و V_t هر دو افزایش می‌یابند. اما ضریب توان بستگی به طبیعت بار دارد.
اما برای A_2، افزایش تحریک باعث تغییر ضریب توان از پیش‌فازی به پس‌فازی می‌گردد.

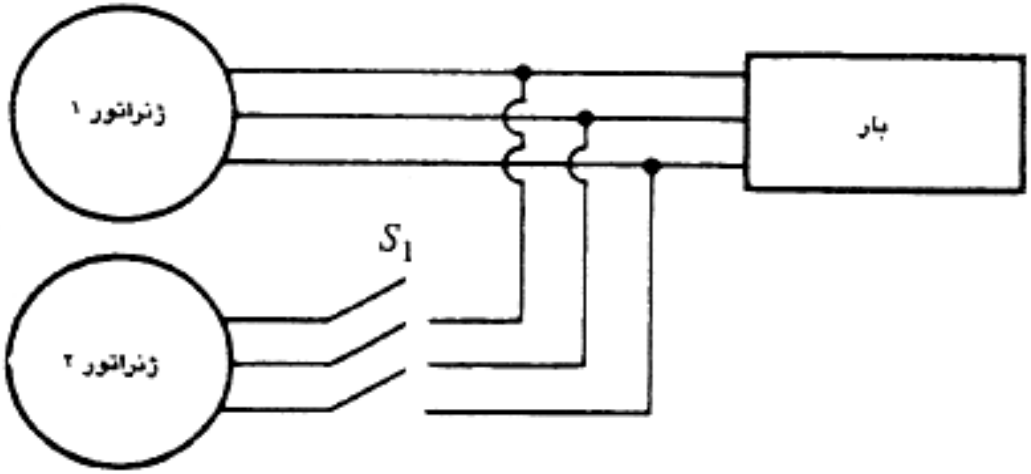
(۲) **توان ورودی چرخاننده:** در A_1 با افزایش توان چرخاننده، E_f و V_t و f هر سه افزایش یافته و توان تحویلی به بار زیاد می‌شود.
اما برای A_2، V_t و فرکانس ثابت می‌مانند. لذا زاویه بار δ زیاد شده و توان تحویلی به شین بی‌نهایت بالا می‌رود.

- **شین بی‌نهایت:** سیستم قدرت بسیار بزرگی است که هر قدر توان اکتیو یا راکتیو به آن داده شود و یا از آن گرفته شود، ولتاژ و فرکانس آن تغییر نمی‌کند.

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

هدف از موازی کردن ژنراتورها:

- ✓ باری که چند ژنراتور می‌توانند تامین کنند، بیشتر از باری است که یک ژنراتور به تنهایی تامین می کند.
- ✓ بالا بردن قابلیت اطمینان سیستم (عدم قطع برق بار در صورت خراب شدن یک یا چند واحد)
- ✓ امکان برنامه‌ریزی برای تعمیرات دوره‌ای
- ✓ افزایش راندمان (تغذیه بارهای کوچک به‌وسیله ژنراتورهای کوچک‌تر به جای استفاده از ژنراتور بزرگ‌تر)



اتصال یک ژنراتور به یک سیستم قدرت در حال کار

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

شرایط لازم برای موازی کردن

چهار شرط لازم برای موازی کردن ژنراتورها:

ردیف	شرط	ابزار تست برقراری شرط	راه حل در صورت بر قرار نبودن شرط
۱	دامنهٔ ولتاژ فازها یکی باشد	استفاده از ولت متر	تنظیم تحریک
۲	توالی فازها یکی باشد	استفاده از یک موتور القائی	جابجائی دو فاز
۳	ولتاژها هم فاز باشند	روش سه لامپ	تغییر فرکانس تا هم فاز شدن بعد تنظیم فرکانس
۴	برابری فرکانس ژنراتورها	فرکانس متر	تنظیم ست پوینت محرک اولیه

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

سؤال:

دو ژنراتور که با هم موازی می شوند، در صورتیکه تمام پارامترهای آنها (دامنه و توالی ولتاژها، فرکانس و زاویه آنها) مثل هم باشند، هیچ توانی بین آنها رد و بدل نمی شود. حال اگر باری به ترمینال مشترک آنها وصل شود، چگونه بین آن دو تقسیم می شود؟

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

جلسه پانزدهم

جمع بندی ژنراتورهای سنکرون سه فاز

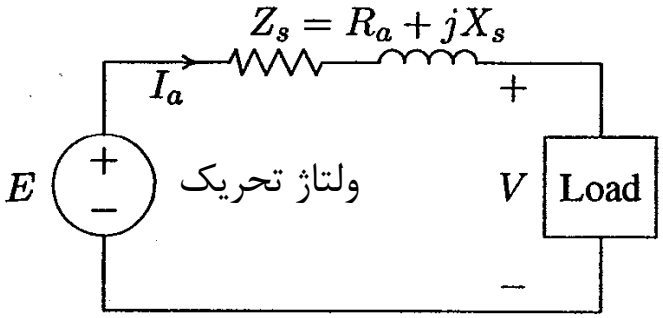
- ✓ روتور ماشین های سنکرون معمولاً دارای ساختار استوانه‌ای و قطب برجسته می باشند.

برای سرعتهای بالا بکار می رود. → توربین بخار

برای سرعتهای پایین بکار می رود. → توربین آبی

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

جمع بندی ژنراتورهای سنکرون سه فاز



– مدار معادل ژنراتور سنکرون (مدار یکفاز):

$$E = V + jX_s I_a$$

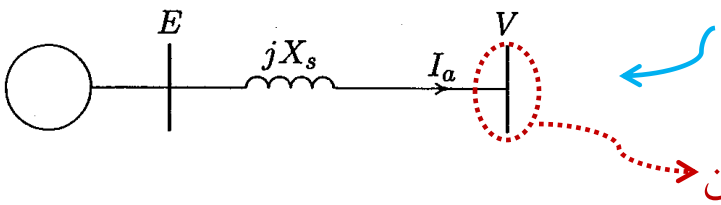
راکتانس پراکندگی

راکتانس سنکرون: $X_s = (X_\ell + X_{ar})$

راکتانس عکس العمل آرمیچرسنکرون

تعریف شین بینهایت: بیشتر ماشین های سنکرون به شبکه های بزرگ بهم پیوسته الکتریکی وصل شده‌اند. این شبکه ها دارای این مشخصه مهم هستند که ولتاژ سیستم در نقطه اتصال از نظر اندازه، زاویه فاز و فرکانس ثابت می باشد. چنین نقطه‌ای در سیستم قدرت شین بینهایت نامیده می شود. یعنی ولتاژ در شین ژنراتور با تعییرات شرایط کار ژنراتور تغییر نخواهد کرد.

