

Méthode d'analyse des réseaux électriques

Les unités normalisées pu

Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Les problèmes des réseaux électriques peuvent être résolus moyennant la méthode des circuits qui présente l'avantage d'être une méthode analytique exacte, mais qui s'avère trop lourde (trop d'équations à résoudre) quand le réseau dépasse une certaine taille.

Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Les ingénieurs ont mis en pratique une méthode simple qui permet d'aboutir à la même résolution avec le moins d'erreurs possibles:
la méthode des unités normalisées (unités réduites)
pu = per-unit

Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Définition:

Il existe deux façons pour exprimer une grandeur:

- Absolue : 2Ω – $5,5 \text{ kV}$ – 3300 A
- Relative: 8% - 1 pu – $0,3 \text{ pu}$

Que signifie tout ça?

Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Exemple:
 - Si la tension au démarrage d'une machine est de **3.8 kV** sous **4 kV**, on dirait qu'elle est à **0.950 pu**;
 - Si la tension au démarrage d'une machine est de **2.2 kV** sous **2.3 kV**, on dirait qu'elle est à **0.956 pu**;

Méthode d'analyse des réseaux électriques

- On parle ici de deux systèmes différents: l'un à 4 kV et l'autre à 2.3 kV.
- Les réseaux électriques possèdent souvent des systèmes de tension différents selon l'utilisation. Ces niveaux de tensions sont obtenus au moyen de transformateurs qui adaptent la tension entre deux systèmes différents (400 kV/225 kV).
- Néanmoins, ces transformateurs possèdent leurs propres impédances.

Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Méthode des unités normalisées:
 - Pour transformer les grandeurs en pu, il faut:
 - Avoir une base unique S_{base} (en VA);
 - Diviser le réseau en autant de systèmes de tensions différents;
 - Calculer ensuite les autres grandeurs en pu;
 - De cette façon:
 - S_{base} doit être unique pour tout le problème;
 - Si S_{base} est monophasée, V_{base} est la tension entre phase et neutre;
 - Si S_{base} est triphasée, $V_{\text{base}}/U_{\text{base}}$ est la tension entre phases;

Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Méthode des unités normalisées:

- De cette façon:

- Le courant, en monophasé, est: $I_{base} = \frac{S_{base1}}{V_{base}}$

-

- Le courant, en triphasé, est: $I_{base} = \frac{S_{base3}}{\sqrt{3} U_{base}}$

- L'impédance de base est donc: $Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}}$

Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Méthode des unités normalisées:
 - A partir de là, on peut écrire:

$$pu = \frac{\text{réelle}}{\text{base}}$$

- C'est-à-dire:

$$I_{pu} = \frac{I_{réel}}{I_{base}}$$

$$V_{pu} = \frac{V_{réelle}}{V_{base}}$$

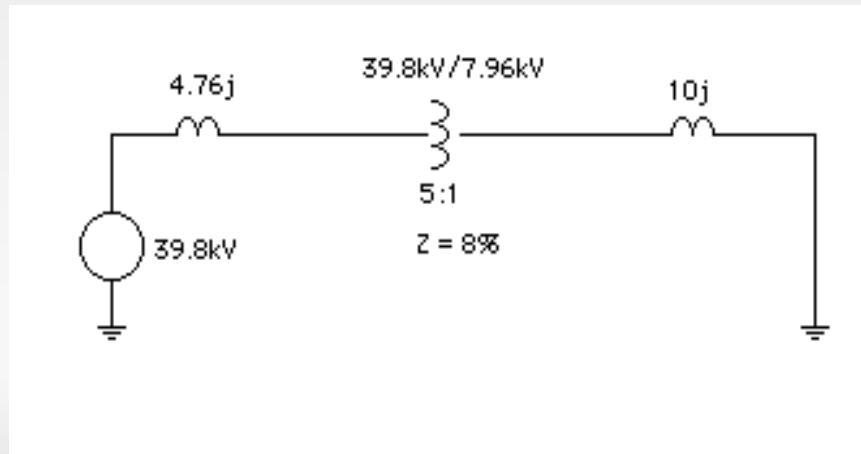
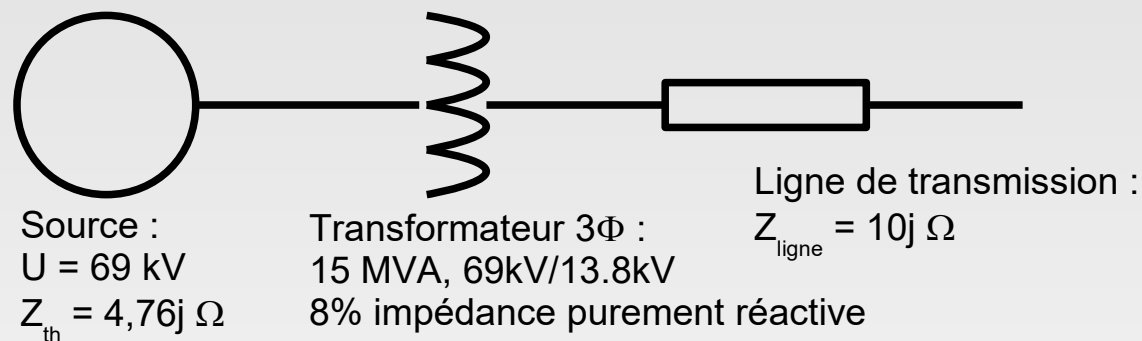
$$Z_{pu} = \frac{Z_{réelle}}{Z_{base}}$$

