ماشین ۲

- مراجع:

کتاب ماشین‌های الکتریکی — چاپمن

کتاب ماشین‌های الکتریکی — پی سی سن

- عناوین:

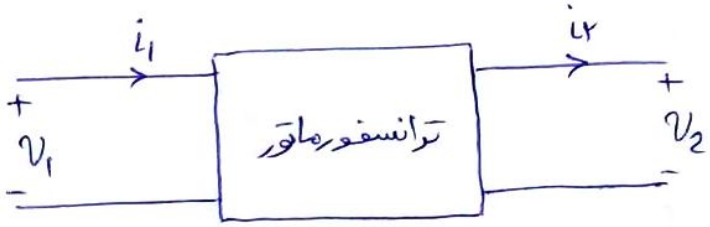
۱- ترانسفورماتورها

۲- ماشین‌های القایی

2014 05 22

Transformers ترانسفورماتورها

ترانسفورماتورها تجهیزاتی الکتریکی برای تبدیل سطوح ولتاژ و جریان هستند.



a: نسبت تبدیل

برای ترانسفورماتور ایده آل

$$\begin{cases} v_1 = a v_2 \\ i_1 = \frac{1}{a} i_2 \end{cases}$$

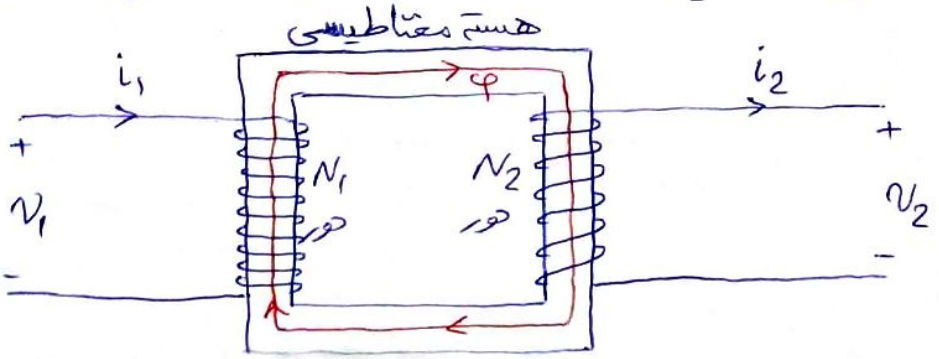
توان لحظه‌ای ورودی اولیه $p_1(t) = v_1 i_1$

توان لحظه‌ای خروجی ثانویه $p_2(t) = v_2 i_2$

$$p_1(t) = v_1 i_1 = a v_2 \cdot \frac{1}{a} i_2 = v_2 i_2 = p_2(t)$$

در ترانسفورماتورها انرژی ورودی و خروجی هر دو به صورت الکتریکی هستند یعنی برخلاف ماشین‌های الکتریکی که ورودی آن‌ها الکتریکی و خروجی آن‌ها مکانیکی است (موتورها) و یا ورودی آن‌ها مکانیکی و خروجی‌شان الکتریکی (ژنراتورها)، در ترانسفورماتورها شکل انرژی ورودی و خروجی هر دو الکتریکی است. همچنین طبق رابطه‌ی $p_1(t) = p_2(t)$ در یک ترانسفورماتور ایده آل، توان ورودی برابر با توان خروجی است و ترانسفورماتور تولید توان نمی‌کند. وظیفه‌ی یک ترانسفورماتور افزایش سطح ولتاژ خروجی (به همراه کاهش سطح جریان) و یا کاهش سطح ولتاژ خروجی (به همراه افزایش سطح جریان) می‌باشد.

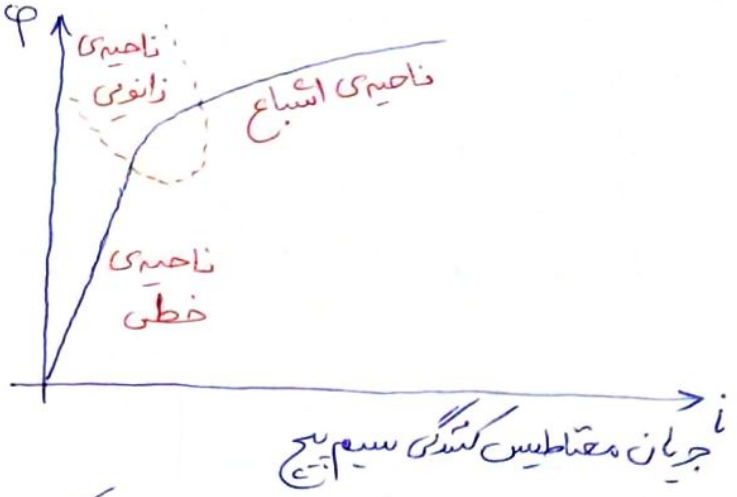
برای تبدیل سطوح ولتاژ و جریان در ترانسفورماتورها از میدان مغناطیسی به عنوان یک واسطه استفاده می‌شود.



2014 05 22

هسته‌ی مغناطیسی برای کوپل کردن مغناطیسی توسیم پیچ (هدایت شار مغناطیسی تولیدشده توسط یکی از سیم پیچ ها به داخل سیم پیچ دیگر) استفاده می‌شود

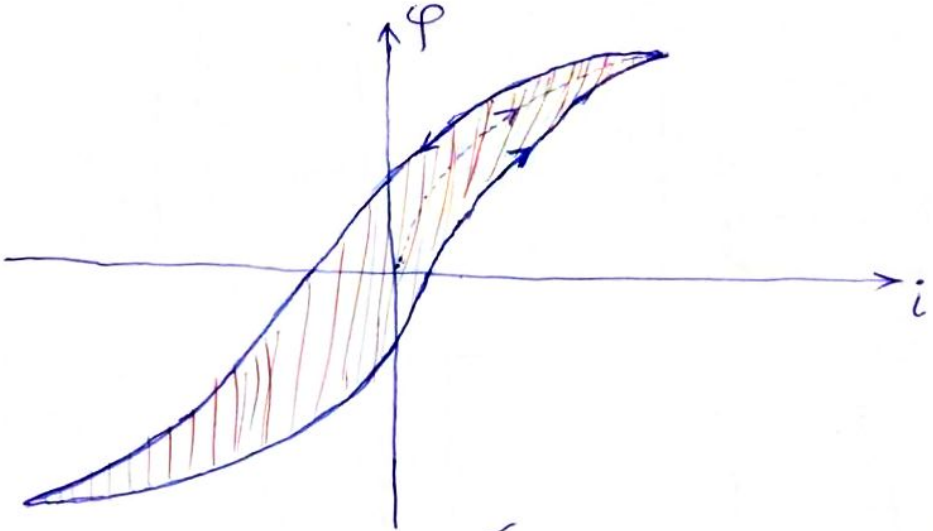
نمودار شار - جریان هسته‌ی مغناطیسی به‌صورت زیر است :



نقطه‌ی کار مغناطیسی هسته‌ی ترانسفورماتورها طوری تنظیم می‌شود که در ناحیه‌ی زانویی بیفتد اگر نقطه‌ی کار در ناحیه‌ی اشباع باشد اولاً موجب تولید هارمونیک های فرد مرتبه‌ی بالای مزاحم خواهد شد که تولید تلفات می‌کند و ثانیاً جریان مغناطیس کنندگی سیم پیچ ها به شدت دچار افزایش می‌شود که منجر به داغ شدن و ازبین رفتن سیم پیچ ها شده و افزایش تلفات اهمی را در پی دارد از طرفی کار کردن در ابتدای منطقه‌ی خطی هسته که دارای شار بسیار پایینی است موجب می‌شود که از قابلیت های هسته به طور کامل استفاده نکرده باشیم (عدم استفاده‌ی بهینه از سرمایه‌ی اقتصادی هسته)

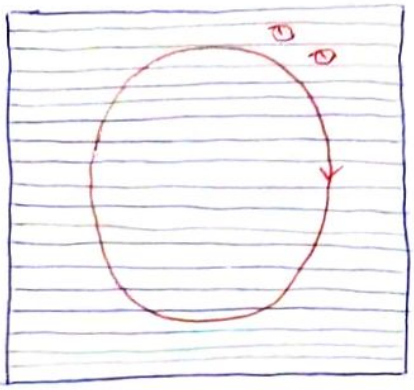
بهتر است از هسته‌ای استفاده شود که شیب ناحیه‌ی خطی آن زیاد باشد (μ_r بزرگ) زیرا در این صورت به ازای یک شار مورد نیاز مشخص جریان مغناطیس کنندگی کمتری از سیم پیچ رد خواهد شد.

هسته های مغناطیسی در حالت کار در AC دارای تلفات هیسترزیس و فوکو می‌باشند.



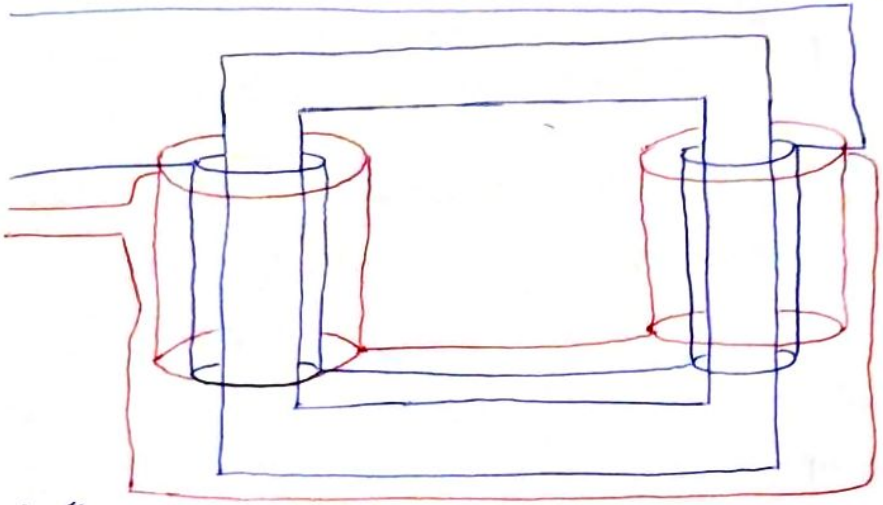
ورقه‌ای هسته به گونه‌ای ساخته می‌شوند که سطح حلقه‌ی هیسترزیس آن‌ها کوچک باشد یا تلفات هیسترزیس را کاهش دهند. ثانیاً هسته را به‌صورت ورقه ورقه می‌سازند تا با کاستن از طول جریان های گردابی داخل هسته، تلفات فوکو (تلفات جریان گردابی) را کاهش دهند.

2014 05 22

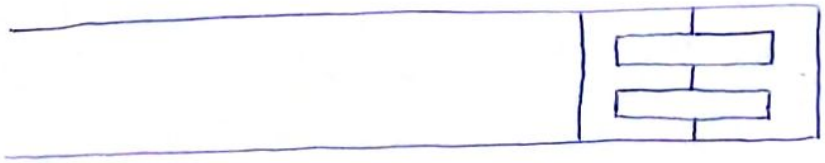


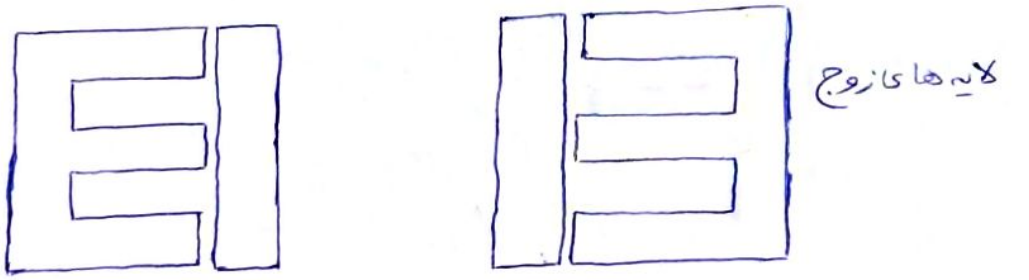
سطح مقطع هسته

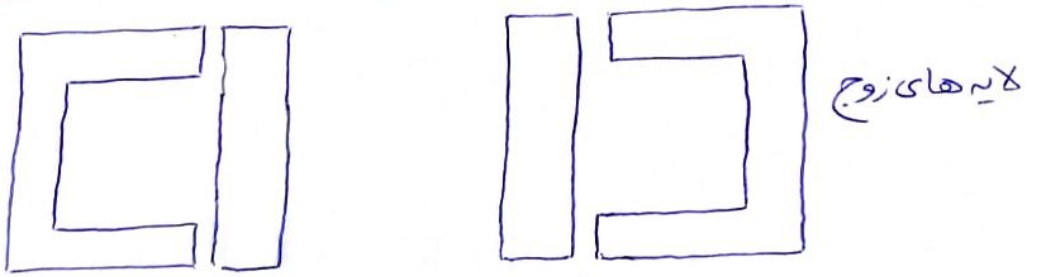
برای تزویج بیشتر و استفاده‌ی بهتر از فضای داخل ترانسفورماتور معمولاً سیم پیچ های اوّلیه و ثانویه را در داخل یکدیگر جاسازی می‌کنند.



ورق های هسته را به صورت رول می‌سازند این رول ها پس‌ته به ابعاد هسته بعداً برش زده می‌شود

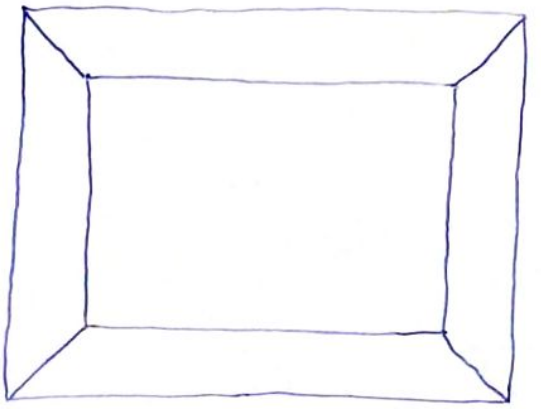




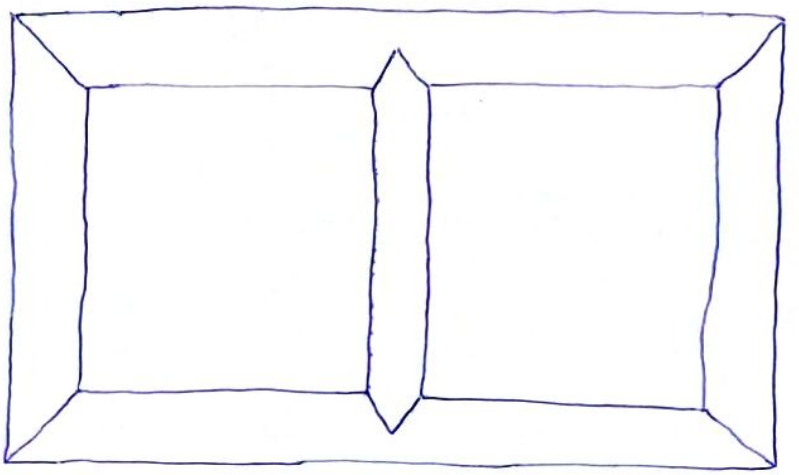


معمولاً شکل لایه های متوالی ورقهای هسته با یکدیگر متفاوت است این امر اولاً موجب استحکام مکانیکی هسته و ثانیاً با کاهش طول هوایی مؤثر هسته موجب کاهش جریان مغناطیس کنندگی سیم پیچ می‌شود شکل ورقهای هسته ترانسفورماتورهای قدرت معمولاً به صورت زیر است.

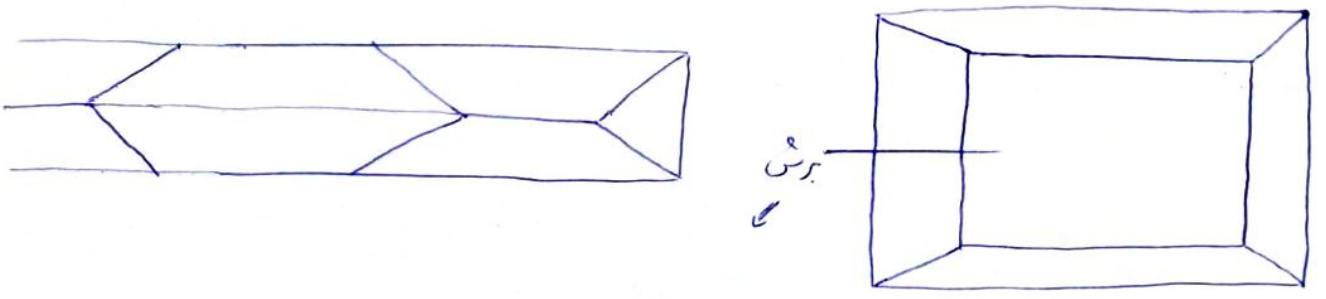
2014 05 22



یک نوع از هسته ترانسفورماتورهای تک فاز



یک نوع از هسته ترانسفورماتورهای سه فاز



سطح مقطع هسته ترانسفورماتورهای قدرت را به صورت دایره‌ای شکل می‌سازند تا اولاً توزیع میدان الکتریکی در اطراف هسته را یکنواخت‌تر کرده و از شدت آن بکاهند و ثانیاً استحکام مکانیکی شکل دایروی نسبت به شکل های دیگر در برابر نیروهای مکانیکی داخل ترانسفورماتور بیشتر است.

2014 05 22

ترانسفورماتور ایده آل:

برای شناخت کار یک ترانسفورماتور واقعی، ابتدا با ساده سازی آن مفاهیم اولیه را بررسی می‌کنیم تا سپس بعد از اضافه کردن پیچیدگی های یک ترانسفورماتور واقعی رفتار آن را به طور کامل تشریح نمائیم.

ترانسفورماتور ایده آل ترانسفورماتوری است که دارای شرایط زیر است:

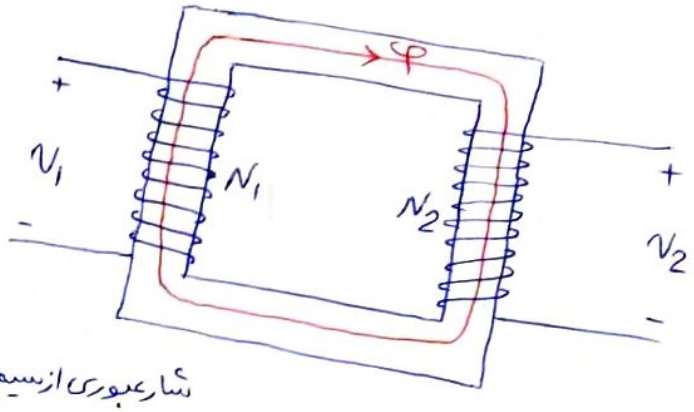
(۱) - از مقاومت الکتریکی سیم پیچ ها صرفنظر می شود

(۲) - فرض می شود هسته بدون تلفات (هیسترزیس و فوکو) است.

(۳) - فرض می کنیم μ_r هسته بی نهایت است. به عبارت دیگر فرض می شود که کل شار در هسته محدود شده است وهیچ شاری خارج از آن نداریم یعنی از شارهای نشتی که مسیر خود را از هوا می بندند صرفنظر می کنیم.

در یک ترانسفورماتور ایده آل با فرض عبور شار سینوسی زیر در هسته داریم:

$$\varphi = \varphi_m \sin \omega t$$



شار عبوری از سیم پیچ ثانویه φ_2 = شار عبوری از سیم پیچ اولیه φ_1

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$$

شار پیوندی سیم پیچ اولیه	$\lambda_1 = N_1 \varphi$	ولتاژ القایی در سیم پیچ اولیه	$V_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1 \frac{d\varphi}{dt}$
شار پیوندی سیم پیچ ثانویه	$\lambda_2 = N_2 \varphi$	ولتاژ القایی در سیم پیچ ثانویه	$V_2 = \frac{d\lambda_2}{dt} = N_2 \frac{d\varphi}{dt}$

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

نسبت تبدیل (نسبت دور) $a = \frac{N_1}{N_2}$ $\Longrightarrow V_1 = aV_2$

اگر $N_1 > N_2$ $(a>1) \Longrightarrow V_1 > V_2$ ترانسفورماتور کاهنده

اگر $N_1 < N_2$ $(a<1) \Longrightarrow V_1 < V_2$ ترانسفورماتور افزاینده

سیم پیچ اولیه (primary Winding) به سیم پیچی گفته می شود که به منبع تغذیه وصل است وسیم پیچ ثانویه (secondary Winding) به سیم پیچی گفته می شود که به بار وصل است.

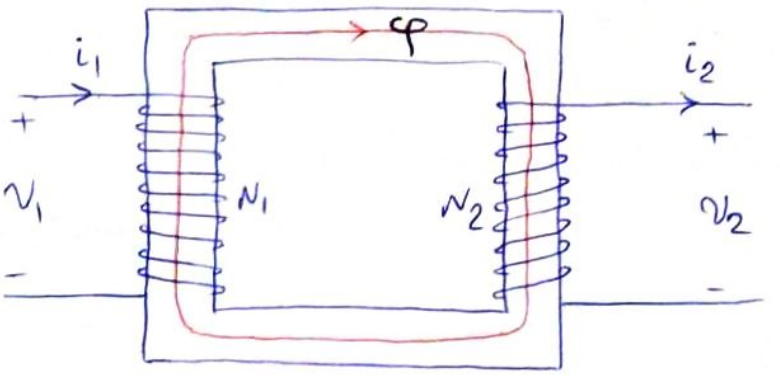
سیم پیچی که دارای دور بیشتری باشد، ولتاژ بیشتری نیز خواهد داشت. به این سیم پیچ، سیم پیچ فشار قوی (High Voltage (HV) Winding) گفته می شود. همچنین سیم پیچی که دارای دور کمتری باشد، ولتاژ کمتری نیز خواهد داشت که به آن سیم پیچ فشار ضعیف (Low voltage (LV) Winding)

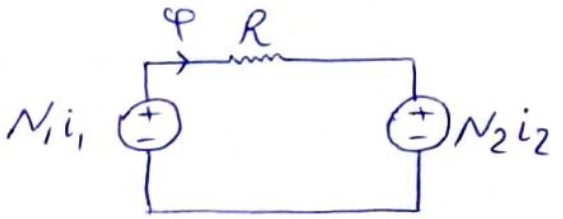
2014 05 22

گفته می‌شود

در ترانسفورماتور ایده‌آل همچنین داریم:

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = R\varphi$$





$\mu_r = \infty$ چون فرض شده $\Rightarrow R = 0$

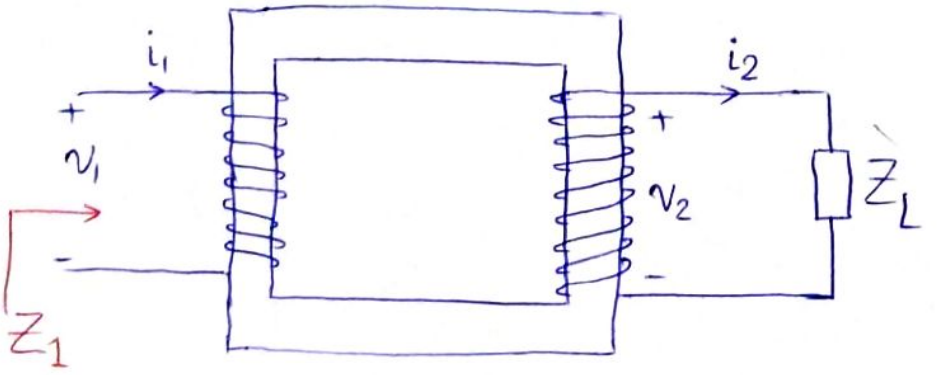
$$\Rightarrow N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0 \Rightarrow N_1 i_1 = N_2 i_2$$

به عبارت دیگر یعنی mmf تولیدی هر دو سیم پیچ برابر بوده و در جهت مخالف یکدیگر هستند.

$$\Rightarrow \frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow \frac{i_1}{i_2} = \frac{1}{a} \Rightarrow \begin{cases} P_1(t) = v_1 i_1 \\ P_2(t) = v_2 i_2 \end{cases} \Rightarrow P_1(t) = P_2(t)$$

یعنی ترانسفورماتور ایده‌آل نه توانی تولید می‌کند و نه توانی مصرف می‌کند.

نکته: تبدیل امپدانس توسط یک ترانسفورماتور به صورت زیر است:



$$v_2 = Z_L i_2$$

2014 05 22

امپدانس دیده شده از دو سر اولیه

$$Z_1 = \frac{v_1}{i_1} = \frac{a v_2}{\frac{1}{a} i_2} = a^2 \frac{v_2}{i_2} \Rightarrow Z_1 = a^2 Z_L = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_L$$

شناخت پلاریته‌ی سیم‌پیچ‌ها و بررسی اهمیت آن‌ها:

اگر جهت پلاریته‌ی سیم‌پیچ‌ها مشخص نباشد به این صورت عمل می‌کنیم ابتدا یک سر یک سیم‌پیچ را به طور اختیاری مثبت فرض می‌کنیم سپس یکی از سرهای سیم‌پیچ دیگر را نیز به طور دلخواه مثبت فرض می‌کنیم (سرها مثبت دو سیم‌پیچ با یکدیگر هم پلاریته هستند همچنین سرهای منفی نیز با یکدیگر هم پلاریته‌اند. حال از سر مثبت یک سیم‌پیچ جریان وارد سیم‌پیچ می‌کنیم و از سر مثبت سیم‌پیچ دیگر جریان خارج می‌کنیم. سپس جهت شار تولیدی هر دو سیم‌پیچ توسط این جریان‌ها را بدست می‌آوریم. اگر جهت این شارها در جهت تضعیف یکدیگر باشند، پلاریته‌های انتخابی صحیح می‌باشد ولی اگر شارها همدیگر را تقویت کنند، بایستی علامت پلاریته‌ی یکی از سیم‌پیچ‌ها را عوض نمود.

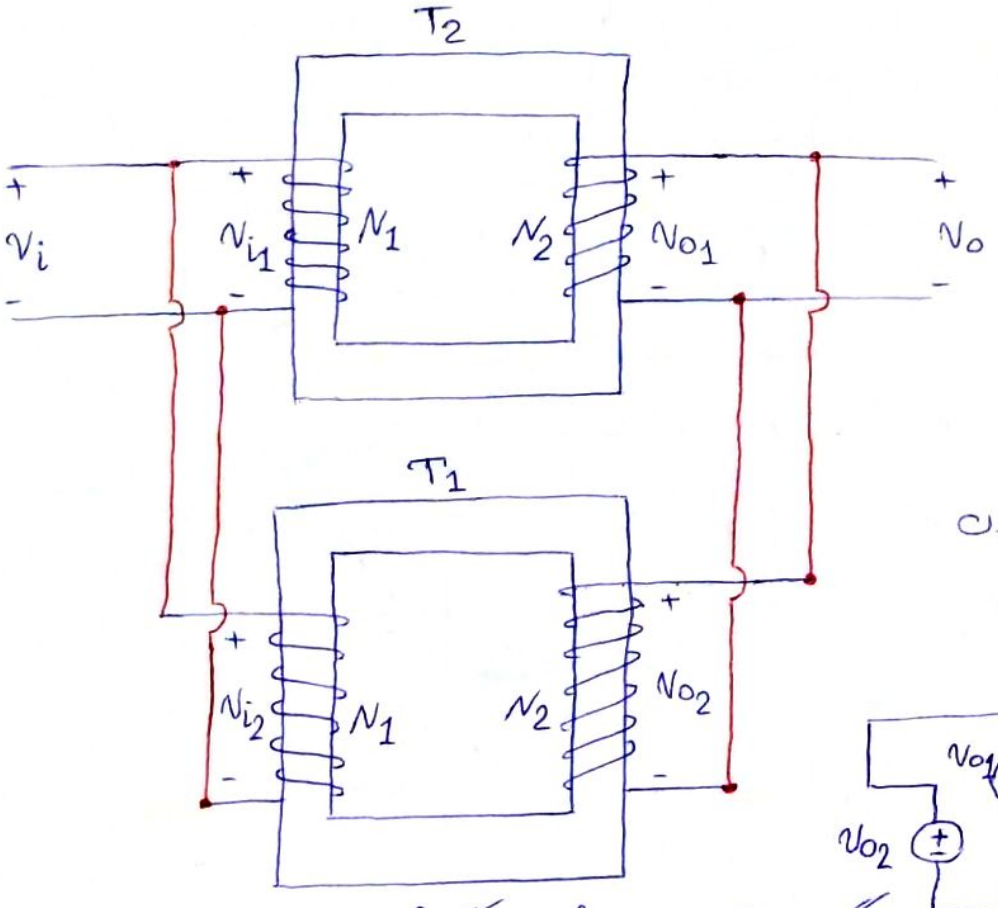
اهمیت شناخت پلاریته‌ها در موازی کردن ترانسفورماتورهاست.

گاهاً برای افزایش ظرفیت انتقال توان الکتریکی و همچنین بهبود قابلیت اطمینان انتقال این توان، ترانسفورماتورها را به صورت موازی می‌بندند. در موازی بستن ترانسفورماتورها بایستی دقت کرد که پلاریته‌های یکسان به هم وصل شوند در غیر این صورت جریان گردشی شدیدی بین آن‌ها جاری خواهد شد که منجر به داغ شدن سیم‌پیچ‌ها و آسیب دیدن ترانسفورماتور می‌گردد همچنین در موازی بستن دو ترانسفورماتور باید موارد زیر رعایت گردد:

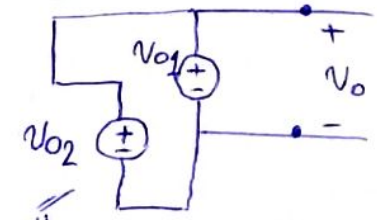
(۱) - ولتاژ نامی ترانسفورماتورها برابر باشد.

(۲) - نسبت تبدیل آن‌ها یکسان باشد.

(۳) - ترمینال‌های هم پلاریته به یکدیگر وصل شوند.

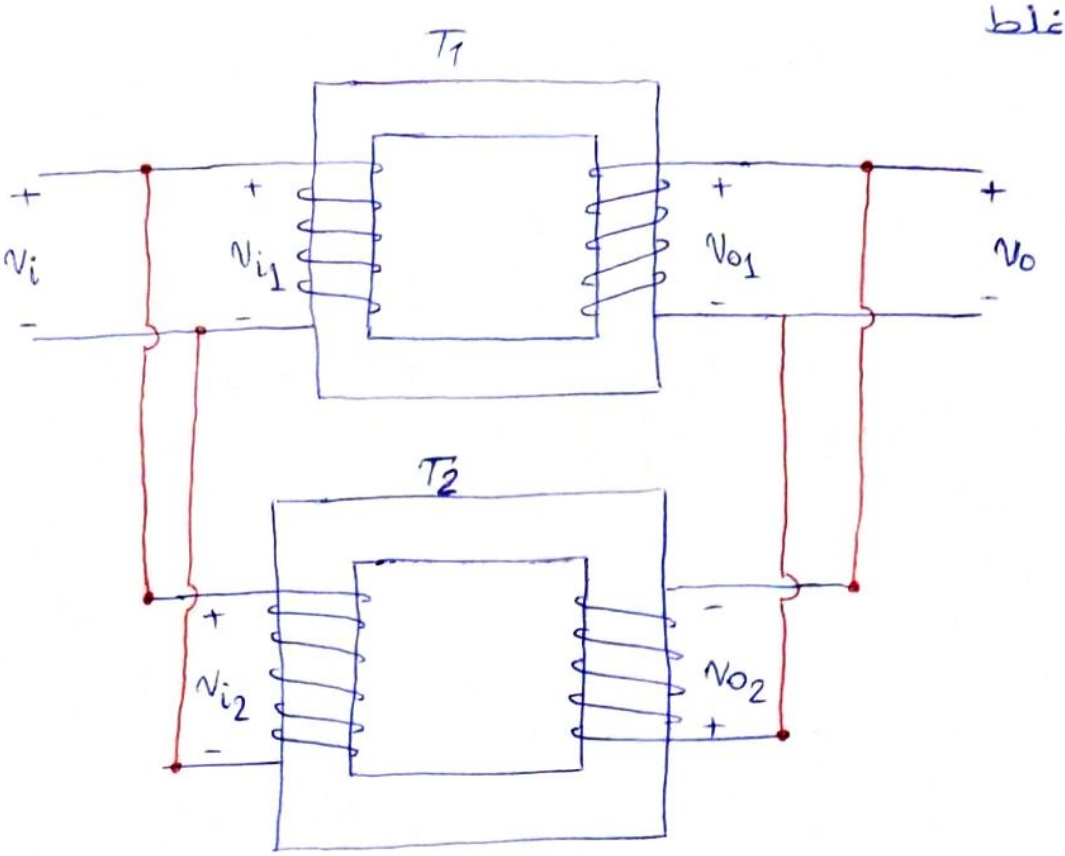


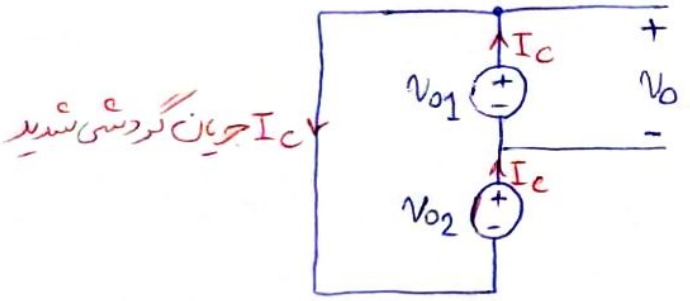
موازی کردن صحیح



اگر $V_{o1} = V_{o2}$ باشد جریان گردشی نداریم.

2014 05 22

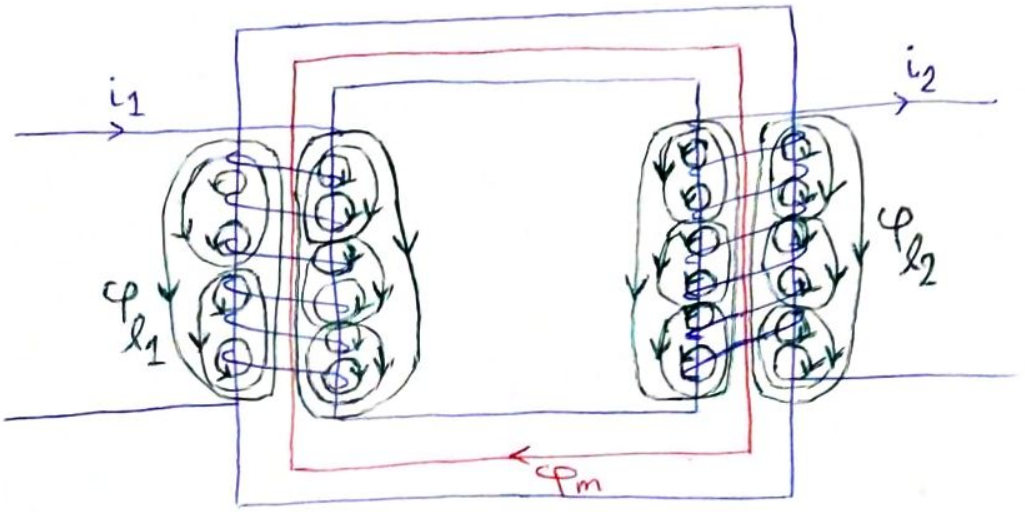




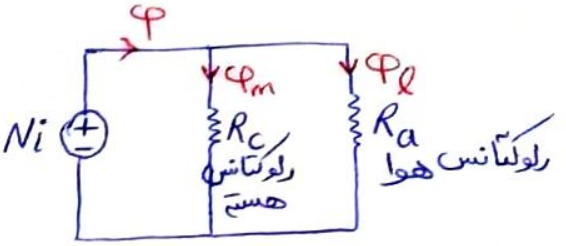
ترانسفورماتور واقعی :

باتوجه به مباحث قبلی مرحله به مرحله فرض های ساده سازی ترانسفورماتور ایده آل را حذف می کنیم تا به مدار معادل ترانسفورماتور واقعی برسیم باتوجه به آنکه μ_r هسته بی نهایت نیست مقداراندکی از شار سیم پیچ ها به جای این که مسیر خود را از طریق هسته ببندند مسیر خود را از طریق فاصله ی هوایی طی می کنند. قسمت اعظم شار مغناطیسی که از داخل هسته و هر سیم پیچ رد می شود را شار اصلی Φ_m (main flux) می نامند. این شار است که هر سیم پیچ را به یکدیگر از لحاظ مغناطیسی کوپل می کند. ولی بخشی از شارهای مغناطیسی تنها یک سیم پیچ را طور می زنند. به این شارها، شارهای نشتی Φ_l (Leakage flux) گفته می شود

2014 05 22



$$R_C = \frac{l_c}{\mu_0 \mu_r A_c}$$



شار پیوندی سیم پیچ ها عبارت است از :

شار پیوندی سیم پیچ اولیه $\lambda_P = \varphi_{P_1} + \varphi_{P_2} + \cdots + \varphi_{P_{NP}}$

شار پیوندی سیم پیچ ثانویه $\lambda_S = \varphi_{S_1} + \varphi_{S_2} + \cdots + \varphi_{S_{N_S}}$

φ_{P_j} : شار عبوری از سیم پیچ اولیه

φ_{S_j} : شار عبوری از سیم پیچ ثانویه

N_P : تعداد دور سیم پیچ اولیه

N_S : تعداد دور سیم پیچ ثانویه

ولتاژ القایی در سیم پیچ ها برابر است با :

$$\begin{cases} v_P = \dfrac{d\lambda_P}{dt} \\ v_S = \dfrac{d\lambda_S}{dt} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} v_P = \dfrac{d\varphi_{P_1}}{dt} + \cdots + \dfrac{d\varphi_{P_{NP}}}{dt} \\ v_S = \dfrac{d\varphi_{S_1}}{dt} + \cdots + \dfrac{d\varphi_{S_{N_S}}}{dt} \end{cases}$$

2014 05 22

شار متوسط اولیه $\bar{\varphi}_P = \varphi_m + \bar{\varphi}_{lP}$

شار متوسط ثانویه $\bar{\varphi}_S = \varphi_m + \bar{\varphi}_{lS}$ (۱۰)

و

شار نشتی متوسط اولیه $\bar{\varphi}_{lP} = \dfrac{\sum_{j=1}^{N_P} \varphi_{lP_j}}{N_P}$

شار نشتی متوسط ثانویه $\bar{\varphi}_{lS} = \dfrac{\sum_{j=1}^{N_S} \varphi_{lS_j}}{N_S}$

φ_{lpj} : شار نشتی عبوری از هر سیم‌پیچ اولیه

φ_{lsj} : شار نشتی عبوری از هر سیم‌پیچ ثانویه

$$\Rightarrow \begin{cases} \lambda_p = N_p \bar{\varphi}_p \\ \lambda_s = N_s \bar{\varphi}_s \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} v_p = N_p \dfrac{d\bar{\varphi}_p}{dt} = N_p \dfrac{d(\varphi_m + \bar{\varphi}_{lp})}{dt} \\ v_s = N_s \dfrac{d\bar{\varphi}_s}{dt} = N_s \dfrac{d(\varphi_m + \bar{\varphi}_{ls})}{dt} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} v_p = N_p \dfrac{d\varphi_m}{dt} + N_p \dfrac{d\bar{\varphi}_{lp}}{dt} \\ v_s = N_s \dfrac{d\varphi_m}{dt} + N_s \dfrac{d\bar{\varphi}_{ls}}{dt} \end{cases}$$

تعریف می‌کنیم:

$$\begin{cases} e_p = N_p \dfrac{d\varphi_m}{dt} \\ e_s = N_s \dfrac{d\varphi_m}{dt} \end{cases} \leftrightarrow \text{ولتاژهای القایی دراثر شار اصلی}$$

$$\begin{cases} e_{lp} = N_p \dfrac{d\bar{\varphi}_{lp}}{dt} \\ e_{ls} = N_s \dfrac{d\bar{\varphi}_{ls}}{dt} \end{cases} \leftrightarrow \text{ولتاژهای القایی دراثر شارهای نشتی}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} v_p = e_p + e_{lp} \\ v_s = e_s + e_{ls} \end{cases}$$

داریم:

$$\frac{e_p}{e_s} = \frac{N_p}{N_s} = a$$

$$, e_{lp} = N_p \frac{d\bar{\varphi}_{lp}}{dt} = N_p \frac{d\left(\frac{N_p i_p}{R_{lp}}\right)}{dt}$$

$$\Rightarrow e_{lp} = \frac{N_p^2}{R_{lp}} \frac{di_p}{dt}$$

R_{lp} : رلوکتانس متوسط فاصله‌ی هوایی دورهای سیم‌پیچ اولیه

R_{ls} : رلوکتانس متوسط فاصله‌ی هوایی دورهای سیم‌پیچ ثانویه

2014 05 22

به طور مشابه داریم:

$$e_{ls} = \frac{N_s^2}{R_{ls}} \frac{di_s}{dt}$$

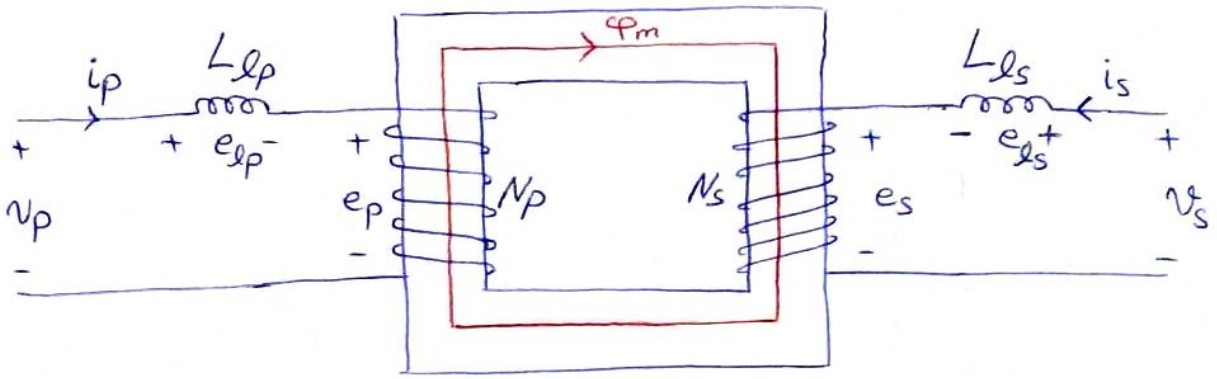
همچنین تعریف می‌کنیم :

اندوکتانس نشتی سیم پیچ اولیه $L_{lp} = \frac{N_p^2}{R_{lp}}$

اندوکتانس نشتی سیم پیچ ثانویه $L_{ls} = \frac{N_s^2}{R_{ls}}$

بنابراین اثر وجود شار نشتی در سیم پیچ ها را می‌توان به کمک یک ترانسفورماتور ایده آل به صورت زیر نمایش داد:

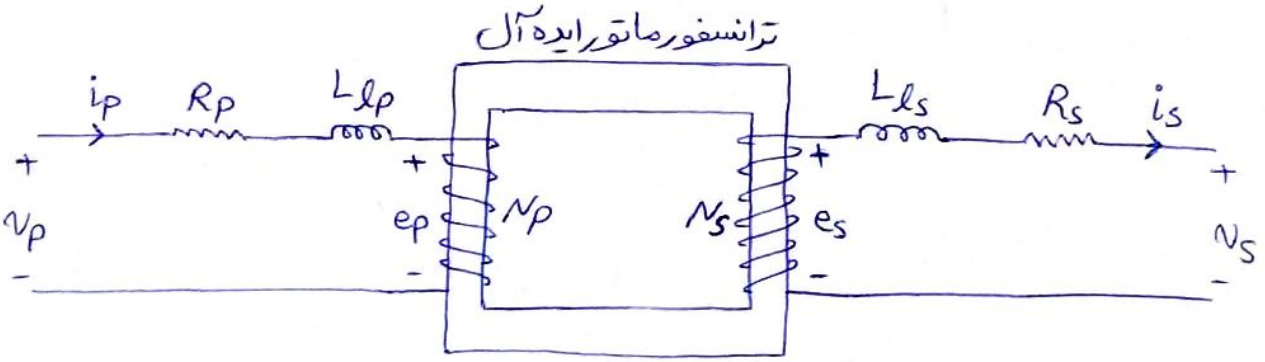
ترانسفورماتور ایده آل



$$\begin{cases} \frac{e_p}{e_s} = \frac{N_p}{N_s} \\ v_p = e_p + e_{lp} \\ v_s = e_s + e_{ls} \end{cases}$$

حال اثر وجود مقاومت سیم پیچ ها را در نظر می‌گیریم . از آنجا که طول رشته‌ی مسی به کار رفته در سیم پیچ زیاد است این سیم پیچ ها مقداری مقاومت اهمی از خود نشان می دهند. این مقاومت در کل سیم پیچ گسترده شده است با این وجود می‌توان در مدار معادل آن را با یک مقاومت متمرکز شده‌ی سری نشان داد در این صورت مدار معادل ترانسفورماتور واقعی به صورت زیر اصلاح می‌گردد

