

بسمه تعالی

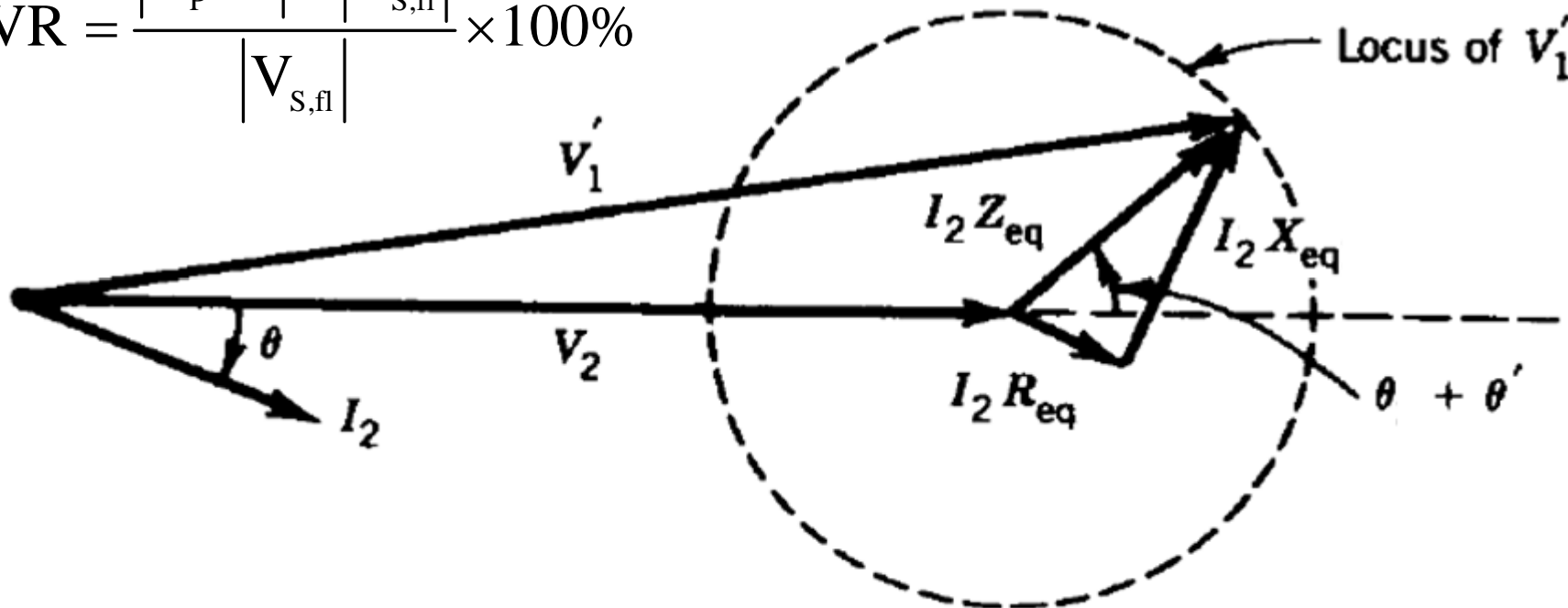
ادامه فصل دوم

ترانسفورماتورها

تنظیم ولتاژ حداکثر

❖ تنظیم ولتاژ به ضریب توان بار بستگی دارد:

$$VR = \frac{|V_P / a| - |V_{S,fl}|}{|V_{S,fl}|} \times 100\%$$



❖ تنظیم ولتاژ حداکثر = حداکثر ولتاژ اولیه منتقل شده $\theta + \theta' = 0 \Rightarrow \theta = -\theta'$