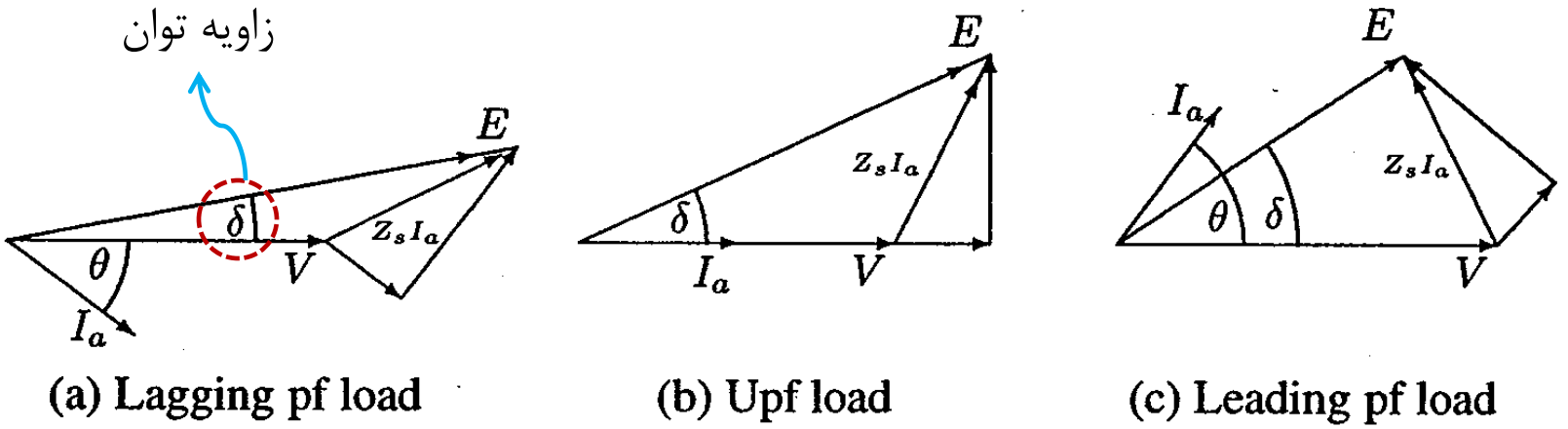
مدار معادل در هر فاز ژنراتور سنکرون وصل شده به شین بینهایت



فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

جمع بندی ژنراتورهای سنکرون سه فاز

– نمایش فازوری ژنراتور سنکرون با در نظرگرفتن ولتاژ پایانه آن بعنوان مرجع:



✓ توانایی تغییر تحریک روتور یک ویژگی مهم ماشین سنکرون می باشد.

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

جمع بندی ژنراتورهای سنکرون سه فاز

– درصد تنظیم ولتاژ:

ولتاژ بی باری ولتاژ بار نامی

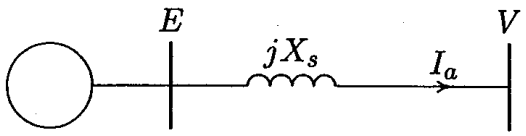
$$\mathrm{VR} = \frac{|V_{nl}| - |V_{rated}|}{|V_{rated}|} \times 100 = \frac{|E| - |V_{rated}|}{|V_{rated}|} \times 100$$

- ✓ تنظیم ولتاژ ژنراتور معیار مناسبی برای مقایسه ماشین ها است و بر حسب درصد تغییر ولتاژ پایانه از حالت بی باری تا بار نامی تعریف می شود.
- ✓ تنظیم ولتاژ نشان دهنده‌ی تغییر جریان تحریک مورد نیاز برای حفظ ولتاژ سیستم از حالت بی باری تا بارنامی در یک ضریب قدرت مشخص می باشد.

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

جمع بندی ژنراتورهای سنکرون سه فاز

– مشخصات زاویه توان در حالت ماندگار – روتور استوانه‌ای



$$P_{3\phi} = 3\frac{|E||V|}{X_s}\sin\delta$$

$$Q_{3\phi} = 3\frac{|V|}{X_s}(|E|\cos\delta - |V|)$$

the theoretical maximum power occurs when $\delta = 90°$ ⟹ $P_{max(3\phi)} = 3\frac{|E||V|}{X_s}$

for small δ, $\cos\delta$ is nearly unity ⟹ $Q_{3\phi} \simeq 3\frac{|V|}{X_s}(|E| - |V|)$

فوق تحریک

when $|E| > |V|$ the generator delivers reactive power to the bus ⟹ generator is said to be overexcited.

If $|E| < |V|$, the reactive power delivered to the bus is negative ⟹ یعنی ژنراتور توان راکتیو از شین می کشد.

سوال: ژنراتورها معمولاً در حالت فوق تحریک کار می کنند. چرا؟

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

Example :

ژنراتور سنکرون سه فاز، ۵۰ MVA ، ۳۰ kV و ۶۰ Hz دارای راکتانس سنکرون ۹Ω در هر فاز می‌باشد. مقاومت اهمی قابل چشم‌پوشی است. این ژنراتور قدرت نامی را در ضریب قدرت ۰/۸ پس فاز در ولتاژ نامی پایانه خود به شبکه بی‌نهایت تحویل می‌دهد.

ولتاژ تحریک در هر فاز (E) و زاویه توان (δ) را تعیین کنید.

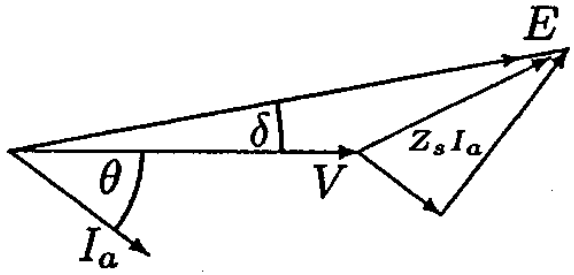
Example :

(a) The three-phase apparent power is

$$S_{3\phi} = 50\angle\cos^{-1}0.8 = 50\angle 36.87^\circ \quad \text{MVA}$$
$$= 40 \ \text{MW} + j30 \ \text{Mvar}$$

The rated voltage per phase is

$$V = \frac{30}{\sqrt{3}} = 17.32\angle 0^\circ \quad \text{kV}$$



(a) Lagging pf load

The rated current is

$$I_a = \frac{S_{3\phi}^*}{3V^*} = \frac{(50\angle -36.87)10^3}{3(17.32\angle 0^\circ)} = 962.25\angle -36.87^\circ \quad \text{A}$$

The excitation voltage per phase is $E = V + jX_s I_a$

$$E = 17320.5 + (j9)(962.25\angle -36.87) = 23558\angle 17.1^\circ \quad \text{V}$$

The excitation voltage per phase (line to neutral) is 23.56 kV and the power angle is 17.1°.

