

بسمه تعالی

ادامه فصل دوم

# ترانسفورماتورها

# تعیین مقدار عناصر مدار معادل



با آزمایش هایی می توان مقدار مقاومت ها و اندوکتانس های مدار معادل را تعیین کرد:

# تعیین مقدار عناصر مدار معادل

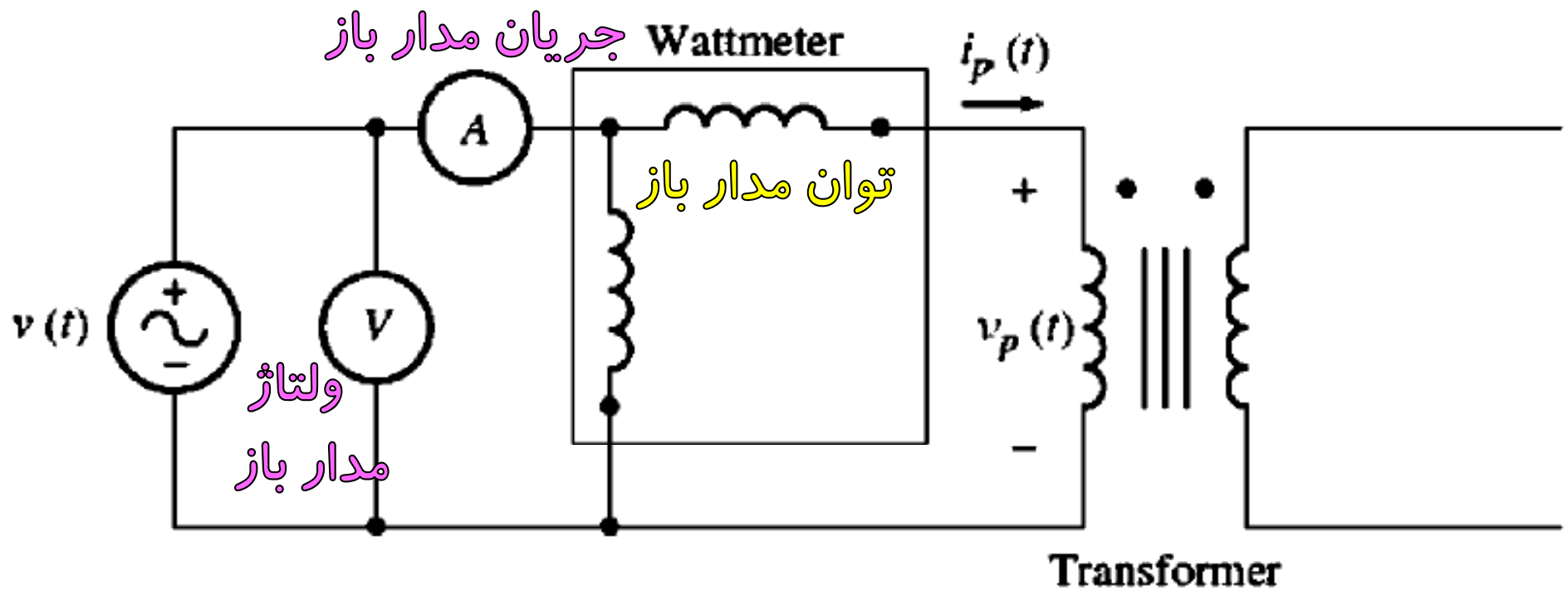
## \* آزمایش مدار باز:

- ❖ سیم پیچی خروجی ترانسفورماتور باید مدار باز شود.
- ❖ ولتاژ اعمالی به سیم پیچی ورودی برابر ولتاژ نامی است.
- ❖ جریان در این آزمایش ناچیز است.

✓ سیم پیچی فشار قوی = سیم پیچی خروجی  
✓ سیم پیچی فشار ضعیف = سیم پیچی ورودی

# تعیین مقدار عناصر مدار معادل

\* آزمایشی مدار باز:



# تعیین مقدار عناصر مدار معادل

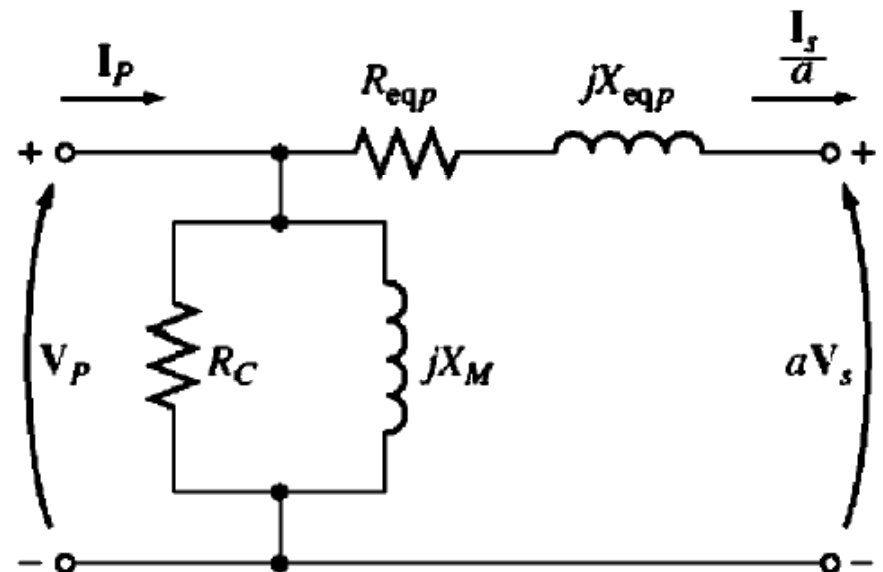
\* در آزمایش مدار باز مقادیر به صورت ارجاع شده به سمت فشار ضعیف بدست می آیند:

رسانایی معادل مقاومت تلف هسته

$$Y_{O.C.} = G_C - jB_M = \frac{1}{R_C} - j\frac{1}{X_M}$$

ادمیتانس شاخه تحریک

سوسپتانس معادل اندوکتانس مغناطیس کننده



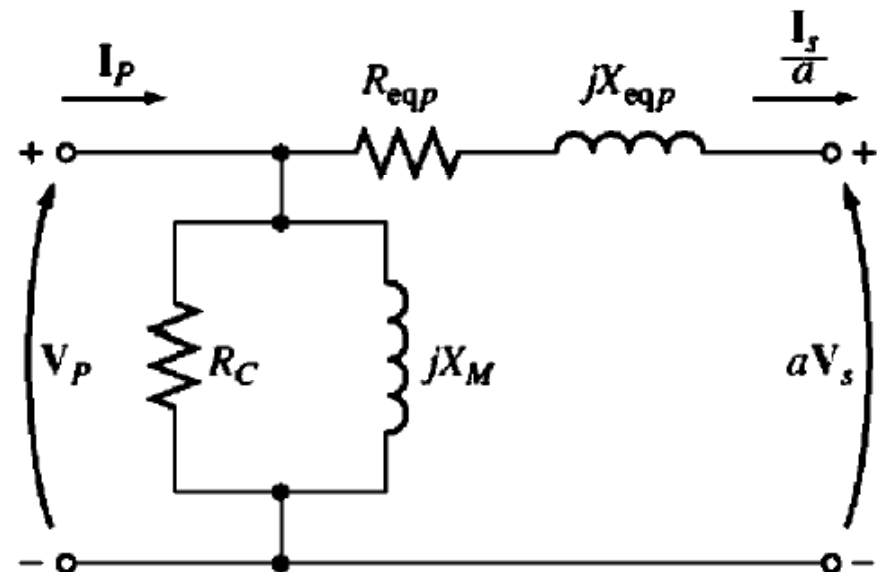
## تعیین مقدار عناصر مدار معادل

\* در آزمایش مدار باز مقادیر به صورت ارجاع شده به سمت فشار ضعیف بدست می آیند:

$$|Y_{O.C.}| = \frac{I_{O.C.}}{V_{O.C.}}$$

$$PF = \frac{P_{O.C.}}{V_{O.C.} \times I_{O.C.}} \Rightarrow \theta = \cos^{-1}(PF)$$

$$Y_{O.C.} = |Y_{O.C.}| \angle -\theta = \frac{1}{R_C} - j \frac{1}{X_M}$$



# تعیین مقدار عناصر مدار معادل

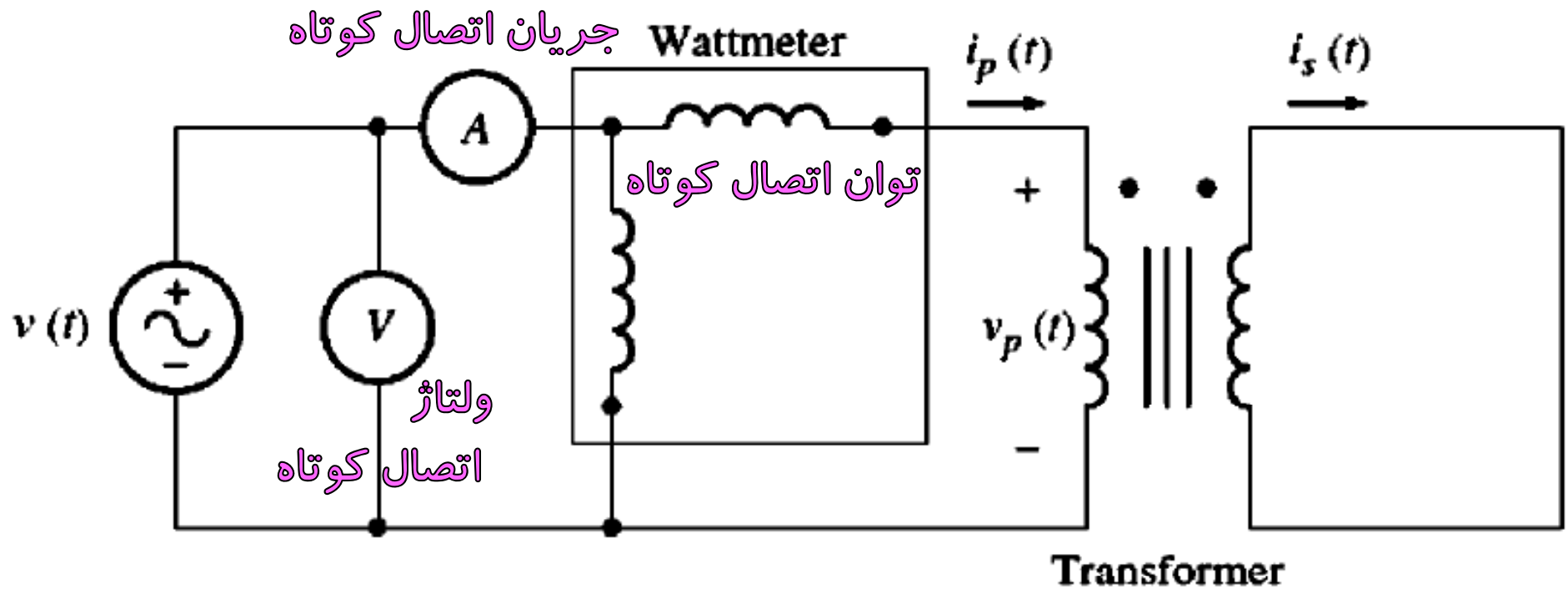
## \* آزمایش اتصال کوتاه:

- ❖ سیم پیچی خروجی ترانسفورماتور باید اتصال کوتاه شود.
- ❖ جریان اعمالی به سیم پیچی ورودی برابر جریان نامی است.
- ❖ ولتاژ اعمالی در این آزمایش ناچیز است.

- ✓ سیم پیچی فشار قوی = سیم پیچی ورودی
- ✓ سیم پیچی فشار ضعیف = سیم پیچی خروجی

# تعیین مقدار عناصر مدار معادل

\* آزمایش اتصال کوتاه:





# تعیین مقدار عناصر مدار معادل

\* در آزمایش اتصال کوتاه مقادیر به صورت ارجاع شده به سمت فشار قوی بدست می آیند.

\* چون ولتاژ اتصال کوتاه بسیار ناچیز است، از شاخه تحریک جریان ناچیزی می گذرد و میتوان از شاخه تحریک صرفنظر کرد:

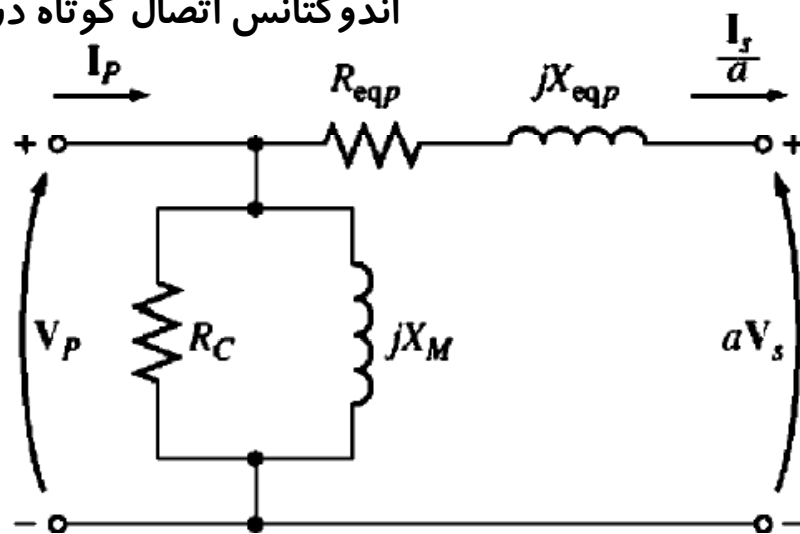
مقاومت اتصال کوتاه در طرف فشار قوی

$$Z_{S.C.} = R_{S.C.} + jX_{S.C.} = R_{eq} + jX_{eq}$$

امپدانس اتصال کوتاه

اندوکتانس اتصال کوتاه در طرف فشار قوی

$$Z_{S.C.} = (R_P + a^2 R_S) + j(X_P + a^2 X_S)$$



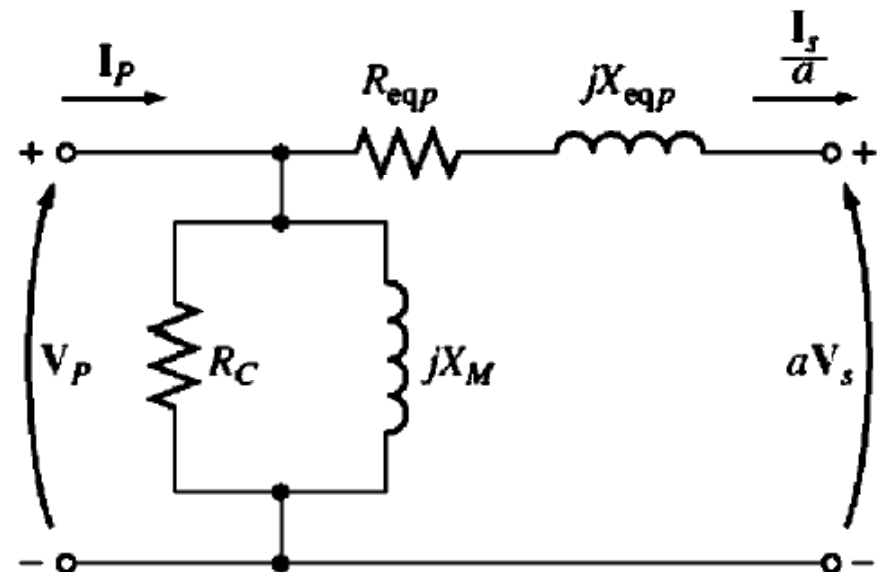
## تعیین مقدار عناصر مدار معادل

\* در آزمایش اتصال کوتاه کل امپدانس ارجاع شده به سمت فشار قوی تعیین می شود.

$$|Z_{S.C.}| = \frac{V_{S.C.}}{I_{S.C.}}$$

$$PF = \frac{P_{S.C.}}{V_{S.C.} \times I_{S.C.}} \Rightarrow \theta = \cos^{-1}(PF)$$

$$Z_{S.C.} = |Z_{S.C.}| \angle \theta = R_{eq} + jX_{eq}$$

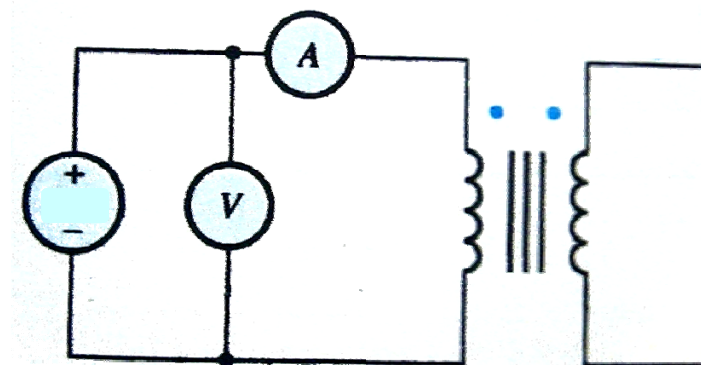


# تعیین مقدار عناصر مدار معادل

## \* آزمایش DC:

- ❖ سیم پیچی ورودی با یک ولتاژ DC تغذیه می شود.
- ❖ معمولا مقدار ولتاژ تغذیه به نحوی تعیین می گردد که جریان DC سیم پیچی برابر مقدار موثر جریان نامی سیم پیچ گردد.

$$R_{DC} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}}$$



ترانسفورماتور

توجه:

بعد از تمام شدن همه آزمایش ها، همه مقادیر محاسبه شده باید به یک طرف (فشار قوی یا فشار ضعیف) منتقل شوند.



Tests are performed on a  $1\phi$ , 10 kVA, 2200/220 V, 60 Hz transformer and the following results are obtained.

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

- (a) Derive the parameters for the approximate equivalent circuits referred to the low-voltage side and the high-voltage side.
- (b) Express the excitation current as a percentage of the rated current.
- (c) Determine the power factor for the no-load and short-circuit tests.



Note that for the no-load test the supply voltage (full-rated voltage of 220 V) is applied to the low-voltage winding, and for the short-circuit test the supply voltage is applied to the high-voltage winding with the low-voltage winding shorted. The subscripts H and L will be used to represent quantities for the high-voltage and low-voltage windings, respectively.

The ratings of the windings are as follows:

$$V_{H(\text{rated})} = 2200 \text{ V}$$

$$V_{L(\text{rated})} = 220 \text{ V}$$

$$I_{H(\text{rated})} = \frac{10000}{2200} = 4.55 \text{ A}$$

$$I_{L(\text{rated})} = \frac{10,000}{220} = 45.5 \text{ A}$$

$$V_H I_H|_{\text{rated}} = V_L I_L|_{\text{rated}} = 10 \text{ kVA}$$



- (a) The equivalent circuit and the phasor diagram for the open-circuit test are shown in Fig. E2.2a.

$$\text{Power, } P_{oc} = \frac{V_L^2}{R_{cL}}$$

$$R_{cL} = \frac{220^2}{100} = 484 \, \Omega$$

$$I_{cL} = \frac{220}{484} = 0.45 \, \text{A}$$

$$I_{mL} = (I_L^2 - I_{cL}^2)^{1/2} = (2.5^2 - 0.45^2)^{1/2} = 2.46 \, \text{A}$$

$$X_{mL} = \frac{V_L}{I_{mL}} = \frac{220}{2.46} = 89.4 \, \Omega$$

The corresponding parameters for the high-voltage side are obtained as follows:

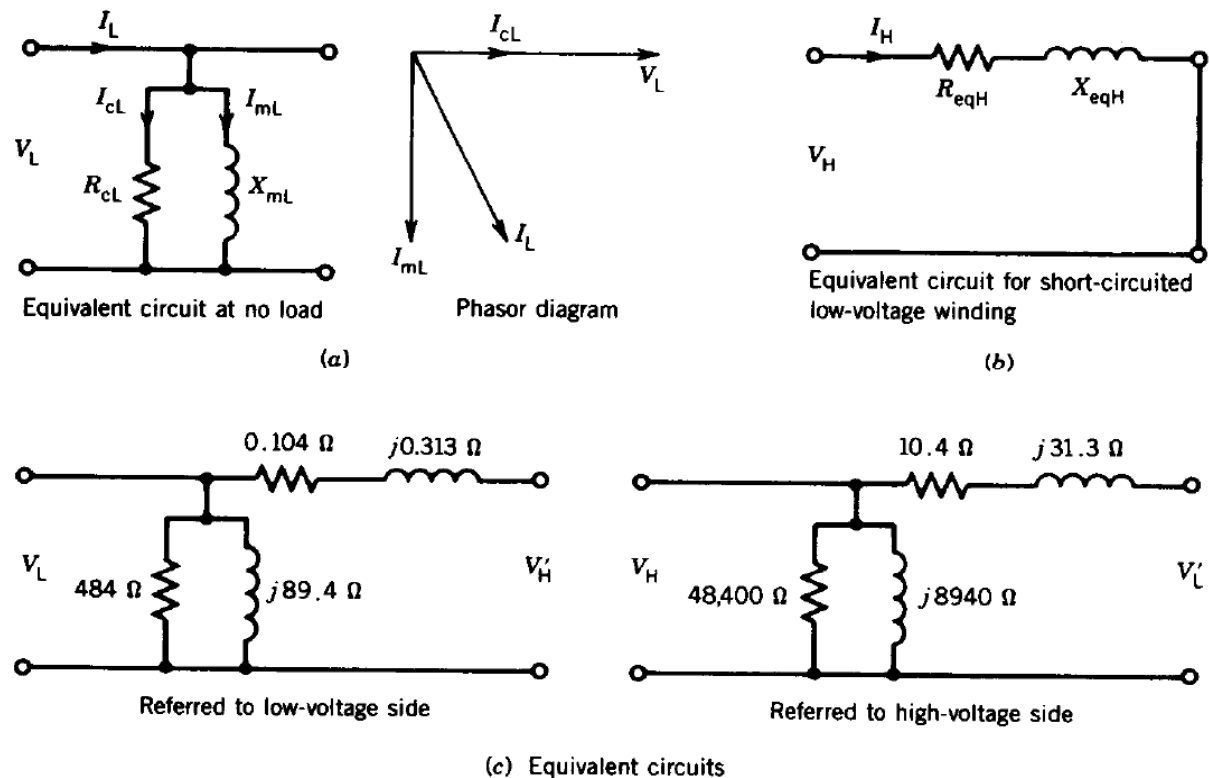


Turns ratio  $a = \frac{2200}{220} = 10$

$$R_{cH} = a^2 R_{cL} = 10^2 \times 484 = 48,400 \Omega$$

$$X_{mH} = 10^2 \times 89.4 = 8940 \Omega$$

The equivalent circuit with the low-voltage winding shorted is shown





Power  $P_{sc} = I_H^2 R_{eqH}$

$$R_{eqH} = \frac{215}{4.55^2} = 10.4 \, \Omega$$

$$Z_{eqH} = \frac{V_H}{I_H} = \frac{150}{4.55} = 32.97 \, \Omega$$

$$X_{eqH} = (Z_{eqH}^2 - R_{eqH}^2)^{1/2} = (32.97^2 - 10.4^2)^{1/2} = 31.3 \, \Omega$$

The corresponding parameters for the low-voltage side are as follows:

$$R_{eqL} = \frac{R_{eqH}}{a^2} = \frac{10.4}{10^2} = 0.104 \, \Omega$$

$$X_{eqL} = \frac{31.3}{10^2} = 0.313 \, \Omega$$

The approximate equivalent circuits referred to the low-voltage side and the high-voltage side are shown in Fig. E2.2c. Note that the impedance of the shunt branch is much larger than that of the series branch.





- (b) From the no-load test the excitation current, with rated voltage applied to the low-voltage winding, is

$$I_{\phi} = 2.5 \text{ A}$$

This is  $(2.5/45.5) \times 100\% = 5.5\%$  of the rated current of the winding

(c)

$$\begin{aligned} \text{Power factor at no load} &= \frac{\text{power}}{\text{volt-ampere}} \\ &= \frac{100}{220 \times 2.5} \\ &= 0.182 \end{aligned}$$

$$\text{Power factor at short-circuit condition} = \frac{215}{150 \times 4.55} = 0.315 \quad \blacksquare$$

## مثال

یک ترانسفورماتور ۱۰۰۰ ولت آمپر، ۲۳۰/۱۱۵ ولت، مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج آزمایشها به شرح زیر است:

Open-circuit test	Short-circuit test
$V_{OC} = 230 \text{ V}$	$V_{SC} = 19.1 \text{ V}$
$I_{OC} = 0.45 \text{ A}$	$I_{SC} = 8.7 \text{ A}$
$P_{OC} = 30 \text{ W}$	$P_{SC} = 42.3 \text{ W}$

تمام اطلاعات داده شده مربوط به سمت اولیه ترانسفورماتور است. پارامترهای مدار معادل ترانسفورماتور را به صورت ارجاع شده به سمت فشار ضعیف محاسبه نمایید.



(a) OPEN CIRCUIT TEST:

$$|Y_{\text{EX}}| = |G_C - jB_M| = \frac{0.45 \text{ A}}{230 \text{ V}} = 0.001957$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_{\text{oc}}}{V_{\text{oc}} I_{\text{oc}}} = \cos^{-1} \frac{30 \text{ W}}{(230 \text{ V})(0.45 \text{ A})} = 73.15^\circ$$

$$Y_{\text{EX}} = G_C - jB_M = 0.001957 \angle -73.15^\circ \text{ mho} = 0.000567 - j0.001873 \text{ mho}$$

$$R_C = \frac{1}{G_C} = 1763 \Omega$$

$$X_M = \frac{1}{B_M} = 534 \Omega$$



### SHORT CIRCUIT TEST:

$$|Z_{\text{EQ}}| = |R_{\text{EQ}} + jX_{\text{EQ}}| = \frac{19.1 \text{ V}}{8.7 \text{ A}} = 2.2 \Omega$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_{\text{SC}}}{V_{\text{SC}} I_{\text{SC}}} = \cos^{-1} \frac{42.3 \text{ W}}{(19.1 \text{ V})(8.7 \text{ A})} = 75.3^\circ$$

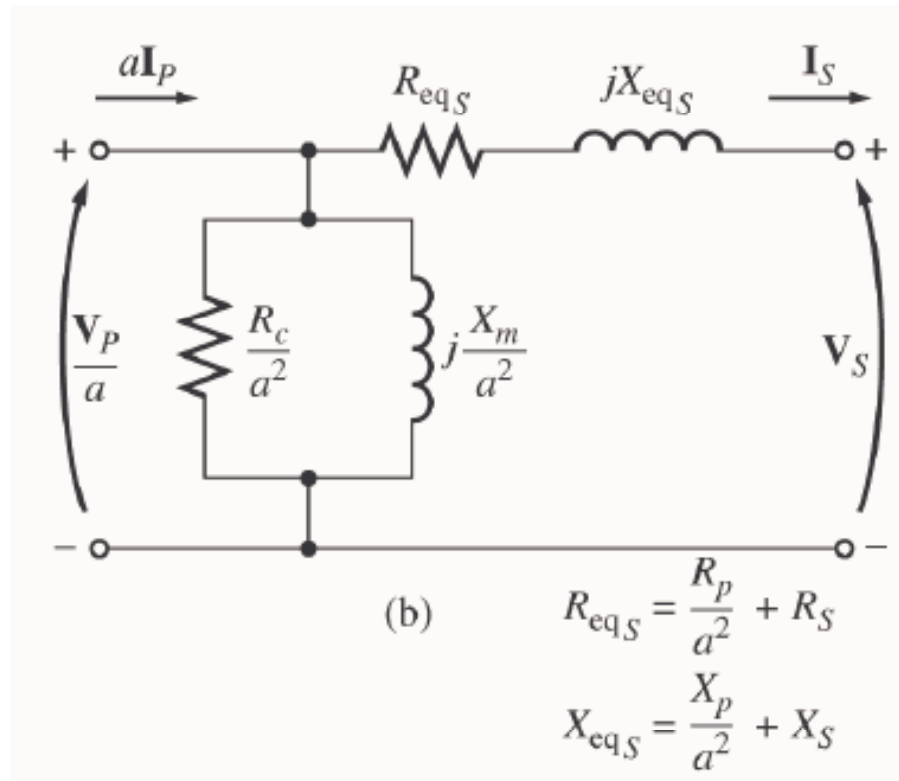
$$Z_{\text{EQ}} = R_{\text{EQ}} + jX_{\text{EQ}} = 2.20 \angle 75.3^\circ \Omega = 0.558 + j2.128 \Omega$$

$$R_{\text{EQ}} = 0.558 \Omega$$

$$X_{\text{EQ}} = j2.128 \Omega$$

To convert the equivalent circuit to the secondary side, divide each impedance by the square of the turns ratio ( $a = 230/115 = 2$ ). The resulting equivalent circuit is shown below:

