



uOttawa

L'Université canadienne
Canada's university

Chapitre 2

Le Transformateur

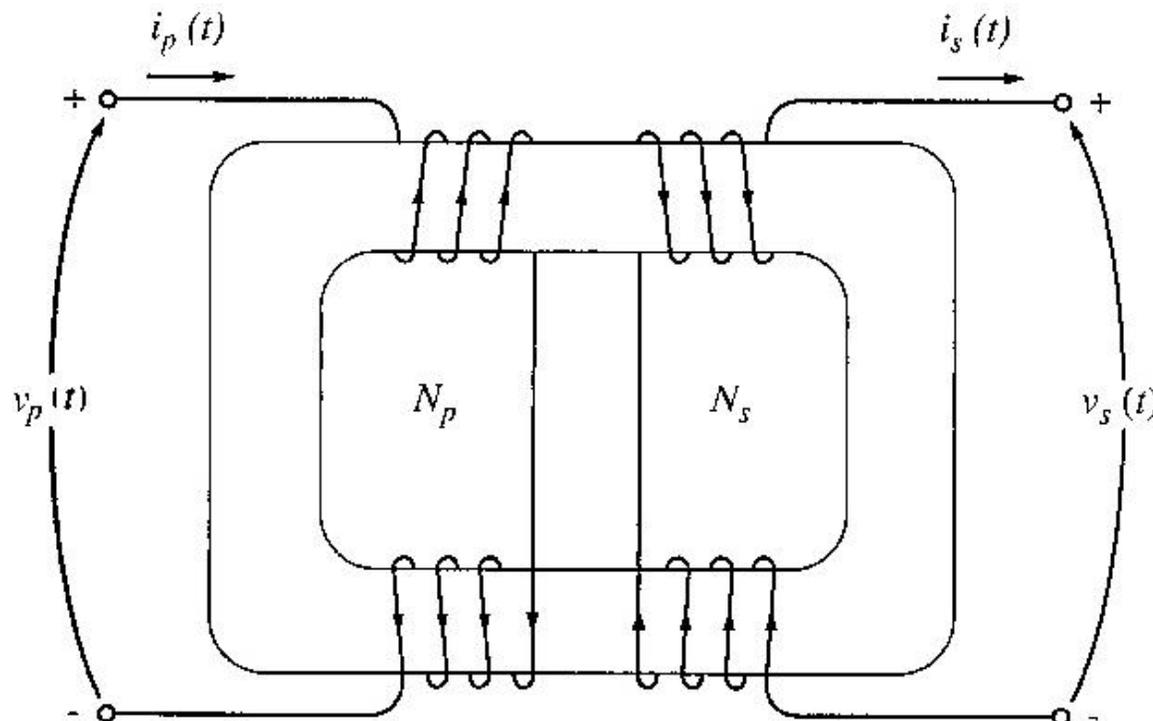


Rôle et constitution

- Le transformateur assure, avec un excellent rendement et de façon économique, un transfert d'énergie électrique par une liaison magnétique et sur de très grandes distances entre deux réseaux électriques, afin de les isoler l'un de l'autre et d'adapter les tensions qui peuvent être différentes.
- Il est constitué d'un **circuit magnétique** (CM) sur lequel sont bobinés 2 enroulements conducteurs isolés (l'un appelé **primaire**, l'autre **secondaire**).
- Cette appellation correspond à la direction du transfert d'énergie, bien que le transformateur soit réversible.
- Le circuit magnétique, feuilleté, est constitué de lamelles remplies en acier au silicium ayant une perméabilité élevée afin de réduire les pertes ferromagnétiques.

Constitution

- En général, le transformateur existe sous deux formes:



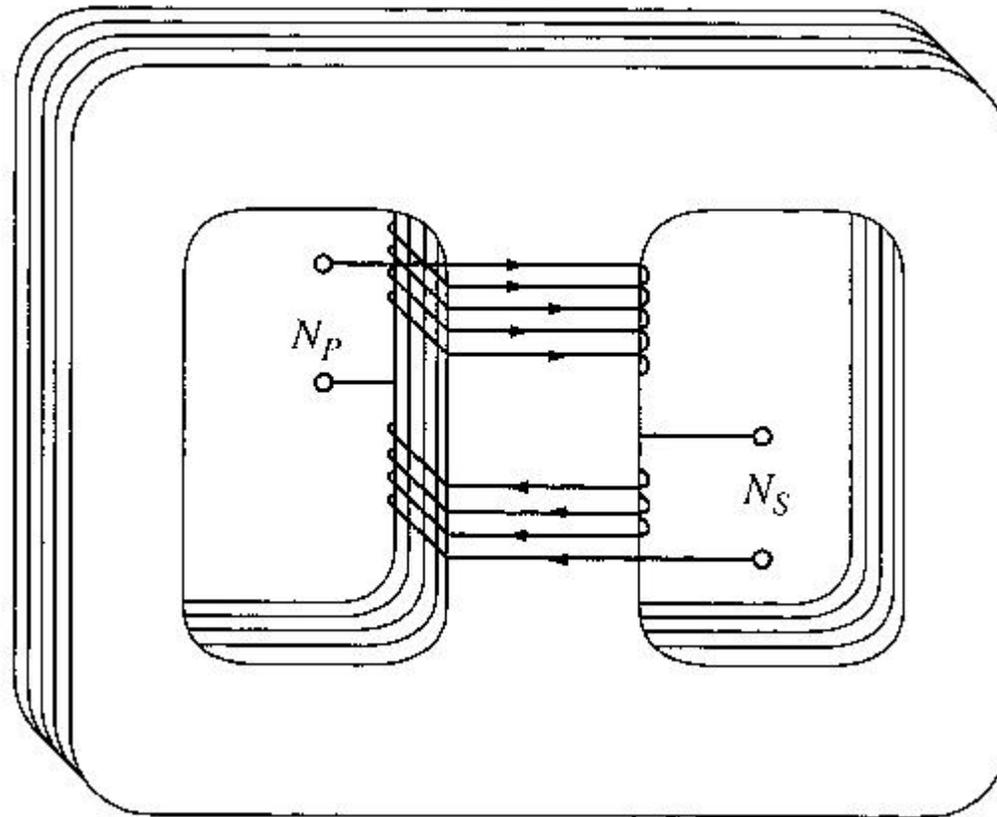
La forme noyau ou compacte



uOttawa

L'Université canadienne
Canada's university

Constitution

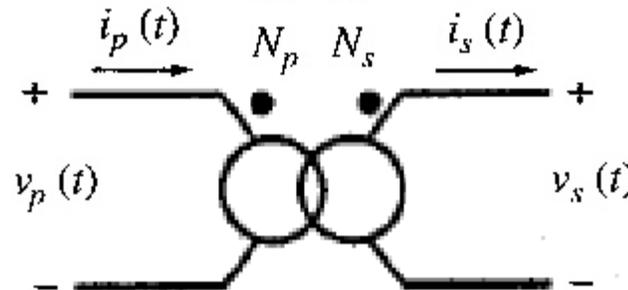
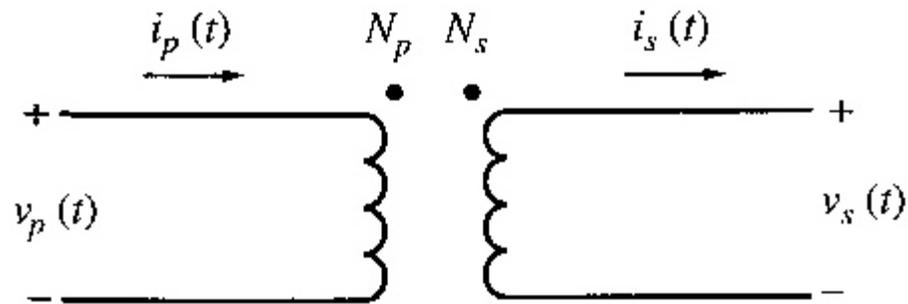
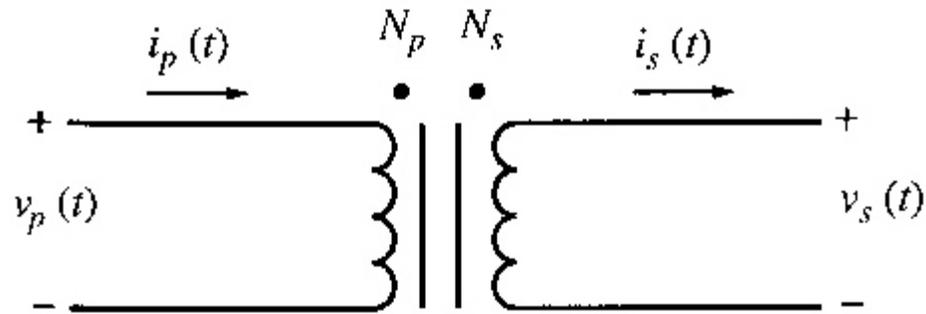


La forme enveloppée



Représentations ou symboles

- En général, le transformateur est représenté symboliquement sous les formes suivantes:





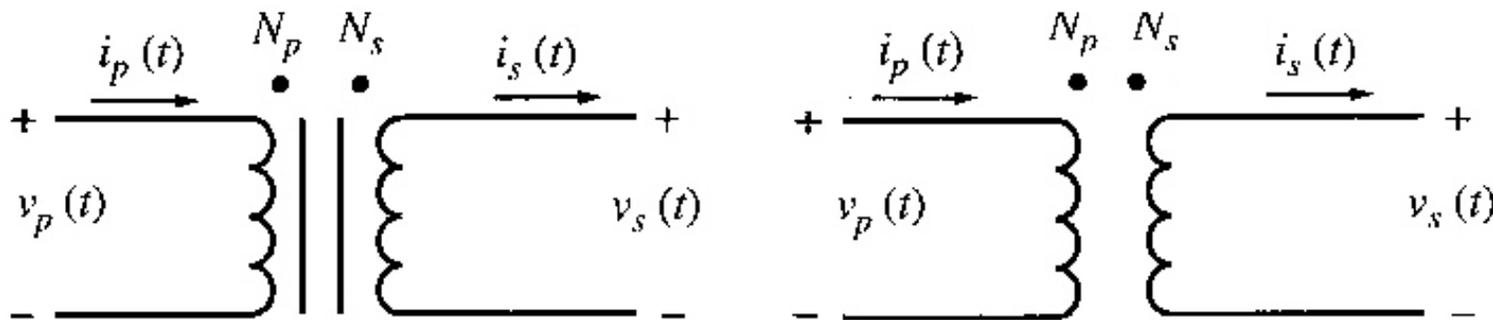
Conventions et définitions

- On rappelle que le sens du bobinage détermine le sens du champ magnétique créé et par conséquent les polarités des tensions induites.
- Le repérage du sens du bobinage est identifié par des points (.) ou bornes homologues qui correspondent à des points de même polarité instantanée.
- Par convention on définit les signes des grandeurs magnétiques et électriques de la façon suivante:
 - o Un courant positif entrant par une borne homologue crée un flux positif dans un CM.
 - o La force magnétomotrice est positive si la flèche d'orientation du courant entre par une borne homologue et négative dans le cas contraire.



Le transformateur idéal ou parfait

- C'est un transformateur qui ne subit pas de perte, c'est-à-dire que la résistance des enroulements est nulle et que le circuit magnétique est parfait, sans fuite et ayant une réluctance nulle.



- Les voltages du primaire et du secondaire sont reliés par le rapport d'enroulements, a , de la façon suivante:

$$\frac{v_p(t)}{v_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a$$



Le transformateur idéal ou parfait

- Similairement les courant du primaire et du secondaire seront donc reliés par l'expression suivante:

$$N_p i_p(t) = N_s i_s(t) \longrightarrow \frac{i_p(t)}{i_s(t)} = \frac{1}{a}$$

- On remarque que le rapport des voltages et courants sont constants et que par conséquent le transformateur ne modifie que les amplitudes des voltages ou courants et que donc les angles des phases ne sont pas affectés. C'est-à-dire que les phases du voltage primaire et secondaire sont égales, et que celles des courants primaire et secondaire le sont aussi.
- Donc si le voltage primaire est positif à sa borne, il s'en suit que le voltage secondaire le sera aussi à la sienne. Similairement, si le courant primaire se dirige vers sa borne, le courant secondaire sortira du sien.



