

مبحث درس : تبدیل انرژی الکترومکانیکی

انرژی الکتریکی \longleftrightarrow انرژی مکانیکی

(1) بازدهی بالای ماشین های الکتریکی

بازده موتور احتراقی

در حالت گذرا 10 تا 20 درصد

در حالت دائمی ماکزیمم 60 درصد

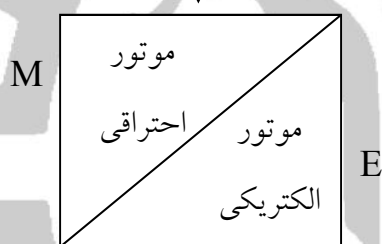
بازده موتور الکتریکی

حداقل 80 درصد

میان 85 درصد

ماکزیمم 95 درصد

موتور الکتریکی حالت گذرا را از روی موتور احتراقی برمی دارد . سوخت



باتری

Total(kw)	M(kw)	E(kw)
100	50	50
70	50	02
50	50	0
20	50	-30
0	50	-50

(2) اثرات زیست محیطی

(3) طول عمر و زمان کارکرد

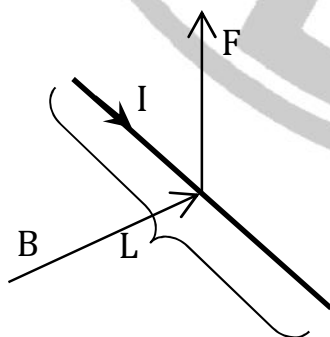
(4) ابعاد و وزن

اثر متقابل الکتریسته و مغناطیس:

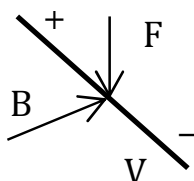
نیروی وارد بر یک سیم حامل جریان \Leftarrow گشتاور الکترو مغناطیسی

ولتاژ القایی یک سیم متحرک در یک میدان مغناطیسی

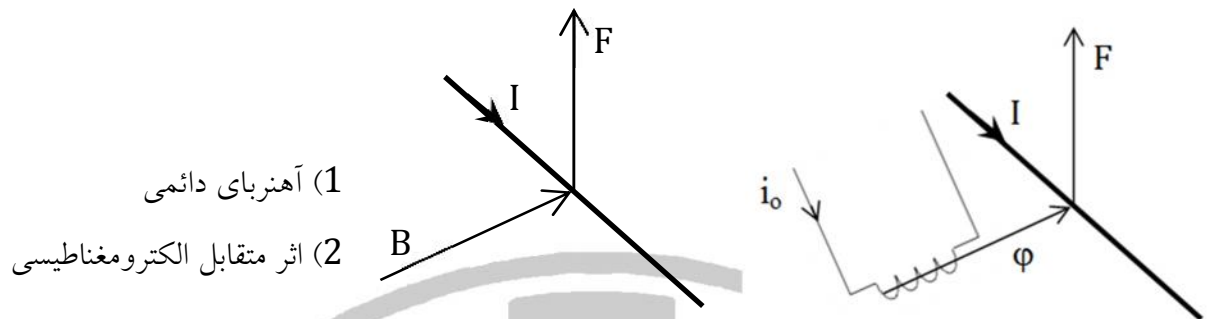
$$F = BIL$$



اساس تولید پتانسیل الکتریکی :



هدف : ساخت موتور



(1) آهنربای دائمی

(2) اثر متقابل الکترومغناطیسی

ابعاد ژنراتور نیروگاه :



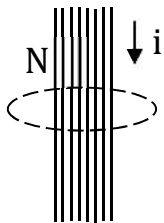
μ_r	نفوذ پذیری نسبی
≈ 1	هوا و خلاء
≈ 1	مس ، طلا ، چوب ، شیشه ، سرب ، روی
2000	آهن

ماشین الکترو مغناطیسی

10000 ϵ_r برای عنصر استرنسیوم ← ماشین الکترو استاتیکی

ادامه بحث اصول ساختمان ماشین های الکتریکی (تبدیل الکترو مکانیکی)

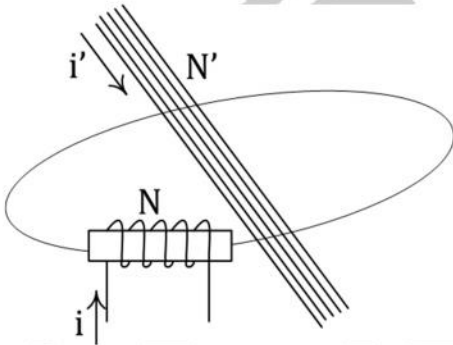
همانطور که گفته شد به دلیل ویژگی های عناصری مانند آهن ، عموماً ماشین های الکتریکی روی هسته آهنی ساخته می شوند . در ادامه به روش های تحلیل در این گونه مسائل می پردازیم .



$$\oint H \cdot dl = i_{net} = Ni$$

اگر مسیر یکنواخت باشد داریم : $HL = Ni$

بنابراین با توجه به اثر آهن علاقه مندیم که در مسیر شار تا حد ممکن از این عنصر استفاده کنیم ، تا چگالی میدان مغناطیسی را افزایش دهیم .



اگر فرض کنیم سطح مقطع شار در طول این مسیر ثابت است
(فرض کاملاً تقریبی است اما به زودی بهبود می یابد)

$$Ni = \oint H \cdot dl = H_{Fe} l_{Fe} + H_g l_g$$

$$Ni = \left(\frac{l_{Fe}}{A\mu} \right) (\phi_{Fe}) + \left(\frac{l_g}{A\mu_0} \right) (\phi_g)$$

سطح مقطع ثابت است : $\phi_{Fe} = \phi_g$

$$Ni = \phi_{Fe} \left(\frac{l_{Fe}}{A\mu_{Fe}} + \frac{l_g}{A\mu_0} \right)$$

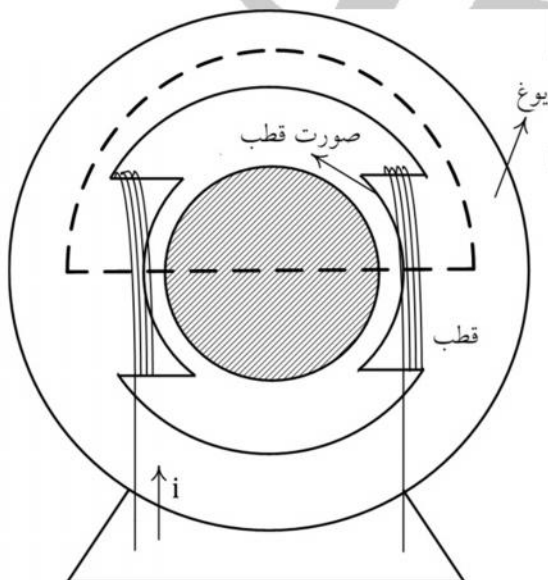
$$\mu_{Fe} = 2000\mu_0$$

1) طول مسیر فاصله هوایی در مسیر شار باید تا حد ممکن کم باشد (تا آمپر دور کمتر صرف قسمت هوایی شود)

2) فرض ثابت بودن سطح مقطع کاملاً درست نمی باشد .

بخش ثابت ماشین : stator

بخش گردان ماشین : rotor



هدف : محاسبه چگالی میدان در فاصله هوایی

با فرض یکنواخت بودن خطوط میدان

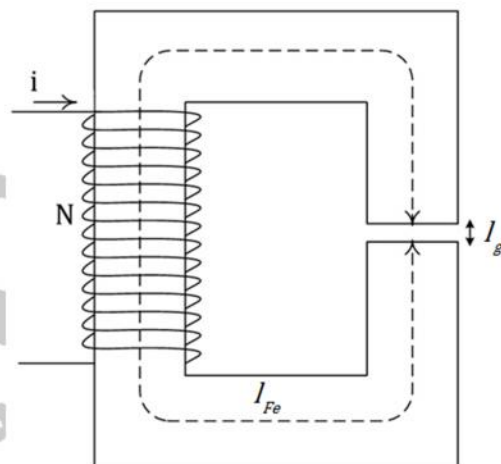
$$Ni = \oint H \cdot dl$$

$$= H_{Fe} l_{Fe} + H_g l_g$$

$$= \left(\frac{l_{Fe}}{A\mu} \right) (\phi_{Fe}) + \left(\frac{l_g}{A\mu_0} \right) (\phi_g)$$

$$= \phi_{Fe} \left(\frac{l_{Fe}}{A\mu_{Fe}} + \frac{l_g}{A\mu_0} \right)$$

$$\Rightarrow Ni = (R_F + R_g) \phi$$



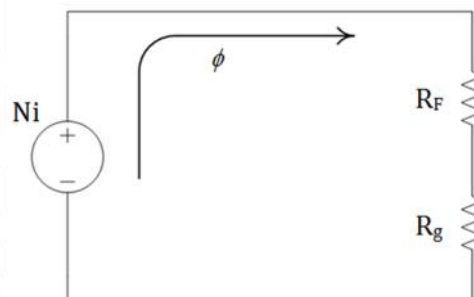
$$R_m = \frac{l}{\mu A} \quad (\text{رلوکتانس})$$

می توان برای محاسبات این رابطه را به صورت یک قانون اهم حل نمود .