حل



$$R_{EQ,s} = 0.140 \, \Omega$$

$$R_{C,s} = 441 \, \Omega$$

$$X_{EQ,s} = j0.532 \, \Omega$$

$$X_{M,s} = 134 \, \Omega$$

## سیستم اندازه گیری در-یکی

- در تحلیل مسائل شامل ترانسفورماتور احتمال خطا بسیار زیاد است.
- استفاده از روشی که در آن لازم نباشد سطح ولتاژها به صورت صریح تغییر کند می تواند احتمال خطا را به شدت کاهش دهد.
- این سیستم محاسبه و اندازه گیری سیستم در یکی (pu) نام دارد.
- حسن دیگر سیستم پریونیت این است که برای انواع ماشینهای الکتریکی با هر توان و هر ساختمانی، امپدانسها در گستره کوچکی قرار می گیرند.
- در سیستم پریونیت مقدار کمیتهای الکتریکی را با واحد SI نمی سنجند بلکه هر کمیت را به صورت کسری از یک مقدار مبنا بیان می کنند:

$$\text{کمیت پریونیت} = \frac{\text{کمیت واقعی}}{\text{مقدار مبنای کمیت}}$$

## سیستم اندازه گیری در-یکی

➤ معمولاً دو کمیت ولتاژ و توان ظاهری به عنوان مبنا انتخاب می شوند و بقیه مقادیر مبنا با روابط الکتریکی معمولی بر حسب این مقادیر محاسبه می شوند:

$$S_b = V_b I_b \Rightarrow I_b = \frac{S_b}{V_b}$$

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

✓ مقادیر مبنا در یک نقطه خاص از سیستم قدرت انتخاب می شوند.

✓ ترانسفورماتور روی توان مبنا تأثیری ندارد.

✓ با گذر از ترانسفورماتور ولتاژ تغییر می کند بنابراین ولتاژ مبنا نیز تغییر می کند.

✓ چون کمیت‌های مبنا با عبور از ترانسفورماتور تغییر می کنند، روند ارجاع کمیت‌ها به یک سطح مشترک در سیستم پریونیت خود به خود انجام می شود.

## مثال

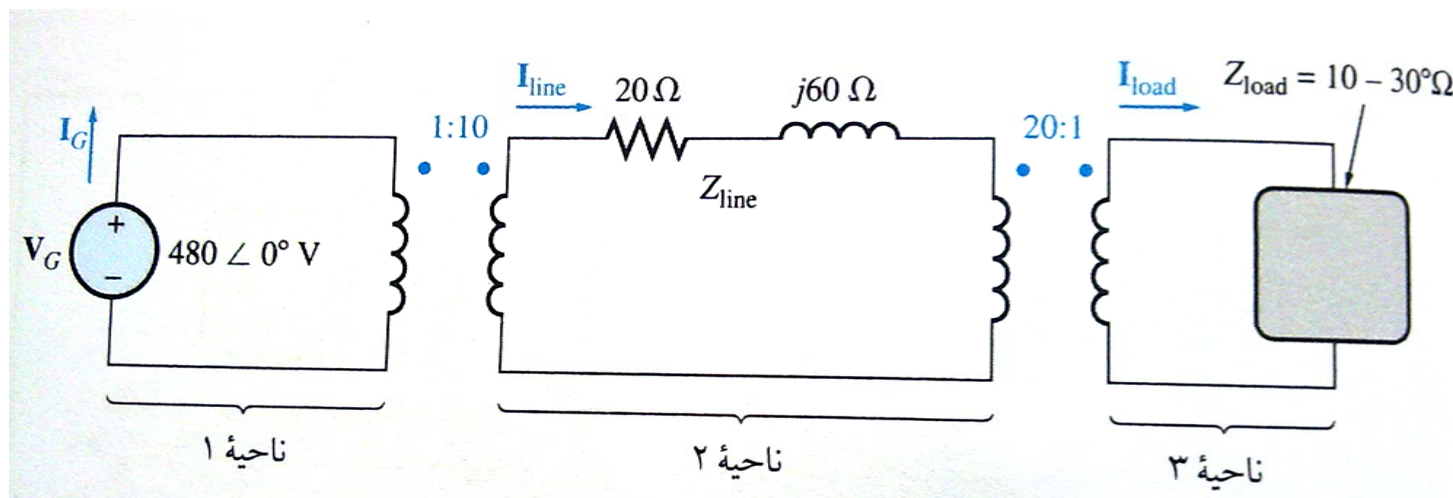
سیستم قدرتی شامل یک ژنراتور ۴۸۰ ولتی، یک ترانسفورماتور افزایشده ۱۰:۱، خط انتقالی با امپدانس  $20 + j60$  اهم، یک ترانسفورماتور کاهشده ۲۰:۱ و امپدانس بار  $10 \angle -30^\circ$  اهم مفروض است. مقادیر مبنای سیستم در سمت ژنراتور ۴۸۰ ولت ۱۰ KVA انتخاب شده اند.

الف: مقادیر مبنای ولتاژ، جریان، امپدانس و توان ظاهری را در نقاط دیگر سیستم قدرتی بیابید.

ب: این سیستم را به مدار معادل پریونیت تبدیل کنید.

پ: توان تحویل شده به بار را بیابید.

ت: توان تلف شده در خط انتقال را بیابید.





## حل

(الف) در ناحیه ژنراتور،  $V_{\text{مبنا}} = 480 \text{ V}$  و  $S_{\text{مبنا}} = 10 \text{ kVA}$ ، بنابراین

$$I_{\text{مبنا}1} = \frac{S_{\text{مبنا}}}{V_{\text{مبنا}1}} = \frac{10000 \text{ VA}}{480 \text{ V}} = 20.83 \text{ A}$$

$$Z_{\text{مبنا}1} = \frac{V_{\text{مبنا}1}}{I_{\text{مبنا}1}} = \frac{480 \text{ V}}{20.83 \text{ A}} = 23.04 \Omega$$

نسبت تبدیل ترانسفورماتور  $T_1$  برابر است با  $a = \frac{1}{0.1} = 10$ ، بنابراین ولتاژ مبنا در ناحیه خط انتقال برابر است با

$$V_{\text{مبنا}2} = \frac{V_{\text{مبنا}1}}{a} = \frac{480 \text{ V}}{10} = 48.00 \text{ V}$$

بقیه کمیات مبنا برابرند با

$$S_{\text{مبنا}2} = 10 \text{ kVA}$$

## حل

$$I_{2\text{ مینا}} = \frac{10000 \text{ VA}}{4800 \text{ V}} = 2.083 \text{ A}$$

$$Z_{2\text{ مینا}} = \frac{4800 \text{ V}}{2.083 \text{ A}} = 2304 \Omega$$

نسبت تبدیل ترانسفورماتور  $T_2$  برابر است با  $a = \frac{20}{1} = 20$ ، بنابراین ولتاژ مینا در ناحیه بار برابر است با

$$V_{3\text{ مینا}} = \frac{V_{2\text{ مینا}}}{a} = \frac{4800 \text{ V}}{20} = 240 \text{ V}$$

بقیه کمیات مینا برابرند با

$$S_{3\text{ مینا}} = 10 \text{ kVA}$$

$$I_{3\text{ مینا}} = \frac{10000 \text{ VA}}{240 \text{ V}} = 41.67 \text{ A}$$

$$Z_{3\text{ مینا}} = \frac{240 \text{ V}}{41.67 \text{ A}} = 5.76 \Omega$$

## حل

(ب) برای تبدیل سیستم قدرت به یک سیستم در - یکی ، هرکمیتی را باید به مقدار مبنای ناحیه‌ای که در آن قرار دارد تقسیم کرد. ولتاژ در-یکی **ژنراتور** با تقسیم ولتاژ واقعی آن بر مقدار مبنای آن به دست می‌آید :

$$V_{G, pu} = \frac{480 \angle 0^\circ \text{ V}}{480 \text{ V}} = 1 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