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

– ژنراتور سنکرون قطب برجسته

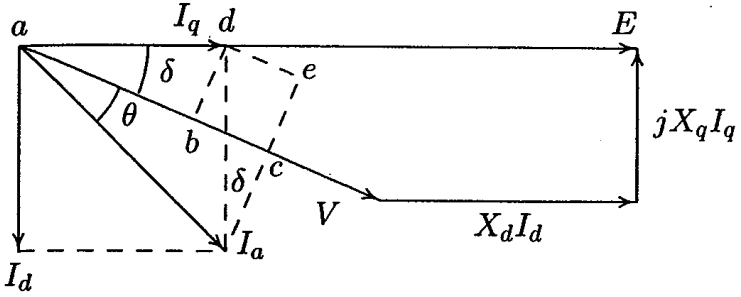
✓ در ژنراتور روتور استوانه‌ای فاصله هوایی یکنواخت است. اما در حالت روتور قطب برجسته فاصله هوایی یکنواخت نیست. لذا عدم یکنواختی رلوکتانس مغناطیسی فاصله هوایی را خواهیم داشت.

رلوکتانس در امتداد محور قطب (محور مستقیم) (X_d)

رلوکتانس در امتداد محور عمودی (X_q)

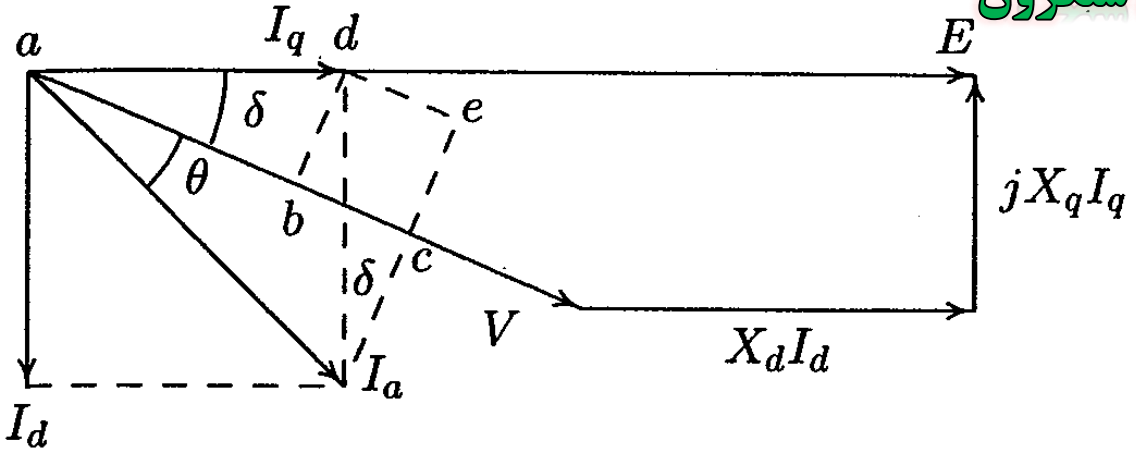
اندازه ولتاژ تحریک : $|E| = |V|\cos\delta + X_d I_d$

– نمایش فازوری ژنراتور قطب برجسته:



فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

– ژنراتور سنکرون قطب برجسته



$$P = 3|V||I_a|\cos\theta$$

$$|I_a|\cos\theta = ab + de$$

$$P = 3|V|(I_q\cos\delta + I_d\sin\delta)$$

$$|V|\sin\delta = X_qI_q$$

$$I_q = \frac{|V|\sin\delta}{X_q}$$

$$I_d = \frac{|E| - |V|\cos\delta}{X_d}$$

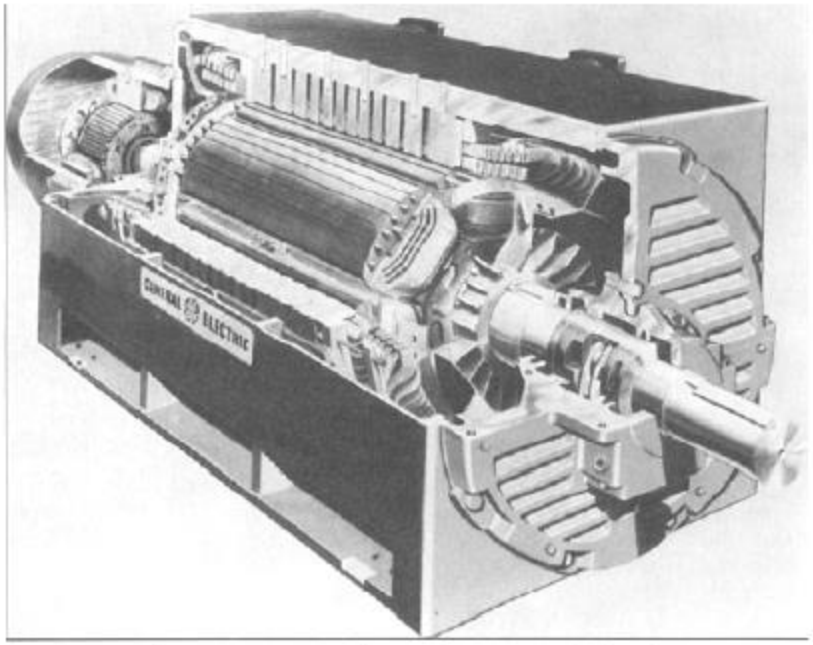
$$P_{3\phi} = 3\frac{|E||V|}{X_d}\sin\delta + 3|V|^2\frac{X_d - X_q}{2X_dX_q}\sin 2\delta$$

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

موتور سنکرون

- ساختار موتور سنکرون از نظر فیزیکی همانند ژنراتور سنکرون است با این تفاوت که جهت توان حقیقی آن معکوس شده است.

- اندازه توانی موتورهای سنکرون معمولا زیر ۵۰ kW نمی‌باشد زیرا در این محدوده نسبت به موتور القایی غیراقتصادی هستند.



نمایی از یک موتور سنکرون با روتور سیم پیچی شده

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

ویژگی های موتور سنکرون

❖ معایب:

۱- نیاز به منبع dc برای میدان تحریک

۲- راه‌اندازی، سنکرونیزاسیون و وسایل کنترلی آن گران هستند.

۳- موتور به میزان زیادی به اغتشاش سیستم حساس است.

❖ مزایا:

۱- ضریب توان آن به آسانی با تغییر جریان میدان قابل تنظیم است. با این ترتیب موتور سنکرون فوق‌تحریک برای تولید توان راکتیو و تصحیح ضریب توان سیستم قدرت بکار می‌رود.

۲- دارا بودن بازده کاری بالا

۳- سرعت ثابت از بی‌باری تا بار کامل

٤- صرفه اقتصادی بیشتر نسبت به موتور القایی در بارهای بالا و سرعت‌های پائین.