$$Ni = (R_F + R_g) \phi$$

$$V = Ri$$

$$\begin{cases} V \rightarrow Ni \\ R_e \rightarrow R_m \\ i \rightarrow \phi \end{cases}$$



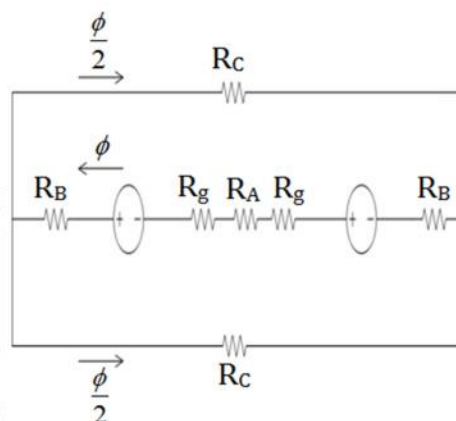
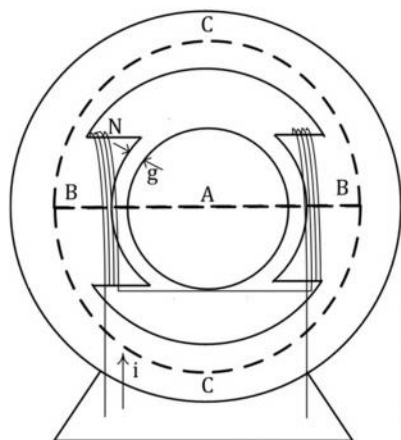
توجه: در منبع ولتاژ Ni (در مدار معادل الکتریکی هم ارز مدار مغناطیسی) ، i هیچ ربطی به جریان مدار معادل

(ϕ) ندارد و تنها به صورت غیر مستقیم $\phi = \frac{Ni}{R}$ می باشد .

توجه: در رابطه $Ni = R\phi$ ، i و ϕ مقدار های لحظه ای می باشند .

مثال : برای ماشین گردان نشان داده شده ، مدار معادل مغناطیسی را رسم کنید .

هدف محاسبه شار در نقاط مختلف ماشین است .



توجه : شار یوغ نصف شار شاخه وسط می باشد

توجه : اگر چگالی شار را ثابت فرض کنیم \Leftarrow سطح مقطع یوغ نصف شاخه وسط می باشد

محاسبه شار شاخه وسط :

$$\phi_g = \frac{2Ni}{2R_g + 2R_B + R_A + \frac{R_C}{2}}$$

سوال : به چه روش می توان شار را افزایش داد؟

$$\phi_{\text{یوغ}} = \frac{\phi_g}{2} = \phi_C$$

فرض کنید $A_g = A_A = A_B = 2A_C = A$

$l = 30\text{cm}$ (طول)

$D = 15\text{cm}$ (قطر کلی)

برای یک موتور 500 وات:

مقایسه مقادیر رلوکتانس ها :

$$l_A + 2l_B = 15\text{cm}$$

$$2l_C = 15\pi \approx 50\text{cm}$$

$$g = 5\text{mm}$$

$$R_A = \frac{l_A}{\mu_0 \mu_r A}$$

$$R_B = \frac{l_B}{\mu_0 \mu_r A}$$

$$R_C = \frac{2l_C}{\mu_0 \mu_r A}$$

$$R_g = \frac{0.5}{\mu_0 A}$$

$$R_A + 2R_B = \frac{15}{\mu_0 \mu_r A}$$

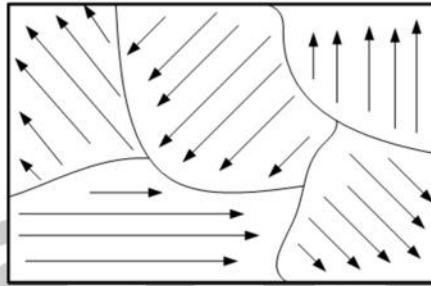
$$\frac{R_C}{2} = \frac{25}{\mu_0 \mu_r A}$$

$$\sum R = \frac{1}{\mu_0 A} \left(0.5 + \frac{40}{\mu_r} \right) = \frac{1}{\mu_0 A} (0.5 + 0.02)$$

حداکثر 4 درصد تاثیر گذاری آهن

ویژگی های مواد فرومغناطیسی:

این مواد در ساختار کریستالی خود دارای حوزه های مغناطیسی همسو می باشند که برآیند همه آنها در حالت عادی تقریباً صفر است .

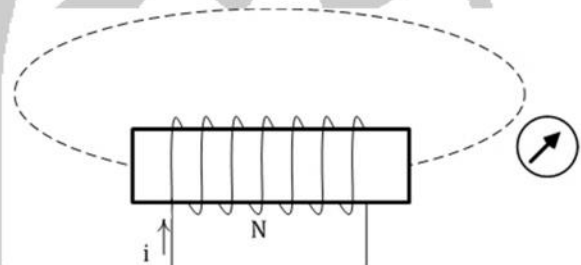
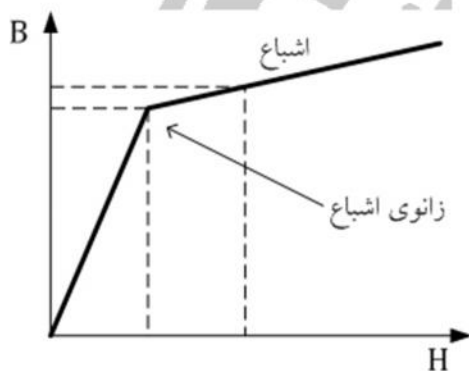


مواد دیگر (غیرفرومغناطیس) دارای این حوزه ها نیستند . این مواد به دو دسته تقسیم می شوند :

(1) پارامغناطیس

(2) دیامغناطیس

در ادامه برای بررسی رفتار این عناصر آزمایش زیر را انجام می دهیم .



عمدتاً به دلیل اینکه :

(1) تا زانوی اشباع هنوز μ_r مقدار اولیه خود را دارد و بزرگ است.

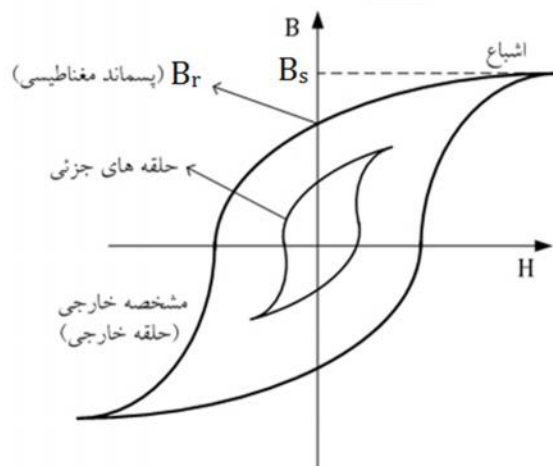
(2) بعد از اشباع درصد افزایش B نسبت به H به شدت کاهش می یابد .

بنابراین نقطه کار مناسب زانوی اشباع می باشد .

در مورد علت پدیده اشباع توجه کنید که در حوزه های مغناطیس کوچک داخلی چگالی میدان بسیار بالا می

باشد ($\mu_r = 2000$) وقتی که شدت میدان مغناطیسی افزایش می یابد ، این حوزه ها با میدان هم خط شده و

برآیند میدان هسته را افزایش می دهند .



ادامه آزمایش : در ادامه شدت میدان مغناطیسی را کاهش

می دهیم ، توجه کنید که علامت هنوز ثابت است . در ادامه

شدت میدان مغناطیسی را برعکس می کنیم (از نظر

علامت) و مقدار آنرا در جهت معکوس افزایش می دهیم .

برای ورق های آهن متداول در بازار :

$$B_s : 1.2T \dots 2.4T$$

$$B_r : 0.1T \dots 0.3T$$

مشخصه خارجی به پهن ترین حالت منحنی B-H گفته می شود

قانون فاراده :

اگر یک سیم پیچ با N دور در مجاورت شدت میدان مغناطیسی قرار بگیرد ، در آن ولتاژی به وجود می آید

که با شار مخالفت کند . مقدار این ولتاژ با تغییرات شار نسبت مستقیم دارد . $e = N \frac{d\phi}{dt}$

قانون فاراده یک قانون دو طرفه است ، یعنی اگر به یک سیم پیچ ولتاژی اعمال شود ، شار به وجود آمده باز هم از قانون فاراده بدست می آید .

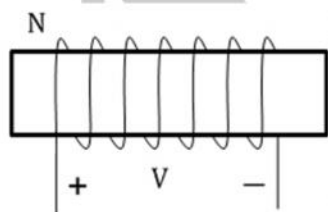
مخصوصاً در حالت دوم (اعمال ولتاژ و تولید شار) عامل به وجود آورنده شار معلوم نمی باشد .

عامل به وجود آورنده شار ، جریان الکتریکی است و در این رابطه هیچ اثری از آن وجود ندارد

اعمال این ولتاژ به هر سیم پیچ (با هر هسته ای از جمله هوا ، خلاء ، چوب ، مس ، آهن و...) به یک شار منجر می شود ، اما در این حالت در واقع عامل تحریک سیم پیچ یک منبع ولتاژ می باشد ، نه یک منبع جریان .

بنابراین بر طبق خاصیت منبع ولتاژ هر جریانی مجاز است از آن عبور کند.