- Dans chaque domaine, on a:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{Z_{réelle}}{Z_{pu}}$$

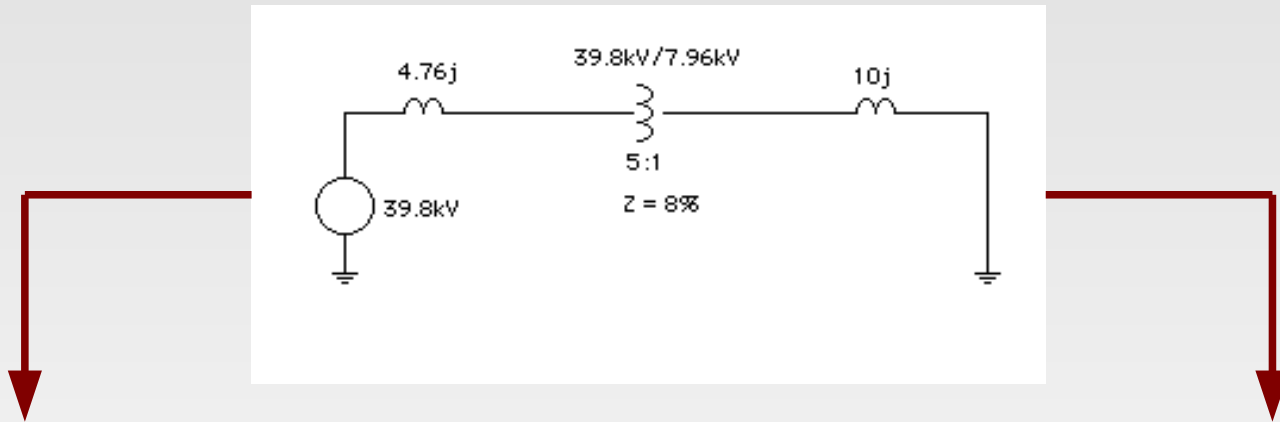
Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Analyse d'un court-circuit:
 - Méthode classique



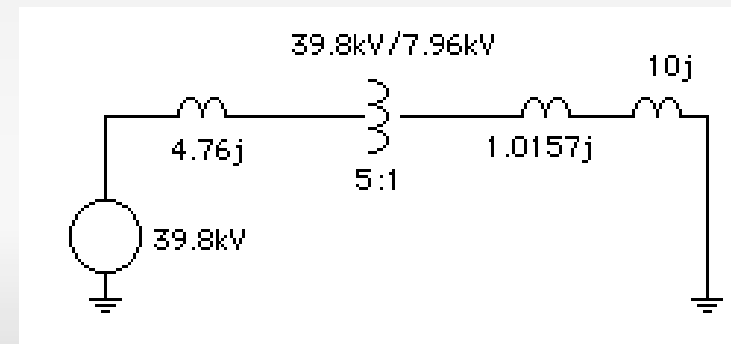
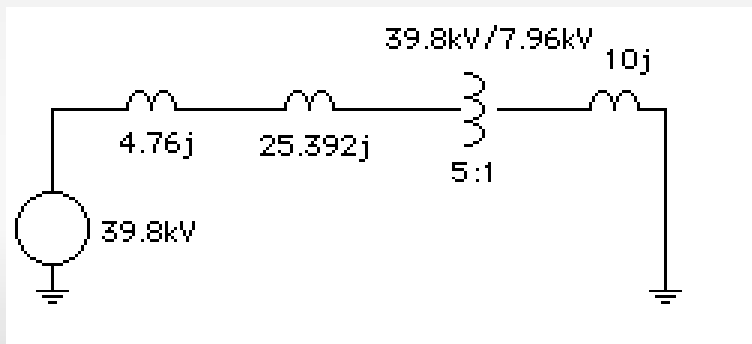
Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Analyse d'un court-circuit:
 - Méthode classique



Impédance du transformateur ramenée au primaire

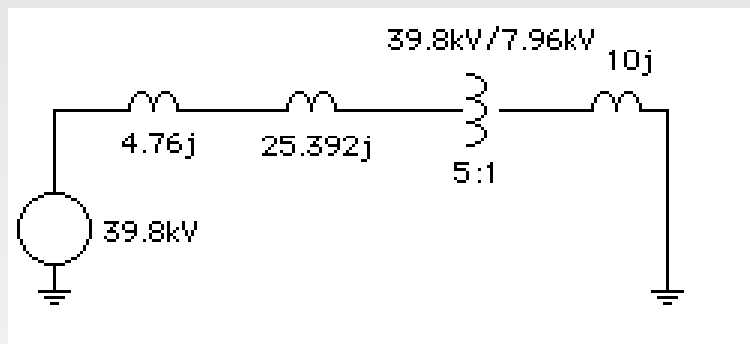
Impédance du transformateur ramenée au secondaire