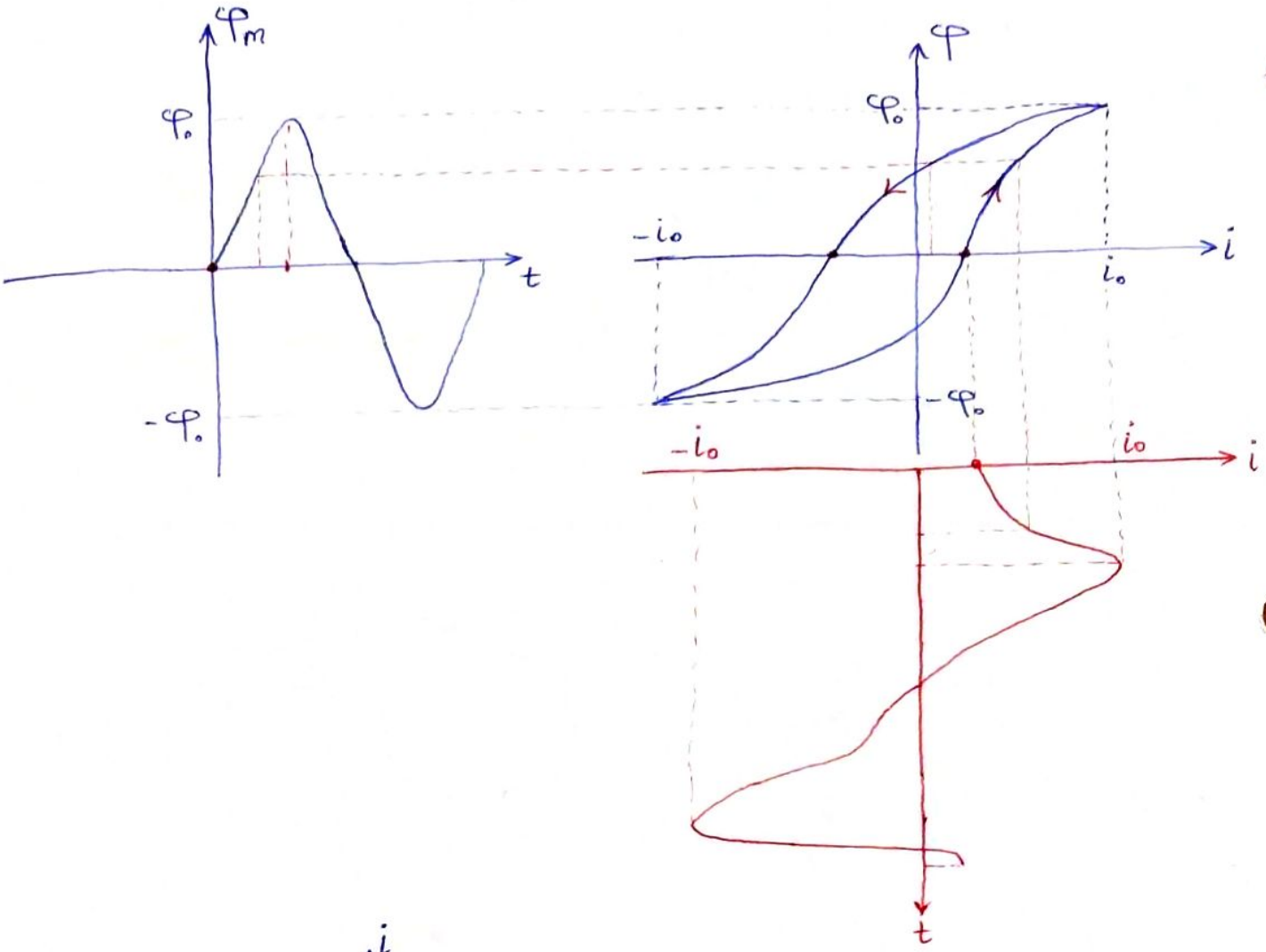
ترانسفورماتور ایده آل

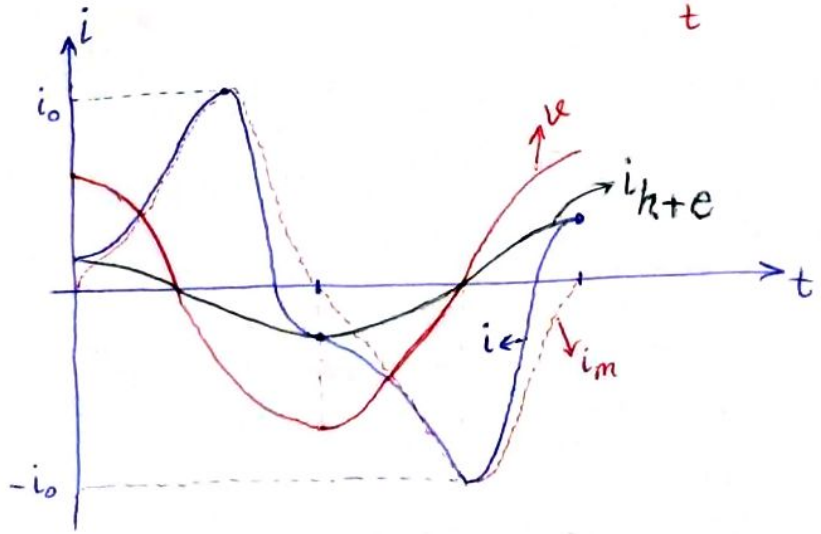


$$\overline{\varphi_s} = \varphi_m + \overline{\varphi_{ls}}$$

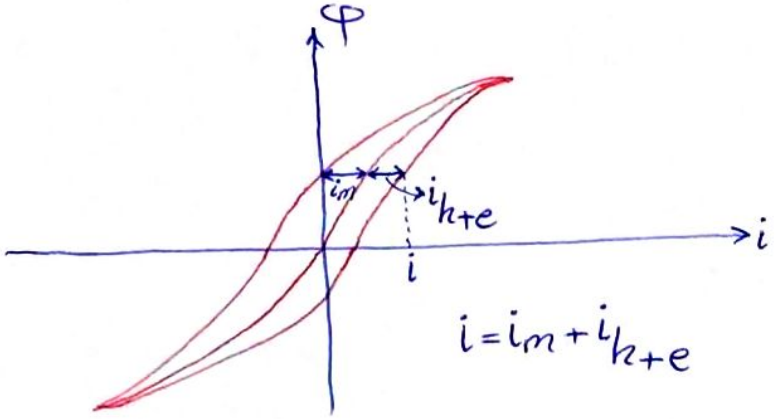
حال اثر وجود تلفات در هسته و وجود جریان مغناطیس کنندگی هسته (که ایجاد کننده شار اصلی φ_m است) در نظر می‌گیریم. اگر فرض کنیم که شار اصلی هسته به صورت $\varphi = \varphi_m \sin \omega t$ باشد، آن گاه با استفاده از مشخصه‌ی $i-\varphi$ هسته می‌توان جریان سیم پیچ را به دست آورد :

2014 05 22





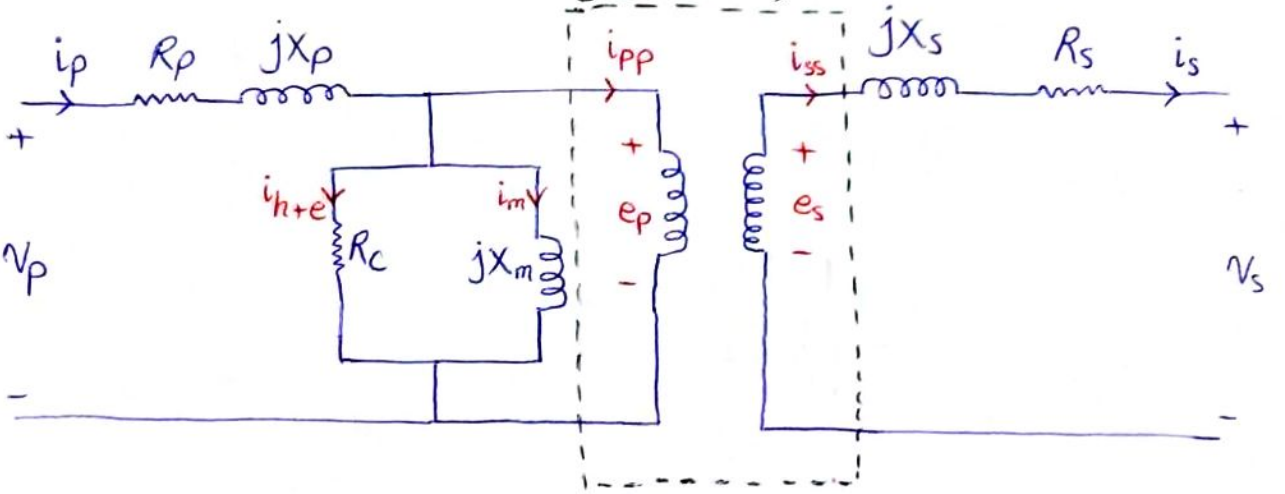
$$v = N\frac{d\varphi}{dt} = V_m \cos\omega t$$



2014 05 22

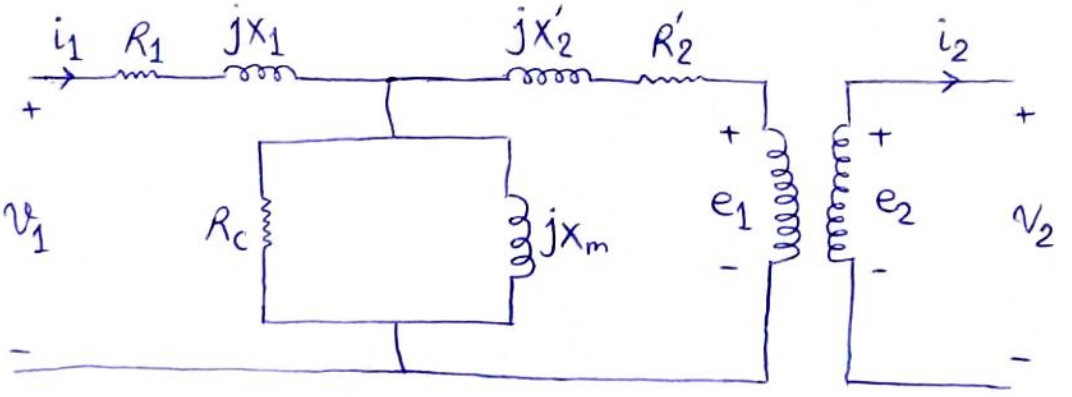
همانگونه که در شکل موج های جریان سیم پیچ مشاهده می شود ، می توان آن را به صورت مجموع دو جریان i_m و i_{h+e} نمایش داد . i_{h+e} بیانگر تلفات هسته است با دقت در شکل موج جریان i_{h+e} و ولتاژ سیم پیچ (۷) مشاهده می گردد که این دو با یکدیگر هم فاز هستند لذا این جریان می تواند با جریان یک مقاومت متصل به ولتاژ ۷ مدل گردد . همچنین ملاحظه شد که جریان i_m علاوه بر هارمونیک اصلی دارای هارمونیک های فرد مرتبه ی بالاتر نیز می باشد . هارمونیک های مرتبه ی فرد بالاتر به دلیل ورود هسته به ناحیه ی اشباع ایجاد شده اند با فرض آن که هسته زیاد وارد اشباع نشده باشد ، می توان فرض کرد که دامنه ی هارمونیک های مرتبه ی بالا نسبت به هارمونیک اصلی جریان i_m ناچیز بوده و قابل صرفنظر کردن هستند . هارمونیک اصلی جریان i_m سینوسی بوده و نسبت به ولتاژ سیم پیچ ۹۰ درجه پس فاز دارد . بنابراین می توان آنرا با جریان یک اندوکتانس مدل نمود به جریان i_m جریان مغناطیس کنندگی (magnetizing current) گفته می شود با در نظر گرفتن تلفات و جریان مغناطیس کنندگی هسته ، مدار معادل کلی ترانسفورماتور واقعی به صورت زیر خواهد شد :

ترانسفورماتور ایده آل



$$\frac{e_p}{e_s} = a \quad , \quad \frac{i_{pp}}{i_{ss}} = \frac{1}{a}$$

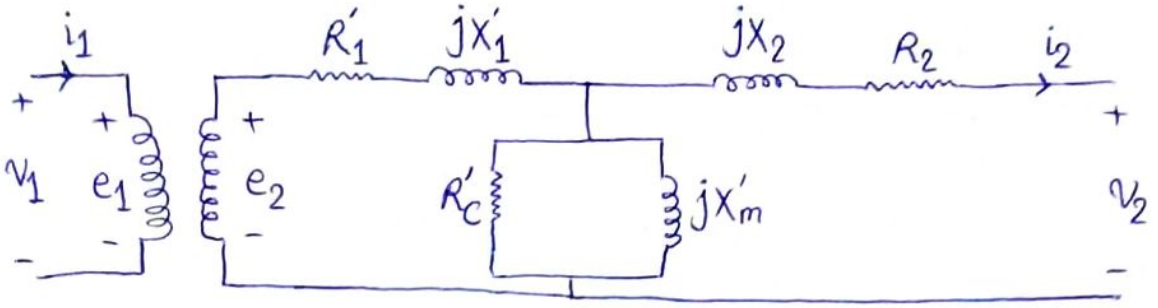
می توان امپدانس های ثانویه را به اولیه منتقل کرد و بالعکس .



$$X'_2 = a^2 X_2 \quad , \quad R'_2 = a^2 R_2 \quad , \quad \frac{e_1}{e_2} = a$$

مدار معادل انتقال یافته به اولیه ترانسفورماتور

2014 05 22

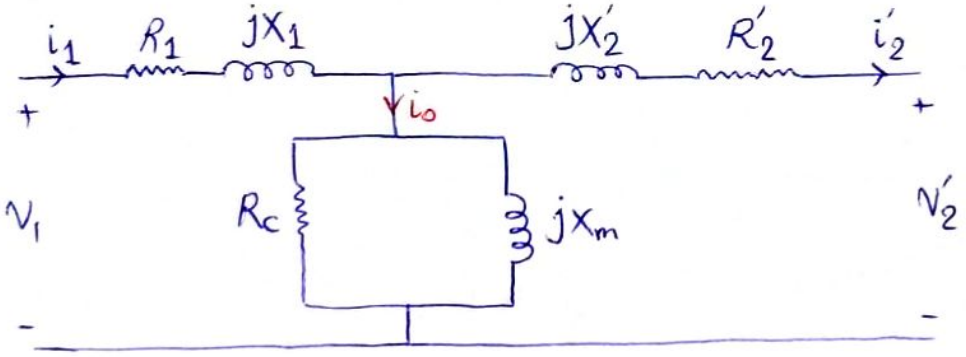


$$R'_1 = \frac{R_1}{a^2} \quad , \quad X'_1 = \frac{X_1}{a^2} \quad , \quad X'_m = \frac{X_m}{a^2} \quad , \quad R'_c = \frac{R_c}{a^2} \quad , \quad \frac{e_1}{e_2} = a$$

مدار معادل انتقال یافته به ثانویه ترانسفورماتور

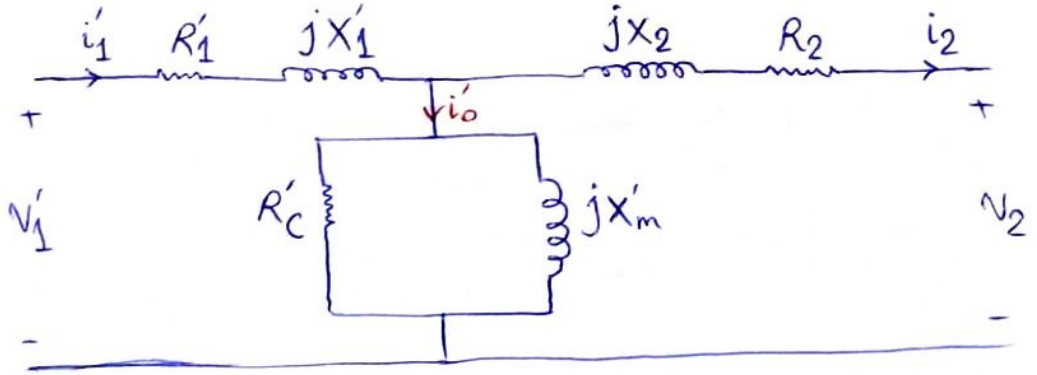
نکته: معمولاً مقادیر R_c و X_m بسیار بزرگتر از مقادیر R_1 ، R_2 ، X_1 ، X_2 هستند. به شاخه‌ی موازی R_c با X_m شاخه‌ی بی باری نیز گفته می‌شود زیرا حتی وقتی که جریان بار صفر باشد ($i_s = 0 \Leftarrow i_{pp} = 0$) نیز از این شاخه جریان کشیده می‌شود ولذا جریان بی باری در سمت اولیه برابر با جریان‌های این شاخه خواهد بود به جریان i_o ($i_o = i_{h+e} + i_m$) جریان بی باری گفته می‌شود مقدار جریان بی باری در مقایسه با جریان نامی بار ترانسفورماتور بسیار ناچیز است.

معمولاً برای ساده‌سازی، مدار معادل ترانسفورماتور را به صورت زیر نیز نمایش می‌دهند:



$$v'_2 = a v_2 \quad , \quad i'_2 = \frac{i_2}{a}$$

مدار معادل T ترانسفورماتور انتقال یافته به اولیه

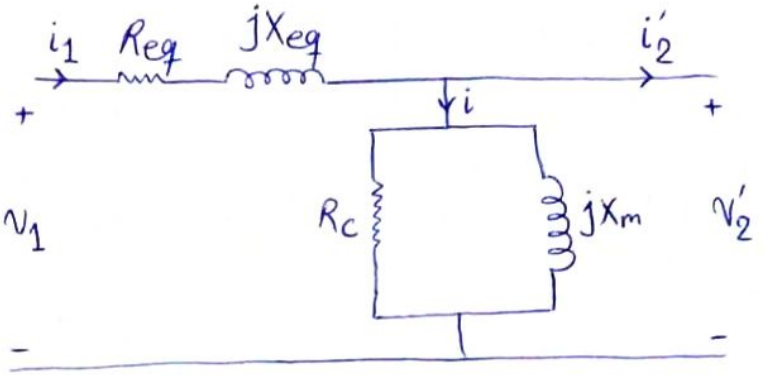


$$v'_1 = \frac{v_1}{a} \quad , \quad i'_1 = a i_1$$

مدار معادل T ترانسفورماتور انتقال یافته به ثانویه

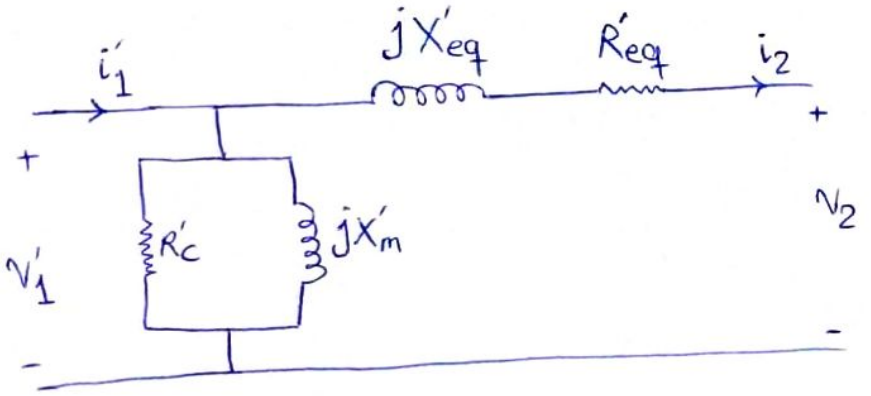
2014 05 22

باتوجه به آن که مقادیر R_c و X_m نسبت به R_1 ، R_2 ، X_1 ، X_2 بسیار بزرگ بوده و جریان i_0 نسبت به جریان i_1 و i_2 ناچیز است می‌توان با تقریب خوبی امپدانس سیم پیچ های اولیه یا ثانویه را به هر سمت شاخه‌ی بی‌بار منتقل نمود



$$R_{eq} = R_1 + a^2 R_2$$
$$X_{eq} = X_1 + a^2 X_2$$

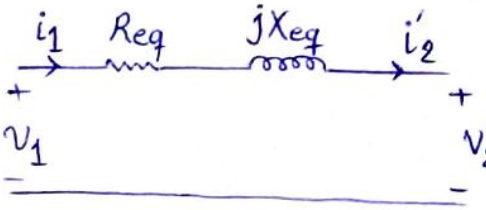
مدار معادل T ترانسفورماتور انتقال یافته به اولیه



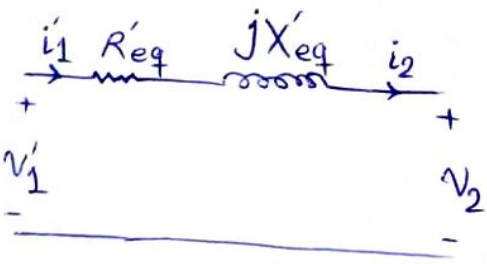
$$X'_{eq} = \frac{X_1}{a^2} + X_2$$
$$R'_{eq} = \frac{R_1}{a^2} + R_2$$

مدار معادل T ترانسفورماتور انتقال یافته به ثانویه

می‌توان با یک تقریب دیگر از شاخه‌ی موازی نیز صرفنظر کرد :



انتقال یافته به اولیه



انتقال یافته به ثانویه

2014 05 22

تخمین پارامترهای مدار معادل ترانسفورماتور :

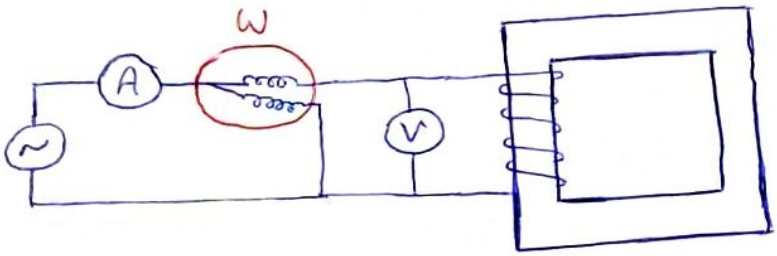
برای تعیین پارامترهای مدار معادل از یک سری آزمایش های عملی استفاده می‌شود که عبارتند از :

① آزمایش اتصال کوتاه ⟵ R_{eq} , X_{eq}

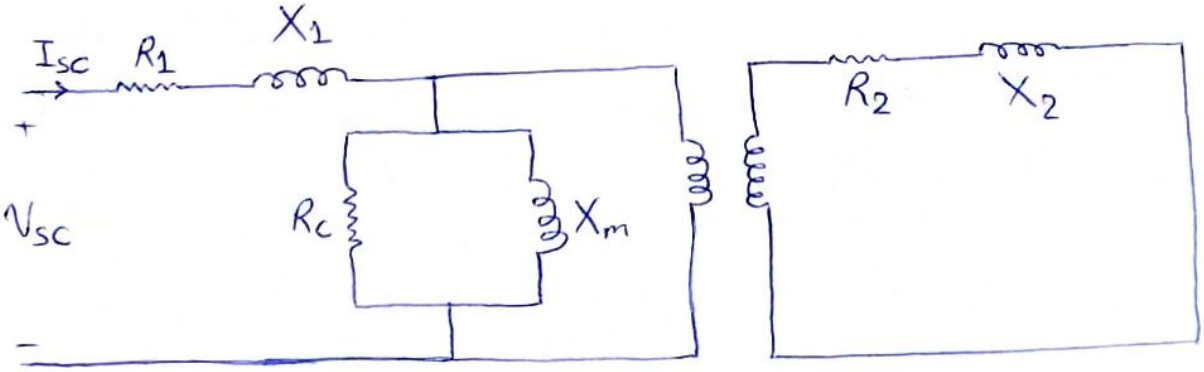
② آزمایش مدار باز ⟵ R_c , X_m

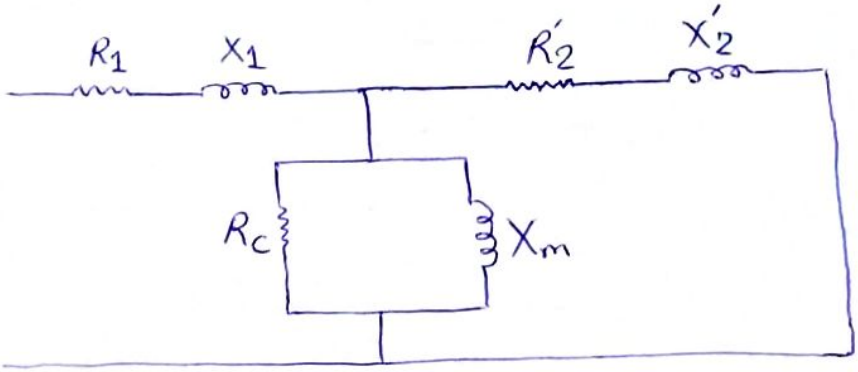
الف) آزمایش اتصال کوتاه (short circuit test)

در این آزمایش یک طرف ترانسفورماتور اتصال کوتاه شده و به طرف دیگر آن منبع تغذیه با ولتاژ V وصل می‌شود سطح ولتاژ این منبع از مقدار صفر تا حدی افزایش داده می‌شود که جریان ترانسفورماتور برابر با جریان نامی آن گردد سپس ولتاژ، جریان و توان را در طرف تغذیه قرائت می‌کنند. مقدار ولتاژ تغذیه در این تست خیلی پایین تر از ولتاژ نامی ترانسفورماتور است.

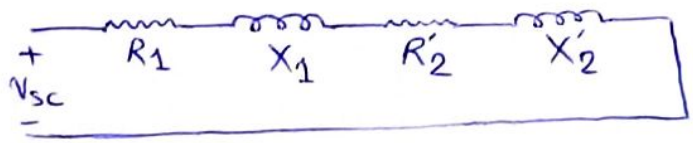


مدار معادل ترانسفورماتور را می‌توان به صورت زیر رسم نمود :





با توجه به آن که R_c و X_m از R'_2 و X'_2 خیلی بزرگتر هستند می‌توان از آن‌ها چشم پوشی کرد :



2014 05 22

حال به کمک مقادیر اندازه‌گیری شده V_{sc} و I_{sc} و R_{sc} داریم:

$$P_{sc} = R_{eq} I_{sc}^2 \Rightarrow \boxed{R_{eq} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2}}$$

$$|Z_{sc}| = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \Rightarrow |Z_{sc}| = \sqrt{X_{eq}^2 + R_{eq}^2} \Rightarrow X_{eq} = \sqrt{|Z_{sc}|^2 - R_{eq}^2}$$

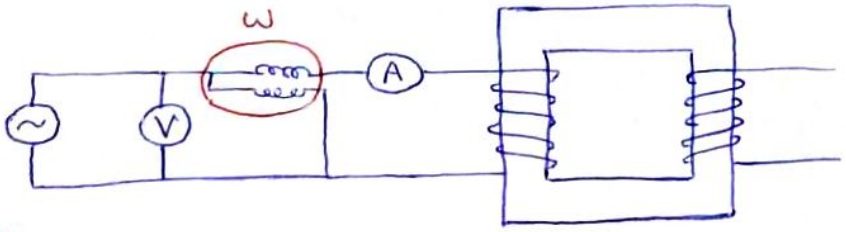
$$\boxed{X_{eq} = \sqrt{\left(\frac{V_{sc}}{I_{sc}}\right)^2 - \left(\frac{P_{sc}}{I_{sc}^2}\right)^2}}$$

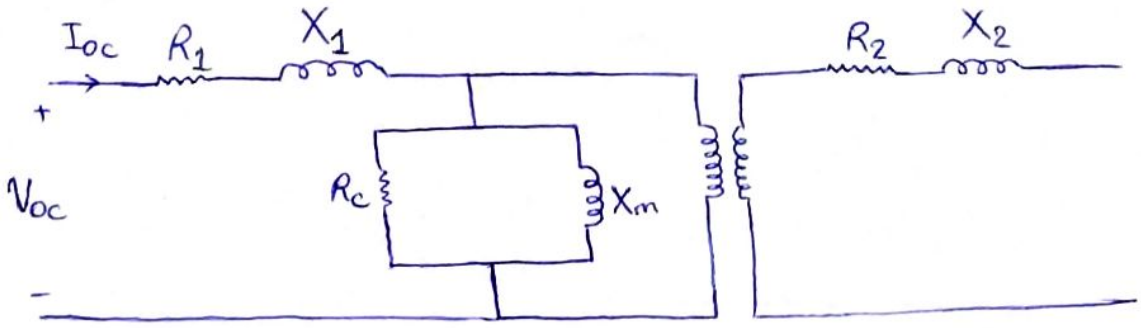
اگر اتصال کوتاه در ثانویه و منبع ولتاژ و اندازه‌گیری‌ها در اولیه باشد، R_{eq} و X_{eq} بدست آمده مقادیر انتقال یافته به اولیه هستند و اگر اتصال کوتاه در اولیه باشد و منبع ولتاژ و اندازه‌گیری‌ها در سمت ثانویه باشند آن‌گاه R_{eq} و X_{eq} محاسبه شده انتقال یافته به ثانویه هستند.

با توجه به کوچک بودن جریان نامی سیم پیچ فشار قوی نسبت به سیم پیچ فشار ضعیف معمولاً در آزمایشگاه‌ها طرف LV را اتصال کوتاه کرده و به سمت HV ولتاژ وصل می‌شود. در این صورت از منبع ولتاژ تغذیه (ژنراتور) جریان کوچکتری رد می‌شود در این صورت با یک ژنراتور کم توان و کم‌هزینه می‌توان تست اتصال کوتاه را انجام داد.

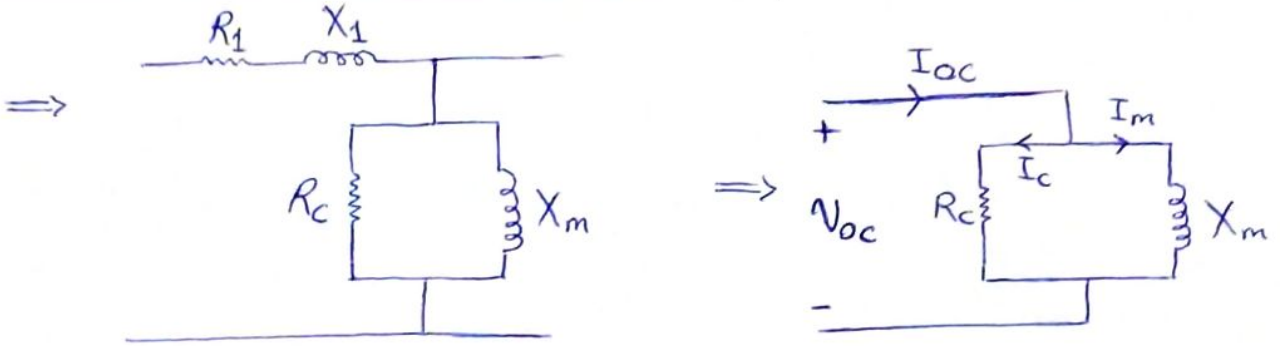
ب) تست مدار باز (open circuit test):

در این تست یکی از سیم پیچ‌های ترانسفورماتور اتصال باز قرار داده شده و به سیم پیچ دیگر ولتاژ نامی اعمال می‌شود.





2014 05 22



$$I_{oc}\angle\theta = I_c - jI_m$$

$$P_{oc} = \frac{V_{oc}^2}{R_c} \Rightarrow \boxed{R_c = \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}}}$$

$$I_{oc} = \sqrt{I_c^2 + I_m^2} \Rightarrow I_m = \sqrt{I_{oc}^2 - I_c^2}$$

$$|I_m| = \frac{V_{oc}}{X_m} \Rightarrow \frac{V_{oc}}{X_m} = \sqrt{I_{oc}^2 - \left(\frac{V_{oc}}{R_c}\right)^2}$$

$$\boxed{X_m = \frac{V_{oc}}{\sqrt{I_{oc}^2 - \left(\frac{V_{oc}}{R_c}\right)^2}} = \frac{V_{oc}}{\sqrt{I_{oc}^2 - \left(\frac{P_{oc}}{V_{oc}}\right)^2}}}$$

باتوجه به آنکه ترانزاتور تست در آزمایش اتصال باز بایستی ولتاژ نامی را تهیه کند معمولاً این تست از سمت LV انجام شده و سمت HV به صورت باز قرار داده می شود به طور کلی آزمایش از هر طرفی که انجام شده باشد مقادیر R_c و X_m بدست آمده منتقل شدن به آن طرف هستند.

در تست مدار باز، جریان کشیده شده توسط ترانسفورماتور بسیار پایین تر از جریان نامی است.

نکته: در تست مدار باز R_c و X_m هستند و در تست اتصال کوتاه R_{eq} و X_{eq} سیم پیچ ها تعیین می شوند.

(از آنجا که R_c و X_m وابسته به شار هستند و دوست داریم این مقادیر تحت شرایط نامی تعیین گردند، در تست مدار باز ولتاژ نامی به سیم پیچ اعمال می شود تا هسته تحت شار نامی کار کند. از طرفی تلفات سیم پیچ نیز وابسته به جریان آن است. برای آن که تلفات سیم پیچ در شرایط نامی بدست آید در تست اتصال کوتاه بایستی جریان نامی از آن ها عبور داده شود

نکته: اگر در هسته شار $\varphi = \varphi_m \sin \omega t$ وجود داشته باشیم داریم:

$$\begin{cases} v_1 = N_1 \frac{d\varphi_1}{dt} = N_1 \varphi_m \omega \cos \omega t \\ v_2 = N_2 \frac{d\varphi_2}{dt} = N_2 \varphi_m \omega \cos \omega t \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} v_1 = V_{m_1} \cos \omega t, V_{m_1} = N_1 \varphi_m \omega, V_{rms_1} = \frac{N_1 \varphi_m \omega}{\sqrt{2}} \\ v_2 = V_{m_2} \cos \omega t, V_{m_2} = N_2 \varphi_m \omega, V_{rms_2} = \frac{N_2 \varphi_m \omega}{\sqrt{2}} \end{cases}$$

2014 05 22

$$V_{rms} = \frac{N\Phi_m w}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N \Phi_m}{\sqrt{2}} \Rightarrow \boxed{V_{rms} = 4.44 N \Phi_m f}$$

مثال: نتایج تست یک ترانسفورماتور تک فاز $2400^V/240^V$ ، 50Hz ، 20kVA به صورت زیر است

تست مدار باز: 126.6 w, 1.066 A, 240 V

تست اتصال کوتاه: 284 w, 8.34 A, 57.7 V

$$V_{n1} = 2400 \;,\; I_{n1} = \frac{20\times10^3}{2400} = 8.33A$$

$$V_{n2} = 240 \;,\; I_{n2} = \frac{20\times10^3}{240} = 83.3A$$

با توجه به آنکه در تست oc ولتاژ برابر با ولتاژ نامی LV است این تست از سمت LV انجام شده است:

$$R_c = \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}} = \frac{240^2}{126.6} = 454.98\,\Omega$$

$$X_m = \frac{V_{oc}}{\sqrt{I_{oc}^2 - \left(\frac{P_{oc}}{V_{oc}}\right)^2}} = \frac{240}{\sqrt{1.066^2 - \left(\frac{126.6}{240}\right)^2}} = 259.1\,\Omega$$

با توجه به آنکه جریان در تست اتصال کوتاه برابر با جریان نامی HV است، این تست در سمت HV انجام شده است.

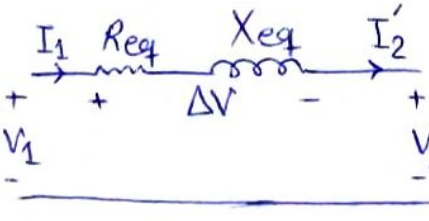
$$R_{eq} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = \frac{284}{8.34^2} = 4.1\,\Omega$$

$$X_{eq} = \sqrt{\left(\frac{V_{sc}}{I_{sc}}\right)^2 - R_{eq}^2} = 5.57\,\Omega$$

R_{eq} و X_{eq} انتقال یافته به HV هستند و همچنین R_c و X_m محاسبه شده انتقال یافته به LV هستند.

تنظیم ولتاژ ترانسفورماتور: (Voltage Regulation)

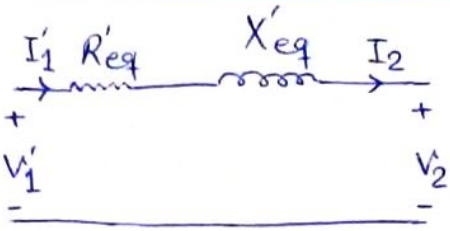
به دلیل وجود امپدانس سری سیم پیچ اگر از ترانسفورماتور جریان بار کشیده شود، ولتاژ در سمت خروجی آن متفاوت از حالت بی باری خواهد بود.



$$\Rightarrow V_2' = V_1 - (R_{eq} + jX_{eq})I_2'$$

انتقال یافته به اولیه

2014 05 22



$$\Rightarrow V_2 = V_1' - (R_{eq}' + jX_{eq}')I_2$$

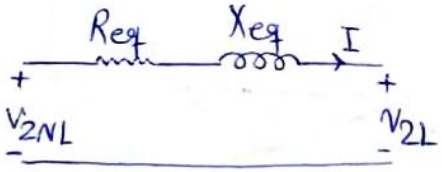
درحالت کلی داریم:

$$V_{2L} = V_{2NL} - (R_{eq} + jX_{eq})I$$

V_{2L} : ولتاژ بار

V_{2NL} : ولتاژ بی باری

اگر جریان صفر باشد داریم : $V_{2L} = V_{2NL}$



تنظیم ولتاژ به صورت زیر تعریف می‌شود:

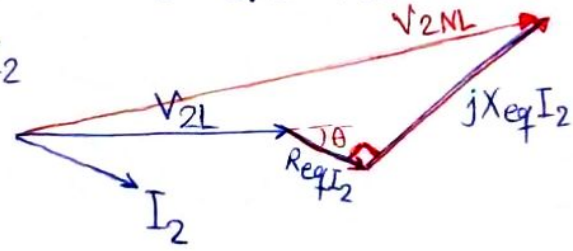
$$VR\% = \frac{|V_{2NL}| - |V_{2L}|}{|V_{2L}|} \times 100$$

ازآنجا که بایستی ولتاژ دوسر بار برابر با ولتاژ نامی باشد معمولاً در مسائل فرض می‌شود که V_{2L} برابر با ولتاژ نامی است و به کمک آن جریان و ولتاژ V_{2NL} را تعیین می‌کند.

به صورت کلی سه حالت زیر برای محاسبه‌ی $VR\%$ وجود دارد:

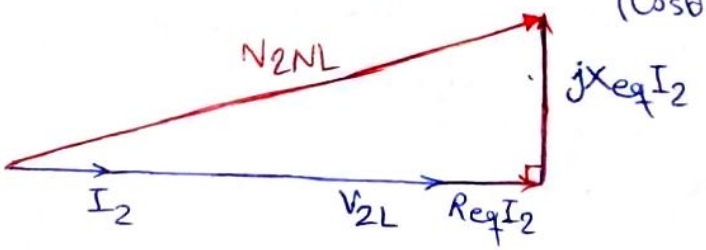
الف) بار پس فاز باشد

$$V_{2NL} = V_{2L} + (R_{eq} + jX_{eq})I_2$$



$$|V_{2NL}| > |V_{2L}| \Rightarrow VR\% > 0$$

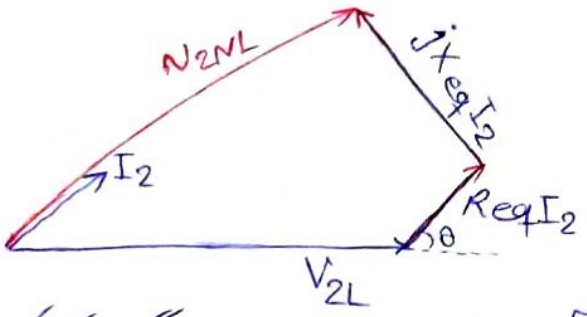
ب) بار اهمی باشد $(\cos\theta = 1)$



$$|V_{2NL}| > |V_{2L}| \Rightarrow VR\% > 0$$

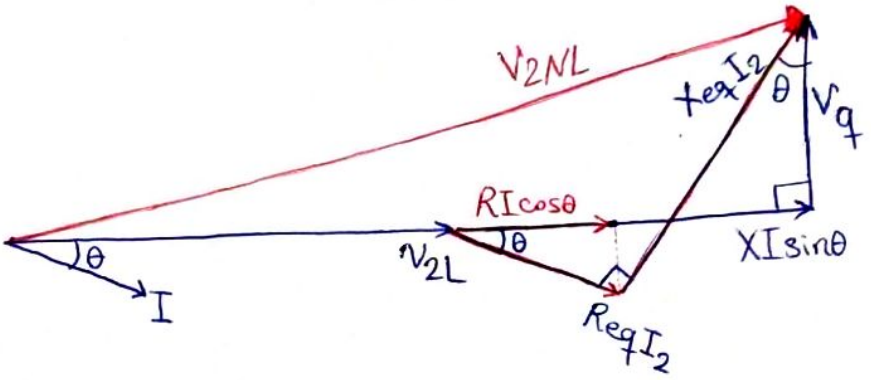
ج) بار خازنی باشد :

2014 05 22



در این حالت بسته به اندازه‌ی جریان و زاویه‌ی آن، اندازه‌ی V_{2NL} می‌تواند بزرگتر، کوچکتر و یا مساوی اندازه‌ی V_{2L} گردد. در نتیجه در بار خازنی هر سه حالت $VR\% > 0$ ، $VR\% < 0$ و $VR\% = 0$ قابل حصول می باشد.

تعیین رابطه‌ی تقریبی برای $VR\%$



$$\theta = \angle V - \angle I$$

$\theta > 0$ برای بارهای پس فاز

$\theta < 0$ برای بارهای پیش فاز

$$|V_{2NL}|^2 = |(V_{2L} + R_{eq}I\cos\theta + X_{eq}I\sin\theta)|^2 + |V_q|^2$$

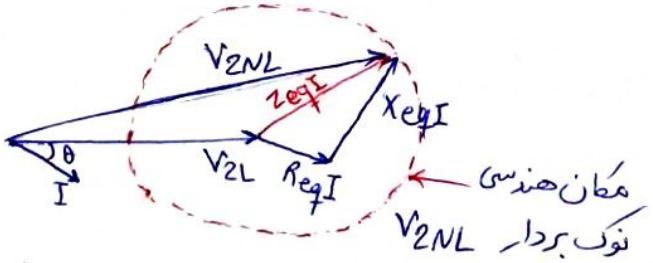
از آنجا که معمولاً V_q دارای مقدار کوچکی است می توان از آن صرفنظر کرد

$$|V_{2NL}| \simeq |V_{2L}| + R_{eq}I\cos\theta + X_{eq}I\sin\theta$$

$$\Rightarrow |V_{2NL}| - |V_{2L}| \simeq R_{eq}I\cos\theta + X_{eq}I\sin\theta$$

$$\Rightarrow \boxed{VR\% = \frac{R_{eq}I\cos\theta + X_{eq}I\sin\theta}{|V_{2L}|} \times 100\%}$$

اگر فرض کنیم مقدار جریان I ثابت باشد، برای مقادیر مختلف θ ، $VR\%$ های مختلف حاصل خواهد شد.

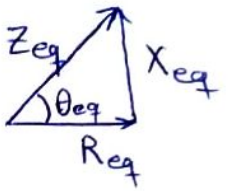


2014 05 22

که در آن مقدار ماکزیمم VR% روی می‌دهد به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\frac{d(VR\%)}{d\theta} = 0 \Rightarrow -R_{eq} I \sin\theta_{max} + X_{eq} I \cos\theta_{max} = 0$$

$$\frac{\sin\theta_{max}}{\cos\theta_{max}} = \frac{X_{eq}}{R_{eq}}$$



$$\tan\theta_{max} = \tan\theta_{eq} \Rightarrow \boxed{\theta_{max} = \theta_{eq}}$$

$\cos\theta_{max} = \frac{R_{eq}}{|Z_{eq}|}$ و $\theta_{max} > 0$ پس فاز

یعنی VR% وقتی ماکزیمم می‌شود که ضریب توان بار برابر با ضریب توان امپدانس سری ترانسفورماتور گردد

زاویه‌ای که در آن VR% برابر صفر می‌گردد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$VR\% = 0 \Rightarrow R_{eq} I \cos\theta_0 + X_{eq} I \sin\theta_0 = 0$$

$$\Rightarrow \frac{\sin\theta_0}{\cos\theta_0} = \frac{-R_{eq}}{X_{eq}} \Rightarrow \tan\theta_0 = -\frac{R_{eq}}{X_{eq}} \Rightarrow \cos\theta_0 = \frac{X_{eq}}{|Z_{eq}|}$$

$\theta_0 < 0$ پس فاز

- راندمان (Efficiency)

راندمان ترانسفورماتور به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

$$\begin{cases} P_{out} = V_2 I_2 \cos\theta \\ P_{in} = P_{out} + P_{Loss} = V_2 I_2 \cos\theta + P_c + P_{cu} \end{cases}$$

P_c: تلفات آهنی — P_{cu}: تلفات مسی

P_c تلفات هسته‌ی ترانسفورماتور است که به آن تلفات آهنی نیز گفته می‌شود از آنجا که تلفات هسته وابسته به شار موجود در آن می‌باشد و از طرفی شار نیز وابسته به ولتاژ است ($V = 4.44 N \Phi_m f$) تلفات هسته وابسته به ولتاژ اعمالی به ترانسفورماتور خواهد بود از آنجا که معمولاً ولتاژ اعمالی به ترانسفورماتور تقریباً ثابت است. می‌توان تلفات هسته را نیز ثابت فرض کرد. از این رو به تلفات هسته، تلفات ثابت ترانسفورماتور گفته می‌شود (تلفات ایجاد شده در مقاومت R_c در مدار معادل)

با عبور جریان از سیم پیچ‌ها، تلفات دیگری در آن‌ها ایجاد خواهد شد که به آن تلفات اهمی سیم پیچ یا تلفات مسی گفته می‌شود

$$P_{cu} = R_{eq} I_2^2$$

$$\Rightarrow \boxed{\eta = \frac{V_2 I_2 \cos\theta}{V_2 I_2 \cos\theta + P_c + R_{eq} I_2^2} \times 100}$$

2014 05 22

نکته :

$$\eta = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}}$$

با فرض ثابت بودن ولتاژ اعمالی به بار (V_2) دامنه‌ی جریان و ضریب توان آن توسط بار تعیین می‌شود که هرکدوم آنها بر راندمان ترانسفورماتور مؤثر است. برای تعیین نحوه‌ی تأثیر آن‌ها بر مقدار ماکزیمم راندمان دو حالت زیر را در نظر می‌گیریم :

الف) دامنه‌ی جریان ثابت باشد $|I_2| = cte$

$$\frac{d\eta}{d\theta} = 0 \Longrightarrow -V_2 I_2 \sin\theta \left(V_2 I_2 \cos\theta + P_c + R_{eq} I_2^2 \right) + V_2 I_2 \sin\theta \times V_2 I_2 \cos\theta = 0$$

$$\Longrightarrow \sin\theta = 0 \Longrightarrow \theta = 0 \Longrightarrow \boxed{\cos\theta = 1}$$

به عبارت دیگر راندمان در بارهایی با ضریب توان یک ماکزیمم می‌شود

ب) ضریب توان ثابت باشد $\cos\theta = cte$

$$\frac{d\eta}{dI_2} = 0 \Longrightarrow V_2 \cos\theta \left[V_2 I_2 \cos\theta + P_c + R_{eq} I_2^2 \right] - \left(V_2 \cos\theta + 2 R_{eq} I_2 \right) V_2 I_2 \cos\theta = 0$$

$$P_c - R_{eq} I_2^2 = 0 \Longrightarrow R_{eq} I_2^2 = P_c \;\; \text{یا} \;\; P_{cu} = P_c$$

یعنی راندمان در جریانی از بار ماکزیمم می‌شود که تلفات اهمی سیم پیچ برابر با تلفات ثابت هسته گردد.

در حالت کلی راندمان ماکزیمم در باری روی می‌دهد که ضریب توان آن یک بوده و در آن بار تلفات مسی و آهنی ترانسفورماتور باهم برابر شوند.

مثال : یک ترانسفورماتور 25kVA ، 2000/200V دارای تلفات آهنی 350w و تلفات مسی بارکامل 400w می‌باشد الف) راندمان ماکزیمم را بدست آورید؟ ب) بازده را در ضریب توان 0.9 یک حالت در بارکامل و در یک حالت در نصف بارکامل محاسبه کنید؟

پاسخ الف)

$\cos\theta = 1$

$$VR\% = \frac{S_2 \cos\theta}{S_2 \cos\theta + P_c + P_{cu}}$$

$$S_{2n} = 25kVA$$

$$I_{2n} = I_{2fL} = \frac{25 \times 10^3}{200} = 125A$$

$$P_{cu} = P_c = 350w$$

$$P_{cu} \propto I_2^2 \Longrightarrow \frac{P_{cu}}{P_{cufl}} = \frac{I_2^2}{I_{2fl}^2} = \frac{350}{400}$$

2014 05 22

$$n = \left(\frac{I_2}{I_{2fl}}\right) = 0.935$$

$$S_2 = V_2 I_2 \,,\; S_2 \propto I_2$$

$$\frac{S_2}{S_{2n}} = \frac{I_2}{I_{2fl}} = n = 0.935$$

$$\Rightarrow \boxed{\eta = \frac{S_{2fl}\cos\theta \times n}{n S_{2fl}\cos\theta + P_c + n^2 P_{cufl}}}$$

درصد بار $n = \dfrac{S_2}{S_{2n}} = \dfrac{I_2}{I_{2n}}$

$$\eta = \frac{n S_{fl}\cos\theta}{n S_{fl}\cos\theta + P_c + n^2 P_{cufl}}$$

$$\eta_{max} = \frac{0.935 \times 25\times10^3 \times 1}{0.935\times25\times10^3 + 350 + 0.935^2 \times 400} =$$

ب)

بارکامل $\Rightarrow n = 1$

$$\eta = \frac{1\times25\times10^3\times0.9}{1\times25\times10^3\times0.9 + 350 + 1^2\times400}$$

نصف بارکامل $\Rightarrow n = \frac{1}{2}$

$$\Rightarrow \eta = \frac{\frac{1}{2}\times25\times10^3\times0.9}{\frac{1}{2}\times25\times10^3\times0.9 + 350 + \left(\frac{1}{2}\right)^2\times400} =$$

ولتاژ، جریان، توان وفرکانس نامی ترانسفورماتور:

برای هریک از سیم پیچ های ترانسفورماتور یک ولتاژ نامی تعریف می‌شود. مقدار و کیفیت عایق‌بندی هریک از سیم پیچ ها با توجه به ولتاژ نامی مربوط به آن سیم پیچ انتخاب می‌گردد

باتوجه به آنکه اعمال ولتاژ بیشتر از مقدار ولتاژ نامی به ترانسفورماتور می‌تواند موجب ایجاد قوس الکتریکی در عایق ترانسفورماتور شده و موجب نابودی آن گردد، نمی‌توان در حالت عادی ولتاژی بیشتر از حد نامی به ترانسفورماتور اعمال نمود. معمولاً در شرایط عادی ولتاژ ترانسفورماتور در حد ولتاژ نامی آن می باشد.