❖ تنظیم ولتاژ حداکثر وقتی رخ می دهد که زاویه ضریب توان بار با زاویه امپدانس

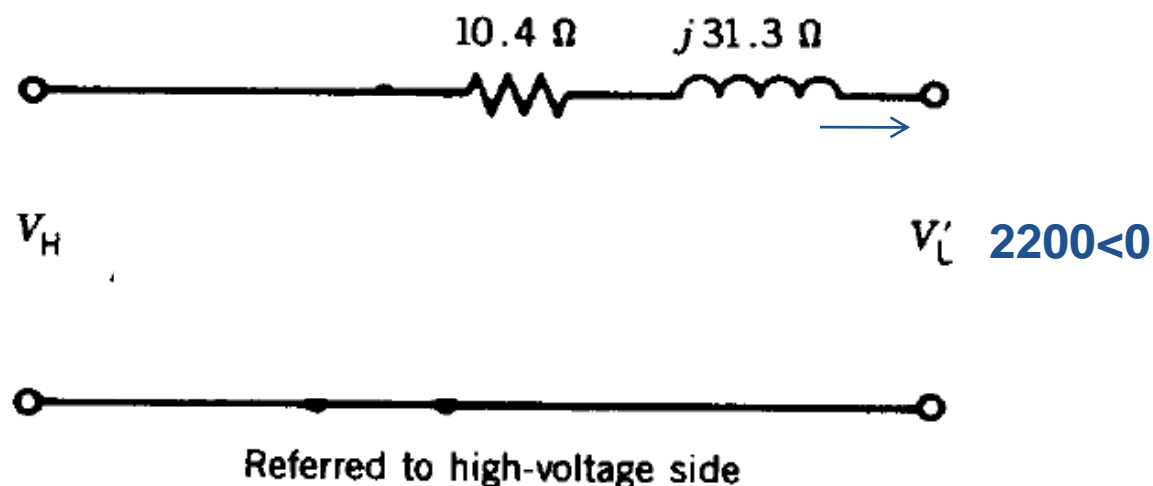
داخلی ترانسفورماتور برابر بوده و بار از نوع پسفاز باشد.



Consider the transformer in Example 2.2. Determine the voltage regulation in percent for the following load conditions.

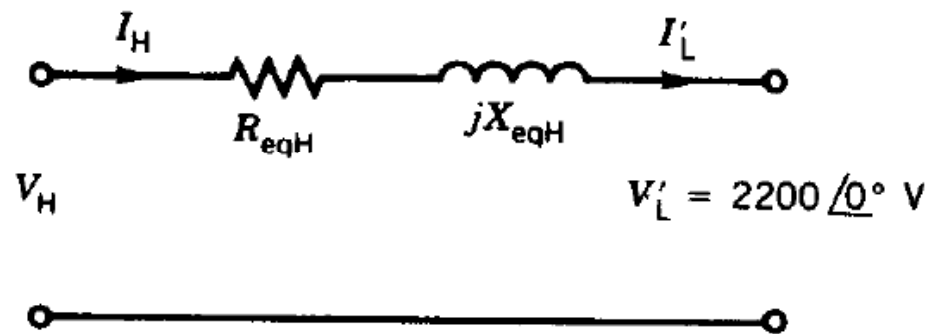
- (a) 75% full load, 0.6 power factor lagging.
- (b) 75% full load, 0.6 power factor leading.
- (c) Draw the phasor diagram for conditions (a) and (b).

a 1ϕ , 10 kVA, 2200/220 V, 60 Hz transformer





Consider the equivalent circuit referred to the high-voltage side, as shown in Fig. E2.3. The load voltage is assumed to be at the rated value. The condition 75% full load means that the load current is 75% of the rated



current. Therefore,

$$I_H = I'_L = 0.75 \times 4.55 = 3.41 \text{ A}$$

$$\text{Power factor} \quad \text{PF} = \cos \theta_2 = 0.6$$

$$\theta_2 = \pm 53.13$$



(a) For a lagging power factor, $\theta_2 = -53.13^\circ$

$$I_H = 3.41 \angle -53.13^\circ \text{ A}$$

$$V_H = V'_L + I'_L Z_{eqH}$$

$$= 2200 \angle 0^\circ + 3.41 \angle -53.13^\circ (10.4 + j31.3)$$

$$= 2200 + 35.46 \angle -53.13^\circ + 106.73 \angle 90^\circ - 53.13^\circ$$

$$= 2200 + 21.28 - j28.37 + 85.38 + j64.04$$

$$= 2306.66 + j35.67$$

$$= 2306.94 \angle 0.9^\circ \text{ V}$$

$$\text{Voltage regulation} = \frac{2306.94 - 2200}{2200} \times 100\%$$

$$= 4.86\%$$



The meaning of 4.86% voltage regulation is that if the load is thrown off, the load terminal voltage will rise from 220 to 230.69 volts. In other words, when the 75% full load at 0.6 lagging power factor is connected to the load terminals of the transformer, the voltage drops from 230.69 to 220 volts.

