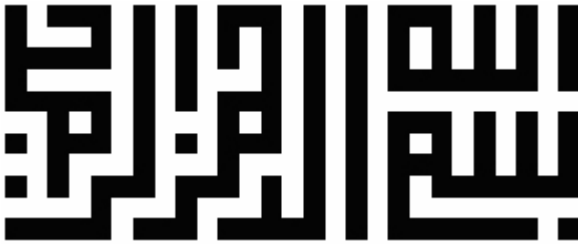


خلاصه مطالب مربوط به درس

ماشین های الکتریکی II

(کتاب چاپمن)

تهیه کننده : حامد مظاهری

Hamed.mazaheri@Gmail.com

شما نیز می توانید مطالب و مقالات خود را برای ما ارسال کنید تا با نام خودتان در سایت قرار داده شود تا دیگر دوستان نیز از آن بهره برند .

①

(جوان سازی وسط هم پیچیده)

لی در این حالت اولیه و ثانویه روی هم پیچیده می‌شوند، LV اول پیچیده می‌شود و روی آن HV

- عایق‌بندی HV را نسبت به هسته آسان می‌کند.
- شار نشتی را نسبت به حالتی که دو سیم‌پیچ با فاصله قرار دارند را کاهش می‌دهد.

ترانس واحد: ترانسی است که به خروجی ژنراتور وصل می‌شود و ولتاژ آن را در حد ولتاژ انتقال (110^{KV}) بالا می‌برد.

ترانس پست: در انتهای خط انتقال قرار دارد و ولتاژ را به حد توزیع کاهش می‌دهد ($2.4^{K} \sim 24.9^{K}$)

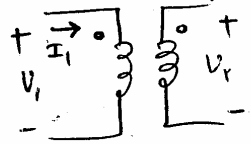
ترانس توزیع: ولتاژ توزیع را به ولتاژهای مصرفی می‌رساند ($220^{...} - 220 \sim 110$)

ترانس ولتاژ (PT) برای کاهش ولتاژ هوی و اندازه‌گیری آن است (برای کارهای جریان سیار کم طراحی شده)

ترانس جریان (CT) برای کاهش جریان ثانویه متناسب با جریان اولیه به منظور اندازه‌گیری و حفاظت.

* ترانس ایده‌آل:

(در اینجا یعنی $V_p \to V_1$, $V_s \to V_2$)



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

a: ضریب تبدیل یا نسبت تبدیل است.

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow N_1 I_1 = N_2 I_2$$

$$\Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{a}$$

* در ترانس ایده‌آل نسبت تبدیل تنها بر روی اندازه‌ها ولتاژها و جریان‌ها اثر می‌گذارد اما به زاویه آنها کاری ندارد.

* در ترانس‌های ایده‌آل برای تعیین قطبیت ثانویه باید سیم‌پیچ‌ها را بازکنیم و تست کنیم.

ادامه ترانس ایده آل:

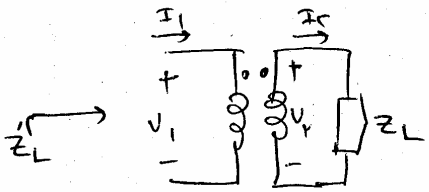
$$P_{in} = V_1 I_1 \cos\phi_1$$
$$P_{out} = V_2 I_2 \cos\phi_2$$
$$\Rightarrow \phi_1 = \phi_2$$ چون ایده آل است.

$$\boxed{P_{out} = P_{in}}$$

$$Q_{in} = V_1 I_1 \sin\phi_1$$
$$Q_{out} = V_2 I_2 \sin\phi_2 \Rightarrow \boxed{Q_{in} = Q_{out}}$$

$$\boxed{S_{in} = V_1 I_1 = V_2 I_2 = S_{out}}$$

* تبدیل امپدانس:



$$\vec{Z}_L = \frac{\vec{V_2}}{\vec{I_2}}$$
$$\vec{Z}'_L = \frac{\vec{V_1}}{\vec{I_1}}$$

$$\Rightarrow \vec{Z}'_L = \frac{a\vec{V_2}}{\vec{I_2}/a} = a^2 \frac{V_S}{I_S} \Rightarrow \boxed{\vec{Z}'_L = a^2 Z_L}$$

* افزایش ولتاژ انتقال در سیستم قدرت، تلفات خط انتقال را با ضریبی نزدیک ۹۰ کاهش می‌دهد.

* ولتاژ بار در سیستم‌های دارای ترانس در مقایسه با بی‌ترانس ضایعات دارد.

* قانون فاراده‌ی

$$e_{ind} = N\frac{d\phi}{dt} \Rightarrow \begin{cases} e_{ind} = \frac{d\lambda}{dt} \\ \lambda = \sum_{i=1}^{N} \phi_i \end{cases}$$

قانون اصلی

ولتاژ القایی در سیم‌پیچ — تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ — تعداد حلقه

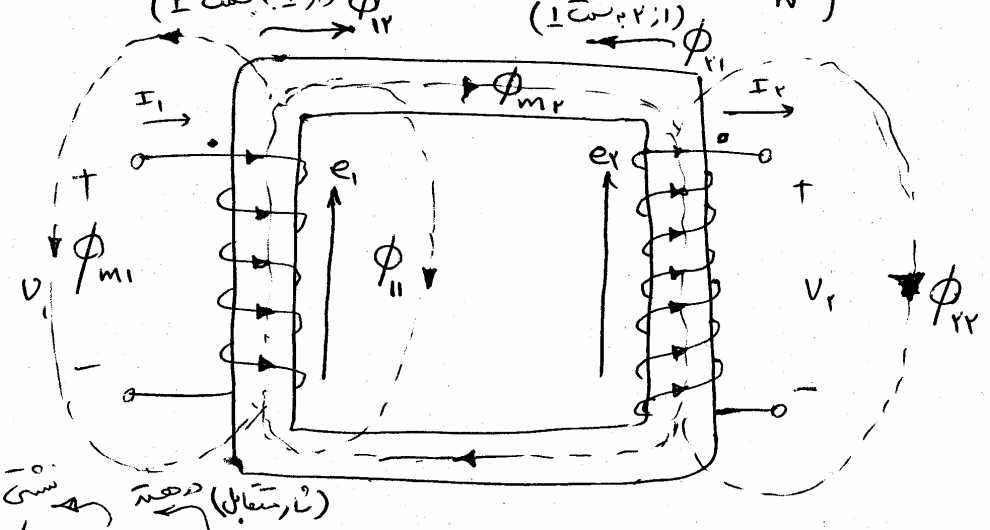
* کل شار عبوری دقیقاً $N\phi$ نیست زیرا شار هر حلقه با حلقه دیگر اندکی تفاوت دارد که به محل حلقه در سیم‌پیچ بستگی دارد.

← برای هر سیم پیچ می‌توان یک شار متوسط تعیین کرد.

شار عبوری سیم‌پیچ $\bar{\phi} = \frac{\lambda}{N}$ ← شار متوسط ← تعداد حلقه

$\Rightarrow e_{ind} = N \frac{d\bar{\phi}}{dt}$

$\Rightarrow \bar{\phi} = \frac{1}{N} \int v_1(t)\, dt$



شار دهنده ← شار هسته

شار اولیه $\phi_m = \phi_{m1} + \phi_{m2}$ ← شار نشتی

شار تولیدی اولیه $\phi_1 = \phi_{11} + \phi_{12}$ ← شار نشتی

شار تولیدی ثانویه $\phi_2 = \phi_{22} + \phi_{21}$ ← شار نشتی

شار نشتی: شار متقابل بین اولیه و ثانویه دهنده‌ها می‌باشد.

در حالت بی باری:

$$\begin{cases} e_1 = N_1 \frac{d\phi_{m2}}{dt} \\ e_2 = N_2 \frac{d\phi_{m2}}{dt} \end{cases}$$

* در بی باری ϕ_2 وجود ندارد پس ϕ نیز تولید نخواهد شد.

شار نشتی: شاری که تنها از یک سیم‌پیچ می‌گذرد و از سیم‌پیچ دیگر عبور نمی‌کند.

در بی باری $\Rightarrow v_1 = N \frac{d\phi_{m1}}{dt} + N \frac{d\phi_{m2}}{dt} = e_{m1} + e_{m2}$

④

در ترانسی که خوب طراحی شده باشد:

$$\phi_{12} \gg \phi_{11}$$

$$\phi_{22} \gg \phi_{21}$$

به همین دلیل با تقریب می‌توان گفت در ترانس ایده‌آل:

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

* با وصل منبع به اولیه حتی اگر ثانویه مدار باز باشد، باز هم جریانی در اولیه داریم که برای تولید شار ϕ_m مورد نیاز است (i_0).

این جریان از دو جزء تشکیل شده است:

۱- جریان مغناطیسی که تولید ϕ_m می‌کند.

۲- جریان تلفات هسته که شامل جریان‌های گردابی و هیسترزیس هستند. (i_{h+e})

در حالتی که از شار نشتی صرف‌نظر کنیم:

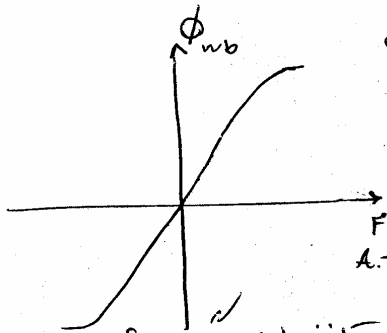
$$v_1(t) = V_m \cos \omega t$$

$$\bar{\phi} = \frac{1}{N_1} \int v_1(t)\,dt = \frac{1}{N_1} \int V_m \cos \omega t$$

$$= \frac{V_m}{\omega N_1} \sin \omega t$$

۱- جریان مغناطیس کننده (تولید ϕ_m) در ترانس سینوسی نیست (به دلیل اشباع مغناطیسی هسته)

۲- با رسیدن شار به نقطه اشباع، برای افزایش کوچکی در شار، نیاز به افزایش زیادی در جریان مغناطیس کننده داریم.



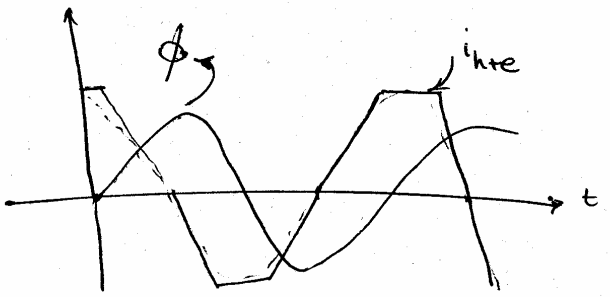
۳- مولفه اصلی جریان مغناطیس کننده نسبت به ولتاژ اعمال شده ۹۰° تاخیر دارد (خاصیت سلفی).

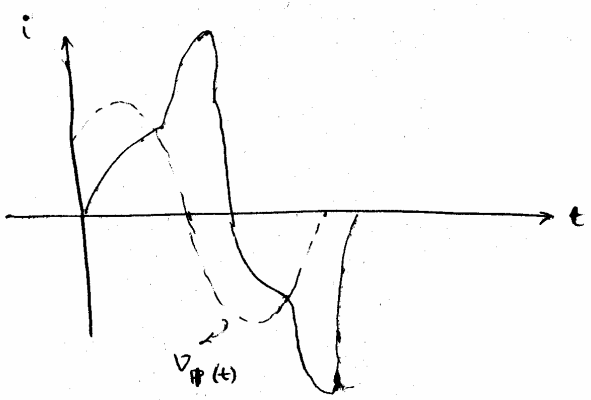
۴- هارمونیک‌های جریان مغناطیس کننده در برابر مولفه اصلی می‌توانند دامنه بزرگی داشته باشند.

در حالت کلی ترانس هرچه بیشتر به اشباع برود، مولفه‌های هارمونیکی بزرگتری دارد.

۵

- تلفات هیسترزیس به دلیل غیرخطی است و زمانی Max می‌شود که شار از ۰ می‌گذرد.
- جریان‌های گردابی در هسته با $\frac{d\phi}{dt}$ متناسب هستند پس در زمان صفر شدن شار، ماکزیمم مقدار را دارند.





کل جریان تحریک ⟸ تحریک در آن

- جریان تلفات هسته به دلیل غیرخطی بودن تلفات هیسترزیس، غیرخطی است.
- جزء اصلی تلفات هسته، با ولتاژ اعمال شده هم فاز است.

جریان تحریک : جریان بی باری ترانس راگویند ($i_m + i_{hte}$)

- جریان وارد سرنقطه‌دار ⟵ ایجاد mmf مثبت
- " خارج از " " ⟵ " " منفی

نیروی محرکه مغناطیسی خالص هسته. ⟸ $F_{net} = N_1 I_1 - N_2 I_2$

F_{net} باید شار ϕ_m را تولید کند، پس :

$$F_{net} = \phi R$$

R تمایل هسته

* هر هسته‌ای با طراحی خوب، R تا حد از پراکندگی رفتن هسته، در حد صفر است.

②

$$\frac{i_1}{i_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad , \quad F_{net} \approx 0 \quad \text{پس در حالت غیر اشباع}$$

* تلفات مهم در ترانس :

- تلفات مسی (I^2R) : با مربع جریان سیم پیچ ها متناسب است.
- تلفات جریان گردابی : تلفات حرارتی مقاومتی در سیم پیچ های اولیه و ثانویه هستند که با مربع ولتاژ اعمال شده به ترانس متناسب است.
- تلفات هیسترزس : ناشی از تغییر جهت های مغناطیسی در هر سیکل.
- شار نشتی : شارهای ϕ_{11} و ϕ_{22} که از طریق هوا مسیرشان را می بندند. که باعث می شود سیم پیچ های اولیه و ثانویه خود القایی داشته باشند.