بنابراین قانون فاراده مقدار شار را نتیجه می دهد ولی نمی گوید در چه مقدار جریانی این شار تولید شده



حالت اول : هسته آهن $V = N \frac{d\phi}{dt}$

حالت دوم : هسته غیر آهن $V = N \frac{d\phi}{dt}$

ϕ در هر دو حالت یکسان است . با فرض A یکسان و با توجه به رابطه $\phi = BA$

نتیجه می شود که B در هر دو حالت یکسان است .

$$Ni_1 = H_1 L = \frac{B}{\mu_0} L$$

$$Ni_2 = H_2 L = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} L$$

$$\Rightarrow i_2 = \frac{i_1}{\mu_r}$$

اما در عمل مقدار B هسته آهنی از هسته غیر آهنی بیشتر است. دلیل این موضوع مقاومت سیم پیچ است.

چون منابع مستقل واقعی ما در عمل منابع ولتاژ می باشند، بنابراین وجود مقاومت سری با منابع باعث محدودتر

شدن جریان آن می شود، بنابراین در حالت هسته آهنی ، مقدار شار محدود تر می شود ، چون به دلیل افت

روی این مقاومت مقدار V کاهش می یابد و بنابراین ϕ کم می شود .

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = NA \frac{dB}{dt}$$

$$B = B_m \sin \omega t$$

$$e = N\omega B_m A \cos \omega t$$

$$e_m = N\omega B_m A$$

$$e_{rms} = \frac{e_m}{\sqrt{2}} = \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \right) NfB_m A = 4.44 NfB_m A$$

مقدار rms سینوسی برابر است با :

(رابطه فوق قانون فاراده برای حالت دائمی سینوسی است)

B_m در رابطه بالا حداکثر چگالی شار مغناطیسی است.

بنابراین برطبق قانون فاراده در حالت دائمی سینوسی اگر یک ولتاژ سینوسی به سیم پیچی اعمال شود داریم :

$$V = 4.44 NfB_m A$$

اگر به هسته اشباع شونده مفروضی ولتاژ V سینوسی را اعمال کنیم نتیجه مقدار شار مشخصی می شود. جریانی که منجر به این شار می شود، از قانون آمپر بدست می آید، که اگر در ناحیه خطی منحنی $B-H$ باشیم ، مقدار آن نسبت به وقتی که هسته غیر آهنی باشد به اندازه μ_r کمتر است .

اگر اندازه ولتاژ را افزایش دهیم (به قدری که در ناحیه اشباع برویم) به دلیل کاهش شدید μ_r مقدار جریان بسیار زیاد می شود ، در حالی که شار فقط به اندازه ولتاژ زیاد ده است . بنابراین همواره سعی می کنیم در ناحیه زیر زانوی اشباع کار کنیم .

سوال : چرا علاقه مندیم که با وجود خطر فوق (رفتن به اشباع) درست در نزدیک زانوی اشباع کار کنیم ؟

اگر $B \uparrow$ (در V و f ثابت) $\Leftarrow NA \downarrow$

پس ابعاد ماشین کوچکتر می شود .

سوال : چرا در هواپیما و ادوات نظامی قابل حمل فرکانس منبع 400 هرتز است؟

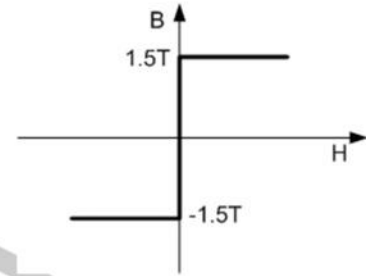
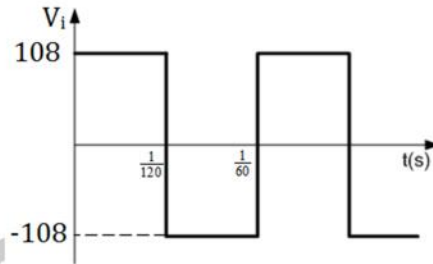
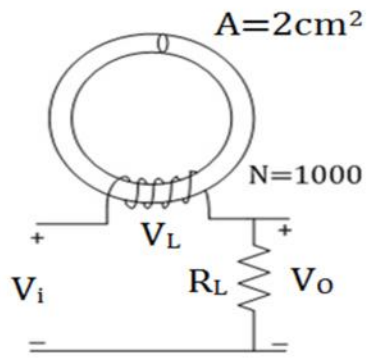
اگر $f \uparrow$ (در V و B ثابت) $\Leftarrow NA \downarrow$

در فرکانس فوق ورق مغناطیسی باید نازک تر شود و در نتیجه باید درجه خلوص را زیادتیر کنیم که بسیار

هزینه بر می شود ، پس برق شهر را 400 هرتز نمی کنیم .

مثال (از فصل اول کتاب Sen) مطلوبست V_0

مشخصات هسته :



اگر هسته به اشباع نرفته باشد : $(H = \frac{Ni}{L}, H = 0 \Rightarrow i = 0)$

$$KVL: -V_i + V_L + V_o = 0 \Rightarrow V_i = V_L + V_o$$

$$V_o = 0 \Rightarrow V_L = V_i$$

$$V = N \frac{d\phi}{dt} \quad \text{و یا} \quad \Delta\phi = \frac{1}{N} \int_0^{\Delta t} V dt$$

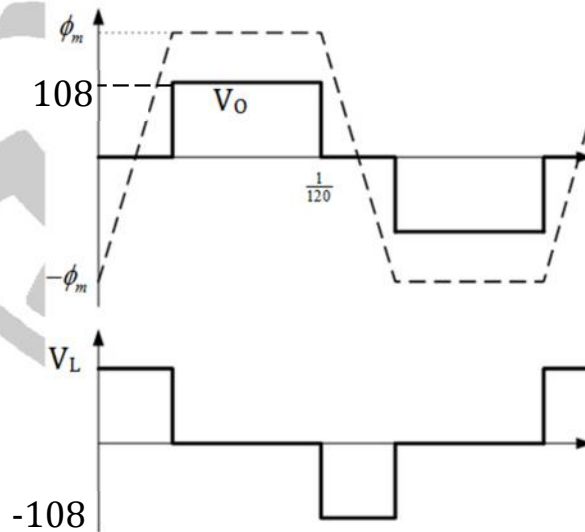
برطبق قانون فاراده :

بنابراین تا وقتی که به اشباع نرفته ایم شار هسته به صورت خطی تغییر می کند .

چک کردن شرط اشباع :

$$\phi_m = 1.5 \times 2 \times 10^{-4}$$

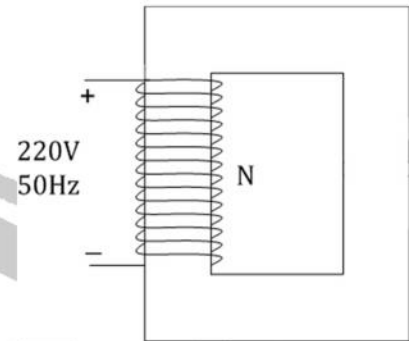
$$2\phi_m = \frac{1}{N} \int_0^{\Delta t} V dt \Rightarrow 2 \times 1.5 \times 2 \times 10^{-4} = \frac{1}{1000} \times 108 t \Rightarrow t = \frac{1}{360} s$$



مثال : یک هسته فرو مغناطیس سیم پیچی شده با 100 دور سیم مفروض است . سطح مقطع هسته 0.01 m^2 و از اثرات اشباع صرف نظر می شود . مطلوبست محاسبه شار و چگالی شار در هسته؟
با استفاده از قانون فاراده در حالت دائمی سینوسی داریم :

$$V = 4.44 N f B A = 4.44 N f \phi$$

$$\Rightarrow 220 = 4.44 \times 100 \times 50 \times \phi \Rightarrow \phi \approx 0.01 \text{ wb} \Rightarrow B_m = \frac{\phi_m}{A} = \frac{0.01}{0.01} = 1 \text{ T}$$



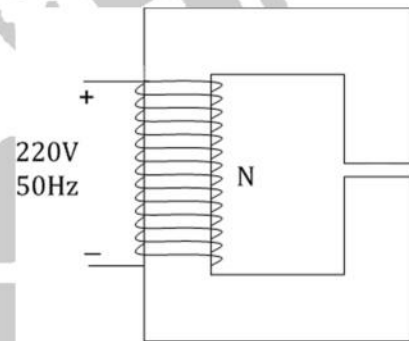
در ادامه در هسته یک شکاف هوایی با طول 1cm ایجاد می کنیم ، مجدداً داریم :

$$\phi \approx 0.01 \text{ wb} \Rightarrow B_m = 1 \text{ T}$$

در هوا و در هسته آهنی

$$\frac{\sqrt{A}}{10} = 0.01 \text{ m} = 1 \text{ cm}$$

✓



تفاوت این دو حالت در میزان جریانی است که از منبع ولتاژ ورودی کشیده می شود . اگر طول موثر هسته را یک متر (1m) و $\mu_r = 1000$ فرض کنیم .

$$R_{Fe} = \frac{l_{Fe}}{\mu_0 \mu_r A} = \frac{1}{1000 \mu_0 A}$$

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 A} = \frac{0.01}{\mu_0 A} = 10 R_{Fe}$$

$$N i_1 = R_{Fe} \phi$$

در حالت بدون شکاف هوایی :

$$N i_2 = (R_{Fe} + R_g) \phi = 11 R_{Fe} \phi$$

در حالت با وجود شکاف :

بنابراین در حالت دوم میزان جریانی که از منبع کشیده می شود ، اثر قابل توجهی دارد (11 برابر) و بنابراین اگر نیازی نیست باید از شکاف هوایی پرهیز شود .