(b) For leading power factor load, $\theta_2 = +53.13$

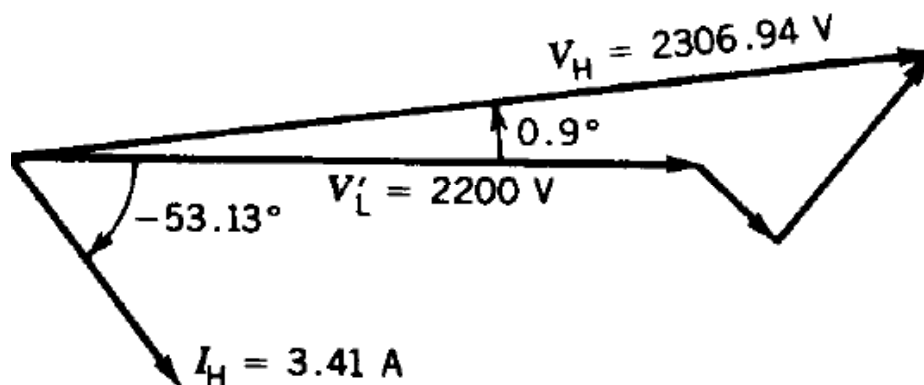
$$\begin{aligned} V_H &= 2200 \angle 0^\circ + 3.41 \angle 53.13^\circ (10.4 + j31.3) \\ &= 2200 + 35.46 \angle 53.13^\circ + 106.73 \angle 90^\circ + 53.13^\circ \\ &= 2200 + 21.28 + j28.37 - 85.38 + j64.04 \\ &= 2135.9 + j92.41 \\ &= 2137.9 \angle 2.48^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Voltage regulation} &= \frac{2137.9 - 2200}{2200} \times 100\% \\ &= -2.82\% \end{aligned}$$

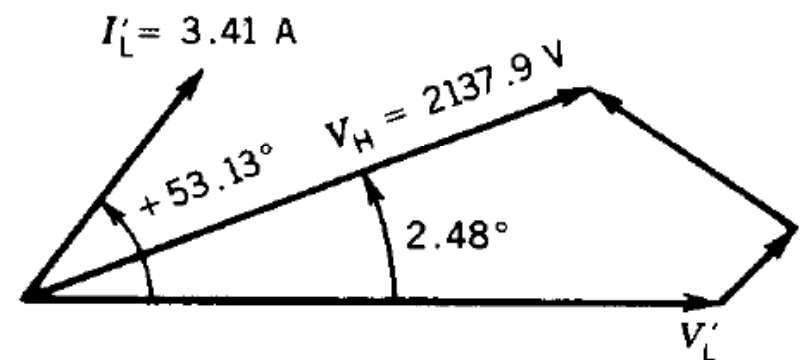


Note that the voltage regulation for this leading power factor load is negative. This means that if the load is thrown off, the load terminal voltage will decrease from 220 to 213.79 volts. To put it differently, if the leading power factor load is connected to the load terminals, the voltage will increase from 213.79 to 220 volts.

(c)