امپدانس در-یکی **خط انتقال** برابر است با مقدار واقعی آن تقسیم بر مقدار مبنا:

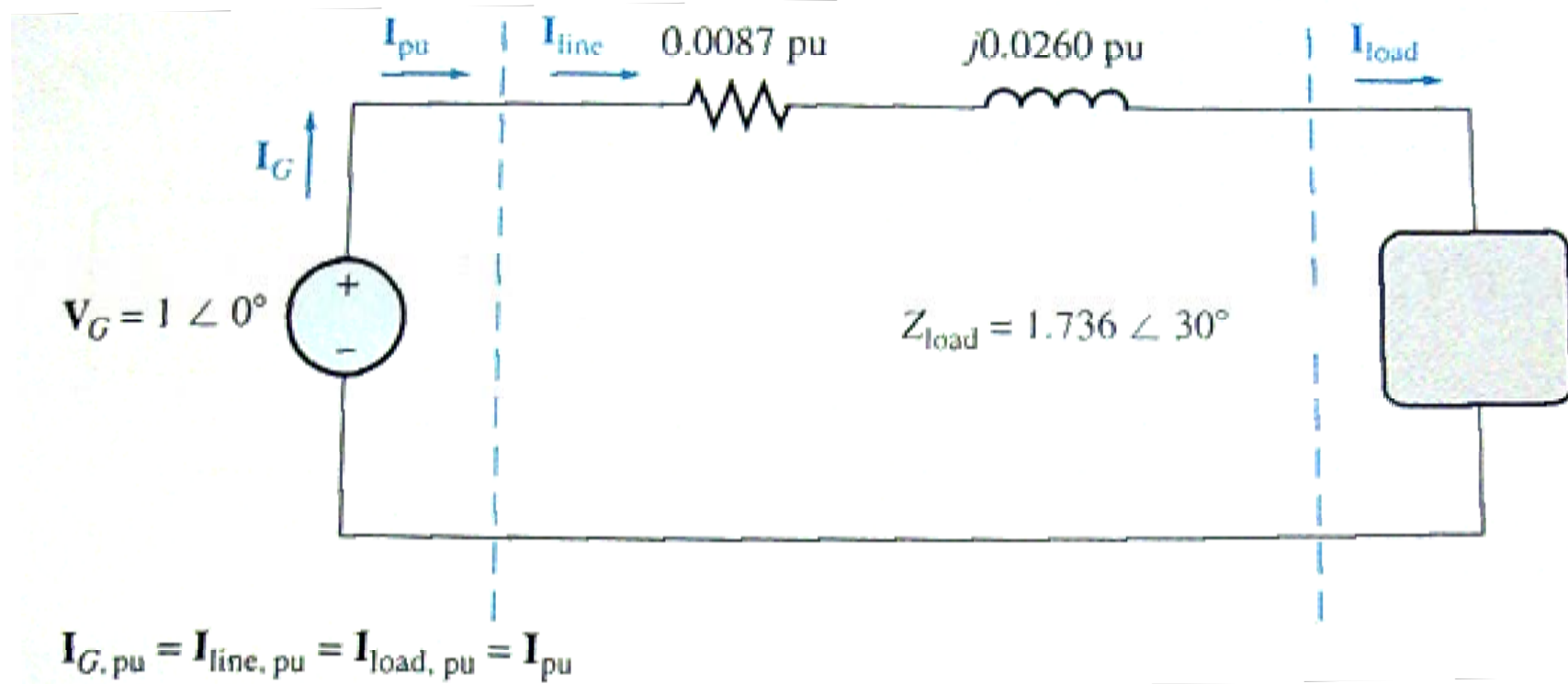
$$\begin{aligned} Z_{line, pu} &= \frac{20 + j60 \ \Omega}{2304 \ \Omega} \\ &= 0.0087 + j0.0260 \text{ pu} \end{aligned}$$

امپدانس در-یکی **بار** نیز از تقسیم مقدار واقعی بر مقدار مبنا به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} Z_{load, pu} &= \frac{10 \angle 30^\circ \ \Omega}{576 \ \Omega} \\ &= 1.736 \angle 30^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

مدار معادل در یکی سیستم قدرت در شکل ۲-۲۳ نشان داده شده است.

حل



مدار معادل پریونیت

## حل

(پ) جریان در این سیستم قدرت در-یکی برابر است با

$$\begin{aligned} I_{pu} &= \frac{V_{pu}}{Z_{tot, pu}} = \frac{1 \angle 0^\circ}{(0.0087 + j0.0260) + (1.736 \angle 30^\circ)} \\ &= \frac{1 \angle 0^\circ}{(0.0087 + j0.0260) + (1.503 + j0.868)} \\ &= \frac{1 \angle 0^\circ}{1.512 + j0.894} = \frac{1 \angle 0^\circ}{1.757 \angle 30.6^\circ} \\ &= 0.569 \angle -30.6^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

بنابراین، توان در-یکی بار برابر است با

$$P_{load, pu} = I_{pu}^2 R_{pu} = (0.569)^2 (1.503) = 0.487$$

و توان واقعی داده شده به بار عبارت است از:

$$P_{load} = R_{load, pu} S_{base} = (0.487)(10000 \text{ VA}) = 4870 \text{ W}$$

(ت) توان در-یکی تلف شده در خط انتقال برابر است با:

$$P_{line, pu} = I_{pu}^2 R_{line, pu} = (0.569)^2 (0.0087) = 0.00282$$

توان واقعی تلف شده در خط انتقال برابر است با

$$P_{line} = P_{line, pu} S_{base} = (0.00282)(10000 \text{ VA}) = 28.2 \text{ W}$$

## سیستم پر یونیت

❖ در یک سیستم قدرت معمولا کمیتهای مبنا به دلخواه انتخاب می شوند. ولی تمام سیستم باید همین مقادیر مبنا را داشته باشد.

❖ در سیستم هایی که بیش از یک ماشین الکتریکی وجود داشته باشد معمولا کمیات مبنای بزرگترین ماشین به عنوان مبنا انتخاب می شود.

❖ در تحلیل یک ماشین تنها، معمولا کمیت های نامی همان ماشین به عنوان مبنا فرض می شوند.