مثال : یک هسته سیم پیچی شده مفروض می باشد . سیم پیچ این هسته توسط ولتاژ برق شهر 60 هرتز تحریک می شود و در زانوی اشباع کار می کند . آیا می توان از این هسته در فرکانس های 50 هرتز و 400 هرتز استفاده نمود؟

الف: 50 هرتز: با توجه به قانون فاراده در حالت دائمی سینوسی $f \downarrow \Rightarrow B \uparrow$ در نتیجه هسته به اشباع میرود.
ب: 400 هرتز : می توان بدون رفتن به اشباع فرکانس را زیاد کرد . اما در این حالت قدرت موتور به شدت کم می شود (برطبق رابطه $F=BIL$ و با توجه به کاهش B)



تلفات هسته :

در یک هسته فرومغناطیس که با ولتاژ AC تحریک می شود دو منبع برای تولید تلفات حرارتی وجود دارد .
الف : تلفات هیستریزیس : این تلفات با سطح حلقه هیستریزیس (A_{B-H}) نسبت مستقیم دارد . بدین معنی که در هر بار حرکت در این حلقه به اندازه سطح حلقه انرژی تلف می شود .

$$P_h = f \times A_{B-H}$$

به طور کلی رابطه سطح حلقه B-H به صورت $k_h B^n$ می باشد که ضریب k_h تابعی از جنس ماده و حجم و ابعاد هسته است و B حداکثر چگالی شار مفروض می باشد . حدود n به صورت $1 < n \leq 2$ می باشد و معمولاً $n=2$ فرض می شود .

$$P_h = k_h B^n f$$

در نتیجه خواهیم داشت:
مثال : یک سیم پیچ روی هسته آهنی به منبع ولتاژ سینوسی مقدار موثر 220 ولت با فرکانس 50 هرتز متصل است . در این حالت توان تلفاتی برابر 100 وات ناشی از هیستریزیس می باشد . اگر فرکانس ولتاژ به 100 هرتز افزایش یابد، میزان توان تلفاتی چقدر خواهد بود ؟ ($n=2$)

بر طبق رابطه P_h داریم $\uparrow f \Leftarrow \uparrow P_h$ اما به شرط ثابت بودن B

$$V = 4.44 N f B A$$

$$f_1 = 50 \text{ Hz}, f_2 = 100 \text{ Hz} \Rightarrow B_2 = \frac{B_1}{2}$$

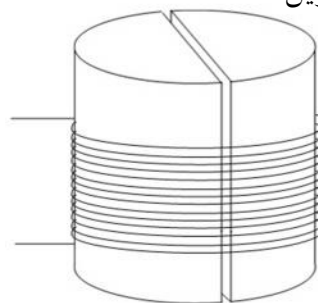
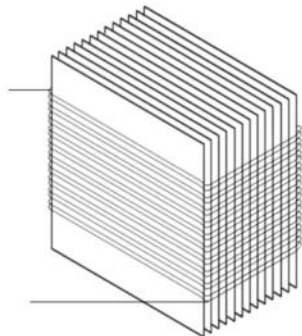
$$\frac{P_{h2}}{P_{h1}} = \left(\frac{B_2}{B_1} \right)^2 \left(\frac{f_2}{f_1} \right) = \frac{1}{2}$$

در نتیجه تلفات نصف می شود

ب) تلفات جریان های گردابی (تلفات فوکو و یا تلفات ادی (eddy))

وجود یک میدان مغناطیسی متغیر با زمان باعث ایجاد یک میدان الکتریکی متغیر با زمان می شود . جریان ناشی از این میدان الکتریکی به فرم گردابی می باشد و در مسیر خود ایجاد تلفات اهمی می کند .

سوال : میزان تلفات چقدر است ؟ $P_e \propto \frac{V^2}{R}$ از طرفی در حالت دائمی سینوسی $V \propto B f$ در نتیجه $P_e \propto B^2 f^2$
میزان تلفات ناشی از جریان های گردابی به حدی زیاد است که باید برای آن فکری کرد وگرنه هسته آنقدر گرم می شود که مشکل آفرین است .



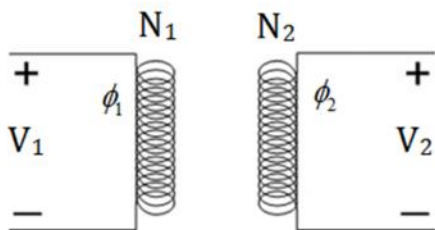
مثال : قطر ورق مورد استفاده برای ساخت هسته 1mm است . اگر در طراحی موردنظر برای سطح مقطع هسته به قطر 10mm نیاز باشد تعداد ورق ها عبارتست از : 10 عدد
اگر میدان مغناطیسی ثابت باشد نیازی به مورق کردن نیست (چون فقط میدان مغناطیسی متغیر است که ایجاد جریان گردابی می کند)

مثال : بخش چرخنده ژنراتور نیروگاه
اگر فرکانس خیلی بالا باشد ، حوزه جریان های گردابی خیلی کوچک می شود . در بازار ورق به قطر های 0.1mm ، 0.15mm ، 0.2mm و 0.35mm موجود است.



ساختمان و اصول ترانسفورماتور تکفاز :

اگر دو سیم پیچ در مجاورت یکدیگر قرار گرفته و به یکی ولتاژ اعمال شود ، بر طبق قانون فاراده در آن شار به وجود می آید و این شار در سیم پیچ مجاور القای الکترومغناطیسی ایجاد می کند و مجدداً بر طبق قانون فاراده ایجاد ولتاژ می کند .



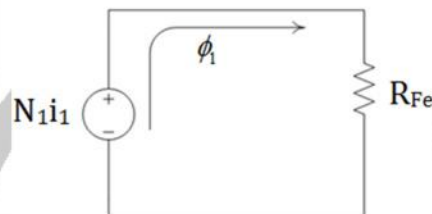
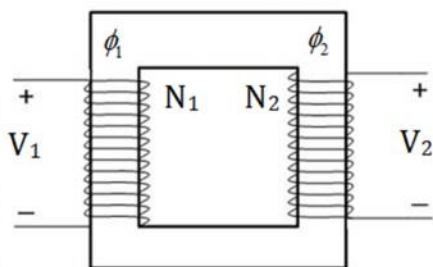
اگر شرایطی به وجود آید که $\phi_1 = \phi_2$ باشد :

$$V_1 = N_1 \frac{d\phi_1}{dt} \quad V_2 = N_2 \frac{d\phi_2}{dt}$$

$$\frac{d\phi_1}{dt} = \frac{d\phi_2}{dt} \Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

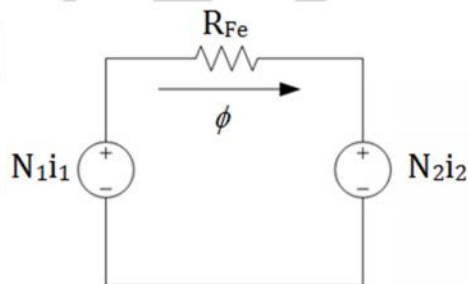
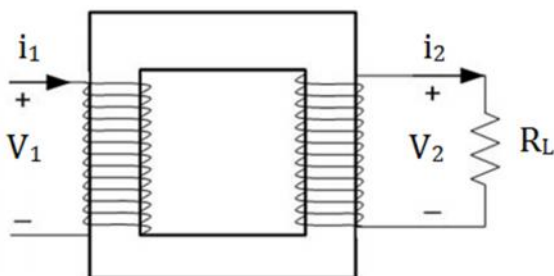
با این نسبت ولتاژ تلفات انتقال توان الکتریکی به دلیل کاهش سطح جریان (در توان ثابت) به شدت کاهش می یابد . به علاوه با استفاده از ایزوله بودن در سیم پیچ ، مسائل ایمنی و تداخل تا حد زیادی حل می شود . دو سیم پیچ باید روی مواد فرومغناطیسی پیچیده شوند .

شار با استفاده از V_1 بدست می آید و مستقل از جنس هسته است. اگر سیم پیچ دوم مدار باز باشد ، در یک ترانسفورماتور واقعی میزان جریان i_1 حدود یک الی دو درصد جریان نامی آن است .



$$N_1 i_1 = R_{Fe} \phi_1$$

در ادامه به ثانویه یک بار متصل می کنیم .



$$i_2 = 0 \Rightarrow \phi = \frac{N_1 i_1}{R_{Fe}}$$

در بی باری :

$$i_2 = \frac{V_2}{R_L} \Rightarrow \phi' = \frac{N_1 i_1' - N_2 i_2}{R_{Fe}}$$

در حالت وجود بار :

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

توجه : رابطه فوق بر اساس قانون آمپر بدست آمده است .

$$N_1 i_1' = N_2 i_2 \Rightarrow \frac{i_1'}{i_2} = \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow i_1' V_1 = i_2 V_2$$

اگر i_1 خیلی ناچیز باشد:

مسئله دیگر در ترانسفورماتور تکفاز بحث اشباع هسته است . تنها به دلیل اشباع هسته ، ترانسفورماتور نمی تواند ولتاژ DC را عبور دهد .