Puissance du transformateur idéal

- La puissance fournie au transformateur par le circuit primaire est définie comme:

$$P_{in} = V_p I_p \cos \theta_p$$

- Où θ_p est l'angle entre le voltage du primaire et le courant du primaire. La puissance fournie par le circuit secondaire à la charge est:

$$P_{out} = V_s I_s \cos \theta_s$$

- Où θ_s est l'angle entre le voltage du secondaire et le courant du secondaire.
- Puisque les voltages, au primaire et au secondaire, sont en phases et que les courants le sont aussi donc: $\theta_p = \theta_s$



Puissance du transformateur idéal

- Il s'en suit que la puissance d'entrée est égale à la puissance de sortie:

$$\begin{aligned} V_S &= \frac{V_p}{a} \\ I_S &= aI_p \end{aligned} \quad \longrightarrow \quad P_{out} = \frac{V_p}{a} (aI_p) \cos \theta = V_p I_p \cos \theta = P_{in}$$

- La même observation s'applique aux puissances réactive et apparente:

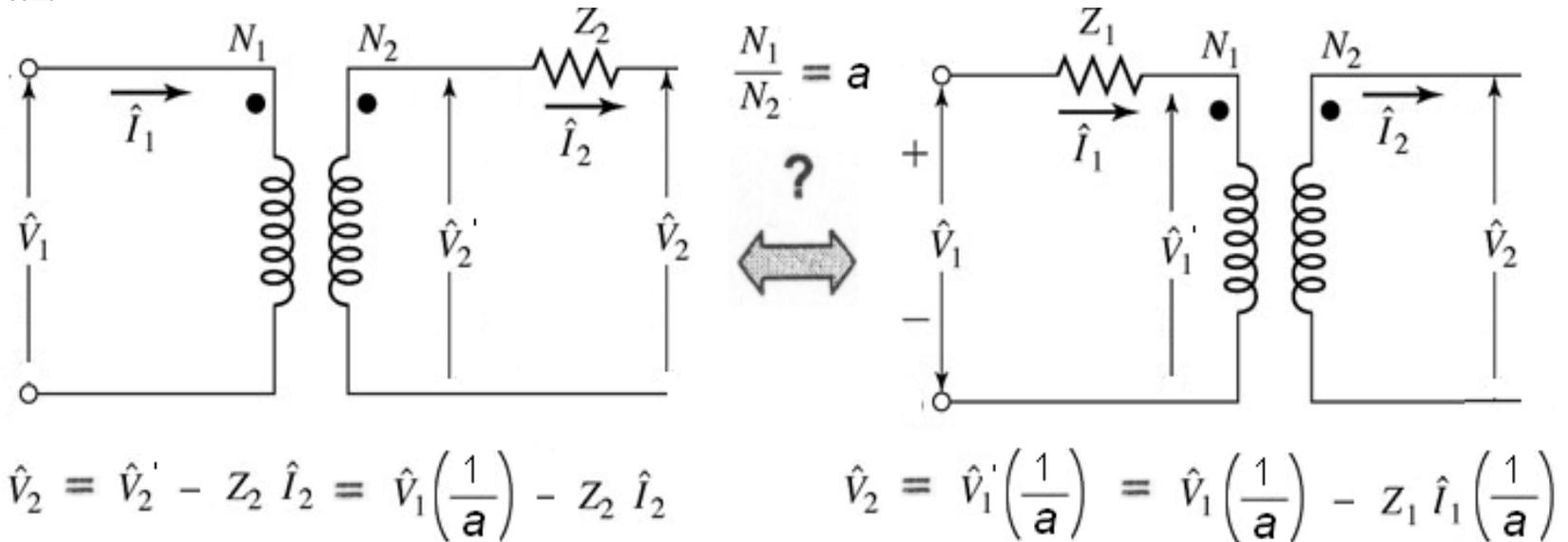
$$Q_{in} = Q_{out} \quad S_{in} = S_{out}$$

- Le transformateur ne subit donc pas de perte, il est donc idéal.



Transposition d'impédance

- Il s'agit d'établir une équivalence entre une impédance placée au primaire et une impédance placée au secondaire d'un transformateur idéal.



- Puisque $\hat{I}_1 = \hat{I}_2 \left(\frac{1}{a}\right)$ alors:

$$Z_1 = Z_2 a^2 \qquad Z_2 = \frac{Z_1}{a^2}$$

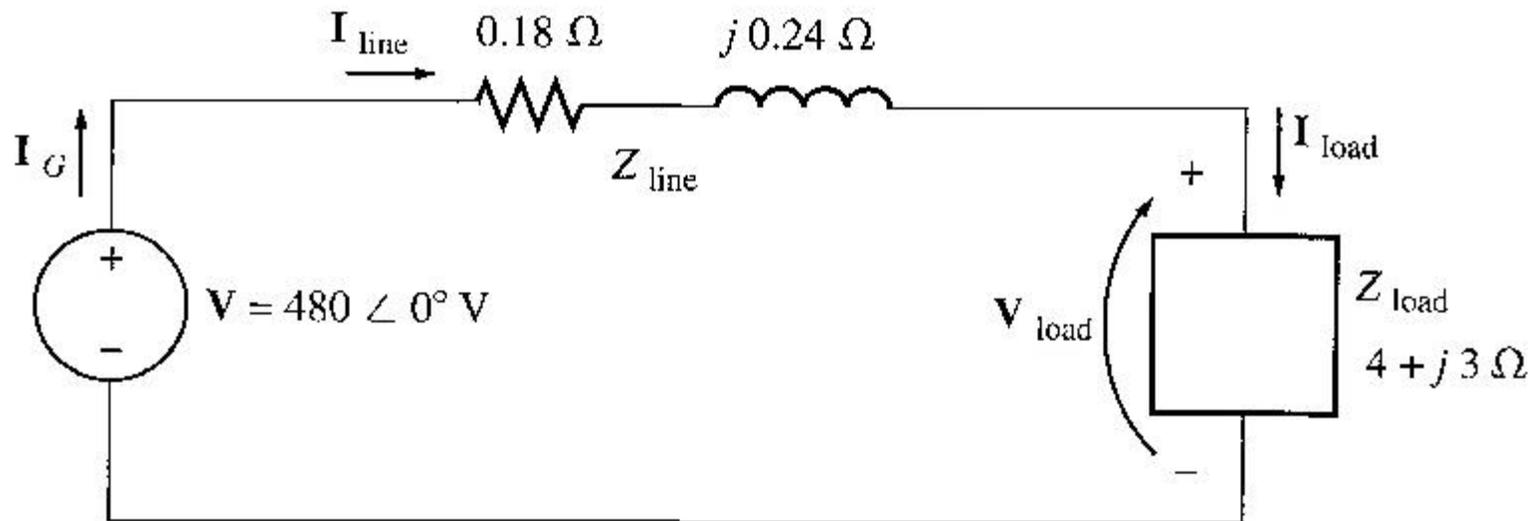


Analyse de circuits contenant des transformateurs idéaux

- La façon la plus facile d'analyser ce type de circuits est de remplacer le transformateur idéal par un circuit équivalent ayant les mêmes caractéristiques:
 - Dérivation des voltages et courants respectant le ratio des bobines.
 - Respect de la polarité des bornes primaire et secondaire.
- Traitons l'exemple suivant avec un circuit ordinaire, ne contenant pas de transformateur, puis avec un qui en contient. Dans les deux cas on nous demande de dériver le voltage de la charge ainsi que les pertes, en puissance, dues à la ligne de transmission ou plus exactement dues à sa résistance.

Analyse de circuits contenant des transformateurs idéaux

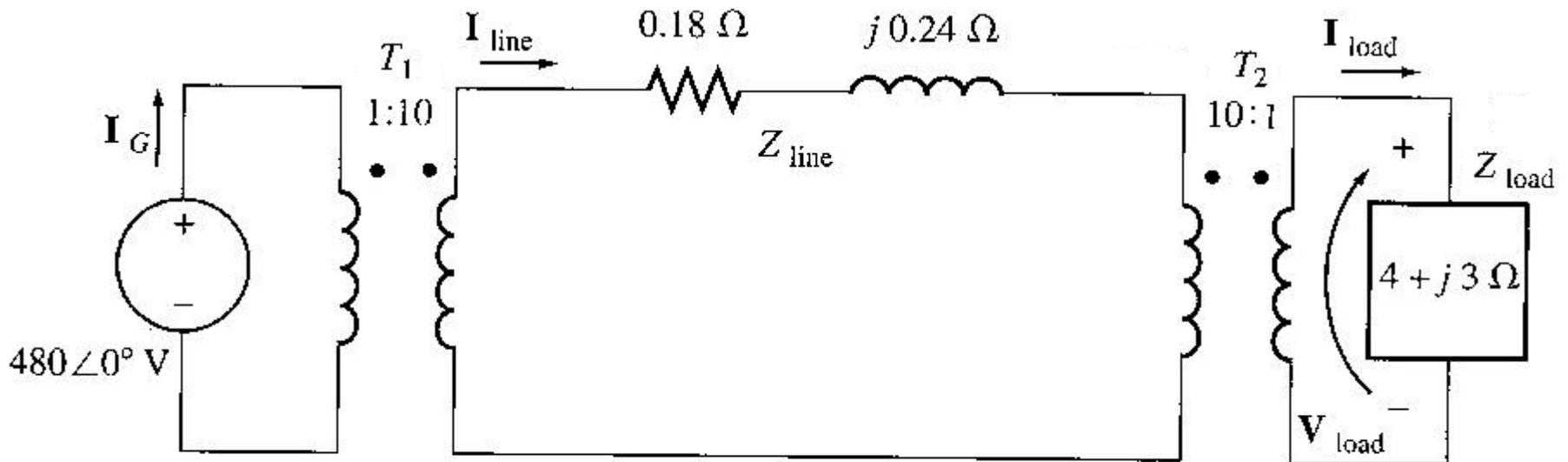
- Le traitement de l'exemple sera traité en classe.
- Circuit ne contenant pas de transformateur:



(a)

Analyse de circuits contenant des transformateurs idéaux

- Circuit contenant le transformateur idéal:



(b)



uOttawa

L'Université canadienne
Canada's university

Analyse de circuits contenant des transformateurs idéaux

- Le traitement des deux circuits a permis de mettre en évidence l'avantage d'utiliser les transformateurs:
- On constate que non seulement le voltage fourni à la charge du circuit contenant le transformateur est supérieur au circuit non contenant pas.
- Plus encore, les pertes de puissance dues à la ligne de transmission du transformateur sont largement inférieures au circuit n'ayant pas de transformateur, d'où la supériorité du transformateur dans la distribution d'énergie.



Opération du transformateur réel monophasé

- Il y a toujours des pertes durant l'opération d'un transformateur. De part ce fait, le transformateur idéal n'est qu'un concept nous permettant d'introduire les principes de fonctionnement de base. Pour compléter notre analyse, nous devons donc inclure l'effet des pertes du transformateur
- Assumons que le primaire d'un transformateur soit connecté à un voltage d'alimentation et que son secondaire soit en circuit ouvert. D'après la loi de Faraday, un flux de voltage sera généré égale à:

$$e_{ind} = \frac{d\lambda}{dt}$$

- λ représente le flux de couplage de la bobine, c'est-à-dire, la somme des flux de chaque tour de bobine:

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \phi_i$$



Opération du transformateur réel monophasé

- Il est à noter que les flux des tours de bobines ne ont pas nécessairement égaux ($\lambda \neq N\Phi$). La valeur de chacun des flux dépend entre autre de sa position.
- Par contre, on peut définir le flux moyen comme:

$$\bar{\phi} = \frac{\lambda}{N}$$

- Ce qui nous permet d'exprimer la loi de Faraday comme:

$$e_{ind} = N \frac{d\bar{\phi}}{dt}$$



Ratio des voltages primaire et secondaire

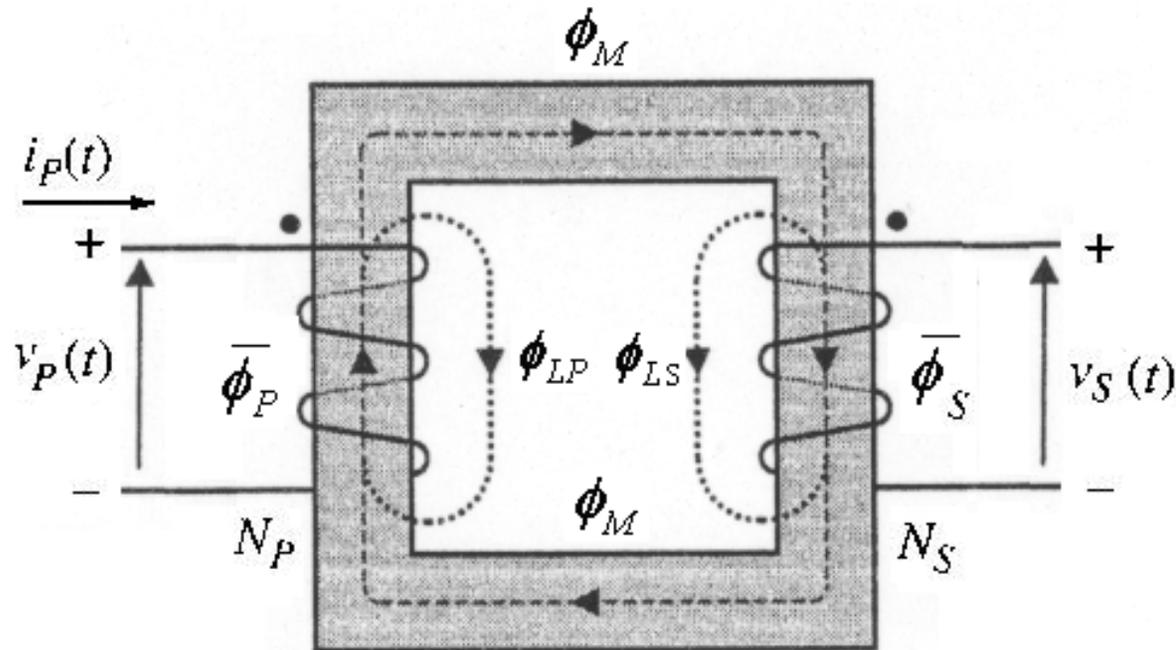
- Si on applique un voltage, au primaire, défini par l'équation précédente, on peut exprimer le flux moyen en fonction du voltage primaire comme:

$$\bar{\phi} = \frac{1}{N_P} \int v_P(t) dt$$

- Donc, le flux moyen dans les tours de bobine est proportionnel à l'intégrale du voltage primaire et la constante de proportionnalité est l'inverse du nombre de tours de bobine au primaire ($1/N_p$).
- Il est à noter que lors du passage du flux de courant du primaire vers le secondaire, une certaine quantité se dissipe dans l'air et représente les pertes ou fuites de flux.