* چون اکثر مسیر شار نشتی در هوا است و چون رلوکتانس هوا ثابت است (بسیار بزرگتر از هسته)، شار نشتی در اولیه و ثانویه مستقیماً با جریان اولیه و ثانویه متناسبند :

$$\phi_{11} = (P N_1) I_1 \quad , \quad e_{11} = N_1 \frac{d\phi_{11}}{dt}$$

$$\phi_{22} = (P N_2) I_2 \quad e_{22} = N_2 \frac{d\phi_{22}}{dt}$$

پرمیانس مسیر شار

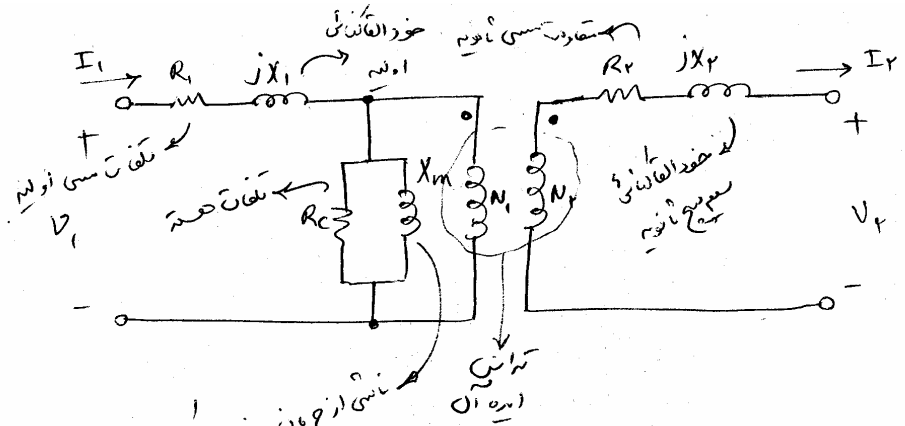
$$\Rightarrow \boxed{e_{11} = N_1^2 P \frac{dI_1}{dt}} \quad N_1^2 P : \text{خود القایی سیم پیچ اولیه}$$

$$\boxed{e_{22} = N_2^2 P \frac{dI_2}{dt}} \quad N_2^2 P : \text{ " " " ثانویه}$$

← شار نشتی را با قرار دادن سلف در اولیه و ثانویه مدل می کنیم.

← جریان i_m (در ناحیه غیر اشباع) با ولتاژ اعمال شده به ترانس هم فاز است و نسبت به آن 90° تاخیر دارد و می توان آنرا با یک راکتانس مدل کرد.

(۷)

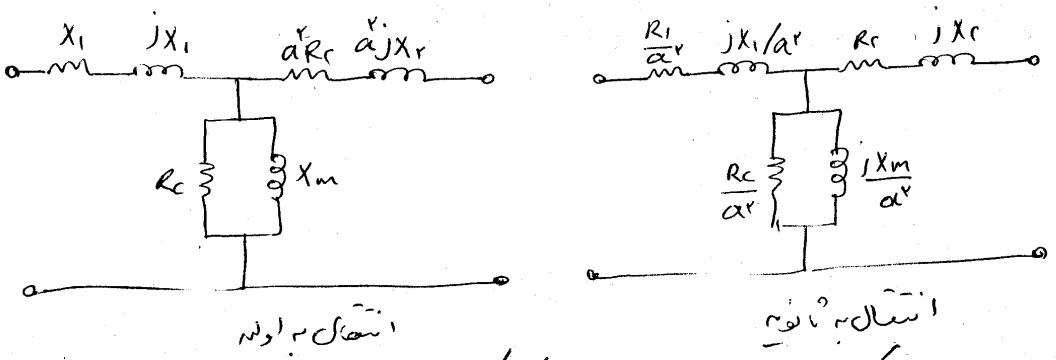


R_c ← جریان تلفات هسته h_{te} با ولتاژ اعمالی به ترانس متناسب و هم فاز است. پس با یک مقاومت اهمی آن را مدل می کنیم.

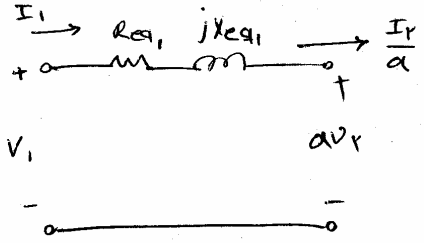
در واقع چون I_m و h_{te} غیر خطی هستند، در مدل کردن R_c و X_m از تقریب استفاده شده است

ولتاژ اعمالی به هسته = ولتاژ ورودی − افت های داخلی سیم پیچ اولیه

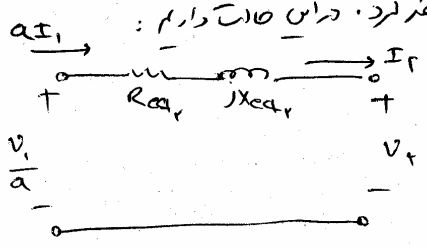
* در عمل برای مدل سازی ترانس عملی امپدانس ها را به یک طرف منتقل می کنیم و ترانس ایده آل و سطا را نیز حذف می کنیم.



* جریان ثانویه ترانس در مقایسه با جریان بار بسیار کوچک است و می توان از افت ولتاژ ناشی از آن صرفنظر کرد. در این حالت داریم:



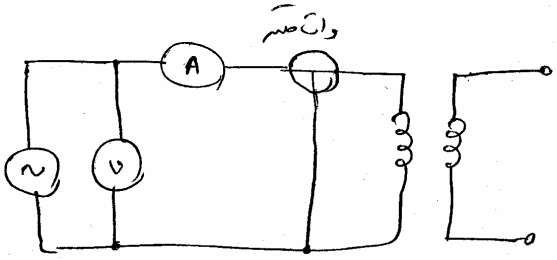
$\simeq$



۴

* آزمون مدار باز:

ثانویه مدار باز است و اولیه به ولتاژ نامی متصل می‌شود. در این حالت تمام جریان ورودی به شاخه تحریک (موازی) وارد می‌شود چون R_1 و jX_1 در برابر R_c و jX_m بسیار کوچکتر است می‌دانند، عملاً تمام ولتاژ ورودی روی شاخه تحریک می‌افتد.



* با نصب ولتاژ و جریان و توان ورودی می‌توان ضریب قدرت و در نتیجه اندازه و زاویه امپدانس تحریک را مشخص کرد.

برای محاسبه R_c و X_m از طریق ادمیتانس‌ها عمل می‌کنیم.

ادمیتانس / سوسپتانس
برای شاخه تحریک $Y_{eq} = G + B$ و $G = \frac{1}{R_c}$

$$B = \frac{1}{jX_c} = -j\frac{1}{X_c}$$

$$\Rightarrow \quad = \frac{1}{R_c} - j\frac{1}{X_m}$$

$$|Y_{eq}| = \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \quad , \quad PF = \cos\theta = \frac{P_{oc}}{V_{oc} I_{oc}}$$

$$\theta = \cos^{-1} PF$$

* در ترانس واقعی ضریب توان همیشه پسفاز است. پس زاویه جریان همیشه θ درجه نسبت به ولتاژ تأخیر دارد. چون θ منفی است، پس زاویه ادمیتانس منفی است.

$$\Rightarrow \quad Y_{eq} = \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \angle -\theta$$

۸

* آزمایش اتصال کوتاه :

در این حالت ثانویه اتصال کوتاه شده است و اولیه به ولتاژی وصل می شود که باعث ایجاد جریان نامی در ثانویه شود. چون در این حالت ولتاژ کم است، از شاخهٔ تحریک جریان کمی می گذرد که می توان از آن صرف نظر کرد و تمامی افت ولتاژ را به عناصر سری نسبت داد.

$$|Z_{eq}| = \frac{V_{sc}}{I_{sc}}$$

$$PF = \cos\theta = \frac{P_{sc}}{V_{sc} I_{sc}} \quad , \theta = \cos^{-1} PF$$

* در این حالت چون PF عقب فاز است، پس زاویه جریان منفی و زاویه امپدانس مثبت است.

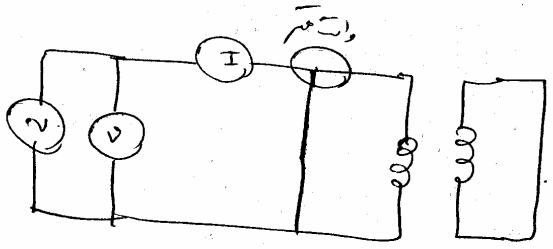
$$\Rightarrow Z_{eq} = |Z_{eq}| \angle\theta$$

در این حالت می توان امپدانس سری انتقال یافته به اولیه را محاسبه کرد:

$$Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq}$$

$$= (R_1 + a^2 R_2) + j(X_1 + a^2 X_2)$$

* می توان آزمایش را در سمت ثانویه انجام داد (محدودیت در سطح ولتاژ) در این حالت امپدانس به دست آمده، امپدانس سری منتقل شده به ثانویه است.



مدار معادل pu :

- در این حالت نیازی به انتقال امپدانس ها به طرف دیگر نیست.
- مقادیر مربوطه در الکتریکی ماشین ها و ترانس ها در یک رنج محدود هستند.

* مقادیر بیس معمولاً ولتاژ و توان نامی (یا توان ظاهری) در نظر گرفته می شوند.

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} = \frac{(V_{base})^2}{S_{base}}$$

$$Y_{base} = \frac{I_{base}}{V_{base}} = \frac{1}{Z_{base}}$$

* ترانس تأثیری بر توان ظاهری بیس سیستم ندارد (توان ظاهری ورودی ترانس = توان ظاهری خروجی از ترانس)
اما ولتاژ بیس با عبور از ترانس متفاوت تغییر می کند (با توجه به ضریب تبدیل).
و چون کمیت های بیس با عبور از ترانس تغییر می کند، روند ارجاع به کمیات یک سطح ولتاژ مشترک در تبدیل pu خود به خود انجام می شود.

- به طور کلی هر چه ترانس بزرگتر باشد، امپدانس سری آن کوچکتر است.

- معمولاً در سیستم های با چند ترانس و ... مقادیر بیس بزرگتر را به عنوان مقادیر بیس اصلی سیستم در نظر می گیرند و باقی را با توجه به آن اصلاح می کنند.

$$(P,Q,S)_{new\ pu} = (P,Q,S)_{old\ pu} \frac{S_{obase}}{S_{nbase}}$$

$$V_{new\ pu} = V_{old\ pu} \frac{V_{obase}}{V_{nbase}}$$

$$(R,X,Z)_{new\ pu} = (R,X,Z)_{old\ pu} \times \frac{V_{ob}^2 \cdot S_{nb}}{V_{nb}^2 \cdot S_{ob}}$$

⑪ * تنظیم ولتاژ : به اندازه امپدانس های سری و زاویه جریان ترانس بستگی دارد (صرفنظر کردن از ...)

$$VR = \frac{V_{nL} - V_{fL}}{V_{fL}} \times 100\ \% \qquad V_{nL} = \frac{V_1}{a}$$

اگر pu باشد $\rightarrow$ $$V.R = \frac{V_{1pu} - V_{2fLpu}}{V_{2fL\,pu}} \times 100\ \%$$

در ترانس ایده آل تنظیم ولتاژ = ۰

$\leftarrow$ برخی جوامع برای کاهش جریان اتصال کوتاه از ترانس های با تنظیم ولتاژ بزرگ استفاده می کنیم.

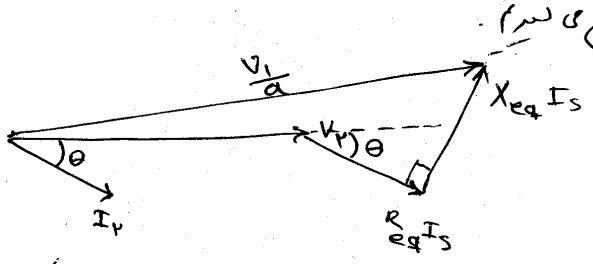
* تلفات مازوری ترانس :

یک KVL در مدار ثانویه ترانس می زنیم :

$$\frac{V_1}{a} = V_2 + (R_{eq} + jX_{eq})\, I_2$$

* V_2 را همواره مرجع می گیریم.

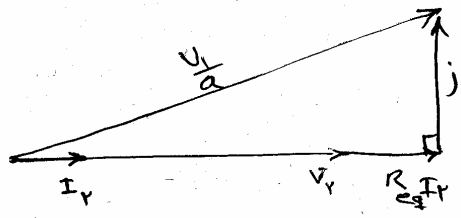
ترانس با PF پسفاز $\hookrightarrow$



برای بارهای پسفاز، $\frac{V_1}{a} > V_2$ است پس VR باید بزرگتر از صفر باشد.

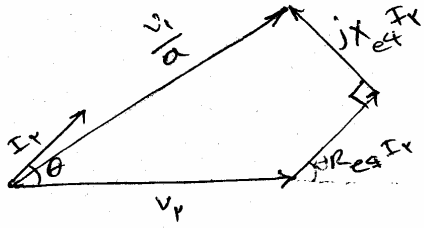
در این حالت نیز $\frac{V_1}{a} > V_2$ پس $VR > 0$ است.

PF=1 دارد $\rightarrow$

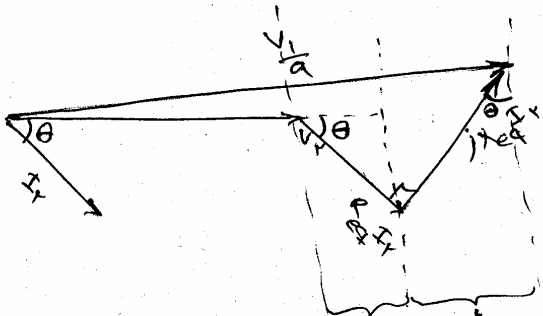


در این حالت V_2 می تواند از $\frac{V_1}{a}$ بزرگتر شود پس VR منفی می شود.