عبور جریان بیش از حد از سیم پیچ ها موجب داغ شدن آن‌ها و از بین رفتن عایق سیم پیچ ها می‌شود از این رو باتوجه به حداکثر جریان بار نامی که از ترانسفورماتور رد می‌شود باید نسبت به انتخاب سطح مقطع سیم پیچ اقدام کرد سطح مقطع پایین تر از حد مجاز موجب داغ شدن سیم پیچ و انتخاب سطح مقطع بزرگتر از حد نیاز موجب افزایش مس مصرفی و افزایش هزینه ساخت ترانسفورماتور می‌گردد

باتوجه به ولتاژ و جریان نامی، توان نامی ترانسفورماتور به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\boxed{S_n = V_n I_n}$$

2014 05 22

برای هر ترانسفورماتور یک فرکانس کار نامی نیز ذکر می‌شود اگر دامنه‌ی شار در هسته ثابت باشد، با کاهش فرکانس ولتاژ نیز کاهش خواهد یافت.

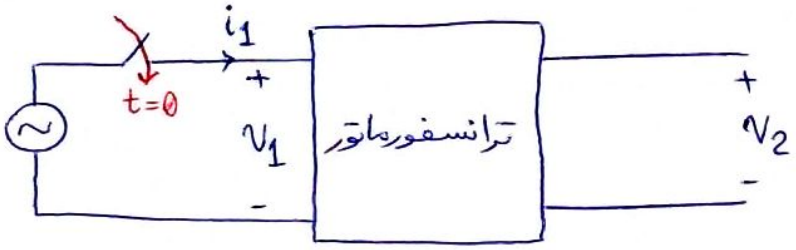
$$V = 4.44 N \varphi_m f$$

به عبارت دیگر اگر شار در هسته برابر با مقدار نامی خود باشد آنگاه افزایش فرکانس از فرکانس نامی می‌تواند موجب افزایش ولتاژ شده و منجر به صدمه دیدن ترانسفورماتور گردد و یا اگر ولتاژ نامی به ترانسفورماتور اعمال گردد با کاهش فرکانس از مقدار فرکانس نامی، سطح شار بایستی افزایش یابد که ممکن است منجر به اشباع هسته و افزایش بیش از حد جریان مغناطیس کنندگی شود.

گاهی اوقات در آزمایشگاههای کنترل کیفی کارخانجات سازنده ترانسفورماتور، برای ابراز اطمینان از کیفیت عایق ممکن است سطح ولتاژ اعمالی به ترانسفورماتور را به طور کوتاه مدت تا 1.7 برابر ولتاژ نامی اعمال کنند در این تست‌ها بایستی برای جلوگیری از اشباع هسته، فرکانس تست را بزرگتر از فرکانس نامی ترانسفورماتور اتخاذ گردد.

- جریان هجومی:

فرض می‌کنیم ولتاژی برابر با ولتاژ نامی توسط یک کلید به ترانسفورماتور اعمال گردد:



با توجه به لحظه‌ی وصل کلید ولتاژ اعمالی به ترانسفورماتور به صورت زیر خواهد بود:

$$V_1(t) = V_{m_1} \sin(\omega t + \theta)$$

θ: یک متغیر تصادفی

شار در هسته به صورت زیر بدست می‌آید:

$$V = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \Rightarrow d\varphi = \frac{V_1}{N} dt \Rightarrow \varphi = \int_0^t \frac{V_m}{N_1} \sin(\omega t + \theta)\, dt$$

$$\varphi = \frac{-V_{m_1}}{N_1 \omega} \cos(\omega t + \theta) \Big|_{t=0}^{t}$$

$$\varphi = \frac{V_{m_1}}{N_1 \omega} \left[\cos\theta - \cos(\omega t + \theta)\right]$$

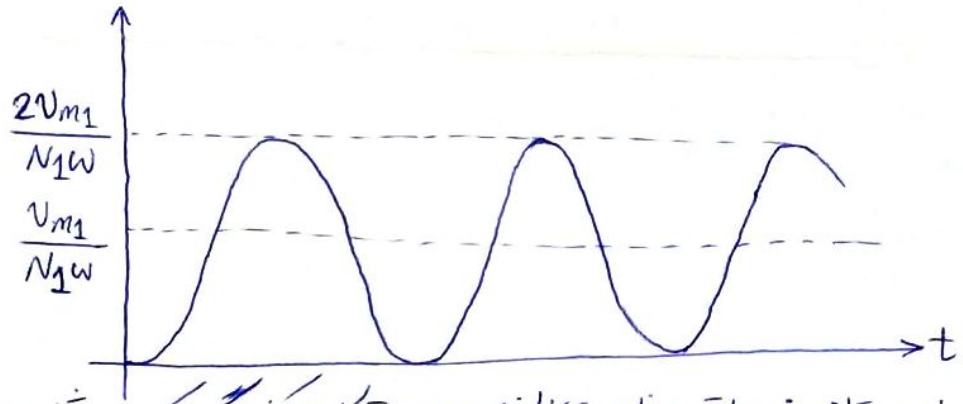
می‌دانیم که در حالت عادی دامنه‌ی شار ماکزیمم نامی هسته برابر با $\frac{V_{m_1}}{N_1 \omega}$ می‌باشد (یا همان $\frac{V_{rms_1}}{4.44 N_1 f}$) ولی با توجه به رابطه‌ی فوق پس از کلیدزنی مقدار ماکزیمم شار ممکن است بزرگتر از مقدار $\frac{V_{m_1}}{N_1 \omega}$ باشد زیرا ممکن است یک مقدار dc به شار اضافه گردد برای بررسی این موضوع دو حالت حدی زیر را در نظر می‌گیریم:

الف) $\theta = 0^\circ$

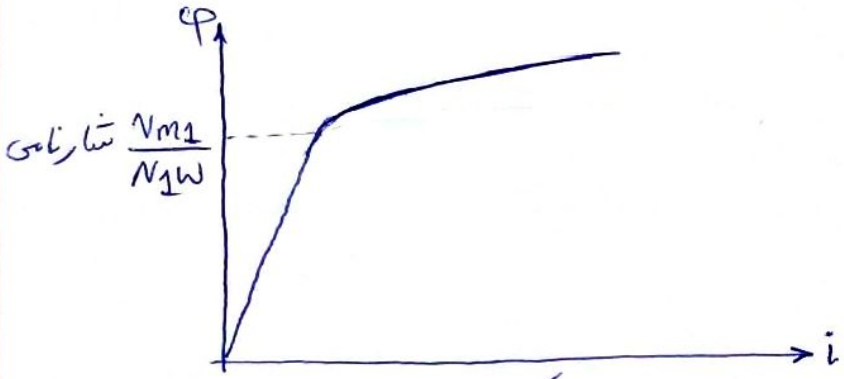
$$\Rightarrow \varphi = \frac{V_{m_1}}{N_1 \omega} \left[1 - \cos\omega t\right] \qquad (۲۶)$$

2014 05 22

$$\Rightarrow \varphi_m = 2\frac{V_{m1}}{N_1 w}$$



باتوجه به شکل زیر وانیکه در شار نامی ترانسفورماتور در ناحیه ی زانویی هسته کار می کند اگر ماکزیمم شار دو برابر مقدار نامی گردد جریان بسیار بسیار بالایی از سیم پیچ رد خواهد شد که به آن جریان هجومی گفته می شود دامنه ی این جریان هجومی ممکن است حتی ۱۰ برابر جریان نامی ترانسفورماتور نیز برسد.



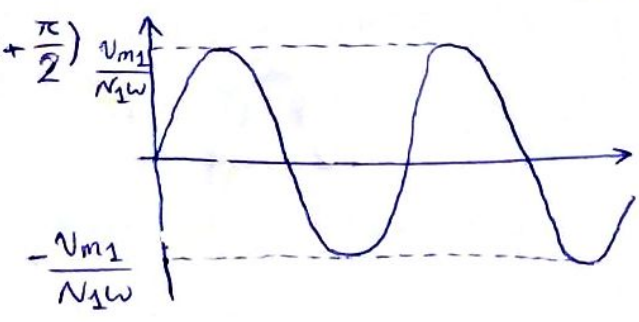
خوشبختانه این جریان بسیار زیاد در اثر تلفات هسته و سیم پیچ طی چند سیکل میرا می شود و مقدار شار dc هسته صفر می گردد.

سیم پیچ های ترانسفورماتور بایستی بتوانند این جریان بسیار زیاد را تا میرا شدن آن تحمل کند

ب) $\theta = \frac{\pi}{2}$

$$\Rightarrow \varphi = \frac{-V_{m1}}{N_1 w}\cos(wt + \frac{\pi}{2})$$

$$\Rightarrow \varphi = \frac{V_{m1}}{N_1 w}\sin wt$$

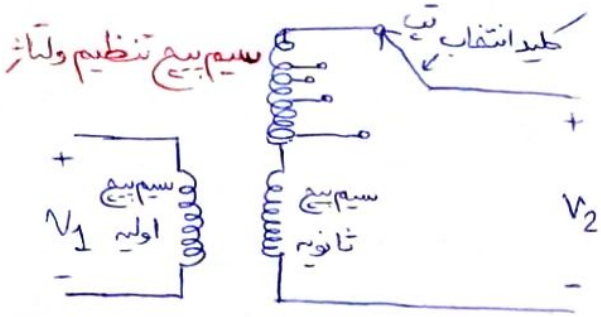


2014 05 22

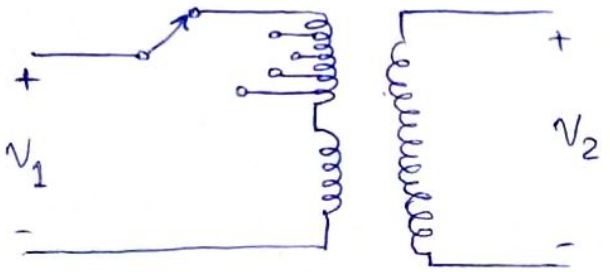
- جریان هجومی (Inrush current)

- سیم پیچ تنظیم ولتاژ (Voltage Regulating winding)

برای تنظیم ولتاژ خروجی ترانسفورماتور از این نوع سیم پیچی استفاده می‌شود سیم پیچی‌ای تنظیم ولتاژ دارای انشعاباتی برای تغییر تعداد دور هستند. به این انشعابات، تپ (tap) گفته می‌شود



$$V_2 = \frac{V_1}{\alpha}$$



$$\alpha = \frac{N_1}{N_2} = \text{متغیر}$$

با تغییر اتصال تپ توسط کلید انتخاب تپ می‌توان تعداد دور (در اولیه یا ثانویه) را کم و زیاد کرد. به این ترتیب نسبت دور تغییر کرده و ولتاژ خروجی تغییر می‌کند. لذا به این صورت می‌توان ولتاژ خروجی را تنظیم کرد. اگر فرض V_1 ثابت باشد، آن گاه اگر سیم پیچ تنظیم ولتاژ در اولیه باشد با افزایش تعداد دور (N_1 افزایش)، نسبت دور α بزرگتر شده و V_2 کاهش می‌یابد و اگر سیم پیچ تنظیم ولتاژ در ثانویه باشد. با افزایش تعداد دور (N_2 افزایش) نسبت دور α کمتر شده و V_2 افزایش می‌یابد.

$$V_2 = \frac{V_1}{\alpha}$$

عملیات تغییر تپ که توسط کلید تنظیم تپ انجام می‌شود می‌تواند در دو حالت بدون بار و یا زیر بار انجام شود. اگر تغییر تپ در زیر جریان بار انجام شود، کلید تنظیم تپ بایستی دارای مکانیزمی برای مقابله با قوس احتمالی ناشی از عملیات کلیدزنی را داشته باشد. چنین کلیدی دارای تکنولوژی بسیار بالایی بوده و بسیار گران قیمت است و مهم‌ترین مزیت آن تداوم برق رسانی به بار در حین عملیات کلیدزنی است. به این عملیات عملیات تغییر تپ زیر بار (TCUL : Tap changing Under Load) گفته می‌شود

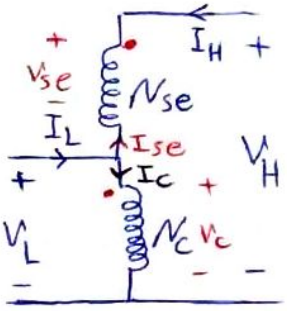
برای آنکه مشکل ایجاد قوس در حین تغییر تپ به وجود نیاید، می‌توان ابتدا ترانسفورماتور را بی بار کرده (توسط یک کلید قدرت بار را باز نمود) و با صفر شدن جریان ترانسفورماتور، کلیدزنی مربوط به تغییر تپ را انجام داد. کلید تنظیم تپ در این حالت بسیار ارزان قیمت تر خواهد شد ولی عیب عمده‌ی آن نیاز به قطع برق بار می‌باشد.

2014 05 22

به این عملیات، عملیات تنظیم تپ بدون بار (off Load Tap changing) گفته می‌شود در ترانسفورماتورهای بسیار کوچک و یا ترانسفورماتورهایی که معمولاً تغییر تپ آن‌ها بسیار کم است و یا فقط در هنگام نصب اولیه تغییر تپ انجام می‌شود از سیستم تغییر تپ بدون بار بهره گرفته می‌شود ولی در ترانسفورماتورهایی که در پست های فشار قوی نصب می‌شوند و ممکن است روزانه دهها بار عملیات تنظیم تپ در آنها مورد نیاز باشد از سیستم تغییر تپ زیر بار استفاده می‌گردد.

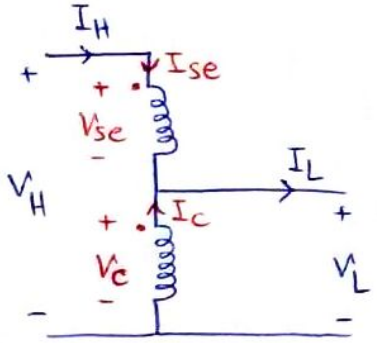
- اتوترانسفورماتور: (Auto-transformer)

در اتوترانسفورماتورهای تک فاز هر سیم پیچ وجود دارد که به صورت الکتریکی متصل با یکدیگر قرار می‌گیرند:



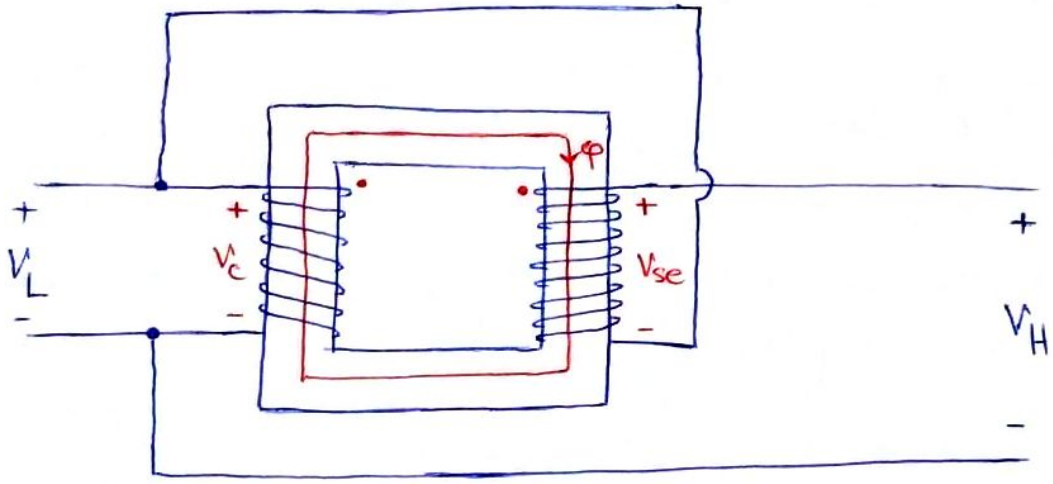
$$N_{se} I_{se} = N_c I_c$$

$$\frac{V_c}{V_{se}} = \frac{N_c}{N_{se}}$$



$$N_{se} I_{se} = N_c I_c$$

$$\frac{V_c}{V_{se}} = \frac{N_c}{N_{se}}$$



یکی از سیم پیچ ها به صورت مشترک بین سمت فشار قوی و فشار ضعیف می باشد که به آن سیم پیچ مشترک (Common Winding) گفته می‌شود. به سیم پیچ دیگر که به صورت سری با سمت فشار قوی قرار گرفته است، سیم پیچ سری (series Winding) گفته می‌شود. همانند یک ترانسفورماتور معمولی، این سیم پیچ بر روی یک هسته سوار شده و شار داخل آن ها یکسان است. لذا نسبت ولتاژ سیم پیچ ها برابر با نسبت دور آن ها بوده $\left(\frac{V_c}{V_{se}} = \frac{N_c}{N_{se}}\right)$ و همچنین لزوم صفر بودن mmf کل در هسته

2014 05 22

ایده آل رابطه‌ی $N_c I_c = N_{se} I_{se}$ را ایجاب می‌کند.

برخلاف ترانسفورماتور معمولی که دو سیم پیچ به لحاظ الکتریکی از یکدیگر کاملاً ایزوله بودند، در اتوترانسفورماتور، این دو سیم پیچ (ولذا طرف اولیه و ثانویه) به لحاظ الکتریکی به یکدیگر متصل هستند.

در اتوترانسفورماتورها روابط زیر برقرار هستند:

$$\begin{cases} I_H = I_{se} \\ I_L = I_c + I_{se} \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_H = V_L + V_{se} \\ V_L = V_c \end{cases}$$

$$I_L = I_c + I_{se} = \frac{N_{se} I_{se}}{N_c} + I_{se} = \frac{N_{se} + N_c}{N_c} I_{se}$$

$$\Rightarrow I_L = \frac{N_{se} + N_c}{N_c} I_H \Rightarrow \boxed{\frac{I_H}{I_L} = \frac{N_c}{N_c + N_{se}}}$$

$$V_H = V_c + V_{se} = V_c + \frac{N_{se}}{N_c} V_c = \frac{N_c + N_{se}}{N_c} V_c \Rightarrow V_H = \frac{N_c + N_{se}}{N_{se}} V_L$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{V_H}{V_L} = \frac{N_c + N_{se}}{N_c}} \rightarrow \boxed{V_H > V_L \text{ ، } I_H < I_L}$$

توان در اتوترانسفورماتور:

در ترانسفورماتور معمولی برای هر سیم پیچ یک ولتاژ و جریان نامی وجود دارد که ولتاژ و جریان سیم پیچ به هیچ وجه نباید از آنها بزرگتر باشد. اگر یک ترانسفورماتور را تبدیل به یک اتوترانسفورماتور کنیم آنگاه با فرض آنکه ولتاژ نامی دو سیم پیچ آن تغییر نکند و همچنین با توجه به اینکه می‌دانیم جریان نامی دو سیم پیچ هم به دلیل ثابت بودن سطح مقطع آن‌ها ثابت مانده است، می‌توانیم توان نامی اتوترانسفورماتور جدید را برحسب توان نامی ترانسفورماتور معمولی اولیه بدست آوریم:

توان ظاهری نامی سیم پیچ مشترک $S_{nc} = V_{nc} I_{nc}$

توان ظاهری نامی سیم پیچ سری $S_{nse} = V_{nse} I_{nse}$

V_{nc} : ولتاژ نامی سیم پیچ مشترک

I_{nc} : جریان نامی سیم پیچ مشترک

V_{nse} : ولتاژ نامی سیم پیچ سری

I_{nse} : جریان نامی سیم پیچ سری

2014 05 22

$$S_{nc} = V_{nc} I_{nc} = \frac{N_c}{N_{se}} V_{nse} \times \frac{N_{se}}{N_c} I_{nse} = V_{nse} I_{nse}$$

$$\Longrightarrow S_{nc} = S_{nse}$$

توان نامی ترانسفورماتور معمولی برابراست با توان نامی هریک ازسیم پیچ های آن :

S_{nT} توان نامی ترانسفورماتور معمولی $= S_{nc} = S_{nse}$

ازطرفی داریم:

$$V_{nL} = V_{nc}$$

$$V_{nH} = V_{nc} + V_{nse} = \frac{N_c + N_{se}}{N_c} V_{nc} = \frac{N_c + N_{se}}{N_{se}} V_{nse}$$

$$I_{nH} = I_{nse}$$

$$I_{nL} = I_{nc} + I_{nse} = \frac{N_c + N_{se}}{N_{se}} I_{nc} = \frac{N_c + N_{se}}{N_c} I_{nse}$$

V_{nH} : ولتاژ نامی طرف فشارقوی

I_{nH} : جریان نامی طرف فشارقوی

V_{nL} : ولتاژ نامی طرف فشارضعیف

I_{nL} : جریان نامی طرف فشارضعیف

$S_{nH} = V_{nH} I_{nH}$ توان ظاهری نامی طرف فشارقوی

$S_{nL} = V_{nL} I_{nL}$ توان ظاهری نامی طرف فشارضعیف

$$S_{nH} = V_{nH} I_{nH} = \frac{N_c + N_{se}}{N_{se}} V_{nse} I_{nse}$$

$$\Longrightarrow S_{nH} = \frac{N_c + N_{se}}{N_{se}} S_{nse} \Longrightarrow \boxed{S_{nH} = \frac{N_c + N_{se}}{N_{se}} S_{nT}}$$

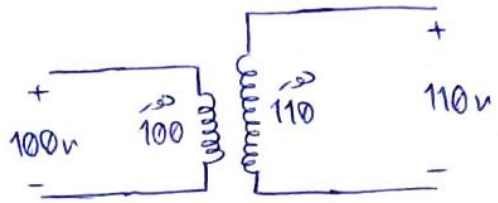
$$S_{nL} = V_{nL} I_{nL} = V_{nc} \frac{N_c + N_{se}}{N_{se}} I_{nc} = \frac{N_c + N_{se}}{N_{se}} S_{nc} \Longrightarrow \boxed{S_{nL} = \frac{N_c + N_{se}}{N_{se}} S_{nT}}$$

$$\Longrightarrow S_{nH} = S_{nL} = S_{nAT} \Longrightarrow \boxed{S_{nAT} = \frac{N_c + N_{se}}{N_{se}} S_{nT}}$$

2014 05 22

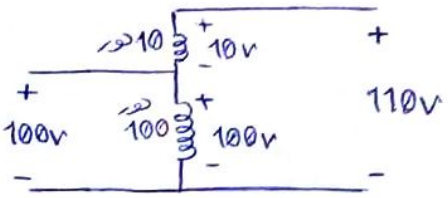
نکته : معمولاً درمواقعی که نسبت ولتاژ های اولیه وثانویه بسیار نزدیک به یکدیگرباشد ، اقتصادی است که از اتوترانسفورماتور به جای ترانسفورماتور معمولی استفاده کنیم دراین صورت N_{se} خیلی کوچکتراز

N_c است. به عنوان مثال اگر نسبت ولتاژ 100/110 مورد نیاز باشد:



$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{100}{110}$$

ترانسفورماتور معمولی



$$\frac{N_c}{N_c + N_{se}} = \frac{100}{110}$$

اتوترانسفورماتور

مجموعاً 210 دور در دو سیم پیچ مورد نیاز است.

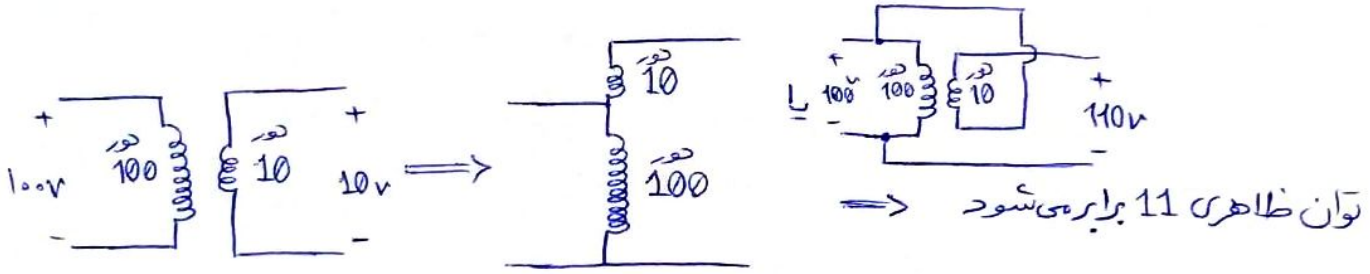
تنها 110 دور در دو سیم پیچ لازم است.

با توجه به آنکه معمولاً در اتوترانسفورماتور $N_{se} \ll N_c$ ، در نتیجه در اتوترانسفورماتورهای معمولی داریم:

$$S_{nAT} \gg S_{nT}$$

↑

توان نامی ترانسفورماتور معمولی معادل



$\Rightarrow$ توان ظاهری 11 برابر می‌شود

این توان اضافی به دلیل اتصال الکتریکی دو طرف است.

$$S_{AT} = V_H I_H = \frac{N_{se} + N_c}{N_{se}} V_{se} I_{se}$$

$$\Rightarrow S_{AT} = \underbrace{V_{se} I_{se}}_{\text{توان ظاهری ناشی از کوپلینگ مغناطیسی}} + \underbrace{\frac{N_c}{N_{se}} V_{se} I_{se}}_{\text{توان ظاهری ناشی از اتصال الکتریکی}} \quad \text{یا} \quad S_{AT} = V_c I_c + \frac{N_c}{N_{se}} V_c I_c$$

مزایای اتوترانسفورماتور:

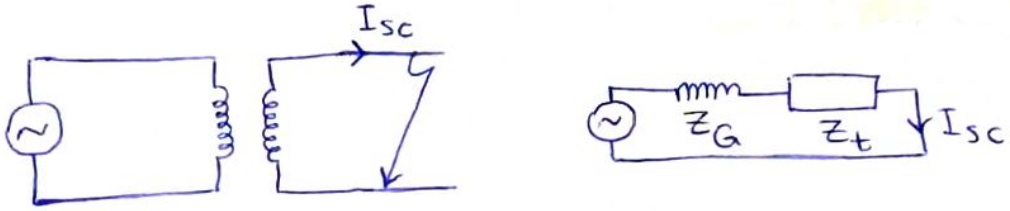
۱) هزینه ی ساخت آن کمتر است. ۲) قدرت نامی آن بزرگتر است ۳) تلفات مسی سیم پیچ کمتر است زیرا امپدانس آن نسبت به ترانسفورماتور معادل کوچکتر است. (تلفات $R_{eq} I^2$)

معایب اتوترانسفورماتور:

۱) به دلیل اتصال الکتریکی سمت اولیه و ثانویه، هر عیب الکتریکی در یک طرف، مستقیماً به طرف دیگر منتقل می‌شود

2014 05 22

۲) به دلیل کوچک بودن امپدانس سری آن ، جریان اتصال کوتاه آن بسیار بالاست.



- سیستم یکایی یا پریونیت (per unit)

در سیستم های قدرت برای آسانی کار تحلیل معمولاً از سیستم یکایی یا پریونیت استفاده می شود در این سیستم هریک از کمیتهای مدار نسبت به مقدار پایه ی خود نرمالیزه می شود

کمیتهای مهم مدار عبارتند از: جریان ، ولتاژ ، توان ، امپدانس و ... .

معمولاً مقادیر پایه ی دو کمیت ابتدا مشخص می شود و مقادیر پایه کمیتهای دیگر از روی آن ها تعیین می گردند

در شبکه های قدرت معمولاً مقادیر پایه ولتاژ و توان به عنوان مقادیر پایه ی اصلی در نظر گرفته می شوند.

S_b ، V_b b:base پایه

$$\Longrightarrow \begin{cases} I_b = \dfrac{S_b}{V_b} \\ Z_b = \dfrac{V_b^2}{S_b} \end{cases}$$

نکات مهم:

① -

$$\begin{cases} S_{pu} = \dfrac{S}{S_b} \\ V_{pu} = \dfrac{V}{V_b} \\ I_{pu} = \dfrac{I}{I_b} \\ Z_{pu} = \dfrac{Z}{Z_b} \end{cases}$$

② - مقادیر پایه اعداد حقیقی هستند نه مختلط . از آنجا که مقادیر ولتاژ ، جریان ، توان و امپدانس اعداد مختلط هستند ، مقادیر پریونیت آن ها نیز اعداد مختلطی با زاویه ی یکسان خواهند بود.

③ - مقادیر پایه برای توان های اکتیو و راکتیو همان مقدار پایه برای توان ظاهری است.

$$\begin{cases} P_b = S_b \\ Q_b = S_b \end{cases}$$

اثبات:

$$S = P + jQ \Longrightarrow S_{pu} = \frac{S}{S_b} = \frac{P+jQ}{S_b} = \frac{P}{S_b} + j\frac{Q}{S_b}$$

$$\xRightarrow{S_{pu} = P_{pu} + jQ_{pu}} \begin{cases} P_b = S_b \\ Q_b = S_b \end{cases}$$

2014 05 22

④- مقادیر پایه برای مقاومت و راکتانس همان مقدار پایه امپدانس می باشد:

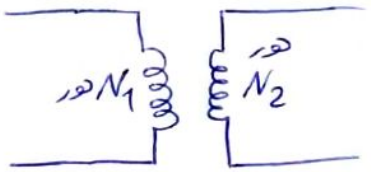
$$\begin{cases} R_b = Z_b \\ X_b = Z_b \end{cases}$$

اثبات:

$$Z = R + jX \;,\; Z_{pu} = \frac{Z}{Z_b} = \frac{R+jX}{Z_b} = \frac{R}{Z_b} + j\frac{X}{Z_b}$$

$$Z_{pu} = R_{pu} + jX_{pu} \Longrightarrow \begin{cases} R_b = Z_b \\ X_b = Z_b \end{cases}$$

⑤- باتوجه به آنکه توان سمت اولیه و ثانویه در ترانسفورماتور یکسان است، درنتیجه مقدار توان پایه در دو طرف آن باید یکسان باشد. ولی مقادیر پایه جریان، ولتاژ، وامپدانس در دو طرف ترانسفورماتور بایستی در کمیتهای a یا a^2، ضرب یا تقسیم شوند:



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

S_{b_1} S_{b_2} $\Longrightarrow S_{b_1} = S_{b_2}$

V_{b_1} V_{b_2} $\Longrightarrow V_{b_1} = aV_{b_2}$

I_{b_1} I_{b_2} $\Longrightarrow I_{b_1} = \frac{1}{a} I_{b_2}$

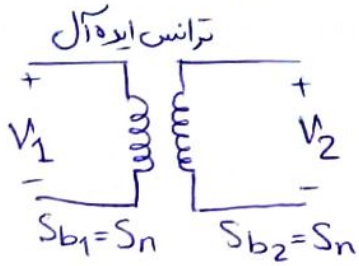
Z_{b_1} Z_{b_2} $\Longrightarrow Z_{b_1} = a^2 Z_{b_2}$

⑥- معمولاً در بحث پریونیت کردن مدار حل ترانسفورماتور، از مقادیر نامی ولتاژ، جریان و توان ظاهری برای مقادیر پایه استفاده می‌شود:

$$\begin{cases} S_b = S_n \\ V_b = V_n \\ I_b = I_n \end{cases}$$

⑦- به کمک سیستم پریونیت، ترانسفورماتور ایده‌آل در مدار پریونیت شده حذف می‌گردد

اثبات:



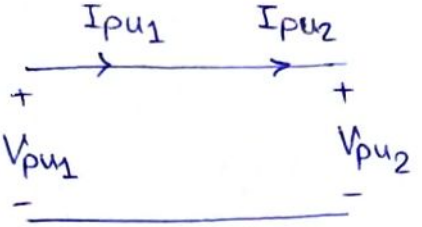
$$V_{b_1} = V_{n_1} \quad V_{b_2} = \frac{V_{b_1}}{a} = \frac{V_{n_1}}{a} = V_{n_2}$$

$$I_{b_1} = I_{n_1} \quad I_{b_2} = aI_{b_1} = aI_{n_1} = I_{n_2}$$

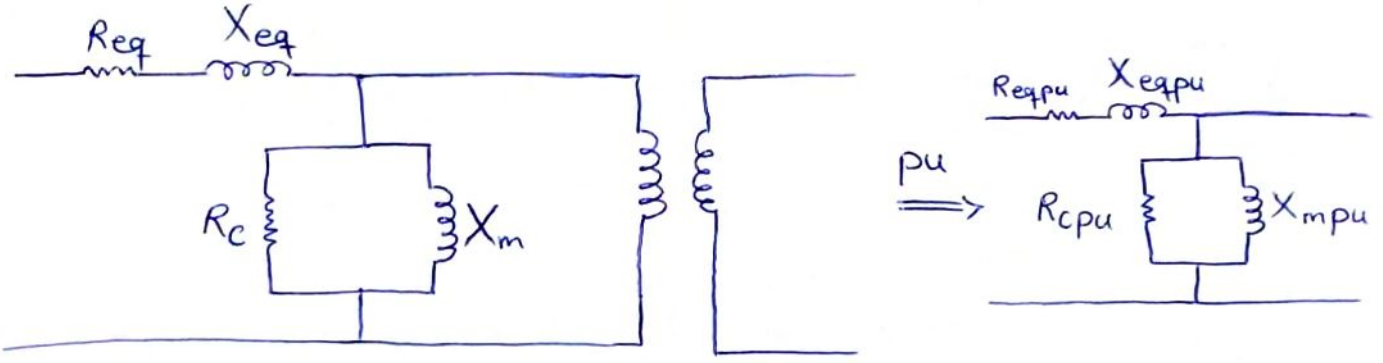
2014 05 22

$$\begin{cases} V_{pu_1} = \dfrac{V_1}{V_{b_1}} \\ I_{pu_1} = \dfrac{I_1}{I_{b_1}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{pu_2} = \dfrac{V_2}{V_{b_2}} = \dfrac{\frac{1}{a}V_1}{\frac{1}{a}V_{b_1}} = \dfrac{V_1}{V_{b_1}} = V_{pu_1} \\ I_{pu_2} = \dfrac{I_2}{I_{b_2}} = \dfrac{aI_1}{aI_{b_1}} = \dfrac{I_1}{I_{b_1}} = I_{pu_1} \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} V_{pu_2} = V_{pu_1} \\ I_{pu_2} = I_{pu_1} \end{cases}$$

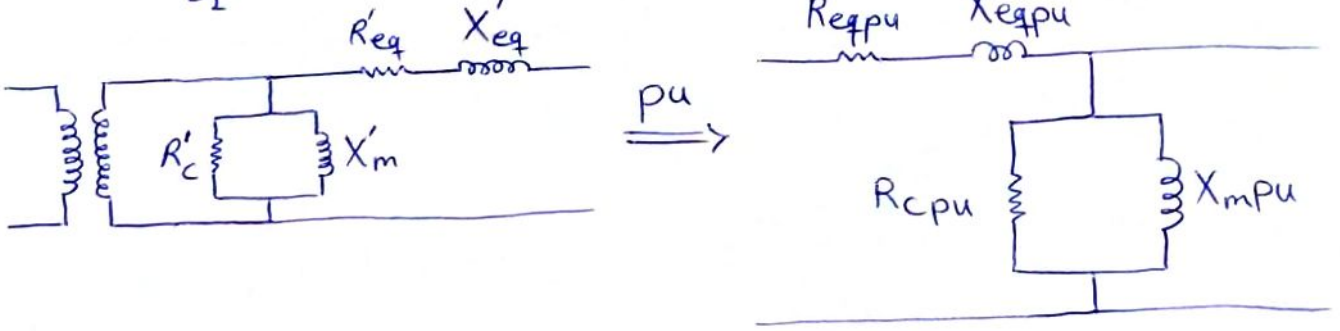


(۸) - در مدار پریونیت شده معادل ترانسفورماتور، فرقی نمی‌کند که امپدانس ترانسفورماتور در سمت اولیه باشد و آن را پریونیت کنیم و یا در سمت ثانویه باشد و آن را در سمت ثانویه پریونیت کنیم.



Z : امپدانس در سمت اولیه

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_{b_1}}$$



Z' : امپدانس انتقال یافته به ثانویه

$$Z'_{pu} = \frac{Z'}{Z_{b_2}}$$

$$Z'_{pu} = \frac{\frac{1}{a^2}Z}{\frac{1}{a^2}Z_{b_1}} = \frac{Z}{Z_{b_1}} = Z_{pu_1} \Longrightarrow Z'_{pu} = Z_{pu}$$

2014 05 22

(۹) - مقاومت سری سیم پیچ در مدار پریونیت شده برابر با توان تلفات پریونیت شده بار کامل سیم پیچ است:

$$R_{eqpu} = P_{cuflpu}$$

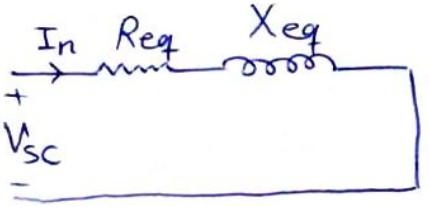
اثبات:

$$P_{cuflpu} = \frac{P_{cufl}}{S_b} = \frac{R_{eq} I_{fl}^2}{Z_b I_b^2} = \frac{R_{eq} I_n^2}{Z_b I_n^2} = \frac{R_{eq}}{Z_b} = R_{eqpu}$$

(۱۰) - اندازه امپدانس سری پریونیت شده ترانسفورماتور برابر با مقدار پریونیت شده ولتاژ ترانسفورماتور در تست اتصال کوتاه است. (مقدار پریونیت شده ولتاژ ترانسفورماتور در تست اتصال کوتاه را امپدانس درصد نیز می نامند.)

$$Z_{eqpu} = V_{scpu}$$

اثبات: می دانیم در تست اتصال کوتاه جریان نامی از ترانسفورماتور رد می شود و مدار معادل به صورت زیر است:



$$V_{scpu} = \frac{V_{sc}}{V_b} = \frac{Z_{eq} I_n}{V_b} = \frac{Z_{eq} I_b}{V_b} = \frac{Z_{eq}}{\frac{V_b}{I_b}} = \frac{Z_{eq}}{Z_b}$$

$$\Longrightarrow V_{scpu} = Z_{eqpu}$$

(۱۱) - تنظیم ولتاژ در سیستم پریونیت شده را می توان به صورت زیر بدست آورد:

$$VR\% = R_{eqpu} I_{pu} \cos\theta + X_{eqpu} I_{pu} \sin\theta$$

اثبات:

$$VR\% = \frac{R_{eq} I \cos\theta + X_{eq} I \sin\theta}{V_L} = \frac{\frac{R_{eq} I \cos\theta + X_{eq} I \sin\theta}{V_b}}{\frac{V_L}{V_b}}$$

$$VR\% = \frac{\frac{R_{eq} I \cos\theta + X_{eq} I \sin\theta}{Z_b I_b}}{\frac{V_n}{V_b}} \Longrightarrow VR\% = R_{eqpu} I_{pu} \cos\theta + X_{eqpu} I_{pu} \sin\theta$$

(۱۲) - بازده در سیستم پریونیت به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\eta = \frac{I_{pu} \cos\theta}{I_{pu} \cos\theta + P_{cpu} + R_{eqpu} I_{pu}^2}$$

2014 05 22

اثبات:

$$\eta = \frac{aS_n\cos\theta}{aS_n\cos\theta + P_c + P_{cufl}\,a^2}$$

$$a = \frac{I}{I_n} = \frac{I}{I_b} = I_{pu}$$

$$\eta = \frac{\frac{aS_n\cos\theta}{S_b}}{\frac{aS_n\cos\theta + P_c + P_{cufl}\,a^2}{S_b}} \Longrightarrow \eta = \frac{I_{pu}\cos\theta}{I_{pu}\cos\theta + P_{cpu} + R_{eqpu}I_{pu}^2}$$

(۱۳) - اگر یک کمیت را در مقدار مبنا (مقدار پایه) قبلاً پریونیت کرده باشیم و حال بخواهیم آن را در یک مبنای جدید پریونیت کنیم به صورت زیر عمل می‌کنیم:

$$\text{مقدار پریونیت جدید} = \frac{\overbrace{\text{مبنای قدیم} \times \text{مقدار پریونیت قدیم}}^{\text{مقدار واقعی}}}{\text{مبنای جدید}}$$

$$V_{punew} = \frac{V_{puold} \times V_{bold}}{V_{bnew}}$$

$$Z_{punew} = \frac{Z_{puold} \times Z_{bold}}{Z_{bnew}} = \frac{Z_{puold} \times \frac{V_{bold}^2}{S_{bold}}}{\frac{V_{bnew}^2}{S_{bnew}}} \Longrightarrow$$

$$Z_{punew} = Z_{puold} \times \left(\frac{V_{bold}}{V_{bnew}}\right)^2 \left(\frac{S_{bnew}}{S_{bold}}\right)$$

(۱۴) -

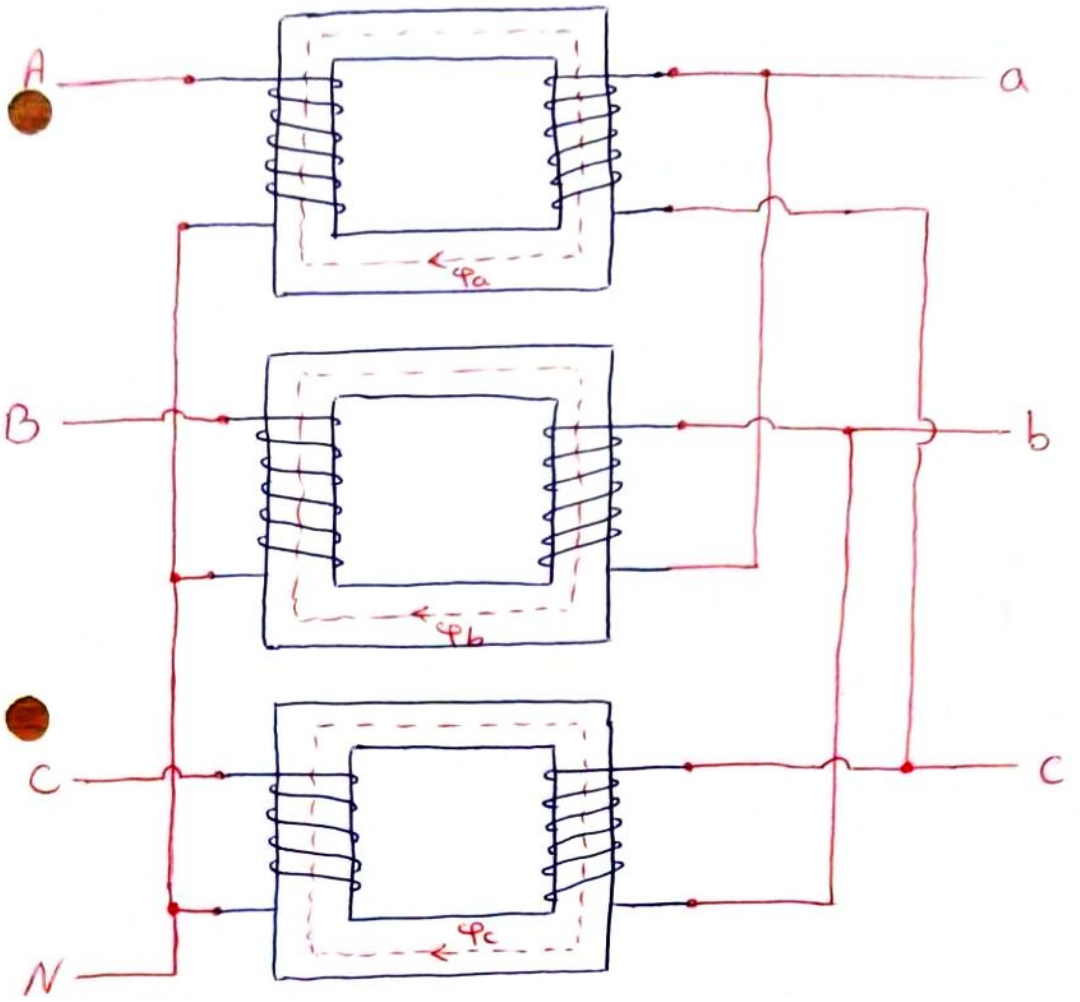
مسأله: اثبات کنید که مقدار تلفات توان در تست اتصال کوتاه برابر با مقدار R_{eqpu} و مقدار تلفات در تست پریونیت شده‌ی اتصال باز برابر با معکوس R_{cpu} است (یعنی $\frac{1}{R_{cpu}}$)

پریونیت شده‌ی

ترانسفورماتورهای سه فاز:

باتوجه به اینکه سیستم های قدرت سه فاز هستند، بایستی از ترانسفورماتورهای سه فاز در آن ها استفاده کرد برای این منظور می توان از سه دستگاه ترانسفورماتور تک فاز استفاده نمود.

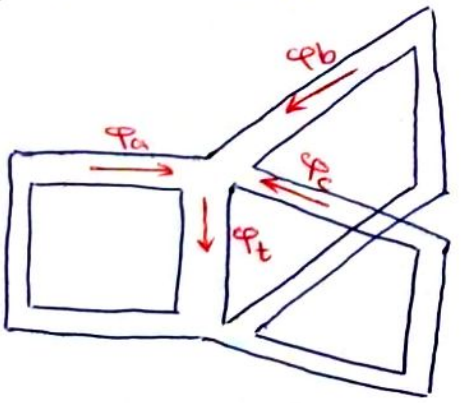
2014 05 22



اتصال Y_n

اتصال Δ

در اغلب موارد معمول است که ترانسفورماتور سه فاز را به صورت یکپارچه بسازند فرض کنیم سه دستگاه ترانسفورماتور فوق را به صورت زیر در کنار یکدیگر قرار دهیم.



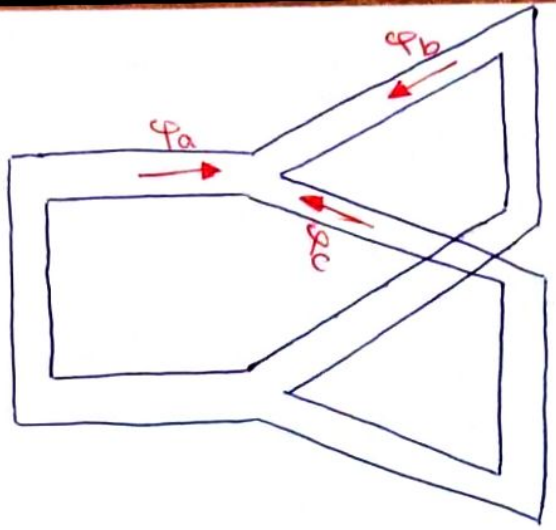
$$\varphi_t = \varphi_a + \varphi_b + \varphi_c$$

از آنجا که سیستم سه فاز متعادل است (اندازه‌ی ولتاژ فازها با هم برابر بوده و فازهای آن‌ها نسبت به هم 120 درجه جلو یا عقب می باشد)، در نتیجه اندازه‌ی شارهای هر سه فاز با هم برابر بوده و نسبت به هم 120 درجه پس فاز یا پیش فاز دارند. از این رو جمع فازوری شارهای سه فاز در ساق وسط صفر می باشد.

