

## MODELISATION DE BASE ET SYSTEME PER-UNIT

### 1 Modélisation des composants du réseau

La modélisation et les calculs qui vont suivre concernent essentiellement le réseau de transport mais les méthodes décrites sont indépendantes du niveau de tension. Sur un tel réseau, on distingue essentiellement les types d'éléments fondamentaux suivants : moyens de production, lignes, transformateurs de puissance, charges, et moyens de réglage de puissance réactive.

Notons que les charges ne sont qu'exceptionnellement des clients directement raccordés en THT. Elles représentent plus généralement un point de connexion au réseau de distribution (typiquement 63 kV) via un transformateur. Notons également que les moyens de réglage de la puissance réactive (capacités, réactance, compensateurs statiques de puissance réactive) peuvent être assimilés à des charges ou à des moyens de production ne consommant ou ne fournissant que de la puissance réactive.

D'une manière générale, modéliser un réseau d'énergie, c'est avant tout faire un certain nombre d'hypothèses simplificatrices qui conditionneront à la fois la complexité et le domaine de validité du modèle. Les principales hypothèses retenues, dans le cadre des différentes études de base, sont les suivantes : seul le comportement en régime permanent à 50 Hz est étudié ; le réseau est supposé linéaire. Un choix important doit alors être fait : le calcul des transits de puissance se limite-t-il à un fonctionnement totalement équilibré du réseau ; L'étude du réseau peut être menée à partir d'un schéma monophasé équivalent. Cette approche est bien souvent suffisante dans le cadre de l'exploitation d'un réseau d'énergie. Elle permet déjà de prédéterminer, pour un plan de production et un niveau de charge donnés, quelle sera la charge de chacune des lignes du réseau en fonctionnement normal, et aussi quel sera le plan de tension du réseau.

#### 1.1 Générateurs

Le générateur (groupe turbo-alternateur) est considéré comme le cœur du réseau électrique, il assure la production de l'énergie électrique demandée par le consommateur. Dans ce cas d'étude, le générateur est modélisé par une source de tension constante qui injecte, au niveau du nœud auquel il est connecté, une puissance active  $P_G$  et une puissance réactive  $Q_G$ . L'alternateur possède deux boucles de régulation automatique, une pour le réglage automatique de la puissance (AGC : Automatic Generation Control) et l'autre pour le réglage automatique de la tension (AVR : Automatic Voltage Regulator).

La production de l'énergie active dans un générateur est limitée suivant l'équation :

$$P_{Gmin} \leq P_G \leq P_{Gmax} \quad (1)$$

La production de l'énergie réactive est limitée suivant l'équation :

$$Q_{Gmin} \leq Q_G \leq Q_{Gmax} \tag{2}$$

Cette limitation est due principalement à la limite thermique des bobinages statorique et rotorique ainsi que la limitation de l'angle rotorique permis ( $\delta \leq 30^\circ$ ).

### 1.2 Charges

Les charges sont les dispositifs classiques de consommation. La modélisation de la charge joue un rôle très important dans l'étude et l'analyse de la sécurité des réseaux. Dans la littérature, il existe deux types de modélisation des charges électriques à savoir, la modélisation statique et celle dynamique. La modélisation dynamique est relativement compliquée ; la puissance consommée par la charge est une fonction de la tension et du temps ; Elle est utilisée généralement pour l'étude et l'analyse de la stabilité transitoire. La modélisation statique est mieux adaptée aux programmes d'écoulement de puissance. Dans ce cas, la charge est représentée par une puissance active ainsi qu'une puissance réactive,  $P_L$  et  $Q_L$ , constantes. La puissance réactive peut être fournie ou consommée, selon la nature de la charge capacitive ou inductive.

### 1.3 Eléments shunts

Les shunts sont des éléments réactifs qui peuvent absorber la puissance réactive du système, mais peuvent également alimenter le système en puissance réactive. La puissance réactive  $Q_{sh}$  injectée par l'élément shunt est déterminée par l'admittance shunt  $B_{sh}$  et la tension en ce nœud.

Les modèles des éléments précédents sont représentés par la Fig. 1 ci-dessous.