در PF پسفاز $\rightarrow$



* به دست آوردن معادلهٔ تقریبی $\frac{V_1}{a}$:



$$\frac{V_1}{a} \simeq V_2 + R_{eq}I_2\cos\theta + X_{eq}I_2\sin\theta$$

$R_{eq}I_2\cos\theta$ ، $X_{eq}I_2\sin\theta$

---

* بازده ترانسفورماتور :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\ \%$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{Loss}} \times 100\ \%$$

تلفات ترانس:
- مسی I^2R : با مقاومت سری مدار معادل شده است.
- هیسترزیس :
- جریان گردابی :

} با R_c مدل شده است.

در یک بار معین :

$$P_{out} = V_2 I_2 \cos\theta_2$$

که θ_2 را با توجه به بار و امپدانس‌های معادل به دست می‌آوریم . در این صورت :

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos\theta_2}{P_{out} + P_{core} + V_2 I_2 \cos\theta_2} \times 100$$

← توسط آزمایش اتصال کوتاه می توان مقاومت های سری معادل را به دست آورد.

" " مدار باز " " " " شاخه سازی " " " .

* $\text{جریان بار کامل در ثانویه} = \frac{S_{\text{نامی}}}{V_{2\,\text{نامی}}}$

$$\frac{V_1}{a} = V_2 + I_2 (R_{eq} + jX_{eq})$$

چون با استفاده از معادله * می توان I_2 بار کامل را به دست آورد، ترجیحاً از مدار معادل ترانس انتقالی به ثانویه استفاده می شود.

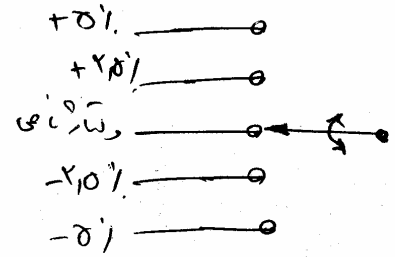
← چون جریان در ثانویه فرض شده است R_{eq} هم باید منتقل شده به ثانویه باشد.

$$\begin{cases} P_{Cu} = (I_2)^2 R_{eq} \\ P_{core} = \dfrac{\left(\frac{V_1}{a}\right)^2}{R_c} \end{cases}$$

← در اینجا چون از معادل انتقالی به ثانویه استفاده شده است، R_c هم باید به ثانویه منتقل شده باشد.

یک ترانس نوعی می تواند تا ۴ سر برای تنظیم ولتاژ باشد.

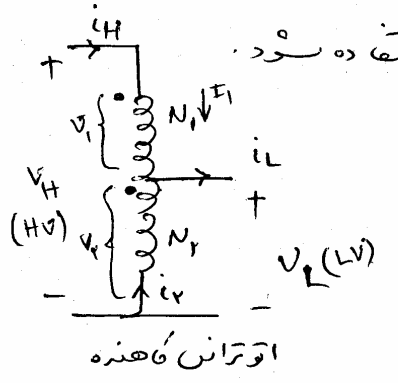
ترانس TCUL ترانسی است که می تواند برای ثابت نگه داشتن ولتاژ خروجی، سرک های خود را اتومات تغییر دهد.



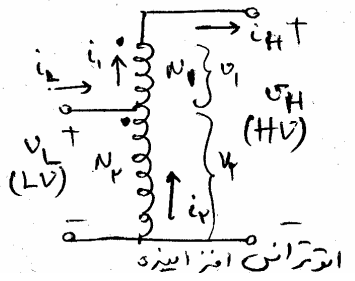
---

* اتوترانس:

در مواردی که تغییر کمی در سطوح ولتاژ لازم است، باصرفه ترین است که جای استفاده از ترانسی با دو سیم پیچ با ولتاژ تقریباً برابر، از اتوترانس استفاده شود.



=



(۴)

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad , \quad I - i_1 - i_2 = 0$$

$$V_1 i_1 = V_2 i_2$$

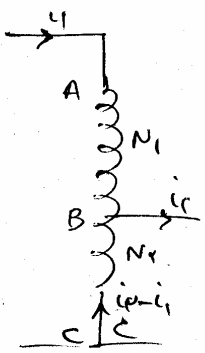
$$V_H = V_1 + V_2 = V_1 + \frac{N_2}{N_1} V_1 = V_2 + \frac{N_1}{N_2} V_2$$

$$V_2 = V_L \Rightarrow \boxed{\frac{V_L}{V_H} = \frac{N_2}{N_1 + N_2}}$$

$$i_H = i_1 + i_2 \Rightarrow \boxed{\frac{I_L}{I_H} = \frac{N_1 + N_2}{N_2}}$$

اتوترانس را به صورت ترانس انتقال دهیم، توانی بیش از توان نامی می‌توان از آن عبور داد.

توان ظاهری ورودی = توان ظاهری خروجی $\neq$ توان ظاهری سیم‌پیچ‌های اتوترانس



$$\frac{N_1}{N_2} = a \quad , \quad \frac{N_2}{N_1} = K$$

$$\Rightarrow \frac{\text{توان منتقل شده}}{\text{توان اتوترانس}} = \frac{V_{AB} \times i_1}{V_{AC} \times i_1} = \frac{V_{AB}}{V_{AC}}$$

$$= \frac{N_1 - N_2}{N_1} = \boxed{1 - K}$$

(۱۵) امپدانس DU موثر اتوترانس در مقایسه با ترانس های معمولی به نسبت کمتر عدد فرینه توان (یعنی تا چند برابر توان نامی می تواند عبور دهد) کوچکتر است.

محدودیت‌های قابل استفاده از ولتاژهای

۱- حفاظت عایقی سیم پیچ ها در برابر شکست الکتریکی

۲- محدودیت‌های مربوط به منحنی مغناطش و جریان مغناطس کننده ترانس

بعد از یک محدوده با افزایش ولتاژ و در نتیجه افزایش شار، جریان ضعیف بزرگی برای تولید ϕ مورد نیاز است.

$$\phi(t) = \frac{1}{N_p}\int v(t)\,dt$$

$$v(t) = V_m \sin \omega t \;,\; \phi(t) = -\frac{V_m}{\omega N_1}\cos \omega t$$

$$\Rightarrow \phi_{max} = \frac{V_{max}}{\omega N_1}$$ بنابراین است که

$f \downarrow \xrightarrow{\text{ثابت}} V \downarrow$

$f \uparrow \rightarrow V \uparrow$

* اگر ولتاژ ترانس به هر دلیلی کاسته شود (مثلاً در فرکانس کمتر کار کند)، باید ولتاژ نامی آن نیز کاسته شود زیرا در این حالت جریان بیشتری می‌توان عبور داد که از جریان مجاز بیشتر است.

$$\Rightarrow \quad S = V.I \xrightarrow{S=\text{ثابت}} V \downarrow \rightarrow I \uparrow$$

---

* جریان هجومی ترانس:

دامنه ماکزیمم شار در اولین نیم سیکل ولتاژ، به زاویه شار ولتاژ در لحظه وصل ترانس به خط بستگی دارد. اگر $v(t) = V_M \sin(\omega t + 90)$ باشد و شار را با همین فرض نیز در نظر بگیریم،

$$= V_M \cos \omega t$$

شار ماکزیمم در نیم سیکل اول برابر با شار ماکزیمم در حالت کار پایدار است:

$$\phi_{max} = \frac{V_{max}}{\omega N_1}$$

(۲۷)

حال اگر ولتاژ $v(t) = V_m \sin \omega t$ باشد، شار عبوری در نیم سیکل اول برابر است با:

$$\phi(t) = \frac{1}{N_1} \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} V_m \sin \omega t \, dt$$

$$= -\frac{V_m}{\omega N_1} \cos \omega t \Big|_0^{\frac{\pi}{\omega}}$$

$$= -\frac{V_m}{\omega N_1} [(-1) - (1)] = \frac{2V_{max}}{\omega N_1}$$

که ۲ برابر شار max است و برای تولید این شار نیاز به جریان خیلی زیادی داریم. یعنی در قسمتی از نیم سیکل ترانس در لحظه شروع ساعت اتصال کوتاه عمل می کند و جریان خطی را از خود عبور می دهد.

$\theta = 90^\circ \longrightarrow$ عادی

$\theta = 0 \longrightarrow$ بدترین حالت $\Longrightarrow 0 < \theta < 90 \Rightarrow$ اضافه جریان خواهیم داشت.

---

* PT باید بسیار دقیق باشد تا خوب اشباع و تار واقعی نشود.
* استاندارد جریان ثانویه در CT، 5^A است.
* CT باید همواره اتصال کوتاه باشد چون در صورت مدار باز بودن ممکن است جریان زیادی در ثانویه ظاهر شود.
* عیب اتوترانس این است که ایزولاسیون الکتریکی بین اولیه و ثانویه ندارد.
* در اتوترانس تنها بخشی از توان خروجی از سیم پیچ ها می گذرد.

آشنایی :

انواع روتور
- روتور قفس سنجابی ← شامل یک دسته میله‌های هادی هستند که در شیارهای سطح روتور قرار دارند و در دو طرف توسط میله‌های اتصال کوتاه حلقه‌ای هم وصل شده‌اند.
- روتور سیم پیچی شده ← محور که حاوی سیم پیچ‌های سه فاز دارد که شکل تصویر آینه‌ای سیم پیچ‌های استاتور بر روتور هستند و معمولاً اتصال ستاره دارند و انتهای سه سیم روتور به حلقه‌های لغزان محور روتور متصل‌اند. سیم پیچ‌های روتور توسط جاروبک‌های سوار بر حلقه لغزان اتصال کوتاه می‌شوند.

بنابراین جریان‌های روتور موتور القایی روتور سیم پیچی شده از طریق جاروبک‌های استاتور قابل دسترسی هستند و می‌توان این جریان را اندازه گیری کرد و یا مقاومت‌های اضافی در مدار روتور گذاشت.

← روتور سیم پیچی شده گران‌تر از قفس سنجابی است و به دلیل نیاز به جاروبک‌ها و حلقه‌های لغزان نگهداری آن سخت است و کاربرد کمی دارد.

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

n_s ← سرعت چرخش میدان مغناطیسی استاتور
f ← فرکانس
P ← تعداد قطب

$e_{ind} = (v \times B) l$ ← ولتاژ القا شده در هر سیم روتور

← سرعت سیم‌ها نسبت به میدان مغناطیسی
← چگالی شار مغناطیسی استاتور
← طول سیم‌های روتور

← سرعت نسبی روتور نسبت به سرعت میدان مغناطیسی است که ولتاژ القایی در سیم‌های روتور ایجاد می‌کند.

$$\omega_s = \frac{4\pi f_s}{P}$$

$$n_s = \frac{120 f_s}{P}$$

سرعت سنکرون ← سرعت میدان

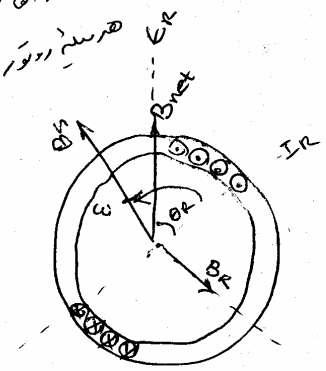
$$e_{ind} = (v \times B) \cdot L$$

سرعت نسبی ← چگالی شار استاتور ← طول سیم

ولتاژ القایی در سیم‌های روتور ناشی از سرعت نسبی روتور نسبت به میدان مغناطیسی است.

سرعت سیم‌های بالای روتور نسبت به میدان مغناطیسی به سمت راست است؛ بنابراین ولتاژ القایی در سیم‌های بالای به سمت بیرون کاغذ است و در سیم‌های پائینی به سمت داخل کاغذ است.

ولتاژ القایی هر سیم روتور



← در موتور القایی جریان یک روتور، نسبت به ولتاژ یک روتور تأخیر دارد. جریان روتور میدان مغناطیسی روتور B_R را ایجاد می‌کند.

جریان روتور

$$\tau_{ind} = K B_R \times B_S$$

گشتاور القایی ← میدان مغناطیسی استاتور

← گشتاور حاصل پادساعتگرد است.

← هر بالای سرعت روتور یک مقدار ثابت کمتر از سرعت سنکرون است. زیاد شدن سرعت سنکرون، سرعت نسبی = ۰ شده و e_{ind} و در نتیجه جریان روتور و B_R نیز صفر خواهند شد و سرعت روتور کم می‌شود.

← در عملکردهای عادی B_R و B_S با هم و با سرعت سنکرون می‌چرخند و سرعت طبیعی روتور کمتر است.

روتور سیم‌پیچی القایی به ولتاژ و فرکانس روتور بستگی دارد.

سرعت لغزش = سرعت سنکرون (میدان مغناطیسی) − سرعت مکانیکی روتور

$n_{slip} = n_s - n_m$ ← سرعت لغزش

$$\text{لغزش} \leftarrow S = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \times 100 = \frac{n_s - n_m}{n_s} \times 100 = \frac{n_{slip}}{n_s} \times 100$$

← روتور با سرعت سنکرون بچرخد ← $S = 0$

← روتور ساکن یا بند ← $S = 1$

$$n_m = (1 - S)\, n_s$$

$$\omega_m = (1 - S)\, \omega_s$$

← چون حرکت القایی براساس القاء ولتاژ از استاتور (اولیه) بر روتور (ثانویه) عمل می‌کند، به این ترتیب آن را ترانسفورماتور دوار نیز می‌نامند. اما فرکانس ثانویه همیشه با اولیه برابر نیست.