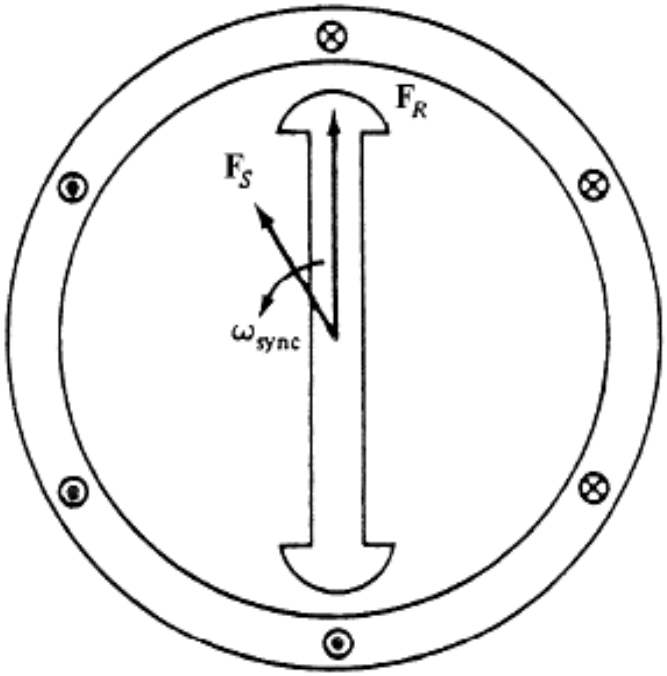
❖ کاربردها:

- برای سرعت کاری کمتر از ۵۰۰ rpm و توان‌های بیش از ٦۰۰kW موتورهای سنکرون نسبت به موتورهای القایی ارزانترند.
- برای چرخاندن پمپ‌های بزرگ، کمپرسورها، قرقره‌ها، غلطک‌ها، ماشین‌های سنگ شکن، پروسه‌های نورد گرم استفاده می شود.
- همچنین از موتورهای سنکرون به عنوان خازن سنکرون برای تنظیم ضریب توان سیستم قدرت در جاهائیکه تغییرات توان راکتیو در سیستم قدرت زیاد است و استفاده از خازن‌های ساکن تنظیم متغیر گران باشد، استفاده می‌شود.

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

مکانیزم کارکرد موتور سنکرون

- در موتور سنکرون دو میدان مستقل روتور و استاتور وجود دارند.
- میدان روتور تمایل دارد که با میدان استاتور همراستا شود و در نتیجه روتور شروع به چرخش می کند.
- همواره یک زاویه‌ای بین دو میدان وجود دارد که با افزایش مقدار گشتاور بار، زیاد می‌شود. بنابراین، روتور، میدان مغناطیسی استاتور را همواره تعقیب می کند، اما هیچگاه به آن نمی‌رسد.



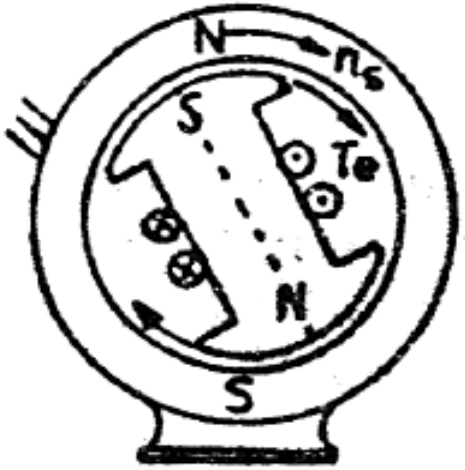
نیروهای مغناطیسی موجود در یک موتور سنکرون

$$T_e = k F_s F_r \sin\delta$$

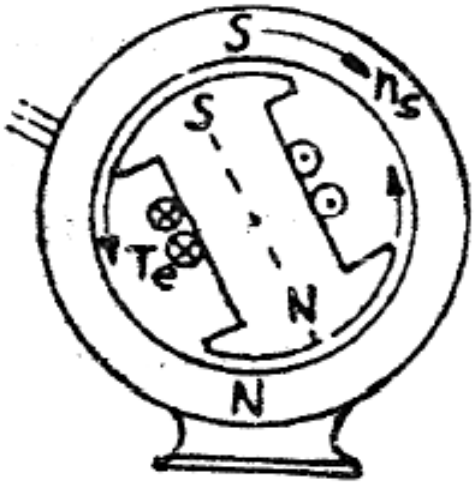
فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

راه‌اندازی موتور سنکرون

- موتور سنکرون، گشتاور راه‌اندازی ندارد. چرا؟
- از آنجا که میدان مغناطیسی دوار استاتور با سرعت بسیار زیادی می‌چرخد، این سرعت زیاد مانع می‌شود که روتور به علت وجود لختی بتواند تغییرات سریع میدان را دنبال نموده و به دنبال آن شروع به چرخش کند. لذا موتور سنکرون راه‌اندازی نمی شود.
- گشتاور الکترومغناطیسی حالت دائمی در موتور سنکرون وقتی تولید می شود که میدان‌های روتور و استاتور با هم قفل مغناطیسی شوند. این قفل شدن (جذب قطب‌های غیرهمنام روتور و استاتور) وقتی اتفاق می‌افتد که سرعت نسبی بین میدان‌های استاتور و روتور صفر باشد.



(الف) حالت جذب میدان‌های روتور و استاتور



(ب) حالت دفع میدان‌های روتور و استاتور

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

جلسه شانزدهم

روشهای راه اندازی موتور سنکرون

۱- کاهش سرعت میدان مغناطیسی استاتور (کاهش فرکانس تغذیه استاتور):

- کاهش سرعت میدان استاتور تا حدی که روتور بتواند طی نیم‌سیکل چرخش میدان مغناطیسی شتاب گرفته و با آن قفل شود.
- ایجاد تغذیه AC با فرکانس‌های پائین به وسیله کنترل کننده‌های حالت جامد (یا اینورتر) انجام می‌شود که برق AC با فرکانس کمتر از ۵۰ هرتز (البته با سطح ولتاژ پائین‌تر برای کنترل جریان استاتور) برای موتور ایجاد می کند.

۲- استفاده از راه‌انداز یا گرداننده کمکی

- که سرعت موتور را تا قدری بیش از سرعت سنکرون بالا ببرد و با طی مراحل موازی کردن، ماشین مثل ژنراتور روی خط آورده شود.
- معمولا یک موتور القایی سه‌فاز به موتور سنکرون متصل است که موتور سنکرون را به سرعتی بالاتر از فرکانس سنکرون می‌رساند.
- سپس استاتور موتور سنکرون به شبکه AC وصل شده و سیم پیچ تحریک نیز به تغذیه DC متصل گشته و گرداننده کمکی جدا می‌شود.
- عیب این روش: موتور سنکرون زیر بار نمی‌توان راه‌اندازی شود. اما در صورت لزوم راه‌اندازی زیر بار، گرداننده کمکی باید توانش از توان موتور سنکرون بیشتر باشد که غیر اقتصادی و غیرمعقول است.