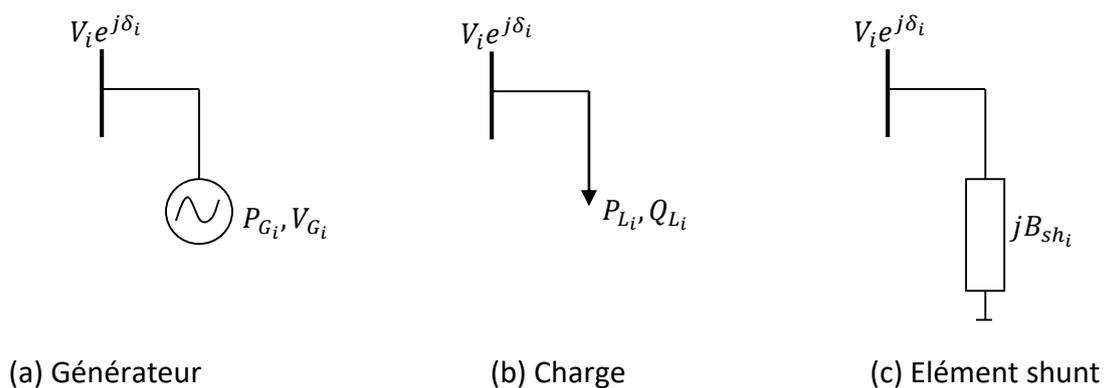


Fig. 1 : Eléments pouvant être reliés à un nœud donné

### 1.4 Lignes

Une ligne de transport reliant deux nœuds  $i$  et  $k$  est représentée par son modèle classique en  $\pi$  (Fig. 2). L'impédance série de la ligne se compose de la résistance  $R$  et de la réactance inductive  $X$ . Négligeant la conductance shunt, l'admittance shunt correspond à la capacitance shunt  $B$ .

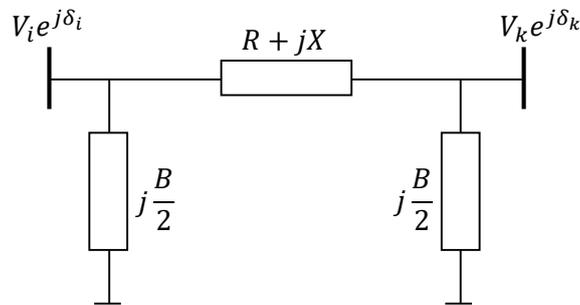


Fig. 2 : Modèle en  $\pi$  d'une ligne électrique

Il est important de garder à l'esprit qu'un schéma en  $\pi$  peut être un modèle très précis du comportement d'une ligne aérienne en régime permanent (50 Hz) équilibré, tout en étant un modèle très mauvais pour étudier le comportement de cette même ligne dans d'autres conditions de fonctionnement, par exemple en régime transitoire hautes fréquences. En effet, un tel modèle ne peut pas, par nature, représenter les phénomènes de propagation le long de la ligne, tels que ceux apparaissant par exemple lors de la mise sous tension de la ligne ou lors d'un choc de foudre. Il n'y a pas de bon ou de mauvais modèle dans l'absolu ; il n'existe que des modèles adaptés, ou pas, à l'étude d'un phénomène donné. Le modèle en  $\pi$  est bien adapté au calcul de répartition des puissances dans un réseau de transport d'énergie.

### 1.5 Transformateurs

Le transformateur de puissance est un élément fondamental des systèmes électriques, permettant d'acheminer l'énergie, de manière économique avec un rendement élevé et de faible chute de tension. La puissance étant proportionnelle au produit du courant et de la tension, alors pour une puissance donnée, il est possible de maintenir un niveau de courant suffisamment bas, grâce à des niveaux de tension élevés obtenus à l'aide des transformateurs de puissance. Ceci permet, ainsi, de réduire les pertes par effet joule et les chutes de tension.

Actuellement, les transformateurs de puissance ont un rendement avoisinant les 100% et un niveau de puissance supérieur à 1300MVA.

### 1.5.1 Le transformateur idéal

Pour un transformateur idéal, il est supposé que :

- Les enroulements ont une résistance nulle (donc sans pertes joule  $RI^2 = 0$ )
- La perméabilité magnétique  $\mu_c$  du noyau ferromagnétique est infinie ce qui correspond à une réluctance nulle (circuit magnétique sans pertes)
- Il n'y a pas de flux de fuite; ce qui signifie que le flux  $\phi_c$  est entièrement confiné à l'intérieur du circuit magnétique et encercle les deux enroulements.

Une représentation schématique de ce transformateur est donnée par la Fig. 3 ci-dessous.