❖ اگر مقادیر نامی هر یک از ترانسفورماتور توزیع یا قدرت مبنا انتخاب شود و سایر کمیت ها بر حسب آنها بیان شود:

➤ مقاومت سری ترانسفورماتور حدود  $0.01$  پریونیت

➤ راکتانس های پراکندگی بین  $0.02$  تا  $0.1$  پریونیت

➤ راکتانس مغناطیس کننده حدود  $10$  تا  $40$  پریونیت

➤ مقاومت تلف هسته  $50$  تا  $200$  پریونیت

## سیستم پریونیت

❖ ممکن است لازم شود مبنای کمیت‌های پریونیت تغییر کند. در این صورت ابتدا مقدار واقعی این کمیت‌ها باید محاسبه شود و بعد نتایج را به مقادیر مبنای جدید تقسیم کنیم:

$$(P, Q, S)_{pu2} = (P, Q, S)_{pu1} \frac{S_{b1}}{S_{b2}}$$

$$(V)_{pu2} = (V)_{pu1} \frac{V_{b1}}{V_{b2}}$$

$$(R, X, Z)_{pu2} = (R, X, Z)_{pu1} \left( \frac{V_{b1}}{V_{b2}} \right)^2 \frac{S_{b2}}{S_{b1}}$$

## تنظیم ولتاژ ترانسفورماتور

❖ چون ترانسفورماتور واقعی امپدانس سری دارد، حتی اگر ولتاژ ورودی آن هم ثابت بماند، ولتاژ خروجی اش با تغییر بار تغییر می کند. برای مقایسه ترانسفورماتورها از این نظر کمیته تعریف می شود تحت عنوان **”تنظیم ولتاژ بار کامل“** که ولتاژ خروجی ترانسفورماتور در بی باری را با ولتاژ خروجی در بار کامل مقایسه می کند:

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

در بی باری  $V_S = V_P / a$

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

در سیستم پریونیت

$$VR = \frac{|V_{P,pu}| - |V_{S,fl,pu}|}{|V_{S,fl,pu}|} \times 100\%$$

❖ تنظیم ولتاژ باید حتی المقدور **کم** باشد ولی گاهی برای کاهش **جریانهای اتصال کوتاه** مدار عمداً از ترانسفورماتورهای با **تنظیم ولتاژ بزرگ** استفاده می شود.



## نمودار فازوری ترانسفورماتور

❖ برای تعیین اثر امپدانس ها و زاویه فاز جریان بر تنظیم ولتاژ، از نمودار فازوری استفاده می کنیم.

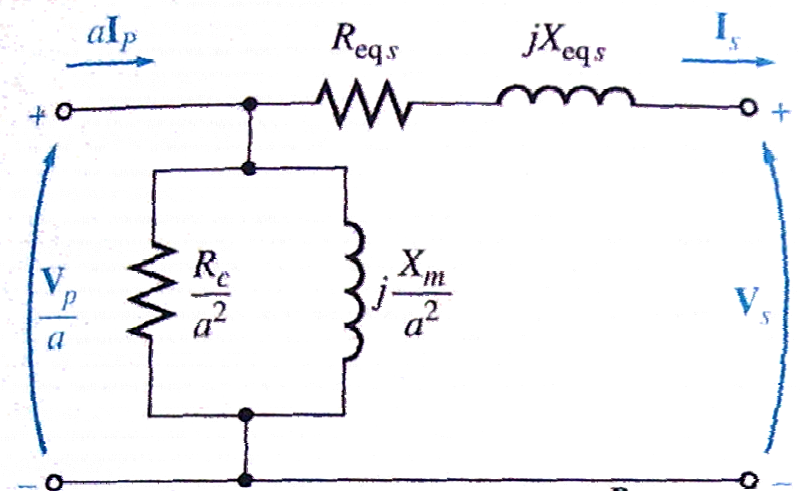
❖ در تمام نمودارهای فازوری، فازور ولتاژ ثانویه را با زاویه صفر فرض می کنیم و بقیه ولتاژها و جریانها را نسبت به آن می سنجیم.

❖ قانون ولتاژ کیرشهف برای مدار معادل ترانسفورماتور به صورت زیر نوشته می

شود:

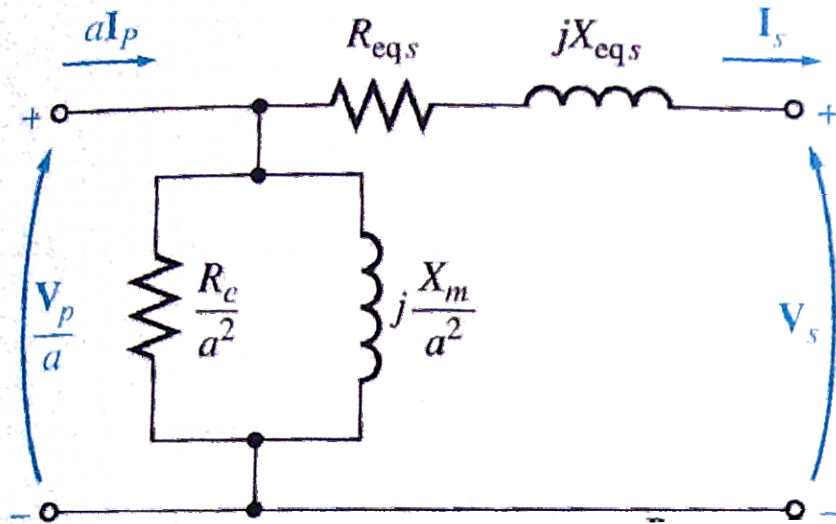
$$\frac{V_P}{a} = V_S + R_{eq} I_S + jX_{eq} I_S$$

نمودار فازوری ترانسفورماتور  
نمایش تصویری این معادله است.

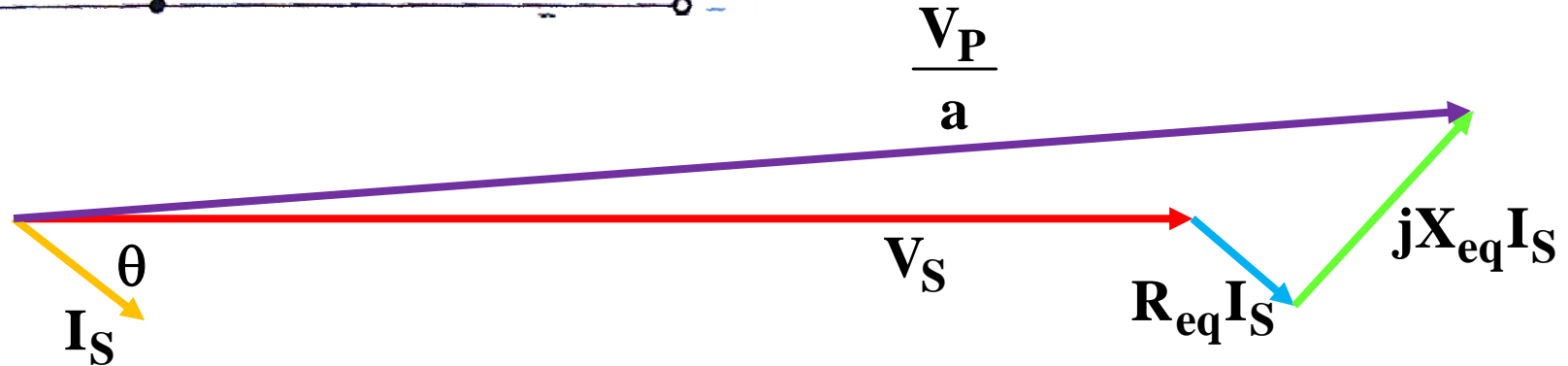


# نمودار فازوری ترانسفورماتور

❖ برای بار پسفاز:



$$\frac{V_P}{a} = V_S + R_{eq}I_S + jX_{eq}I_S$$

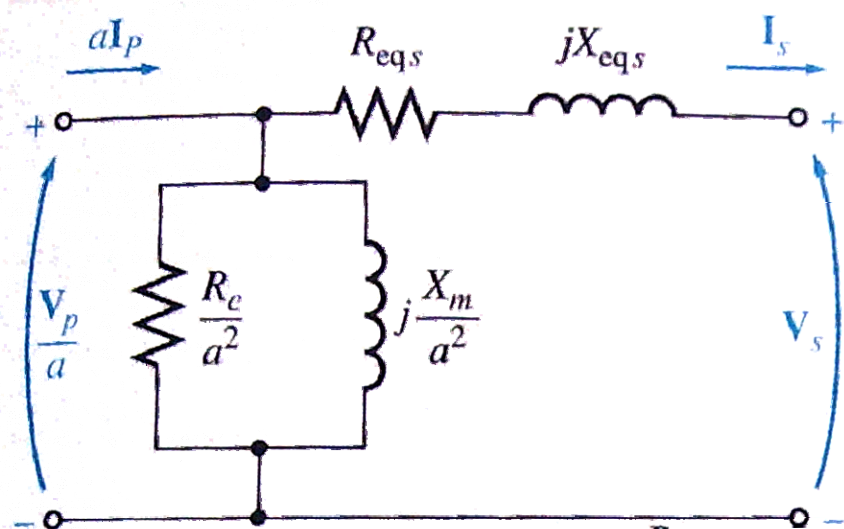


❖ ولتاژ ثانویه کمتر از ولتاژ اولیه منتقل شده است.