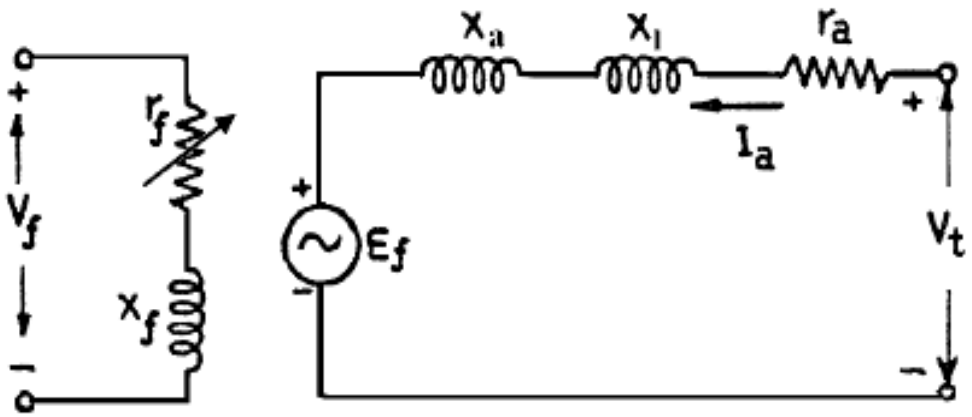
۳- استفاده از سیم پیچ‌های میراکننده و یا دمپر (راه‌اندازی به صورت القایی)

- متداول‌ترین روش راه‌اندازی موتور سنکرون، به‌کارگیری سیم پیچ‌های میرایی یا دمپر است.
- سیم‌پیچی میرائی در واقع شبیه سیم‌پیچ قفسه سنجابی موتور القایی سه‌فاز است.
- سیم پیچ میرائی در شیارهای واقع در کفش قطب‌های روتور جای دارد. انتهای این سیم پیچ ها را بوسیله حلقه فلزی اتصال کوتاه می کنند.

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

مدل موتور سنکرون

- این مدار معادل همان مدار معادل ژنراتور سنکرون است با این تفاوت که در آن جهت جریان عکس شده است.



مدل کامل تکفاز موتور سنکرون

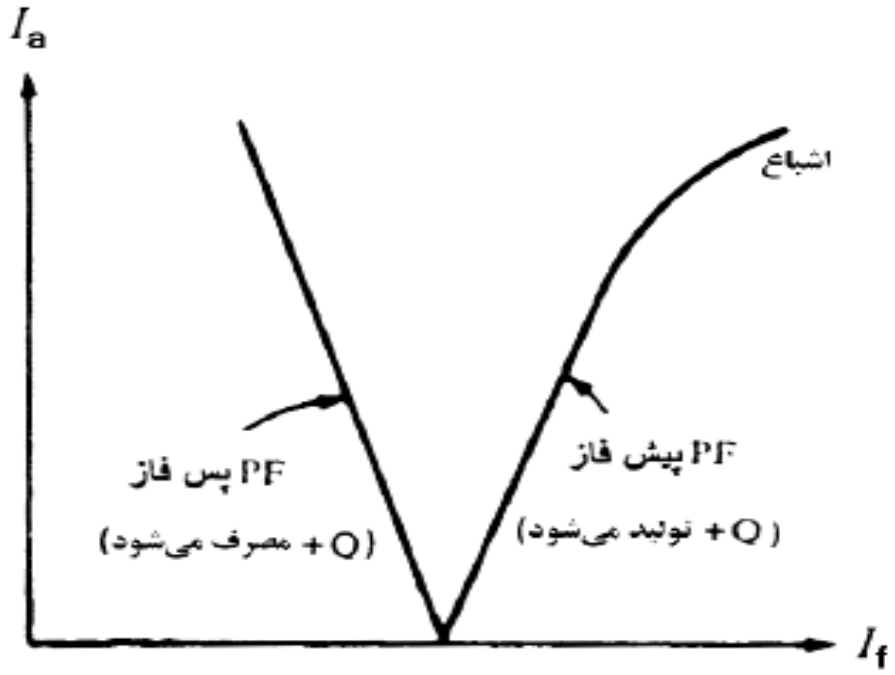
$$\vec{V}_t = \vec{E}_f + jX_s\vec{I}_a + r_a\vec{I}_a \qquad (۱)$$

$$\vec{E}_f = \vec{V}_t - r_a\vec{I}_a - jX_s\vec{I}_a \qquad (۲)$$

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

کندانسور (یا خازن) سنکرون:

- **خازن سنکرون:** موتور سنکرونی است که فقط توان راکتیو تولید می‌کند و برای اصلاح ضریب توان فروخته می‌شود.
- محور این موتورها راهی به بیرون نداشته و عملا نمی‌توان از آنها کار مکانیکی کشید.
- خازن سنکرون در جاهایی استفاده می شود که استفاده از خازن‌های استاتیکی به صرفه نباشد.



منحنی V شکل خازن سنکرون

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

موتور سنکرون آهنربای دائم (PMSM)

- در موتورهای سنکرون، به جای استفاده از سیم پیچی تحریک DC می توان از آهنربای دائم در روتور استفاده نمود.

- مزایا:

۱- حذف تلفات اهمی بخش تحریک موتور و در نتیجه افزایش راندمان

۲- ساختار ساده تر، استحکام بیشتر و نیاز به نگهداری کمتر

۳- وزن و حجم کمتر و درنتیجه نسبت توان (گشتاور) به وزن (حجم) بیشتر در مقایسه با دیگر انواع موتورهای AC

- معایب:

۱- هزینه بالای مغناطیس دائم (در صورت استفاده از مواد مغناطیس دائم با کیفیت نظیر ساماریوم –کبالت ها و عناصر خاک نادر

۲- تغییر مشخصات مغناطیسی آهنربای دائم به مرور زمان

- کاربردها:

هوا-فضا، حمل و نقل و خودرو، رباتیک، سیستم های کنترل حرکت پیشرفته و ...

فصل چهارم: ماشین های الکتریکی سنکرون

حالت های گذرا

تعاریف و علل ایجاد حالت گذرا:

- **تعریف حالت های گذرا:** حالت های قبل از رسیدن ماشین به حالت دائمی را حالت های گذرا گویند.