در ادامه به کمی کردن بیشتر ترانسفورماتور و مدل مداری آن می پردازیم . در حالت ایده آل :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

برای واقعی کردن ترانسفورماتور باید اثرات زیر را در نظر بگیریم :

اشباع ، تلفات اهمی سیم پیچ ها ، پراکندگی شار (یعنی بخشی از شار که توسط سیم پیچ اول تولید می شود ولی سیم پیچ دوم را دور نمی زند) ، تلفات هسته و μ_r محدود

هدف بدست آوردن یک مدار معادل الکتریکی برای سیستم الکترومغناطیسی ترانسفورماتور است .

بحث را با سیم پیچ اولیه که مولد شار است و به منبع ولتاژ متصل می شود آغاز می کنیم.

مدار پیشنهادی با استفاده از المان های فشرده ساخته شده است ، اما رفتار دقیق سیستم به صورت فشرده

نیست ، به عبارت دیگر المان های مشخص شده روی مدار معادل هیچ ما به ازای فیزیکی مشخصی در

ترانسفورماتور ندارند .

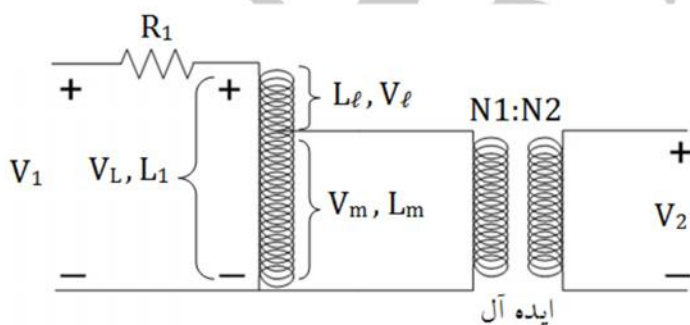
شار تولید شده توسط N_1 دور سیم پیچ اولیه را به دو بخش تقسیم می کنیم :

(1) شاری که سیم پیچ دوم را دور می زند (ϕ_m) (مغناطیسی)

(2) شاری که سیم پیچ دوم را دور نمی زند (ϕ_l) (نشتی)

توجه کنید : $\phi_l = \phi_m + \phi_l$

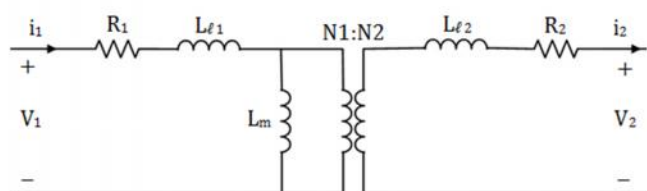
هر دو جزء شار اولیه متناسب با جریان i_1 می باشد .

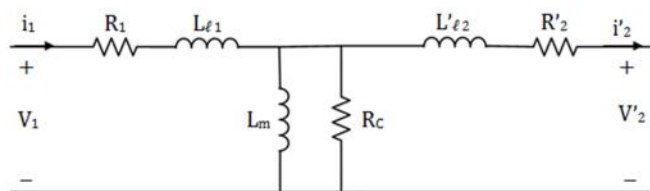


$$\phi_l = L_l i_1$$

$$\phi_m = L_m i_1 = \frac{1}{N_1} \int V_m dt$$

$$\phi_l = L_l i_1$$





فقط برای سهولت در محاسبات می توان ثانویه ترانسفورماتور ایده آل را حذف نمود و کل مدار ثانویه را به اولیه منعکس نمود.

مقاومت R_C برای مدل کردن تلفات هیستریزس و جریان های گردابی به مدل اضافه می شود .

چون عمدتاً ترانسفورماتور زیر زانوی اشباع طرح می شود ، پس می توان L_m را خطی فرض نمود بدست آوردن پارامتر های مدل :اگر بدانیم R_C و L_m خیلی بزرگ هستند .

الف : ثانویه مدار باز : (آزمایش مدار باز) V_{OC} , I_{OC} , P_{OC} (مقادیر در سمت اولیه اندازه گیری می شوند)

$$P_{OC} \approx \frac{V_{OC}^2}{R_C} \Rightarrow R_C \quad \checkmark$$

$$Q_{OC} = \sqrt{(V_{OC} I_{OC})^2 - P_{OC}^2} \Rightarrow Q_{OC} = \frac{V_{OC}^2}{X_m}, X_m = L_m \omega \Rightarrow L_m \quad \checkmark$$

ب : ثانویه اتصال کوتاه : (آزمایش اتصال کوتاه) V_{SC} , I_{SC} , P_{SC} (مقادیر در سمت اولیه اندازه گیری می شوند)

$$P_{SC} = (R_1 + R_2') I_{SC}^2 \Rightarrow R_1 + R_2' \quad \checkmark$$

$$Q_{SC} = \sqrt{(V_{SC} I_{SC})^2 - P_{SC}^2} = (X_{l1} + X_{l2}') I_{SC}^2 \Rightarrow L_{l1} + L_{l2}' \quad \checkmark$$

از آنجا که مشخصه B-H غیر خطی می باشد ، بنابراین مقدار R_C و X_m تابعی از نقطه کار مغناطیسی می باشد. ضمناً آزمایش مدار باز به علت غیر خطی بودن مشخصه B-H باید در نقطه کارنامی صورت گیرد، یعنی این آزمایش باید در ولتاژ نامی انجام شود .

به دلایل فوق انجام آزمایش ¹ OC در سمت ² LV انجام می شود .

در مورد آزمایش اتصال کوتاه (³ SC) نیز توجه کنید ، چون امپدانس ثانویه خیلی کم شده است ، انجام آزمایش در ولتاژ نامی منجر به افزایش جریان شدید خواهد شد . بنابراین این آزمایش نه در ولتاژ نامی بلکه در جریان نامی انجام می شود . مشابه با دلیل آزمایش قبلی این آزمایش در سمت ⁴ HV انجام می شود.

از آزمایش اتصال کوتاه مقادیر تفکیک شده شاخه های سری بدست نمی آید . ($R_1 + R_2'$ و $X_{l1} + X_{l2}'$) اما در یک ترانسفورماتور خوب طراحی شده برای هر طرف قطر سیم مناسب جریان نامی همان سمت بکار می رود

¹ Open Circuit

² Low Voltage

³ Short Circuit

⁴ High Voltage

در نتیجه :

$$R_1 = \rho \frac{l_1}{A_1} = \rho \frac{l_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)}{A_2 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)} = \rho \frac{l_2}{A_2} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 = R_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 = R_2' \Rightarrow R_1 = R_2'$$

به طور مشابه : $X_{l1} = X_{l2}'$

$$S_n = 20kVA, 8kv / 240v, 60Hz$$

مثال :

$$OC : 8000v, 0.214A, 400w$$

$$SC : 489v, 2.5A, 240w$$

همه در سمت اولیه

$$I_{n P} = \frac{20k}{8k} = 2.5A$$

اگر در مسئله ای تصریح نشود ، منظور RMS است .

بدست آوردن پارامترها :

OC :

$$R_c = \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}} = \frac{8000^2}{400}$$

$$Q_{oc} = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(8000 \times 0.214)^2 - 400^2} = \dots$$

$$X_m = \frac{V_{oc}^2}{Q_{oc}} = \frac{8000^2}{\dots}$$

SC :

$$(R_1 + R_2') I_{sc}^2 = P_{sc} \Rightarrow R_1 + R_2' = \frac{240}{2.5^2}$$

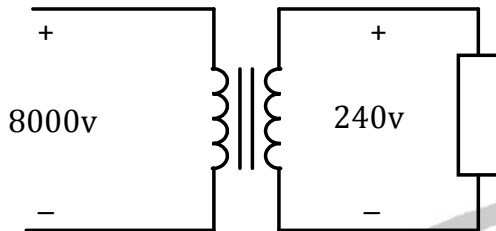
$$Q_{sc} = \sqrt{(489 \times 2.5)^2 - 240^2}$$

$$(X_{l1} + X_{l2}') I_1^2 = Q_{sc} \Rightarrow X_{l1} + X_{l2}' = \dots$$

نمودار فازوری ترانسفورماتور:

عموماً صورت مسئله به صورت ارائه مشخصات بار می باشد .

مثال : ترانسفورماتور فوق در بار نامی با ضریب توان 0.8 lag



20kVA

PF=0.8 lag

بار نامی : توان ظاهری نامی ، جریان نامی

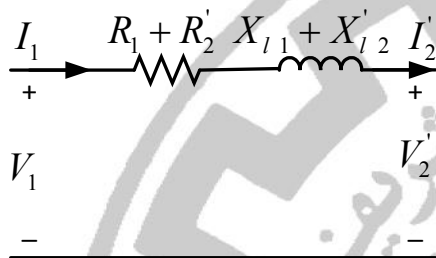
Lag : پس فاز \Leftarrow موجود سلفی است!