Lagging PF



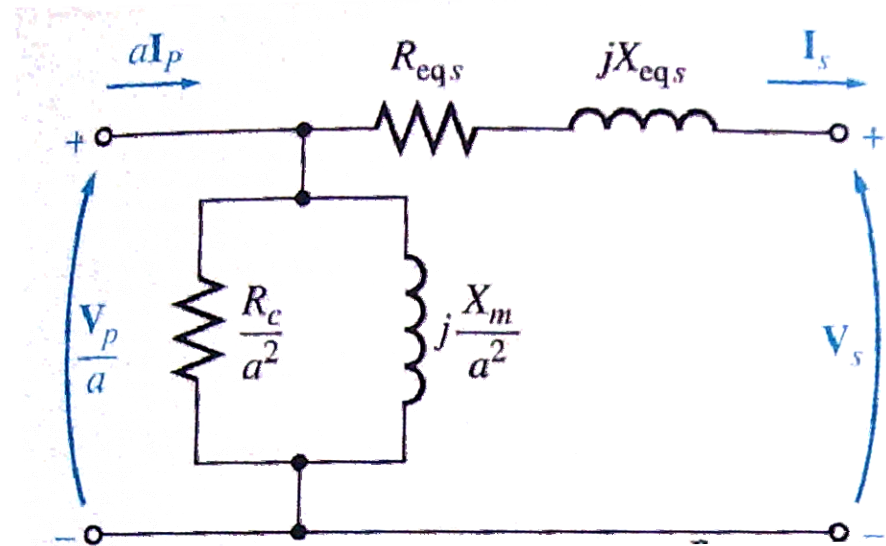
Leading PF

بازده ترانسفورماتور

❖ می توان ترانسفورماتورها را بر اساس بازده با هم مقایسه کرد:

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

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



❖ انواع تلفات در ترانسفورماتورها:

➤ تلف مس که با مقاومت سری در مدار معادل مدل می شود.

➤ تلف هیستریزیس و فوکو که با مقاومت R_C مدل می شود.

بازده ترانسفورماتور

❖ برای تعیین بازده در یک بار معین:

کافی است توان خروجی را بر اساس ولتاژ و جریان ثانویه تعیین کنیم و تلفات مقاومتها را هم با هم جمع کنیم:

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

$$\eta = \frac{V_S I_S \cos \theta_S}{V_S I_S \cos \theta_S + P_{cu} + P_{core}} \times 100\%$$

✓ تلفات مسی به بار ترانسفورماتور بستگی دارد. بنابراین مقدارش متغیر است.

✓ تلفات هسته به حداکثر چگالی شار و در نتیجه به ولتاژ اعمالی بستگی دارد. بنابراین مقدارش ثابت است.

$$\eta = \frac{x V_n I_n \cos \theta_S}{x V_n I_n \cos \theta_S + x^2 P_{cu,n} + P_{core}} \times 100\%$$

بازده حداکثر

❖ فرض کنیم ولتاژ بار و ضریب توان آن ثابت هستند:

$$\eta = \frac{V_S I_S \cos \theta_S}{V_S I_S \cos \theta_S + R_{eq,S} I_S^2 + P_{core}} \times 100\%$$

$$\frac{d\eta}{dI_S} = 0 \Rightarrow R_{eq,S} I_S^2 = P_{core}$$

در شرایط نامی: $R_{eq,S} I_{S,fl}^2 = P_{cu,fl}$

در کسری از جریان نامی: $P_{cu} = X^2 P_{cu,fl}$, $X = \frac{I_S}{I_{S,fl}}$

شرط بازده حداکثر در ولتاژ و ضریب توان ثابت:

$$P_{core} = X^2 P_{cu,fl}$$

بازده حداکثر

❖ فرض کنیم ولتاژ و جریان بار ثابت هستند:

$$\eta = \frac{V_S I_S \cos \theta_S}{V_S I_S \cos \theta_S + R_{eq,S} I_S^2 + P_{core}} \times 100\%$$