Ratio des voltages primaire et secondaire

- Le flux atteignant le secondaire est dénommé flux mutuel.
- Le même principe se produit dans le sens contraire, du secondaire vers le primaire.



Ratio des voltages primaire et secondaire

- On en déduit que le flux primaire est égale à: $\bar{\phi}_P = \phi_M + \phi_{LP}$

- Où: $\bar{\phi}_P$ = Flux moyen total au primaire

$$\phi_M = \text{Flux mutuel}$$

$$\phi_{LP} = \text{Flux de perte du primaire}$$

- Ce qui, à partir de la loi de Faraday, nous permet d'obtenir:

$$v_P(t) = N_P \frac{d\bar{\phi}_P}{dt} = N_P \frac{d\phi_M}{dt} + N_P \frac{d\phi_{LP}}{dt}$$

- Ou: $v_P(t) = e_P(t) + e_{LP}(t)$

Ratio des voltages primaire et secondaire

- Les mêmes équations sont valides pour le voltage secondaire (on remplace l'indice P par S).
- Le flux mutuel étant le même, les voltages primaire et secondaire dus au flux mutuel sont donc égaux:

$$\frac{e_P(t)}{N_P} = \frac{d\phi_M}{dt} = \frac{e_S(t)}{N_S}$$

- Ce qui nous au même rapport de voltage du transformateur idéal:

$$\frac{e_P(t)}{e_S(t)} = \frac{N_P}{N_S} = a$$

Ratio des voltages primaire et secondaire

- Un transformateur bien construit devra avoir:

$$\phi_M \gg \begin{cases} \phi_{LS} \\ \phi_{LP} \end{cases}$$

- De façon à ce que l'on soit le plus près possible du transformateur idéal ou parfait :

$$\frac{v_P(t)}{v_S(t)} = \frac{N_P}{N_S} = a$$

- Ceci étant dit, jetons un coup d'œil aux imperfections du transformateur réel.



Courant de magnétisation du transformateur réel

- Le principe du transformateur est basé sur un courant d'excitation provenant du primaire qui, par magnétisation du fer (noyau), s'écoulera dans le secondaire par un facteur proportionnel au rapport des bobines.
- Ce courant d'excitation est défini comme le courant requis pour produire un flux dans un matériau ferromagnétique sans charge, il est constitué de deux composantes:
 - **D'un courant de magnétisation qui produit le flux dans le fer.**
 - **D'un courant de perte de fer requis pour compenser l'effet d'hystérésis (non linéaire) ainsi que les courants d'Eddy ou de Foucault.**

$$i_{ex} = i_m + i_{h+e}$$

Courant de magnétisation du transformateur réel

- Nous savons que le flux est corrélé au courant ainsi qu'à la force magnétomotrice (fmm) de la façon suivante:

$$F = Ni = \Phi R$$

- Où R est la réluctance du fer ou résistance magnétique.
- Sachant qu'un courant entrant dans une borne (primaire) produit une force positive et qu'un courant sortant d'une borne (secondaire) produit une force négative, la force nette du system est donc:

$$F_{\text{net}} = N_P i_P - N_S i_P = \Phi R$$

- On aura $F_{\text{net}} \approx 0$ aussi longtemps que le fer/noyau n'est pas dans un état saturé et donc $N_P i_P \approx N_S i_P$ ce qui mène à :

$$\frac{i_P}{i_S} = \frac{N_S}{N_P} = \frac{1}{a}$$

Majeures différences entre le transformateur idéal et réel

- Dans le cas idéal le fer n'a pas de perte d'hystérésis ni de courant d'Eddy ou de Foucault.
- La courbe de magnétisation d'un transformateur parfait est similaire à une fonction échelon et sa fmm nette est nulle.
- Le flux du transformateur idéal reste dans le fer ce qui prévient toute perte de flux.
- La résistance des bobines (câblage) est nulle.
- La modélisation d'un transformateur réel doit donc inclure tous ces paramètres qui différencient les deux types de transformateurs.



Circuit équivalent du transformateur réel

- Les pertes de cuivre: modélisée en plaçant une résistance aussi bien au primaire qu'au secondaire (R_P et R_S).

- Les pertes de flux:
$$e_{LP}(t) = N_P \frac{d\phi_{LP}}{dt} \quad e_{LS}(t) = N_S \frac{d\phi_{LS}}{dt}$$

comme le flux est directement proportionnel au courant on a donc (P = la permanence du parcours du flux):

$$\phi_{LP} = (PN_P)i_P \quad \phi_{LS} = (PN_S)i_S$$

$$e_i = N \frac{d\phi_i}{dt} \quad e_{LP}(t) = N_P \frac{d}{dt} (PN_P)i_P = N_P^2 P \frac{di_P}{dt}$$
$$e_{LS}(t) = N_S \frac{d}{dt} (PN_S)i_S = N_S^2 P \frac{di_S}{dt}$$



Circuit équivalent du transformateur réel

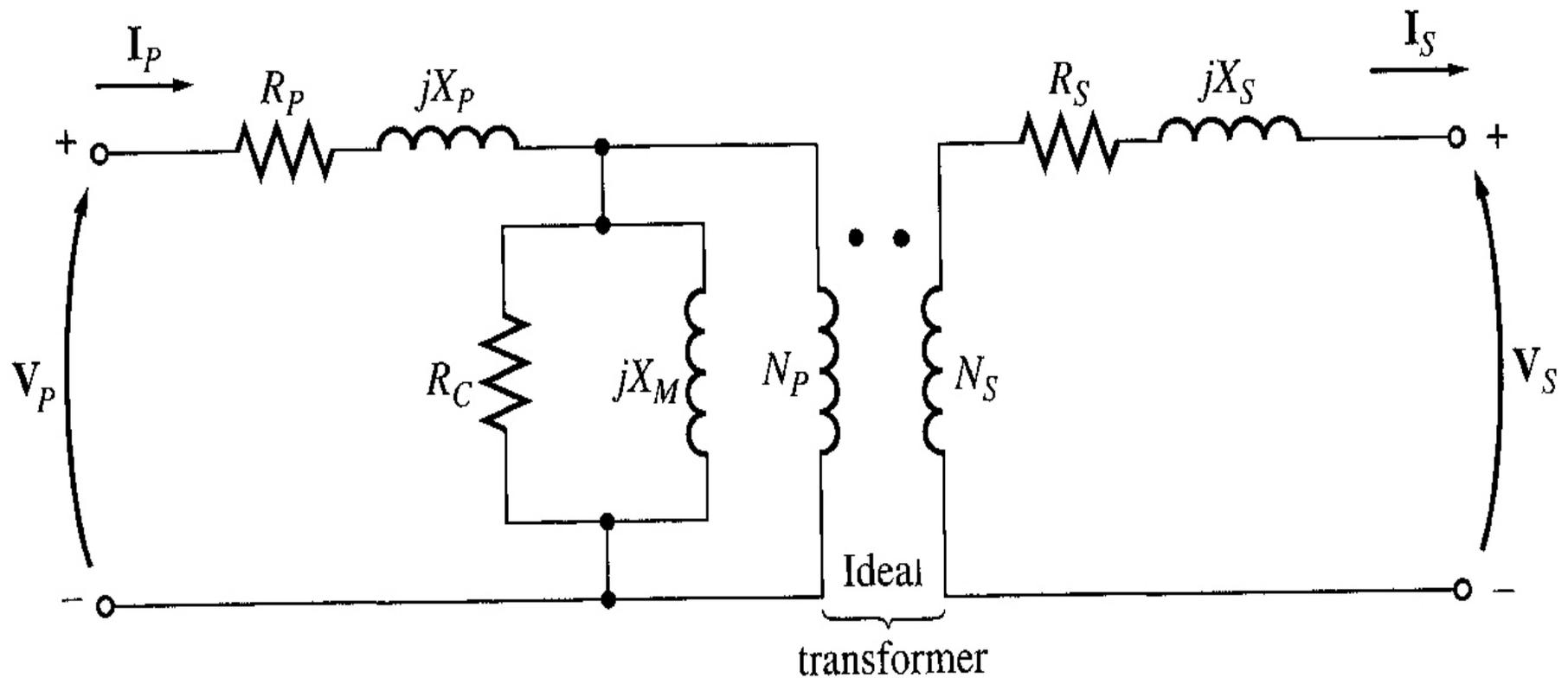
- Ce qui nous mène à: $e_{LP}(t) = L_P \frac{di_P}{dt}$ $e_{LS}(t) = L_S \frac{di_S}{dt}$

où $L_P = N_P^2 P$ est l'inductance de la bobine primaire et $L_S = N_S^2 P$ du secondaire.

- Le courant des pertes de fer i_{h+e} est proportionnel au voltage appliqué au noyau qui est en phase avec celui de la source, il est modélisé par une résistance R_C à travers le voltage appliqué au primaire.
- Le circuit équivalent résultant est illustré dans la page suivante:

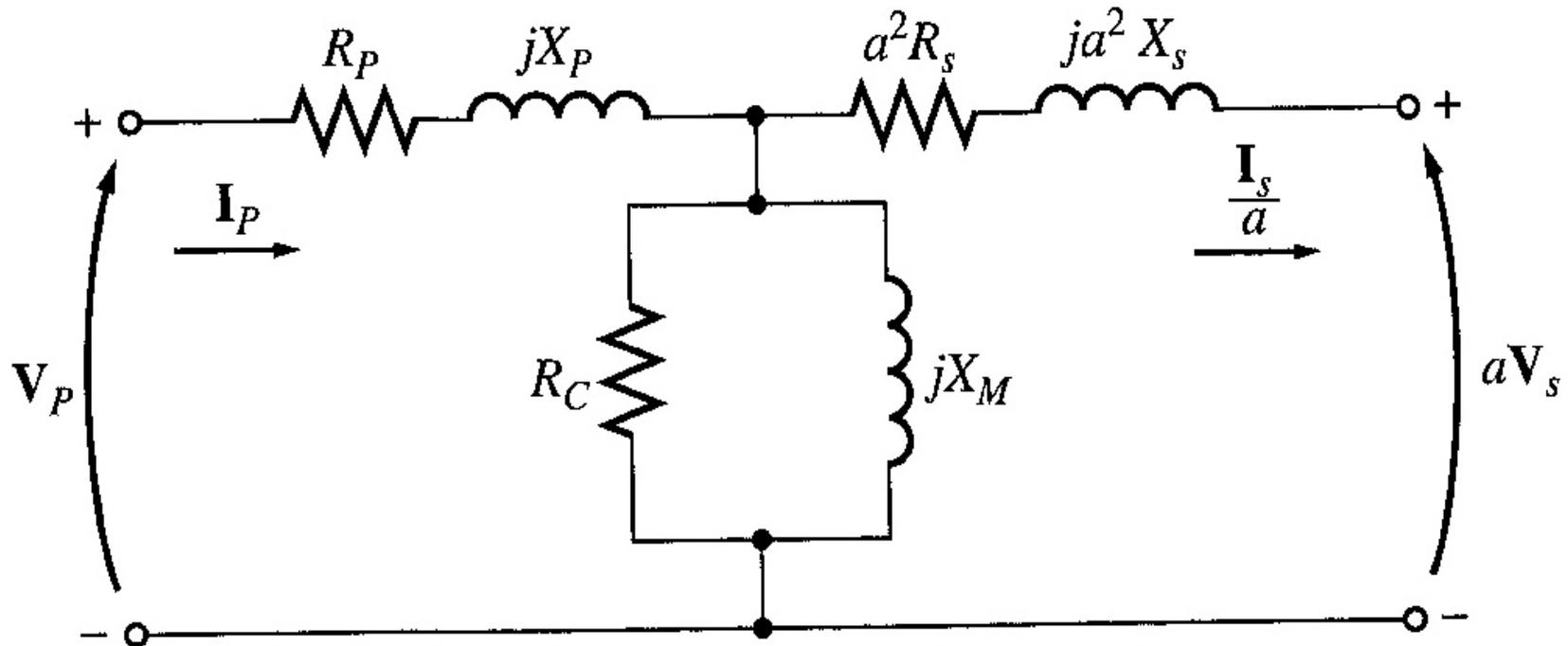


Circuit équivalent du transformateur réel



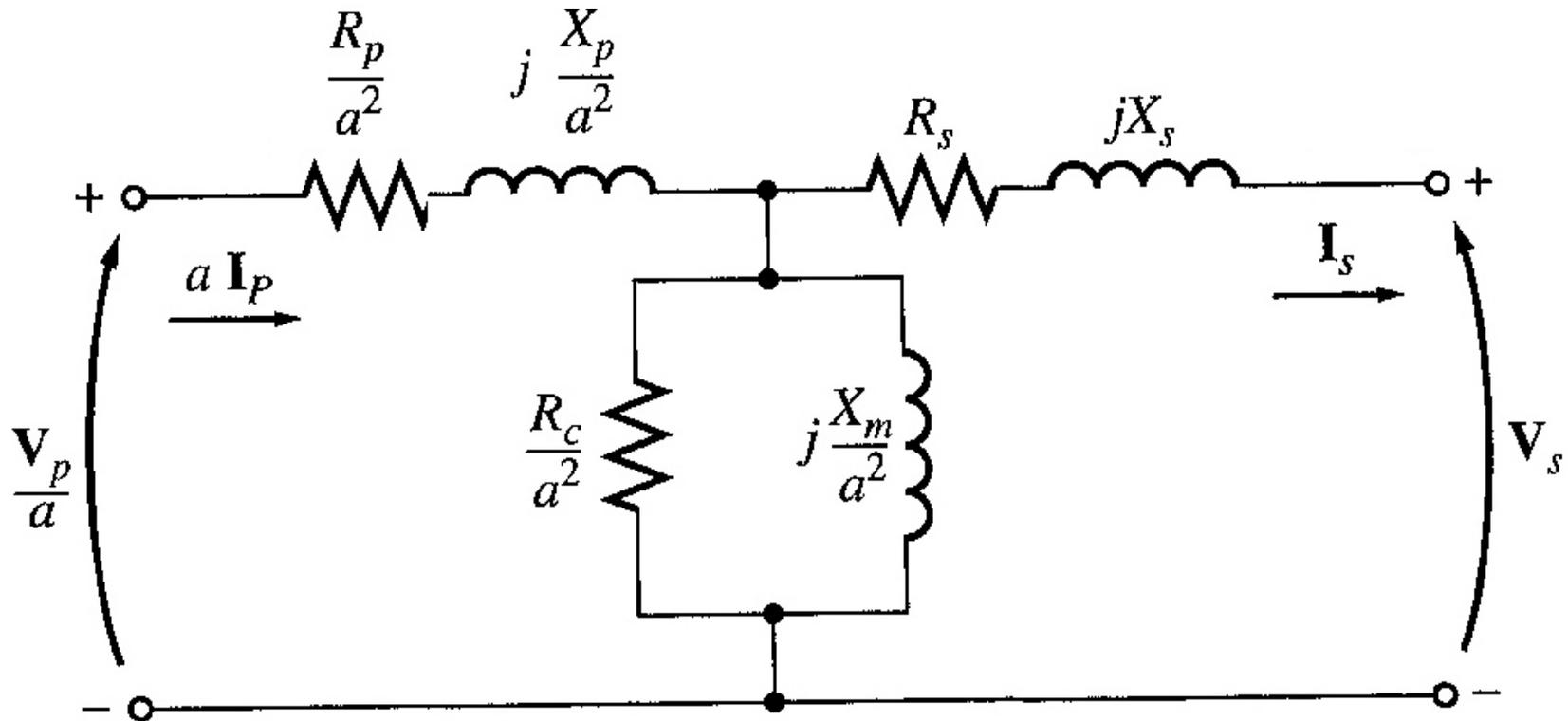
Circuit équivalent du transformateur réel

- Comme dans le cas de l'analyse du transformateur idéal, il nous est possible de dériver un circuit équivalent qui se réfère au **circuit primaire**:



Circuit équivalent du transformateur réel

- Et un circuit équivalent qui se réfère au **circuit secondaire**:



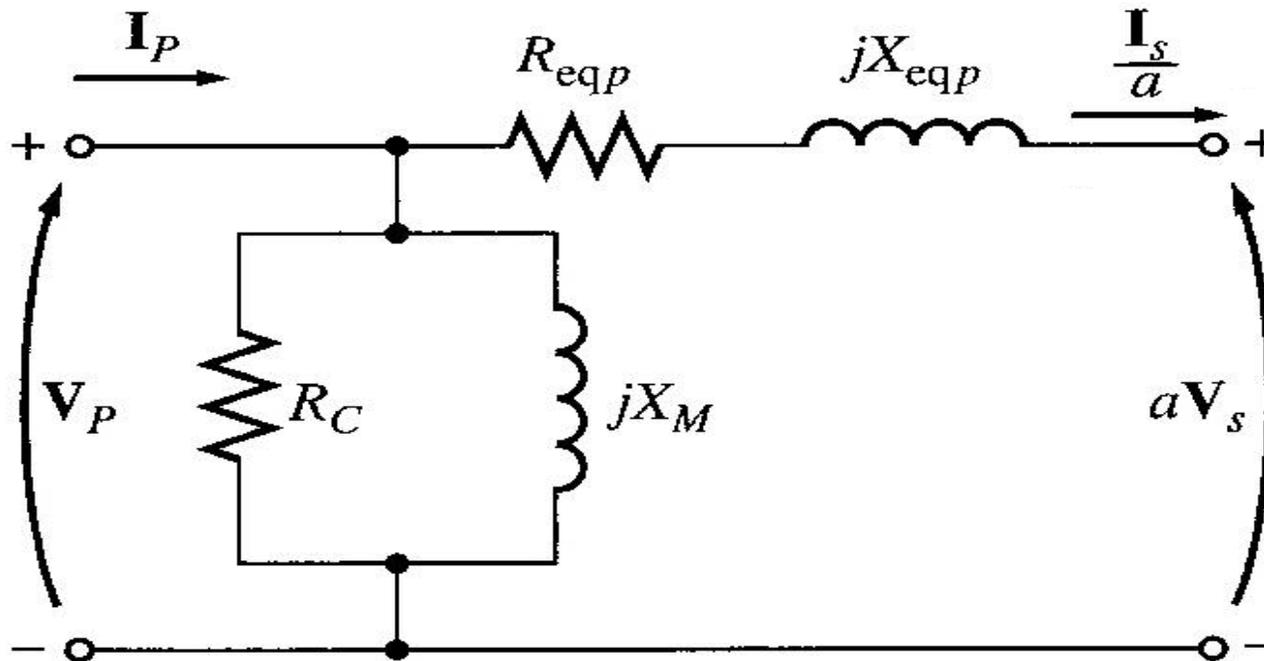


Circuit équivalent approximatif du transformateur réel

- Les circuits équivalents dérivés présentent tous un nœud supplémentaire au niveau du circuit primaire, ce qui rend l'analyse du circuit plus complexe d'autant plus que la nouvelle branche introduite n'utilise que très peu de courant (dans certains cas elle est même ignorée) et que donc la chute de potentiel à travers l'ensemble R_p et X_p est très petit. De ce fait il nous est donc possible de déplacer la branche de façon à ce qu'elle précède l'ensemble R_p et X_p .
- Nous obtenons ainsi des circuits beaucoup plus facile à analyser,

Circuit équivalent approximatif du transformateur réel

- Circuit équivalent se référant au circuit primaire:

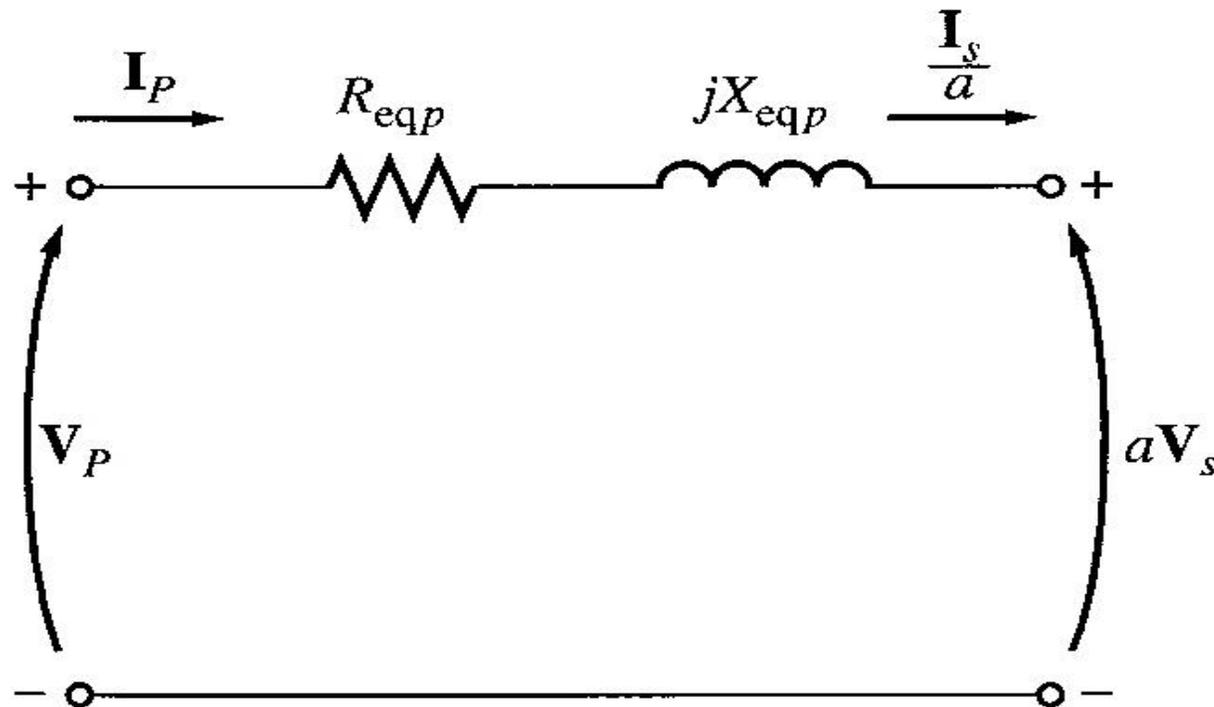


$$R_{eqp} = R_p + a^2 R_s$$

$$X_{eqp} = X_p + a^2 X_s$$

Circuit équivalent approximatif du transformateur réel

- Circuit équivalent se référant au circuit primaire sans la branche:

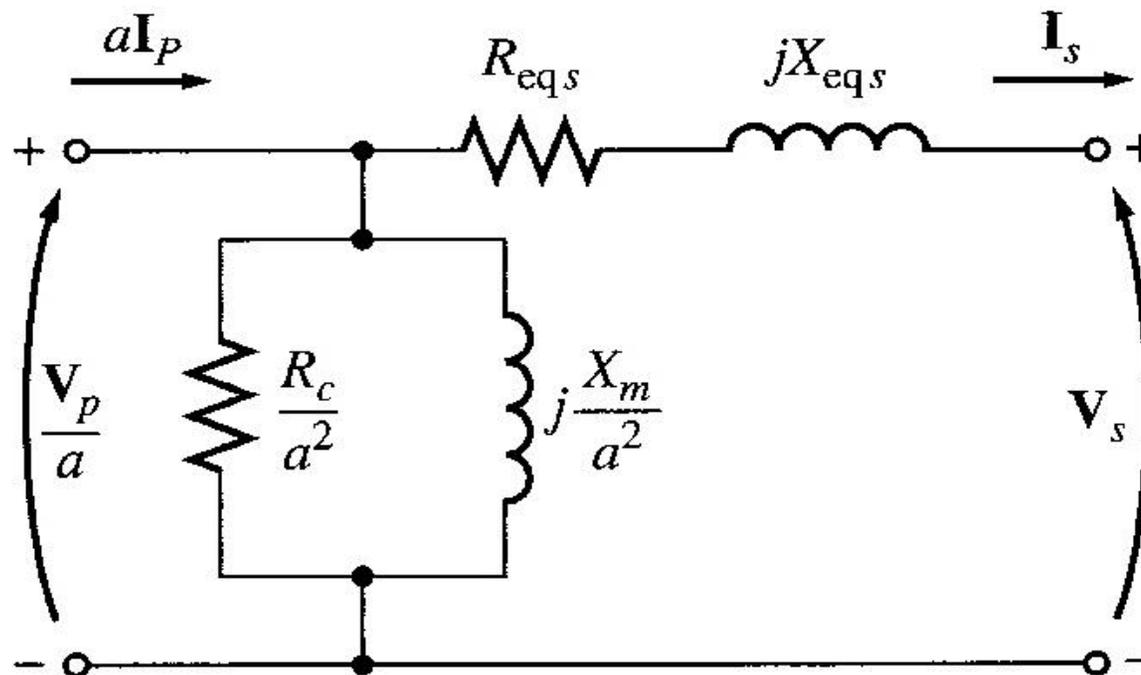


$$R_{eqp} = R_p + a^2 R_s$$

$$X_{eqp} = X_p + a^2 X_s$$

Circuit équivalent approximatif du transformateur réel

- Circuit équivalent se référant au circuit secondaire:

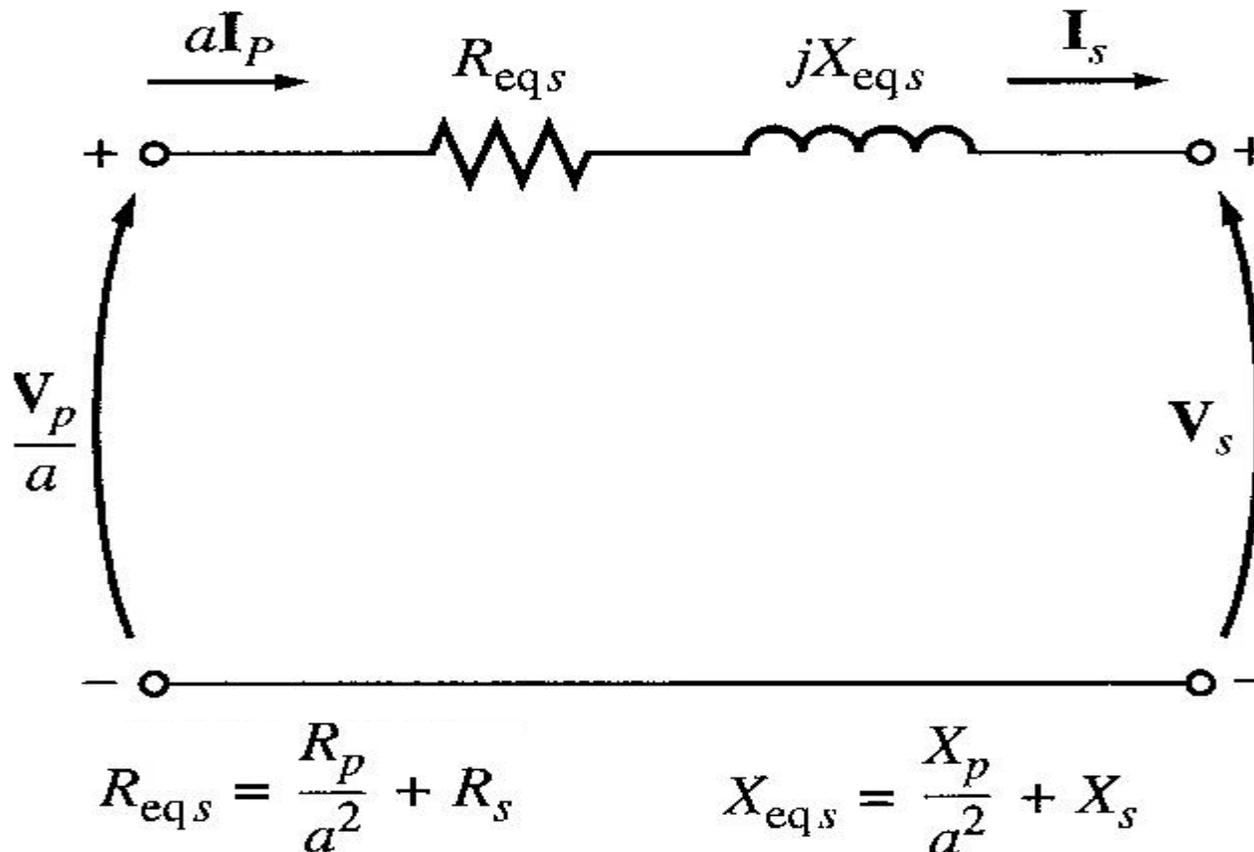


$$R_{eqs} = \frac{R_p}{a^2} + R_s$$

$$X_{eqs} = \frac{X_p}{a^2} + X_s$$

Circuit équivalent approximatif du transformateur réel

- Circuit équivalent se référant au circuit secondaire sans la branche:





uOttawa

L'Université canadienne
Canada's university

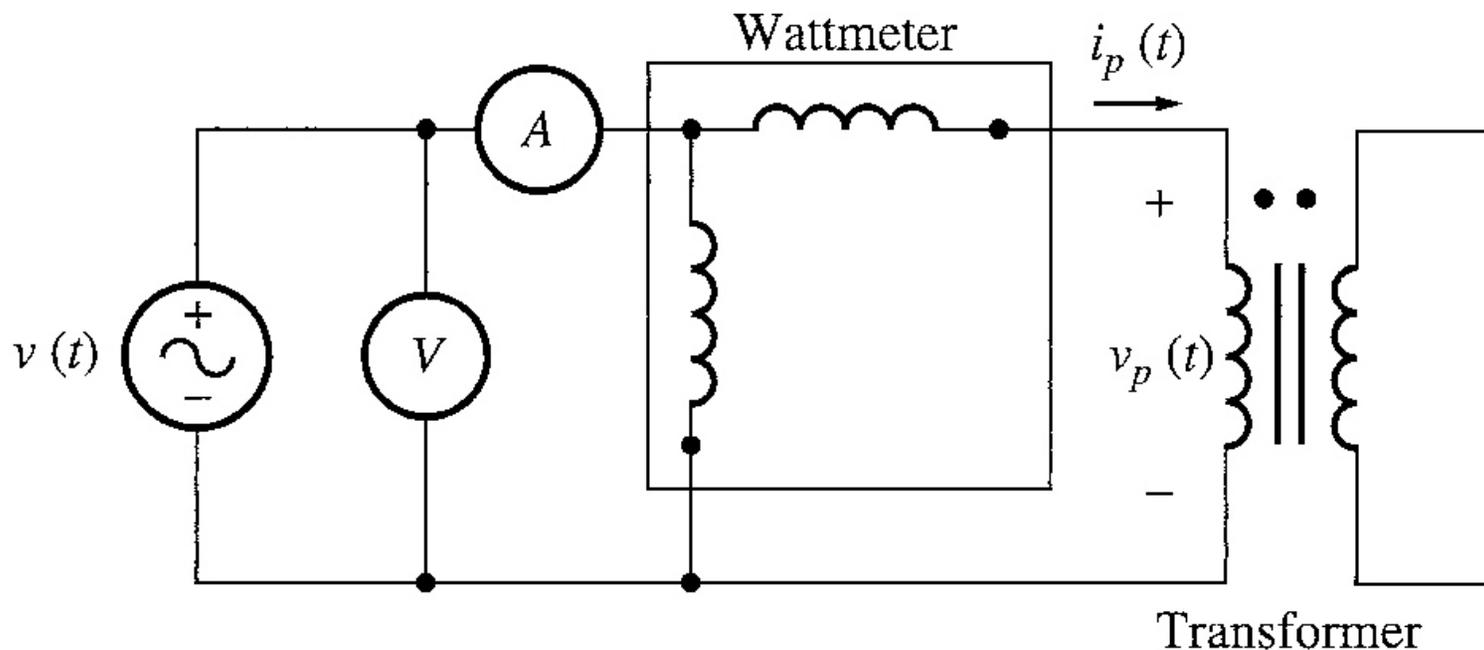
Dérivation des valeurs des composantes du modèle du TR

- Les valeurs des inductances et résistances qui constituent le modèle du transformateur sont déterminées expérimentalement à l'aide de 2 types de test:
 - Le test à circuit ouvert
 - Le test à court circuit.



Test à circuit ouvert

- Le secondaire est en circuit ouvert et le primaire est connecté à une source de voltage nominale:





Test à circuit ouvert

- Dans ces conditions, tout le courant d'entrée circulera dans la branche d'excitation du transformateur. Comme les éléments en séries, R_p et X_p sont beaucoup plus petits que R_C et X_M pour causer une chute de tension significative, il s'en suit que tous le voltage d'entrée se retrouve aux bornes de la branche d'excitation.
- On recueille donc, à l'aide d'appareils de mesure, les valeurs des courant, voltage et puissance aux bornes de la branche d'excitation.



Test à circuit ouvert

- On détermine les valeurs de R_C et X_M en extrayant l'admittance de la branche d'excitation.
- La conductance de la résistance causant les pertes de fer étant $G_C = 1/R_C$
- La susceptance de l'inductance étant : $B_M = 1/X_M$
- Les 2 éléments étant en parallèles, leurs admittances s'ajoutent pour former l'admittance totale de la branche d'excitation:

$$Y_E = G_C + jB_M = \frac{1}{R_C} - j\frac{1}{X_M}$$

Test à circuit ouvert

- L'amplitude de l'admittance, par rapport au primaire, est dérivée à partir de:

$$|Y_E| = \frac{I_{oc}}{V_{oc}}$$

- L'angle de l'admittance peut être dérivé à partir du facteur de puissance:

$$\text{FP} = \cos(\theta) = \frac{P_{oc}}{V_{oc} I_{oc}}$$



Test à circuit ouvert

- L'angle est donc: $\theta = \cos^{-1} \frac{P_{OC}}{V_{OC} I_{OC}}$
- Le facteur de puissance est toujours en retard dans un transformateur réel, le courant étant en retard par rapport au voltage :

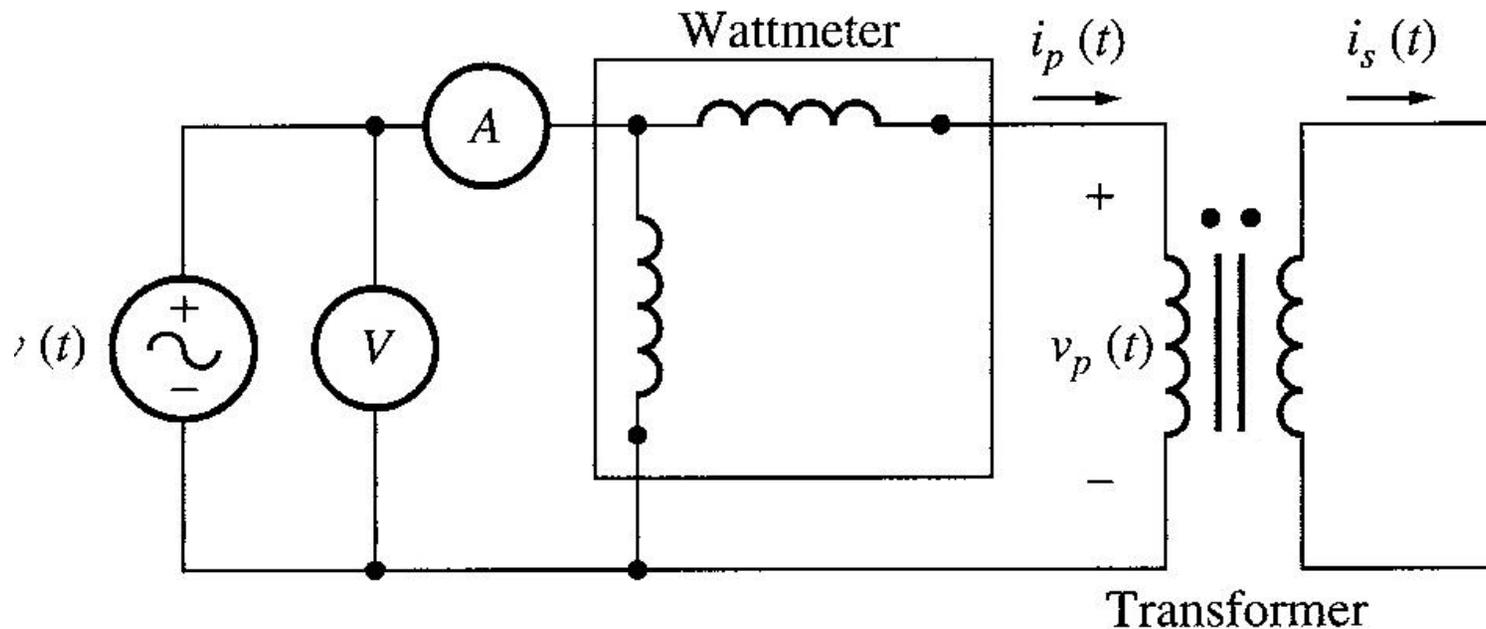
$$Y_E = \frac{I_{OC}}{V_{OC}} \angle -\theta \qquad Y_E = \frac{I_{OC}}{V_{OC}} \angle -\cos^{-1}(FP)$$

- La partie réelle déterminera R_C et la partie imaginaire déterminera X_M .