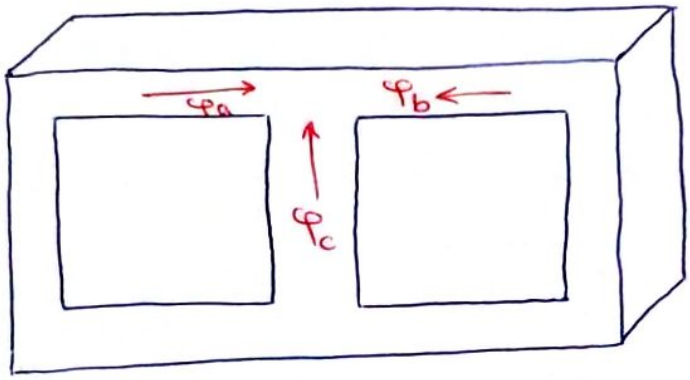
$$\Longrightarrow \varphi_t = 0$$

از آنجا که از ساق وسطی شاری رد نمی‌شود، می توان آن را حذف کرد

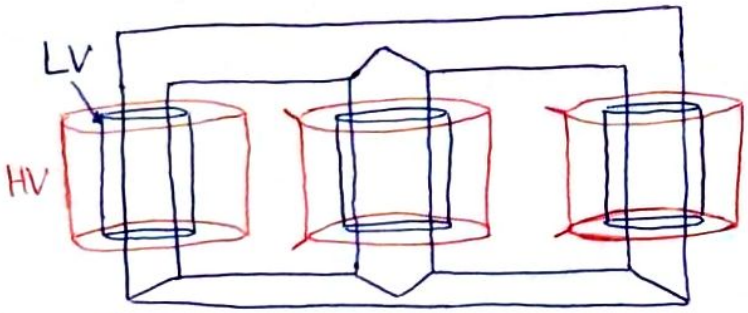
2014 05 22



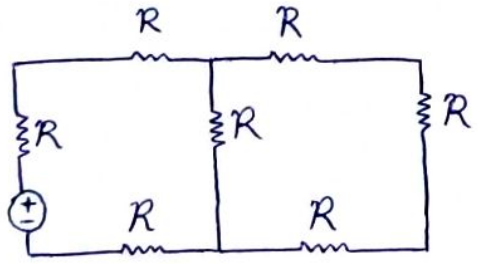
برای کاهش حجم ترانسفورماتور، در ساختار فوق تغییراتی به صورت زیر داده می‌شود



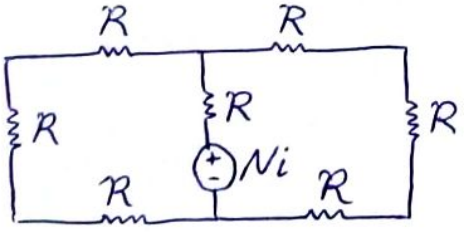
در ترانسفورماتورها معمولاً برای افزایش کوپلینگ مغناطیسی اولیه و ثانویه (کاهش شارهای نشتی) و همچنین استفاده‌ی بهینه از حجم موجود در داخل مغزن، سیم‌پیچ‌های فشار قوی و فشار ضعیف هر فاز داخل یکدیگر جاسازی می‌شوند.



با توجه به شکل فوق دیده می‌شود که رلوکتانس مغناطیسی دیده شده توسط سیم‌پیچ فاز وسط کمتر از رلوکتانس مغناطیسی دیده شده توسط سیم‌پیچ‌های فازهای کناری است.



$$\Longrightarrow \boxed{R_t = 3.75R}$$



$$\Longrightarrow \boxed{R_t = 2.5R}$$

2014 05 22

ازاین رو ، بافرض شارهای یکسان برای هرسه فاز ، جریان مغناطیس کنندگی سیم پیچ فاز وسط کمتر از فازهای کناری خواهد بود $(Ni_m = R_t \varphi)$

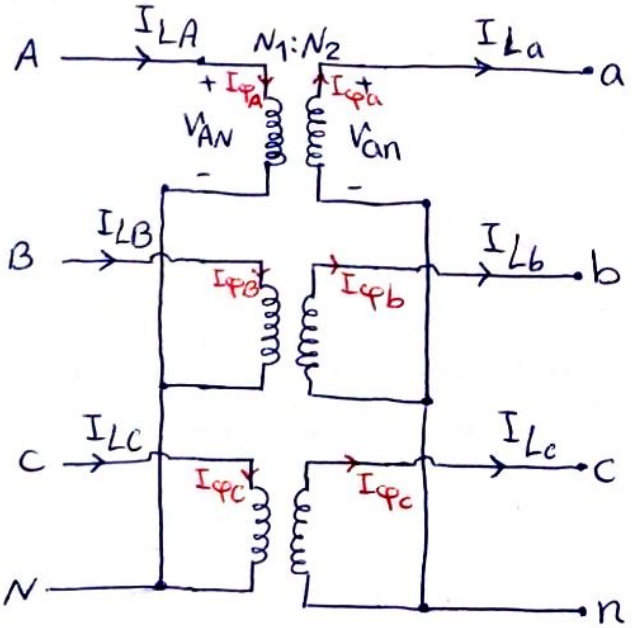
ازآنجاکه جریان مغناطیس کنندگی هسته بسیار کوچکتر از جریان بار است ، می توان ازاین عدم تقارن بسیار کوچک درجریان های مغناطیس کنندگی صرفنظر کرد

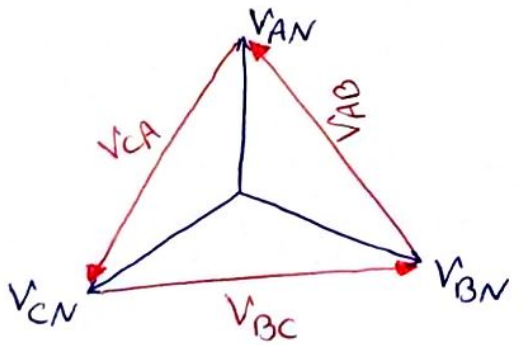
مقایسه‌ی ترانسفورماتورهای سه‌فاز سه‌پارچه و یکپارچه :

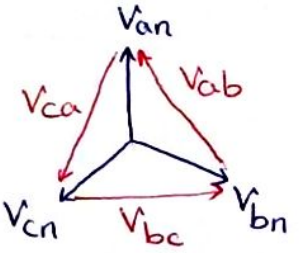
مقدار هسته و روغن مصرفی در ترانسفورماتور سه‌فاز یکپارچه کمتر از ترانسفورماتور سه‌فاز سه پارچه است. ازاین رو ترانسفورماتور سه‌فاز یکپارچه هزینه‌ی تمام‌شده‌ی کمتری دارد واز لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه‌تر است. ازطرفی وزن کل یک دستگاه ترانسفورماتور سه‌فاز یکپارچه بسیار بیشتر از وزن یکی از ترانسفورماتورهای سه‌فاز، سه‌پارچه می باشد. ازاین رو حمل ونقل ترانسفورماتورهای سه‌فاز سه‌پارچه خیلی راحتتر از ترانسفورماتور سه‌فاز یکپارچه است. همچنین درصورت استفاده از ترانسفورماتورهای سه‌فاز، سه‌پارچه قابلیت اطمینان تداوم برقرسانی با استفاده از یک دستگاه ترانسفورماتور تک فاز اضافی بیشتر است. زیرا اگر دریکی ازفازهای ترانسفورماتور سه‌فاز، یکپارچه خطایی ایجادشود کل ترانسفورماتور معیوب خواهدشد وجایگزینی آن سخت ترمی باشد. ولی اگر ازیک بانک چهارتایی از ترانسفورماتورهای تک فاز استفاده شود (سه دستگاه به شبکه وصل‌شده و یک دستگاه به‌صورت زرو می‌باشد. درصورت بروز عیب دریک فاز ، ترانسفورماتورهای فاز های دیگرسالم باقی خواهندماند. دراین حالت می توان درحین تعمیر ترانسفورماتور معیوب، ترانسفورماتور زرو را جایگزین آن کرده و دروقفه‌ی زمانی بسیار کوتاه دوباره اقدام به برق رسانی نمود

بررسی انواع اتصالات سه‌فاز:

① - اتصال ستاره - ستاره







2014 05 22

$$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN} = V_\circ \angle 0 - V_\circ \angle -120 = \sqrt{3} V_\circ \angle +30$$

$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN}$$

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN}$$

ولتاژهای خط ← ولتاژهای فاز

در اتصال ستاره ولتاژهای خط $\sqrt{3}$ برابر ولتاژهای فاز بوده و نسبت به آن‌ها 30 درجه جلوتر هستند.

اگر $\begin{cases} V_{AN} = V_\circ \angle 0 \\ V_{BN} = V_\circ \angle -120 \\ V_{CN} = V_\circ \angle +120 \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} V_{AB} = \sqrt{3} V_\circ \angle +30 \\ V_{BC} = \sqrt{3} V_\circ \angle -90 \\ V_{CA} = \sqrt{3} V_\circ \angle +150 \end{cases}$

در اتصال ستاره جریان‌های خط برابر با جریان فاز می‌باشند.

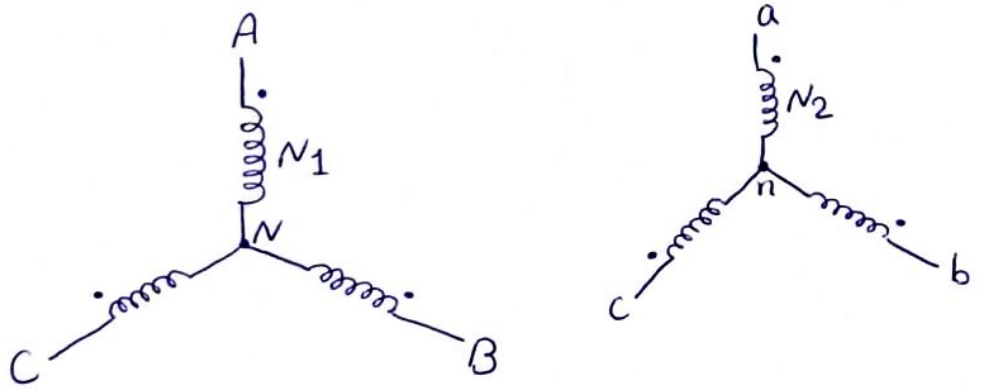
اگر نسبت تبدیل هر فاز برابر $a_{1\varphi}$ باشد داریم:

$$a_{1\varphi} = \frac{N_1}{N_2} \Longrightarrow V_{AN} = a_{1\varphi} V_{an}$$

نسبت تبدیل بین ولتاژهای خط در اولیه و ثانویه برابر با همان نسبت تبدیل سه‌فاز ($a_{3\varphi}$) می‌باشد

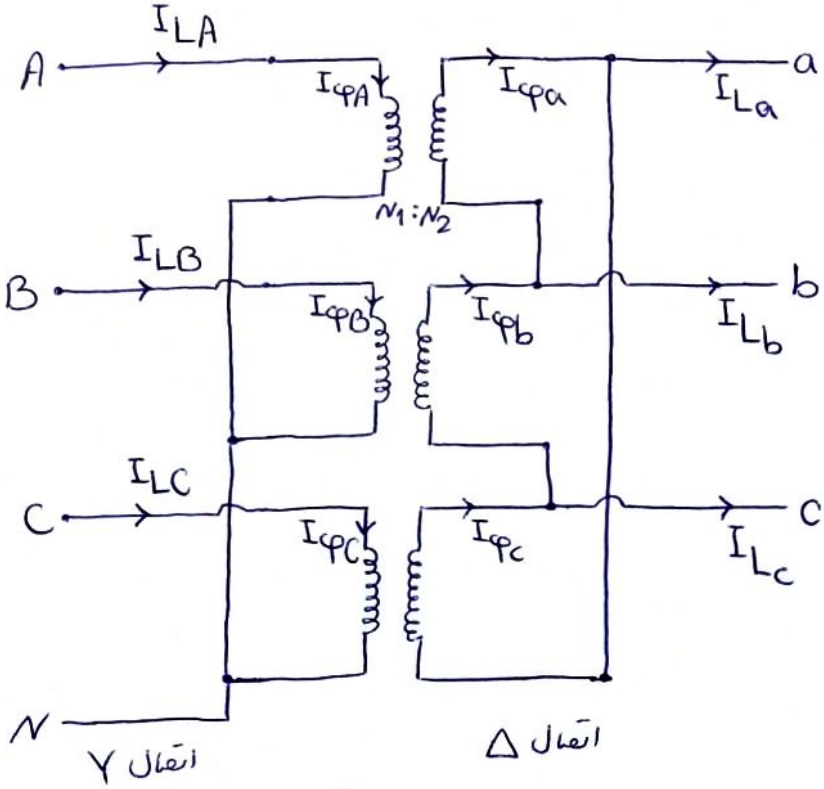
$$a_{3\varphi} = \frac{|V_{AB}|}{|V_{ab}|} = \frac{\sqrt{3}|V_{AN}|}{\sqrt{3}|V_{an}|} = \frac{\sqrt{3} V_\circ}{\sqrt{3} \frac{V_\circ}{a_{1\varphi}}} = a_{1\varphi} \Longrightarrow a_{3\varphi} = a_{1\varphi}$$

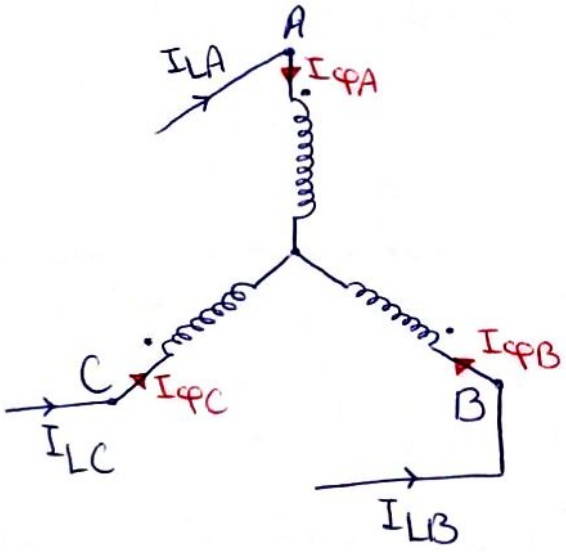
اتصال ستاره - ستاره را به صورت شماتیکی به صورت زیر نمایش می‌دهند:

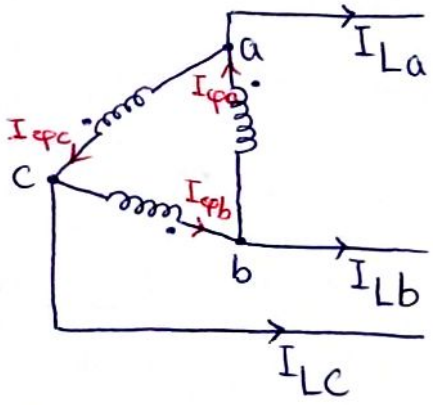


ب) اتصال ستاره - مثلث

2014 05 22







روابط مربوط به سمت ستاره در قسمت الف بررسی شد.

برای سمت مثلث داریم:

در اتصال مثلث ولتاژ خط برابر با ولتاژ فاز است. در نتیجه در اتصال ستاره مثلث نسبت تبدیل سه فاز به صورت زیر بدست می آید:

$$a_{1\varphi} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{|V_{AN}|}{|V_{ab}|}$$

$$a_{3\varphi} = \frac{|V_{AB}|}{|V_{ab}|} = \frac{\sqrt{3}\,|V_{AN}|}{\frac{1}{a_{1\varphi}}|V_{AN}|} = \sqrt{3}\,a_{1\varphi} \Longrightarrow \boxed{a_{3\varphi} = \sqrt{3}\,a_{1\varphi}}$$

براساس kcl در سمت مثلث داریم:

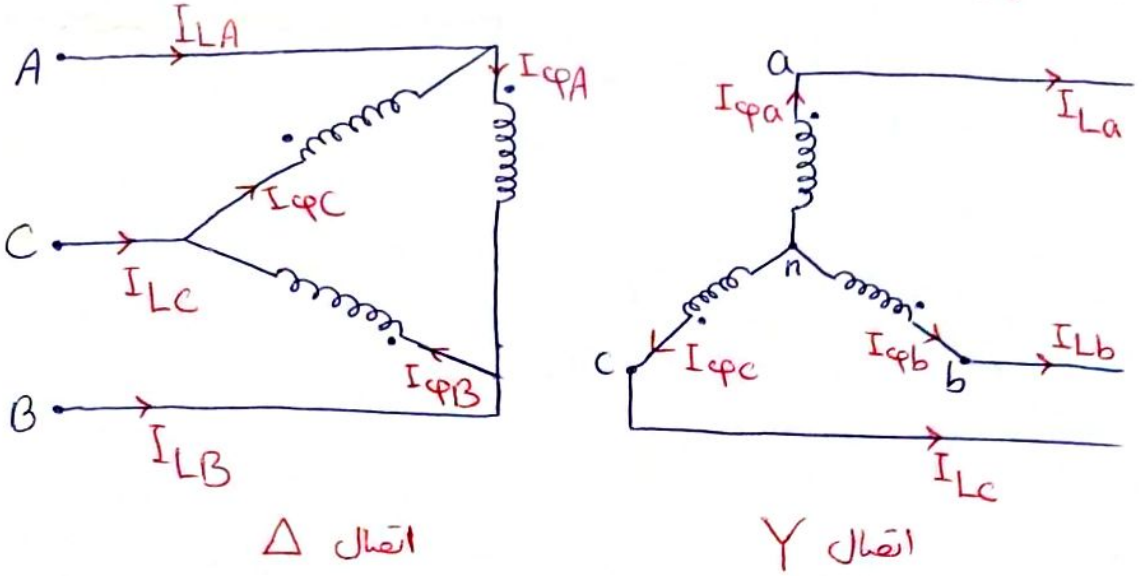
$$\begin{cases} I_{La} = I_{\varphi a} - I_{\varphi c} \\ I_{Lb} = I_{\varphi b} - I_{\varphi a} \\ I_{Lc} = I_{\varphi c} - I_{\varphi b} \end{cases}$$

2014 05 22

اگر
$$\begin{cases} I_{\varphi a} = I_\circ \angle 0 \\ I_{\varphi b} = I_\circ \angle -120 \\ I_{\varphi c} = I_\circ \angle +120 \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} I_{La} = \sqrt{3}\, I_\circ \angle -30 \\ I_{Lb} = \sqrt{3}\, I_\circ \angle -150 \\ I_{Lc} = \sqrt{3}\, I_\circ \angle +90 \end{cases}$$

یعنی در اتصال مثلث جریان خط $\sqrt{3}$ برابر جریان فاز بوده و نسبت به آن 30 درجه عقب تر است.

ج) اتصال مثلث - ستاره:



اتصال Δ اتصال Y

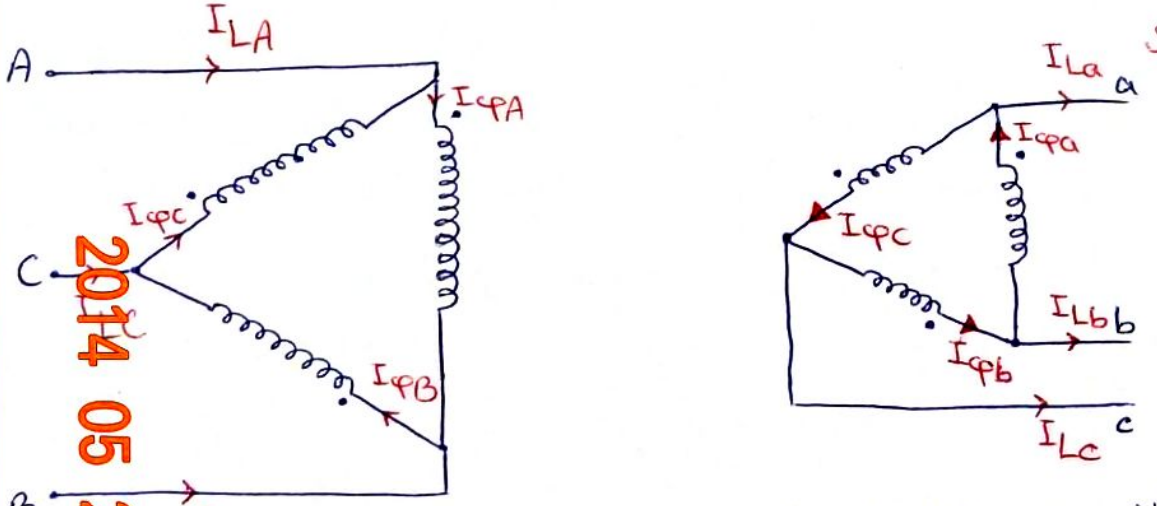
روابط ولتاژ و جریان در طرف های ستاره یا مثلث مشابه مباحث مطرح شده در قسمت های الف و ب می باشد.

نسبت تبدیل سه فاز:

$$a_{1\varphi} = \frac{|V_{AB}|}{|V_{an}|} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$a_{2\varphi} = \frac{|V_{AB}|}{|V_{ab}|} = \frac{|V_{AB}|}{\sqrt{3}|V_{an}|} = \frac{a_{1\varphi}}{\sqrt{3}} \Longrightarrow \boxed{a_{3\varphi} = \frac{a_{1\varphi}}{\sqrt{3}}}$$

د) اتصال مثلث - مثلث



روابط مربوط به ولتاژ و جریان در مثلث ها، مشابه با روابط مربوط به اتصال مثلث در قسمت ب است.

2014 05 22

نسبت تبدیل سه فاز اتصال مثلث - مثلث برابر است با:

$$a_{1\varphi} = \frac{|V_{AB}|}{|V_{ab}|}$$

$$a_{3\varphi} = \frac{|V_{AB}|}{|V_{ab}|} = a_{1\varphi} \Longrightarrow \boxed{a_{3\varphi} = a_{1\varphi}}$$

توان در ترانسفورماتورهای سه فاز:

$$P = 3V_\varphi I_\varphi \cos\varphi$$

$$Q = 3V_\varphi I_\varphi \sin\varphi$$

$$S = P + jQ$$

$$\varphi = \angle V_\varphi - \angle I_\varphi$$

$$\begin{cases} P = \sqrt{3}\, V_L I_L \cos\varphi \\ Q = \sqrt{3}\, V_L I_L \sin\varphi \end{cases}$$

$$|S| = \sqrt{3} V_L I_L$$

V_L: ولتاژ خط

I_L: جریان خط

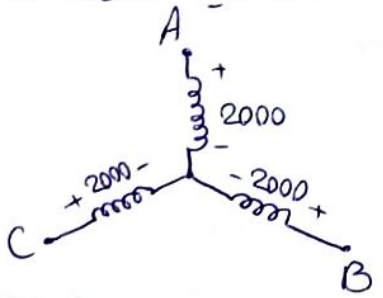
V_φ: ولتاژ فاز

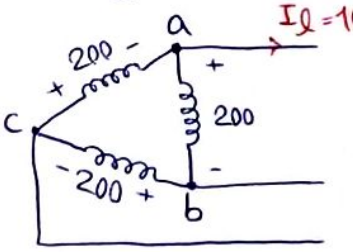
I_φ: جریان فاز

تذکر: در حل مسائل مربوط به ترانسفورماتورهای سه فاز، کمیتهای داده شده خط را تبدیل به کمیتهای فاز نموده و سپس مسأله را مشابه سه ترانسفورماتور تک فاز حل می‌کنیم.

تذکر: معمولاً در مسائل مقادیر ولتاژ و جریان مربوط به خط می‌باشد مگر آنکه صریحاً ذکر گردد این مقادیر مربوط به فاز هستند همچنین توان ذکر شده توان سه فاز است مگر آنکه صریحاً خلاف آن ذکر گردد

مثال: یک بار جریان 100A در ضریب توان 0/8 پس فاز از ثانویه‌ی یک مجموعه از سه ترانسفورماتور تک فاز که به صورت ستاره - مثلث بسته شده‌اند می‌کشد مشخصات هر ترانسفورماتور عبارت است از 60kVA، 2000/200 مطلوب است: الف) قدرت کل مصرفی، ب) جریان نامی خط سمت تغذیه، ج) kVA بار، د) جریان نامی فاز ثانویه، هـ) درصد بار نامی ترانسفورماتور، و) جریان های خط و فاز در اولیه ز) توان نامی مجموعه‌ی کل ترانسفورماتور سه فاز





2014 05 22

الف) $V_L = 200$ ثانویه ، $I_L = I_\ell = 100A$ جریان خط در ثانویه

توان بار
$$\begin{cases} P_\ell = \sqrt{3} V_L I_L \cos\varphi = \sqrt{3} \times 200 \times 100 \times 0.8 = 27.7\ kw \\ Q_\ell = \sqrt{3} V_L I_L \sin\varphi = \sqrt{3} \times 200 \times 100 \left(\sqrt{1-0.8^2}\right) = 26.8\ KVAR \\ |S_\ell| = \sqrt{3} V_L I_L = 34.6\ kVA \end{cases}$$

نکته: توان های فوق، توان مصرفی بار هستند. از آنجا که این توان توسط ترانسفورماتور تأمین می گردد، توان خروجی ترانسفورماتور (توان ثانویه آن) نیز برابر با این مقادیر خواهد بود از آنجا که ترانسفورماتورها ایده آل فرض شده اند توان ورودی و خروجی ترانسفورماتور برابر است. لذا توان ورودی (اولیه) ترانسفورماتور نیز برابر با همین مقادیر می باشد اگر ترانسفورماتور ایده آل نبود، توان ورودی آن برابر می شد با مجموع توان خروجی ترانسفورماتور به اضافه توان اکتیو و راکتیو مصرفی خود ترانسفورماتور.

ب) در قسمت (و) حل شده است.

ج)
$$S_\ell = \sqrt{3} V_L I_L = 34.6\ kVA$$

د)
$$I_{\varphi} \text{ ثانویه} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \text{خط} = 57.74A$$

هـ)
$$I_{\varphi n} \text{ ثانویه} = \frac{60 \times 10^3}{200} = 300\ A$$

$$n = \frac{57.74}{300} = 0.192 = 19.2\%$$

و)
$$I_{\varphi} \text{ اولیه} = 57.74 \times \frac{200}{2000} = 5.77A$$

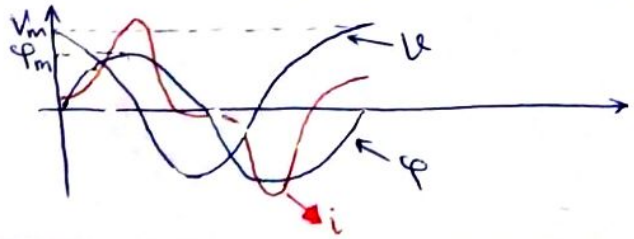
$$I_L = I_\varphi = 5.77A \text{ خط}$$

ز)
$$S_{3\varphi} = 3 S_{1\varphi}$$

$$S_{3\varphi n} = 3 S_{1\varphi n} = 3 \times 60^{kVA} = 180 kVA$$

- بحث پیرامون هارمونیک های ولتاژ و جریان در اتصالات مختلف سه فاز

باتوجه به مباحث مطرح شده در ترانسفورماتور تک فاز، می دانیم اگر یک ولتاژ بدون هارمونیک ($V = V_m \cos\omega t$) به سیم پیچ اولیه اعمال کنیم یک شار بدون هارمونیک ($\varphi = \varphi_m \sin\omega t$) در هسته ایجاد خواهد شد. دیدیم که باتوجه به مشخصه $i-\varphi$ هسته، چنین شاری منجر به یک جریان هارمونیک دار در سیم پیچ می شود



2014 05 22

با توجه به شکل موج متناوب جریان می توان توسط سری فوریه دامنه ی هارمونیک های آن را بدست آورد. چنین شکل موج هایی فقط دارای هارمونیک های فرد هستند. بنابراین می توان نوشت:

$$\begin{cases} i_a = i_1 \sin \omega t + i_3 \sin 3\omega t + i_5 \sin 5\omega t + i_7 \sin 7\omega t \\ i_b = i_1 \sin(\omega t - 120) + i_3 \sin 3(\omega t - 120) + i_5 \sin 5(\omega t - 120) + i_7 \sin 7(\omega t - 120) \\ i_c = i_1 \sin(\omega t + 120) + i_3 \sin 3(\omega t + 120) + i_5 \sin 5(\omega t + 120) + i_7 \sin 7(\omega t + 120) \end{cases}$$

$$i_a = i_1 \sin \omega t + i_3 \sin 3\omega t + i_5 \sin 5\omega t + i_7 \sin 7\omega t$$

$$i_b = i_1 \sin(\omega t - 120) + i_3 \sin 3\omega t + i_5 \sin(5\omega t + 120) + i_7 \sin(7\omega t - 120)$$

$$i_c = i_1 \sin(\omega t + 120) + i_3 \sin 3\omega t + i_5 \sin(5\omega t - 120) + i_7 \sin(7\omega t + 120)$$

- $i_1 \sin \omega t$: سه فاز متعادل با توالی مثبت و فرکانس ω
- $i_3 \sin 3\omega t$: مجموعه سه فاز متعادل نیست
- $i_5 \sin(5\omega t + 120)$: سه فاز متعادل با توالی منفی و فرکانس 5ω برابر
- $i_7 \sin(7\omega t - 120)$: سه فاز متعادل با توالی مثبت و فرکانس 7ω برابر

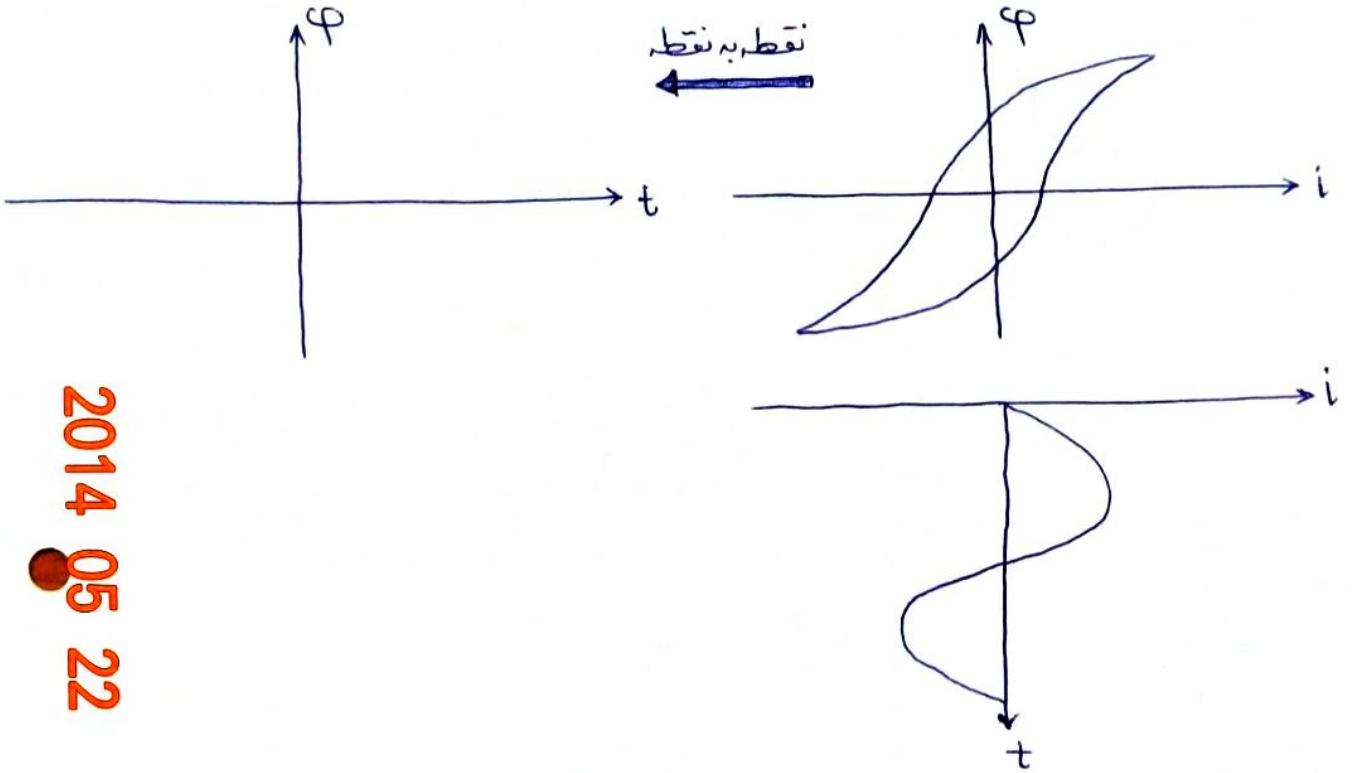
i_1 : دامنه هارمونیک اوّل جریان

i_3 : دامنه هارمونیک سوم جریان

i_5 : دامنه هارمونیک پنجم جریان

i_7 : دامنه هارمونیک هفتم جریان

حال اگر فرض کنیم جریان بدون هارمونیک باشد، آنگاه به کمک مشخصه ی φ-i هسته و به روش نقطه به نقطه می توان منحنی شار برحسب زمان را بدست آورد مشاهده خواهد شد که در این حالت شار دارای هارمونیک می باشد وجود هارمونیک در شار موجب ایجاد هارمونیک در ولتاژ خواهد شد.

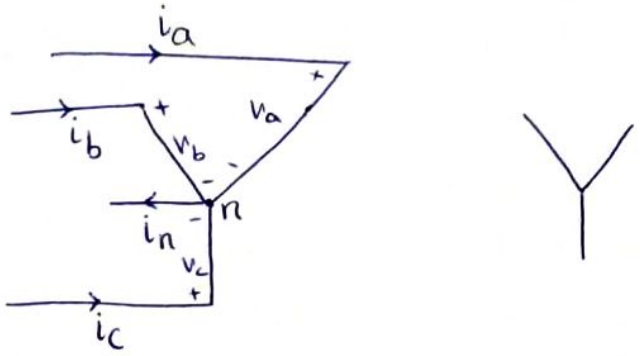


2014 05 22

جملات مشابهی را می توان برای هارمونیک های ولتاژ نیز در نظر گرفت.

از این به بعد برای راحتی فقط هارمونیک های اصلی و سوم جریان یا ولتاژ را در نظر خواهیم گرفت. (رفتار هارمونیک پنجم و هفتم نیز مشابه هارمونیک اصلی می باشد)

- اتصال ستاره - ستاره (Y - Y)



اگر سیم خنثی باز باشد داریم:

$$i_n = 0 \Rightarrow i_a + i_b + i_c = 0$$

اگر فرض کنیم جریان دارای هارمونیک بوده و ولتاژ ها بدون هارمونیک باشند:

$$i_a = i_1 \sin \omega t + i_3 \sin 3\omega t$$

$$i_b = i_1 \sin(\omega t - 120) + i_3 \sin 3\omega t$$

$$i_c = i_1 \sin(\omega t + 120) + i_3 \sin 3\omega t$$

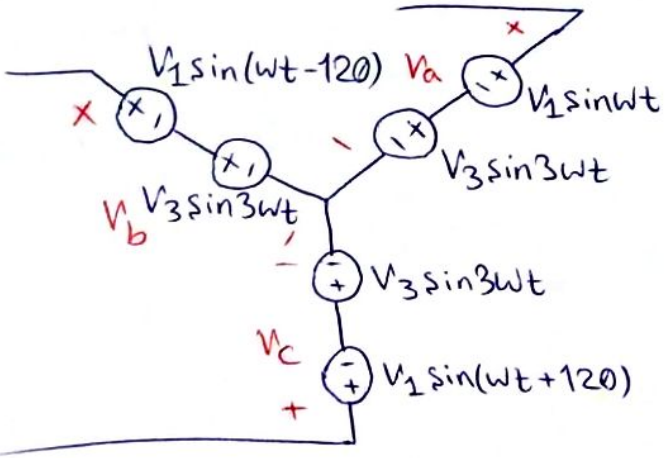
$$\Rightarrow i_a + i_b + i_c = 3 i_3 \sin 3\omega t = 0 \Rightarrow i_3 = 0$$ خلاف فرض

بنابراین جریان بدون هارمونیک است ولذا ولتاژ دارای هارمونیک خواهد بود

$$V_a = V_1 \sin \omega t + V_3 \sin 3\omega t$$

$$V_b = V_1 \sin(\omega t - 120) + V_3 \sin 3\omega t$$

$$V_c = V_1 \sin(\omega t + 120) + V_3 \sin 3\omega t$$



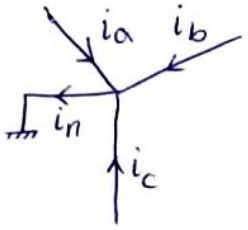
2014 05 22

نکته: در اتصال ستاره اگر ولتاژهای فاز دارای هارمونیک سوّم باشند، ولتاژهای خط بدون هارمونیک هستند.

$$V_{ab} = V_a - V_b = V_1 \sin\omega t - V_1 \sin(\omega t - 120) = \sqrt{3}\, V_1 \sin(\omega t + 30)$$

وجود هارمونیک در ولتاژ قابل تحمل نیست و بایستی راهی برای حل آن بیندیشیم.

برای آنکه ولتاژهای فاز در اتصال ستاره بدون هارمونیک باشند بایستی نقطه‌ی نوترال زمین‌شده باشد و یا از یک اتصال مثلث استفاده نمود. اگر نقطه‌ی نوترال زمین‌شده باشد، آنگاه جریان نقطه‌ی خنثی دیگر صفر نبوده و جریان ها می‌تواند دارای هارمونیک سوّم باشند. در این حالت، ولتاژهای فاز دیگر دارای هارمونیک نخواهد بود



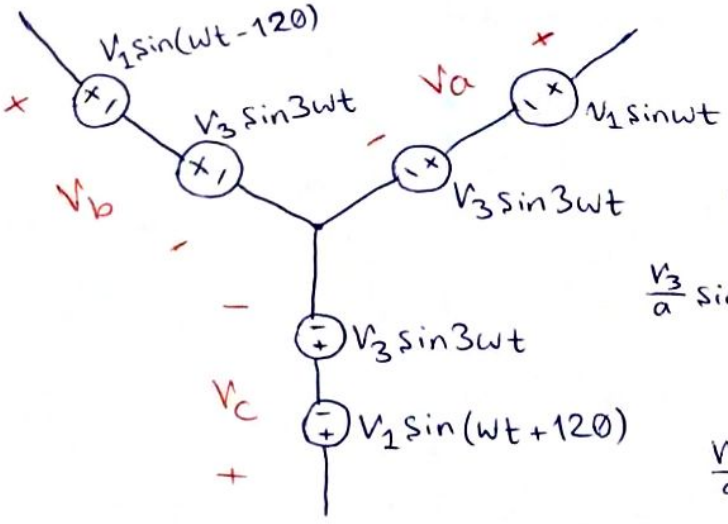
$$\Rightarrow i_a + i_b + i_c = i_x$$

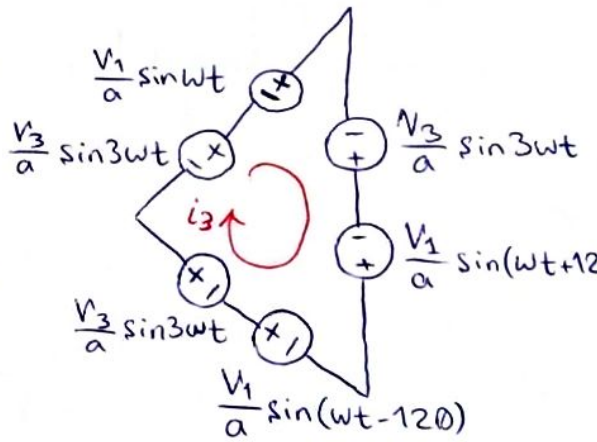
در این صورت اگر جریان ها دارای هارمونیک سوّم باشند، آن گاه این جریان‌ها از طریق نوترال می‌توانند جاری شوند:

$$i_n = 3 i_3 \sin 3\omega t$$

i_3: دامنه‌ی هارمونیک سوّم جریان

روش دیگر استفاده از اتصال مثلث است. اگر ثانویه به صورت مثلث بسته شود و اگر فرض کنیم که ولتاژهای فاز دارای هارمونیک سوّم باشند، در این صورت این ولتاژها با استفاده از نسبت دور به ثانویه متقل خواهند شد و لذا داریم:





حال اگر در اتصال مثلث KVL بزنیم داریم:

$$\underbrace{\frac{V_1}{a}\sin\omega t + \frac{V_1}{a}\sin(\omega t - 120) + \frac{V_1}{a}\sin(\omega t + 120)}_{\text{مجموعه ولتاژ سه فاز متعادل} = 0} + \frac{V_3}{a}\sin 3\omega t + \frac{V_3}{a}\sin 3\omega t + \frac{V_3}{a}\sin 3\omega t = 0$$

2014 05 22

$$\Rightarrow \frac{3V_3}{a}\sin 3\omega t = 0 \Longrightarrow V_3 = 0$$

به‌عبارت دیگر اگر یک اتصال مثلث داشته باشیم، چون V_3 صفراست، ولتاژ دارای هارمونیک نخواهد بود در این حالت جریان هارمونیک سوم در مثلث به صورت گردشی ایجاد خواهد شد. (اگر یک ولتاژ هارمونیک سوم با دامنه‌ی بسیار ضعیف داشته باشیم، هارمونیک سوم جریان شدیدی را در اتصال مثلث ایجاد می‌کند که تنها امپدانس کوچک سیم‌پیچ‌های مثلث آن را محدود می‌کند. در نتیجه با جاری شدن جریان هارمونیک سوم در مثلث، ولتاژهای فاز بدون هارمونیک خواهند شد.

اتصال Y Y (ستاره - ستاره زمین شده)

در این اتصال ولتاژهای فاز بدون هارمونیک بوده و جریان‌ها دارای هارمونیک سوم هستند که از نوترال مسیر خود را می‌بندند.

اتصال ستاره مثلث Δ Y و مثلث ستاره Y Δ :

بدلیل دارا بودن یک اتصال مثلث، این اتصالات دارای ولتاژهای فاز بدون هارمونیک هستند. زیرا جریان هارمونیک سوم گردشی در اتصال مثلث جاری می‌گردد

اتصال مثلث - مثلث Δ Δ :

در این اتصال نیز ولتاژهای فاز بدلیل اتصال مثلث بدون هارمونیک هستند.

نکته: اتصال مثلث در سمت فشار قوی موجب افزایش هزینه ساخت بدلیل افزایش سطح عایق‌بندی را به دنبال دارد. از این رو معمولاً در ترانسفورماتورهایی با ولتاژ خیلی زیاد اتصال مثلث را در سمت فشار ضعیف استفاده می‌کنند.

نکته: معمولاً در اتصال ستاره ستاره، از یک سیم‌پیچ مثلث برای رفع هارمونیک سوم استفاده می‌شود از این سیم‌پیچ سوم (ثالثیه) که دارای ولتاژ کوچکی است معمولاً برای تغذیه داخل پست‌های فشار قوی نیز استفاده می‌گردد.

اتصال Δ Y Y

تغذیه‌ی سه‌فاز به کمک ترانسفورماتور تک‌فاز:

① روش اتصال مثلث باز - مثلث باز V V

② روش اتصال ستاره باز - مثلث باز

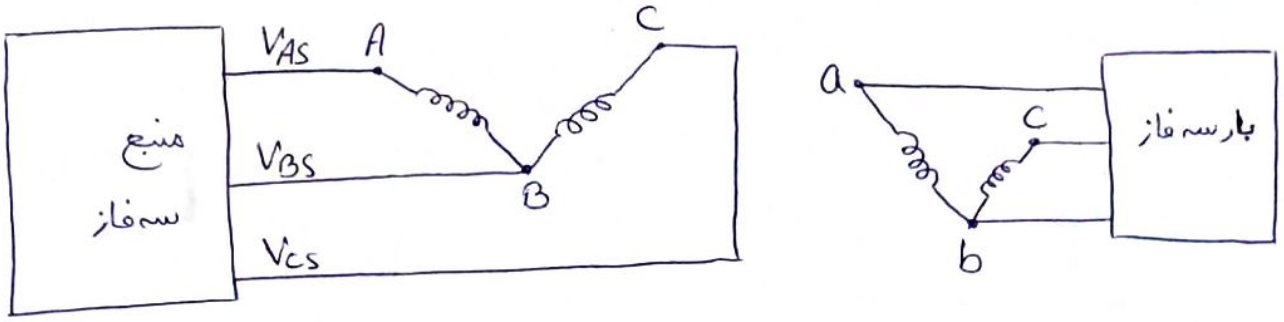
③ روش اتصال اسکات سه‌فاز

گاهی اوقات لازم است به کمک ترانسفورماتور تک‌فاز بتوانیم یک بار سه‌فاز را از طریق یک منبع سه‌فاز تغذیه کنیم (مثلاً ممکن است یکی از فازها دچار خرابی شده و در حال تعمیر باشد.)

الف - اتصال مثلث باز - مثلث باز:

فرض کنیم یک منبع سه‌فاز با ولتاژ ثابت داشته باشیم و آن را به یک اتصال V V اعمال کنیم.

2014 05 22



ولتاژهای منبع

$$\begin{cases} V_{ABS} = V_0 \sin \omega t \\ V_{BCS} = V_0 \sin(\omega t - 120) \\ V_{CAS} = V_0 \sin(\omega t + 120) \end{cases}$$

$$\Longrightarrow \text{ولتاژهای سمت اولیه} \begin{cases} V_{AB} = V_{ABS} = V_0 \sin \omega t \\ V_{BC} = V_{BCS} = V_0 \sin(\omega t - 120) \end{cases}$$

$$\Longrightarrow \text{ولتاژهای سمت ثانویه} \begin{cases} V_{ab} = \dfrac{V_{AB}}{a} = \dfrac{V_0}{a} \sin \omega t \\ V_{bc} = \dfrac{V_{BC}}{a} = \dfrac{V_0}{a} \sin(\omega t - 120) \end{cases}$$

بدست می‌آید:

$$V_{ab} + V_{bc} + V_{ca} = 0$$

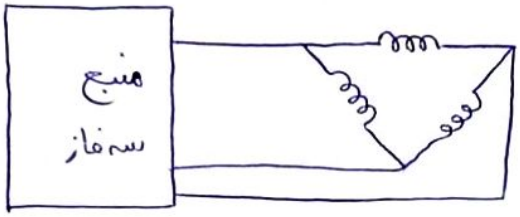
$$\Longrightarrow V_{ca} = -V_{ab} - V_{bc} = \frac{V_0}{a} \sin(\omega t + 120)$$

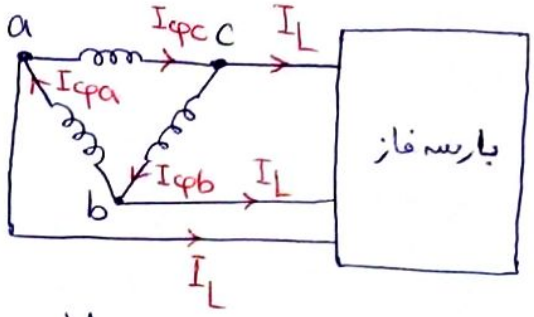
بنابراین هرچند از دو ترانسفورماتور استفاده می‌شود، ولی مشاهده می‌گردد که ولتاژهای خط در ثانویه (V_{ab} ، V_{bc} و V_{ca}) تشکیل ولتاژهای سه‌فاز متعادل می‌دهند که می‌توان از آن‌ها برای تغذیه‌ی بار سه‌فاز استفاده کرد

اگر از سه ترانسفورماتور تک‌فاز استفاده می‌کردیم، حداکثر توان قابل انتقال آن‌ها برابر بود با $S_{3\phi} = 3S_{1\phi}$ (ضریب بار هم‌ارز)

حال که از دو ترانسفورماتور استفاده می‌کنیم تصور می‌شود که حداکثر توان قابل انتقال دو برابر توان نامی هریک از ترانسفورماتورها می‌گردد. ولی همانگونه که بعداً خواهیم دید حداکثر توان اکتیو قابل انتقال از این مقدار کمتر است به‌عنوان مثال، یک بار اهمی را در نظر می‌گیریم. اگر این بار توسط یک اتصال $\Delta\Delta$ تغذیه می‌شد داشتیم:

2014 05 22





$$\begin{cases} V_{ab} = \frac{V_\circ}{a} \angle 0 \\ V_{bc} = \frac{V_\circ}{a} \angle -120 \\ V_{ca} = \frac{V_\circ}{a} \angle +120 \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} V_{an} = \frac{V_\circ}{\sqrt{3}\,a} \angle -30 \\ V_{bn} = \frac{V_\circ}{\sqrt{3}\,a} \angle -150 \\ V_{cn} = \frac{V_\circ}{\sqrt{3}\,a} \angle +90 \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{La} = I_L \angle -30 \\ I_{Lb} = I_L \angle -150 \\ I_{Lc} = I_L \angle +90 \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} I_{\varphi a} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \angle 0 \\ I_{\varphi b} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \angle -120 \\ I_{\varphi c} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \angle +120 \end{cases}$$

حال فرض می‌کنیم در ولتاژ نامی حداکثر جریان نامی از خطوط و فازها کشیده می‌شود.

$$\begin{cases} I_{\varphi a} = I_{\varphi n} \angle 0 \\ I_{\varphi b} = I_{\varphi n} \angle -120 \\ I_{\varphi c} = I_{\varphi n} \angle 120 \end{cases}$$

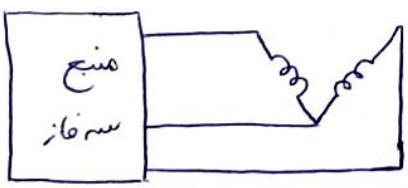
$I_{\varphi n}$: جریان نامی هر فاز ترانسفورماتور

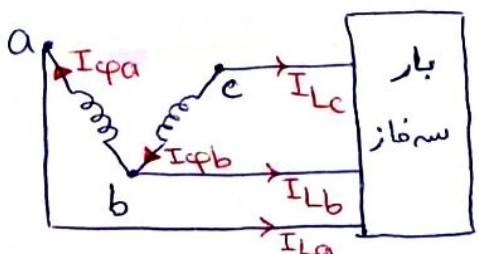
در این حالت حداکثر توان قابل انتقال توسط اتصال مثلث متقارن برابر است با:

$$P_{3\varphi} = P_a + P_b + P_c = 3\,\frac{V_\circ}{a}\,I_{\varphi n} \;,\; Q = Q_a + Q_b + Q_c = 0$$

(ولتاژ و جریان فاز هریک از ترانسفورماتورها هم فاز هستند.)