← اگر روتور قفل شود و نتواند بچرخد، فرکانس روتور با استاتور یکی می‌شود. اما اگر روتور با فرکانس سنکرون بچرخد، فرکانس روتور صفر می‌شود.

$$f_r = S f_s = \frac{n_s - n_m}{n_s} f_s \quad , \quad n_s = \frac{120 f_s}{P}$$

$$f'_r = f_s - f_m$$

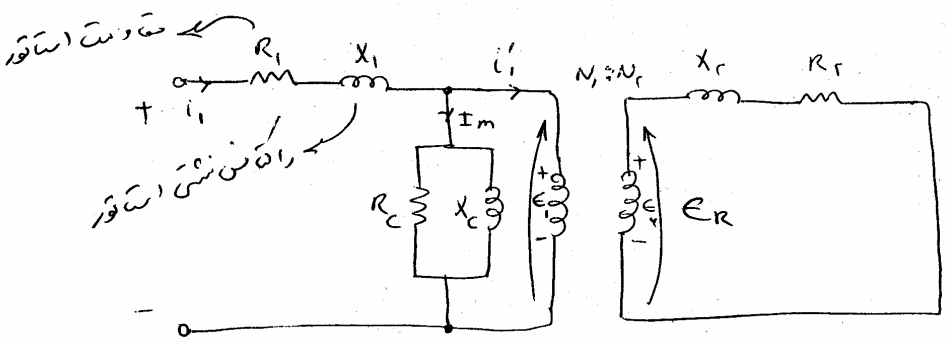
$$\Rightarrow f_r = \frac{P}{120}\left(n_s - n_m\right)$$

$1\,hp = 746\,W$

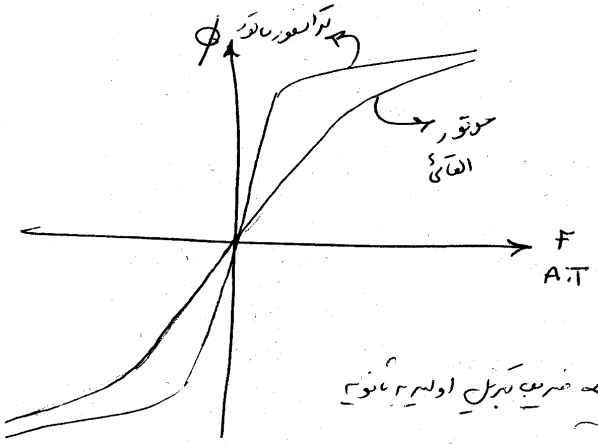
$\tau_{load} = \frac{P_{out}}{\omega_m}$ ← گشتاور وارد بر محور، خروجی روتور

گشتاور بار

← مدار معادل موتور القایی :



* دلیل شیب کمتر منحنی مربوط به موتور القایی این است که نیاز به وجود شکاف هوایی دارد که باعث افزایش شدید رلوکتانس مسیر شار می شود و تزدیک بین اولیه و ثانویه کاهش می یابد. این رلوکتانس باعث می شود تا برای داشتن یک شار خاص، نیروی محرکه بزرگتری لازم باشد بنابراین X_m در مدار معادل از مقدار آن برای یک ترانس خطی کمتر است.



← شیب خطی تبدیل اولیه به ثانویه

← نسبت دور موتور برای روتور سیم پیچی شده عبارت است از نسبت هادی فاز استاتور به هادی فاز روتور. اما برای مقصص سنجابی نمی توان به این شکل تعیین کرد چون سیم پیچی مشخصی نداریم.

← فرق مدار معادل موتور القایی با ترانس بیشتر در فرکانس تغییر روتور است که روی E_R و R_2 و X_2 تاثیر می گذارد.

$$E_R = S E_{R_0} \qquad \text{و} \qquad f_r = S f_s$$

E_{R_0} ولتاژ القایی روتور در حالت روتور قفل شده (روتور ساکن)

* R_2 تنها کمی به دلیل اثر پوستی تغییر می کند و مستقل از S است

راکتانس یک موتور القایی به القایی روتور و فرکانس ولتاژ و جریان روتور بستگی دارد.

$X_R = \omega_r L_R = 2\pi f_r L_R$ ← همان X_L

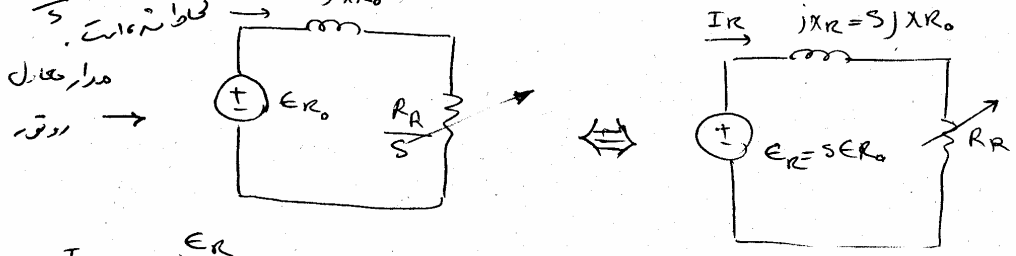
← القایی روتور

$f_r = s f_s$ →

$X_R = 2\pi s f_s L_R = s(2\pi f_e L_R) = s X_{R_0}$

← راکتانس روتور متغیر شده.

← در این حالت مقاومت و ولتاژ ثابت فرض شده و تمام افت‌ها در مقاومت $\frac{R_R}{s}$ لحاظ شده است.



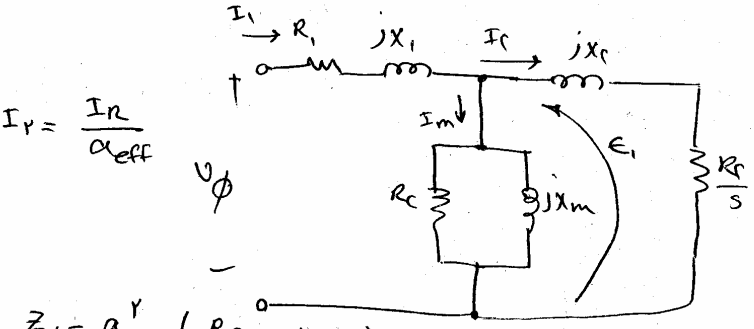
$$I_R = \frac{\epsilon_R}{R_R + jX_R} = \frac{\epsilon_R}{R_R + jsX_{R_0}} = \frac{\epsilon_{R_0}}{\frac{R_R}{s} + jX_{R_0}}$$

$$\Rightarrow Z_{Req} = \frac{R_R}{s} + jX_{R_0}$$

← مقاومت معادل روتور

← جریان روتور با تغییر لغزش تناسب خطی دارد.

مدار معادل کلی موتور القایی:



$$I_2 = \frac{I_R}{a_{eff}}$$

$$\epsilon_1 = \epsilon'_R = a_{eff}\epsilon_R$$

← ولتاژ روتور انتقال یافته به اولیه

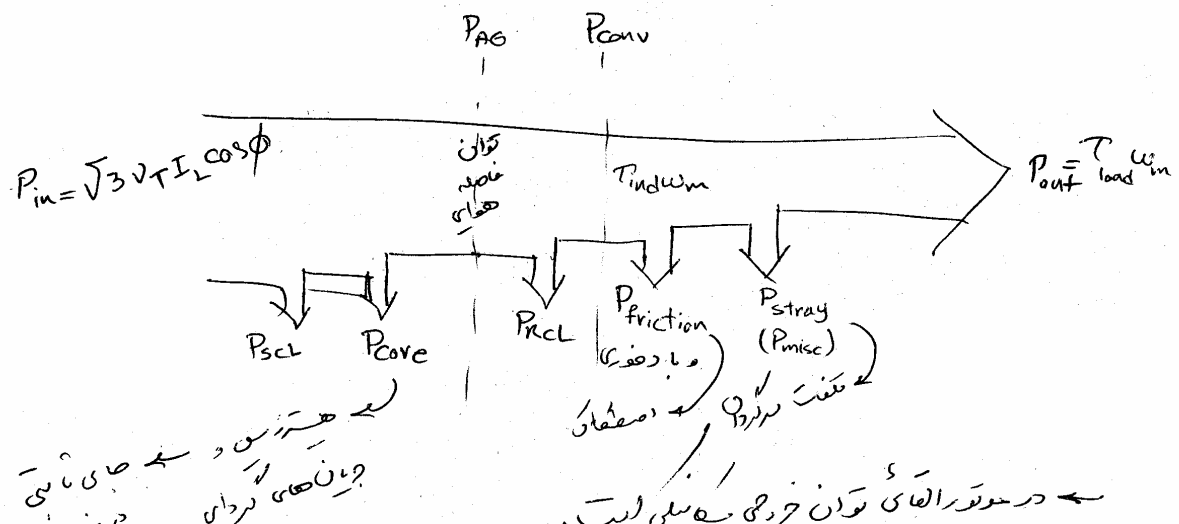
← سمت عضو موتور القایی

$$Z_2 = a_{eff}^2\left(\frac{R_R}{s} + jX_{R_0}\right), \quad R_2 = a_{eff}^2 R_R$$

$$X_2 = a_{eff}^2 X_{R_0}$$

R_R و X_R و a_{eff} برای روتور تقش سنجابی سخت نقش می‌شود (توسط برق‌ساخت‌ها).

* تلفات:



← در موتور القائی توان خروجی شکل است.

P_{AG} ← توان انتقالی است قدرت روتور از طریق فاصله هوای

P_{conv} ← توان تبدیل شده از الکتریکی به مکانیکی

← چون موتور القائی در سرعت نزدیک سنکرون می‌چرخد، حرکت نسبی میدان مغناطیسی بردوی سطح روتور کم است و تلفات هسته روتور در مقابل تلفات هسته استاتور بسیار ناچیز است.

هرچه سرعت موتور بیشتر باشد تلفات پراکنده، بادهوری و اصطکاک بیشتر و تلفات هسته کمتر می‌شود.

تلفات چرخشی = تلف هسته + تلف پراکنده + تلف بادهوری و اصطکاک

در موتورهای سه‌فاز القایی روتور سنجابی سخت نقش می‌شود (توسط برق‌ساخت‌ها).

$$I_1 = \frac{V_\phi}{Z_{eq}}$$

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{G_c - jB_M + \frac{1}{\frac{R_2}{s} + jX_2}}$$ ← امپدانس دیده شده در ورودی

$$P_{SCL} = 3 I_1^2 R_1$$

$$P_{core} = 3 E_1^2 G_c$$

$$\Rightarrow P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} - P_{core}$$

تنها عنصری که در روتور وجود دارد و می‌تواند توان تلف شده‌ی هوایی را مصرف کند $\frac{R_2}{s}$ است.

$$P_{AG} = 3 I_2^2 \frac{R_2}{s}$$

$$P_{RCL} = 3 I_R^2 R_R$$ ← توان ورودی و خروجی یک ترانس ایده‌آل برابر است. → $P_{RCL} = 3 I_2^2 R_2$

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} = 3 I_2^2 \frac{R_2}{s} - 3 I_2^2 R_2$$

$$= 3 I_2^2 R_2 \left(\frac{1}{s} - 1\right) = 3 I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s}\right)$$

$$P_{RCL} = s P_{AG}$$ ← هرچه لغزش کمتر باشد، تلفات روتور کمتر است.

اگر روتور بی‌حرکت $s=1$ باشد کل توان فاصله‌ی هوایی در روتور تلف می‌شود.

$$P_{out} = \tau_{ind} \omega_m$$

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} = P_{AG} - s P_{AG}$$

$$\Rightarrow P_{conv} = P_{AG}(1-s)$$

$$P_{out} = P_{conv} - P_{F,W} - P_{misc}$$

(اصطکاک و بادغبغبه)

تلفات بادخوری + پراکنده + اصطکاک = تلفات چرخشی

این گشتاور به اندازه گشتاورهای اصطکاکی و بادخوری با گشتاوری که واقعاً می‌توان از موتور گرفت تفاوت دارد.

$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m}$ گشتاور القاشده نامیده می‌شود. نام دارد.

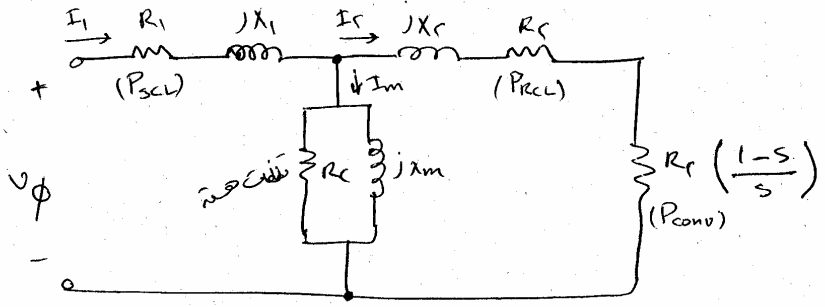
$$\Rightarrow \tau_{ind} = \frac{(1-s)P_{AG}}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_{AG}}{\omega_s}$$

توان نامیده هوای توانی است که در $\frac{R_2}{s}$ مصرف می‌شود.

تلفات مس روتور، توانی است که در R_2 مصرف می‌شود.

$$P_{conv} = \frac{R_2}{s} - R_2 = R_2\left(\frac{1}{s} - 1\right) = R_2\left(\frac{1-s}{s}\right)$$

هدف جدا کردن توان مقاومتی تلفاتی و تلفات روتور است تا به ۲ بخش جدا تقسیم شود.