Test à court circuit

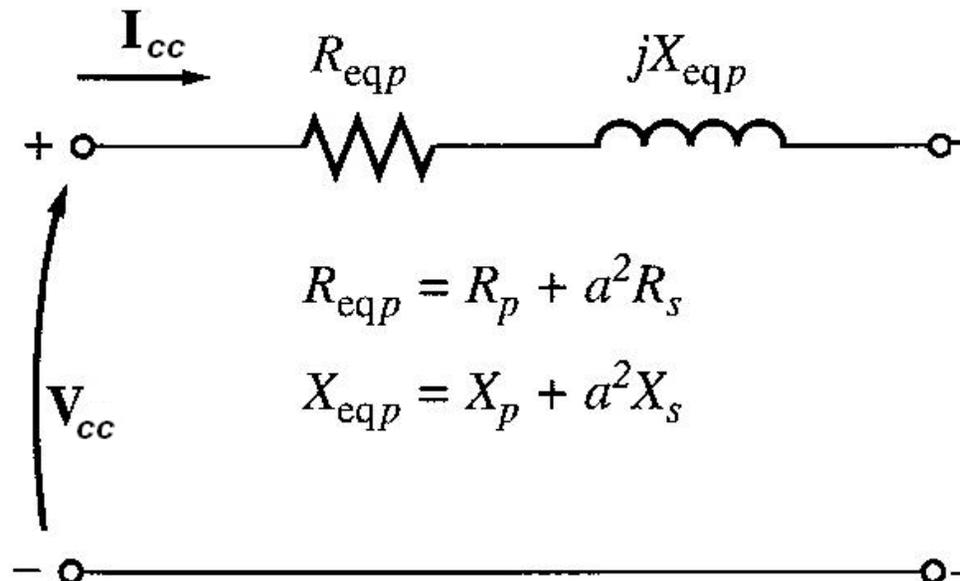
- La sortie du secondaire est court circuitée et le primaire est connecté à une source de voltage très faible pour débuter (pour ne pas endommager les bobines):





Test à court circuit

- On augmente le voltage d'entrée jusqu'à ce qu'on puisse apparaitre un courant de court circuit au secondaire et on note les valeurs des courant, voltage et puissance au primaire.
- A cause du bas voltage d'entrée et donc de courant, on ignore la branche d'excitation.





Test à court circuit

- L'amplitude de l'impédance en série, référée au primaire, est:

$$|Z_{SE}| = \frac{V_{SC}}{I_{SC}}$$

- Le facteur de puissance, en retard, étant:

$$\text{PF} = \cos(\theta) = P_{SC} / (V_{SC} I_{SC})$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_{OC}}{V_{OC} I_{OC}}$$

- On a donc: $Z_{SE} = \frac{V_{SC} \angle 0^\circ}{I_{SC} \angle -\theta} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \angle \theta^\circ$



Test à court circuit

- L'impédance en série est : $Z_{se} = R_{eq} + jX_{eq}$
ou $Z_{se} = (R_p + a^2 R_s) + j(X_p + a^2 X_s)$
- La partie réelle déterminera: $R_p + a^2 R_s$
- La partie imaginaire déterminera: $X_p + a^2 X_s$



Mesures par Unité de Système

- La résolution de système contenant plusieurs transformateurs peut être confuse et complexe.
- Dans le système MUS, chaque entité électrique est mesurée en fraction décimale par rapport à une référence de base. Toute quantité peut s'exprimer par unité de base par l'équation:

$$\text{Quantité par unité} = \frac{\text{valeur actuelle}}{\text{valeur de base de la quantité}}$$

- Où « valeur actuelle » est en V, A, W, Ω etc..



Mesures par Unité de Système

- En générale on définit 2 quantités de base pour définir une unité de système donnée
 - Le voltage
 - La puissance (ou puissance apparente)
- Une fois cette entité de base est choisie, toutes les autres entités sont exprimées en fonction de cette dernière à travers les lois, équations et relations électriques:

$$P_{\text{base}}, Q_{\text{base}} \text{ ou } S_{\text{base}} = V_{\text{base}} I_{\text{base}}$$



MUS

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} \quad Y_{base} = \frac{I_{base}}{V_{base}} \quad Z_{base} = \frac{(V_{base})^2}{S_{base}}$$

- Dans un système, une puissance apparente de base et un voltage de base sont choisis à un point spécifique.
- On a vu que la puissance apparente d'entrée se retrouve à la sortie ($S_{in} = S_{out}$) et que donc le transformateur n'affecte pas la puissance apparente du système.
- Le voltage, par contre, variera à travers le transformateur en fonction du rapport des bobines, nous devons donc en tenir compte.



Voltage de Régulation du Transformateur

- Comme un TR contient des impédances en séries, son voltage de sortie variera même si la charge est constante.
- Le voltage de régulation à pleine est une entité qui compare le voltage de sortie à vide avec celui à pleine charge et est défini par l'expression suivante :

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

Voltage de Régulation du Transformateur

- A vide $V_S = V_P/a$ et donc:

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

- Par unité de système:

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

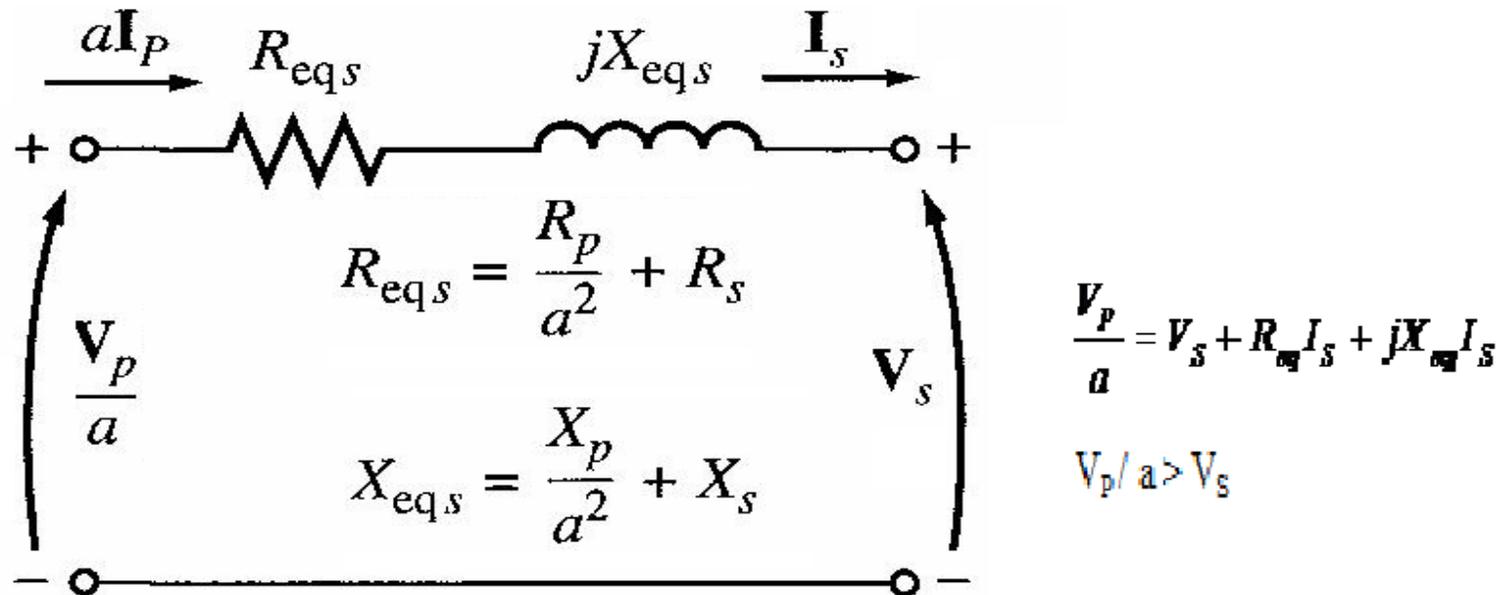
- Dans un transformateur idéal : $VR = 0$



Voltage de Régulation du Transformateur

- Bien qu'en pratique, il soit conseillé de travailler avec un VR aussi petit que possible, des TR à hautes impédances et hauts VR sont utilisés pour réduire des courants indésirables.
- Pour déterminer le VR d'un TR, il nous faut comprendre comment le voltage varie dans ce dernier.
- A cet effet, considérons le circuit suivant où nous avons négligé la branche d'excitation et qui se réfère par rapport au secondaire:

Voltage de Régulation du Transformateur

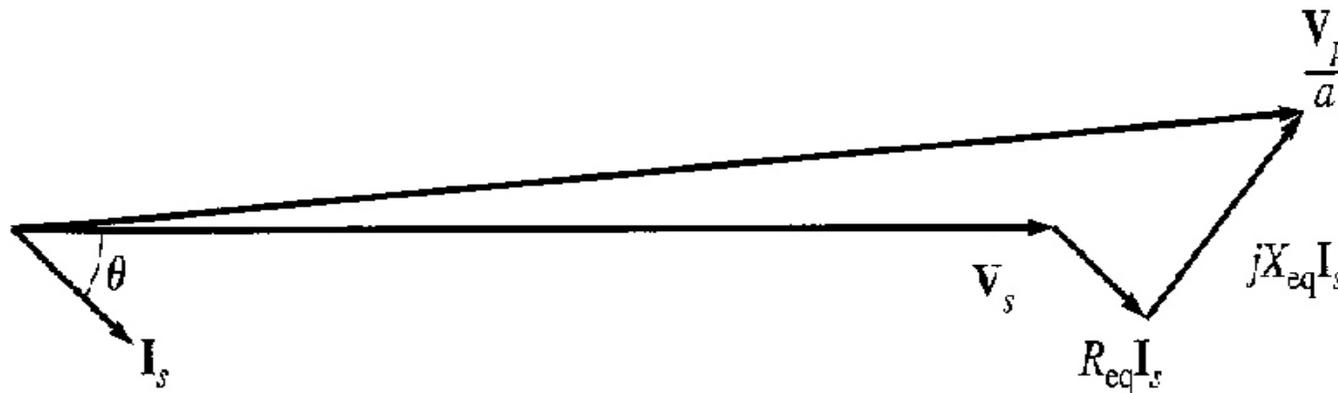


- Puisque dans un TR, le courant est en retard par rapport au voltage d'entrée, on en déduit que le voltage du secondaire sera aussi en retard par rapport à celui de l'entrée.
- L'expression de V_p/a montre que $VR = f(Z_{séries}, \theta_I)$.⁰²⁻⁵²



Voltage de Régulation du Transformateur

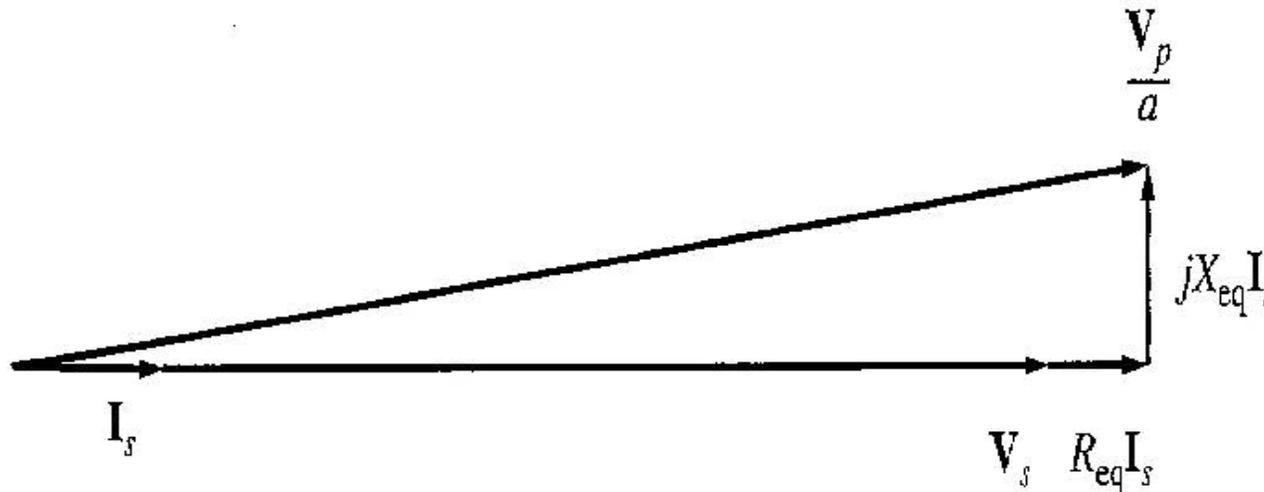
- Utilisons un diagramme de phase et assumons que V_S a un angle de 0° et sert de référence.
- Débutons par considérer que I_S est en retard par rapport à V_S ($\theta_I < 0$ et donc FP est en retard) :



- on voit bien que $V_p/a > V_S$ et donc $VR > 0$.