حال اگر بار سه فاز اهمی را توسط اتصال VV تغذیه کنیم داریم:





2014 05 22

ولتاژها مثل قبل هستند :

$$\begin{cases} V_{ab} = \frac{V_0}{a} \angle 0 \\ V_{bc} = \frac{V_0}{a} \angle -120^\circ \\ V_{ca} = \frac{V_0}{a} \angle +120^\circ \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} V_{an} = \frac{V_0}{\sqrt{3}a} \angle -30 \\ V_{bn} = \frac{V_0}{\sqrt{3}a} \angle -150 \\ V_{cn} = \frac{V_0}{\sqrt{3}a} \angle +90^\circ \end{cases}$$

وجریان‌ها به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{cases} I_{La} = I_L \angle -30 \\ I_{Lb} = I_L \angle -150 \\ I_{Lc} = I_L \angle +90 \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} I_{\varphi a} = I_{La} = I_L \angle -30 \\ \\ \\ I_{\varphi b} = -I_{Lc} = I_L \angle -90 \end{cases}$$

برای اینکه توان حداکثر باشد ، باید جریان نیز حداکثر گردد . ازاین رو فرض می‌کنیم جریان فازها برابر با جریان نامی هریک ازترانسفورماتورها باشد:

$$\begin{cases} I_{\varphi a} = I_{\varphi n} \angle -30 \\ \\ I_{\varphi b} = I_{\varphi n} \angle -90 \end{cases}$$

دراین صورت حداکثر توان قابل انتقال برابراست با :

$$P = P_a + P_b = \frac{V_0}{a} I_{\varphi n} \cos(0-(-30)) + \frac{V_0}{a} I_{\varphi n} \cos(-120-(-90))$$

$$= \frac{V_0}{a} I_{\varphi n} \cos 30 + \frac{V_0}{a} I_{\varphi n} \cos(-30)$$

$$\Longrightarrow P = \sqrt{3} \frac{V_0}{a} I_{\varphi n}$$

مشاهده می‌گردد حداکثر توان قابل انتقال توسط اتصال V V کمتر از دوبرابر توان نامی (حداکثر توان) یک ترانسفورماتور تک فاز است.

$$\text{ضریب بهره‌برداری} = \frac{\text{حداکثر توان قابل انتقال}}{\text{توان نامی نصب شده}} = \frac{\sqrt{3} \frac{V_0}{a} I_{\varphi n}}{2 \frac{V_0}{a} I_{\varphi n}}$$

$$\Longrightarrow \text{ضریب بهره‌برداری} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 86.6\%$$

علت کمتر شدن توان ماکزیمم خروجی ، تبادل توان راکتیو بین دو ترانسفورماتور است :

توان راکتیو انتقالی ترانسفورماتور a

$$Q_a = \frac{V_0}{a} I_{\varphi n} \sin(0-(-30)) = \frac{1}{2} \frac{V_0}{a} I_{\varphi n}$$

توان راکتیو انتقالی ترانسفورماتور b

$$Q_b = \frac{V_0}{a} I_{\varphi n} \sin(-120-(-90)) = -\frac{1}{2} \frac{V_0}{a} I_{\varphi n}$$

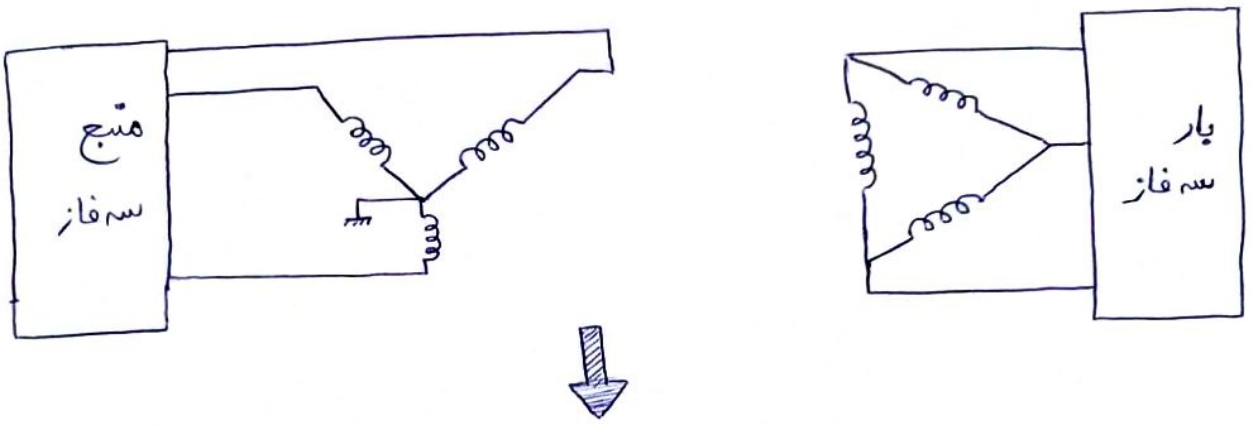
2014 05 22

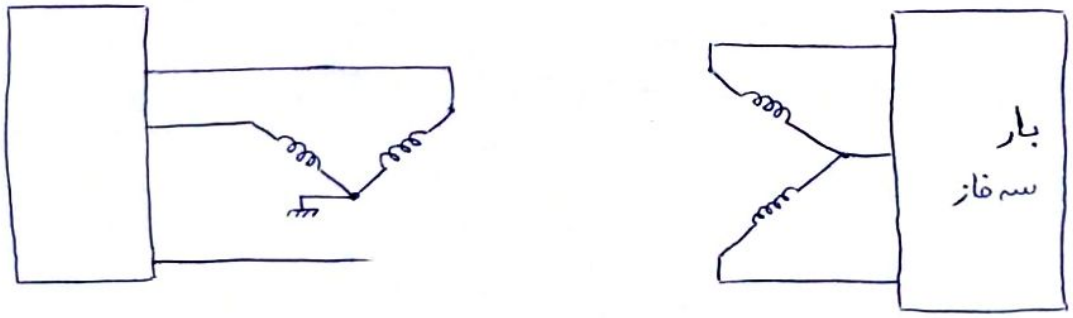
یعنی ترانسفورماتور a توان راکتیو Q_a را تولید می‌کند و ترانسفورماتور b همین توان راکتیو را مصرف می‌کند این تبادل توان راکتیو موجب کمترشدن حداکثر توان اکتیو قابل انتقال از توان نصب شده می باشد.

$$\frac{\text{حداکثر توان اتصال } VV}{\text{حداکثر توان اتصال } \Delta\Delta} = \frac{\sqrt{3}\,\frac{V_0}{a} I_{\varphi n}}{3\,\frac{V_0}{a} I_{\varphi n}} = \frac{\sqrt{3}}{3} = 57.7\,\%$$

ب) اتصال ستاره باز مثلث باز :

اگر یکی از ترانسفورماتورهای اتصال ΔY را برداریم ، داریم :

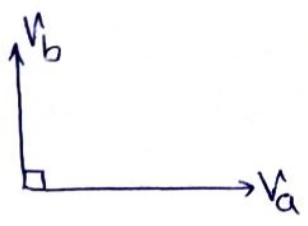




اصول کار این اتصال مشابه با اتصال VV می باشد. با این تفاوت که در سمت اولیه جریان یکی از خطوط صفر است و همچنین جریانی معادل با جریان خط از سیم نوترال کشیده می‌شود سطح مقطع این سیم بایستی به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد تا بتواند این جریان را از خود عبور دهد.

اتصال اسکات سه فاز :

برای بررسی این اتصال، ابتدا اتصال اسکات دوفاز را بررسی می کنیم. در برخی از کاربردها ، نیاز به ولتاژهای دوفاز می باشد، ولتاژهای دوفاز متعادل به صورت زیر تعریف می شود :



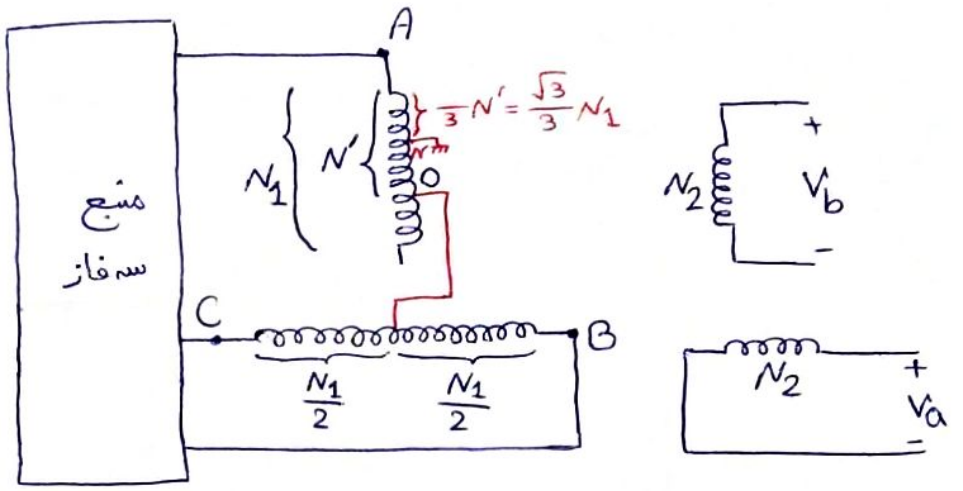
$$V_a = V_0 \angle 0$$

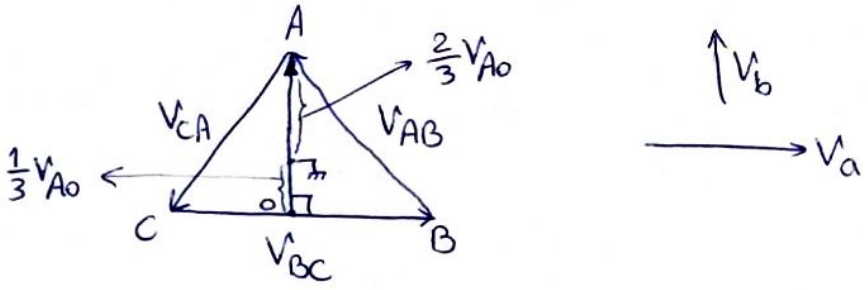
$$V_b = V_0 \angle 90$$

2014 05 22

در اتصال اسکات دوفاز ، ولتاژ سه‌فاز متعادل توسط دو ترانسفورماتور تک فاز کاملاً مشابه (با نسبتهای دور $\frac{N_1}{N_2}$) تبدیل به ولتاژ دوفاز متعادل می‌گردد

$N' = \frac{\sqrt{3}}{2} N_1$





$$V_{AB} = V_\circ \angle 120$$
$$V_{BC} = V_\circ \angle 0$$
$$V_{CA} = V_\circ \angle -120$$

$$\Longrightarrow \begin{cases} V_a = \frac{N_2}{N_1} V_{BC} = \frac{N_2}{N_1} V_\circ \angle 0 \\ V_b = \frac{N_2}{N'} V_{AO} = \frac{N_2}{N'} \frac{\sqrt{3}}{2} V_\circ \angle 90^\circ \end{cases}$$

$$V_{AO} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_\circ \angle 90$$

V_a و V_b دوفاز متعادل $\Longrightarrow \frac{N_2}{N_1} V_\circ = \frac{N_2}{N'} \frac{\sqrt{3}}{2} V_\circ \Longrightarrow$ $\boxed{N' = \frac{\sqrt{3}}{2} N_1 = 0.87 N_1}$

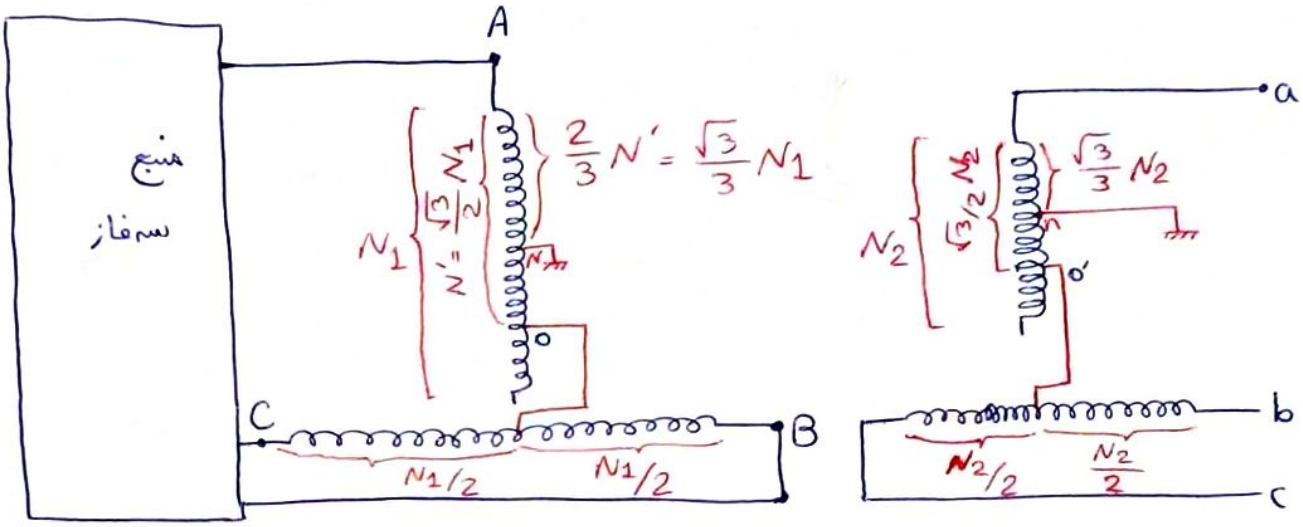
$$\Longrightarrow |V_a| = |V_b|$$

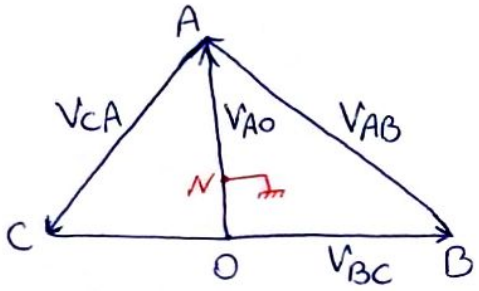
نقطه‌ی نوترال وسط مشخص است. این نقطه با توجه به شکل از سر A به اندازه‌ی $\frac{\sqrt{3}}{3} N_1$ دور پایین‌تر است.

$$\frac{2}{3} N' = \frac{2}{3} \frac{\sqrt{3}}{2} N_1 = \frac{\sqrt{3}}{3} N_1 = 0.58 N_1$$

در اتصال اسکات (اتصال T اسکات) سه‌فاز ، اتصال الکتریکی ثانویه نیز مثل اولیه است . در این حالت خروجی نیز تشکیل ولتاژ سه‌فاز متعادل می‌دهد:

2014 05 22





مزیت اتصال اسکات سه‌فاز آن است که می‌توانیم به کمک دو ترانسفورماتور تک‌فاز، ولتاژ سه‌فاز متعادل را تولید بار دهیم. مزیت این اتصال نسبت به اتصال V V آن است که می‌توانیم یک نقطه نوترال را هم در اولیه و هم در ثانویه داشته باشیم.

2014 05 22

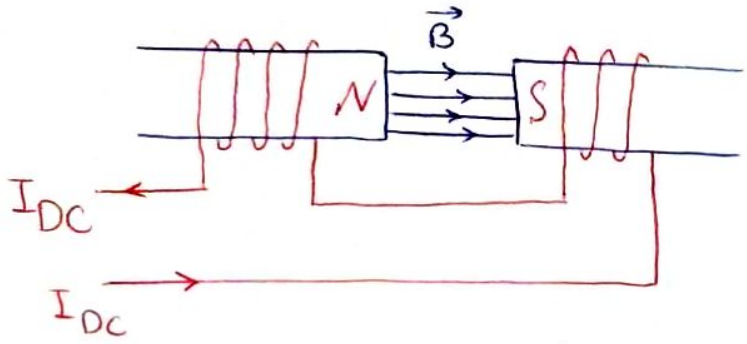
فصل ۲

موتور القایی (موتور آسنکرون)

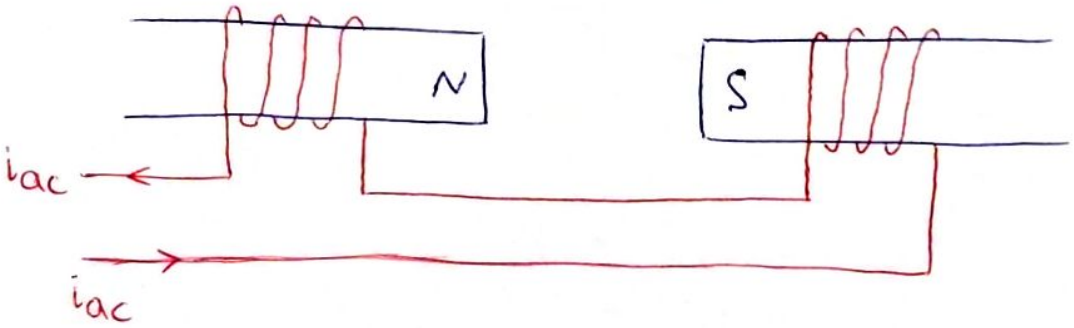
Induction Motor (Asynchronous Motor)

انواع میدان مغناطیسی را می‌توان به صورت زیر تقسیم بندی نمود :

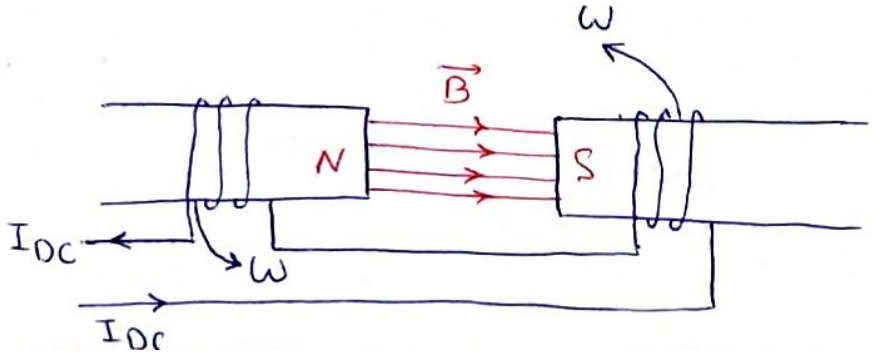
① - میدان ساکن با زمان :



② - میدان ساکن متغیر با زمان (میدان ضربانی) :



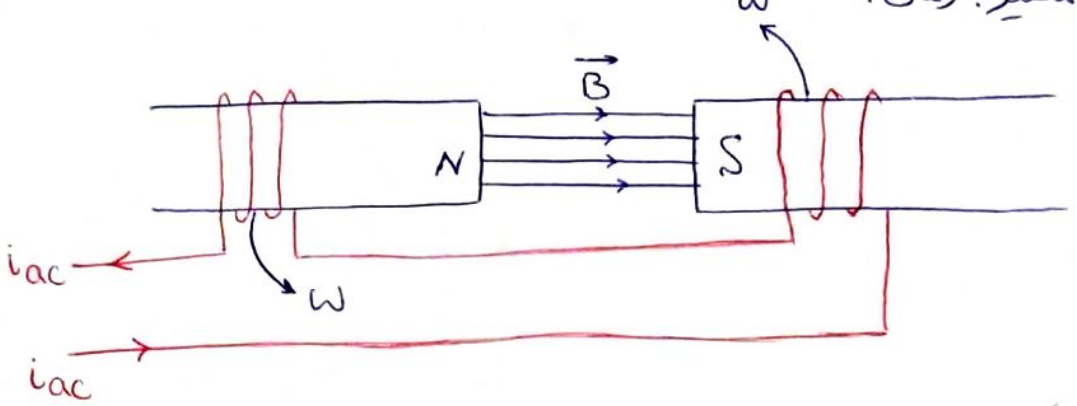
③ - میدان دوار ثابت :



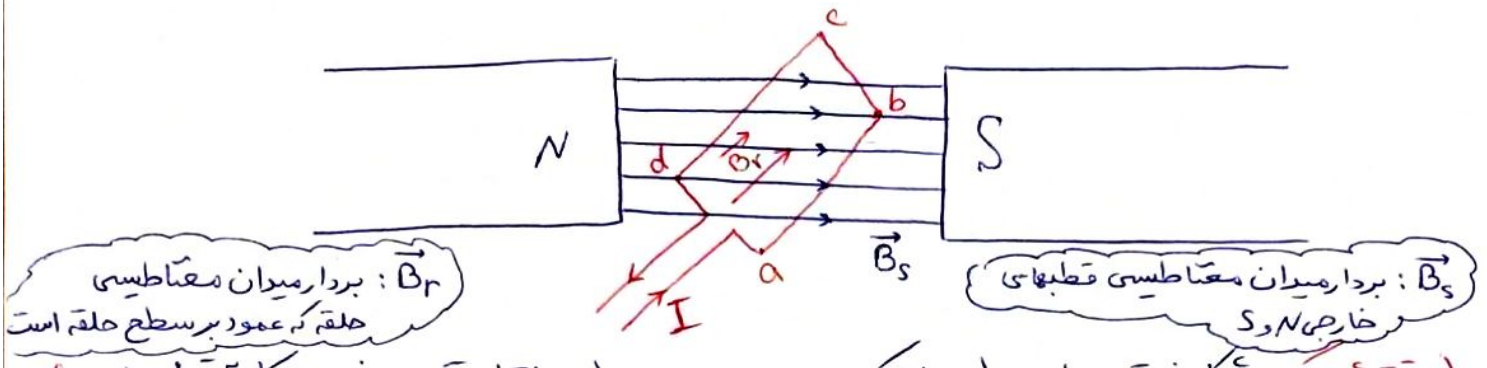
هسته را با سرعت مکانیکی ω می چرخانیم.

2014 05 22

④ - میدان دوّار متغیر با زمان :



اگر در یک میدان ساکن ثابت با زمان یک حلقه‌ی حامل جریان داشته باشیم برآن گشتاوری وارد می‌شود که آن را می‌چرخاند. این گشتاور القایی را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد :

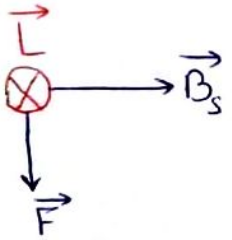


(دقت شود که در شکل فوق بردار سطح حلقه که برداری عمود بر سطح حلقه است در صفحه‌ی کاغذ قرار دارد.)

گشتاور القایی کل برابر با گشتاور وارد شده بر تک تک اضلاع حلقه سیم پیچ است.

$$\tau_{ind} = \tau_{ab} + \tau_{bc} + \tau_{cd} + \tau_{da}$$

الف) ضلع ab :

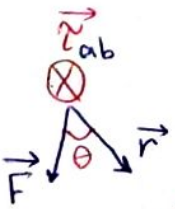


$$\vec{F} = I\vec{L} \times B_s$$

$$|\vec{F}| = ILB_s$$

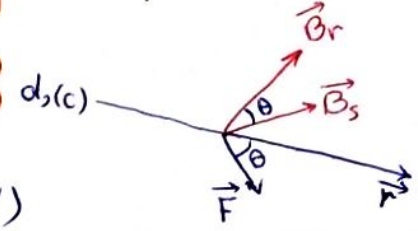
$$\tau_{ab} = \vec{r} \times \vec{F}$$

r: بردار شعاعی از مرکز حلقه تا ضلع ab :



$$|\tau_{ab}| = |\vec{r}||\vec{F}|\sin\theta$$

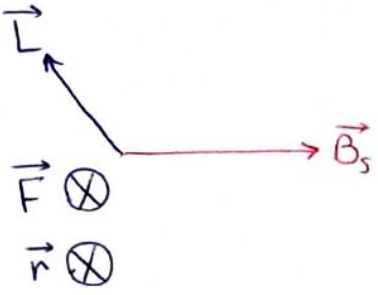
$$|\tau_{ab}| = rILB_s\sin\theta$$



θ : زاویه‌ی بین بردار $\vec{B}_r$ و $\vec{B}_s$ ⟵ - - - -

2014 05 22

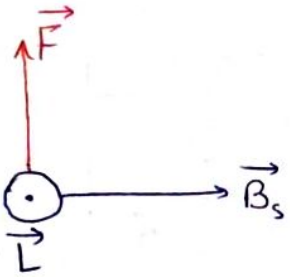
ب) ضلع bc :



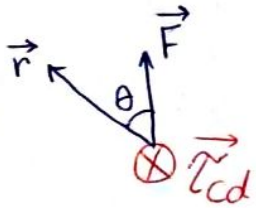
چون بردار $\vec{r}$ و $\vec{F}$ هم راستا هستند داریم:

$$\tau_{bc} = \vec{r} \times \vec{F} = 0$$

ج) ضلع cd :



$$|\vec{F}| = ILB_s$$



$$\vec{\tau}_{cd} = \vec{r} \times \vec{F}$$

$$|\vec{\tau}_{cd}| = rILB_s \sin\theta$$

د) ضلع da : مشابه ضلع bc داریم:

$$\vec{\tau}_{da} = 0$$

بنابراین گشتاور کل برابر است با:

$$|\vec{\tau}_{ind}| = 2rILB_s \sin\theta$$

بردار درون سو ↗

از آنجا که B_r متناسب است با I داریم:

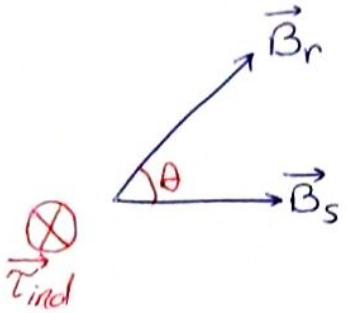
$$\rightarrow |\vec{\tau}_{ind}| = kB_rB_s \sin\theta$$

k : ضریبی وابسته به ساختار حلقه

همچنین با توجه به این فرمول و درون سو بودن گشتاور می‌توانیم بنویسیم :

$$\vec{\tau}_{ind} = k\vec{B}_r \times \vec{B}_s$$

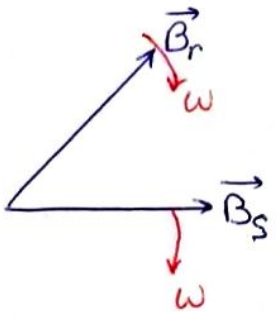
2014 05 22



یعنی گشتاور وارد برحلقه عبارت است از یک ضریب k در ضرب برداری بردار میدان مغناطیسی حلقه در بردار میدان مغناطیسی استاتور. این گشتاور دوست دارد حلقه را طوری بچرخاند که B_r و B_s را هم جهت کند

اگر این دو بردار هم جهت باشند داریم: $\theta = 0 \longleftarrow \tau_{ind} = 0$

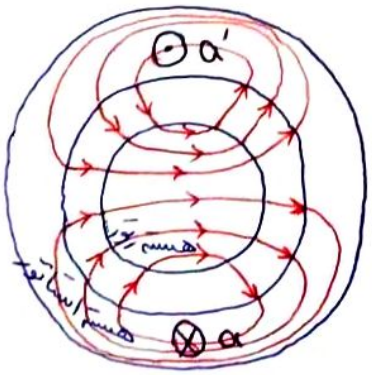
درماشین های دوار این حلقه سوار بر رتور است. لذا گشتاور عملاً به رتور وارد می‌شود و آن را می‌چرخاند حلقه بعد از رسیدن θ به صفر و صفرشدن گشتاور از حرکت باز خواهد ایستاد. برای ایجاد یک حرکت چرخشی پایدار، می‌توانیم B_s را خودمان بچرخانیم. در این حالت حلقه و رتور طوری می چرخند که B_r خود را با B_s هم جهت کند ولذا رتور در جهت چرخش B_s خواهد چرخید.



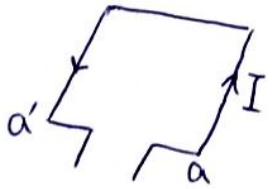
ازاین رو به بررسی نحوه ی ایجاد میدان مغناطیسی دوار توسط استاتور می پردازیم:

✓✓ تولید میدان مغناطیسی دوار:

شکل زیر را در نظر می گیریم:

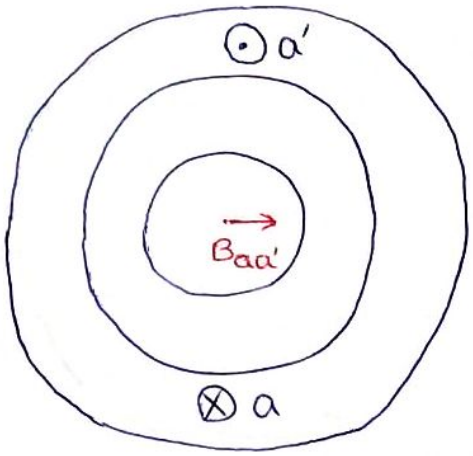


aa': سیم پیچ فاز a استاتور



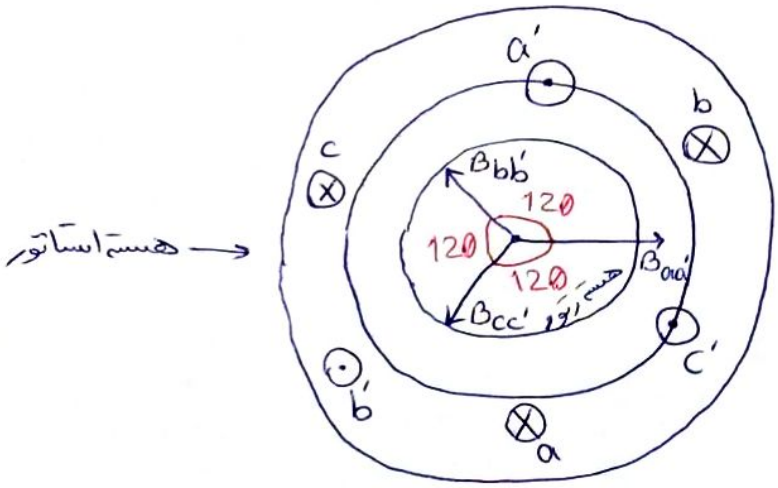
میدان مغناطیسی سیم پیچ aa' را به صورت شماتیکی به صورت زیر نمایش می دهند:

2014 05 22



2014 05 22

اگر یک سیستم سه فاز متعادل از جریان های الکتریکی را به سه دسته سیم پیچ یکسان که به لحاظ مکانیکی با اختلاف فاز 120 درجه نسبت به هم نصب شده اند اعمال کنیم (مطابق با شکل زیر) خواهیم دید که یک میدان دوار مغناطیسی در فاصله ی هوایی ایجاد می شود :



$$i_{aa'} = i_m \sin wt$$

$$i_{bb'} = i_m \sin(wt - 120)$$

$$i_{cc'} = i_m \sin(wt + 120)$$

این جریان ها، تولید شارهای مغناطیسی $B_{aa'}$ ، $B_{bb'}$ و $B_{cc'}$ درجهت های نشان داده شده درشکل خواهند نمود

$$B_{aa'} = B_m \sin wt \angle 0$$

$$B_{bb'} = B_m \sin(wt - 120) \angle +120$$

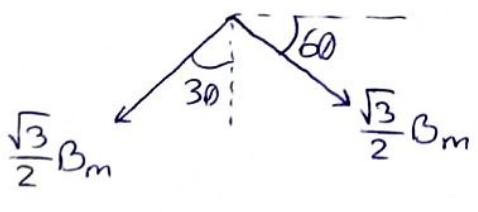
$$B_{cc'} = B_m \sin(wt + 120) \angle -120$$

(-120 ↑ زوایای مکانیکی ، +120 ↑ زوایای الکتریکی)

نحوه ی تولید شار دوار مغناطیسی را می توان درلحظات زمانی مختلف به صورت زیر بررسی نمود :

الف) $wt = 0$ (یا $t = 0$)

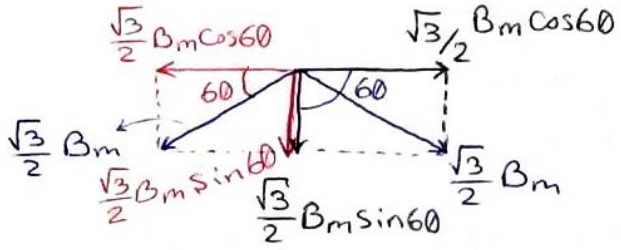
$$\Rightarrow \begin{cases} B_{aa'} = 0 \\ B_{bb'} = B_m \sin(-120) \angle +120 = -\frac{\sqrt{3}}{2} B_m \angle +120 \\ B_{cc'} = B_m \sin(120) \angle -120 = \frac{\sqrt{3}}{2} B_m \angle -120 \end{cases}$$



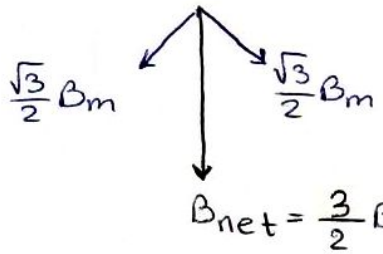
2014 05 22

شار کل مجموع سه شار تولید شده $B_{aa'}$ ، $B_{bb'}$ ، $B_{cc'}$ است.

شار کل فاصله‌ی هوایی $B_{net} = B_{aa'} + B_{bb'} + B_{cc'}$



$\Rightarrow$

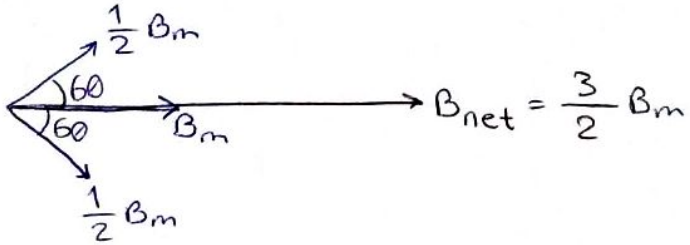


$$B_{net} = 2\,\frac{\sqrt{3}}{2}B_m \sin 60 = \frac{3}{2}B_m$$

$$B_{net} = \frac{3}{2}B_m \angle -90^\circ$$

ب) $\omega t = \frac{\pi}{2}$ $\left(t = \frac{\pi}{2\omega}\right.$ یا $\left.\right)$

$$\Rightarrow \begin{cases} B_{aa'} = B_m \angle 0 \\ B_{bb'} = B_m \sin(-30) \angle +120 = -\frac{1}{2}B_m \angle +120 \\ B_{cc'} = B_m \sin(210) \angle -120 = -\frac{1}{2}B_m \angle -120 \end{cases}$$



$$B_{net} = B_m + 2 \times \frac{1}{2}B_m \cos 60 = \frac{3}{2}B_m$$

$$B_{net} = \frac{3}{2}B_m \angle 0$$

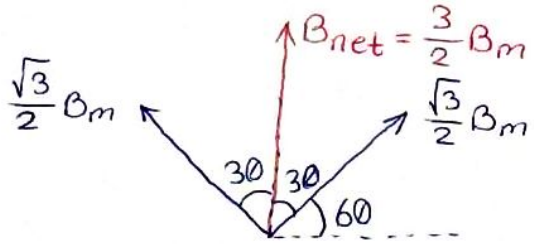
2014 05 22

ج) $\omega t = \pi$ (یا $t = \frac{\pi}{\omega}$)

$B_{aa'} = 0$

$B_{bb'} = B_m \sin(+60) \angle +120 = +\frac{\sqrt{3}}{2} B_m \angle +120$

$B_{cc'} = B_m \sin(300) \angle -120 = \frac{-\sqrt{3}}{2} B_m \angle -120$

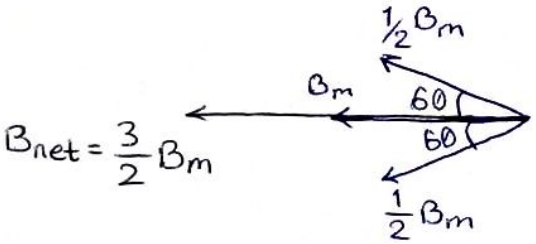


$B_{net} = 2 \frac{\sqrt{3}}{2} B_m \cos 30 = \frac{3}{2} B_m$

$B_{net} = \frac{3}{2} B_m \angle +90$

د) $\omega t = \frac{3\pi}{2}$ (یا $t = \frac{3\pi}{2\omega}$)

$$\begin{cases} B_{aa'} = -B_m \angle 0 \\ B_{bb'} = B_m \sin 150 \angle +120 = \frac{1}{2} B_m \angle +120 \\ B_{cc'} = B_m \sin(390) \angle -120 = \frac{1}{2} B_m \angle -120 \end{cases}$$



$B_{net} = B_m + 2 \frac{1}{2} B_m \cos 60 = \frac{3}{2} B_m$

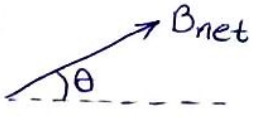
$B_{net} = \frac{3}{2} B_m \angle +180$

ه) $\omega t = 2\pi$ ($t = \frac{2\pi}{\omega}$)

با توجه به طی شدن یک سیکل کامل، همان B_{net} حالت الف حاصل می‌شود

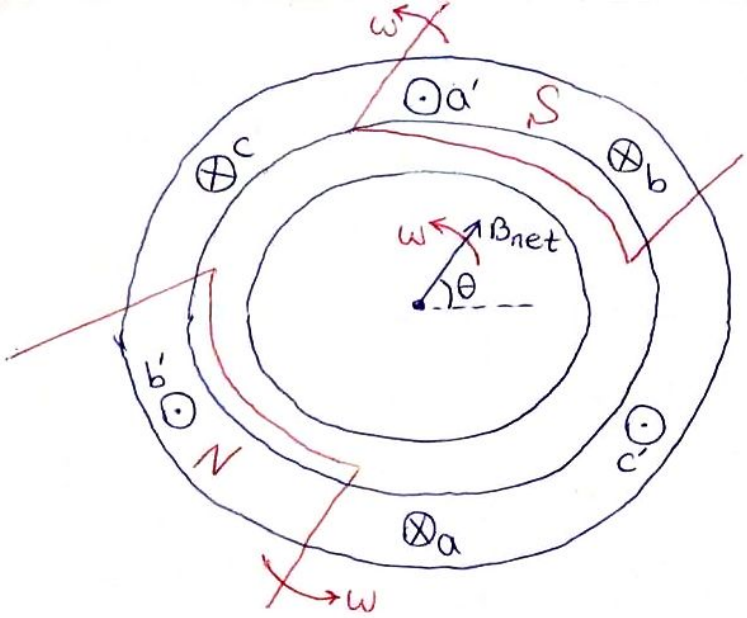
$B_{net} = \frac{3}{2} B_m \angle -90$

✓✓ نتیجه‌گیری: مشاهده می‌شود با اعمال یک دستهٔ جریان سه فاز متعادل به سه سیم‌پیچ که دارای اختلاف فاز مکانیکی 120 نسبت به یکدیگر هستند، یک میدان دوار مغناطیسی در فاصلهٔ هوایی شکل می‌گیرد که با سرعت زاویه‌ای ω و با دامنهٔ $\frac{3}{2} B_m$ در جهت پادساعتگرد می‌چرخد.



$\theta = \omega t + \theta_0$

2014 05 22



اثبات ریاضی میدان دوار مغناطیسی:

$$B_{net} = B_{aa'} + B_{bb'} + B_{cc'}$$

$$B_{net} = B'_m \sin\omega t \angle 0 + B_m \sin(\omega t - 120) \angle +120 + B_m \sin(\omega t + 120) \angle -120$$

$$\Rightarrow B_{net} = \left[B_m \sin\omega t\, a_x\right] + \left[B_m \sin(\omega t - 120)\overset{\cos 120}{\widetilde{a_x}} + B_m \sin(\omega t - 120)\sin 120\, a_y\right]$$

$$+ \left[B_m \sin(\omega t + 120)\cos(-120)\, a_x + B_m \sin(\omega t + 120)\sin(-120) a_y\right]$$

$$\Rightarrow B_{net} = a_x\left[B_m \sin\omega t - \frac{1}{2}B_m \sin(\omega t - 120) - \frac{1}{2}B_m \sin(\omega t + 120)\right]$$

$$+ a_y\left[\frac{\sqrt{3}}{2}B_m \sin(\omega t - 120) - \frac{\sqrt{3}}{2}B_m \sin(\omega t + 120)\right]$$

$$\Rightarrow B_{net} = \frac{3}{2}B_m \sin\omega t\, a_x - \frac{3}{2}B_m \cos\omega t\, a_y = \frac{3}{2}B_m \angle\underbrace{\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)}_{\text{زاویه‌ی مکانیکی}}$$

رابطه‌ی فوق نشان می‌دهد که دامنه‌ی B_{net} ثابت و برابر $\frac{3}{2}B_m$ است و زاویه‌ی مکانیکی با سرعت زاویه‌ای ω در حال افزایش است. (افزایش زاویه‌ی مکانیکی یعنی چرخش مکانیکی)

نکات مهم:

1- اگر جای دو سیم پیچ عوض شود آن گاه باز هم میدان دوار مغناطیسی با دامنه‌ی ثابت $\frac{3}{2}B_m$ و سرعت زاویه‌ای ω خواهیم داشت ولی این بار جهت چرخش معکوس می‌شود

2- اگر جریان دو سیم پیچ عوض شود (یا توالی سه فاز متقی به سیم پیچ ها اعمال گردد) باز هم میدان دوار مغناطیسی با دامنه‌ی ثابت $\frac{3}{2}B_m$، سرعت ω خواهیم داشت ولی جهت چرخش، معکوس جهت چرخش اولیه می‌گردد

3- اگر فرکانس جریان ها k برابر شود آن گاه سرعت چرخش میدان دوار نیز k برابر $(k\omega)$ می‌گردد

2014 05 22

④- اگر جریان ها دارای هارمونیک باشند داریم:

$$i_{aa'} = i_1 \sin \omega t + i_3 \sin 3\omega t + i_5 \sin 5\omega t + i_7 \sin 7\omega t$$

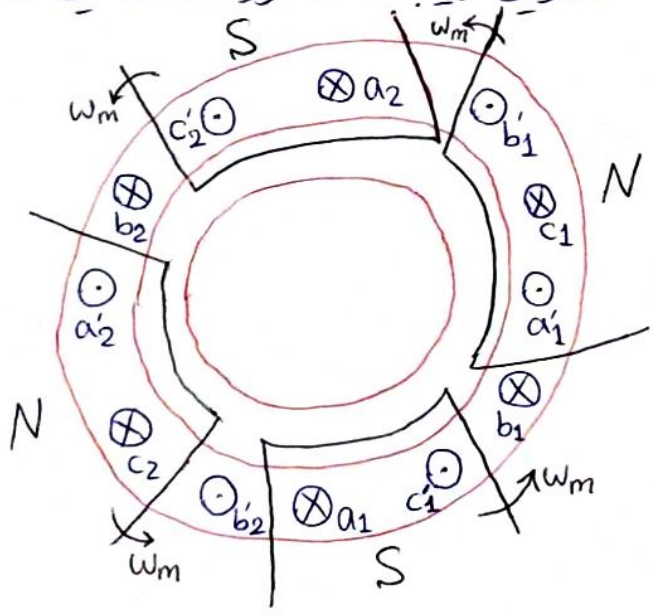
$$i_{bb'} = i_1 \sin(\omega t - 120) + i_3 \sin 3\omega t + i_5 \sin(5\omega t + 120) + i_7 \sin(7\omega t - 120)$$

$$i_{cc'} = i_1 \sin(\omega t + 120) + i_3 \sin 3\omega t + i_5 \sin(5\omega t - 120) + i_7 \sin(7\omega t + 120)$$

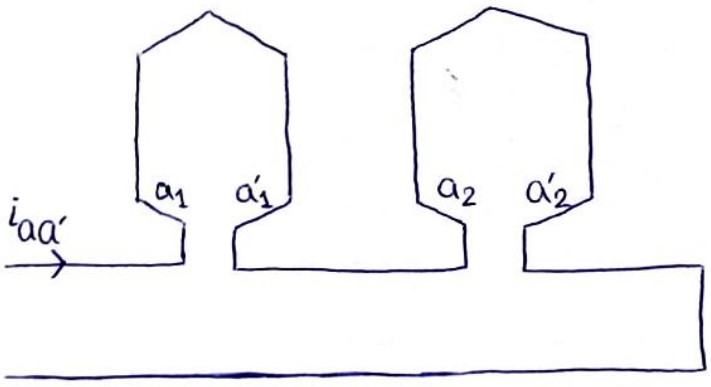
سه فاز توالی مثبت با فرکانس زاویه‌ای ω	سه فاز متعادل نیست	سه فاز متعادل توالی منفی با فرکانس زاویه‌ای 5ω	سه فاز متعادل توالی مثبت با فرکانس زاویه‌ای 7ω

هارمونیک های سوّم جریان چون سه فاز متعادل نیستند تولید میدان دوار مغناطیسی نمی‌کنند. هارمونیک هفتم جریان تولید میدان دوار مغناطیسی با سرعت زاویه‌ای 7ω و در جهت میدان هارمونیک اصلی می‌کند. هارمونیک های پنجم جریان تولید میدان مغناطیسی دوار با سرعت 5ω در جهت عکس میدان هارمونیک اصلی می‌نمایند. به عبارت دیگر، هارمونیک های جریان، تولید هارمونیک های میدان دوار مغناطیسی می‌کنند.