- **علل ایجاد حالت گذرا در ژنراتور:**
  - تغییرات ناگهانی بار الکتریکی روی ژنراتور
  - اتصال کوتاه ها
    - تک فاز
    - دو فاز
    - سه فاز
      - تحت بار
      - بی بار

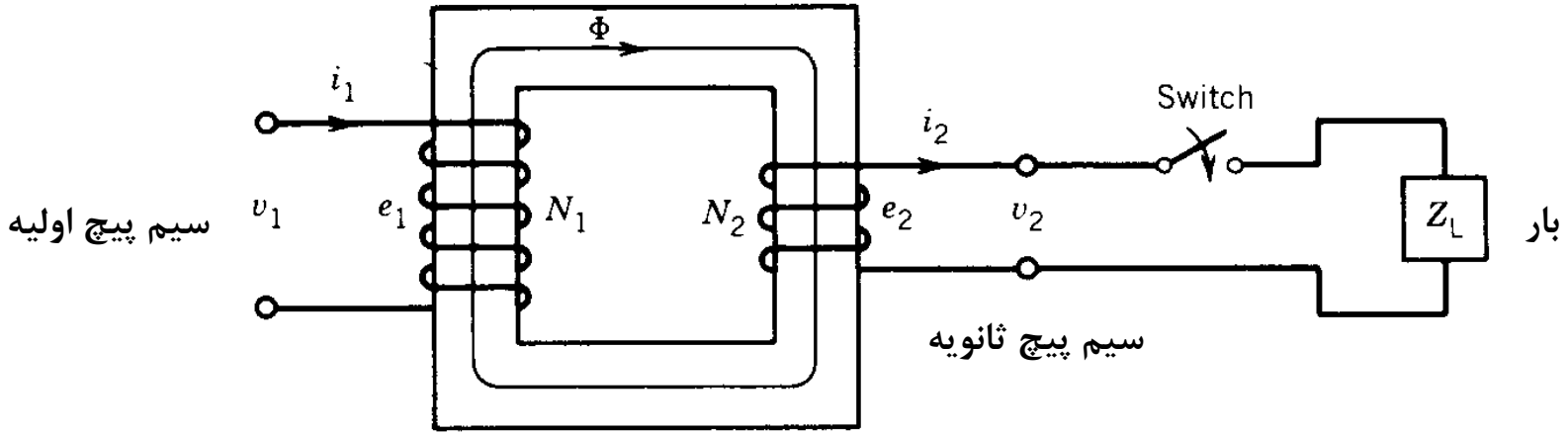
- **علت ایجاد حالت گذرا در موتور:** در حالت موتوری، شرایط گذرا بواسطه تغییر ناگهانی بار مکانیکی روی روتور بوجود می آید.

فصل پنجم: ترانسفورماتورها

❖ ترانسفورماتورها یک ماشین الکتریکی ایستا (استاتیک) هستند و حاوی قسمت گردان نمی باشند.

❖ ترانسفورماتورها معمولاً از دو یا چند سیم پیچ تشکیل شده ان که توسط یک مدار مغناطیسی مشترک بهم پیوند داده شده اند. این پیوند توسط هسته انجام می شود.

❖ تصویر یک ترانسفورماتور ایده آل تکفاز در شکل زیر نشان داده شده است.



$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

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

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

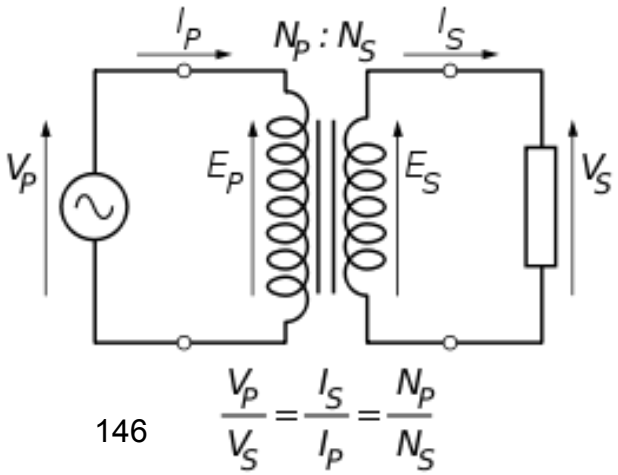
$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$

فصل پنجم: ترانسفورماتورها

اغلب بدون ذکر نام سیم‌پیچ اولیه یا ثانویه، سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور را براساس ولتاژ آن‌ها نامگذاری می‌کنند. سیم‌پیچی که برای ولتاژ کم ساخته شده است. سیم‌پیچ فشار ضعیف و سیم‌پیچی را که برای ولتاژ زیاد درست شده است، سیم‌پیچ فشار قوی می‌نامند.

❖**شکل مداری یک ترانسفورماتور ایده آل در شکل زیر نشان داده شده است:**

در یک ترانسفورماتور، سیم‌پیچی که دارای تعداد حلقه‌های بیشتری است، دارای ولتاژ بزرگتری نیز هست.



در ترانسفورماتورهای ایده‌آل مقدار نیروهای محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه همیشه با هم برابرند.

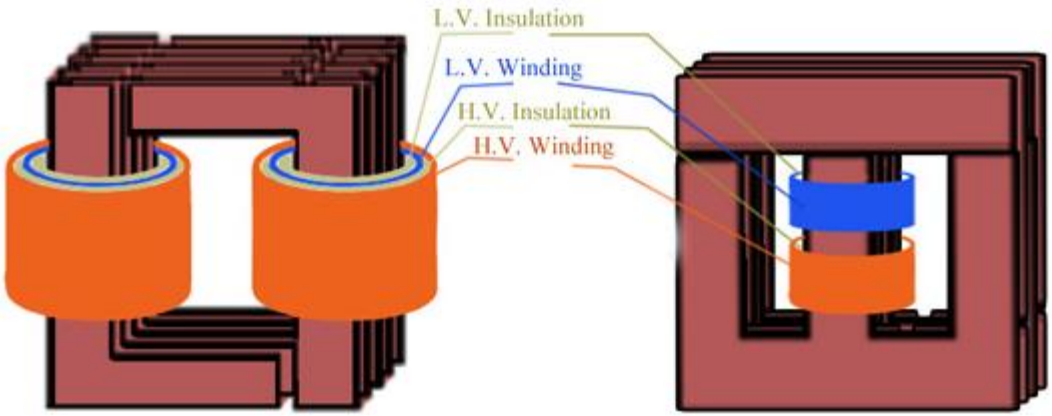
در یک ترانسفورماتور ایده‌آل نسبت امپدانس از دیدگاه اولیه به امپدانس ثانویه با مجذور نسبت تعداد حلقه‌ها متناسب است.

$$Z_1 = Z_2 \times \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$$

فصل پنجم: ترانسفورماتورها

هسته ترانسفورماتور:

- هسته ها را از ورق هایی که به صورت لایه لایه روی هم قرار داده می شوند، می سازند، بـه علت افت جریان فوکه، هسته را ورقه ورقه ساخته و بین آنها به وسیله اکسیداسیون یا کاغذ می پوشانند و یا اینکه از ورق های عایق شده استفاده می کنند.
- به طور کلی ترانسفورماتورها دو نوع هسته دارند که در شکل های زیر نشان داده شده است:

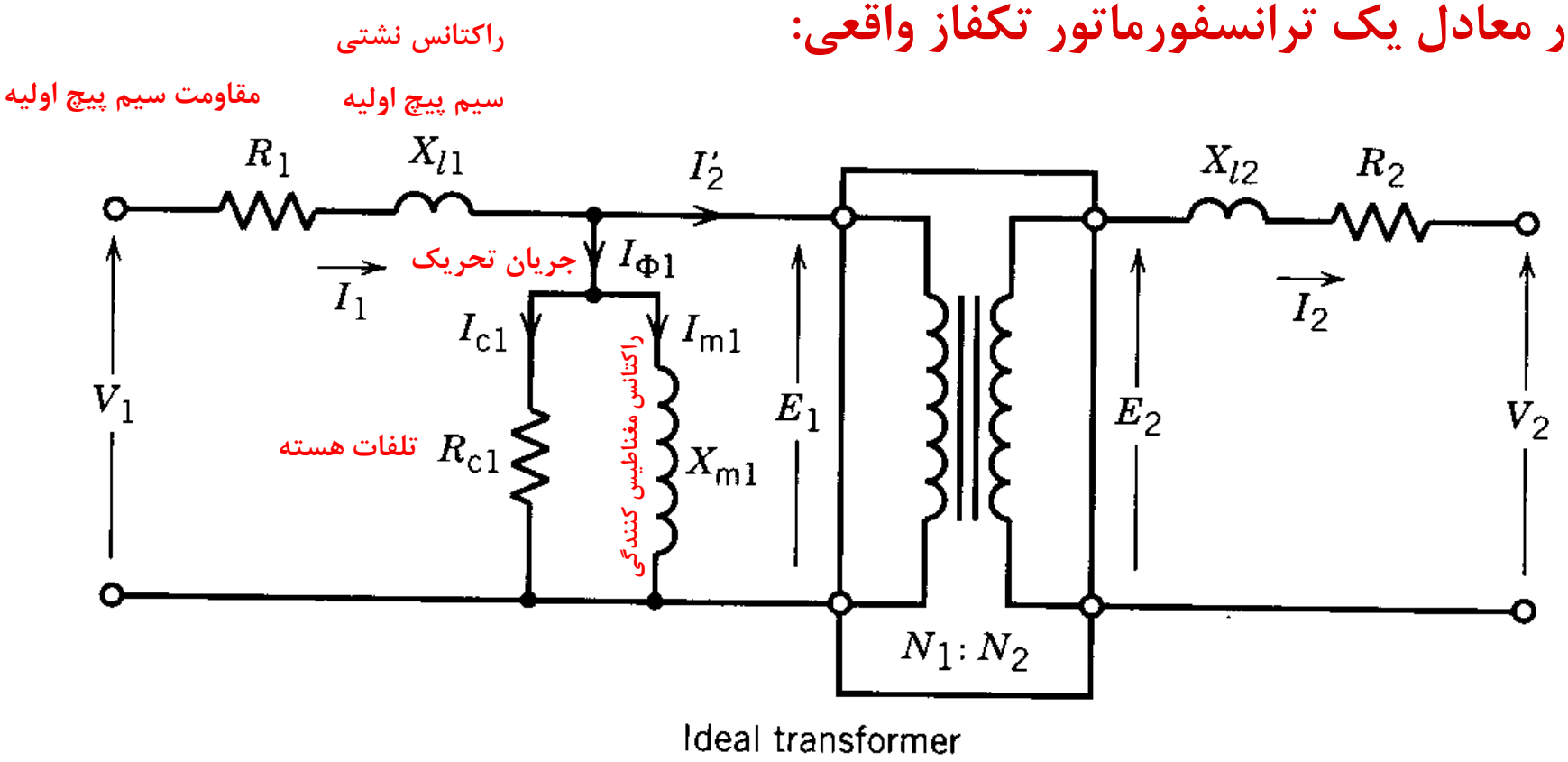


هسته ورقه ای

هسته ستونی

فصل پنجم: ترانسفورماتورها

مدار معادل یک ترانسفورماتور تکفاز واقعی:



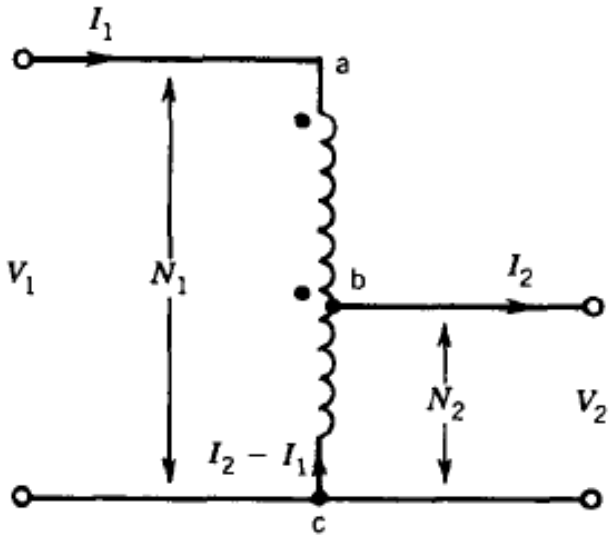
Ideal transformer

سوال: نحوه محاسبه پارمترهای مدار معادل بالا را توسط دو آزمایش اتصال کوتاه و اتصال باز به طور کامل شرح دهید.

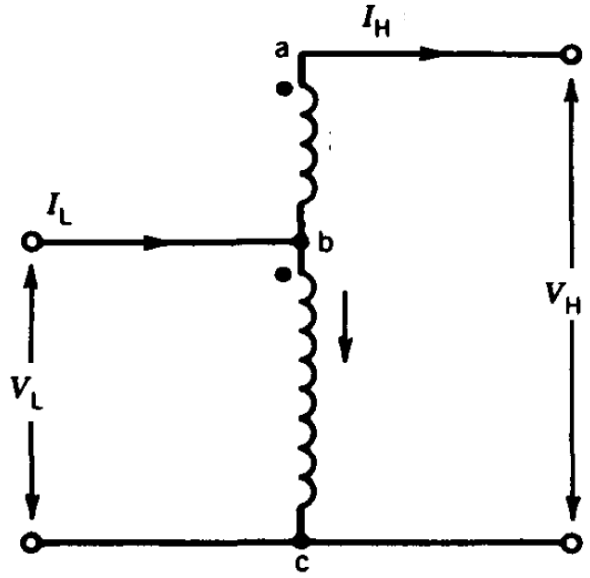
فصل پنجم: ترانسفورماتورها

اتو ترانسفورماتور:

- اتو ترانسفورماتور نوع خاصی از ترانسفورماتورهای تکفاز است که سیم پیچ اولیه و ثانویه آن علاوه بر پیوند مغناطیسی، ارتباط الکتریکی نیز دارند. تلفات اتـو ترانسـفورماتور نسـبت بـه ترانسفورماتور مشابه کمتر است