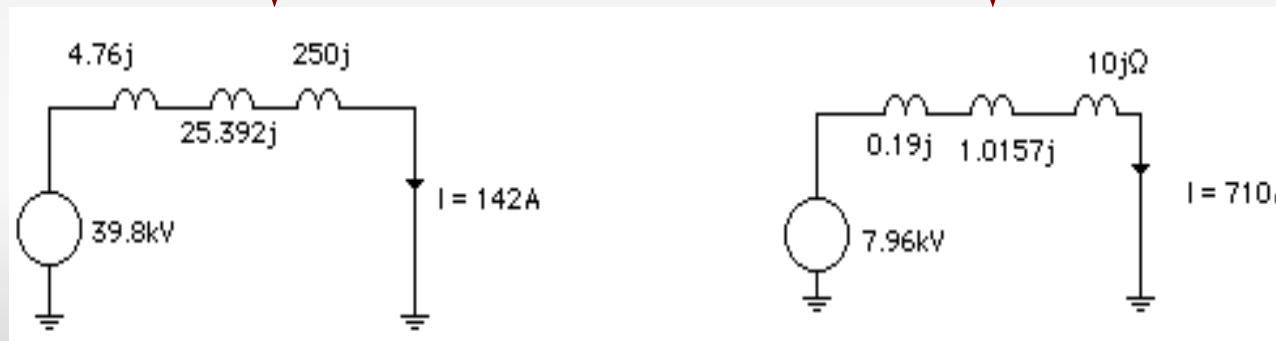
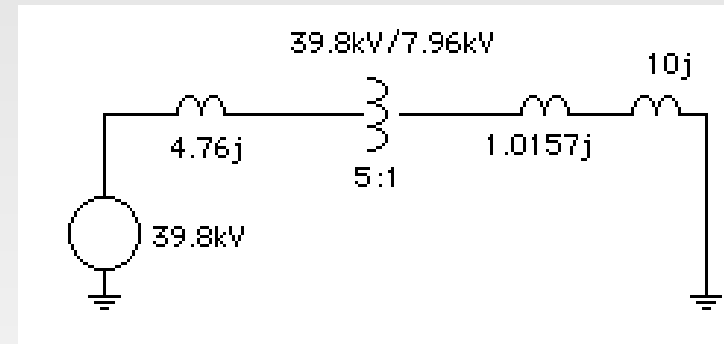
Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Analyse d'un court-circuit:
 - Méthode classique