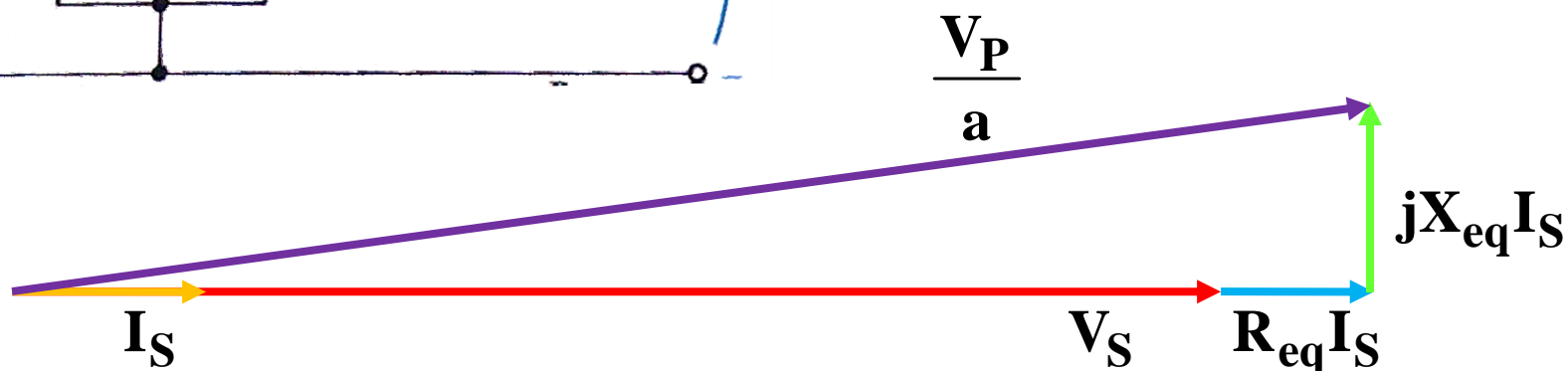
❖ تنظیم ولتاژ ترانسفورماتورهای دارای بار پسفاز باید بزرگتر از صفر باشد.

# نمودار فازوری ترانسفورماتور

❖ برای بار با ضریب توان واحد:



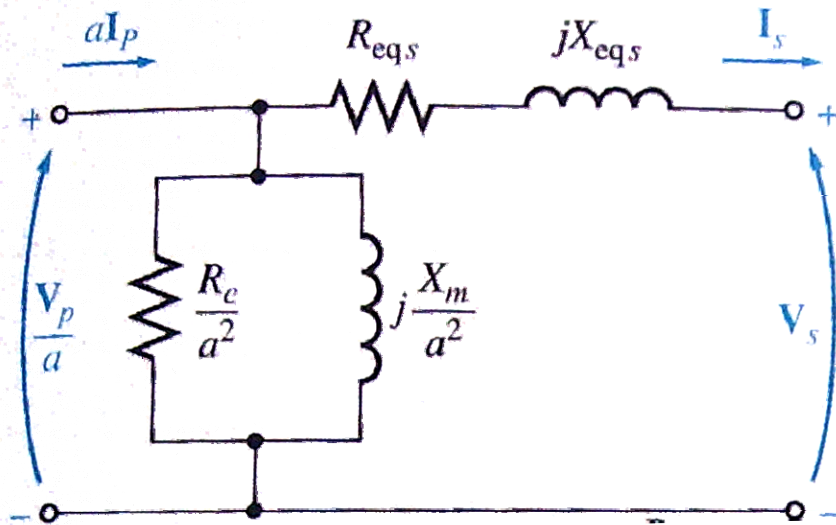
$$\frac{V_P}{a} = V_S + R_{eq}I_S + jX_{eq}I_S$$



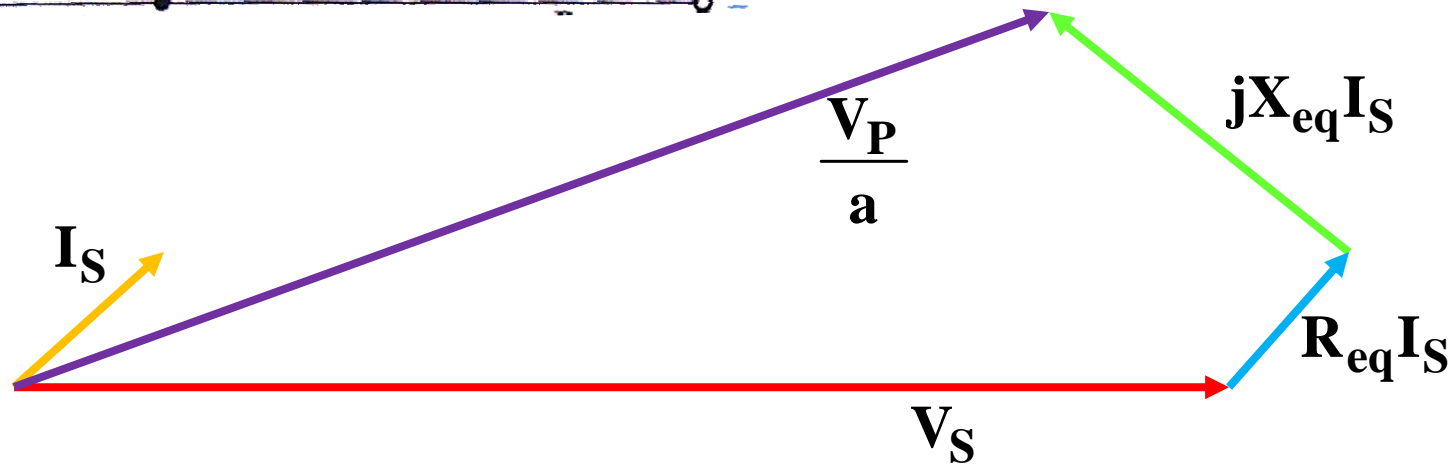
❖ ولتاژ ثانویه کمتر از ولتاژ اولیه منتقل شده است.  
❖ تنظیم ولتاژ ترانسفورماتورهای دارای ضریب توان واحد باید بزرگتر از صفر باشد.

# نمودار فازوری ترانسفورماتور

❖ برای بار پیشفاز:



$$\frac{V_P}{a} = V_S + R_{eq} I_S + jX_{eq} I_S$$



❖ ولتاژ ثانویه بیشتر از ولتاژ اولیه منتقل شده است.

❖ تنظیم ولتاژ ترانسفورماتورهای دارای بار پیشفاز منفی است.