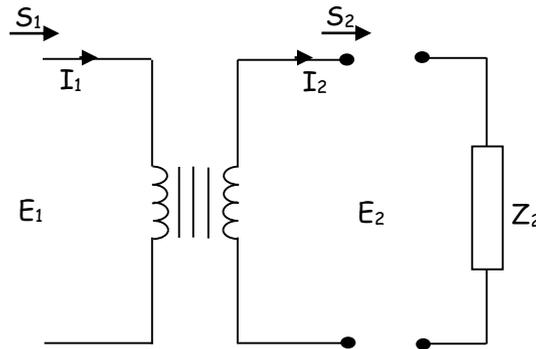


Fig. 3 : Représentation d'un transformateur idéal

Le rapport de transformation est défini comme étant :

$$a_t = \frac{N_1}{N_2} \tag{3}$$

Nous avons alors les relations entre tensions et courants des deux côtés du transformateur :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a_t \rightarrow E_1 = a_t E_2 \tag{4}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a_t} \rightarrow I_1 = \frac{I_2}{a_t} \tag{5}$$

La puissance apparente entrante dans l'enroulement 1 est :

$$S_1 = E_1 I_1^* = (a_t E_2) \left( \frac{I_2}{a_t} \right)^* = E_2 I_2^* \tag{6}$$

donc égale à la puissance apparente sortante de l'enroulement 2  $S_2$ , c'est-à-dire ne présentant ni pertes actives ni pertes réactives.

Si une impédance  $Z_2$  est reliée aux bornes de l'enroulement 2 du transformateur idéal, alors:

$$Z_2 = \frac{E_2}{I_2} \tag{7}$$

Lorsqu'elle est mesurée à partir de l'enroulement 1, elle devient :

$$Z'_2 = \frac{E_1}{I_1} = \frac{a_t E_2}{I_2/a_t} = a_t^2 Z_2 = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z_2 \tag{8}$$

C'est l'impédance de l'enroulement 2 rapportée à l'enroulement 1.

### 1.5.2 Le transformateur déphaseur

Celui-ci n'est pas une réalisation d'un transformateur réel puisqu'il est impossible matériellement d'obtenir un rapport de transformation complexe. Néanmoins, il sera utilisé comme un modèle mathématique permettant de représenter le déphasage dans les transformateurs triphasés.

Pour ce transfo, le rapport de transformation complexe est défini comme suit :

$$a_t = 1e^{j\varphi} \quad (9)$$

avec  $\varphi$  l'angle de déphasage

$$E_1 = a_t E_2 = e^{j\varphi} E_2 \quad (10)$$

$$I_1 = \frac{I_2}{a_t^*} = e^{j\varphi} I_2 \quad (11)$$

Nous constatons que  $E_1$  est en avance sur  $E_2$  d'un angle  $\varphi$  et de même  $I_1$  est en avance sur  $I_2$  d'un angle  $\varphi$  mais les amplitudes restent inchangées.

Il en découle que :

$$S_1 = E_1 I_1^* = (a_t E_2) \left( \frac{I_2}{a_t^*} \right)^* = E_2 I_2^* = S_2 \quad (12)$$

### 1.5.3 Le transformateur réel

Pour le transformateur réel, on tient compte des pertes actives par effet joule dans l'enroulement 1 représentées par une résistance  $R_1$ . Une réactance  $X_1$  dite réactance de fuite est en série avec celle-ci pour tenir compte du flux de fuite. Le flux de fuite est une portion du flux total qui encercle l'enroulement 1 sans encercler l'enroulement 2. Il occasionne une chute de tension  $jX_1 I_1$  proportionnelle au courant  $I_1$  mais déphasée de  $90^\circ$ . La réactance  $X_1$  engendre des pertes réactives  $X_1 I_1^2$ .

Il en de même pour l'enroulement 2.

Aussi, pour une perméabilité du circuit magnétique  $\mu_c$  de grandeur finie, la force magnétomotrice totale est différente de zéro. Ce qui définit un courant de magnétisation  $I_m$  en retard de  $90^\circ$  par rapport à  $E_1$  qui peut être représenté par une susceptance shunt  $B_m$ . En réalité, il existe une branche shunt additionnelle, représentée par une résistance de conductance  $G_c$ , laquelle est parcouru par un courant  $I_c$  dit courant de fuite du noyau. Ce dernier est en phase avec  $E_1$ .

On obtient le circuit équivalent de la Fig. 4 incluant ces différents paramètres représentés du côté de l'enroulement 1.

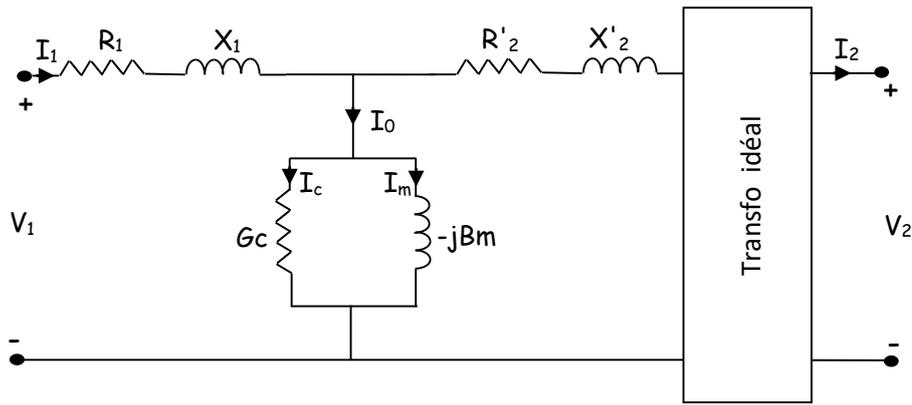


Fig. 4 : Schéma équivalent d'un transfo réel

avec :