$\omega_s = n_s \times \frac{2\pi}{60}$

$\hookrightarrow$ ولتاژ فاز $v_\phi = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}}$

$P_{in} = \sqrt{3} V_L I_L \cos\phi$

$P_{SCL} = 3 I_1^2 R_1$

$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL}$

$P_{conv} = (1-s) P_{AG}$

$P_{out} = P_{conv} - P_{rot}$

$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}}$

$\tau_m = \frac{P_{out}}{\omega_m}$

در حالت بار سرعت موتور نزدیک سرعت سنکرون است. میدان مغناطیسی حاصل B_{net} توسط I_M به وجود می‌آید و با ϵ_1 نسبت ۹۰ درجه تأخیر دارد. در صورت تغییر بار امپدانس‌های R_1 و X_1 شدیداً تغییر می‌کند که باعث تغییر کمی در ϵ_1 می‌شود که این افت ولتاژ ناچیز است.

افتادن روتور ← فرکانس روتور بسیار کوچک ← نقش کم ← در حالت بار ← ناچیز

جریان ماکزیمم روتور I_K تقریباً ← جریان روتور B_R کوچک تولید می‌کند که نسبت به B_{net} با زاویه‌ای کمی بیش از ۹۰° پس‌فاز است. با ϵ_K هم‌فاز است.

چون گشتاور اعظم B_{net} توسط جریان است تولیدی شود، این جریان در حالت بی‌باری نیز باید به حد کافی بزرگ باشد (دلیل اینکه جریان القایی موتورهای القایی نسبت به بقیه بیشتر است).

گشتاور القایی که روتور را به چرخش می‌اندازد. ← $\tau_{ind} = K B_R \times B_{net}$

و اندازهٔ آن برابر است با:

$$\tau_{ind} = K B_R B_{net} \sin\delta$$

زاویه بین B_{net} و B_R

B_R در حالت بی‌باری خیلی کم است که باعث می‌شود τ_{ind} هم کم شود به حدی که برای غلبه بر تلفات اصطکاکی موتور کافی باشد.

بستن ϵ_R ← بزرگ شدن جریان روتور ← کاهش سرعت ← افزایش لغزش ← با گذر زمان بار

افزایش I_R ← افزایش B_R ← افزایش فرکانس روتور $f_r = s f_e$ ← افزایش گشتاور روتور

+ تغییر زاویه جریان روتور و B_R

در این حالت جریان روتور نسبت به ولتاژش پس‌فازتر می‌شود و B_R نیز با جریان جابجا می‌شود.

* افزایش B_R در جهت افزایش گشتاور عمل می‌کند ولی افزایش δ در جهت کاهش گشتاور است. (τ_{ind} با $\sin\delta$ متناسب است و $\delta < 90$) و چون اثر اولی بیشتر است، گشتاور کل افزایش می‌یابد و توان لازم برای بار زیاد شده را تأمین می‌کند).

زمانی که با افزایش بار موتور، کاهش ناشی از $\sin\delta$ بیشتر از افزایش B_R باشد، گشتاور موتور شروع به کاهش می‌گذارد. پس از این افزایش بار باعث کاهش T_{ind} شده و موتور متوقف می‌شود.

← تا زمانی که روتور به اشباع نرسیده است، B_R با جریان روتور نسبت مستقیم دارد.
جریان نیز با افزایش لغزش، زیاد می‌شود.

← B_{net} با ϵ_1 متناسب است و چون ϵ_1 تقریباً ثابت است، B_{net} نیز ثابت خواهد بود.

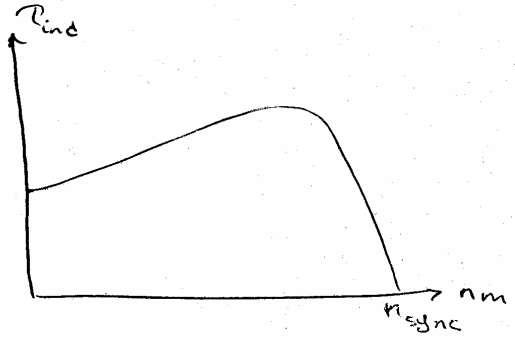
← ϵ_1 با افزایش جریان اندکی کاهش می‌یابد.

$$\delta = \theta_R + 90 \Rightarrow \sin\delta = \sin(\theta_R + 90)$$
$$= \cos\theta_R$$

← زاویه ضریب توان روتور

← ضریب توان روتور

$$PF_R = \cos\left(\tan^{-1}\frac{s X_{R0}}{R_R}\right)$$



* موتور القایی در هنگام کار عادی یک افت سرعت تقریباً خطی دارد (با افزایش بار).
← موتور القایی را برخلاف موتور سنکرون می‌توان نزدیک بار هم راه‌اندازی کرد.
← گشتاور راه‌اندازی حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ گشتاور نامی در بار کامل و گشتاور راه‌اندازی حداکثر حدود ۱۵۰ درصد گشتاور در بار کامل است.

در حالت پرکت صفر

نواحی کاری موتور با توجه به منحنی مشخصه :

۱ - ناحیهٔ لغزش کم : لغزش موتور با افزایش بار تقریباً خطی زیاد می‌شود و سرعت حاصل روتور تقریباً به صورت خطی کاهش می‌یابد و راکتانس روتور ناچیز است این ضریب توان روتور تقریباً ۱ است و جریان روتور با افزایش لغزش تقریباً خطی افزایش می‌یابد.

کل گستره کار عادی حالت ماندگار یک موتور القایی در این ناحیهٔ خطی با لغزش کم است.

۲ - ناحیهٔ لغزش متوسط : در این ناحیه فرکانس روتور بیش از قبل و راکتانس روتور درصد مقاومت روتور است. در این حالت جریان روتور با سرعت قبل زیاد نمی‌شود و ضریب توان شروع به افت می‌کند.

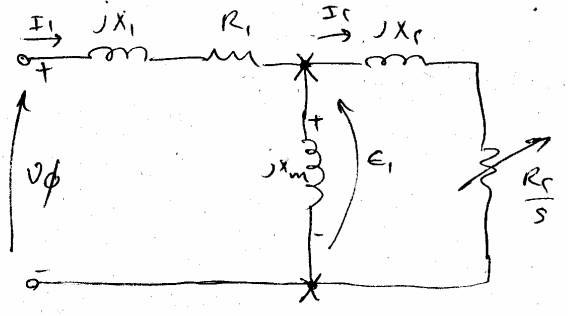
گشتاور ماکزیمم (برون‌کش) در نقطه‌ای رخ می‌دهد که در آن با ازای یک افزایش معنی در بار، افزایش جریان روتور دقیقاً با کاهش ضریب توان روتور معاوضه می‌شود.

۳ - ناحیهٔ لغزش زیاد : در این ناحیه گشتاور القایی با افزایش بار کم می‌شود، زیرا کاهش ضریب توان روتور افزایش جریان روتور را کاملاً تحت الشعاع قرار می‌دهد.

$$T_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m}$$

توان که از فاصلهٔ هوایی از مدار استاتور به مدار روتور منتقل می‌شود که برابر است با توانی که در $\frac{R_2}{s}$ تلف می‌شود.

$$T_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} \longrightarrow \omega_s$$ کاربرد بیشتری دارد چون ثابت است.

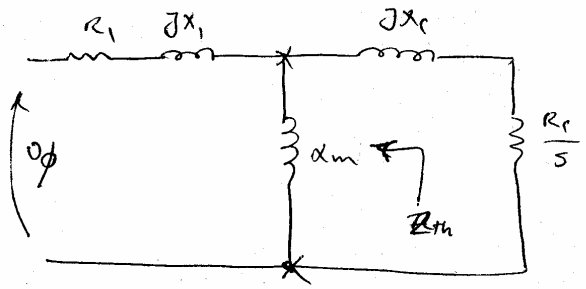


$$P_{AG} = I_1^2 \frac{R_2}{s}$$ برای این فاز

$$P_{AG} = 3 I_2^2 \frac{R_2}{s}$$

ساده‌ترین راه محاسبهٔ I_2 استفاده از مدار توین تونن سمت چپ مدار است.

۱۲



$$V_{TH} = \frac{jX_m}{R_1 + jX_1 + jX_m} V\phi \;,\; Z_{TH} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} = \frac{jX_m R_1 - X_m X_1}{j\left(\frac{R_1}{j} + X_1 + X_m\right)}$$

R_{TH} ← ، X_{TH} →

$$|V_{TH}| = V\phi \frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}}$$

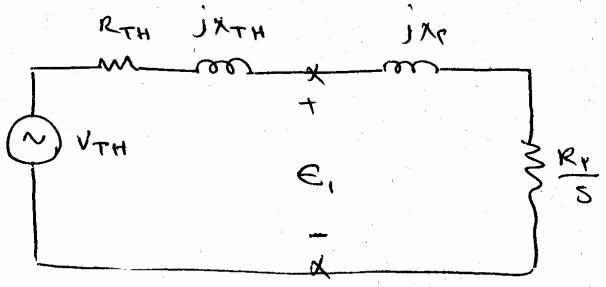
چون X_m از X_1 و R_1 خیلی بزرگتر است، می‌توان نوشت:

$$|V_{TH}| \simeq V\phi \frac{X_m}{X_1 + X_m}$$

$$R_{TH} \simeq R_1 \left(\frac{X_m}{X_1 + X_m}\right)^2 \quad \leftarrow \quad X_m + X_1 \gg R_1 \;,\; X_m \gg X_1$$

$$X_{TH} \simeq X_1$$

$\Rightarrow$

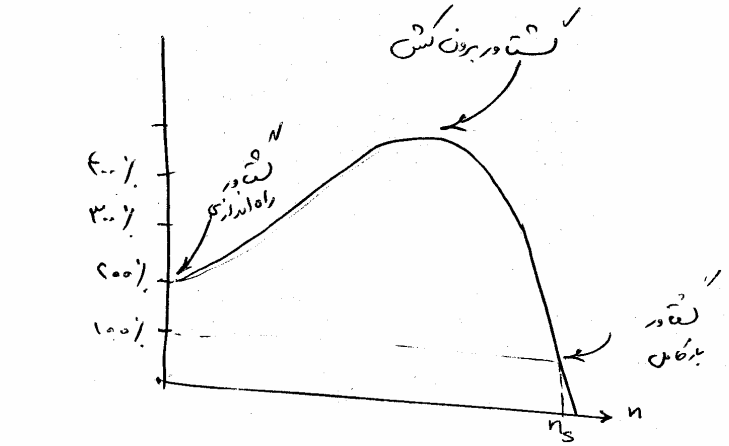


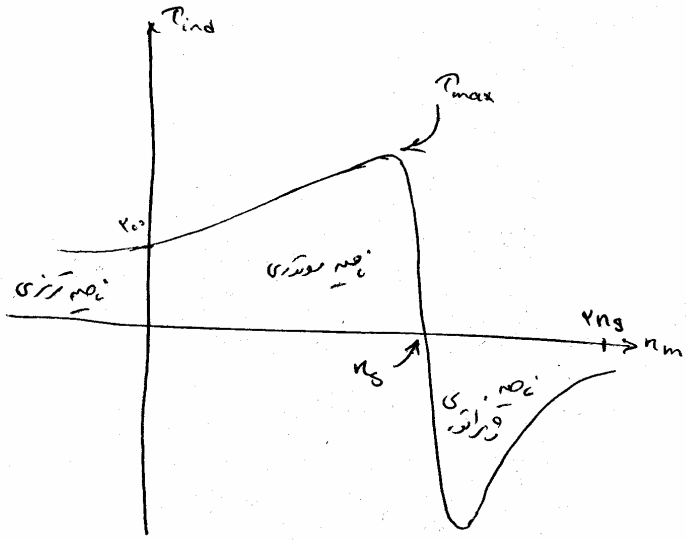
$$I_2 = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + Z_2} = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + \frac{R_2}{s} + jX_{TH} + jX_2}$$

$$\Rightarrow |I_2| = \frac{V_{TH}}{\sqrt{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}}$$

$$\Rightarrow P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} = \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}$$

$$T_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} = \frac{3V_{TH}^2 \frac{R_2}{s}}{\omega_s\left[\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2\right]}$$

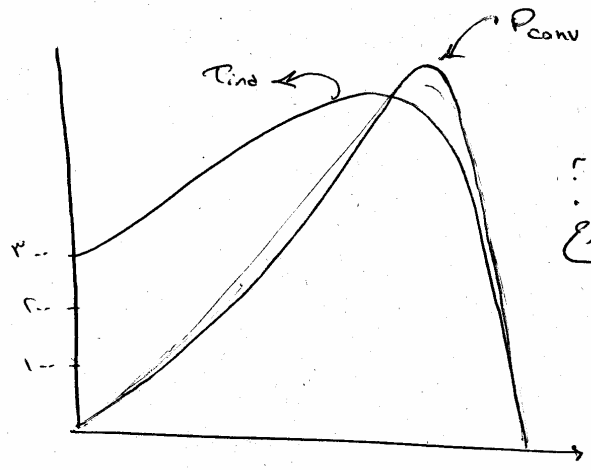




- در سرعت سنکرون، گشتاور القایی موتور صفر است.
- منحنی گشتاور - سرعت در ناحیه ی پایداری و بارکامل تقریباً خطی است. در این ناحیه مقاومت روتور از راکتانس روتور بسیار بزرگ تر است، بنابراین جریان روتور، میدان مغناطیسی روتور و گشتاور القایی با افزایش لغزش به طور خطی زیاد می شود.
- یک گشتاور ماکزیمم وجود دارد که نمی توان از آن تجاوز کرد. این گشتاور گشتاور برون کش یا شکست نام دارد و ۲ تا ۳ برابر گشتاور نامی موتور در بارکامل است.
- گشتاور راه اندازی موتور کمی بیشتر از گشتاور بارکامل است. بنابراین بارکامل این موتور را می توان از همان ابتدا به آن اعمال کرد.