Impédance du transformateur ramenée au primaire

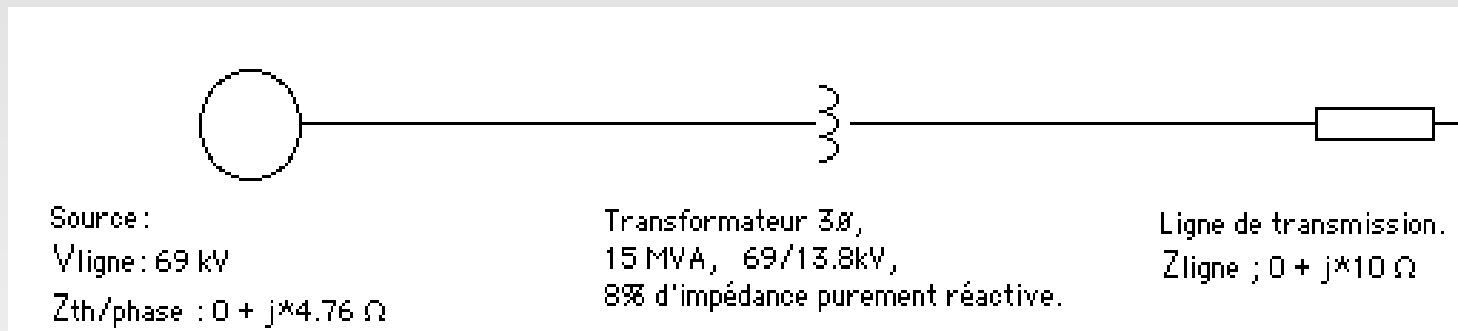


Impédance du transformateur ramenée au secondaire



Méthode d'analyse des réseaux électriques

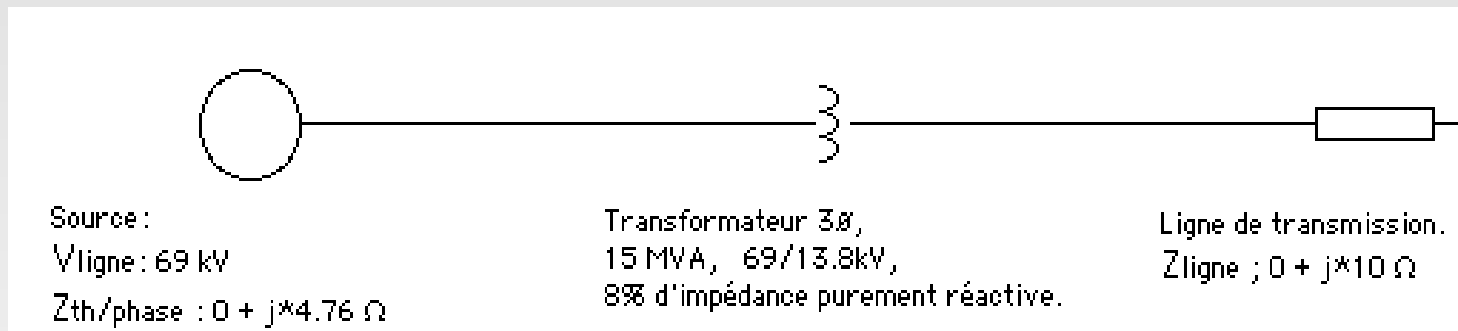
- Analyse d'un court-circuit:
 - Méthode des unités normalisées



- 1° : choix de la base
 - Dans ce cas : $S_{\text{base3}\Phi} = 15 \text{ MVA} = 1 \text{ pu}$
ou $S_{\text{base1}\Phi} = 5 \text{ MVA} = 1 \text{ pu}$

Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Analyse d'un court-circuit:
 - Méthode des unités normalisées



- 2° : choix du domaine

- Domaine 69 kV

- $U_{\text{base}} = 69 \text{ kV} = 1 \text{ pu}$

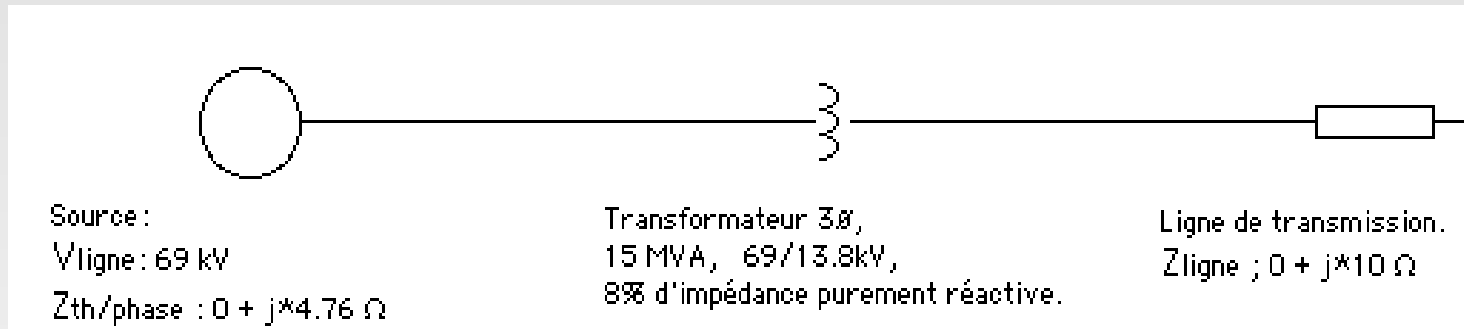
- $V_{\text{base}} = \frac{69}{\sqrt{3}} = 39,8 \text{ kV} = 1 \text{ pu}$

- $I_{\text{base}} = \frac{S_{\text{base3}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{base}}} = \frac{S_{\text{base1}}}{V_{\text{base}}} = 125,63 \text{ A} = 1 \text{ pu}$

- $Z_{\text{base}} = \frac{V_{\text{base}}}{I_{\text{base}}} = 315,2 \Omega = 1 \text{ pu}$

Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Analyse d'un court-circuit:
 - Méthode des unités normalisées