$R_1, R_2$ : résistances des enroulements (pertes actives dans les enroulements)

$X_1, X_2$ : réactances de fuite (flux de fuite)

$B_m$ : représente le courant de magnétisation  $I_m$

$G_c$ : représente le courant de fuite du noyau

D'après ce schéma, un transformateur réel fonctionnant en régime sinusoïdal, est équivalent à un transformateur idéal auquel ont été connectées des branches externes d'admittances et d'impédances. Ces branches externes peuvent être évaluées à partir des essais en court-circuit et des essais à vide.

Si la branche shunt est omise ce qui revient à négliger le courant d'excitation, on obtient le schéma équivalent de la Fig. 5. Comme le courant d'excitation est de l'ordre de 5% du courant nominal, il est généralement admis dans l'analyse des réseaux de ne pas en tenir compte sauf dans le cas où il s'agit d'étudier le rendement du transformateur ou des phénomènes liés au courant d'excitation lui-même. Pour les transformateurs dont la puissance est supérieure à 500kVA, les résistances des enroulements étant très petites par rapport aux réactances, elles sont le plus souvent négligées.

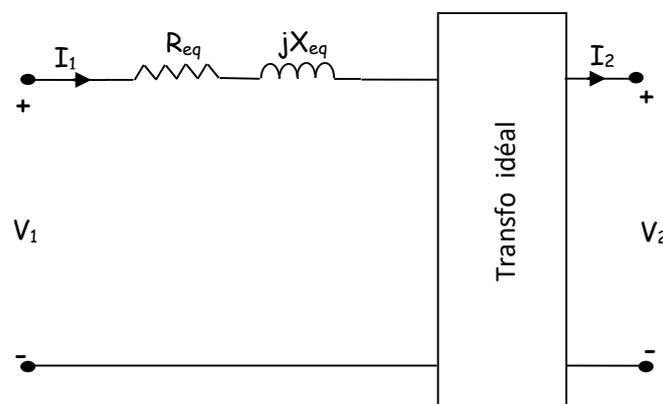


Fig. 5 : schéma équivalent si le circuit d'excitation est négligé

## 2 Système des unités relatives ou système pu

### 2.1 Définitions

Les éléments d'un réseau de puissance fonctionnent dans des niveaux de tension où le Kilovolt (kV) est l'unité qui convient le mieux pour les exprimer, tandis que le Méga voltampères (MVA) exprime la puissance apparente. Le système per-unit a été introduit pour exprimer les quantités physiques tels que courant, tension, puissance et impédances en fractions décimales ou multiples de quantités de base. Dans ce système, les différents niveaux de tension disparaissent et le réseau électrique comprenant générateurs synchrones, transformateurs et lignes est réduit à un système comprenant de simples impédances. Ainsi, une grandeur du système électrique est exprimée en unités relatives ou en pourcentage par rapport à une grandeur de base ou de référence donnée (per unit ben anglais notée pu).

$$\text{valeur en pu} = \frac{\text{valeur réelle}}{\text{valeur de base}}$$

La valeur réelle est la valeur de la grandeur que l'on cherche à convertir.

Par exemple, si une base de tension de 220kV est spécifiée alors une tension 210kV est égale à  $210/220 = 0.954 pu$  ou 95.4%.

Parmi les avantages du système, on peut citer :

- les valeurs sont plus réduites (surtout les valeurs d'impédances) donc les erreurs sont plus faciles à détecter. Aussi, toutes les grandeurs au niveau de tout accès d'un réseau électrique sont proches de l'unité pour les bases appropriées. Cela facilite l'interprétation des résultats de calcul.
- le  $\sqrt{3}$  relatif au système triphasé disparaît des calculs.
- Les schémas des transformateurs sont considérablement simplifiés (très important pour des réseaux comprenant des centaines de transformateurs).