Voltage de Régulation du Transformateur

- Assumons maintenant que I_s est en phase avec V_s ($\theta_I = 0$ et donc $FP = \cos(\theta_r) = 1$) :

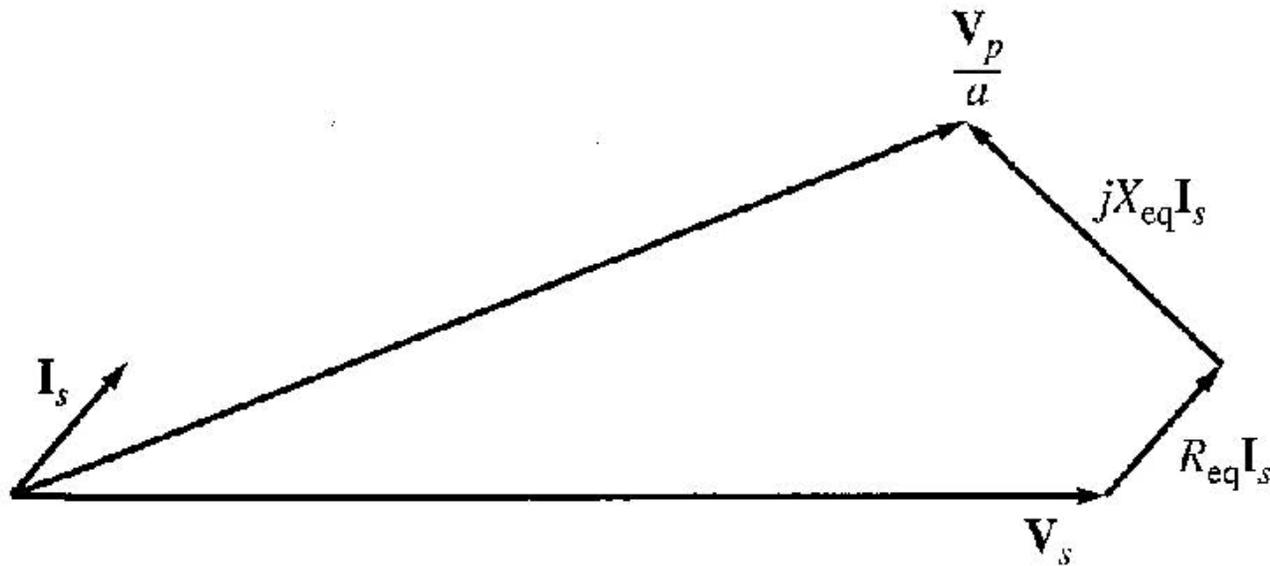


- on voit bien que $V_p/a > V_s$ et donc $VR > 0$.



Voltage de Régulation du Transformateur

- Puis assumons finalement que I_S est en avance par rapport à V_S ($\theta_I > 0$ et donc FP est en avance) :



- on voit bien que $V_p/a < V_s$ et $VR < 0$.



Voltage de Régulation du Transformateur

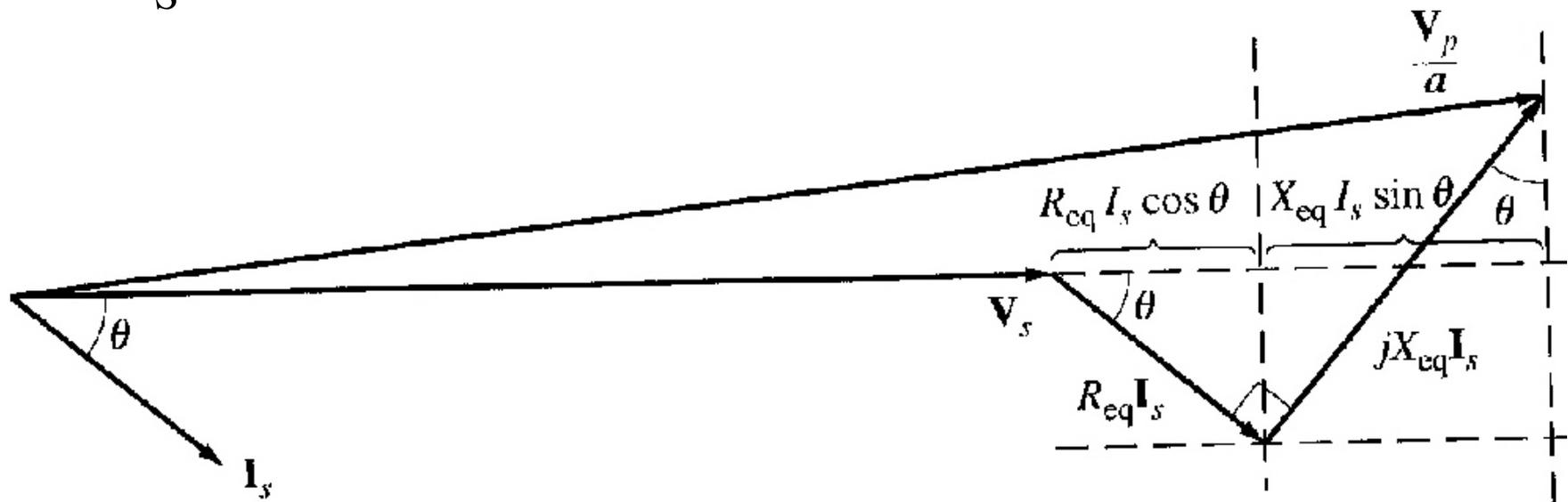
- Les différents scénarios de I_S par rapport à V_S sont résumés dans la table suivante :

PF en Retard	$V_p/a > V_S$	$VR > 0$
PF Unitaire	$V_p/a > V_S$	$VR > 0$ ($< VR$ en retard)
PF en Avance	$V_S > V_p/a$	$VR < 0$



Approximation du Voltage de Régulation du Transformateur

- Revenons au premier cas où I_s est en retard par rapport à V_s :



- Pour θ petit :
$$\frac{V_p}{a} \approx V_s + R_{eq} I_s \cos \theta + X_{eq} I_s \sin \theta$$



Effacité du transformateur

- S'applique aussi bien aux moteurs, gnrateurs qu'aux transformateurs.

- Dfinie de la faon suivante :
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

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

- Types de pertes dans un transformateur :
 - Pertes dues au cuivre, I^2R de l'impdance en srie.
 - Pertes d'hysteresis reprsentes par R_C .
 - Pertes des courants d'Eddy, aussi reprsentes par R_C .



Effacité du transformateur

- Par conséquent, pour dériver l'efficacité d'un transformateur à une charge particulière, on doit prendre en considération les pertes des différentes résistances et comme $P_{\text{out}} = V_s I_s \cos(\theta)$ on obtient l'expression suivante :

$$\eta = \frac{V_s I_s \cos \theta}{P_{\text{Ca}} + P_{\text{core}} + V_s I_s \cos \theta} \times 100\%$$



Embobinage du Transformateur

- Nous avons considéré jusqu'à présent qu'un transformateur avait un nombre fixe de tours de bobine ce qui n'est pas le cas en réalité.
- Les transformateurs sont construits avec typiquement 4 choix de nombre de tours de bobine assez près l'un de l'autre. L'utilisateur fixera son choix à l'aide de calibreurs (TAPS).
- Ces choix sont disponibles pour s'accommoder des différents voltages locaux. Un pourcentage de variation entre les différents niveaux est généralement indiqué en référence à une valeur nominale.



uOttawa

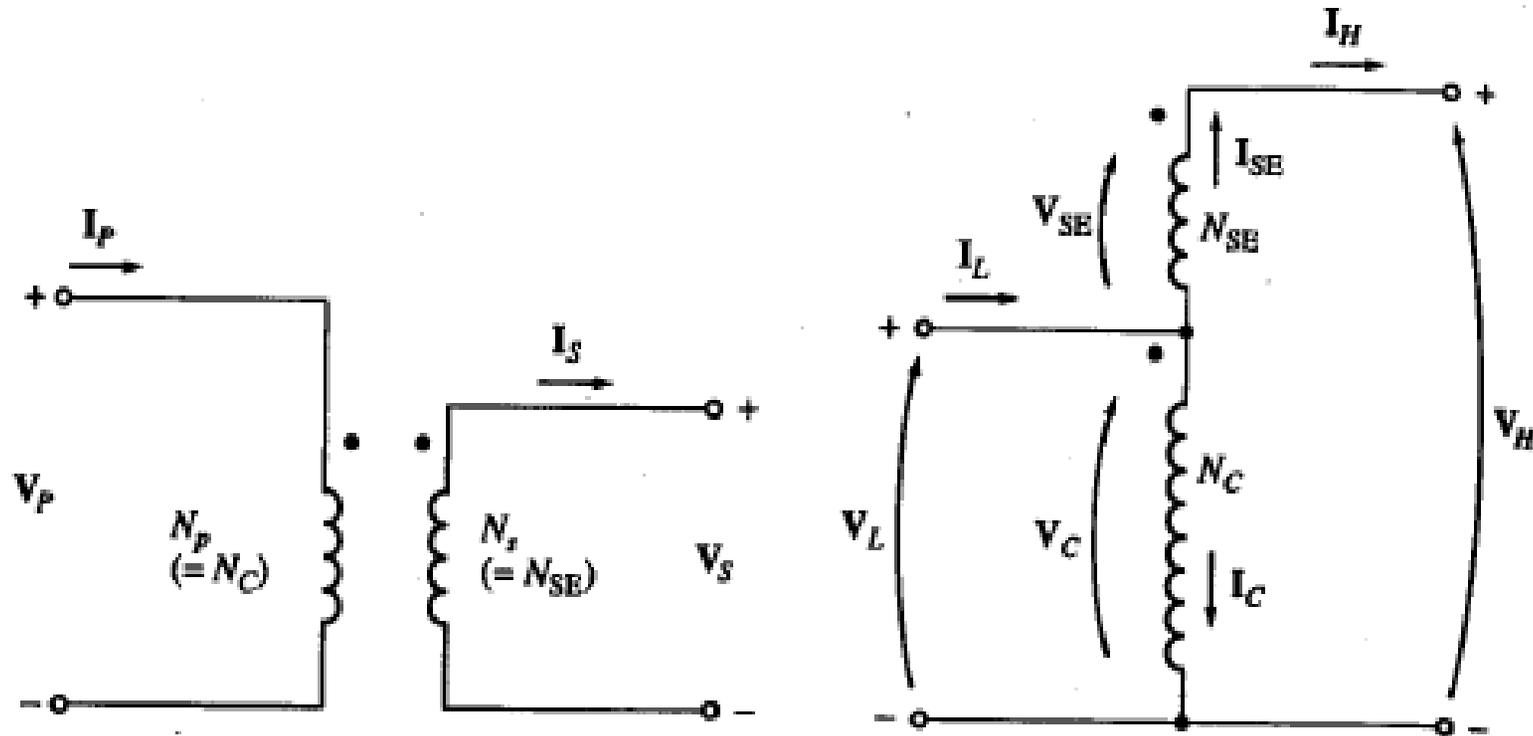
L'Université canadienne
Canada's university

L'autotransformateur ou auto-ajusteur

- Dans certaines situations, il est désirable de changer le niveau de voltage d'un certain montant, à cet effet on a introduit un type de transformateur qui s'auto-ajuste.
- Il existe 2 types de configurations possibles de ce type de transformateur :
 - Le transformateur élévateur.
 - Le transformateur abaisseur.