- 2° : choix du domaine

- Domaine 13,8 kV

- $U_{\text{base}} = 13,8 \text{ kV} = 1 \text{ pu}$

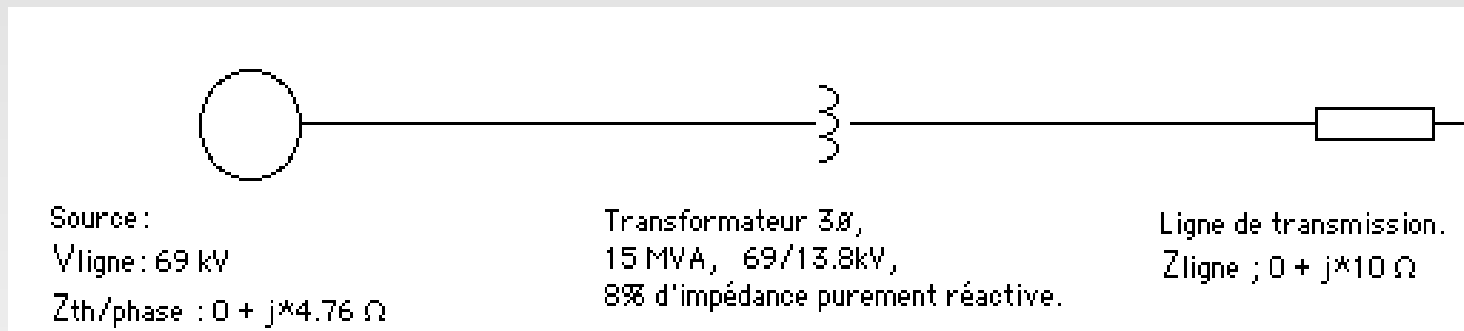
- $V_{\text{base}} = \frac{13,8}{\sqrt{3}} = 7,96 \text{ kV} = 1 \text{ pu}$

- $I_{\text{base}} = \frac{S_{\text{base3}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{base}}} = \frac{S_{\text{base1}}}{V_{\text{base}}} = 627,55 \text{ A} = 1 \text{ pu}$

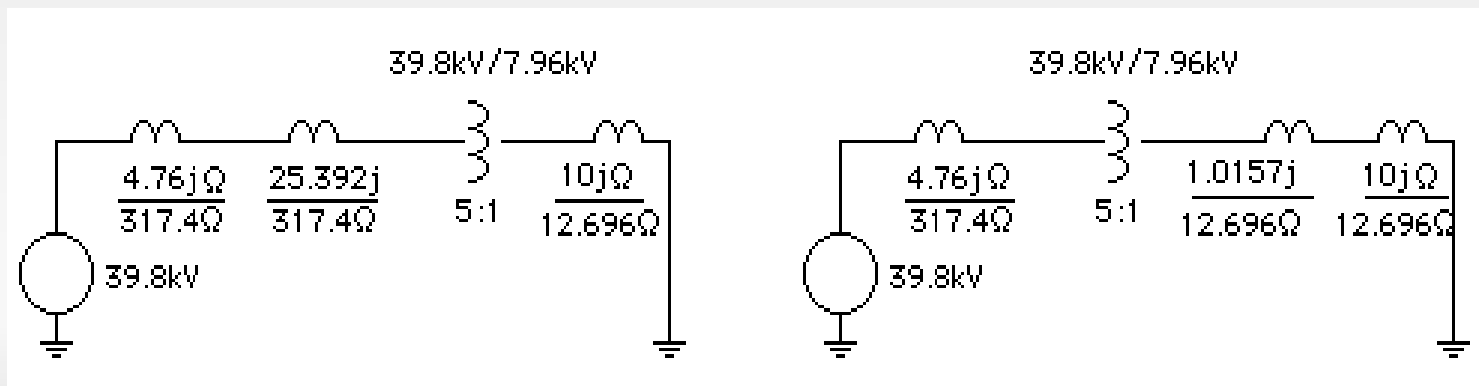
- $Z_{\text{base}} = \frac{V_{\text{base}}}{I_{\text{base}}} = 12,68 \Omega = 1 \text{ pu}$

Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Analyse d'un court-circuit:
 - Méthode des unités normalisées