#### Remarques :

- Il n'y a pas de conversion d'angle en pu
- La valeur de base est toujours un nombre réel

Pour pouvoir convertir toutes les grandeurs en pu, il faut se fixer de manière arbitraire deux grandeurs indépendantes de base en un point donné du système électrique, généralement,  $V_b$  et  $S_b$ . Afin que les lois électriques restent valides dans le système pu, on doit avoir :

$$P_b = Q_b = S_b \quad (13)$$

$$I_b = \frac{S_b}{V_b} \quad (14)$$

$$Z_b = R_b = X_b = \frac{V_b}{I_b} = \frac{V_b^2}{S_b} ; \quad Y_b = \frac{1}{Z_b} \quad (15)$$

En plus, les règles suivantes doivent être respectées.

**Règle 1 :**

La puissance de base est la même en tout point du réseau électrique.

**Règle 2 :**

Au niveau d'un transformateur, le rapport des tensions de base des enroulements primaire et secondaire est égal au rapport correspondant des tensions nominales de ces enroulements

$$\frac{V_{b1}}{V_{b2}} = \frac{V_{n1}}{V_{n2}} \quad (16)$$

**2.2 Changement de base**

La conversion d'impédances en pu à partir d'anciennes valeurs de base vers de nouvelles valeurs de base se fait comme suit :

$$Z_n(pu) = \frac{Z}{Z_{bn}} = \frac{Z_0(pu) \cdot Z_{b0}}{Z_{bn}} = Z_0(pu) \cdot \frac{V_{b0}^2 / S_{b0}}{V_{bn}^2 / S_{bn}} \quad (17)$$

Soit :

$$Z_n(pu) = Z_0(pu) \cdot \left(\frac{V_{b0}}{V_{bn}}\right)^2 \cdot \left(\frac{S_{bn}}{S_{b0}}\right) \quad (18)$$

Les grandeurs ayant l'indice  $n$  sont relatifs à la nouvelle base alors que l'indice 0 es relatif à l'ancienne base.

**2.3 Grandeurs triphasées**

Si  $V_b$  est la tension simple et  $U_b$  la tension composée c'est-à-dire entre lignes, alors:

$$S_{b1\phi} = \frac{S_{b3\phi}}{3} \quad V_b = \frac{U_b}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

D'où :

$$I_b = \frac{S_{b3\phi}}{\sqrt{3}U_b} = \frac{S_{b1\phi}}{V_b} \quad (20)$$

Nous avons alors :

$$Z_b = \frac{V_b}{I_b} = \frac{V_b^2}{S_{b1\phi}} = \frac{U_b^2}{3S_{b1\phi}} = \frac{U_b^2}{S_{b3\phi}} = \frac{U_b}{\sqrt{3}I_b} \quad (21)$$

et aussi:

$$S_{b3\phi} = P_{b3\phi} = Q_{b3\phi} \quad (22)$$

$$U(pu) = \frac{U}{U_b} = \frac{V}{V_b} = V(pu) \quad (23)$$

$$S_{1\phi}(pu) = \frac{S_{1\phi}}{S_{b1\phi}} = \frac{V \cdot I^*}{V_b \cdot I_b} = V(pu) \cdot I^*(pu) \quad (24)$$

$$S_{3\phi}(pu) = \frac{S_{3\phi}}{S_{b3\phi}} = \frac{3VI^*}{3V_b I_b} = V(pu).I^*(pu) = S_{1\phi}(pu) = S(pu) \quad (25)$$

Pour une charge donnée Z:

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V}{\left(\frac{S_{charge3\phi}}{3V}\right)^*} = \frac{3V^2}{S_{charge3\phi}^*} = \frac{U^2}{S_{charge3\phi}^*} \quad (26)$$

$$Z(pu) = \frac{Z}{Z_b} = \frac{\frac{U^2}{S_{charge3\phi}^*}}{\frac{U_b^2}{S_{b3\phi}}} = \frac{\left(\frac{U}{U_b}\right)^2}{\frac{S_{charge3\phi}^*}{S_{b3\phi}}} = \frac{U^2(pu)}{S_{charge3\phi}^*} = \frac{V^2(pu)}{S_{charge1\phi}^*} \quad (27)$$

Donc, les grandeurs des circuits monophasés et circuits triphasés sont identiques lorsqu'elles sont converties en pu.

## 2.4 Représentation des transformateurs dans le système pu

Les tensions et les courants d'un transfo idéal :

$$E_1(pu) = \frac{E_1}{V_{b1}} = \frac{\frac{N_1}{N_2} E_2}{\frac{N_1}{N_2} V_{b2}} = \frac{E_2}{V_{b2}} = E_2(pu) \quad (28)$$

$$I_1(pu) = \frac{I_1}{I_{b1}} = \frac{\frac{N_2}{N_1} I_2}{\frac{N_2}{N_1} I_{b2}} = \frac{I_2}{I_{b2}} = I_2(pu) \quad (29)$$

D'où le schéma équivalent du transfo idéal de la Fig. 6.