$$\frac{d\eta}{d\theta_S} = 0 \Rightarrow \theta_S = 0, \cos \theta_S = 1$$

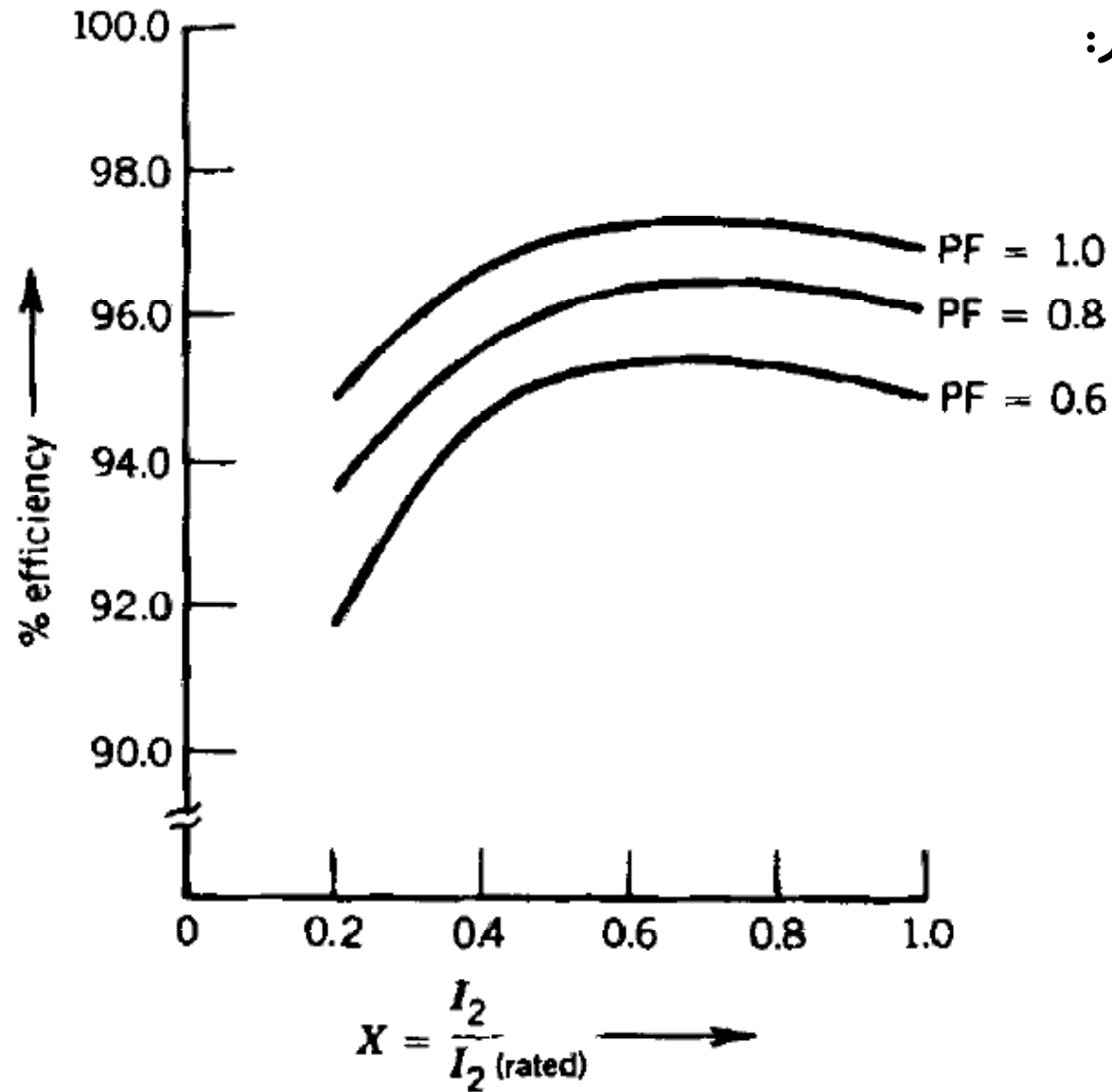
شرط بازده حداکثر :

❖ بار مقاومتی باشد و

❖ شرایط طوری فراهم شود که تلفات مسی با تلفات هسته برابر باشد.

بازده حداکثر

❖ تغییرات بازده ترانسفورماتور:





a 1ϕ , 10 kVA, 2200/220 V, 60 Hz transformer

	Open-Circuit Test	Short-Circuit Test
Voltmeter	220 V	150 V
Ammeter	2.5 A	4.55 A
Wattmeter	100 W	215 W

- (a) Efficiency at 75% rated output and 0.6 PF.
- (b) Power output at maximum efficiency and the value of maximum efficiency. At what percent of full load does this maximum efficiency occur?