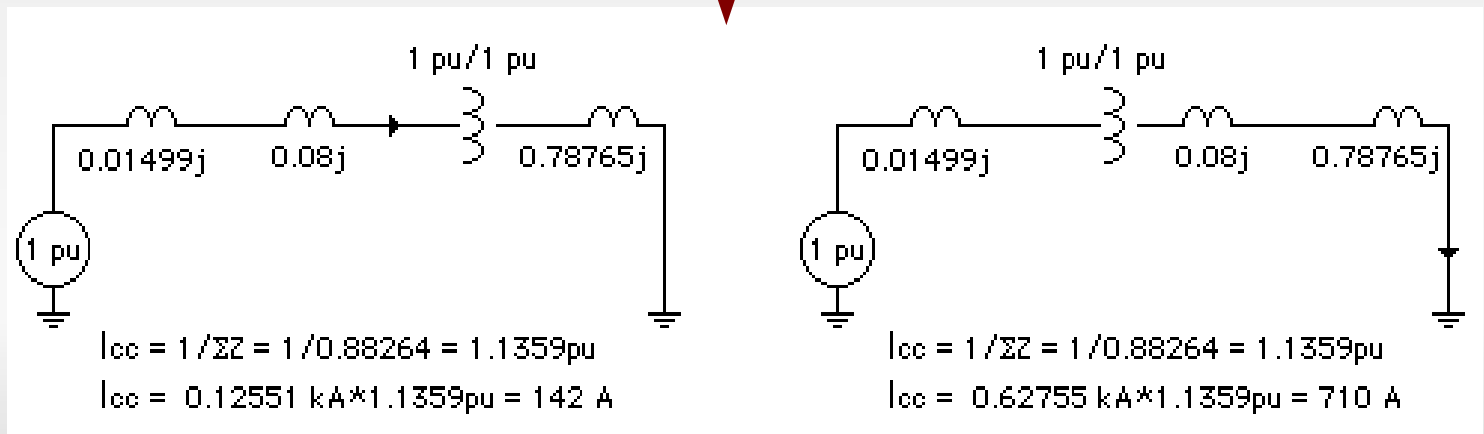
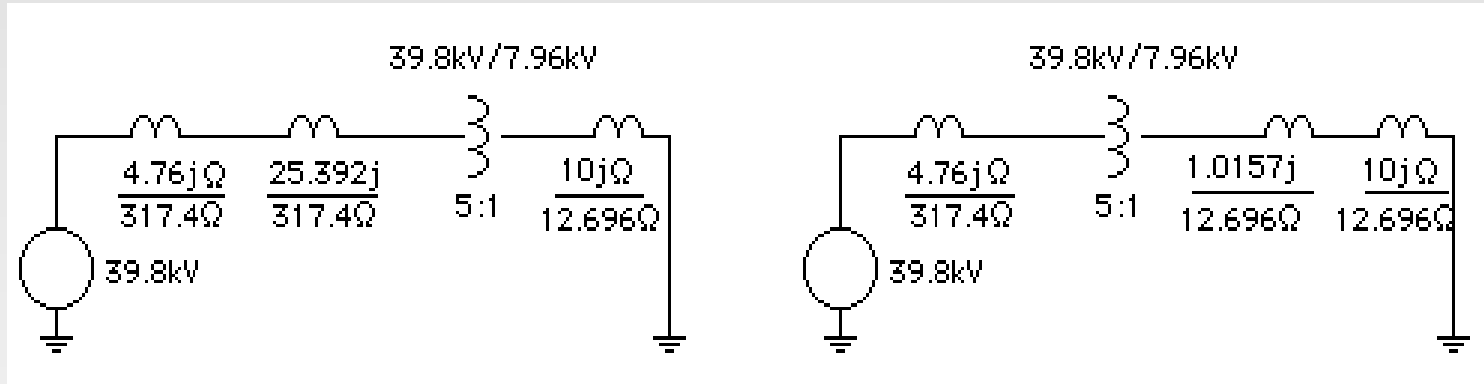


- Modèle équivalent en unités normalisées



Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Analyse d'un court-circuit:
 - Méthode des unités normalisées

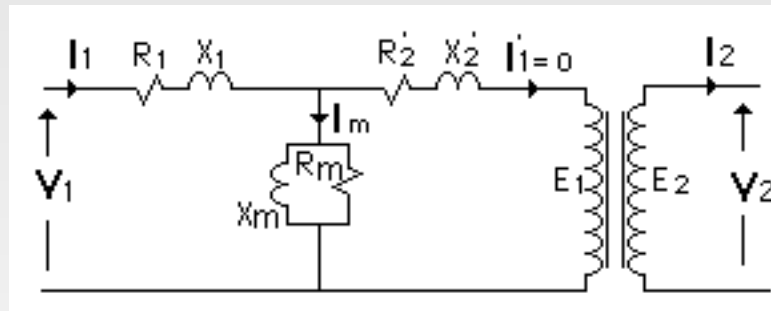


Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Représentation des transformateurs:

- Schéma équivalent

Un transformateur réel peut être représenté par le schéma suivant:

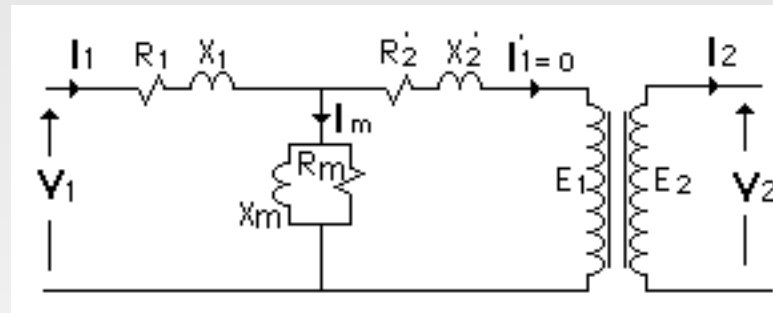


- Où :
- R_1 = la résistance réelle de l'enroulement primaire;
- X_1 = la réactance de fuite de l'enroulement primaire;
- R_m = une résistance symbolique (non physique) qui représente les pertes de fer;
- X_m = la réactance mutuelle entre les deux enroulements (flux magnétique du noyau, non linéaire);
- R'_2 = la résistance réelle de l'enroulement secondaire ramenée au primaire;
- X'_2 = la réactance de fuite de l'enroulement secondaire ramenée au primaire.

Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Représentation des transformateurs:
 - Schéma équivalent

Un transformateur réel peut être représenté par le schéma suivant:



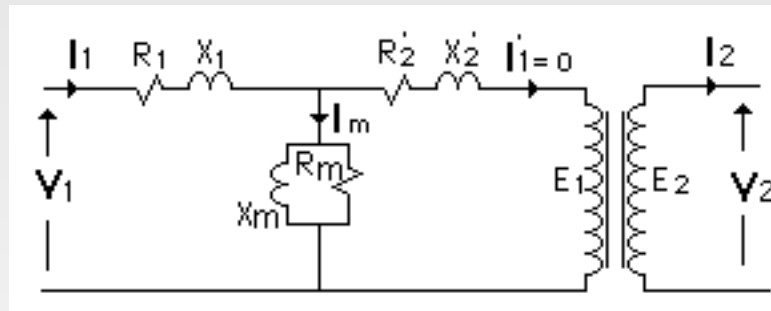
- Le transformateur parfait ne modifie en rien la structure du schéma: il y a conservation des puissances.

Méthode d'analyse des réseaux électriques

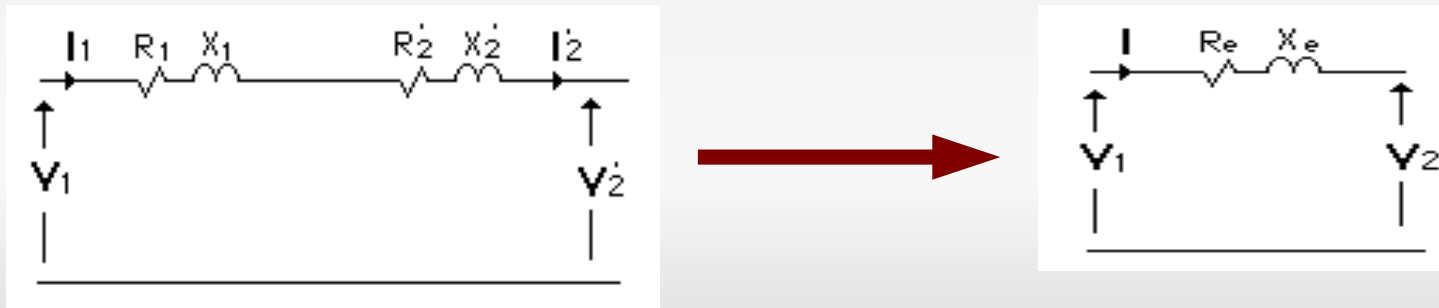
- Représentation des transformateurs:

- Schéma équivalent

- Si l'on utilise les unités normalisées, le transformateur aura un rapport de transformation égale à 1 (1pu/1pu) et le schéma devient:



- L'approximation de Kapp permet encore de simplifier le schéma:



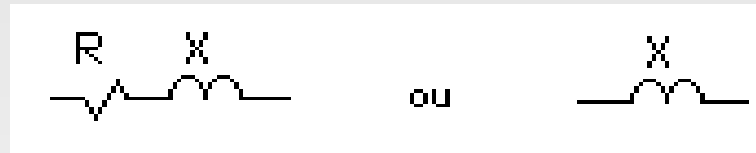
Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Représentation des transformateurs:
 - Schéma équivalent
 - Les réseaux contiennent beaucoup de transformateurs dont les rendements sont très bons (plus de 98%) et si l'on s'intéresse au profil de tension ou au courant de court-circuit, l'impédance série sera le facteur dominant.
 - Comme les chutes de tension sont surtout le fruit des réactances de fuite et que la réactance est ordinairement plus importante que la résistance, on peut représenter les transformateurs par une réactance seulement, tout en restant conscient de l'approximation.
 - Bien sûr, si l'on possède les caractéristiques complètes, et que les moyens de calcul sont disponibles, on utilisera une impédance complexe pour représenter un transformateur.

Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Représentation des transformateurs:
 - Schéma équivalent

En monophasé, un transformateur réel sera représenté par le schéma suivant:



avec une indication du rapport X/R .

Méthode d'analyse des réseaux électriques

■ Représentation des transformateurs:

■ Exemple

Un transformateur monophasé de 100kVA 11,000/2,200 volts, lorsqu'en circuit ouvert sous tension nominale, consomme 1.2kW pour ses pertes de fer et 5kVAR pour sa magnétisation. Les données suivantes sont disponibles:

- Haute tension : $R = 6\Omega$ - $X = 16\Omega$
- Basse tension : $R = 0.24\Omega$ - $X = 0.64\Omega$
- Exprimer les résistances et les réactances séries en pu .
- $S_{Base} = 100 \text{ kVA}$
- $V_{Base} = 11000 \text{ V}$ et 2200 V
- $I_{Base} = 9.0909 \text{ A}$ et 45.4545 A
- $Z_{Base} = 1210 \Omega$ et 48.4Ω
- Haute tension : $R = 0.004958 \text{ pu}$ $X = 0.013223 \text{ pu}$
- Basse tension : $R = 0.004958 \text{ pu}$ $X = 0.013223 \text{ pu}$
- Le modèle sera donc: $Z \text{ pu} = 0.009917 + j0.026446$ ou encore 0.02824 avec $X/R = 2.667$