- گشتاور موتور به ازای یک لغزش خاص با مربع دقه ژ اعمال شده متناسب است.
- اگر روتور یک موتور القایی را سریعتر از سرعت سنکرون بچرخانیم، جهت گشتاور القایی در ماشین عکس شده و ماشین تبدیل به ژنراتور می‌شود و توان مکانیکی را به الکتریکی تبدیل می‌کند.
- اگر موتور نسبت به جهت میدان مغناطیسی در جهت عکس بچرخد، گشتاور القا شده در ماشین آن را به سرعت متوقف می‌کند و سعی می‌کند آنرا در جهت عکس بچرخاند و چون عکس کردن جهت میدان با جابجایی دو فاز انجام می‌گیرد (عکس کردن) از این حالت برای ترمز سریع استفاده می‌شود.

$P_{conv} = T_{ind}\omega_m$

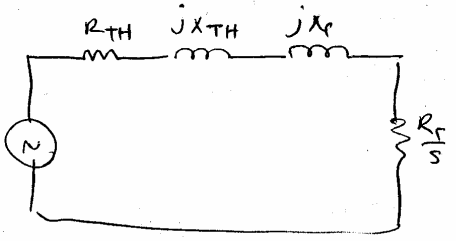


* توان ماکزیمی که موتور القایی می‌دهد، در سرعتی به جز سرعت گشتاور ماکزیمم رخ می‌دهد.

⇐ در حالت توقف روتور، هیچ توانی به تماشلی تبدیل نمی‌شود.

* گشتاور ماکزیمم (برون‌کش):

چون $T_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_s}$ است، ماکزیمم گشتاور در حالتی روی می‌دهد که ماکزیمم توان ناصله هوایی را داشته باشیم و چون توان ناصله هوایی، توان مصرفی $\frac{R_2}{s}$ برابر است، ماکزیمم گشتاور زمانی است که ماکزیمم توان در $\frac{R_2}{s}$ صرف شود.



توان $\frac{R_2}{s}$ زمانی حداکثر می‌شود که:

$$\frac{R_2}{s} = \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}$$

$$\Rightarrow \delta_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}}$$

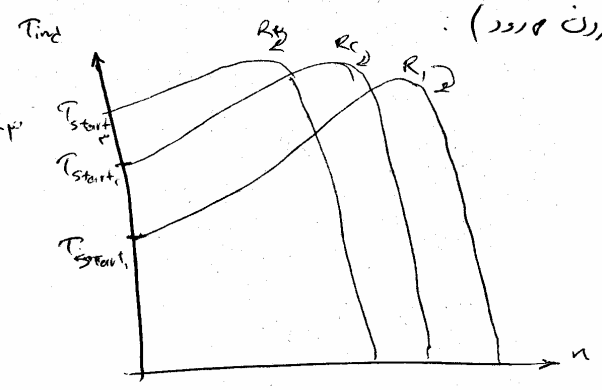
پس لغزش موتور در گشتاور ماکزیمم با مقاومت روتور نسبت مستقیم دارد.

با نوشتن عبارت لغزش برای گشتاور ماکزیمم در معادله P_{ind} (در مدار معادل توونن)

$$\tau_{max} = \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_s \left[R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_r)^2}\right]}$$

با توجه به رابطه فوق می‌توان نتیجه گرفت که گشتاور ماکزیمم با اندازه امپدانس استاتور و رآکتانس روتور نسبت عکس دارد. هرچه رآکتانس ماشین کوچکتر باشد، گشتاور ماکزیمم آن بزرگتر است.

با افزایش مقاومت روتور، سرعت برون‌کش موتور کاهش می‌یابد ولی گشتاور ماکزیمم ثابت است. (در روتور سیم‌پیچی شده) از این خاصیت می‌توان برای راه‌اندازی بارهای سنگین کمک گرفت. (در ابتدا با اضافه کردن مقاومت، سرعت کاهش و پس از راه‌اندازی موتور، مقاومت حذف و سرعت به سمت سنکرون می‌رود):



تلفات مکانیکی داده می‌شود:

$$\tau_{ind} = \tau_{load}$$
$$P_{conv} = P_{load} \Rightarrow \tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m}$$

مقاومت روتور یا برابر می‌شود با لغزش در گشتاور ماکزیمم نیز دوبرابر می‌شود.

← اگر روتوری با مقاومت بالا طراحی شود، گشتاور راه‌اندازی بزرگ است اما لغزش در شرایط کاری نیز بیشتر است و چون $P_{conv} = (1-s)P_{AG}$ پس توان بیشتری تبدیل شده و تلفات توان بالا خواهد رفت (پایین آمدن بازده موتور).

← موتوری که مقاومت روتور بالا دارد، گشتاور راه‌اندازی خوبی دارد اما در شرایط عادی بازده پایینی دارد.

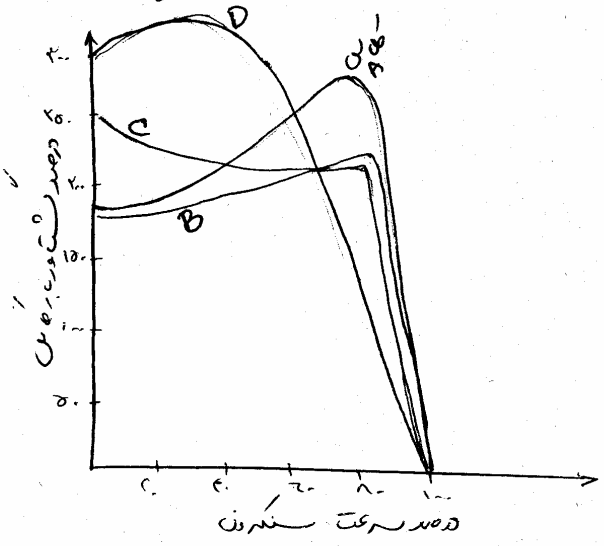
← " " " " کم دارد، " " کم و جریان راه‌اندازی زیاد دارد اما بازده آن در شرایط عادی خوب است.

← راه حل: استفاده از مقاومت اضافی در هنگام راه‌اندازی و سپس خارج کردن آن از مدار.

* با بهره‌گیری از رآکتانس نشتی طراحان کاری کرده‌اند در لغزش‌های کم موتور با مقاومت کوچک عمل کند و در لغزش‌های بزرگ موتور با مقاومت بالا کار کند.

X_2 رآکتانس نشتی روتور متشکل شده از اولیه (رآکتانس ناشی از خطوط شاری که به سیم پیچ‌های استاتور ترکیب نمی‌شوند). هرچه میله روتور با قسمتی از آن از استاتور دورتر باشد، رآکتانس نشتی آن بزرگتر است، چون درصد بیشتری از شار میله با استاتور می‌رسد.

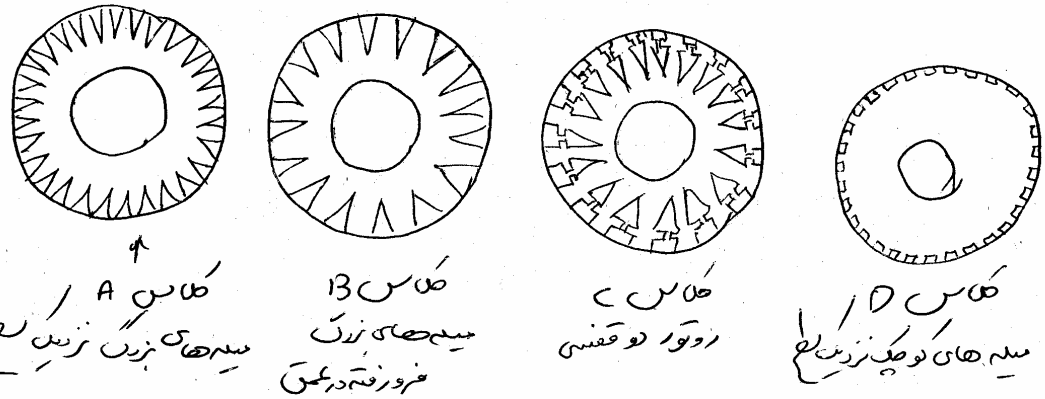
اگر میله‌های یک روتور قفس سنجابی در نزدیک سطح روتور قرار گیرند، شار نشتی و در نتیجه X_2 کوچک‌تر دارد و برعکس.



کلاس A ← لغزش کم

" D ← گشتاور راه‌اندازی بزرگ

با توجه به استاندارد ← NEMA



کلاس A
میله‌های بزرگ نزدیک سطح

کلاس B
میله‌های بزرگ
فرورفته در عمق

کلاس C
روتور دو قفسی

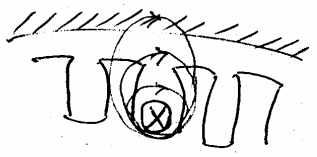
کلاس D
میله‌های کوچک نزدیک سطح

حلقه های کوچک ← مقاومت پایین
فاصله کم با سطح روتور ← رآکتانس پایین

* روتور ژرف ـ سیلی و دوقفسی :

در این حالت چون فاصله کم است، X_2 هم کوچک است.

از لحاظ الکتریکی تمام بخش های سیلی روتور سهازی اند، و هر سیلی را می توان متشکل از چند بخش سهازی دانست که بخش های بالاتر اتصال کمتر و بخش های پایین تر اتصال بیشتری دارد.



در این حالت چون از سطح روتور فاصله دارد، X_2 بزرگ است

← در لغزش کوچک، فرکانس روتور خیلی کوچک است و راکتانس تمام مسیرها حدودی در برابر مقاومتشان ناچیز است و امپدانس تمام بخش های سیلی تقریباً یکی است و جریان از همه بخش ها به صورت تقریباً یکسان می گذرد. سطح مقطع بزرگ سیلی ها باعث می شود مقاومت روتور کوچک و بازده در لغزش های کم، کاملاً بالا باشد. در لغزش های بزرگ (راه اندازی) راکتانس ها در مقایسه با مقاومت سیلی های روتور بزرگ هستند، بنابراین بخش اعظم جریان از مسیرهای کم راکتانس بالایی که نزدیک استاتور هستند، می گذرند. در این حالت سطح مقطع مؤثر کم می شود و مقاومت روتور بیشتر از عمل می شود. بنابراین چون مقاومت روتور در شرایط راه اندازی (گشتاور راه اندازی) بزرگتر و جریان راه اندازی کمتر از کلاس A است. ← طرح کلاس B است.

ساختار دوقفسی { مجموعه سیلی های بزرگ و کم مقاومت در عمق روتور / کوچک و پر " " سطح "

شبیه روتور ژرف ـ سیلی است با اختلاف کار در لغزش های کم و لغزش های زیاد از ژرف ـ سیلی هم بیشتر است.

← در شرایط راه اندازی تنها سیلی های کوچک سوارند و مقاومت روتور خیلی بالاست ولی در سرعت های نامحمول همه دو دسته سیلی سوارند و مقاومت همان کم روتورهای ژرف ـ سیلی می شود. ← راه ساختن کلاس B که از دوقفسه استفاده می شود.

- روتورهای دوقفسی از روتورهای سیم پیچی شده ارزانتر و از قفس سنجابی ها گرانترند، و با کمک آنها می‌توان بهترین ویژگی‌های دو نوع روتور سیم پیچی شده (گشتاور راه اندازی بزرگ و جریان راه اندازی کم و بازده خوب در شرایط عادی) را با هزینه ای ارزانتر و بدون نیاز به حلقه‌های لغزان و جاروبک به دست آورد.

نوع A ← گشتاور راه اندازی عادی جریان راه اندازی عادی لغزش کم (در بار کامل کمتر از ۵٪ و کمتر از یک سوم روتورهای کلاس B است)

گشتاور max ۲۰۰ تا ۲۴۰٪ گشتاور نامی (در لغزش‌های کمتر از ۲۰٪ خ می‌دهد).

گشتاور راه انداز { روتورهای بزرگ حداقل برابر با گشتاور نامی
کوچک ۲۰۰٪ گشتاور نامی یا بیشتر

← شکل اسلاتی: جریان هجومی بالا در هنگام راه اندازی (جریان راه اندازی فوت ۵۰۰ تا ۸۰۰٪ جریان نامی است).

نوع B ← گشتاور راه اندازی عادی جریان راه اندازی کم لغزش کم

گشتاور راه اندازی حدود گشتاور راه اندازی کلاس A است. اما جریان حدود ۲۵٪ کمتر

گشتاور max بزرگتر یا برابر ۲۰۰٪ گشتاور نامی ولی به دلیل افزایش راکتانس روتور، آنها از روتورهای کلاس A کمترند.

لغزش باز هم کمتر از ۵٪ (در بار کامل)

← در کاربردهای جدید، کلاس B جانشین A شده است.

نوع C ← گشتاور راه اندازی بالا جریان راه اندازی کم لغزش کم (کمتر از ۵٪ در بار کامل)

گشتاور max کمی از کلاس A کمتر است گشتاور راه اندازی تا ۲۵۰٪ بار کامل می‌رسد.

← ساخته شده از روتورهای دوقفسی ← گران تر از A و B

کلاس D ← گشتاور بسیار بزرگ (۲۷۵ درصد گشتاور نامی یا بیشتر)
جریان راه اندازی کم
لغزش زیاد در بار کامل

همان کلاس A هستند اما میله های روتور آنها لاغرتر و از ماده ای با مقاومت ویژه بزرگتر ساخته می شوند. که مقاومت بزرگتر روتور باعث می شود گشتاور max در سرعت پایین تری رخ دهد. حتی می توان کاری کرد که در سرعت صفر رخ دهد.
به دلیل مقاومت بزرگ روتور ، لغزش بار کامل نسبی بزرگ است (نوعاً ۷ تا ۱۱ ٪ ولی تا ۱۷ و یا بیشتر هم می تواند باشد)

← کاربرد : بارهای با لختی زیاد که نیاز به شتاب پیدا کنند.