(a)

$$\begin{aligned}P_{\text{out}} &= V_2 I_2 \cos \theta_2 \\&= 0.75 \times 10,000 \times 0.6 \\&= 4500 \text{ W}\end{aligned}$$

$$P_c = 100 \text{ W (Example 2.2)}$$

$$\begin{aligned}P_{\text{cu}} &= I_H^2 R_{\text{eqH}} \\&= (0.75 \times 4.55)^2 \times 10.4 \text{ W} \\&= 121 \text{ W}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{4500}{4500 + 100 + 121} \times 100\% \\&= 95.32\%\end{aligned}$$



(b) At maximum efficiency

$$P_{\text{core}} = P_{\text{cu}} \quad \text{and} \quad \text{PF} = \cos \theta = 1$$

$$\text{Now, } P_{\text{core}} = 100 \text{ W} = I_2^2 R_{\text{eq2}} = P_{\text{cu}}.$$

$$I_2 = \left(\frac{100}{0.104} \right)^{1/2} = 31 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}|_{\eta_{\text{max}}} &= V_2 I_2 \cos \theta_2 \\ &= 220 \times 31 \times 1 \\ &= 6820 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta_{\text{max}} &= \frac{6820}{6820 + \underset{\substack{\uparrow \\ P_c}}{100} + \underset{\substack{\uparrow \\ P_{\text{cu}}}}{100}} \times 100\% \\ &= 97.15\% \end{aligned}$$

$$\text{Output kVA} = 6.82$$

$$\text{Rated kVA} = 10$$

η_{max} occurs at 68.2% full load.

مثال

یک ترانسفورمر تکفاز ۱۰KVA و ۲۵۰/۲۵۰۰ دارای نتایج آزمایش زیر می باشد:

$$P_{O.C} = 50W, \quad I_{O.C} = 0.8A, \quad V_{O.C} = 250V$$

$$P_{S.C} = 61.25W, \quad I_{S.C} = 4A, \quad V_{S.C} = 70V$$

- الف) بازده را در نصف بار کامل تحت ضریب توان ۰/۸ تعیین کنید.
- ب) تنظیم ولتاژ در بار کامل و ضریب توان ۰/۸ پیش فاز چقدر است (از تاثیر شاخه موازی صرفنظر کنید)؟
- پ) اگر ترانسفورمر جریان نامی خود را به بار تحویل دهد، تحت چه ضریب توانی تنظیم ولتاژ صفر است؟



$$P_o = 10000 \times 0.8 \times 0.5 = 4000$$

$$I_{rated} = 10000 / 2500 = 4 = I_{sc} \Rightarrow P_{cu} = x^2 P_{cu,n} = (0.5)^2 \times 61.25 = 15.3125 W$$

$$\eta = \frac{4000}{4000 + 50 + 15.3125} = 98.39\%$$

$$I_{sc} = I_{rated} = 1 \text{ p.u.}, \quad V_{sc} = \frac{70}{2500} = 0.028 \text{ p.u.}, \quad P_{sc} = \frac{61.25}{10000} = 0.0061 \text{ p.u.} \Rightarrow R_{eq} = \frac{0.0061}{1^2} = 0.0061$$

$$Z_{eq} = \frac{0.028}{1} = 0.028 \text{ pu}$$

$$X_{eq} = \sqrt{0.028^2 - 0.0061^2} = 0.0273 \text{ p.u.}$$

$$V_p = 1 + 1 \angle \cos^{-1} 0.8 \times (0.0061 + j0.0273) = 0.9885 + j0.0255$$

$$|V_p| = 0.9888 \Rightarrow V_r = \frac{0.9888 - 1}{1} = -0.0112 = -1.12\%$$



$$Vr = 0 \Rightarrow |V_p| = 1 \Rightarrow |\vec{V}_p| = |\vec{V}_t + Z_{eq} \vec{I}_s|$$

$$|V_p|^2 = |V_t|^2 + |Z_{eq} I_s|^2 + 2|V_t||Z_{eq} I_s| \cos(\theta + \theta')$$

$$\theta' = \cos^{-1}\left(\frac{R_{eq}}{|Z_{eq}|}\right) = 77.35^\circ$$

$$\theta = .22 \text{ rad} \quad \cos \theta = 0.97 \text{ lead}$$

مثال

بازده حداکثر یک ترانسفورماتور 50 KVA ، 97.4% است که در 90% بار کامل اتفاق می افتد. بازده ترانسفورماتور را در:

الف) بار کامل با ضریب توان 0.8

ب) نصف بار کامل با ضریب توان 0.9

محاسبه کنید.



$$\eta_{\max} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + P_{\text{cu}} + P_{\text{core}}} \times 100$$

$$97.4 = \frac{V_S \times 0.9 I_{S,n} \times 1}{V_S \times 0.9 I_{S,n} \times 1 + 2 \times P_{\text{core}}} \times 100, \quad V_S \times I_{S,n} = 50000$$

$$\Rightarrow P_{\text{core}} = \dots, \quad P_{\text{core}} = R_{\text{eq}} (0.9 I_{S,n})^2 \Rightarrow R_{\text{eq}} I_{S,n}^2 = \dots$$

$$\text{a: } \eta = \frac{V_S \times 1 \times I_{S,n} \times 0.8}{V_S \times 1 \times I_{S,n} \times 0.8 + R_{\text{eq}} (1 \times I_{S,n})^2 + P_{\text{core}}} \times 100$$

$$\text{b: } \eta = \frac{V_S \times 0.5 \times I_{S,n} \times 0.9}{V_S \times 0.5 \times I_{S,n} \times 0.9 + R_{\text{eq}} (0.5 \times I_{S,n})^2 + P_{\text{core}}} \times 100$$

مثال

یک ترانسفورماتور ۵۰۰ کیلوولت آمپری دارای بازده ۹۵٪ در بار کامل و ۶۰٪ بار کامل، هر دو با ضریب توان واحد است.

الف) تلفات ترانسفورماتور را از هم جدا کنید.

ب) بازده ترانسفورماتور را در ۰/۷۵ بار کامل و ضریب توان واحد محاسبه کنید.



$$\eta = \frac{V_S I_S \cos \theta}{V_S I_S \cos \theta + P_{cu} + P_{core}} \times 100, \quad V_S I_{S,n} = 500 \text{ kVA}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.95 = \frac{500000 \times 1}{500000 \times 1 + P_{cu,n} + P_{core}} \\ 0.95 = \frac{500000 \times 0.6 \times 1}{500000 \times 0.6 \times 1 + 0.6^2 \times P_{cu,n} + P_{core}} \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow P_{cu,n} = \dots, \quad P_{core} = \dots$$

$$\eta|_{0.75} = \frac{500000 \times 0.75 \times 1}{500000 \times 0.75 \times 1 + 0.75^2 \times P_{cu,n} + P_{core}} \times 100$$

بازده شبانه روزی یا ۲۴ ساعته

❖ **ترانسفورماتورهای قدرت** (نیروگاه) در طول ۲۴ ساعت نزدیک شرایط نامی یا بار کامل کار می کنند. این ترانسفورماتورها به نحوی طراحی می شوند که بازده حداکثر آنها در حوالی **شرایط نامی** رخ دهد.

❖ **ترانسفورماتورهای توزیع** در طول ۲۴ ساعت در بار نامی کار نمی کنند و در برخی ساعتها بار آنها بسیار کم است. لذا طوری طراحی می شوند که بازده حداکثر آنها در **توان متوسط خروجی** رخ دهد. برای این ترانسفورماتورها **بازده شبانه روزی یا ۲۴ ساعته** تعریف می شود:

All Day Efficiency
24 Hour Efficiency

بازده شبانه روزی یا ۲۴ ساعته

❖ برای تعیین بازده ۲۴ ساعته منحنی بار ترانسفورماتور باید در اختیار باشد:

$$\text{بازده شبانه روزی} = \frac{\text{انرژی خروجی در ۲۴ ساعت}}{\text{انرژی ورودی در ۲۴ ساعت}}$$

$$\text{بازده شبانه روزی} = \frac{\text{انرژی خروجی در ۲۴ ساعت}}{\text{انرژی خروجی در ۲۴ ساعت} + \text{انرژی تلف شده در ۲۴ ساعت}}$$