⑤- اگر ترکیب $ac'ba'cb'$ را یکبار دیگر تکرار کنیم، به جای ماشین دو قطبی، ماشین چهار قطبی خواهیم داشت و اگر این ترکیب n بار تکرار شود، ماشین $2n$ قطبی ایجاد می‌شود



ماشین چهار قطبی $p = 4$



2014 05 22

در ماشین چهار قطبی فوق در طی زمان نصف پریود $\left(\frac{T}{2}\right)$ برای جریان‌ها، جای قطب‌های مجاور S و N عوض می‌شود. به طور کلی زاویه‌ی الکتریکی و مکانیکی در ماشین های P قطبی به صورت زیر با یکدیگر مرتبط می‌شوند:

$$\theta_e = \frac{P}{2}\theta_m$$ زاویه‌ی الکتریکی — زاویه‌ی مکانیکی

به همین ترتیب داریم:

$$f_e = \frac{P}{2} f_m$$ فرکانس الکتریکی — فرکانس مکانیکی

$$\omega_e = \frac{P}{2} \omega_m$$ فرکانس زاویه‌ای الکتریکی — فرکانس زاویه‌ای مکانیکی

زاویه (rad)، فرکانس زاویه‌ای $\left(\frac{rad}{s}\right)$، فرکانس (Hz یا دور در ثانیه rps)

rps : review per second

بدست می‌آید:

$$\omega_m = \frac{2}{P}\omega_e$$

معمول است که سرعت مکانیکی را برحسب دور بر دقیقه بیان کنند.

rpm : review per minute

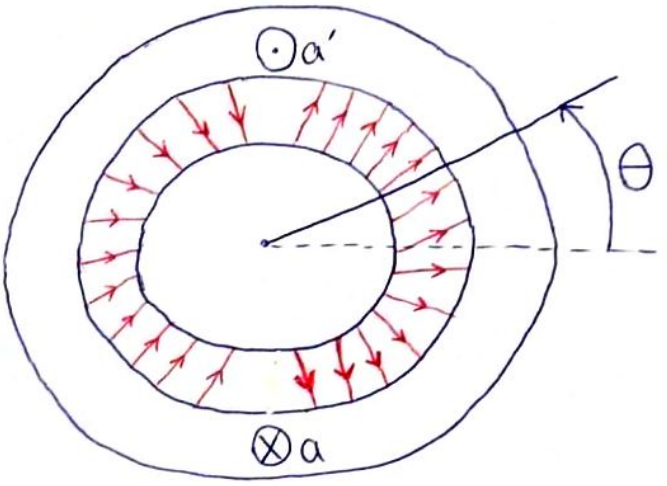
$$f_m = \frac{2}{P} f_e$$

$$n_m = 60 f_m \Longrightarrow \boxed{n_m = \frac{120}{P} f_e}$$ ✓✓

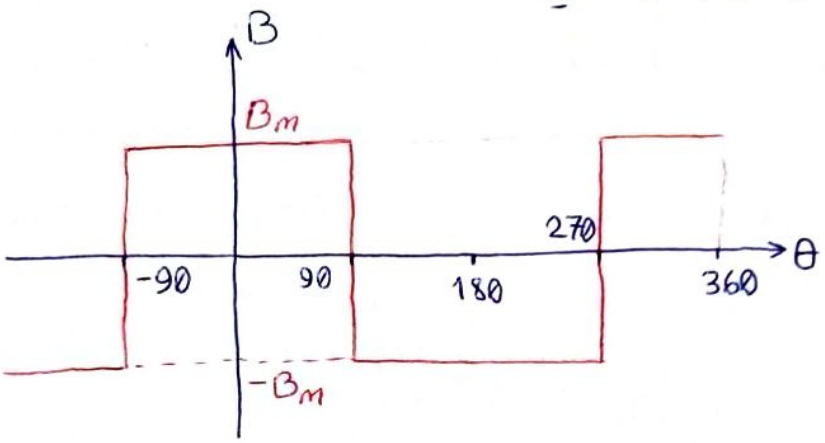
n_m: rpm ، f_m: rps

✓✓ توزیع سینوسی شار: در شکل صفحه‌ی بعد مقدار شار در فاصله‌ی هوایی ثابت می‌باشد. (چگالی شار)

2014 05 22

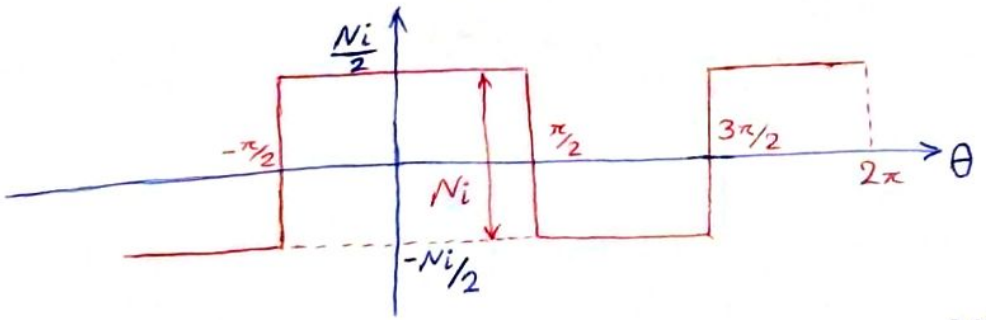


چگالی
توزیع شار برحسب θ به‌صورت زیر است:



$B \alpha \varphi \alpha F \longrightarrow mmf$ $\qquad Ni = F = R\varphi$

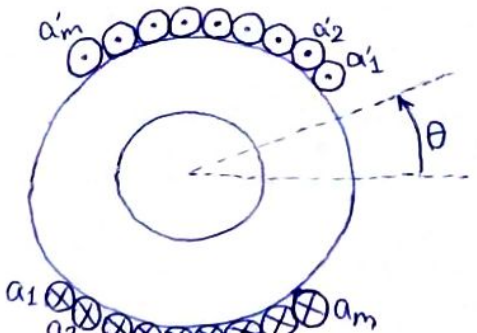
شکل توزیع mmf متناسب با B است:



N: تعداد دور کلاف aa'

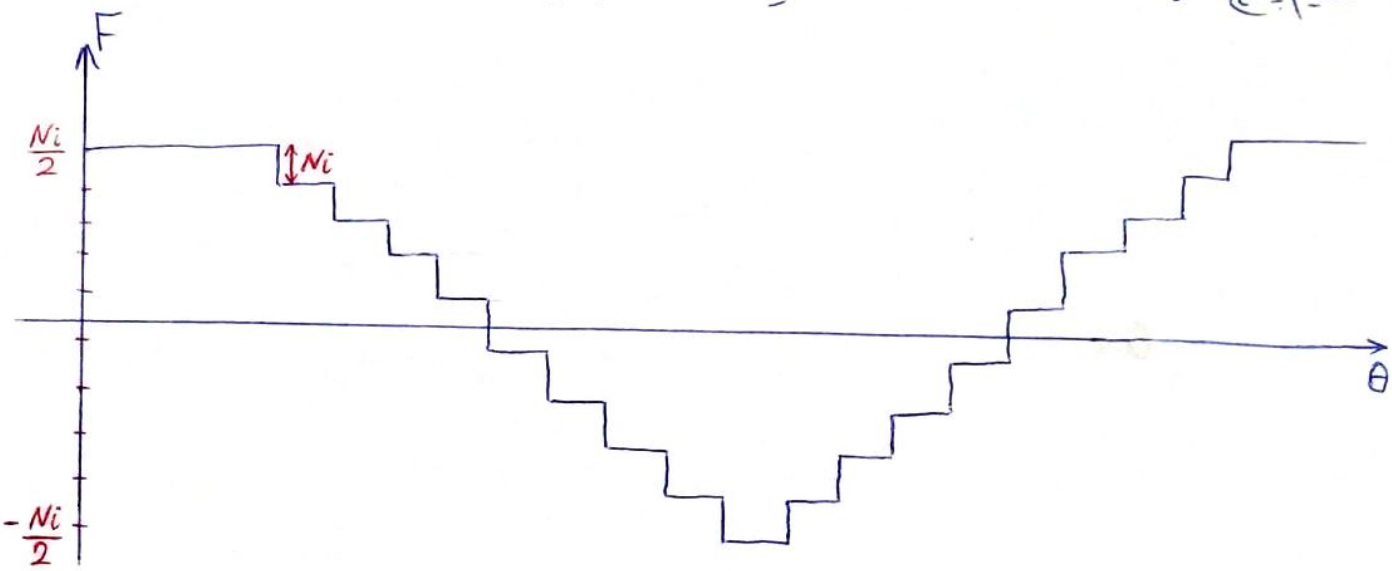
i: جریان کلاف aa'

مشاهده می‌شود که توزیع mmf فوق علاوه بر هارمونیک اصلی، دارای هارمونیک های فرد مراتب بالا نیز می باشد. این هارمونیک های مراتب بالاتر در ماشین‌های ac تولید هارمونیک ولتاژ و گشتاور خواهد نمود که امری نامطلوب است. برای رفع این مشکل بایستی mmf را به‌صورت سینوسی توزیع کنیم. برای این منظور سیم پیچی را توزیع می‌کنند.



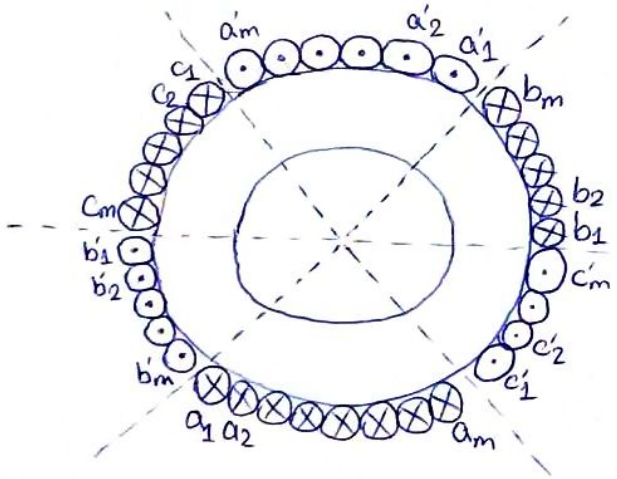
2014 05 22

سیم پیچ فاز a از m کلاف N_1 دوری تشکیل شده است به گونه‌ای که



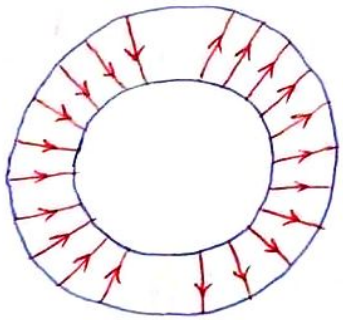
مشاهده می‌گردد که توزیع فوق به یک توزیع سینوسی نزدیکتر است. لذا هارمونیک های مرتبه‌ی فرد بالاتر از آن دارای دامنه‌ی بسیار ضعیف‌تری نسبت به هارمونیک اصلی هستند.

اگر سیم پیچ های b و c را هم توزیع کنیم آنگاه یک میدان دوّار مغناطیسی با توزیع سینوسی در فاصله‌ی هوایی شکل خواهد گرفت:



ماشین دوقطبی

«نحوه‌ی توزیع سیم پیچ ها»



$B = B_p \cos\theta$

توزیع میدان مغناطیسی به صورت سینوسی در فاصله‌ی هوایی

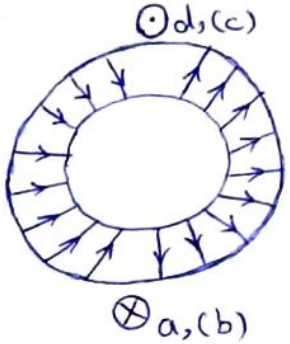
نتیجه گیری: اگر سیم پیچ های هر 3 فاز به صورت کاملاً ایده‌آل پخش شده باشند و دارای اختلاف فاز مکانیکی 120 درجه باشند و به آن سه جریان الکتریکی متعادل با اختلاف فاز 120 درجه اعمال گردد، یک میدان دوار مغناطیسی در فاصله‌ی هوایی شکل خواهد گرفت که دارای سرعت چرخش ω_s بوده و در هر لحظه از زمان دارای توزیع سینوسی در فاصله‌ی هوایی است.

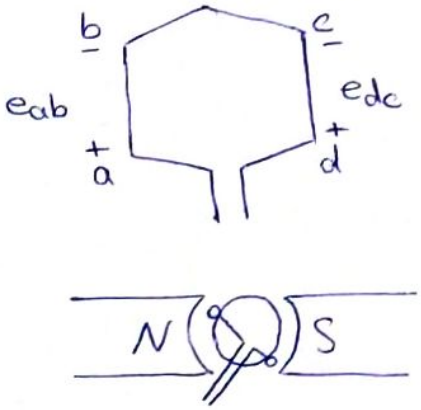
$$\theta = \omega t \Longrightarrow B = B_p \cos\omega t$$

2014 05 22

ولتاژ القایی در کلاف:

فرض کنیم یک میدان دوار مغناطیسی با توزیع سینوسی در فاصله‌ی هوایی داشته باشیم. اگر در استاتور (و یا رتور) یک کلاف یک دور به صورت شکل زیر داشته باشیم ولتاژ القایی در آن به صورت زیر محاسبه می‌گردد:





$e_{ind} = VBL$

$e_{ad} = e_{ab} - e_{dc}$

$e_{ab} = VBpL \sin wt$

$e_{dc} = VBpL \sin(wt-180)$

$e_{ad} = 2VBpL \sin wt = 2rwBpL \sin wt$

L: طول رتور

$V = rw$ سرعت نسبی بین هادی و میدان دوار

w: سرعت زاویه‌ای میدان دوّار نسبت به هادی

بنابراین اگر کلاف فوق N دوری باشد داریم:

$$e_{ad} = 2NrwBpL \sin wt$$

همچنین اگر دو کلاف دیگر با اختلاف فاز مکانیکی 120 درجه در استاتور نصب شده باشند ولتاژهای القایی در آن‌ها برابر خواهد بود با:

$$V_{aa'} = V_m \sin wt$$

$$V_{bb'} = V_m \sin(wt-120)$$

$$V_{cc'} = V_m \sin(wt+120)$$

به عبارت دیگر اگر یک میدان دوّار مغناطیسی با توزیع سینوسی در فاصله‌ی هوایی وجود داشته باشد و سه کلاف با اختلاف فاز مکانیکی 120 درجه داشته باشیم آنگاه در خروجی این کلاف‌ها شاهد القای سه ولتاژ متعادل با دامنه‌ی برابر و اختلاف فاز الکتریکی 120 درجه خواهیم داشت. (دقت شود که دامنه‌ی این ولتاژها متناسب با سرعت نسبی بین سیم پیچ‌ها و میدان (w) بوده و فرکانس الکتریکی آن‌ها نیز با این سرعت نسبی متناسب است.)

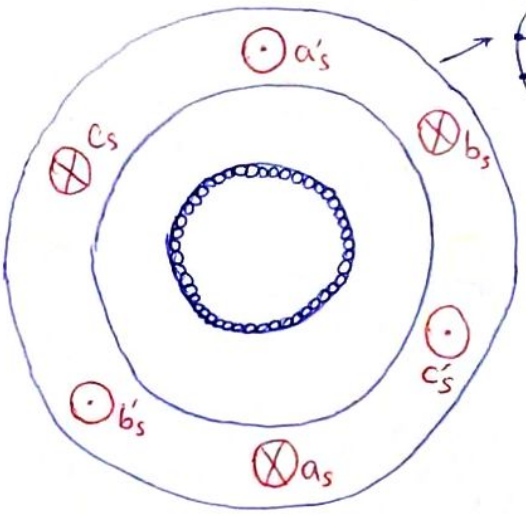
موتور القایی:

استاتور این موتور دارای سه سیم پیچ توزیع شده با اختلاف فاز مکانیکی 120 درجه می‌باشد که به آن‌ها جریان‌ها (ولتاژهای) سه فاز متعادل اعمال می‌گردد. از لحاظ ساختار سیم بندی رتور، موتورهای القایی را می‌توان به 2 دسته‌ی موتور القایی با رتور سیم پیچی شده و موتور القایی قفسه سنجابی تقسیم نمود.

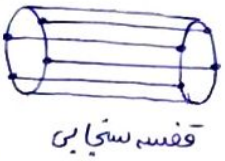
2014 05 22

(۱) - در موتور القایی با روتور سیم پیچی شده، سیم پیچی های استاتور عیناً در روتور تکرار می‌گردد. معمولاً نحوه‌ی اتصال الکتریکی (ستاره یا مثلث) سیم پیچی های روتور و استاتور مشابه هستند.

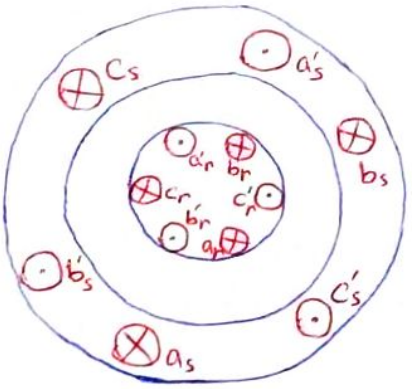
(۲) - روتور موتور القایی قفسه سنجابی، دارای یک سری میله (یا شمش) هادی می باشد که سرهای آن ها در هر طرف روتور به یکدیگر اتصال کوتاه شده‌اند.



«موتور القایی قفسه سنجابی»



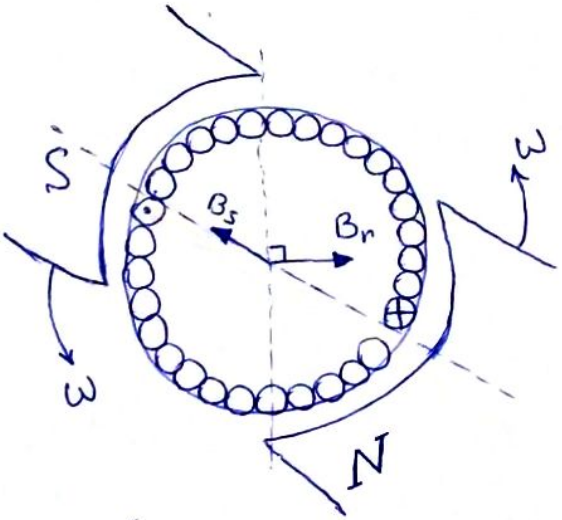
قفسه سنجابی



«موتور القایی با روتور سیم پیچی شده»

بررسی مفهومی نحوه‌ی کار یک موتور القایی:

یک موتور القایی قفسه سنجابی را بدون سرعت اولیه و بدون بار در نظر بگیرید. با اعمال ولتاژهای سه فاز متعادل به سیم پیچ استاتور آن یک میدان دوّار مغناطیسی حاصل خواهد شد. این میدان دوّار نسبت به هادی های روتور که در وهله‌ی اوّل ساکن هستند، می چرخند و در آن‌ها تولید ولتاژ القایی می‌کند.



$$B_r \times B_s = \tau$$

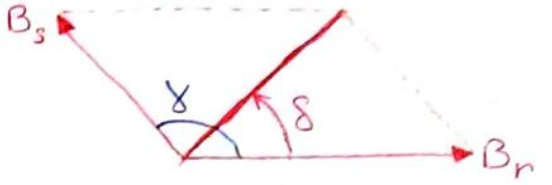
این ولتاژ در هادی‌هایی که دقیقاً در مرکز قطب ها قرار دارند دارای مقدار ماکزیمم می باشد. این ولتاژهای القایی در سیم پیچ های اتصال کوتاه شده روتور، جریان گردشی ایجاد می‌کند. مقدار ماکزیمم این جریان به دلیل وجود اندوکتانس در سیم پیچ ها، در هادی هایی است که قبل از هادی های با ولتاژ ماکزیمم قرار دارند.

(جریان نسبت به ولتاژ پس فاز دارد). جریان ایجاد شده تولید شار مغناطیسی در روتور می‌کند که محور این شار 90 درجه نسبت به صفحه‌ی ماکزیمم جریان عقب تر است. طبق شکل از برآیند میدان مغناطیسی روتور (B_r) و میدان مغناطیسی استاتور (B_s) گشتاور تولید می‌شود که میل دارد روتور را در جهت پادساعتگرد (همان جهت چرخش R_s) بچرخاند.

2014 05 22

$$\vec{\tau}_{ind} = k\vec{B}_r \times \vec{B}_s$$

$$\tau_{ind} = k B_r B_s \sin\gamma$$



شارکل $\vec{B}_{net} = \vec{B}_r + \vec{B}_s \Longrightarrow \vec{B}_s = \vec{B}_{net} - \vec{B}_r$

$$\vec{\tau}_{ind} = k\vec{B}_r \times (\vec{B}_{net} - \vec{B}_r) = k B_r \times B_{net} - k\vec{B}_r \times \vec{B}_r \quad (\vec{B}_r \times \vec{B}_r = 0)$$

$$\vec{\tau}_{ind} = k B_r \times B_{net} \qquad \tau_{ind} = k B_r B_{net} \sin\delta$$

روتور تحت این گشتاور شروع به سرعت گرفتن کرده و هم جهت با قطبها می چرخد. هرچقدر که بر سرعت روتور افزوده شود از سرعت نسبی بین هادی های روتور و میدان استاتور کاسته می شود

$$e_{ad} = 2rwRpL\sin wt$$

w : سرعت نسبی بین میدان دوّار و هادی ها

در نتیجه دامنی ولتاژ القایی در هادی های روتور کمتر شده ولذا جریان روتور و همچنین B_γ کوچکتر می شوند نتیجتاً τ_{ind} نیز کم می شود. ولی چون این گشتاور همچنان غیرصفر است روتور سرعت می گیرد

باتوجّه به آنکه اصطکاک و تلفات مکانیکی صفرفرض شده اند روتور به سرعت گرفتن خود ادامه می دهد تا وقتی که سرعت آن برابر سرعت میدان دوّار مغناطیسی گردد در این صورت سرعت نسبی بین آن ها صفرشده ودیگر هیچ ولتاژی در کلاف های روتور القا نمی گردد. به این ترتیب جریان روتور و B_γ صفرشده و τ_{ind} صفر می گردد وباتوجّه به نبود اصطکاک روتور باهمین سرعت به چرخش خود ادامه می دهد. البتّه در عمل به دلیل وجود اصطکاک و تلفات، سرعت روتور هیچ وقت به سرعت مکانیکی میدان دوّار نمی رسد ودر تئوری های آن باقی می ماند.

سرعت میدان دوّار مغناطیسی استاتور را سرعت سنکرون می نامند.

$$\text{سرعت سنکرون } n_s = \frac{120}{p} f \quad (rpm)$$

چون در موتور القایی روتور هیچ وقت به سرعت سنکرون میدان دوّار استاتور نمی رسد به آن موتور آسنکرون نیز گفته می شود

مفهوم لغزش را به صورت زیر تعریف می کنیم.

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{w_s - w_r}{w_s}$$

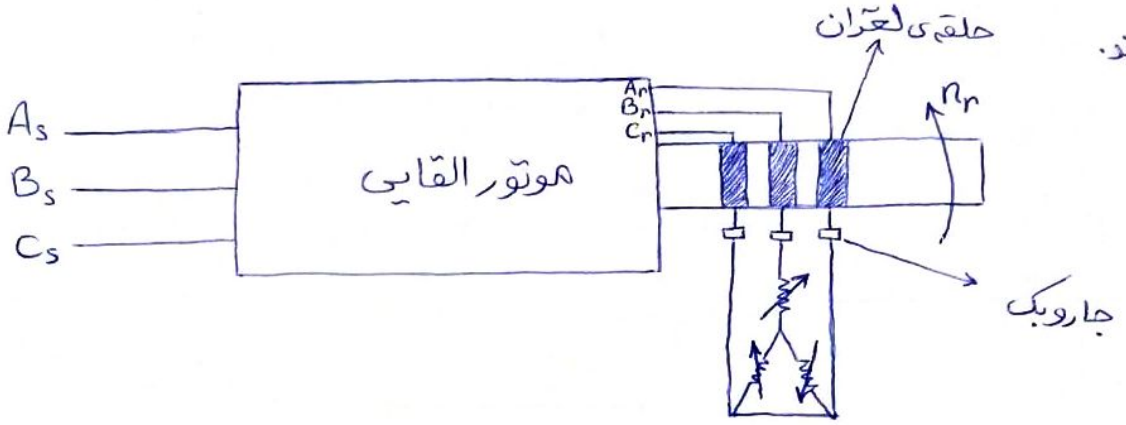
$n_s(rpm)$ و $w_s\left(\frac{rad}{s}\right)$: سرعت سنکرون

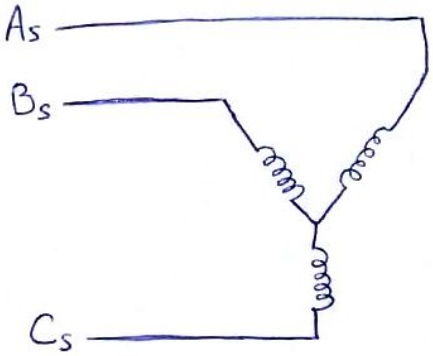
$n_r(rpm)$ و $w_r\left(\frac{rad}{s}\right)$: سرعت مکانیکی روتور

در موتور القایی با روتور سیم پیچی شده نیز اتّفاق یکسانی روی می دهد. یعنی میدان دوّار استاتور در سیم پیچی های روتور ولتاژ القا می کند.

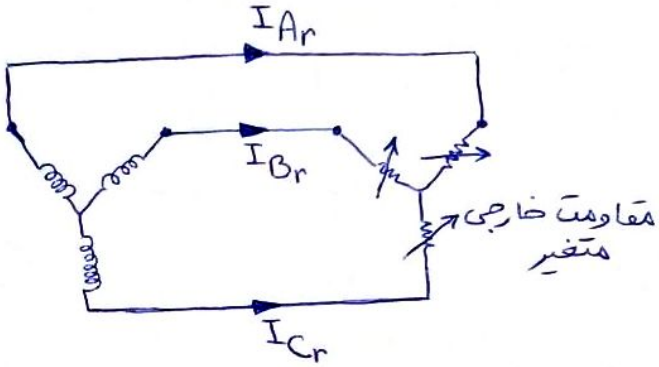
2014 05 22

ولتاژ فازهای مختلف استاتور دارای دامنه های برابر و اختلاف فاز 120 درجه نسبت به هم هستند. معمولاً سیم پیچی های رتور توسط جاروبک و حلقه های لغزان مستقیماً و یا توسط یک سری مقاومت به هم اتصال کوتاه می شوند.





سیم پیچ استاتور



سیم پیچ رتور

این ولتاژ سه فاز متعادل تولید جریان های سه فاز متعادل در سیم پیچ رتور می کند. تعداد قطبهای سیم پیچ رتور و استاتور برابر است. از آنجا که فرکانس ولتاژ و جریان سیم پیچ رتور متناسب با سرعت نسبی بین رتور و میدان استاتور است داریم:

$$f_r = \frac{P}{120}(n_s - n_r)$$

$n_s - n_r$: سرعت نسبی بین رتور و میدان استاتور

P : تعداد قطبهای استاتور و رتور

f_r : فرکانس الکتریکی سیم پیچ های رتور

$$f_r = \frac{P}{120}\frac{n_s - n_r}{n_s} \times n_s \Longrightarrow f_r = \frac{P}{120} S n_s \xrightarrow{n_s = \frac{120}{P} f} \boxed{f_r = Sf}$$

← در سیم پیچ های استاتور همیشه فرکانس 50Hz را داریم ولی در سیم پیچ های رتور فرکانس متغیر است. →

① رتور ساکن باشد $\Longrightarrow n_r = 0 \Longrightarrow S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = 1 \Longrightarrow f_r = f$

$n_r = \frac{n_s}{2} \Longrightarrow S = 0.5 \Longrightarrow f_r = 0.5 f$

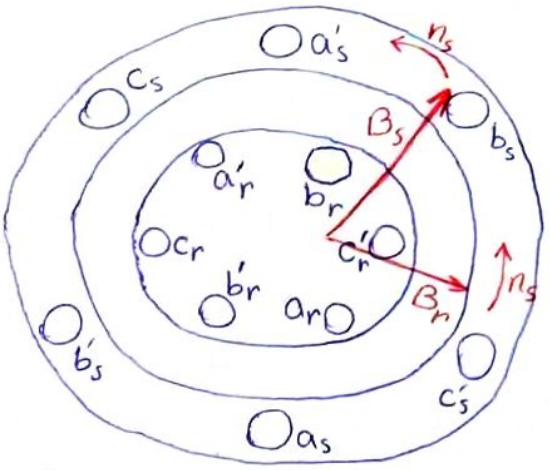
② رتور با سرعت سنکرون بچرخد $\longrightarrow n_r = n_s \Longrightarrow S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = 0 \Longrightarrow f_r = 0$

یعنی در حالت سکون که سرعت رتور صفر است لغزش یک بوده و فرکانس الکتریکی رتور برابر با فرکانس الکتریکی استاتور است به تدریج که رتور سرعت می گیرد، مقدار لغزش کوچکتر شده و فرکانس رتور کاهش می یابد. تا اینکه سرعت رتور به سرعت سنکرون برسد. در این وضعیت لغزش صفر شده و فرکانس الکتریکی رتور صفر می شود

$$0 \leq n_r \leq n_s \Longrightarrow 0 \leq S \leq 1 \Longrightarrow 0 \leq f_r \leq f$$

2014 05 22

فرض کنیم یک موتور القایی با روتور سیم پیچی شده داریم. با اعمال ولتاژ ها یا جریان سه فاز متعادل به سیم پیچی استاتور یک میدان دوار مغناطیسی تشکیل می‌گردد این میدان مغناطیسی دوار استاتور (B_s) با سرعت n_s نسبت به استاتور می‌چرخد و ولتاژهایی را در سیم پیچی روتور القا می‌کند. این ولتاژ های القایی تولید جریان در مسیر بسته سیم پیچی روتور می‌کند.



مشاهده کردیم که یک میدان مغناطیسی در روتور شکل می‌گیرد که منجر به سرعت گرفتن روتور می‌گردد فرکانس ولتاژ القایی و جریان های جاری شده در سیم پیچ روتور وابسته به سرعت نسبی بین روتور و میدان دوار مغناطیسی استاتور است. ($f_r = \frac{P}{120}(n_s - n_r) = sf$) . از آنجا که ولتاژ ها و جریان های القایی در سیم پیچ روتور دارای اختلاف فاز 120 درجه نسبت به هم هستند (تشکیل سیستم سه فاز متعادل با فرکانس f_r می‌دهند.) و همچنین سیم پیچ های روتور دارای اختلاف فاز مکانیکی 120 درجه نسبت به هم هستند و تعداد قطبهای آنها برابر با تعداد قطبهای استاتور است، یک میدان دوار مغناطیسی نسبت به روتور ایجاد خواهند کرد این میدان دوار مغناطیسی و روتور (B_r) نسبت به روتور دارای سرعت n_{rr} می‌باشد:

$$n_{rr} = \frac{120}{P} f_r$$

همچنین داریم:

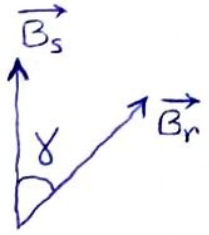
$$n_{rr} = \frac{120}{P} \times \frac{P}{120}(n_s - n_r) \Longrightarrow \boxed{n_{rr} = n_s - n_r}$$

$$\Rightarrow \boxed{n_r + n_{rr} = n_s}$$

جمله‌ی بالا بیان می‌دارد که مجموع سرعت میدان دوار روتور نسبت به روتور و سرعت خود روتور نسبت به استاتور برابر سرعت سنکرون است.

از طرفی می‌دانیم مجموع این دو سرعت همان سرعت میدان دوار روتور نسبت به استاتور می‌باشد یعنی میدان دوار روتور (B_r) نسبت به استاتور هم مثل میدان دوار استاتور (B_s) با سرعت سنکرون n_s می‌چرخد.

به عبارت دیگر دو میدان دوار B_r و B_s نسبت به هم ساکن هستند.



$$\tau_{ind} = k B_r B_s \sin\gamma$$

2014 05 22

مثال: یک موتور القایی 50Hz ، 6 قطب در لغزش 0.1 کار می‌کند مطلوبست:

الف) سرعت سنکرون

ب) سرعت رتور

ج) فرکانس الکتریکی رتور

د) سرعت میدان دوار استاتور نسبت به استاتور

هـ) سرعت میدان دوار رتور نسبت به رتور

و) سرعت میدان دوار رتور نسبت به استاتور

پاسخ:

نکته: $S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \Rightarrow n_r = (1-s)n_s$

الف) $n_s = \frac{120}{P} f = \frac{120}{6} \times 50 = 1000 \text{ rpm}$

ب) $n_r = (1-s)n_s = (1-0.1) \times 1000 = 900 \text{ rpm}$

ج) $f_r = sf = 0.1 \times 50 = 5 \text{ Hz}$

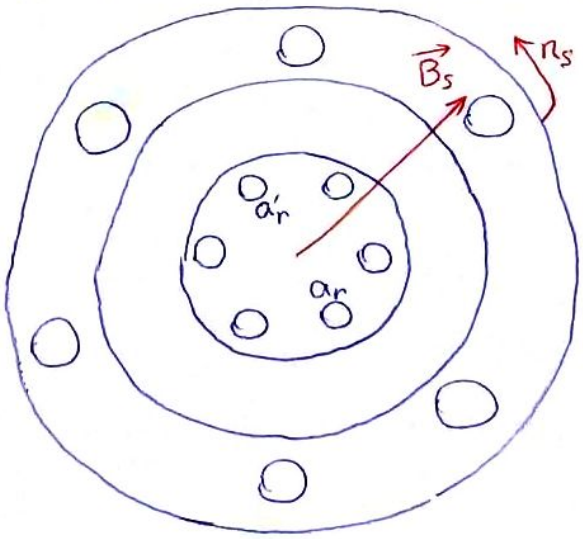
د) $= n_s = 1000 \text{ rpm}$

هـ) $n_{rr} = \frac{120}{6} \times 5 = 100 \text{ rpm}$

و) $= n_s = 1000 \text{ rpm}$

مدار معادل موتور القایی:

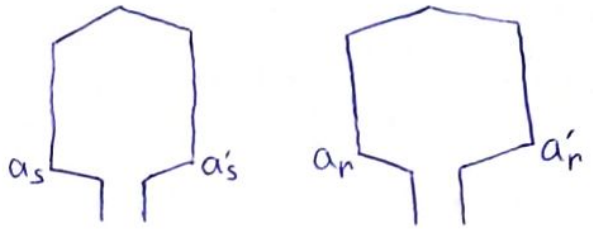
مشاهده شد که میدان دوار تولیدشده توسط استاتور باسرعت n_s می‌چرخد. اگرفرض کنیم که رتور نیز باسرعت n_r بچرخد، میدان دوار استاتور باسرعت نسبی $n_s - n_r$ رتور را جارو می‌کند.



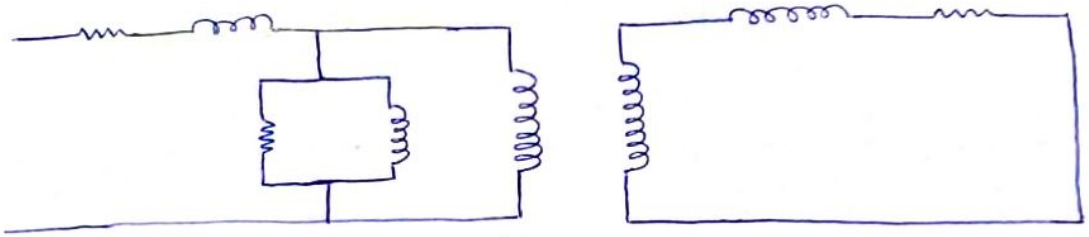
حرکت نسبی میدان استاتور نسبت به سیم پیچ‌های رتور در سطح مقطع آنها ولتاژ القا می‌کند همانطور که قبلاً نیز دیدیم دامنه‌ی فرکانس این ولتاژ القایی متناسب باسرعت نسبی $n_s - n_r$ است.

2014 05 22

از آنجا که میدان تولیدشده توسط سیم پیچ استاتور در سیم پیچ های رتور تولید $\frac{d\varphi}{dt}$ کرده و در آن ولتاژ القا می‌کند. شاهد یک نوع کار ترانسفورماتوری هستیم. بنابراین انتظار می‌رود که مدار معادل یک موتور القایی نیز شبیه به مدار معادل یک ترانسفورماتور گردد



با توجه به اتصال کوتاه بودن سیم پیچ های رتور (سیم پیچ ثانویه) مدار معادل موتور القایی به صورت زیر خواهد بود:



N_s: تعداد دور سیم پیچ استاتور

N_r: تعداد دور سیم پیچ رتور

با این حال تفاوتهایی نیز بین مدار معادل یک ترانسفورماتور و یک موتور القایی وجود دارد:

اولاً بدلیل آنکه فاصله‌ی هوایی در مسیر شار مغناطیسی یک موتور القایی وجود دارد (فاصله‌ی بین رتور و استاتور)، رلوکتانس مغناطیسی آن نسبت به یک ترانسفورماتور خیلی بزرگتر است. لذا با فرض یک شار یکسان، جریان مغناطیس کنندگی موتور القایی خیلی بزرگتر از جریان مغناطیس کنندگی یک ترانسفورماتور است. (X_m موتور القایی کوچکتر از X_m ترانسفورماتور است.)

ثانیاً درحالی که فرکانس سیم پیچ ثانویه یک ترانسفورماتور ثابت و برابر فرکانس سیم پیچ اولیه است، در یک موتور القایی فرکانس سیم پیچ رتور متغیر بوده و وابسته به لغزش (یا سرعت رتور) می باشد. ($f_r = sf$) در این صورت داریم:

$$X_r = 2\pi f_r L_r$$

X_r: راکتانس نشتی سیم پیچ رتور

L_r: اندوکتانس نشتی سیم پیچ رتور

$$\Longrightarrow X_r = 2\pi s f L_r$$

$$\Longrightarrow \boxed{X_r = sX_{r_0} \quad , \quad X_{r_0} = 2\pi f L_r}$$

2014 05 22

X_{r_0} : راکتانس نشتی سیم‌پیچ رتور در لغزش یک ($s=1$ یا $n_r=0$ سکون)

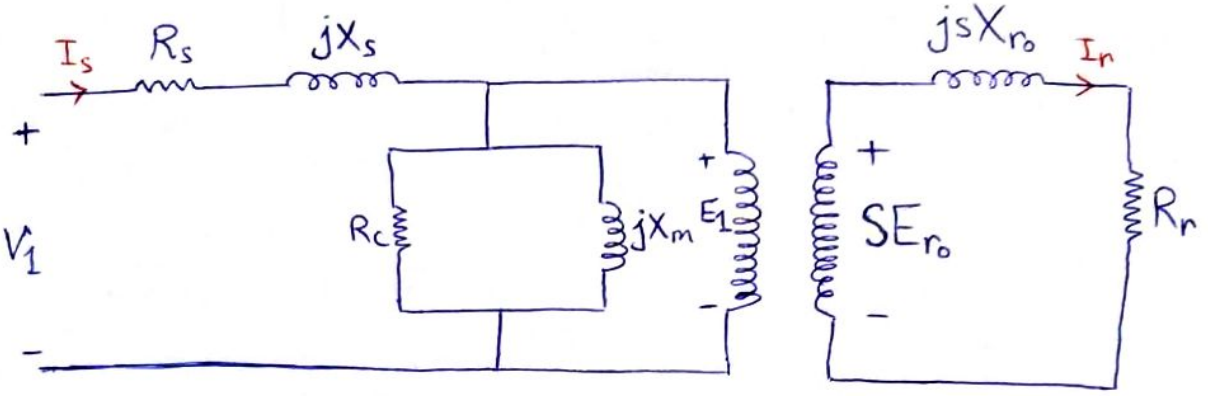
تا لغزش دامنه ولتاژ القایی در سیم‌پیچ رتور علاوه بر نسبت حول به سرعت نسبی رتور و میدان حول استاتور $(n_s - n_r)$ وابسته است. در حالت سکون رتور ($n_r=0$ یا $s=1$) بیشترین ولتاژ و در حالتی که رتور با سرعت سنکرون بچرخد ($n_r=n_s$ یا $s=0$) ولتاژ القایی صفر است.

$$E_r = s E_{r_0}$$

E_r : ولتاژ القایی در سیم‌پیچ رتور در لغزش s

E_{r_0} : ولتاژ القایی در سیم‌پیچ رتور در لغزش $s=0$

بنابراین مدار معادل یک موتور القایی به صورت زیر خواهد بود :



مدار معادل یک فاز موتور القایی

R_s : مقاومت سیم‌پیچ استاتور

X_s : راکتانس سیم‌پیچ استاتور

R_r : مقاومت سیم‌پیچ رتور

X_r : راکتانس سیم‌پیچ رتور

R_c : مقاومت معادل تلفات هسته

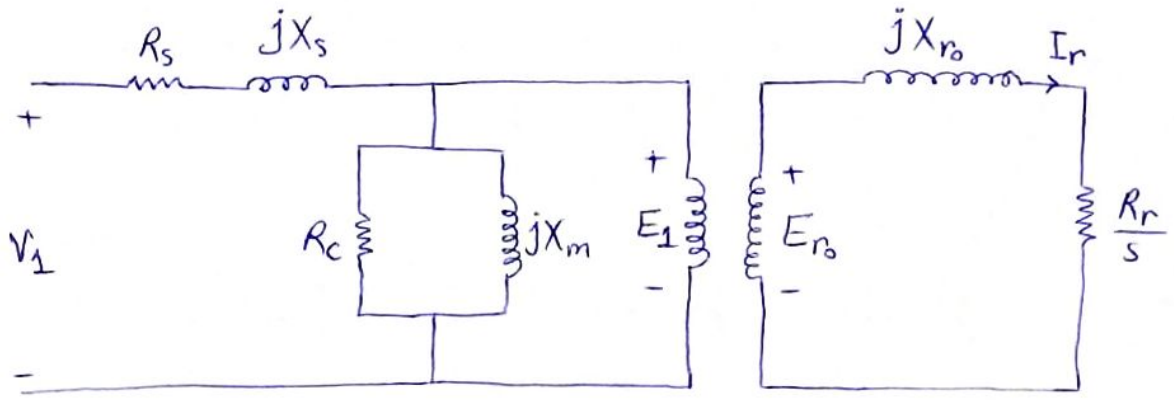
X_m : راکتانس مغناطیس کنندگی هسته

I_s : جریان سیم‌پیچ استاتور

I_r : جریان سیم‌پیچ رتور

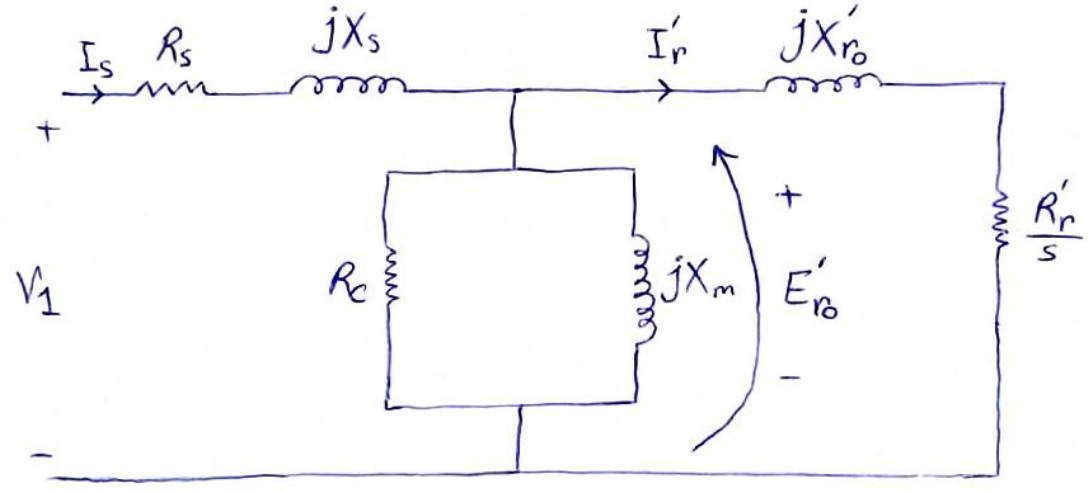
$$\rightarrow I_r = \frac{SE_{r_0}}{R_r + jsX_{r_0}} = \frac{E_{r_0}}{\frac{R_r}{s} + jX_{r_0}}$$

2014 05 22



مقدار I_r در مدار معادل فوق تفاوتی با I_r در مدار معادل اصلی ندارد.