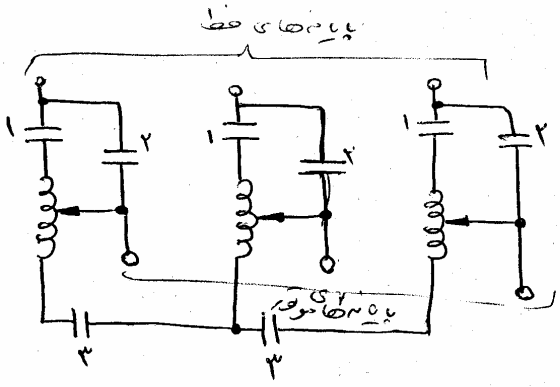
← برای محاسبهٔ مشخصهٔ گشتاور - سرعت روتور دو قفسه ای ، به ازای هر لغزش مقاومت و راکتانس روتور ترکیب نوازی امپدانس های قفس داخلی و قفس خارجی است. در لغزش کم راکتانس روتور اهمیتی ندارد و قفس بزرگ داخلی عامل مهمی در کارکرد ماشین است. در لغزش بزرگ راکتانس بزرگ قفس داخلی تقریباً آن را از مدار خارج می کند.

$$S_{start} = (\text{ضریب کار}) \times (\text{توان نامی برحسب اسب بخار})$$

$$\Rightarrow I_L = \frac{S_{start}}{\sqrt{3}V_T}$$

* روش های کاهش جریان راه اندازی :

۱- قرار دادن مقاومت یا اندکتانس اضافی در هنگام راه اندازی در خط تغذیه
۲- کاهش ولتاژ پایانه ای موتور در طی راه اندازی



ترتیب راه اندازی :

۱ - بستن ۱ و ۳

۲ - باز کردن ۱ و ۳

۳ - بستن ۲

← گستره کار عادی هرکدام از طاس های A و B و C و D به لغزش کمتر از ۵٪ محدود می شود و تغییر سرعت دراین گستره با ازروی محور موتور کم و بیش به خط خطی متناسب است . حتی اگر بتوان لغزش را بزرگتر ، بازده موتور بسیار کم می شود زیرا تلفات مس روتور با لغزش نسبت مستقیم دارد .

روش های کنترل سرعت موتور القائی

- تغییر سرعت سنکرون (سرعت میدان های شفاصلی استاتور و روتور) زیرا سرعت روتور همیشه نزدیک n_s می ماند .
- تغییر لغزش موتور برای بار ثابت

پس تنها راه تغییر سرعت سنکرون ، ⟵ $n_s = \frac{120 f_e}{P}$

تغییر فرکانس و تغییر تعداد قطب های ماشین

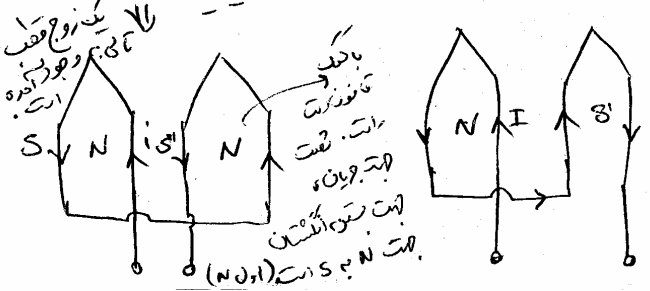
کنترل لغزش نیز با تغییر مقاومت روتور یا ولتاژ پایانه ای موتور انجام می گیرد

* روش های تغییر قطب :

۱ - روش قطب های نامی ⟵ با تغییر اتصال های پیچک می توان تعداد قطب ها را

۲ - سیم پیچ های استاتور جداگانه

سیم پیچ استاتور موتور القائی را به نسبت ۱:۲ تغییر داد.



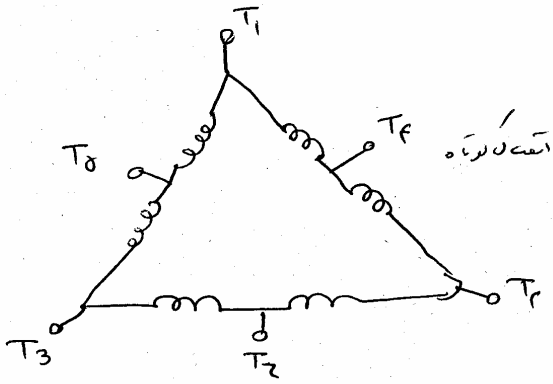
با تغییر اتصال ۴ به ۲ قطب تغییر دارم.

موتوری که روش تابی برای آن اجرا می‌شود، از نوع قطب‌شناسی است، زیرا تعداد قطب‌های روتور قطب‌شناسی همیشه به همان تعداد قطب‌های استاتور است که استاتور را می‌پذیرد.

← وقتی موتور از حالت ۲ قطبی به ۴ قطبی تبدیل می‌شود، گشتاور تأثیر حاصل در موتور می‌تواند شش قبل، ثابت (گشتاور ثابت)، نصف قبل، شد (گشتاور خروجی) یا دوبرابر قبل باشد (توان خروجی ثابت).

پنجه‌ای

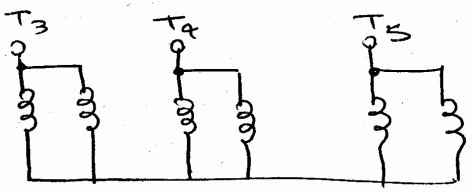
* اتصال توان خروجی ثابت



سرعت کم: $T_4\ T_5\ T_6$ ← خط و $T_1T_2T_3$ اتصال کوتاه

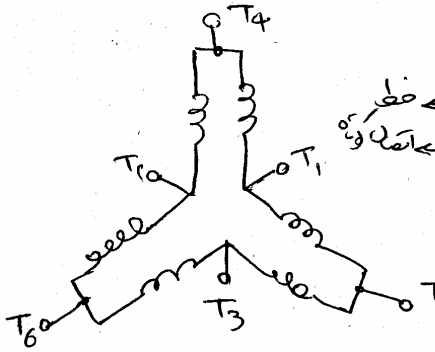
سرعت زیاد: $T_1\ T_2\ T_3$ ← خط

سرعت کم



---

* گشتاور ثابت:



سرعت کم ←

خط ← $T_1\ T_2\ T_3$

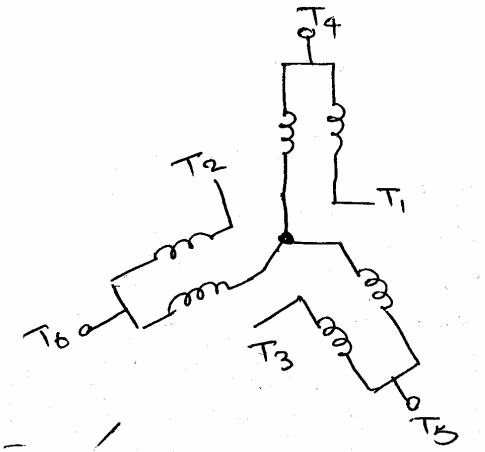
اتصال کوتاه ← $T_4\ T_5\ T_6$

سرعت زیاد ←

خط ← $T_4\ T_5\ T_6$

اتصال ← $T_1\ T_2\ T_3$

* گشتاور دینامیکی :



کم سرعت → $T_1 T_2 T_3$ → خط
$T_4 T_5 T_6$ → باز

پرسرعت → $T_4 T_5 T_6$ → خط
$T_1 T_2 T_3$ → اتصال

عیب روش کلاف ← نسبت ۱ : ۲ دارد (یا برعکس) .

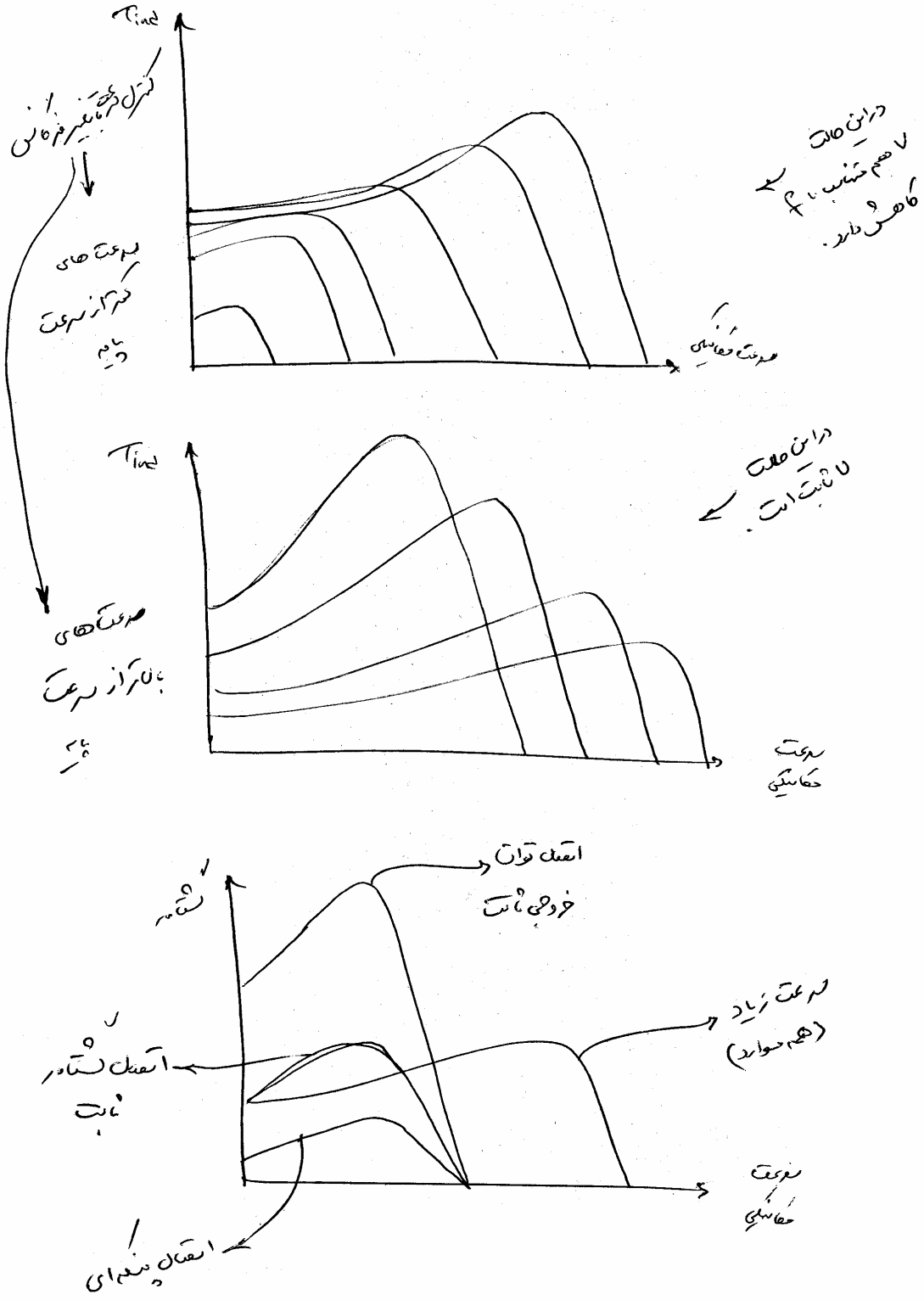
روش دیگر استفاده از استاتورهایی است که چند سیم پیچ با تعداد قطب مختلف دارند.

اگر f تغییر کند (ω_s) ، نقطه کار برای هدفی مشخص گشتاور - سرعت نیز به همراه آن تغییر می‌کند.

سرعت پایه ← سرعت سنکرون موتور در شرایط نامی .

وقتی موتوری با سرعتی پائین‌تر از سرعت پایه کار می‌کند ، باید ولتاژ پایانه‌ای اعمال شده به استاتور برای داشتن عملکرد مناسب کاهش یابد . ولتاژ پایانه‌ای اعمال شده به استاتور باید با کاهش فرکانس استاتور به طور خطی کم شود (تنزل) . اگر این کار انجام نشود ، شار هسته موتور القایی اشباع شده ، جریان های مغناطیس کننده‌ی زیادی جریان می‌یابد .

برگرفته از این اصل که موتور القایی نوعی ترانس دوار است .


Tind
کنترل در حالت تایپ فرمان
سرعت های کمتر از سرعت دیم
سرعت حداکثر
در این حالت با هم حنانب ۴+ کاهش دارد.
Tind
در این حالت ثابت است.
سرعت های بالاتر از سرعت دیم
سرعت حداکثر
اتصال توان خروجی ثابت
اتصال گشتاور ثابت
سرعت زیاد (هم خواند)
سرعت حداکثر
اتصال پله‌ای

دلیل لزوم کاهش ولتاژ :

$$V(t) = -N\frac{d\phi}{dt} \quad , \quad V(t) = V_m \sin \omega t$$

$$\phi(t) = \frac{1}{N_p}\int V(t)\,dt$$

$$= \frac{1}{N_p}\int V_m \sin \omega t\,dt$$

$$\boxed{\phi(t) = -\frac{V_m}{\omega N_p}\cos \omega t}$$

← افزایش فرکانس ← افزایش ω ← در صنایع برای تغییر کم در شار، نیاز به جریان بسیار زیاد است.