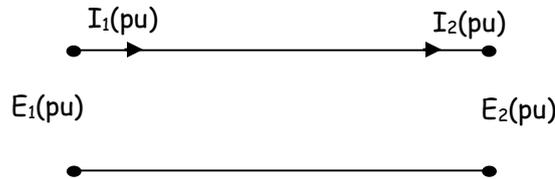


Fig. 6 : Schéma équivalent du transfo idéal en pu

Soit  $Z_2$  une impédance connectée au secondaire (enroulement 2) du transfo, alors cette impédance rapportée au primaire sera:

$$Z_2' = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_2 \quad (30)$$

$$Z_2(pu) = \frac{Z_2}{Z_{b2}} \quad \text{avec} \quad Z_{b2} = \frac{V_{b2}^2}{S_b} \quad (31)$$

$$Z_2'(pu) = \frac{\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_2}{Z_{b1}} = \frac{\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_2}{\frac{V_{b1}^2}{S_b}} = \frac{\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_2}{\left(\frac{N_1}{N_2} V_{b2}\right)^2} = \frac{Z_2}{Z_{b2}} = Z_2(pu) \quad (32)$$

Donc en pu, l'impédance du secondaire rapportée au primaire, est égale à l'impédance de l'enroulement secondaire et réciproquement.

D'où le schéma équivalent du transfo réel donné par la Fig. 7.

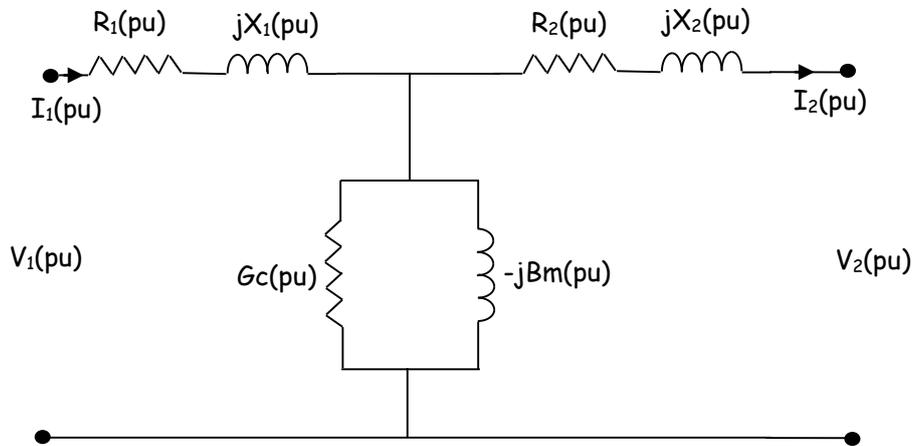


Fig. 7 : Schéma équivalent du transfo réel en pu

### 2.5 Transformateur avec régleur en charge dans le système pu

Le flux de puissance active le long d'une branche du réseau est contrôlé par la différence d'angle des tensions aux bornes alors que le flux de puissance réactive le long d'une branche du réseau est contrôlé par la différence d'amplitude des tensions aux bornes. Les puissances actives et réactives peuvent être ajustées par des transformateurs régulateurs de tension et par des transformateurs déphaseurs.

Le transformateur à changement de prise (à prise variable ou avec régleur en charge) permet un certain contrôle du réseau électrique en modifiant les amplitudes et les et angles des tensions et des courants par de petites quantités. Une représentation convenable d'un transformateur avec un rapport de transformation non nominal consiste à remplacer ce rapport par des éléments réactifs shunt fictifs de façon à contrôler la tension (augmenter ou diminuer) comme exigé.

Pour une position du régleur en charge, le transformateur est modélisé par deux éléments reliés entre eux par un nœud fictif (Fig. 8).

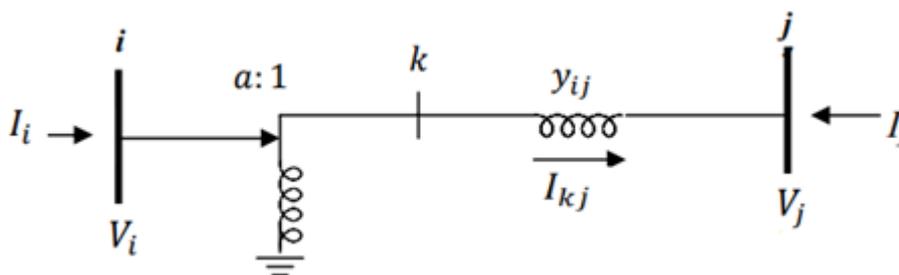


Fig. 8 : Transformateur avec régleur en charge

Equations de base du circuit :