عموماً از جریان شاخه موازی صرف نظر می شود

(به دلیل بزرگ بودن امپدانس های موازی)

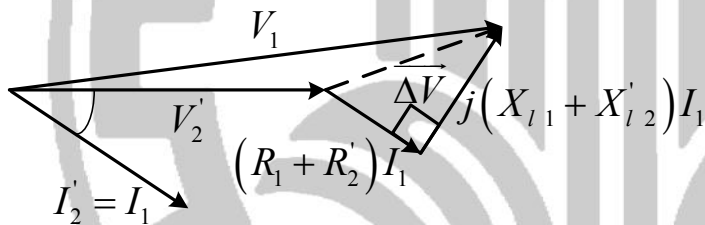
مدل ساده شده تقریبی ترانسفورماتور :

رگولاسیون ولتاژ (تثبیت ولتاژ)

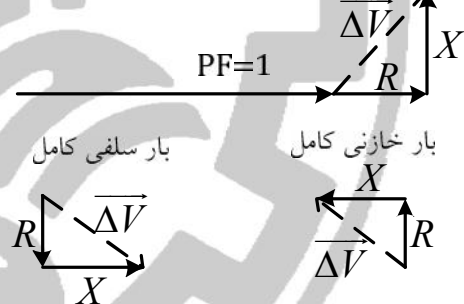


$$KVL: -V_1 + (R_1 + R_2')I_1 + j(X_{l1} + X_{l2}')I_1 + V_2' = 0$$

نکته مهم : پس فاز یعنی جریان پس از ولتاژ می آید (در جهت مثلثاتی). همیشه مبنای فاز ولتاژ است



حالت های حدی



بار سلفی کامل

بار خازنی کامل

$$S_n = 10 \text{ kVA}, 2200 \text{ V} / 220 \text{ V}, 60 \text{ Hz}$$

$$OC(LV): 220 \text{ V}, 2.5 \text{ A}, 100 \text{ W}$$

$$SC(HV): 150 \text{ V}, 4.55 \text{ A}, 215 \text{ W}$$

$$I_{nHV} = \frac{S}{V_{nHV}} = 4.55 \text{ A}$$

مثال :

OC:

$$R_{C(L)} = \frac{V_{OC}^2}{P_{OC}} = \frac{220^2}{100} = 484\Omega$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(220 \times 2.5)^2 - 100^2} \Rightarrow X_{m(L)} = \frac{V_{OC}^2}{Q_{OC}} = 89\Omega$$

$$R_{C(H)} = R_{C(L)} \times \left(\frac{2200}{220}\right)^2 = 48400\Omega$$

$$X_{m(L)} = 89 \times (10)^2 = 8900\Omega$$

SC:

$$(R_1 + R_2') I_{SC}^2 = P_{SC} \Rightarrow (R_1 + R_2')_H = \frac{215}{4.55^2} = 10.4\Omega$$

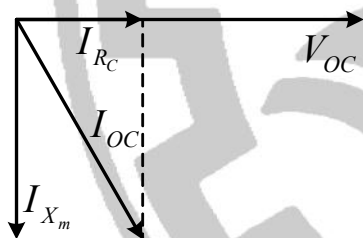
$$Q = \sqrt{(150 \times 4.55)^2 - 215^2}$$

$$(X_{l1} + X_{l2}') I_{SC}^2 = Q \Rightarrow X_{l1} + X_{l2}' = 31.4\Omega$$

$$X_{eq} = (X_{l1} + X_{l2}')_L = \frac{31.4}{10^2}$$

$$(R_1 + R_2')_L = \frac{10.4}{10^2}$$

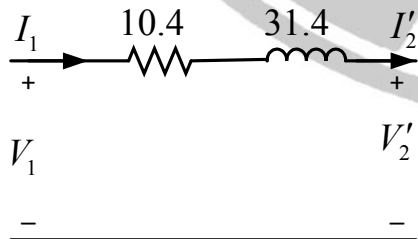
نمودار فازوری OC:



رگولاسیون ولتاژ ترانسفورماتور فوق را در بار 0.6 نامی و ضریب توان 0.75 پس فاز بدست آورید.

مدار معادل را منعکس شده به یکی از دو سمت در نظر می گیریم (مثلا سمت HV). از شاخه موازی صرف

نظر می کنیم.

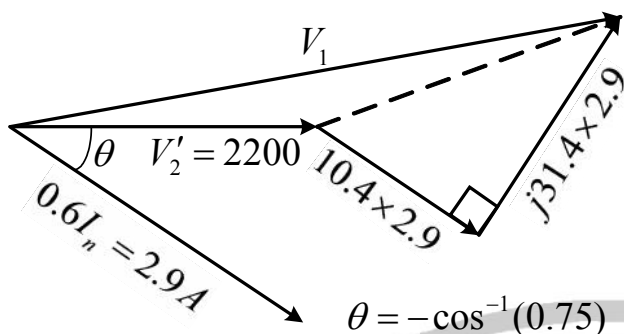


فرض می کنیم بار دارای ولتاژ نامی باشد.

$$V_2' = 2200v \Rightarrow I_2' = \frac{0.6 \times 10kVA}{2200} \approx 2.9A$$

$$|\Delta V| = (\sqrt{10.4^2 + 31.4^2})(2.9)$$

نمودار فازوری :



$$\Rightarrow V_1 = 2306 \angle 0.9^\circ$$

$$\theta = -\cos^{-1}(0.75)$$

$$V.R. = \frac{2306 - 2200}{2200} \times 100 = 4.8\%$$

رگولاسیون ولتاژ :

همین مثال را با بار پیش فاز دوباره بررسی کنید!

محاسبات بر واحد (Per Unit) :

در این حالت مقادیر پایه ای برای V و S در نظر گرفته می شود که معمولاً مقادیر نامی می باشد.

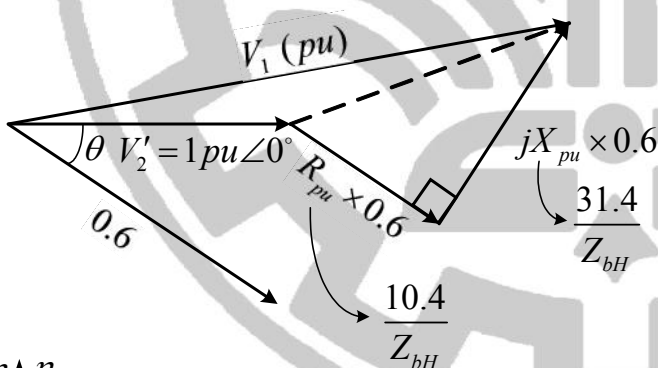
$$S_b = S_n, V_b = V_n \quad (V_{bH} = V_{nH}, V_{bL} = V_{nL})$$

تمام مقادیر پایه جریان و امپدانس و ... از روی همین دو مقدار پایه (V و S) بدست می آیند.

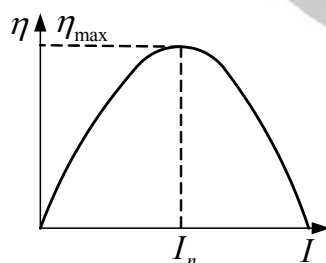
$$I_b = \frac{S_b}{V_b} \quad Z_b = \frac{V_b^2}{S_b}$$

اکنون تمام پارامترها و متغیرها را به مقادیر پایه خود تقسیم می کنیم.

مثال: محاسبه مجدد رگولاسیون ولتاژ مثال قبل به صورت P.U.



$$Z_{bH} = \frac{V_{bH}^2}{S_b} = \frac{2200^2}{10k} \Rightarrow V_{1 \text{ pu}} = 1.048 \angle \dots$$



بازده ترانسفورماتور :

$$P_{out} = VI \cos \theta$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + R_{eq} I^2 + P_{core}}$$

ترانسفورماتور های سه فاز :

فقط اتصال ترانسفورماتور سه فاز متعادل و متقارن مورد بررسی قرار می گیرد .

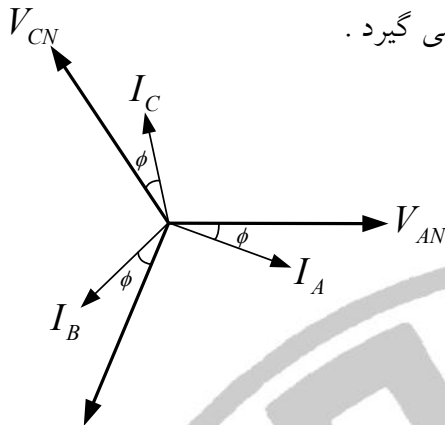
منظور از متعادل : جریان هر سه فاز سینوسی دارای دامنه

برابر و با اختلاف فاز 120° درجه نسبت به فاز دیگر

$$|I_A| = |I_B| = |I_C| = I$$

منظور از متقارن : ولتاژ ها سینوسی و با دامنه برابر و با

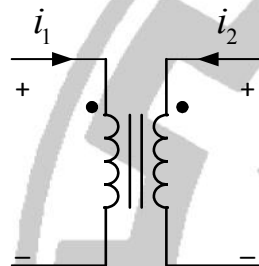
اختلاف فاز 120° درجه $|V_{AN}| = |V_{BN}| = |V_{CN}| = V_P$



قانون نقطه : برای دو سلف تزویج شده با در نظر گرفتن جهت های قراردادی اگر جریان به نقطه در هر دو