کاهنده

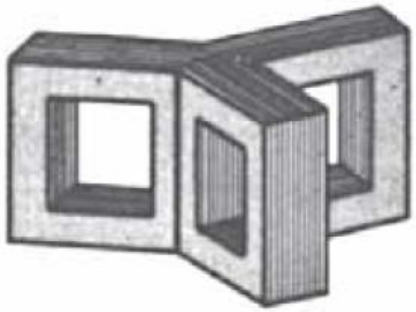


افزاینده

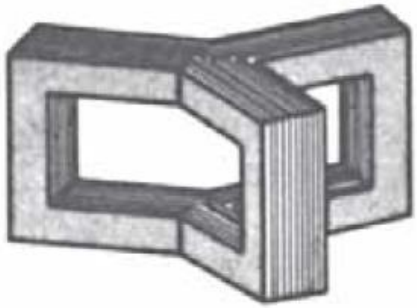
فصل پنجم: ترانسفورماتورها

ترانسفورماتور سه فاز:

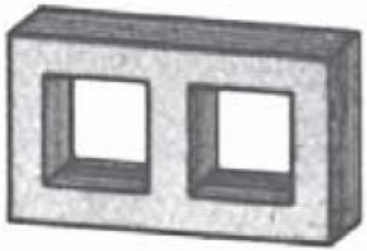
- امروزه اغلب شبکه های قدرت به صورت سه فاز طراحی شده اند که جهت تغییر سطح ولتاژ برای انتقال قدرت از ترانسفورماتورهای سه فاز استفاده می شود. اونواع هسته در ترانسفورماتورهای سه فاز در شکل های زیر نشان داده شده اند.



الف ــ سه‌هسته
ترانسفورماتور یکفاز در کنار هم



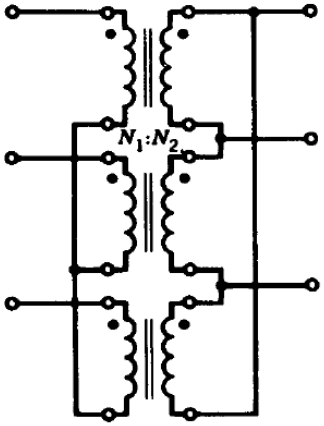
ب ــ بازوی وسط حذف‌شده



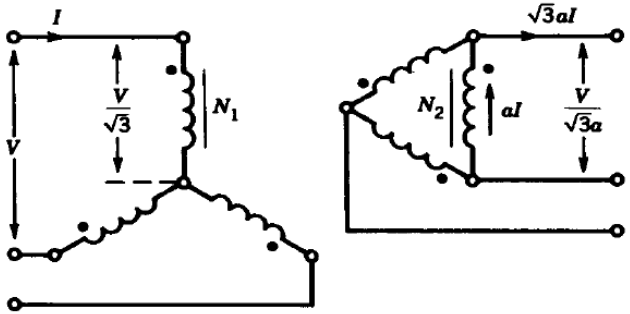
ج ــ شکل معمول
هسته ترانسفورماتورهای سه‌فاز

فصل پنجم: ترانسفورماتورها

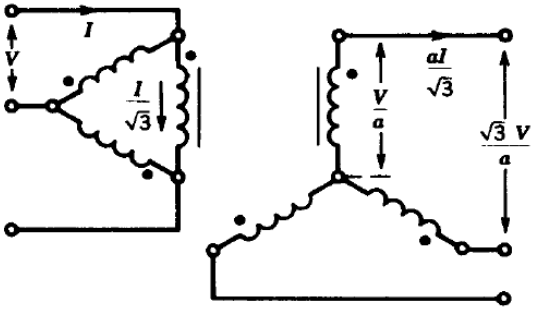
آرایش ترانسفورماتور سه فاز:



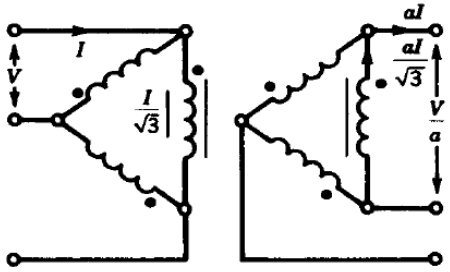
(a) Y - Δ



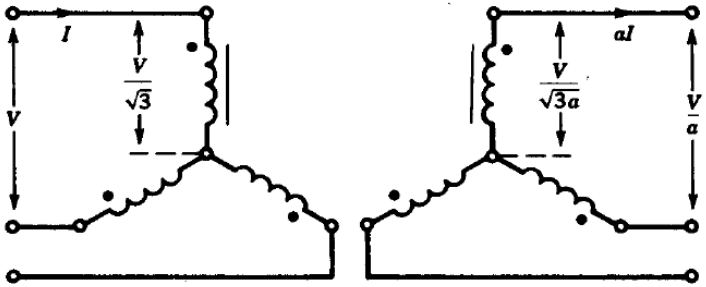
(b) Y – Δ



(c) Δ - Y



(d) Δ – Δ



(e) Y - Y

فصل پنجم: ترانسفورماتورها

ترانسفورماتورهای سه فاز از نظر ساختمان ظاهری بر دو نوع هستند:

ترانسفورماتورهای سه فاز سه پارچه که از سه ترانسفورماتور تکفاز تشکیل شده‌اند.

ترانسفورماتورهای یکپارچه که از یک هسته مشترک تشکیل شده‌اند.

ترانسفورماتورهای سه فاز سه پارچه: این‌گونه ترانسفورماتورها از سه ترانسفورماتور تک فاز تشکیل شده‌اند که با سه سیم پیچ اولیه و سه سیم پیچ ثانویه روبرو هستیم که باید آن‌ها را به روش‌های زیر به هم متصل نماییم:

اتصال ستاره-ستاره :Y-Yسه سیم پیچ اولیه به صورت ستاره و ثانویه هم به صورت ستاره به هم وصل شده‌است. این اتصال به ندرت مورد استفاده قرار می‌گرد.

اتصال مثلث-مثلث (Δ-Δ): اتصال سیم‌پیچ اولیه و ثانویه به صورت مثلث می‌باشد. مزیت این اتصال آن است که می‌توان یکی از ترانس‌ها را برای تعمیر از مدار خارج کرد و دو ترانسفورماتور باقی‌مانده می‌توانند مشترکین سه فاز را تأمین نمایند.

اتصال ستاره –مثلث (Y-Δ): در این نوع اتصال برای کاهش ولتاژ فشار قوی مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا در اتصال ستاره ولتاژ خط بر روی دو سیم پیچ اعمال می‌شود ولی در مثلث بر روی یک سیم پیچ اعمال می‌شود.

اتصال مثلث-ستاره (Δ-Y): در نیروگاه‌ها برای افزایش ولتاژ ژنراتورها به ولتاژ فشار قوی نصب می‌شود زیرا سمت ستاره به ولتاژ قوی وصل است و امکان زمین کردن نقطه خنثی وجود دارد، همچنین در سیستم‌های فشار ضعیف از این سیستم برای مصارف خانگی و تجاری و صنعتی استفاده می‌شود زیرا برخی از مشترکین به برق تک فاز و برخی به برق سه فاز نیاز دارند