$$\frac{V_i}{V_k} = \frac{I_{kj}}{I_i} \quad (33)$$

$$I_i = \frac{I_{kj}}{a} \quad (34)$$

$$I_{kj} = (V_k - V_j)y_{ij} \quad (35)$$

D'où :

$$I_i = \frac{I_{kj}}{a} = (V_k - V_j) \frac{y_{ij}}{a} \quad (36)$$

D'autre part, puisque  $V_k = V_i/a$ , on peut écrire:

$$I_i = (V_i - aV_j) \frac{y_{ij}}{a^2} \quad (37)$$

$$I_j = (V_j - V_k)y_{ij} = (aV_j - V_i) \frac{y_{ij}}{a} \quad (38)$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{ij}}{a^2} & -\frac{y_{ij}}{a} \\ -\frac{y_{ij}}{a} & y_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} \quad (39)$$

Un tel transformateur peut être représenté par un dipôle ou circuit équivalent en  $\pi$ , illustré par la Fig. 9 ci-dessous.

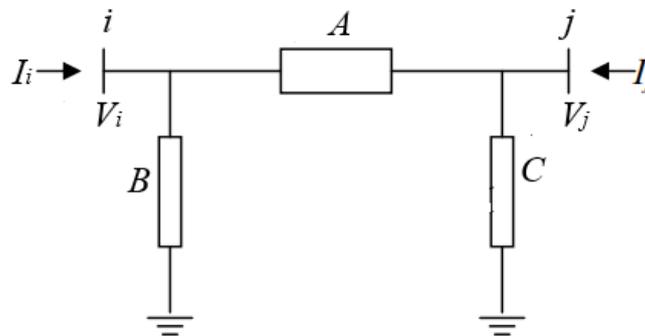


Fig. 9 : Transformateur représenté par un dipôle

Les équations de ce circuit équivalent s'écrivent :

$$\begin{aligned} I_i &= (V_i - V_j)A + V_iB \\ I_j &= (V_j - V_i)A + V_jC \end{aligned} \quad (40)$$

En identifiant les courants  $I_i$  et  $I_j$  avec les expressions précédentes, on peut tirer:

$$\begin{aligned} A &= \frac{y_{ij}}{a} \\ B &= \frac{1}{a} \left( \frac{1}{a} - 1 \right) y_{ij} \\ C &= \left( 1 - \frac{1}{a} \right) y_{ij} \end{aligned} \quad (41)$$

La Fig. 10 ci-dessous résume la modélisation d'un transformateur à prise variable :

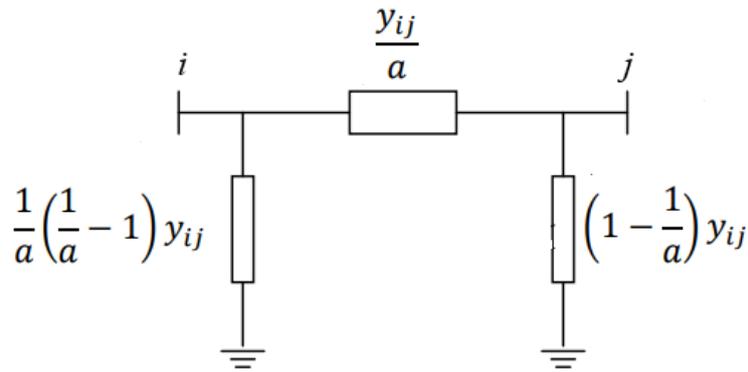


Fig. 10 : Modèle du transformateur à prise variable

## 2.6 Méthode d'analyse en pu

L'analyse de circuits utilisant les valeurs en pu peut se résumer dans les étapes suivantes :

- Choisir une base MVA triphasée commune  $S_b$ .
- Dans une partie du système, arbitraire, choisir une base de tension  $U_b$ .
- Convertir les tensions de ligne à travers les transfos conformément aux rapports de transformation des tensions de ligne figurant sur la plaque signalétique.
- Trouver les impédances de base dans les différentes sections conformément à  $Z_b = \frac{U_b^2}{S_b}$ .
- Ajuster les impédances pu des plaques signalétiques conformément aux valeurs de base et utilisant le changement de base adéquat.
- Etablir le diagramme des impédances pour tout le système et résoudre pour les quantités souhaitées.
- Convertir en valeurs réelles si nécessaire.

## 2.7 Exemple

En utilisant les valeurs de base 3kVA et 230V, donner le schéma équivalent en pu du système électrique de la Fig. 11 ci-dessous ; puis calculer le courant de charge en pu et en A.