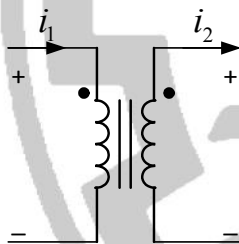
وارد یا خارج شود شار دو سیم پیچ موافق یکدیگر می باشد .

$$\phi_1 = L_{11}i_1 + L_{12}i_2$$

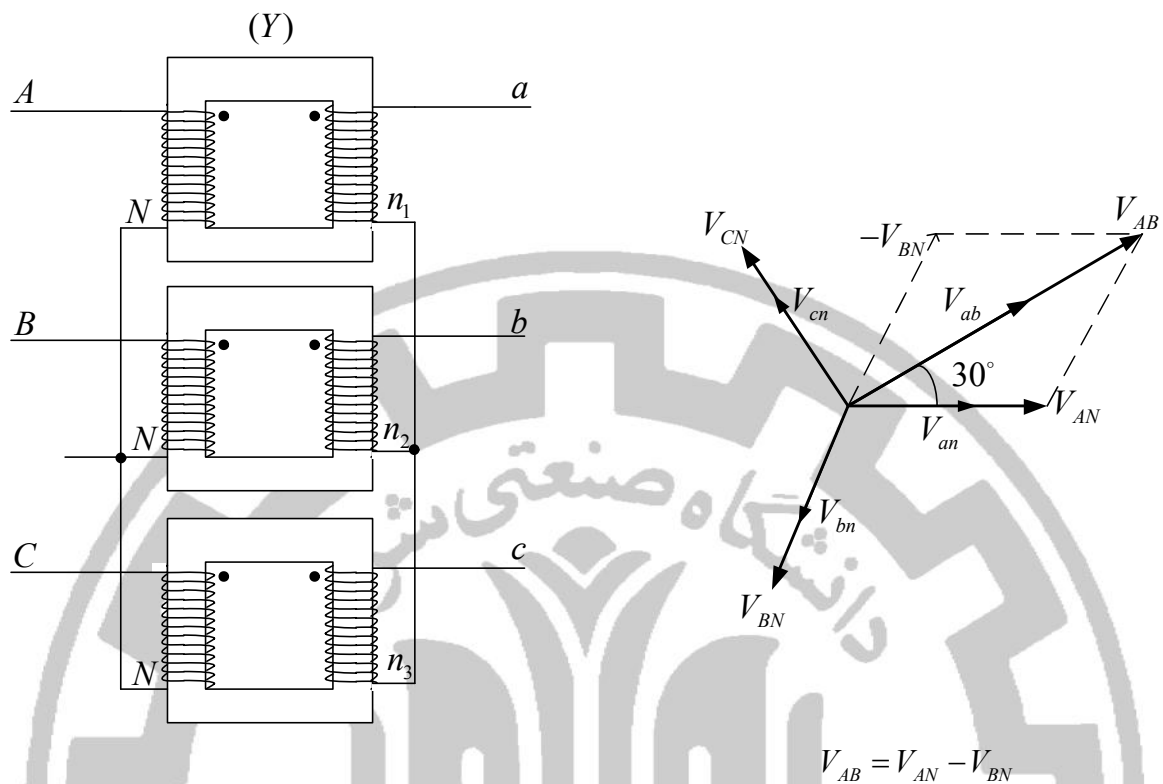


در نتیجه در یک ترانسفورماتور تکفاز اگر در یک سیم پیچ جریان به نقطه وارد شود ، در سیم پیچ دیگر باید

خارج شود .

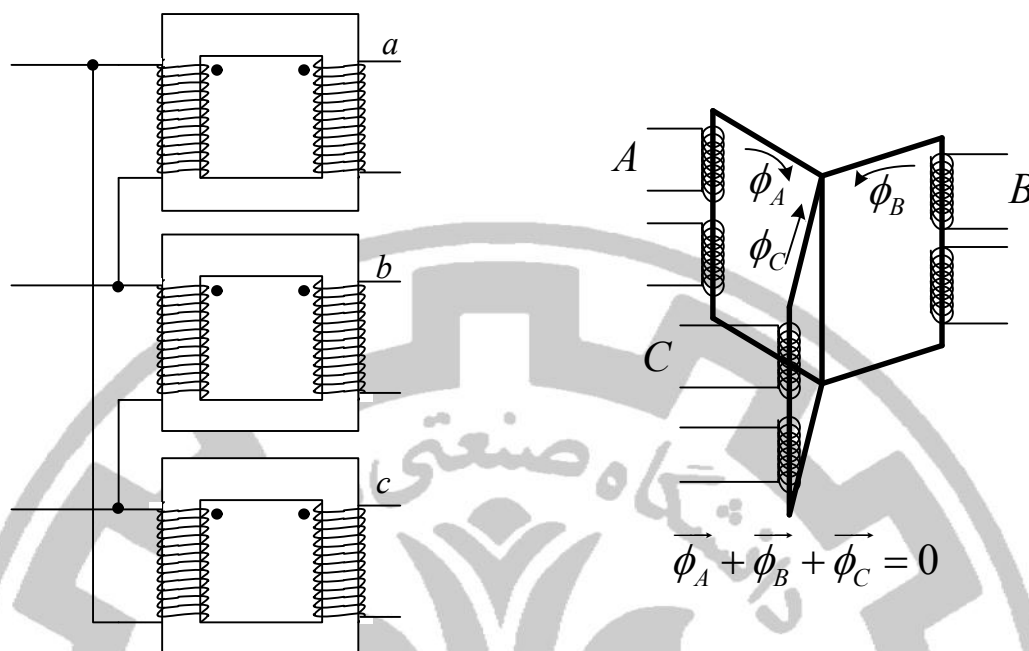


ساده ترین شکل اتصال سه فاز : (Y)

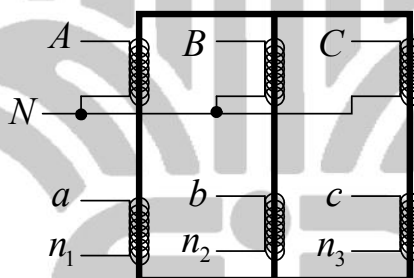


ولتاژ یک فاز عبارت است از ولتاژ یک خط نسبت به N

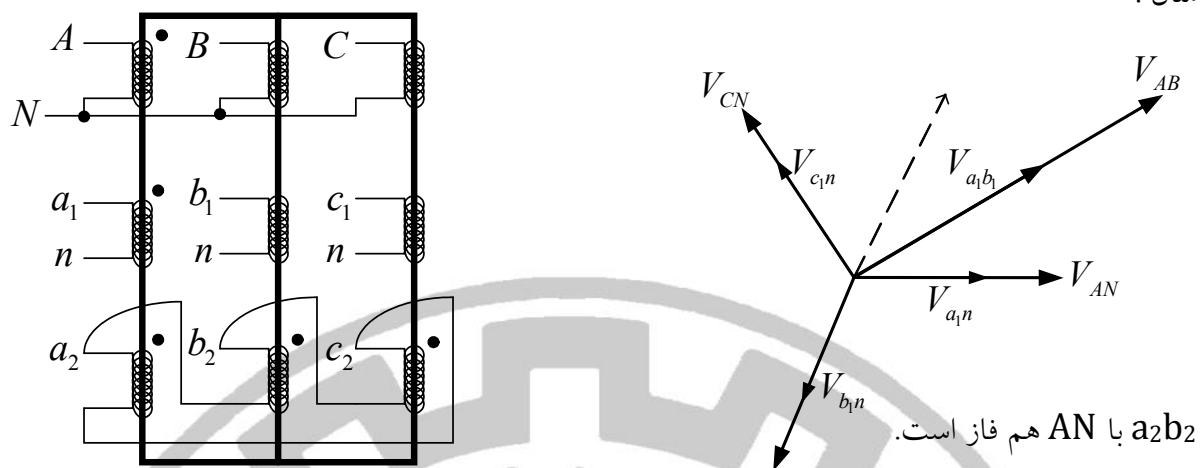
اتصال مثلث (Δ):



روی هر بازو سیم پیچی که به منبع ولتاژ مستقل وصل است را یافته و تمام سیم پیچ های دیگر آن بازو با ولتاژ این سیم پیچ هم فاز می شوند .



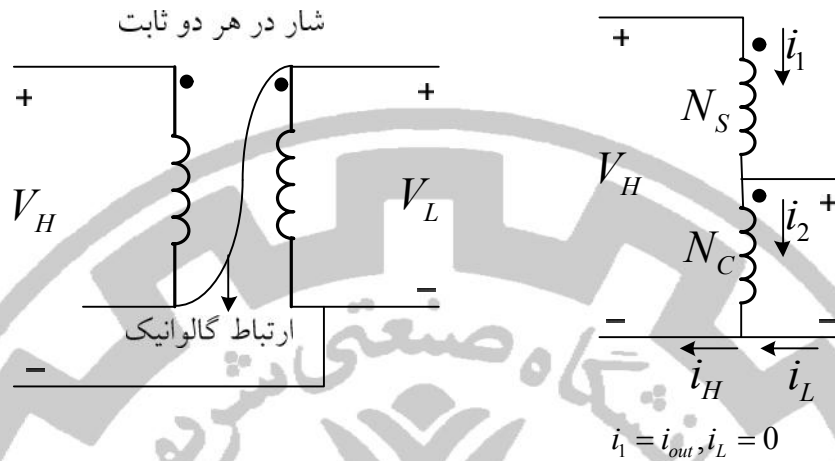
مثال :



تمام بحث های مدار معادل ، رگولاسیون ولتاژ و... برای ترانسفورماتور سه فاز در حالت متقارن و متعادل کاملاً مشابه با ترانسفورماتور تکفاز است . برای حل فقط یکی از فاز ها حل می شود و بقیه با دامنه برابر و تنها نسبت به پارامتر های تکفاز معادل $\pm 120^\circ$ اختلاف فاز خواهند داشت .