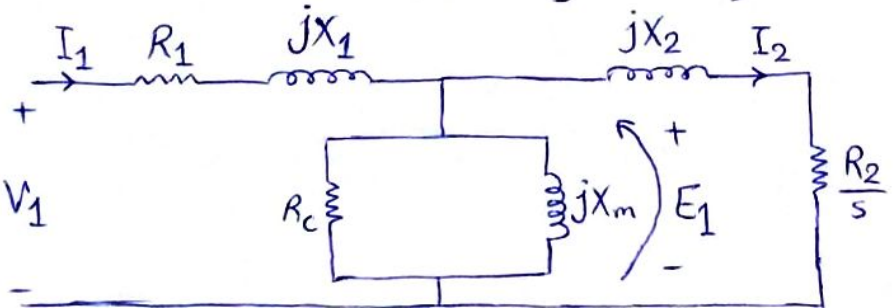
اگر سیم پیچ استاتور N_s دوری و سیم پیچ رتور N_r دوری باشد، مانند یک ترانسفورماتور معمولی می توان عناصر سمت ثانویه را به سمت اولیه انتقال داد.



$$\begin{cases} R'_r = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 R_r \\ X'_{r_o} = \left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 X_{r_o} \\ E'_{r_o} = \frac{N_s}{N_r} E_{r_o} \\ I'_r = \frac{N_r}{N_s} I_r \end{cases}$$

دیاگرام گذر توان در موتور القایی:

اگر مدار معادل یک موتور القایی به صورت زیر در نظر گرفته شود:



2014 05 22

آنگاه نحوه‌ی گذر توان در مدار معادل موتور القایی به شرح ذیل خواهد بود:

توان ورودی به موتور القایی برابر است با: $P_{in} = 3V_1 I_1 \cos(\angle V_1 - \angle I_1)$. از این توان، توان تلفاتی سیم پیچ استاتور $(P_{cus} = 3R_1 I_1^2)$ کسر می‌شود. از توان باقیمانده، توان تلفاتی هسته $\left(P_c = 3\frac{E_1^2}{R_c}\right)$ نیز کسر می‌گردد. توان باقیمانده توانی است که از استاتور خارج شده و از طریق فاصله‌ی هوایی وارد روتور می‌شود از این رو به این توان، توان فاصله‌ی هوایی (P_{Ag}) گفته می‌شود طبق مدار معادل، توان فاصله‌ی هوایی در مقاومت $\frac{R_2}{s}$ مصرف خواهد شد.

$$P_{Ag} = 3E_1 I_2 \cos(\angle E_1 - \angle I_2)$$

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

توان P_{Ag}، توانی است که وارد سیم پیچ روتور شده است. از این توان، توان تلفاتی سیم پیچ روتور کسر می‌شود.

$$P_{cur} = 3R_r I_r^2$$

$$P_{cur} = 3\left(\frac{N_s}{N_r}\right)^2 R_r \times \left(\frac{N_r}{N_s}\right)^2 I_r^2$$

$$P_{cur} = 3R'_r I'^2_r \Longrightarrow P_{cur} = 3R_2 I_2^2$$

بدست می‌آید:

$$P_{Ag} = \frac{P_{cur}}{s}$$

توان باقیمانده، توانی است که از حالت الکتریکی به حالت مکانیکی تبدیل می‌شود و به آن توان تبدیل شده (P_{conv}) گفته می‌شود

$$P_{conv} = P_{Ag} - P_{cur}$$

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

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

2014 05 22

داریم:

$$P_{conv} = \tau_{ind}\, \omega_r$$

τ_{ind} : گشتاور تولیدی ماشین $(N.m)$

ω_r : سرعت زاویه‌ای مکانیکی روتور $\left(\frac{rad}{s}\right)$.

$$\Longrightarrow \tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_r} = \frac{(1-s)P_{Ag}}{(1-s)\omega_s}$$

ω_s : سرعت زاویه‌ای مکانیکی سنکرون $\left(\frac{rad}{s}\right)$

$$\Longrightarrow \boxed{\tau_{ind} = \frac{P_{Ag}}{\omega_s}}$$

از توان تبدیل شده‌ی P_{conv} ، توان تلفات مکانیکی اصطکاک و بادخوری کسر شده و باقیمانده توانی خواهد بود که به صورت مکانیکی از محور روتور خارج می‌شود

$$\boxed{P_{out} = P_{conv} - P_{F\&W}}$$

$P_{F\&W}$: تلفات اصطکاک و بادخوری

$$\boxed{P_{out} = \tau_{load}\, \omega_r}$$

τ_{load} : گشتاور مکانیکی بار $(N.m)$

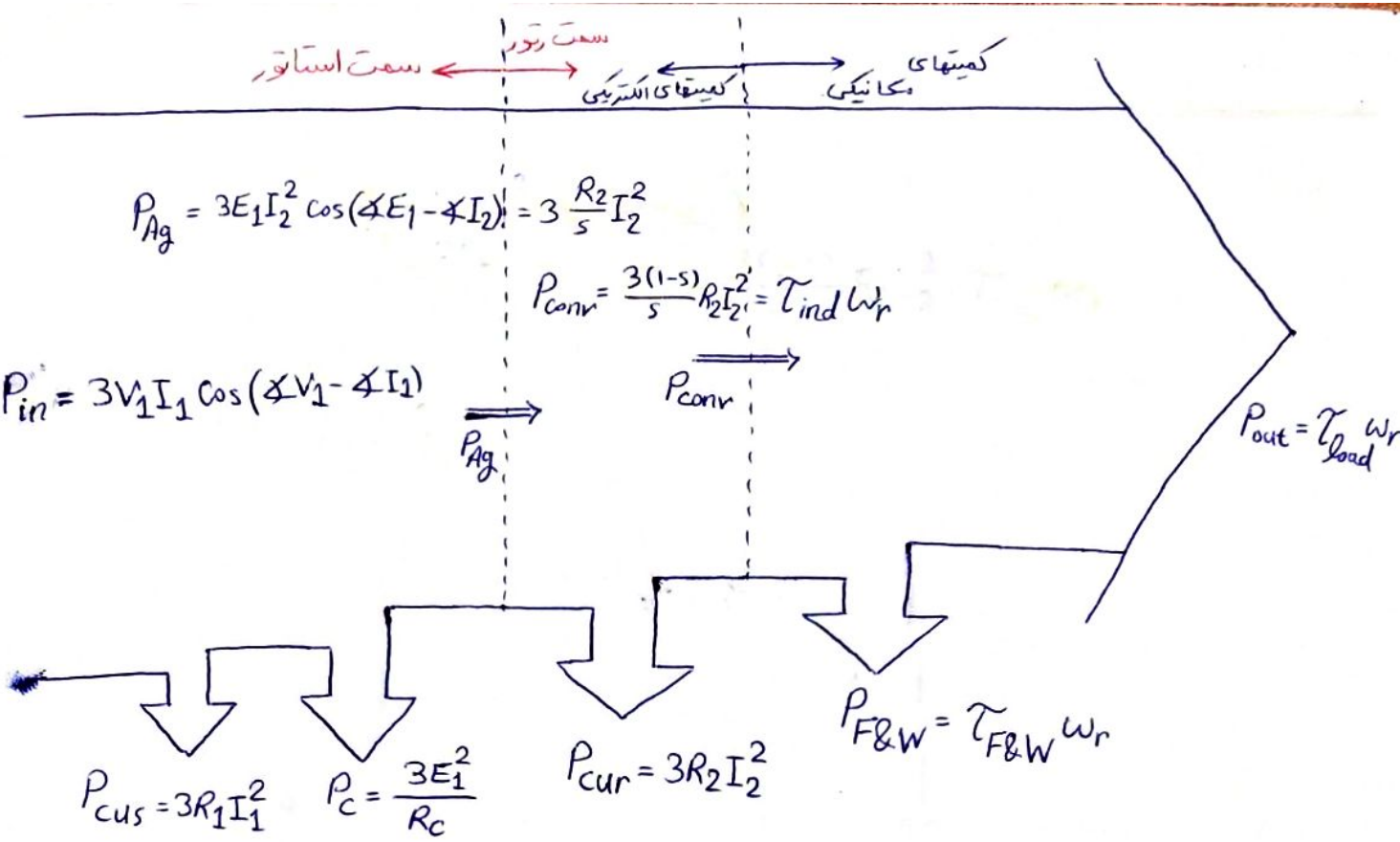
$$P_{F\&W} = \tau_{F\&W}\, \omega_r$$

$\tau_{F\&W}$: گشتاور تلفات اصطکاک و بادخوری $(N.m)$

$$\boxed{\tau_{load} = \tau_{ind} - \tau_{F\&W}}$$

به این ترتیب نمودار گذر توان موتور القایی به صورت زیر خواهد بود:

2014 05 22



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

تلفات هسته موتور القایی شامل تلفات در هسته استاتور و تلفات در هسته رتور می باشد. همچنین می دانیم تلفات در هسته این موتور بستگی به فرکانس تغییرات شار در هسته می باشد. فرکانس تغییرات شار استاتور مقداری ثابت بوده و وابسته به فرکانس تغذیه است. درحالی که فرکانس تغییرات شار در هسته استاتور وابسته به سرعت رتور ولغزش آن (sf) می باشد. هرچه سرعت رتور زیاد باشد لغزش آن کوچکتر شده و تلفات هسته رتور کاهش می یابد در نتیجه تلفات کل هسته که شامل مجموع تلفات هسته های استاتور و رتور می باشد با افزایش سرعت رتور کاهش می یابد. از طرفی می دانیم که تلفات مکانیکی و بادخوری با افزایش سرعت رتور افزایش می یابد. با تقریب می توان فرض کرد که مجموع تلفات هسته و تلفات مکانیکی نسبت به سرعت رتور ثابت می ماند.

به مجموع تلفات هسته و تلفات مکانیکی، تلفات چرخشی (P_{rot}) گفته می شود که نسبت به سرعت رتور عددی ثابت است.

$$P_{rot} = P_c + P_{F\&W}$$

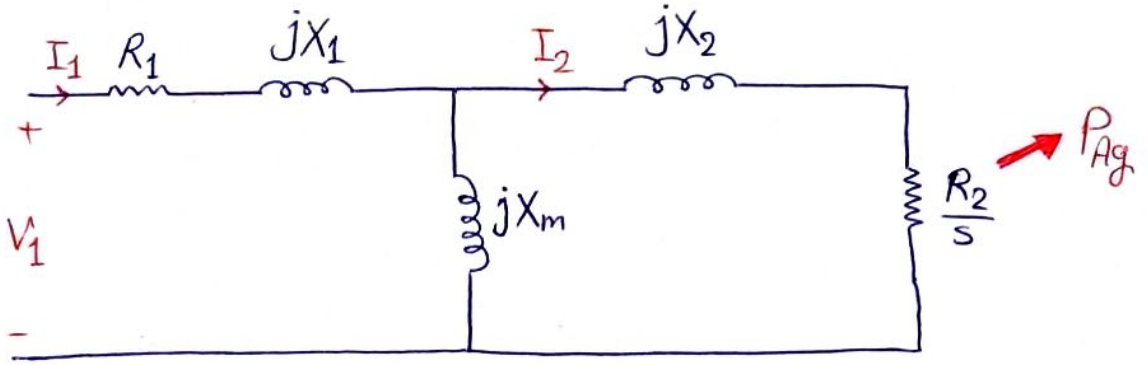
اگر از تلفات چرخشی استفاده شود (استاندارد IEEE) نمودار گذر توان و مدار معادل به صورت زیر تغییر خواهد کرد:

2014 05 22

$$P_{Ag} = P_{in} - P_{cus}$$

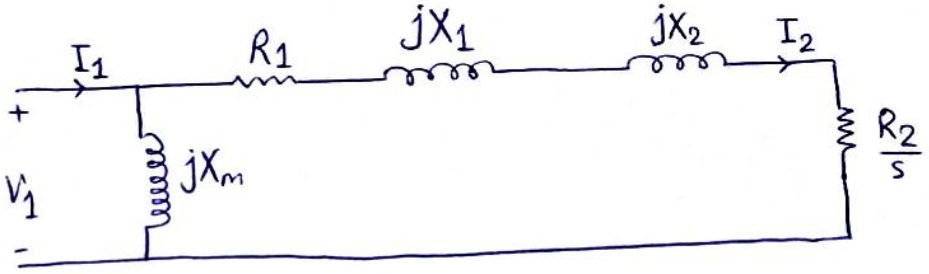
$$P_{conv} = P_{Ag} - P_{cur} = (1-s) P_{Ag}$$

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

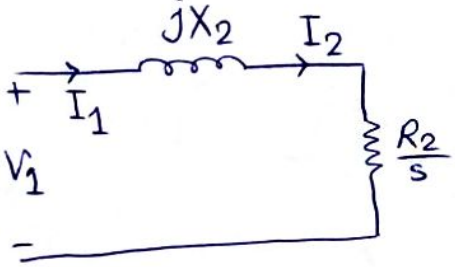


نکته : گاهی می‌توان با تقریب از مدارات معادل ساده‌تری نیز استفاده کرد که کار تحلیل آن‌ها ساده‌تر می‌باشد:

از آنجا که X_m خیلی بزرگتر از امپدانس‌های R_1 و X_1 می‌باشد می‌توان با تقریب آن را به ابتدای مدار منتقل کرد:

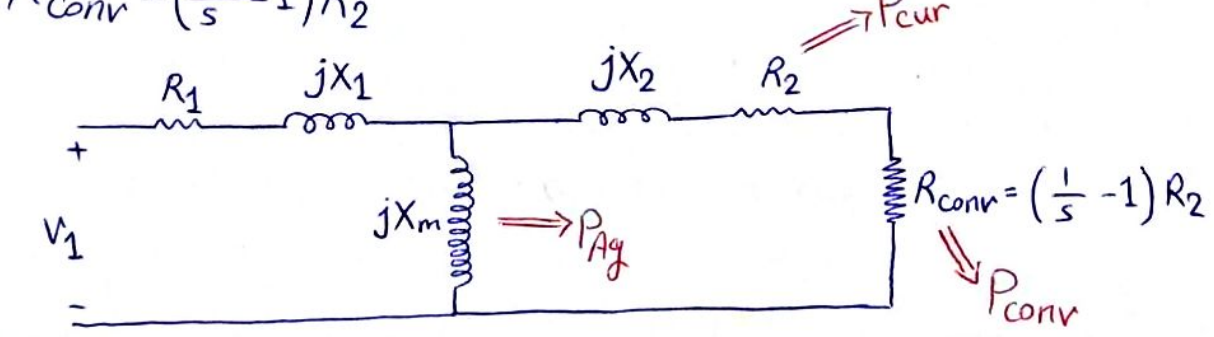


همچنین با یک تقریب بزرگتر می‌توان از مقادیر R_1 و X_1 و X_m در مدار معادل صرفنظر کرد:



نکته: با توجه به آنکه داریم: $P_{conv} = 3\left(\frac{1}{s}-1\right) R_2 I_2^2$ می‌توان R_{conv} را به صورت زیر در نظر گرفت:

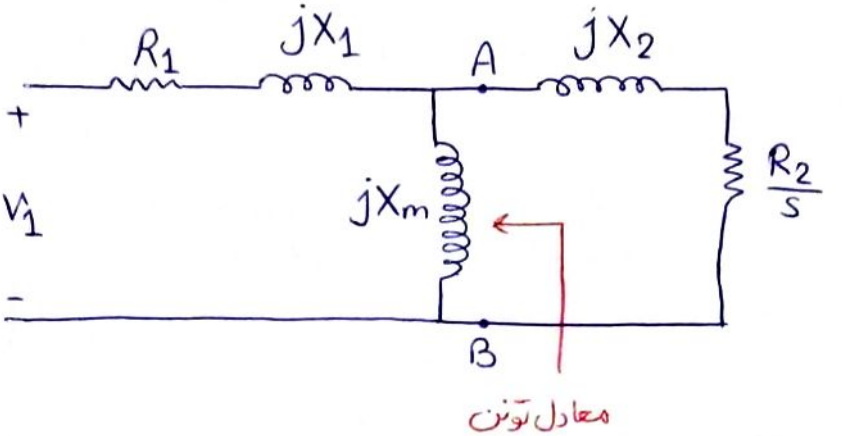
$$R_{conv} = \left(\frac{1}{s}-1\right) R_2$$



2014 05 22

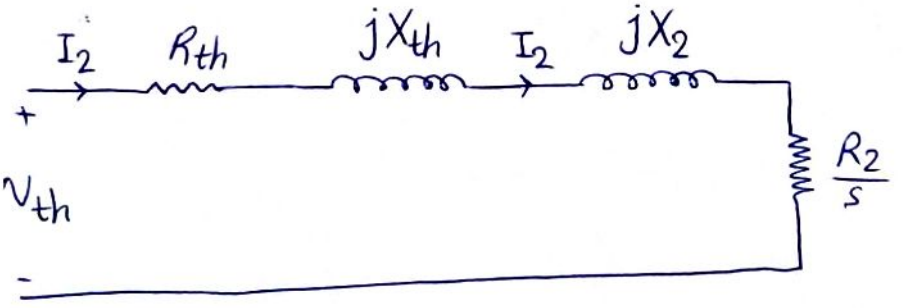
محاسبه‌ی گشتاور تولیدی (τ_{ind}) در ماشین القایی:

با توجه به رابطه‌ی $\tau_{ind} = \frac{P_{Ag}}{\omega_s}$ و اینکه ω_s یک عدد ثابت (وابسته به تعداد قطب‌ها و فرکانس استاتور) و P_{Ag} در مقاومت $\frac{R_2}{s}$ مدار معادل صرف می‌شود، به کمک مدار معادل می‌توان گشتاور القایی را به صورت زیر محاسبه کرد:



از دوسر A و B مدار معادل تونن را بدست می‌آوریم. با توجه به اینکه $X_m \gg X_1$ و $X_m \gg R_1$:

$$\begin{cases} V_{th} \simeq \dfrac{X_m}{X_1 + X_m} V_1 \\ X_{th} \simeq X_1 \\ R_{th} \simeq \left(\dfrac{X_m}{X_1 + X_m} \right)^2 R_1 \end{cases}$$



$$I_2 = \frac{V_{th}}{\left(\frac{R_2}{s} + R_{th}\right) + j\left(X_{th} + X_2\right)}$$

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

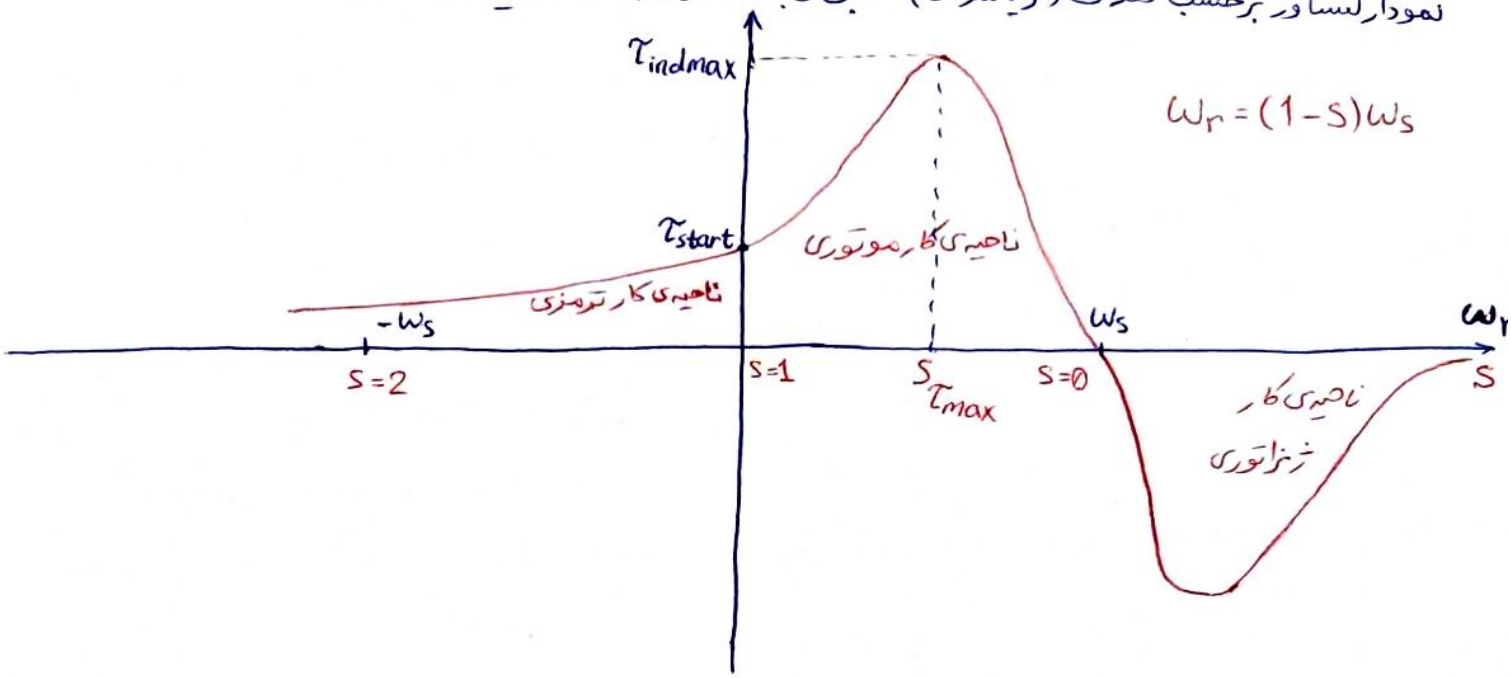
2014 05 22

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

$$\tau_{ind} = \frac{P_{Ag}}{\omega_s} = \frac{3\frac{R_2}{s}|I_2|^2}{\omega_s}$$

$$\Longrightarrow \tau_{ind} = \frac{3}{\omega_s}\frac{\frac{R_2}{s}V_{th}^2}{\left[\left(\frac{R_2}{s}+R_{th}\right)^2+\left(X_{th}+X_2\right)^2\right]}$$

نمودار گشتاور برحسب لغزش (و یا سرعت) طبق رابطه‌ی فوق به صورت زیر خواهد بود:



نکات مهم قابل استخراج از τ_{ind}:

(۱)- در ناحیه‌ی $0<\omega_r<\omega_s$ یا $1>s>0$، گشتاور τ_{ind} و ω_r هر دو مثبت هستند. لذا $P_{conv} = \tau_{ind}\omega_r$ نیز عددی مثبت است یعنی توان از سمت استاتور به سمت روتور جاری شده و به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود بنابراین این ناحیه، ناحیه‌ی کار موتوری است.

(۲)- در $\omega_r = \omega_s$ (سرعت سنکرون) و یا $s=0$ گشتاور القایی صفر است. که این امر مطابق موارد بحث شده‌ی قبلی است. زیرا در سرعت سنکرون ولتاژ القایی و جریان در روتور صفر شده و B_r صفر می‌گردد ولذا τ_{ind} صفر خواهد بود

(۳)- در ناحیه‌ی $\omega_r > \omega_s$ یا $s<0$، گشتاور القایی منفی و ω_r مثبت است. لذا P_{conv} عددی منفی است یعنی توان از سمت روتور به سمت استاتور جاری است به عبارت دیگر توان از حالت مکانیکی به حالت الکتریکی تبدیل می‌شود که نشان دهنده‌ی کار ژنراتوری است.

2014 05 22

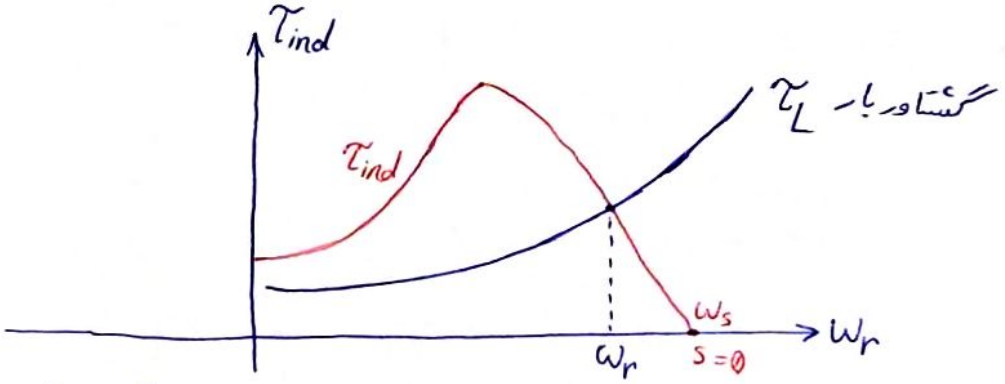
④- به ناحیه‌ی $\omega_r < 0$ یا $s > 1$ ، ناحیه‌ی کار ترمزی گفته می‌شود در این ناحیه گشتاور و سرعت روتور منفی است. لذا بازهم P_{conv} منفی است. یعنی توان از قسمت مکانیکی روتور به سیم پیچ روتور وارد شده است. همچنین از آنجا که در این ناحیه $s > 0$ مثبت است P_{Ag} (توان ورودی از استاتور به روتور) نیز مثبت است (طبق روابط). یعنی هم از استاتور به سیم پیچ روتور توان وارد می‌شود و هم از محور به آن توان تزریق می‌شود این دو توان ورودی در سیم پیچ روتور به صورت تلفات حرارتی از بین می‌روند و همچنین موجب ترمز گرفتن روتور خواهند شد. اهمیت ناحیه‌ی کار ترمزی از آن جهت است که معمولاً می‌توان از آن برای ترمز گرفتن و وادار کردن روتور به عدم چرخش استفاده می‌کنند.

به عنوان مثال موتوری را فرض کنید که در تزدیکیهای سرعت سنکرون در حال چرخش است ($n_r \simeq n_s$). اگر در این وضعیت ناگهان توسط یک کلید جای تغذیه‌ی دو فاز استاتور را عوض کنیم یک میدان هوا رمغناطیسی ایجاد خواهد شد که با سرعت سنکرون ولی در جهت معکوس شروع به حرکت می‌کند. در این لحظه جهت حرکت روتور و همچنین میدان هوا استاتور عکس هم خواهد بود و در نتیجه لغزش تقریباً برابر 2 می‌شود:

$$S = \frac{n_s + n_r}{n_s} \simeq \frac{n_s + n_s}{n_s} = 2$$

یعنی ماشین القایی در ناحیه‌ی کار ترمزی قرار می‌گیرد. از آنجا که میدان هوا استاتور گشتاوری وارد می‌کند که روتور را هم جهت با خود بچرخاند، رفته رفته از سرعت روتور کاسته می‌شود تا به صفر برسد. در این لحظه می‌توان تغذیه‌ی استاتور را قطع کرد تا ماشین از حرکت بایستد.

⑤- معمولاً با توجه به منحنی گشتاور بار، سرعت روتور در بار نامی تزدیک سرعت سنکرون خواهد بود



در این وضعیت S تزدیک به صفر است. در این حالت در بار نامی می‌توان راندمان تقریبی را به صورت زیر بدست آورد:

$$\boxed{\eta \simeq (1 - S)}$$

اثبات:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{conv} - P_{rot}}{P_{Ag} + P_{cus}}$$

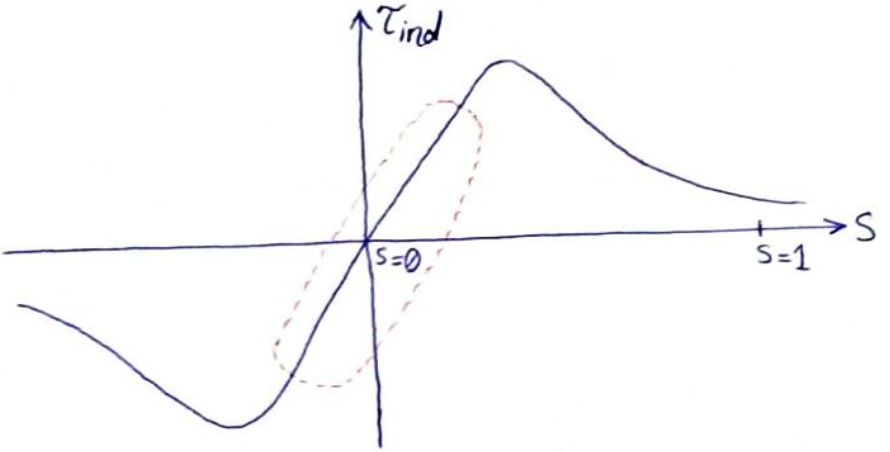
اگر بتوانیم از P_{rot} و P_{cus} صرفنظر کنیم داریم:

$$\eta \simeq \frac{P_{conv}}{P_{Ag}} = \frac{(1-s)\,P_{Ag}}{P_{Ag}} = (1-s)$$

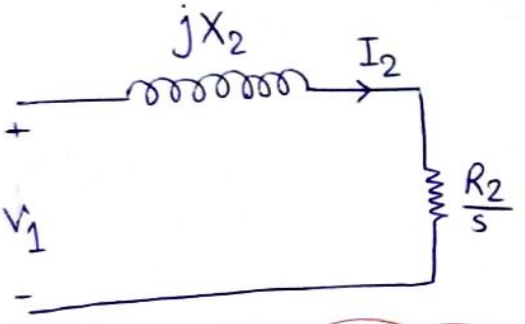
2014 05 22

(۶) - در تردیکیهای سرعت سنکرون ($\omega_r \simeq \omega_s$ یا $s \simeq 0$) ، گشتاور القایی دارای رابطه‌ی خطی با لغزش است:

$$\tau_{ind} = ks$$



اثبات : اگر از مدار معادل تقریبی استفاده کنیم داریم:



$$\Longrightarrow \begin{cases} V_{th} = V_1 \\ R_{th} = 0 \\ X_{th} = 0 \end{cases}$$

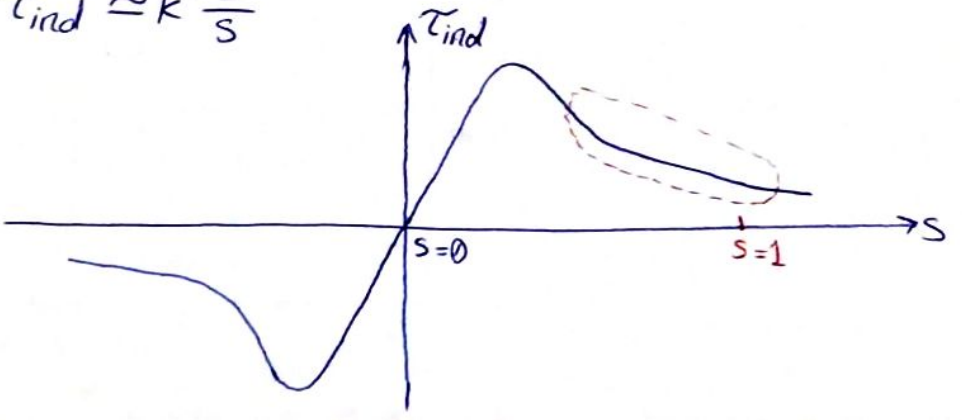
$$\Longrightarrow \tau_{ind} = \frac{3\frac{R_2}{s}V_1^2}{\omega_s\left(\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2\right)}$$

اگر $s \simeq 0 \Longleftarrow \frac{R_2}{s} \gg X_2$

$$\Longrightarrow \tau_{ind} \simeq \frac{3\frac{R_2}{s}V_1^2}{\omega_s\left(\frac{R_2}{s}\right)^2} = \left(\frac{3V_1^2}{R_2\omega_s}\right)s = ks$$

(۷) - اگر سرعت روتور خیلی پایین باشد ($\omega_r \simeq 0$ یا $s \simeq 1$) آنگاه گشتاور القایی متناسب با عکس لغزش خواهد بود:

$$\tau_{ind} \simeq k'\frac{1}{s}$$



2014 05 22

اثبات: به کمک مدار معادل تقریبی داریم:

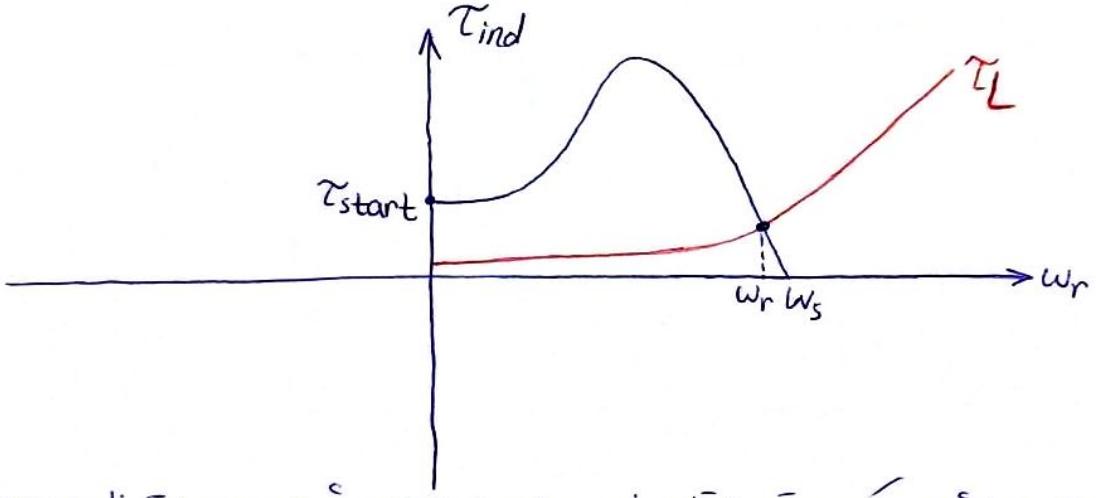
$$\tau_{ind} = \frac{3\frac{R_2}{s}V_1^2}{\omega_s\left(\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2\right)}$$

اگر $s \simeq 1 \Longleftarrow \frac{R_2}{s} \simeq R_2$

از آنجا که در ماشین های القایی معمولاً داریم: $X_2 >> R_2$

$$\Longrightarrow \tau_{ind} \simeq \frac{3\frac{R_2}{s}V_1^2}{\omega_s X_2^2} = \left(\frac{3R_2V_1^2}{\omega_s X_2^2}\right)\frac{1}{s} = k'\frac{1}{s}$$

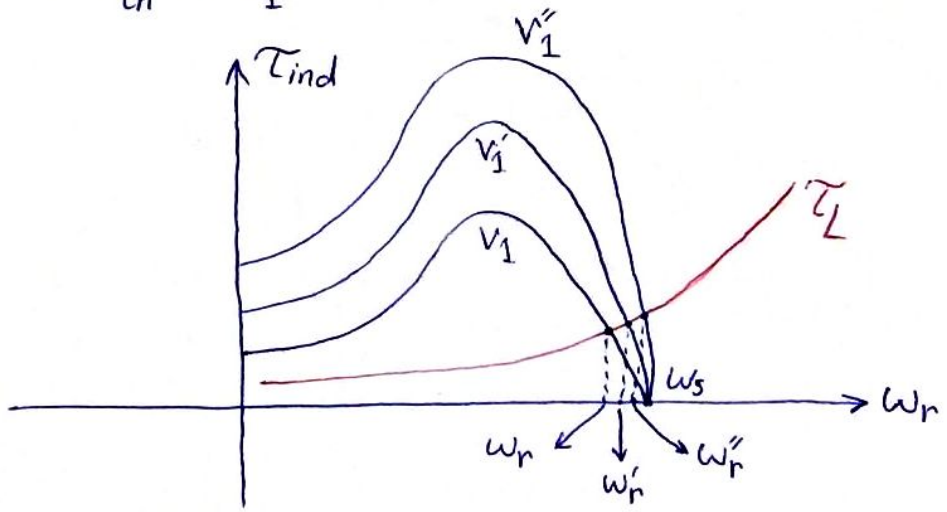
(۸) - موتورهای القایی دارای یک گشتاور راه اندازی غیرصفر (τ_{start}) است.



این گشتاور موجب می شود، که موتور القایی خود به خود راه اندازی شده و به سرعت نامی برسد. (به عنوان مثال یکی از ضعفهای ماشین های سنکرون نداشتن همین گشتاور راه اندازی است.)

(۹) - گشتاور القایی موتور القایی متناسب با مجذور ولتاژ تغذیه است که از این موضوع در کنترل سرعت و گشتاور موتور القایی استفاده می شود:

$$\tau_{ind} \propto V_{th}^2 \propto V_1^2$$

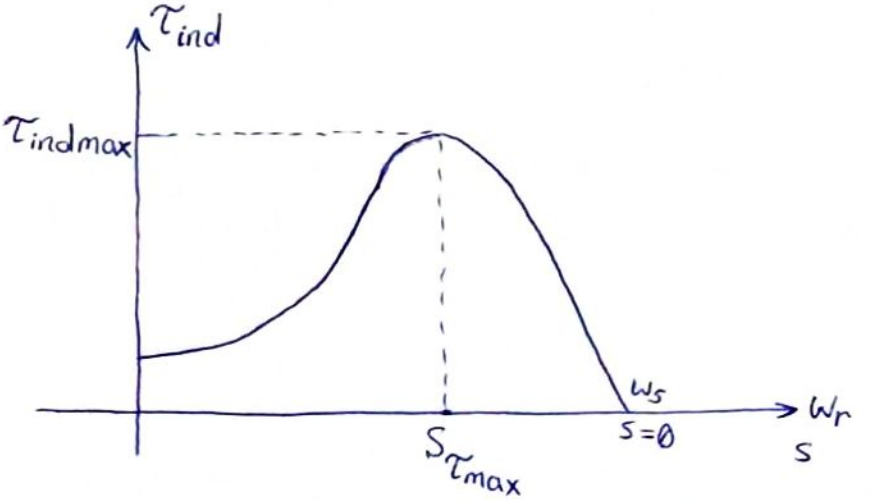


$V_1'' > V_1' > V_1$

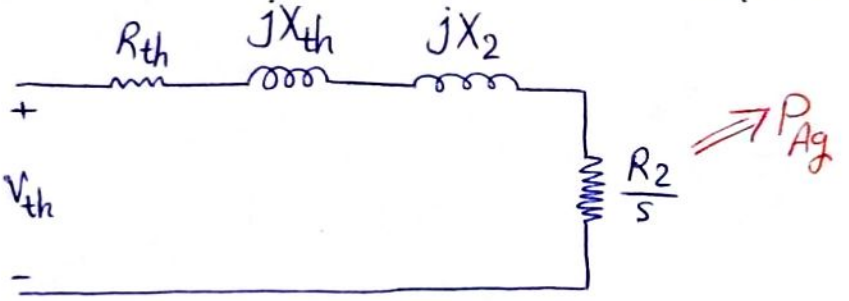
$\omega_r'' > \omega_r' > \omega_r$

2014 05 22

(۱۰) - هر موتور القایی دارای یک گشتاور ماکزیمم (τ_{indmax}) یا گشتاور برون‌کش می‌باشد. این گشتاور حداکثر گشتاوری است که موتور تولید می‌کند.
اگر گشتاور بار بزرگتر از این گشتاور ماکزیمم باشد، موتور قادر به چرخاندن آن نیست.



تعیین گشتاور ماکزیمم و لغزش مربوطه:



$$\tau_{ind} = \frac{P_{Ag}}{\omega_s}$$

τ_{ind} وقتی ماکزیمم است که P_{Ag} ماکزیمم باشد (ω_s عدد ثابتی است). P_{Ag} در مقاومت $\frac{R_2}{s}$ مصرف می‌شود
برای اینکه توان مصرفی $\frac{R_2}{s}$ ماکزیمم گردد بایستی داشته باشیم:

$$\frac{R_2}{s_{\tau max}} = \sqrt{R_{th}^2 + (X_2 + X_{th})^2}$$

$$s_{\tau max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_2 + X_{th})^2}}$$

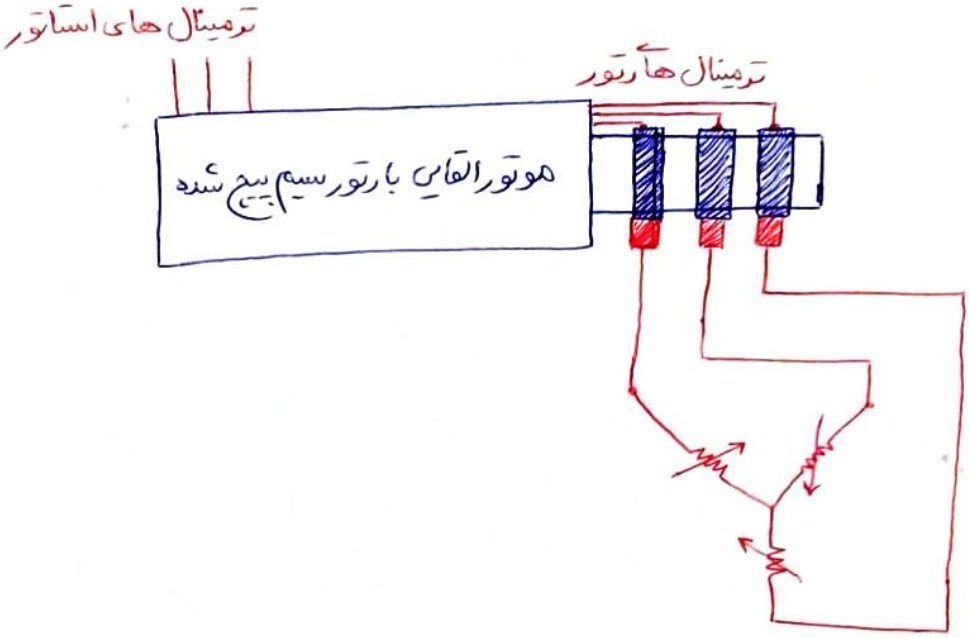
یعنی لغزشی که در آن گشتاور ماکزیمم روی می‌دهد متناسب با R_2 است. با جایگذاری در رابطه‌ی τ_{ind} مقدار ماکزیمم گشتاور به صورت زیر بدست می‌آید:

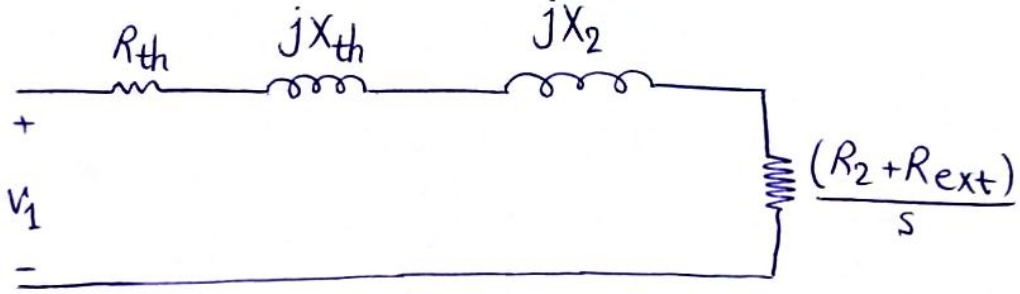
$$\tau_{indmax} = \frac{3V_{th}^2}{2\omega_s\left(R_{th} + \sqrt{\left[R_{th}^2 + (X_2 + X_{th})^2\right]}\right)}$$

2014 05 22

یعنی مقدار گشتاور ماکزیمم مستقل از R_2 است.

ازاین موضوع در راه اندازی موتورهای القایی استفاده می‌گردد می‌دانیم که مقاومت رتور در موتورهای القایی با رتور سیم پیچی شده قابل تنظیم است.

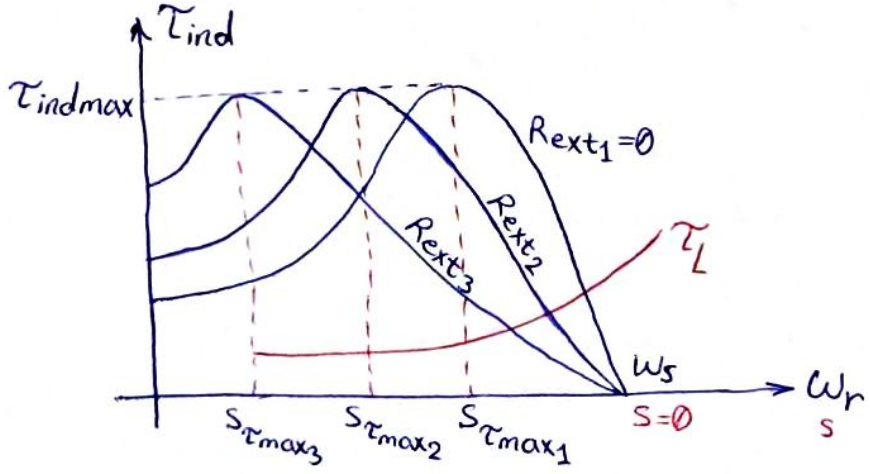




R_{ext} : مقاومت متغیر خارجی متصل به سیم پیچ رتور

تذکر: درصورت استفاده از مقاومت خارجی در تمامی روابط قبل به جای R_2 باید قرار دهیم (R_2+R_{ext})

اگر مقاومت رتور با افزودن یک مقاومت خارجی زیاد شود آنگاه لغزشی که در آن گشتاور ماکزیمم روی می‌دهد بزرگتر می‌شود (سرعت متناظر با آن کوچکتر می‌شود) بدون آنکه گشتاور ماکزیمم تغییر کند.



$R_{ext_3} > R_{ext_2} > R_{ext_1}$ و $s_{\tau max_3} > s_{\tau max_2} > s_{\tau max_1}$

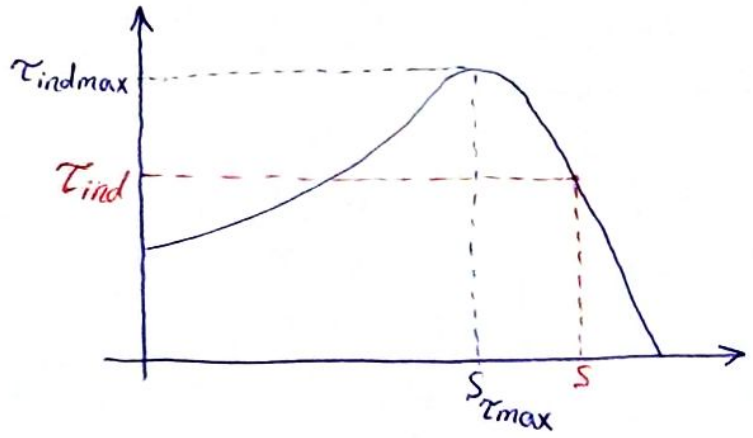
$w_{r\tau max_3} > w_{r\tau max_2} > w_{r\tau max_1}$

2014 05 22

از آنجا که مطلوب است موتور هرچه سریعتر به دور نامی خود برسد، ابتدا R_{ext} را در لحظه‌ی راه اندازی طوری قرار می‌دهیم که گشتاور ماکزیمم در سرعت صفر ($s=1$) رخ بدهد و موتور تحت این گشتاور بالا شتاب گرفته و بر سرعت آن افزوده شود به تدریج و با سرعت گرفتن موتور (افزایش ω_r و کاهش s) R_{ext} را طوری کم می‌کنیم که موتور در همان سرعت، گشتاور ماکزیمم را تجربه کند. تا اینکه در نهایت در تردیکیهای سرعت سنکرون، R_{ext} را کلاً صفر می‌کنیم علت اینکه مقاومت خارجی در نهایت بایستی صفر (یا مقدار کوچک) اختیار گردد آن است که وجود این مقاومت موجب افزایش تلفات و کاهش راندمان می‌شود. به عبارت دیگر همانگونه که در شکل دیده می‌شود با افزایش R_{ext} نقطه‌ی پایدار دارای s بزرگتر و راندمان کمتر ($\eta \simeq 1-s$) خواهد بود

نکته: اگر گشتاور ماکزیمم و لغزش مربوط به آن مشخص باشد، رابطه‌ی زیر را می‌توان برای گشتاور τ_{ind} در لغزش s به کار برد:

$$\frac{\tau_{ind}}{\tau_{indmax}} = \frac{2 s s_{\tau max}}{s^2 + s_{\tau max}^2}$$



اثبات: اگر از R_{th} بتوانیم صرفنظر کنیم داریم:

$$\frac{R_2}{s_{\tau max}} = \sqrt{R_{th}^2 + (X_2 + X_{th})^2} \simeq X_2 + X_{th}$$

$$\tau_{indmax} = \frac{3 V_{th}^2}{2\omega_s \left[R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_2 + X_{th})^2} \right]} \simeq \frac{3 V_{th}^2}{2\omega_s (X_2 + X_{th})}$$

$$\tau_{ind} = \frac{3 V_{th}^2}{\omega_s \left[\left(\frac{R_2}{s} + R_{th} \right)^2 + (X_2 + X_{th})^2 \right]}$$

$$\tau_{ind} \simeq \frac{3 V_{th}^2 \left(\frac{R_2}{s} \right)}{\omega_s \left[\left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_2 + X_{th})^2 \right]}$$

2014 05 22

$$\frac{\tau_{ind}}{\tau_{indmax}} = \frac{\dfrac{3V_{th}^2 \times \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\omega_s\left[\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_2 + X_{th})^2\right]}}{\dfrac{3V_{th}^2}{2\omega_s(X_2 + X_{th})}}$$

$$\frac{\tau_{ind}}{\tau_{indmax}} = \frac{2(X_2 + X_{th})\frac{R_2}{s}}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_2 + X_{th})^2}$$

$$\frac{\tau_{ind}}{\tau_{indmax}} = \frac{2\dfrac{R_2}{s_{\tau max}} \times \dfrac{R_2}{s}}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + \left(\dfrac{R_2}{s_{\tau max}}\right)^2}$$

$$\boxed{\frac{\tau_{ind}}{\tau_{indmax}} = \frac{2SS_{\tau max}}{S^2 + S_{\tau max}^2}}$$

نکته : منحنی P_{conv} برحسب S(یا ω_r) را می‌توان از روی منحنی و روابط τ_{ind} به دست آورد

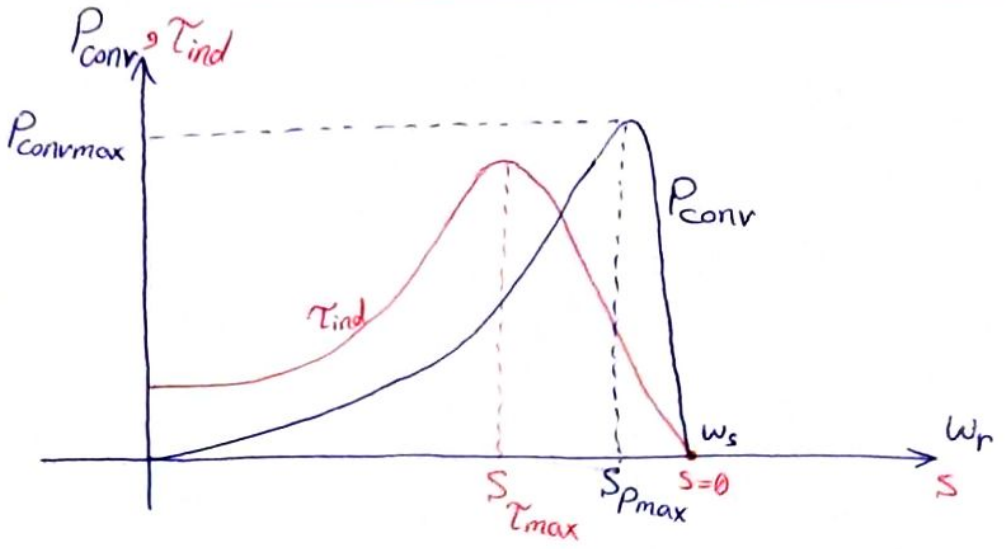
$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_r} \Longrightarrow P_{conv} = \tau_{ind}\,\omega_r$$

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

$$P_{conv} = \frac{3\frac{R_2}{s}V_{th}^2}{\omega_s\left[\left(\frac{R_2}{s} + R_{th}\right)^2 + (X_2 + X_{th})^2\right]} \times (1-s)\omega_s$$

$$\rightarrow \boxed{P_{conv} = \frac{3R_2V_{th}^2}{\left(\frac{R_2}{s} + R_{th}\right)^2 + (X_2 + X_{th})^2} \times \frac{1-s}{s}}$$

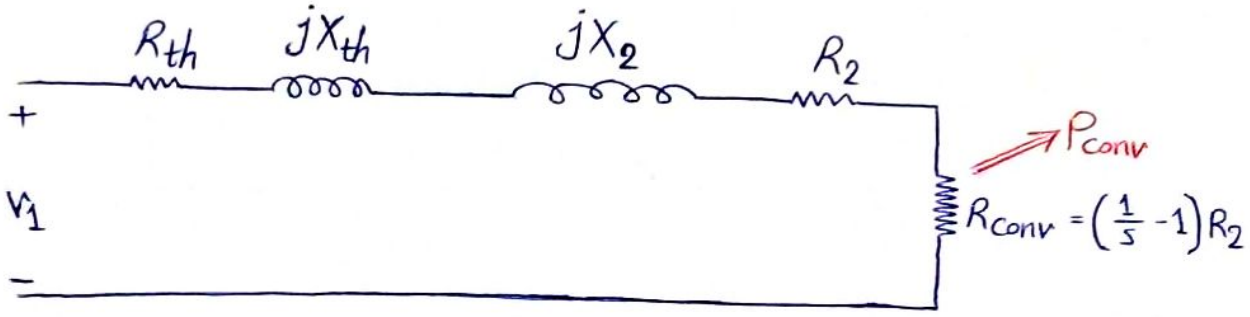
2014 05 22



$$S_{pmax} < S_{\tau max}$$

$$w_{r\,pmax} > w_{r\,\tau max}$$

برای تعیین S_{pmax} مشابه $S_{\tau max}$ عمل می‌کنیم:



$$R_2\left(\frac{1}{S_{pmax}} - 1\right) = \sqrt{(R_{th}+R_2)^2 + (X_2 + X_{th})^2}$$

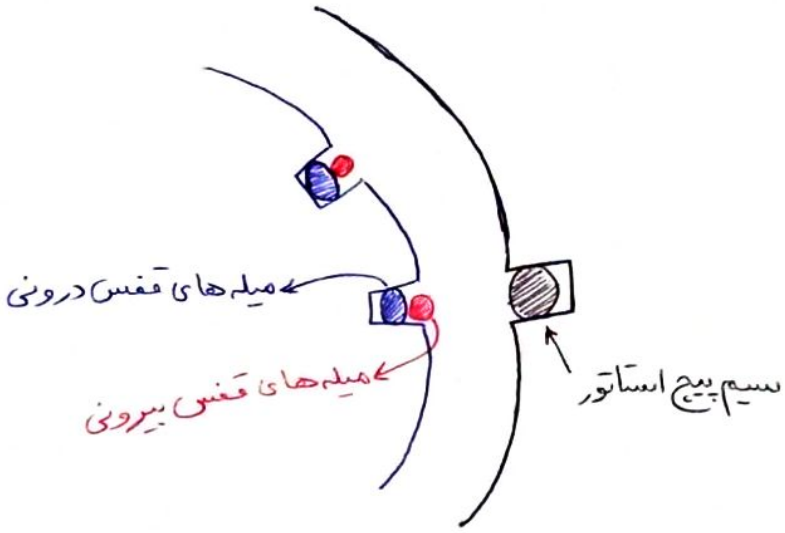
با جایگذاری S_{pmax} در رابطه‌ی P_{conv}، می‌توان $P_{conv\,max}$ را بدست آورد

✓✓ موتور القایی دوقفسه‌ای:

مشاهده شد که در موتور القایی با روتور سیم‌پیچی شده می‌توان مقاومت سیم‌پیچ روتور را تنظیم کرده و موتور را می‌توانستیم با شتاب بیشتری به سرعت نامی برسانیم. ولی چنین امکانی در موتور القایی قفسه‌ای وجود ندارد به کمک موتور القایی دوقفسه‌ای می‌توان بدون هیچ تنظیم اضافی کاری کرد که در راه‌اندازی، مقاومت سیم‌پیچ روتور بزرگ باشد و پس از رسیدن به سرعت نامی مقاومت آن به طور خودکار کم شود (عملی که در موتورهای القایی با روتور سیم‌پیچی شده انجام می‌شد.)