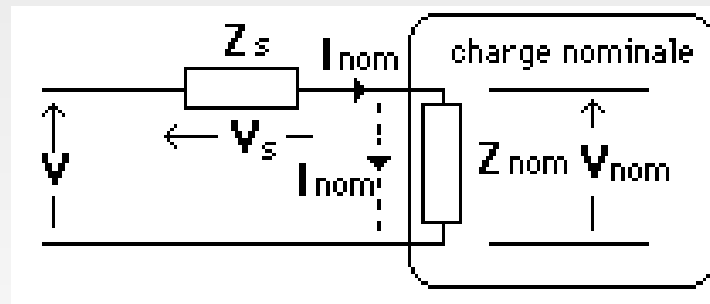
Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Représentation des transformateurs:

- L'impédance d'un transformateur en %.

Si l'on représente un transformateur de puissance par une impédance série seulement, on exprime souvent cette impédance en %.

- Soit un transformateur de puissance qui fournit sa puissance apparente nominale à une charge et dont le modèle à produire est une impédance série.



-
-

Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Représentation des transformateurs:

- L'impédance d'un transformateur en %.

Si l'on place un court-circuit franc à la sortie d'un transformateur et que l'on ajuste la tension à l'entrée V_{cc} (court-circuit) de telle sorte que le courant nominal circule dans les enroulements, le rapport entre cette tension et la tension nominale donne le rapport des modules des impédances en %.

- En court-circuit, $V_{cc} = V_s$ à I_{nom}

$$Z\% = \frac{Z_s}{Z_{nom}} \times 100 = \frac{V_s}{V_{nom}} \times 100 = \frac{V_{cc}}{V_{nom}} \times 100$$

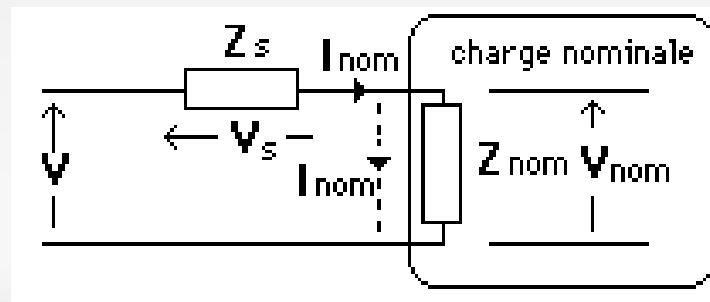
Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Représentation des transformateurs:
 - L'impédance d'un transformateur en pu.

Si l'on représente un transformateur de puissance par une impédance série seulement, on peut aussi représenter cette impédance en pu avec un rapport X/R.

Avec: $\% = pu \cdot 100$.

- Soit un transformateur de puissance qui fournit sa puissance apparente nominale à une charge et dont le modèle à produire est une impédance série.



Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Représentation des transformateurs:
 - L'impédance d'un transformateur en pu.

On a:

$$Z_{pu} = \frac{Z_s}{Z_{nom}} = \frac{V_s}{V_{nom}} = \frac{V_s \times I_{nom}}{V_{nom} \times I_{nom}} = \frac{S_s}{S_{nom}}$$

Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Représentation des transformateurs:
 - L'impédance d'un transformateur en pu.

On a:

$$Z_{pu} = \frac{Z_s}{Z_{nom}} = \frac{V_s}{V_{nom}} = \frac{V_s \times I_{nom}}{V_{nom} \times I_{nom}} = \frac{S_s}{S_{nom}}$$

- L'impédance d'un transformateur en Ω .

$$Z_s = Z_{pu} \times \frac{U^2}{S_n} = Z_{pu} \times \frac{S_{Base}}{S_{nom}}$$

Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Impédance des machines tournantes:
 - L'impédance en Ω .

On a:

$$Z_m = \frac{X}{100} \times \frac{U^2}{S_n} = Z_{pu} \times \frac{S_{Base}}{S_{nom}}$$

Connaissant le rapport X/R, on peut déterminer facilement R et X.

Méthode d'analyse des réseaux électriques

- Impédance du réseau amont de puissance S_{cc} :
 - L'impédance en Ω .

On a:

$$Z_a = \frac{U^2}{S_{cc}}$$

Sachant que pour une source quelconque x, on a:

$$Z_x = \frac{X}{100} \times \frac{U^2}{S_x} \quad \longrightarrow \quad U^2 = S_x \times Z_x \times \frac{100}{X}$$

On peut écrire:

$$Z_a = \frac{S_x}{S_{cc}} \times \frac{Z_x}{Z_{xpu}}$$

En prenant cette source comme base, on aura:

$$Z_x = Z_{xpu} = \frac{X}{100} \quad \longrightarrow \quad Z_a = \frac{S_{Base}}{S_{cc}}$$