موتورهای القایی معمولاً در نزدیکی نقطه اشباع کار می‌کنند. → لزوم کنترل جریان هجومی → کاهش تدریجی $V(t)$

V در صورت افزایش ω در خروج با ضریبی و ϕ ثابت می‌ماند.

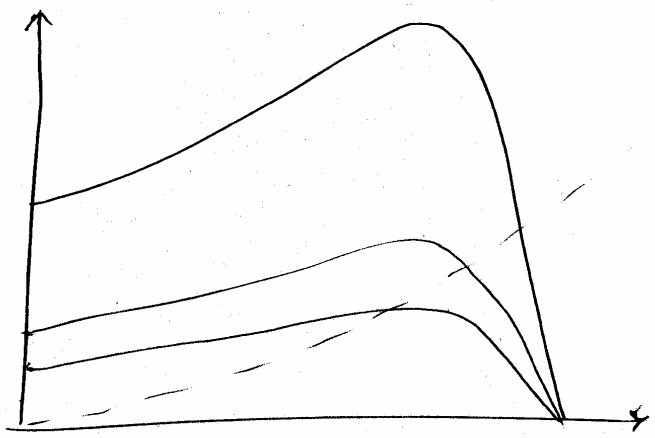
برای جلوگیری از گرم شدن بیش از اندازه موتور، ژنراتور هم توان مجاز هم باید کاهش یابد.

ژنراتور و موتور نسبتاً با هم می‌مانند

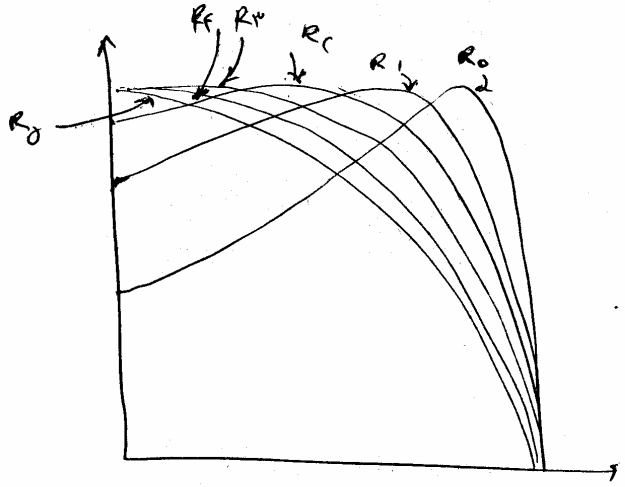
$$P = \sqrt{3}\,V_L I_L \cos\theta$$

وقتی فرکانس اعمالی به موتور از حالت نامی بیشتر شود، ولتاژ استاتور در مقدار نامی خود ثابت می‌ماند. البته ملاحظات ایمنی اجازهٔ افزایش ولتاژ را برای دهد، اما برای جلوگیری از شکست عایقی سیم پیچ استاتور از این کار اجتناب می‌کنیم. در این حالت ϕ کاهش یافته و ژنراتور هم که می‌تواند تولید شود، کاهش می‌یابد.

کنترل یک موتور القایی با روتر سیم‌لچی به آن مناسب است. با تغییر ولتاژ خط سرعت موتور را می‌توان در محدوده وسیعی کنترل کرد:



با قرار دادن مقاومت اضافی در مدار روتور، می‌توان شکل منحنی گشتاور سرعت آن را تغییر داد. اما بازده به شدت کم می‌شود و به همین دلیل برای مواصلت زمانی کوتاه از این روش استفاده می‌کنند.

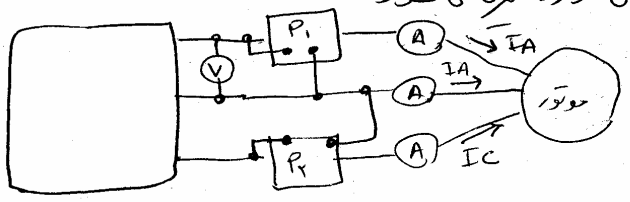


تغییر منحنی گشتاور سرعت با استفاده از مقاومت اضافی مدار روتور.

$R_1 = 2R_0$
$R_2 = 3R_0$
$R_3 = 4R_0$
$R_4 = 5R_0$
$R_5 = 7R_0$

* آزمایش بی باری:

در این آزمایش تلفات چرخشی اندازه گیری می‌شود.



$$I_L = \frac{I_A + I_B + I_C}{3}$$

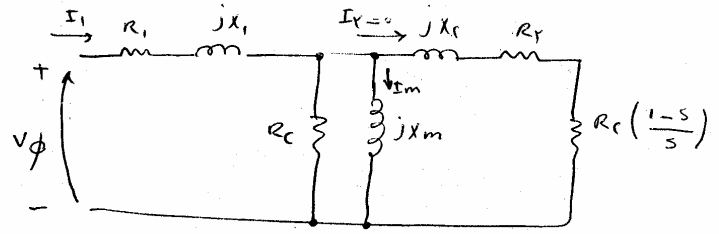
موقعی که این آزمایش آزاد انجام می‌شود و تنها تلفات بادخوری و اصطکاک را داریم و تمام P_{conv} به صورت تلفات مکانیکی مصرف می‌شود (s بسیار ناچیز است). با این تغییر شرایط در این حالت:

- تلفات مس استاتور کم است (کم بودن I_r به دلیل بزرگی $R_r(1-s)/s$) و تلفات مس استاتور:

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1$$

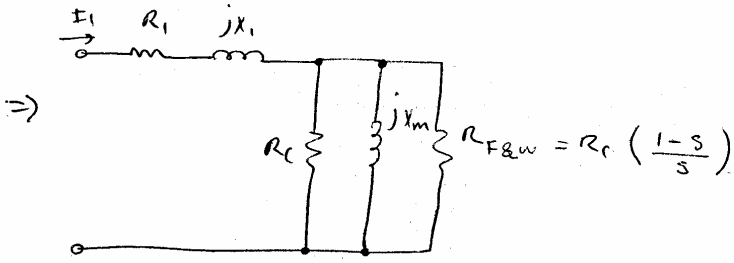
$$\Rightarrow \quad P_{in} = P_{SCL} + P_{هسته} + P_{F\&W} + P_{misc} = 3I_1^2 R_1 + P_{rot}$$

$P_{rot} = P_{هسته} + P_{F\&W} + P_{misc}$ ← تلفات چرخشی

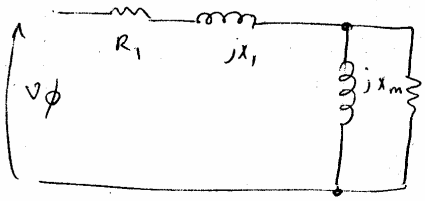


$$R_r\left(\frac{1-s}{s}\right) \gg R_r$$

$$R_r\left(\frac{1-s}{s}\right) \gg X_r$$



$\Rightarrow$



جریان نازم برای ایجاد یک میدان مغناطیسی در موتور القایی نسبتاً بزرگ است، زیرا ناحیه هوایی رلوکتانس بزرگی دارد. بنابراین رلوکتانس X_m بسیار کوچکتر از مقاومت $R_{F\&W}$ است و می‌توان امپدانس ورودی موتور را بسیار کوچک در نظر گرفت.

به ازای جریان بزرگ بی‌باری اکثر افت ولتاژ روی مولفه‌های القایی جداصورت می‌گیرد. پس:

امپدانس ورودی معادل

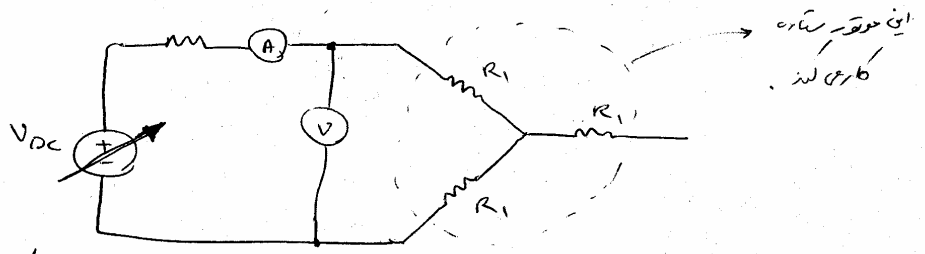
$$|Z_{eq}| = \frac{V\phi}{I_{nL}} \approx X_1 + X_m$$

R_1 نقش زیادی در عملکرد موتور القایی دارد (تعیین منفی گشتاور - سرعت و سرعتی که در آن گشتاور برابر صفر می‌شود)

* آزمایش dc :

با استفاده ولتاژ dc داده می‌شود به دلیل dc بودن در روتور القایی نداریم و جریانی از روتور نمی‌گذرد.

به دلیل dc بودن راکتانس موتور هم صفر است و تنها مقاومت موجود R_1 است.



برای انجام آزمایش، جریان استاتور را به مقادیر نامی می‌رسانیم و ولتاژ بین دو یا سه را اندازه‌گیری می‌کنیم

به دلیل اینکه دیگر نیازی به کار ستاره در رسم بیچ‌ها

این مقدار چندان دقیق نیست، چون در آن اثر پوسته و ولتاژ ac لحاظ نشده است.

$$\Rightarrow R_1 = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}}$$

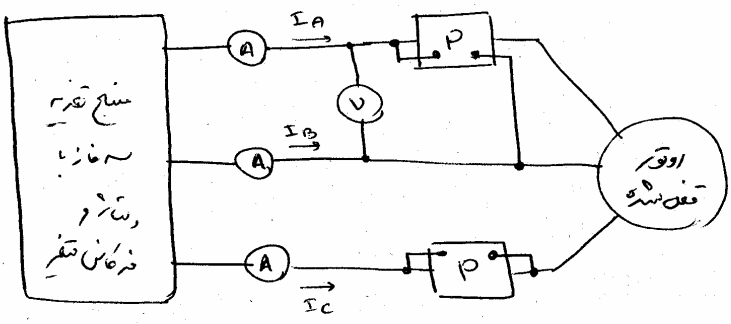
با توجه به R_1 تلفات مس استاتور به دست می‌آید. تلفات هسته در روی بار ثابت فرض می‌شود و تلفات چرخشی نیز از تفاضل بین توان ورودی در روی بار و تلفات مس استاتور به دست می‌آید.

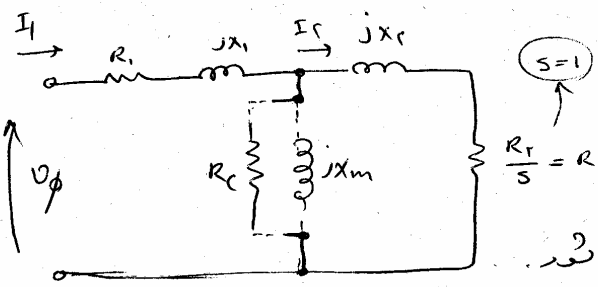
* آزمایش روتور قفل شده :

این آزمایش شبیه با آزمایش اتصال کوتاه ترانس است. در این آزمایش روتور قفل می‌شود تا نتواند بچرخد، ولتاژی به ac موتور اعمال شده، ولتاژ، جریان و توان اندازه‌گیری می‌شود.

به طوری تنظیم می‌شود که جریان استاتور مقدار نامی باشد.

با رسیدن جریان به مقدار نامی آن، ولتاژ، جریان و توان موتور اندازه‌گیری می‌شود.





$X_m >> |R_c + jX_2|$

$R_c >> |R_2 + jX_2|$

← از R_c و jX_m صرف‌نظر می‌شود.

در شرایط عادی کار f برابر f تغذیه است و در شرایط راه‌اندازی اوورتور نیز فرکانس تغذیه را دارد. ولی در شرایط عادی لغزش اکثر موتورها بین ۲٪ تا ۵٪ هرتز است و فرکانس روتور در گستره ۱ تا ۳ هرتز است.

← فرکاس حفاظ، شرایط عادی کار روتور را نشان می‌دهد و چون در موتورهای کلاس C و B مقاومت موثر روتور به شدت تابع فرکانس است، فرکانس نادرستی برای روتور باعث ایجاد حفاظ در نتیجه آزمایش می‌شود.

- یک راه استفاده از ۲۵٪ فرکانس نامی است. این روش بیشتر برای روتورهای مقاومت‌بالا (کلاس A و D) قابل قبول است.

پس از اعمال ولتاژ و فرکانس مورد نظر، جریان در هر فاز اندازه‌گیری می‌شود و قبل از اینکه روتور حرکتی کند، توان ورودی، ولتاژ و جریان اندازه‌گیری می‌شود.

$$P = \sqrt{3}\, V_T I_L \cos\theta$$

$$\Rightarrow PF = \cos\theta = \frac{P_{in}}{\sqrt{3}\, V_T I_L}$$

$$|Z_{LR}| = \frac{V_\phi}{I_L} = \frac{V_T}{\sqrt{3} I_L}$$

← اندازه امپدانس هر فاز موتور

θ ← زاویه

$$Z_{LR} = R_{LR} + jX'_{LR}$$

$$= |Z_{LR}|\cos\theta + j|Z_{LR}|\sin\theta$$

R_{LR} مقاومت روتور متقل شده ← $\Rightarrow \boxed{R_{LR} = R_1 + R_2'}$ $\Rightarrow R_c = R_{LR} - R_1$ که با آزمایش dc

راکتانس روتور متقل شده ← $X'_{LR} = X'_1 + X'_2$

راکتانس های استاتور و روتور در هنگام عبور از پل

راکتانس معادل در هنگام نامی ← $X_{LR} = \frac{f_{نامی}}{f_{آزمایش}} X'_{LR} = X_1 + X_2$