اتو ترانسفورماتور تکفاز :

در این مدل از تبدیل انرژی الکتریکی به الکترومغناطیسی و لثاژ مدنظر نمی باشد و اتصال آن به صورت زیر است :



$$\frac{V_H}{V_L} = \frac{N_S + N_C}{N_C}$$

رابطه جریانهها :

$$KCL : I_2 + I_L = I_H \Rightarrow I_2 = I_H - I_L$$

$$N_S I_1 + N_C I_2 = 0 \Rightarrow N_S I_H + N_C (I_H - I_L) = 0 \Rightarrow \frac{I_H}{I_L} = \frac{N_C}{N_S + N_C}$$

چون جریان در هر دو

شار ناشی از آمپر دور ها

سیم پیچ به نقطه وارد

باید صفر باشد ، زیرا شار

$$V_H I_H = V_L I_L \text{ می شود}$$

ثابت است

رابطه جریانهها از قانون آمپر بدست آمد، نه از قانون بقای انرژی

نامگذاری Sw (توان ظاهری نامی سیم پیچ):

$$S_w = V_S I_H = V_L I_2, V_H = \left(\frac{N_S + N_C}{N_S} \right) V_S \Rightarrow S_w = \left(\frac{N_S}{N_S + N_C} \right) (V_H I_H) \Rightarrow S_I = S_w \left(\frac{N_S + N_C}{N_S} \right)$$

توان ظاهری تحویلی به بار

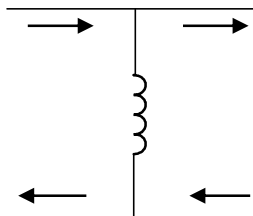
توان ظاهری که سیم پیچ

می تواند تحمل کند

$$\Rightarrow S_I > S_w \text{ در ترانسفورماتور تکفاز این طور نبود!}$$

$$S_w = 0 \Leftrightarrow S_I = \infty \quad (!) \Leftrightarrow N_S = 0 \text{ فرض}$$

که امکان پذیر نیست، مثل اینست که سلف را بزنیم به پریز برق! اتفاقی نمی افتد!



قابلیت رابطه $S_I = S_w \left(\frac{N_s + N_c}{N_s} \right)$ در N_s های کوچک است .

مثال : تبدیل ولتاژ 132kv به 110kv و $S=5000kVA$

چون نسبت تبدیل کم است در نتیجه قابلیت اتوترانسفورماتور را داریم :

$$\frac{132}{110} = \frac{N_s + N_c}{N_s} \Rightarrow \frac{N_s}{N_c} = \frac{1}{5}$$

$$S_I = S_w \left(\frac{N_s + N_c}{N_s} \right) \Rightarrow S_w = 5000 \times \frac{1}{1+5} = 833kVA$$

مثال : در یک ترانسفورماتور سه فاز که از سه ترانسفورماتور تکفاز با مقادیر

$$R_{eq} = 0.01 pu$$

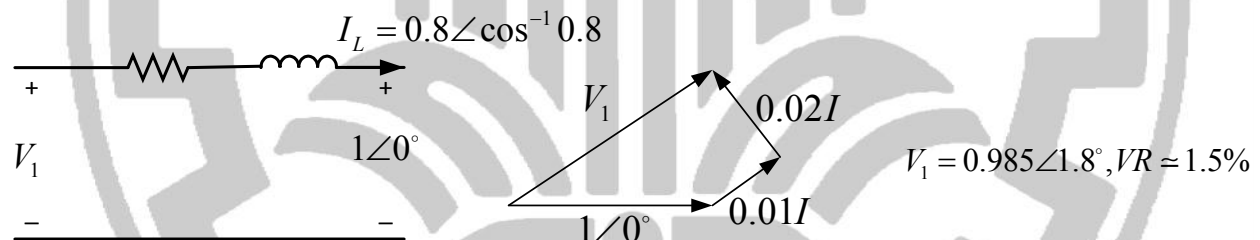
$$X_{eq} = 0.02 pu$$

$$20kv / 220v$$

با اتصال ستاره در ورودی

تشکیل شده است ، یک بار 0.8 مقدار نامی سه فاز تحت ولتاژ نامی در ضریب توان 0.8 پس فاز تحویل می دهد . رگولاسیون ولتاژ فلز را پیدا کنید .

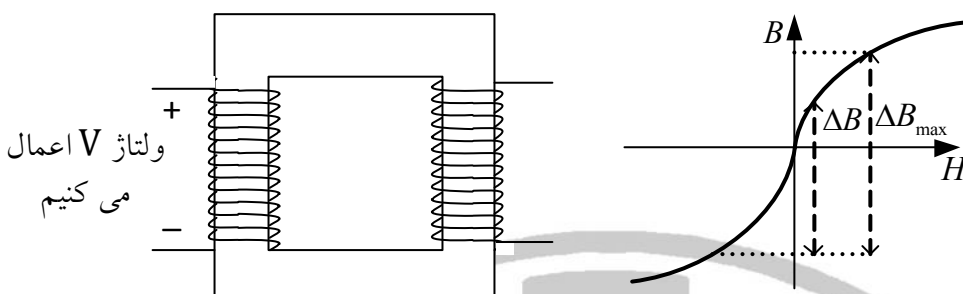
از آنجا که مسئله متعادل و متقارن است ، کافیت آن را فقط برای یکی از فازها حل کنیم (به مثلث یا ستاره بستن بستگی ندارد ، چون تنها با ضریب $\sqrt{3}$ می توان این دو را به هم تبدیل کرد)



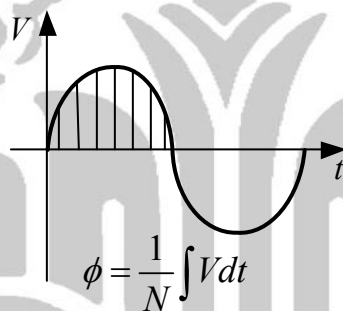
$$V_{LL} = \sqrt{3} \times 20kv \times 0.985$$

سوال : ولتاژ سه فاز ورودی چند است ؟

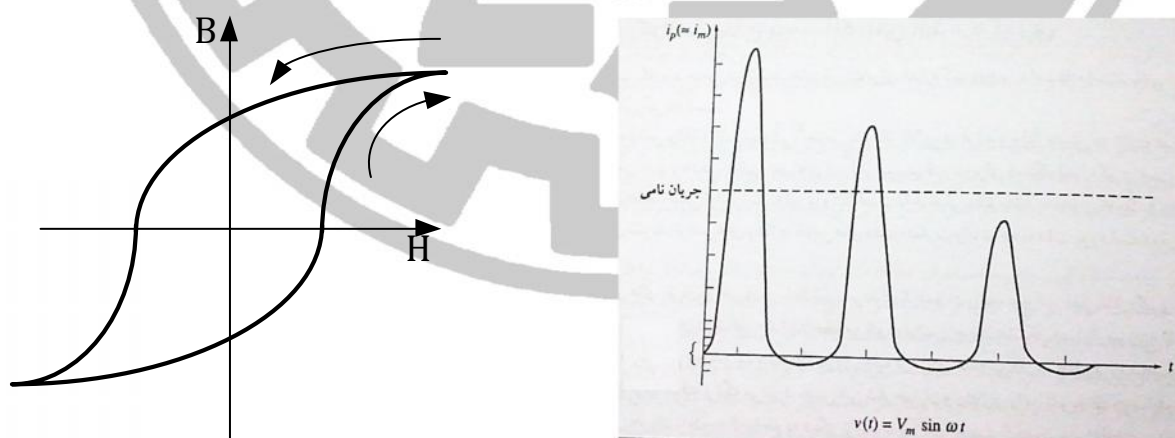
حالت گذرای startup در ترانسفورماتور:



با افزایش B و گذشتن از اشباع \Leftarrow جریان $\uparrow \Leftarrow$ افت ولتاژ روی R و $X_l \uparrow \Leftarrow$ حالت گذرا خوب نیست!
 (1) از آنجا که طراحی ترانسفورماتور برای B_M الی $-B_M$ انجام می شود بنابراین اگر در نقطه $B=H=0$ باشیم و کلیدزنی در ولتاژ صفر انجام شود، ترانسفورماتور حتماً به اشباع می رود.



(2) نوع (پلاریته) و میزان به اشباع رفتن ترانسفورماتور به لحظه ای که کلیدزنی انجام می شود ربط دارد و تحت کنترل نیست.
 روش رفع این پدیده: در عمل منحنی $B-H$ دارای هیستریزیس است.



اشکال های حالت گذرا:

افت ولتاژ غیر سینوسی (شکل فوق) و...