ساختار سیم‌پیچی روتور موتور دوقفسه‌ای به صورت زیر است:

2014 05 22



سیم پیچ رتور از دو قفس تشکیل شده است به گونه‌ای که قفس بیرونی دارای سطح مقطع کم بوده و هادی آن دارای مقاومت ویژه‌ی بزرگتری است و قفس درونی دارای میله هایی باسطح مقطع بزرگتر و مقاومت ویژه‌ی کوچکتر می باشد.

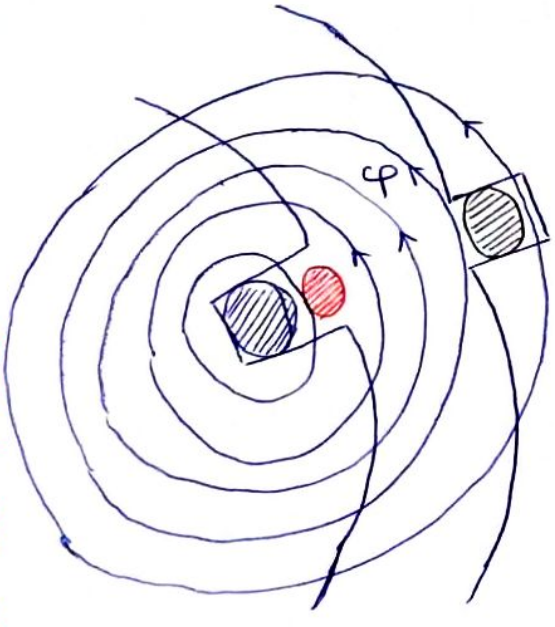
$$R_{2inner} < R_{2outter}$$

مقاومت قفس درونی مقاومت قفس بیرونی

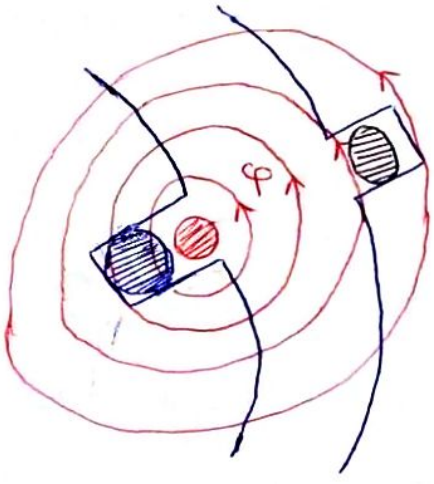
راکتانس نشتی قفس بیرونی کوچکتر از راکتانس قفس درونی است زیرا قفس بیرونی به سیم پیچ استاتور نزدیکتر است ولذا شارهای نشتی آن کمتر خواهد بود

$$X_{2inner} > X_{2outter}$$

راکتانس نشتی قفس درونی راکتانس نشتی قفس بیرونی



شارهای نشتی قفس درونی



شارهای نشتی قفس بیرونی

2014 05 22

- برای بررسی موضوع دو حالت حدی سرعت خیلی کم و سرعت نزدیک سرعت سنکرون را بررسی می‌کنیم :

الف) سرعت خیلی کم ($\omega_r \simeq 0$ و $s \simeq 1$ درحین راه اندازی)

دراین وضعیت $s \simeq 1$ بوده و داریم:

$$\frac{R_{2inner}}{s} \simeq R_{2inner}$$

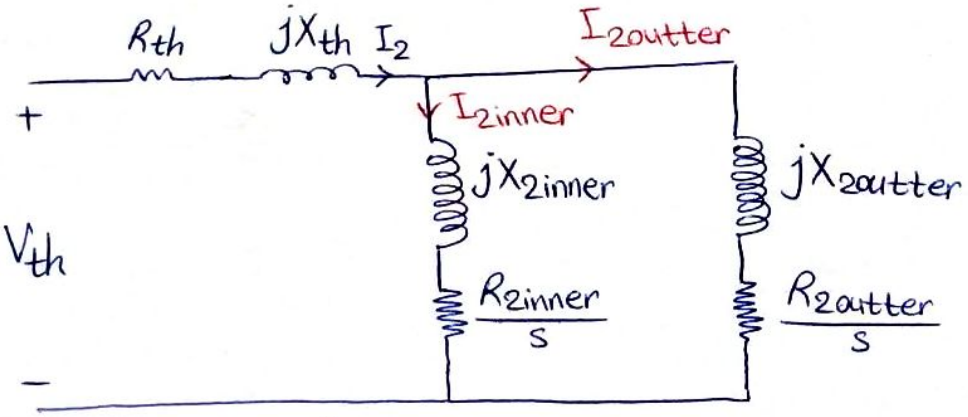
$$\frac{R_{2outter}}{s} \simeq R_{2outter}$$

می دانیم مقاومت سیم‌پیچ های رتور معمولاً خیلی کمتر از راکتانس‌های نشتی آنهاست.

$$R_{2inner} << X_{2inner}$$

$$R_{2outter} << X_{2outter}$$

همچنین می‌دانیم دو قفس بایکدیگر به صورت موازی عمل می‌کنند. لذا مدار معادل موتور القایی دو قفسه مثل شکل زیر می باشد :



از آنجاکه $s=1$ و مقاومت قفس ها خیلی کوچکتر از راکتانس آنهاست ، راکتانس قفس‌ها تعیین کننده‌ی امپدانس شاخه های موازی مدار معادل هستند. چون راکتانس قفس بیرونی کوچکتر از قفس درونی است، جریان قفس بیرونی بزرگتر از قفس درونی خواهد بود یعنی در $s=1$ یا راه‌اندازی قفس بیرونی دارای تأثیر بسیار بیشتری از قفس درونی خواهد بود به این ترتیب از آنجاکه مقاومت قفس بیرونی بزرگ است، در راه‌اندازی مقاومت معادل سیم‌پیچ رتور بزرگ خواهد بود

ب) سرعت نزدیک سرعت سنکرون ($\omega_r \simeq \omega_s$ یا $s \simeq 0$ تحت سرعت نامی)

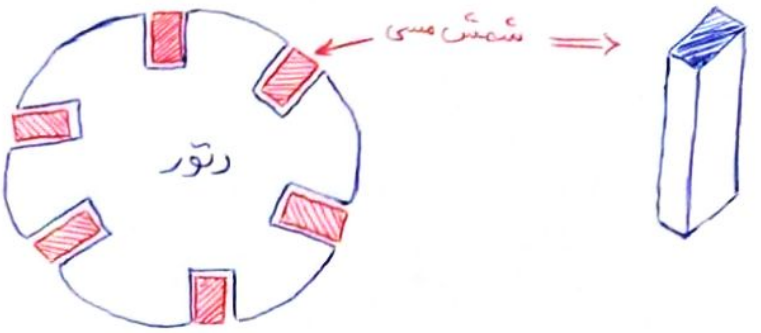
دراین سرعت چون $s=0$ است مقادیر مقاومتهای $\frac{R_{2inner}}{s}$ و $\frac{R_{2outter}}{s}$ بسیار بزرگتر از مقادیر X_{2inner} و $X_{2outter}$ خواهند بود. لذا تقسیم جریان درشاخه های موازی وابسته به این مقاومتها خواهد بود از آنجاکه R_{2inner} خیلی کوچکتر از $R_{2outter}$ است. جریان درقفس درونی خیلی بزرگتر از جریان

2014 05 22

قفس بیرونی خواهد بود یعنی اینکه در سرعت سنکرون تأثیر قفس درونی که دارای مقاومت کوچکی است بسیار بزرگتر از تأثیر قفس بیرونی است. لذا در سرعت سنکرون مقاومت معادل سیم‌پیچ روتور خیلی کم است که این امر مطلوب می باشد.

(۲) - موتور القایی با میله های عمیق:

در این موتور شیارهای روتور عمیق بوده و میله هایی به صورت زیر در آنها جایگذاری می‌شود:



در سرعت صفر روتور ($s=1$) فرکانس ولتاژ و جریان سیم‌پیچ روتور بیش‌ترین مقدار خود ($f_r = sf = f_1$) می باشد در این حالت به دلیل اثر پوستی توزیع جریان در شمش های مسی غیریکنواخت است (جریان در بخش هایی از سطح مقطع شمش که نزدیک به سطح روتور است بزرگتر است). در نتیجه مقاومت سیم‌پیچ روتور در سرعت صفر (لحظه‌ی راه اندازی) بزرگ می باشد که این امر مطلوب ما است.

در نزدیکیهای سرعت سنکرون ($\omega_r \simeq \omega_s$ و $s \simeq 0$)، فرکانس ولتاژ و جریان القایی در سیم‌پیچ روتور نزدیک صفر است ($f_r = sf \simeq 0$) و شبیه به حالت DC است. لذا توزیع جریان در سطح مقطع شمش یکنواخت بوده و مقاومت کل آن پایین خواهد بود که این امر در سرعت های نزدیک سرعت سنکرون مطلوب است.

اندازه‌گیری پارامترهای مدار معادل موتور القایی:

برای بدست آوردن عناصر مدار معادل موتور القایی سه تست مختلف انجام می‌شود:

(۱) - تست DC ⟵ برای اندازه‌گیری R_1

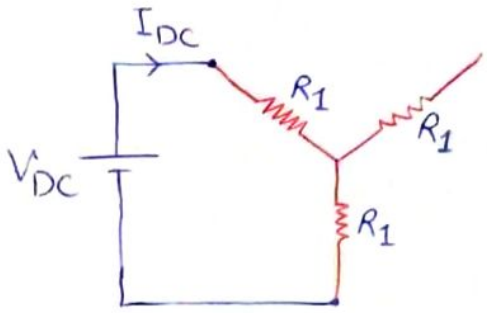
(۲) - تست بی باری ⟵ برای اندازه‌گیری P_{rot} و $(X_1 + X_m)$

(۳) - تست روتور قفل شده ⟵ برای اندازه‌گیری $(X_1 + X_2)$ و R_2

الف) تست DC: در این تست یک ولتاژ DC به پایانه های استاتور متصل می‌شود. به دلیل DC بودن ولتاژ، هیچ میدان دواری تولید نشده و ولتاژی نیز در سیم‌پیچ روتور القا نمی‌گردد. لذا در این وضعیت ماشین القایی مانند بوده و جریان منبع DC فقط توسط مقاومت استاتور تعیین می‌گردد (راکتانس متقابل سیم‌پیچ استاتور در DC صفر است). بسته به اتصال سیم‌پیچ استاتور داریم:

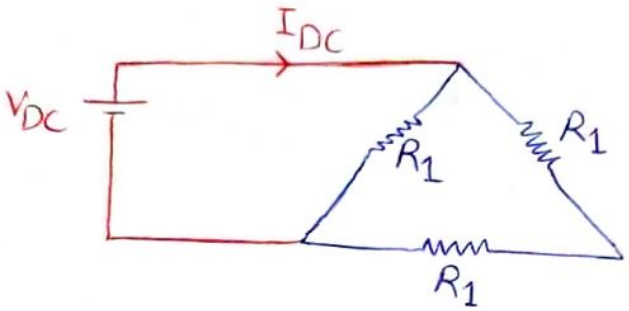
2014 05 22

a) اتصال ستاره



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

b) اتصال مثلث

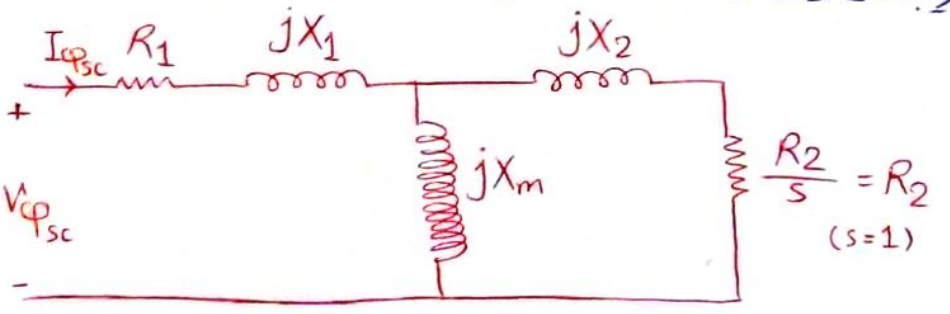


$$V_{DC} = \frac{2}{3} R_1 I_{DC} \Rightarrow R_1 = \frac{3V_{DC}}{2I_{DC}}$$

نکته: مقاومت R_1 بدست آمده از تست DC کوچکتر از مقدار مقاومتی است که سیم‌پیچ استاتور در شرایط کار عادی خود با فرکانس AC از خود بروز می‌دهد. از این رو مقاومت بدست آمده از تست DC را معمولاً در ضریب 1.1 تا 1.3 ضرب می‌کنند تا مقاومت AC سیم‌پیچ استاتور بدست آید.

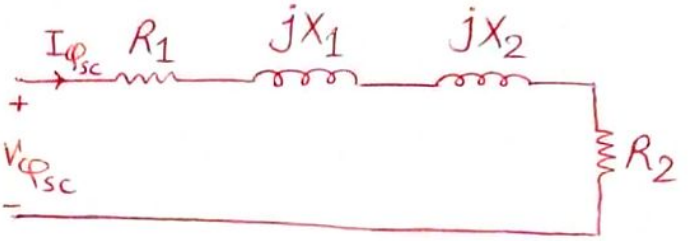
ب) تست روتور قفل‌شده (Blocked Rotor test) یا تست اتصال کوتاه:

در این تست یک ولتاژ سه‌فاز متعادل به سیم‌پیچ‌های استاتور اعمال می‌شود و روتور موتور القایی توسط یک سیستم مکانیکی از حرکت باز داشته می‌شود ($\omega_r = 0$ یا $s = 1$) در این وضعیت مقدار $\frac{R_2}{s}$ در مدار معادل خیلی کوچک بوده ولذا امپدانس $\frac{R_2}{s} + jX_2$ خیلی کوچکتر از امپدانس موازی jX_m خواهد بود. لذا با تقریب می‌توان از شاخه‌ی jX_m صرف‌نظر کرد



(می دانیم که در یک موتور القایی X_m خیلی بزرگ است)

2014 05 22



در این تست مقادیر توان اکتیو مصرف شده P_{sc} ، جریان خط I_{Lsc} و ولتاژ خط V_{Lsc} اندازه‌گیری می‌شود

با توجه به نوع اتصال سیم‌پیچ استاتور داریم :

a) اتصال ستاره ⟶
$$\begin{cases} V_{\varphi sc} = \dfrac{V_{Lsc}}{\sqrt{3}} \\ I_{\varphi sc} = I_{Lsc} \\ P_{\varphi sc} = \dfrac{P_{sc}}{3} \end{cases}$$

b) اتصال مثلث ⟹
$$\begin{cases} V_{\varphi sc} = V_{Lsc} \\ I_{\varphi sc} = \dfrac{I_{Lsc}}{\sqrt{3}} \\ P_{\varphi sc} = \dfrac{P_{sc}}{3} \end{cases}$$

بدست می‌آید :

$$P_{\varphi sc} = (R_1 + R_2) I^2_{\varphi sc} \Longrightarrow R_1 = \frac{P_{\varphi sc}}{I^2_{\varphi sc}} - R_1$$

$$Z_{\varphi sc} = \frac{V_{\varphi sc}}{I_{\varphi sc}} = \sqrt{(R_1+R_2)^2 + (X_1+X_2)^2}$$

$$\Longrightarrow \boxed{X_1 + X_2 = \sqrt{Z^2_{\varphi sc} - (R_1+R_2)^2}}$$

$$\boxed{X_1 + X_2 = \sqrt{\left(\frac{V_{\varphi sc}}{I_{\varphi sc}}\right)^2 - \left(\frac{P_{\varphi sc}}{I^2_{\varphi sc}}\right)^2}}$$

نکته : معمولاً نسبت مقادیر X_1 و X_2 برای هر موتور القایی مشخص است. ($k X_1 = k X_2$ یک عدد تجربی برای هر موتور القایی است.) به کمک این نسبت و رابطه‌ی فوق می‌توان X_1 و X_2 را به طور

2014 05 22

جداگانه بدست آورد.

نکته: دراین تست چون $s=1$ است، فرکانس سیم پیچ رتور برابر با فرکانس استاتور است. ($f_n = sf = f$)
اگر این تست با فرکانس نامی موتور (f_n) تست شود، آنگاه مقدار R_2 در این فرکانس بدست می آید
از آنجا که مقدار این مقاومت درشرایط نامی موتور بسیار پراهمیت است، دوست داریم که مقدار آن را در
شرایط نامی که سرعت نزدیک به سرعت سنکرون است بدست آوریم. درسرعت نزدیک سنکرون ($s\simeq 0$)
فرکانس سیم پیچ رتور خیلی کم بوده (شبیه DC است.) ولذا مقاومت سیم پیچ رتور کمتر از مقداری خواهد
بود که در این تست با فرکانس نامی بدست می آید. ازاین رو، معمولاً این تست با فرکانس کمتر از فرکانس
نامی انجام می پذیرد که این فرکانس تست نزدیک به فرکانس سیم پیچ رتور درشرایط نامی است.
دراین صورت مقادیر بدست آمده از X_1 و X_2 به صورت زیر اصلاح شوند:

$$X_1 = X_{1c}\frac{f_n}{f_{test}}$$

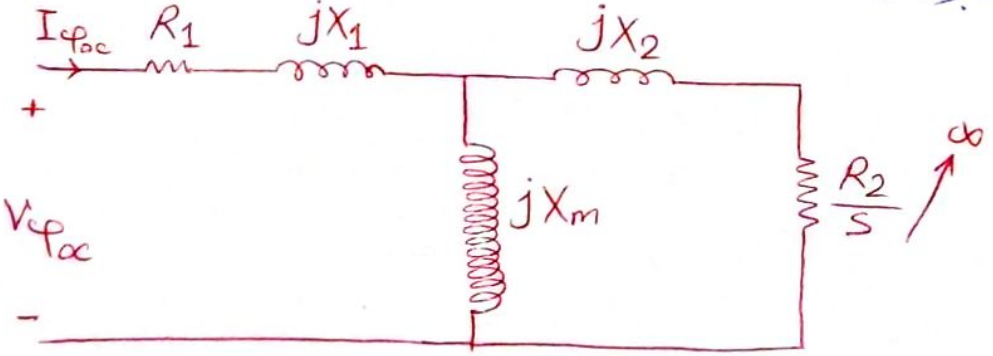
$$X_2 = X_{2c}\frac{f_n}{f_{test}}$$

X_{1c} و X_{2c} مقادیر محاسبه شده برای X_1 و X_2 طبق روابط

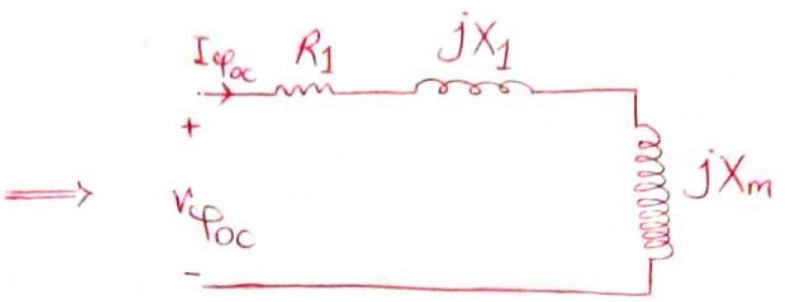
$$\begin{cases} X_1 = kX_2 \\ \text{و} \\ X_1 + X_2 = \sqrt{\left(\frac{V_{\varphi sc}}{I_{\varphi sc}}\right)^2 - \left(\frac{P_{\varphi sc}}{I^2_{\varphi sc}}\right)^2} \end{cases}$$

ج) تست بی باری (No-Load test) یا تست مدار باز:

دراین تست ولتاژ نامی به سیم پیچ های استاتور اعمال شده و محور رتور بدون بار گذاشته می شود و
مقادیر توان تلف شده‌ی P_{oc}، ولتاژ خط V_{Loc} و جریان خط I_{Loc} اندازه گیری می گردد
باتوجه به وضعیت بی باری، سرعت بسیار نزدیک به سرعت سنکرون بوده و $s=0$. درنتیجه مقاومت
$\frac{R_2}{s}$ خیلی بزرگ بوده ولذا می توان از شاخه‌ی $\frac{R_2}{s}+jX_2$ در برابر شاخه‌ی jX_m صرفنظر کرد



2014 05 22



با توجه به اتصال استاتور داریم:

a) اتصال ستاره $\Longrightarrow$

$$\begin{cases} V_{\varphi oc} = \dfrac{V_{Loc}}{\sqrt{3}} \\ I_{\varphi oc} = I_{Loc} \\ P_{\varphi oc} = \dfrac{P_{oc}}{3} \end{cases}$$

b) اتصال مثلث $\Longrightarrow$

$$\begin{cases} V_{\varphi oc} = V_{Loc} \\ I_{\varphi oc} = \dfrac{I_{Loc}}{\sqrt{3}} \\ P_{\varphi oc} = \dfrac{P_{oc}}{3} \end{cases}$$

$$Z_{oc} = \frac{V_{\varphi oc}}{I_{\varphi oc}} = \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}$$

$$\Longrightarrow X_m = \sqrt{Z_{oc}^2 - R_1^2} - X_1$$

$$\Longrightarrow \boxed{X_m = \sqrt{\left(\frac{V_{\varphi oc}}{I_{\varphi oc}}\right)^2 - R_1^2} - X_1}$$

توان کل ← $P_{oc} = P_{rot} + 3R_1 I_{\varphi oc}^2$

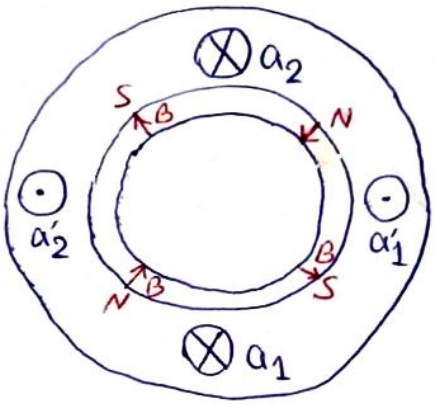
$$\Longrightarrow \boxed{P_{rot} = P_{oc} - 3R_1 I_{\varphi oc}^2}$$

2014 05 22

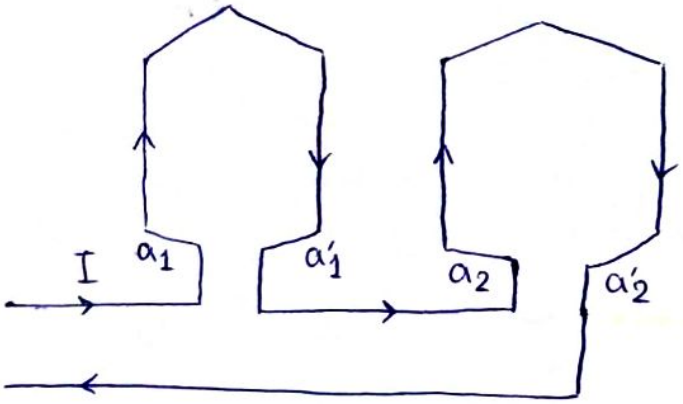
روشهای تنظیم سرعت موتور القایی :

الف) روش تغییر تعداد قطبها :

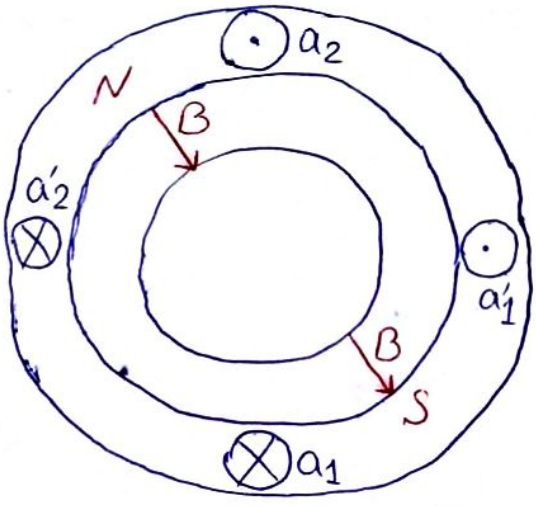
طبق رابطه‌ی $n_s = \frac{120}{P} f$ ، با تغییر تعداد قطبها می‌توان سرعت سنکرون را تغییر داده و درنتیجه سرعت موتور را نیز تغییر داد . برای این منظور می‌توان از دو سیم پیچی جداگانه با تعداد قطبهای مختلف در استاتور استفاده کرد. مشکل این روش سنگین‌تر شدن ماشین و افزایش قیمت آن به دلیل داشتن یک سیم پیچ اضافی در استاتور است . یک روش دیگر برای این منظور ، استفاده از قطبهای تالی است .



P=4

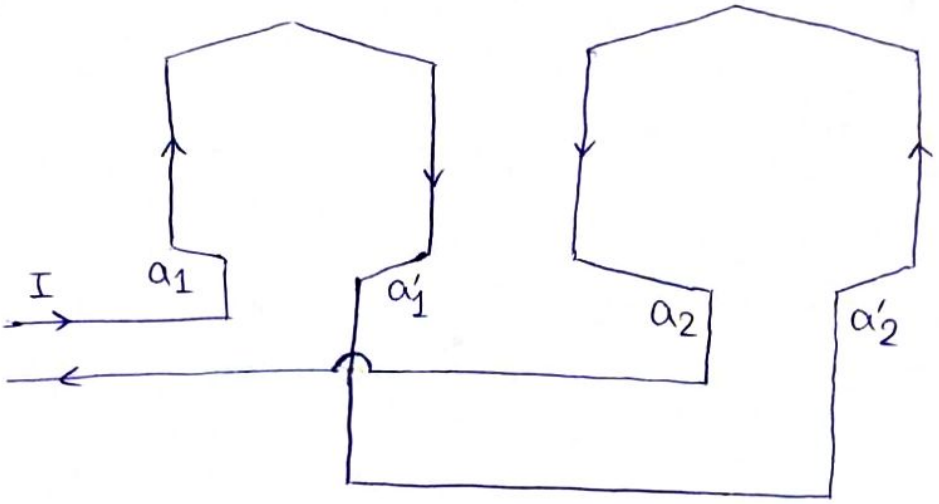


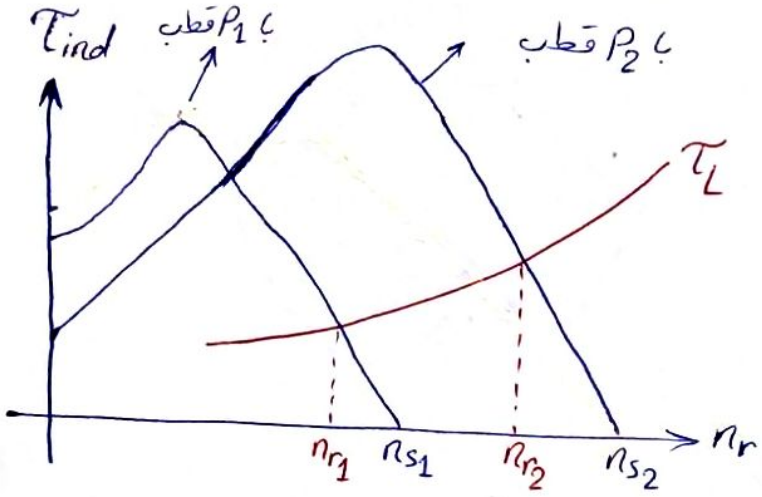
حال اگر اتصالات دو کلاف را توسط یک کلید عوض کنیم ، تعداد قطبها طبق شکل زیر عوض می‌شود



P=2

2014 05 22



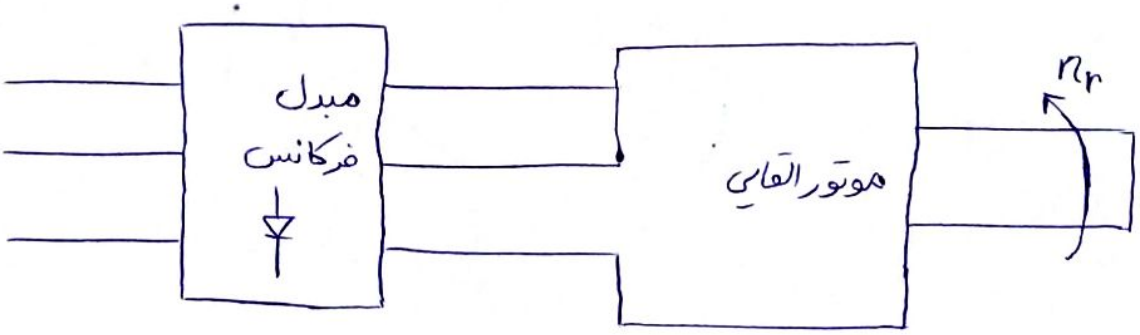


$$P_1 > P_2 \Longrightarrow \begin{cases} n_{s_1} < n_{s_2} \\ n_{r_1} < n_{r_2} \end{cases}$$

ب) تغییر فرکانس

یکی دیگر از روشهای تنظیم دور، روش تنظیم سرعت سنکرون با تغییر فرکانس است ($n_s = \frac{120}{P} f$)

برای تغییر فرکانس می‌توان از ادوات الکترونیک قدرت استفاده نمود



2014 05 22

مزیت این روش نسبت به روش تغییر تعداد قطبها آن است که تغییرات فرکانسی پیوسته است و لذا تغییرات سرعت سنکرون نیز پیوسته خواهد بود. ولی در روش تنظیم سرعت سنکرون به روش تغییر تعداد قطبها، چون تعداد قطبها به صورت گسسته تغییر می‌کرد، سرعت سنکرون نیز دارای تغییرات گسسته بود

البته بایستی در نظر داشت که برای عدم اشباع هسته در فرکانس‌های پایین‌تر از فرکانس نامی باید نسبت $\frac{V}{f}$ ثابت بماند. $(\varphi \propto \left(\frac{V}{f}\right) \Longleftarrow V = 4.44\, N \varphi f)$ همچنین می‌دانیم در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس نامی چون نمی‌توان ولتاژ را بیشتر از ولتاژ نامی اختیار کرد، نسبت $\frac{V}{f}$ کاهش خواهد یافت.

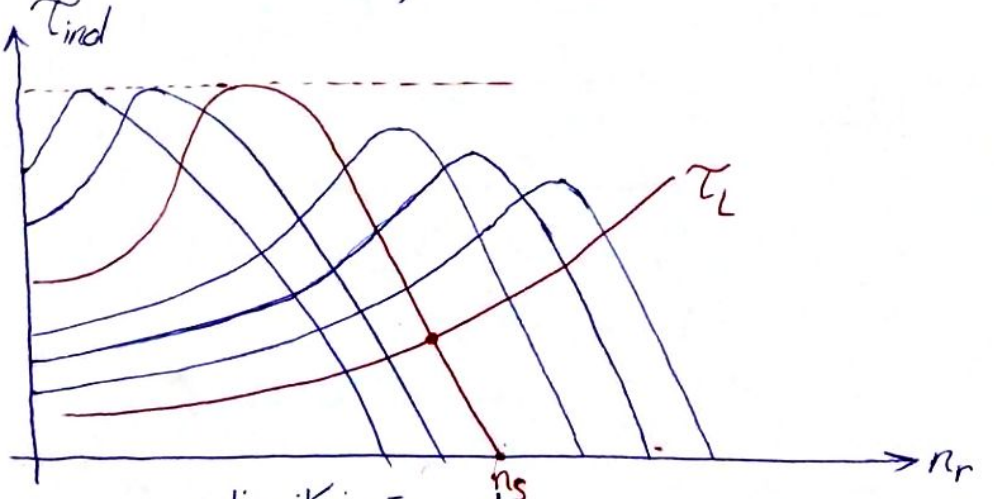
از طرفی می‌دانیم که گشتاور ماکزیمم متناسب است با نسبت $\left(\frac{V}{f}\right)^2$:

$$\tau_{indmax} = \frac{3V_{th}^2}{2\omega_s \left[R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_2 + X_{th})^2}\right.}$$

اگر از R_{th} ، X_{th} صرفنظر شود $\Longrightarrow \tau_{indmax} = \frac{3V_{th}^2}{2\omega_s X_2}$

$$\left.\begin{array}{l} X_2 \propto f \\ \omega_s \propto f \\ V_{th} \propto V \end{array}\right\} \Longrightarrow \tau_{indmax} \propto \left(\frac{V}{f}\right)^2$$

جمع‌بندی: برای کاهش سرعت روتور، باید سرعت سنکرون را با کاهش f کم کنیم ولی در این حالت برای جلوگیری از اشباع هسته ولتاژ را نیز کاهش می‌دهیم تا نسبت $\frac{V}{f}$ ثابت بماند. در این صورت گشتاور ماکزیمم تغییر نمی‌کند. برای افزایش سرعت نیز باید سرعت سنکرون را با افزایش f، زیاد کنیم. که در این وضعیت بدلیل عدم امکان بالا بردن ولتاژ از مقدار ولتاژ نامی، نسبت $\frac{V}{f}$ کاهش یافته و گشتاور ماکزیمم نیز کاهش می‌یابد.

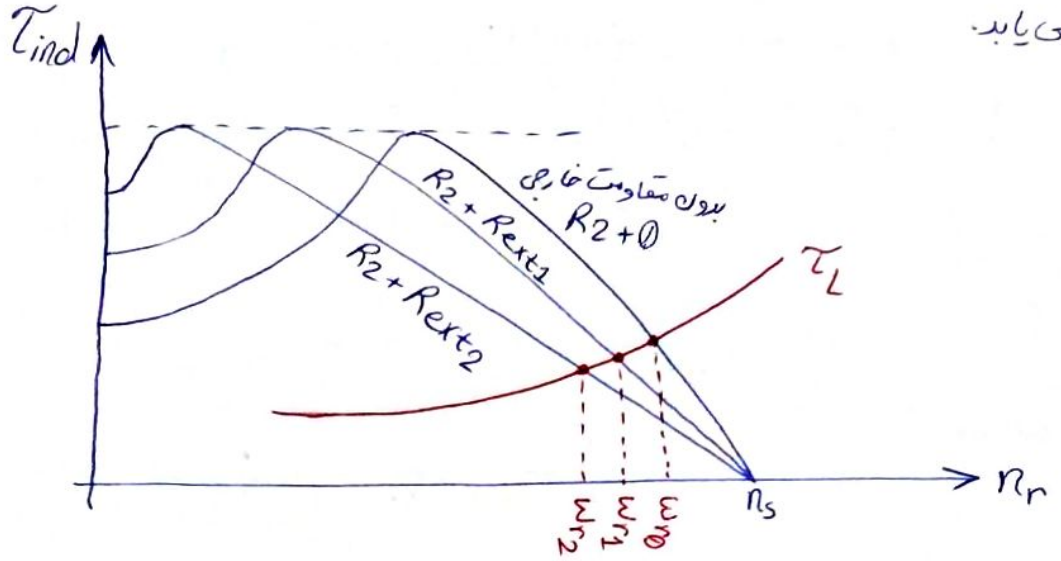


2014 05 22

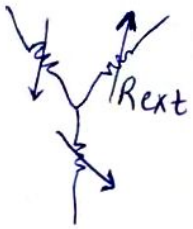
البته باید در نظر داشت که در فرکانس های خیلی کم دیگر نمی‌توان از R_{th} صرفنظر کرد ولذا مقدار گشتاور ماکزیمم کاهش خواهد یافت.

ج) روش تغییر مقاومت روتور:

در موتورهای القایی با روتور سیم پیچی شده اگر مقاومت خارجی متصل به سیم پیچ روتور را افزایش دهیم سرعت روتور کاهش می یابد.

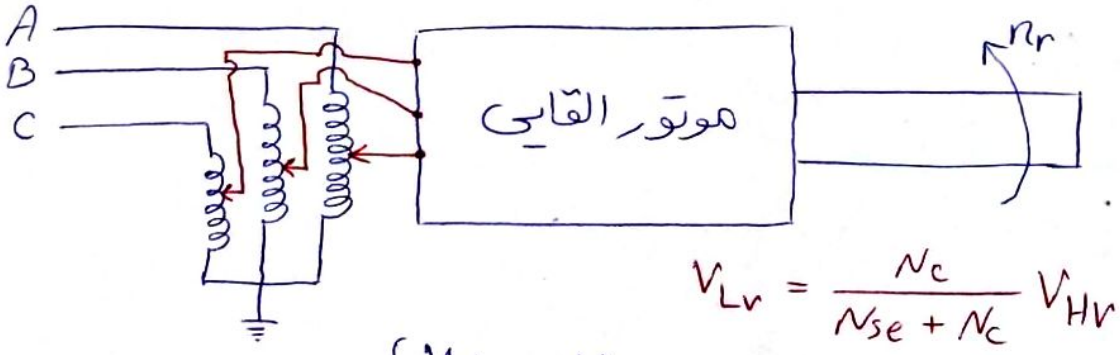


$R_{ext_2} > R_{ext_1} \Longrightarrow \omega_{r_0} > \omega_{r_1} > \omega_{r_2}$ ← مقاومت خارجی قابل تنظیم



د) تغییر ولتاژ تغذیه استاتور:

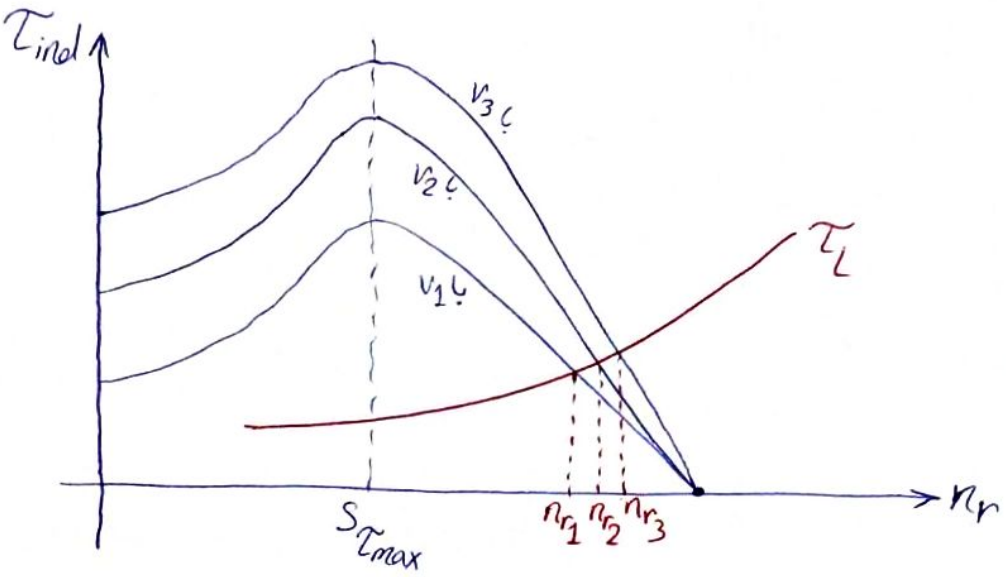
اگر توسط یک اتوترانسفورماتور، ولتاژ تغذیه استاتور تغییر کند، سرعت روتور نیز تغییر خواهد کرد:



$$V_{Lv} = \frac{N_c}{N_{se} + N_c} V_{Hv}$$

$$\begin{cases} V_{th} \propto V_1 \\ \tau_{ind} \propto V_{th}^2 \end{cases} \Longrightarrow \tau_{ind} \propto V_1^2$$

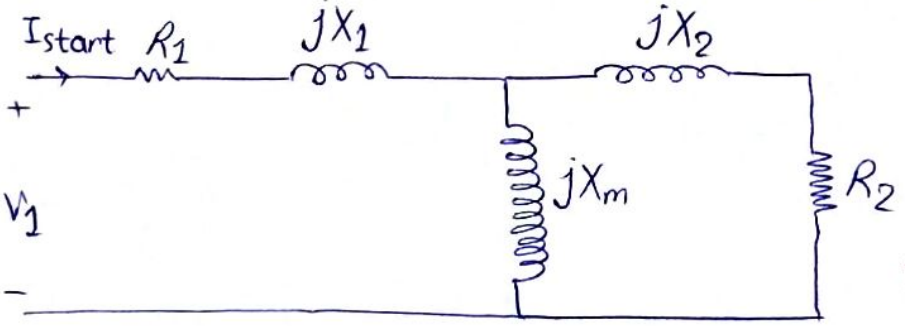
2014 05 22



$$V_1 < V_2 < V_3 \Longrightarrow n_{r_1} < n_{r_2} < n_{r_3}$$

- روش‌های راه اندازی موتور القایی:

در راه‌اندازی موتور القایی ($\omega_r = 0$ یا $s = 1$) مقدار مقاومت $\frac{R_2}{s}$ برابر با R_2 می‌شود و از آنجا که شاخه‌ی $R_2 + jX_2$ خیلی کوچک می‌گردد طبق مدار معادل جریان بسیار بزرگی از موتور کشیده خواهد شد که ممکن است موجب داغ شدن و از بین رفتن سیم پیچها گردد.



مدار معادل در لحظه‌ی راه اندازی

$$I_{start} \simeq \frac{V_1}{\sqrt{(R_1+R_2)^2 + (X_1+X_2)^2}}$$

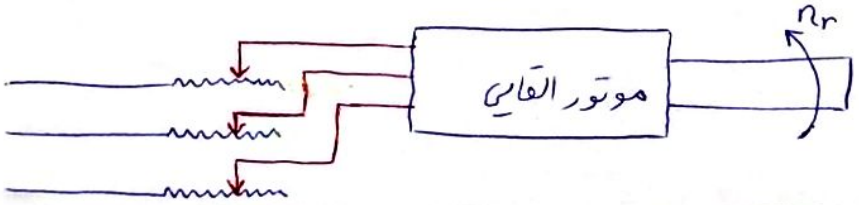
با صرفنظر از مقدار jX_m

برای محدودکردن جریان راه اندازی I_{start} ، از روشهای راه اندازی زیر استفاده می‌شود:

الف) در موتور با روتور سیم پیچی شده مقدار مقاومت خارجی R_{ext} بزرگترین مقدار ممکن انتخاب می‌شود حسن این روش آن است که علاوه بر محدود کردن جریان راه اندازی مقدار گشتاور راه اندازی را نیز افزایش می‌دهد

ب) استفاده از مقاومت سری با استاتور

در این روش یک مقاومت با استاتور سری می‌گردد تا جریان راه اندازی را محدود کند. به عبارت دیگر R_1 افزایش می‌یابد.



2014 05 22

ج) روش تنظیم ولتاژ ورودی با اتوترانسفورماتور :

اگر به کمک یک اتوترانسفورماتور ولتاژ ورودی موتور کاهش یابد، آنگاه جریان راه‌اندازی نیز محدود می‌گردد. ($I_{start} \propto V_1$) دراین وضعیت گشتاور راه‌اندازی نیز کاهش خواهد یافت ($\tau_{ind} \propto V_1^2$)

$$V_1 \downarrow \Longrightarrow \begin{cases} I_{start} \downarrow \\ \tau_{indstart} \downarrow \end{cases}$$

د) روش تنظیم ولتاژ ورودی با تغییر اتصال مثلث به ستاره:

دراتصال ستاره ولتاژ فاز (V_1) ، $\frac{1}{\sqrt{3}}$ برابر ولتاژ خط است. درنتیجه اگر در راه‌اندازی اتصال ستاره را برای استاتور انتخاب شود، جریان راه‌اندازی با این اتصال $\frac{1}{\sqrt{3}}$ برابر جریان راه‌اندازی با اتصال مثلث خواهد بود همچنین گشتاور راه‌اندازی با اتصال ستاره نیز $\frac{1}{3}$ برابر گشتاور راه‌اندازی با اتصال مثلث خواهد بود به عبارت دیگر، در راه‌اندازی اتصال استاتور، ستاره انتخاب می‌شود تا جریان راه‌اندازی محدود بماند وسپس بعداز دورگرفتن موتور، توسط یک سوئیچ سه‌فاز، اتصال استاتور به مثلث تغییر می‌یابد تا گشتاور افزایش یابد.

$$\text{دراتصال ستاره } V_1 = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$$

$$\text{دراتصال مثلث } V_1 = V_L$$

2014 05 22