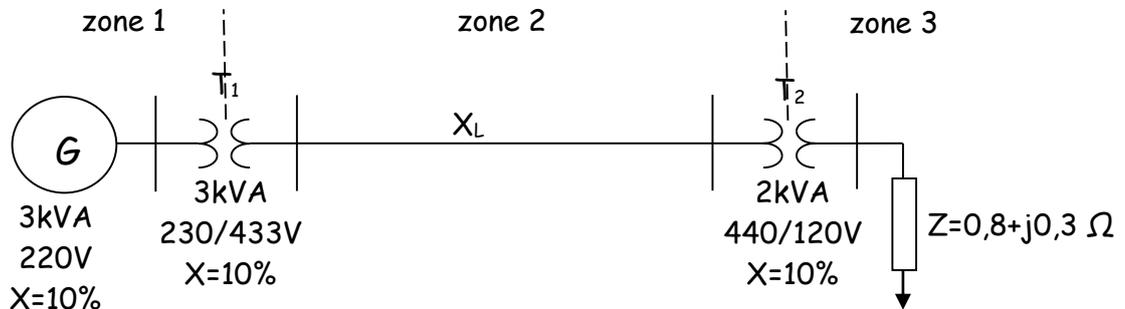


Fig. 11 : Circuit électrique basique

Pour la zone 1 :

$$S_b = 3kVA = 0,003MVA \quad V_{b1} = 230V = 0,23kV$$

$$X_G = 0,1 \times \frac{3}{3} \times \left(\frac{220}{230}\right)^2 = 0,091 pu$$

$$X_{T1} = 0,1 \times \frac{3}{3} \times \left(\frac{230}{230}\right)^2 = 0,1 pu$$

$$V_G(pu) = \frac{V_G}{V_{b1}} = \frac{220}{230} = 0,956 pu$$

Pour la zone 2 :

$$V_{b2} = \frac{433}{230} \times 230 = 433V$$

$$Z_{b2} = \frac{(V_{b2})^2}{S_b} = \frac{(0,433)^2}{0,003} = 62,5 \Omega$$

$$X_L(pu) = \frac{X_L}{Z_{b2}} = \frac{3}{62,5} = 0,048 pu$$

Pour la zone 3 :

$$V_{b3} = \frac{120}{440} \times 433 = 118,1V$$

$$Z_{b3} = \frac{(V_{b3})^2}{S_b} = \frac{(0,1181)^2}{0,003} = 4,64 \Omega$$

$$I_{b3} = \frac{S_b}{V_{b3}} = \frac{3 \cdot 10^3}{118,1} = 25,4 A$$

$$X_{T2} = 0.1 \times \frac{3}{2} \times \left( \frac{120}{118,1} \right)^2 = 0,1548 \text{ pu}$$

$$Z_{ch}(\text{pu}) = \frac{Z_{ch}}{Z_{b3}} = \frac{0,8 + j0,3}{4,64} = 0,1724 + j0,0646 \text{ pu}$$

Le schéma équivalent en pu du circuit est donné par la Fig. 12 ci-dessous.

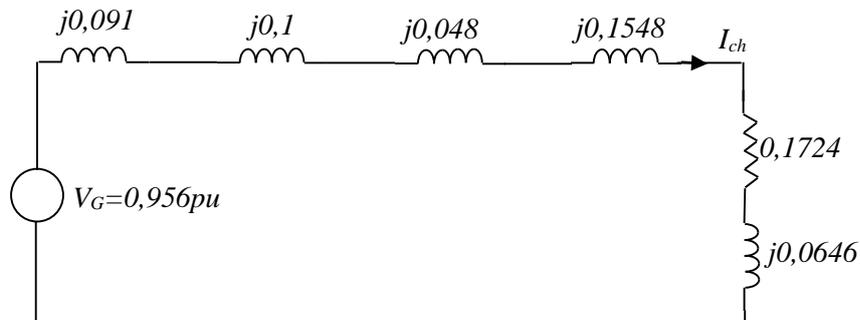


Fig. 12 : Schéma équivalent en pu

Le courant de charge est :

$$I_{ch} = \frac{V_G}{Z_T}$$

$$Z_T = j0,091 + j0,1 + j0,048 + j0,1548 + 0,1724 + j0,0646 = 0,1724 + j0,4584 \\ = 0,49/\underline{69,36^\circ} \text{ pu}$$

$$I_{ch} = \frac{0,956}{0,49/\underline{69,36^\circ}} = 1,951/\underline{-69,36^\circ} \text{ pu}$$

ou en ampères:

$$I_{ch} = (1,951/\underline{-69,36^\circ}) \times 25,4 = 49,55/\underline{-69,36^\circ} \text{ A}$$