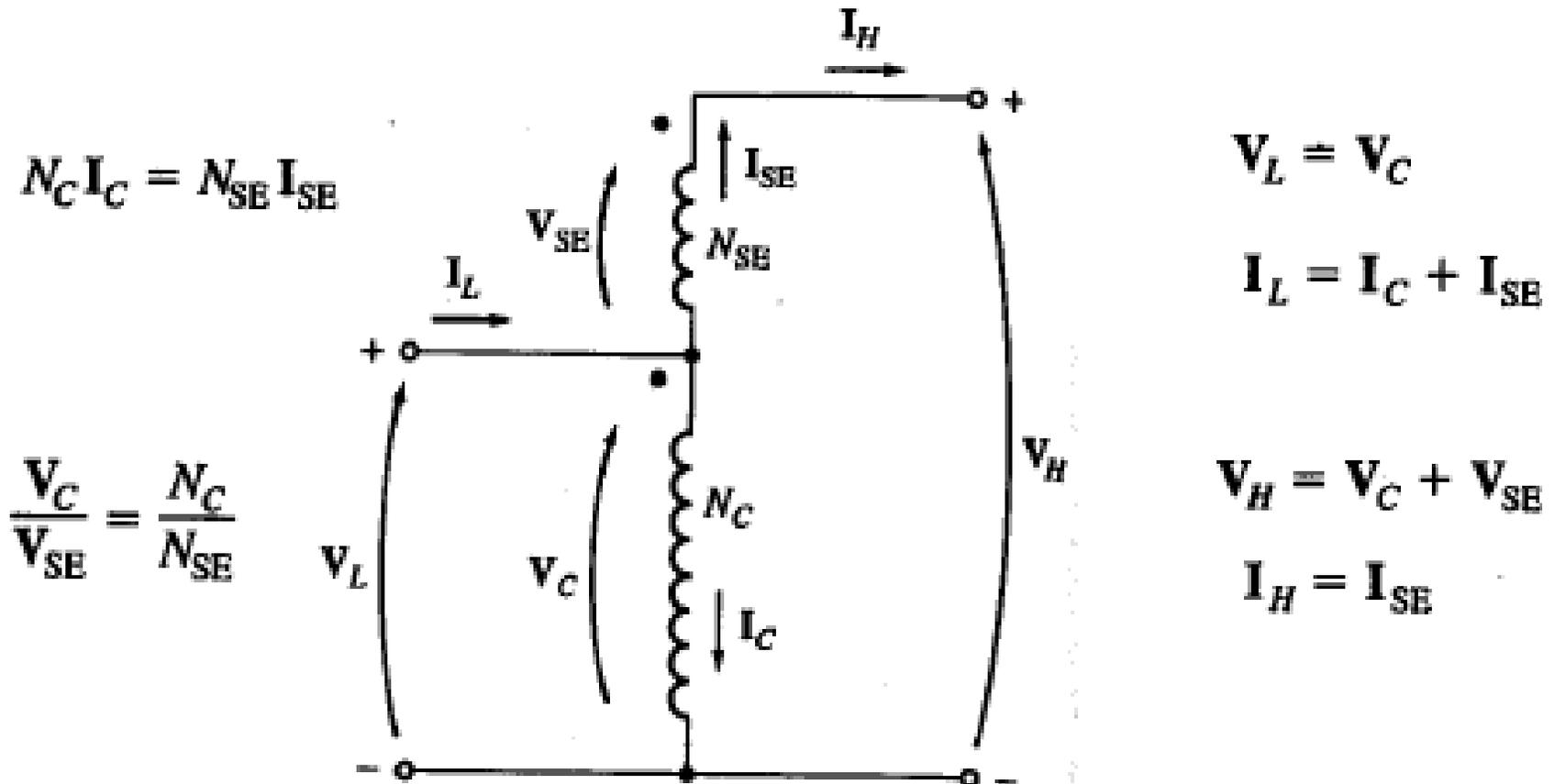
Le transformateur élévateur



- Un transformateur à connexions conventionnelles suivi d'un transformateur connecté en un transformateur auto-ajusteur.



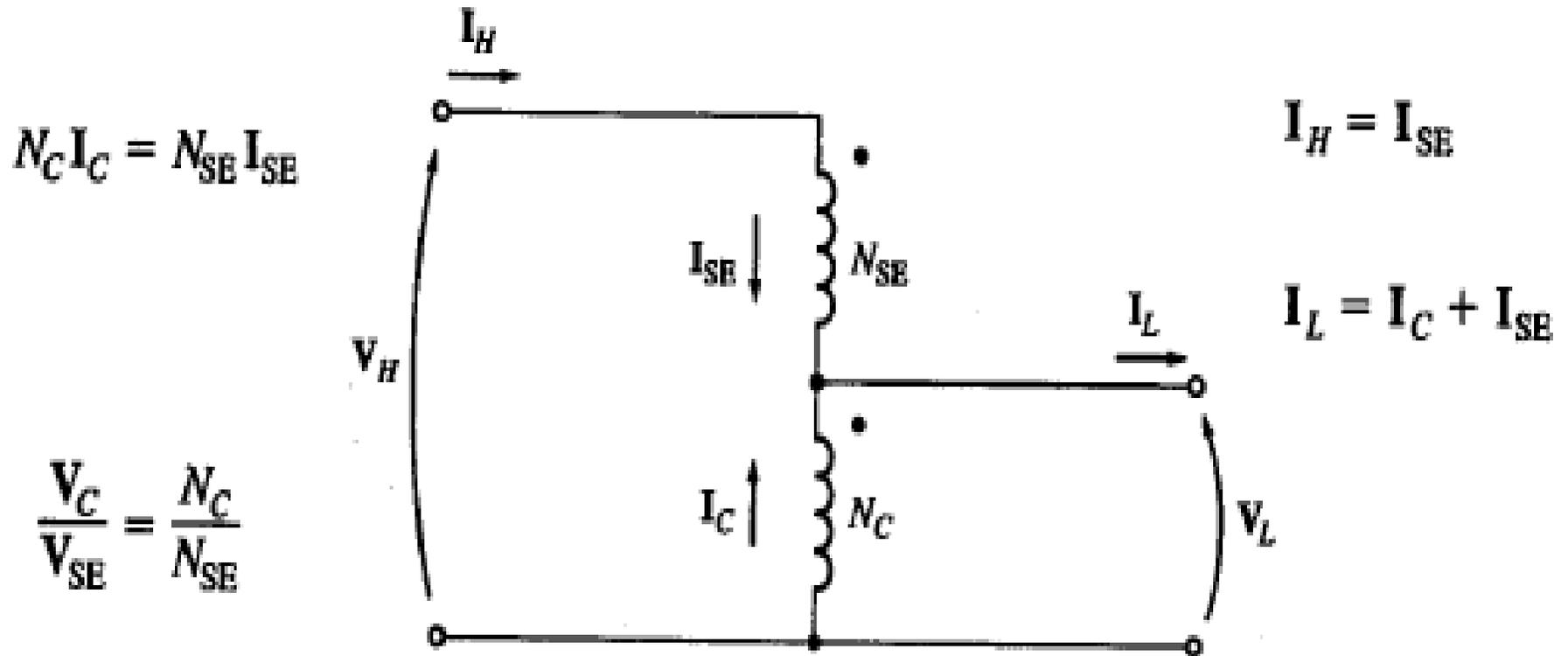
Le transformateur élévateur



- Ici c'est le voltage de sortie qui est la somme du voltage primaire et du voltage secondaire.



Le transformateur abaisseur



- La bobine du primaire est telle qu'elle s'ajout à celle du secondaire. Le voltage d'entrée est la somme du primaire et du secondaire.



Voltages de l'autotransformateur

- Le haut voltage est toujours $V_H = V_C + V_{SE}$, puisque $V_C/V_{SE} = N_C/N_{SE}$ on obtient :

$$V_H = V_C + \frac{N_{SE}}{N_C} V_C$$

- Comme $V_L = V_C$ ce qui mène à :

$$\begin{aligned} V_H &= V_L + \frac{N_{SE}}{N_C} V_L \\ &= \frac{N_{SE} + N_C}{N_C} V_L \end{aligned}$$

$$\boxed{\frac{V_L}{V_H} = \frac{N_C}{N_{SE} + N_C}}$$



Courants de l'autotransformateur

- Similairement, $I_L = I_C + I_{SE}$, puisque $I_C = (N_C / N_{SE}) I_{SE}$ on obtient :

$$\mathbf{I}_L = \frac{N_{SE}}{N_C} \mathbf{I}_{SE} + \mathbf{I}_{SE}$$

- Comme $I_H = I_{SE}$ ce qui mène à :

$$\mathbf{I}_L = \frac{N_{SE}}{N_C} \mathbf{I}_H + \mathbf{I}_H$$

$$= \frac{N_{SE} + N_C}{N_C} \mathbf{I}_H$$

$$\boxed{\frac{\mathbf{I}_L}{\mathbf{I}_H} = \frac{N_{SE} + N_C}{N_C}}$$



Avantage du niveau de puissance apparente de l'auto-ajusteur

- D'après le circuit élévateur : $S_{in} = V_L I_L$ et $S_{out} = V_H I_H$
- Le rapport des voltages étant l'inverse du rapport des courants, on en déduit que : $S_{in} = S_{out} = S_{IO}$
- Par contre la puissance apparente des bobines est définie comme : $S_w = V_C I_C = V_{SE} I_{SE}$
- Puisque $I_C = I_L - I_H$ on a donc:

$$S_w = V_C I_C = V_L (I_L - I_H) = V_L I_L - V_L I_H$$



Avantage du niveau de puissance apparente de l'auto-ajusteur

- Si on combine l'expression précédente avec :

$$\mathbf{I}_H = \mathbf{I}_L \frac{N_C}{N_{SE} + N_C}$$

- On peut corrélérer la puissance apparente des bobines et des entrée/sortie par :

$$\begin{aligned} S_W &= V_L I_L - V_L I_L \frac{N_C}{N_{SE} + N_C} \\ &= V_L I_L \frac{(N_{SE} + N_C) - N_C}{N_{SE} + N_C} \\ &= S_{IO} \frac{N_{SE}}{N_{SE} + N_C} \end{aligned}$$



Avantage du niveau de puissance apparente de l'auto-ajusteur

- Le rapport des puissances apparentes des entrée/sortie sur celle des bobines est définie comme le facteur du niveau de puissance de l'autotransformateur :

$$\frac{S_{IO}}{S_W} = \frac{N_{SE} + N_C}{N_{SE}}$$

- On en déduit que la puissance apparente d'un autotransformateur est supérieure à celle d'un transformateur conventionnel.



Avantage du niveau de puissance apparente de l'auto-ajusteur

- Remarque : S_w est la puissance apparente qui traverse les bobines du transformateur alors S_{IO} est la puissance apparente qui entre dans le circuit primaire et sort du circuit secondaire et d'après l'expression précédente on constate que plus le nombre de tours de la bobine en série est petite, plus l'avantage de S_{IO} est grand.
- Par contre l'auto-ajusteur présent le désavantage de ne pas avoir de bobines isolées puisqu'il y a un contact directe entre elles.



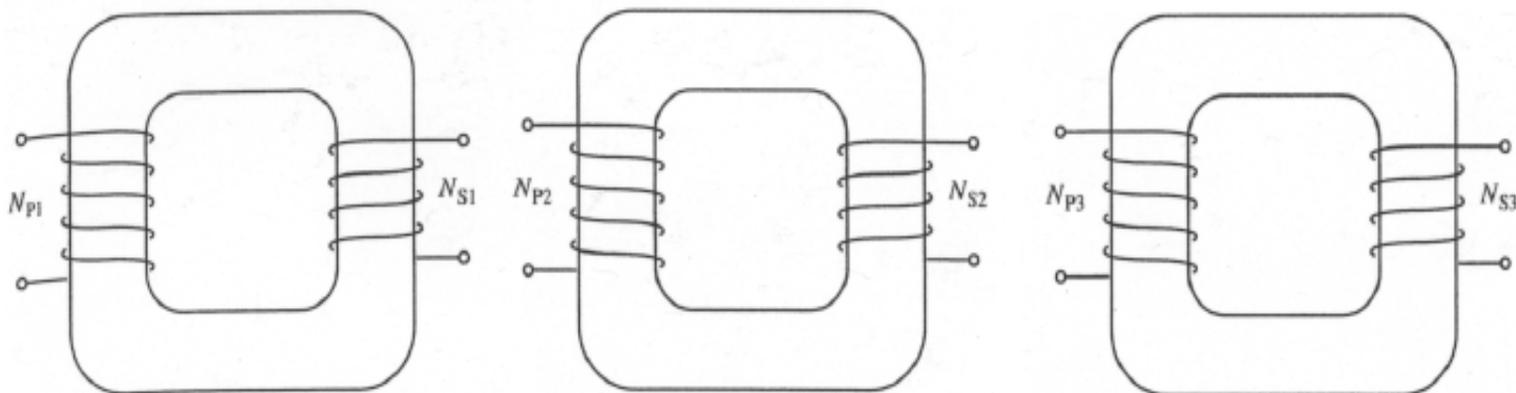
L'impédance interne de l'auto-ajusteur

- L'autotransformateur présent un autre désavantage, son impédance.
- L'impédance par unité effective de l'auto-ajusteur est plus petite que celle d'un transformateur conventionnel par un facteur égale au réciproque de l'avantage de puissance apparente



Les transformateurs triphasés

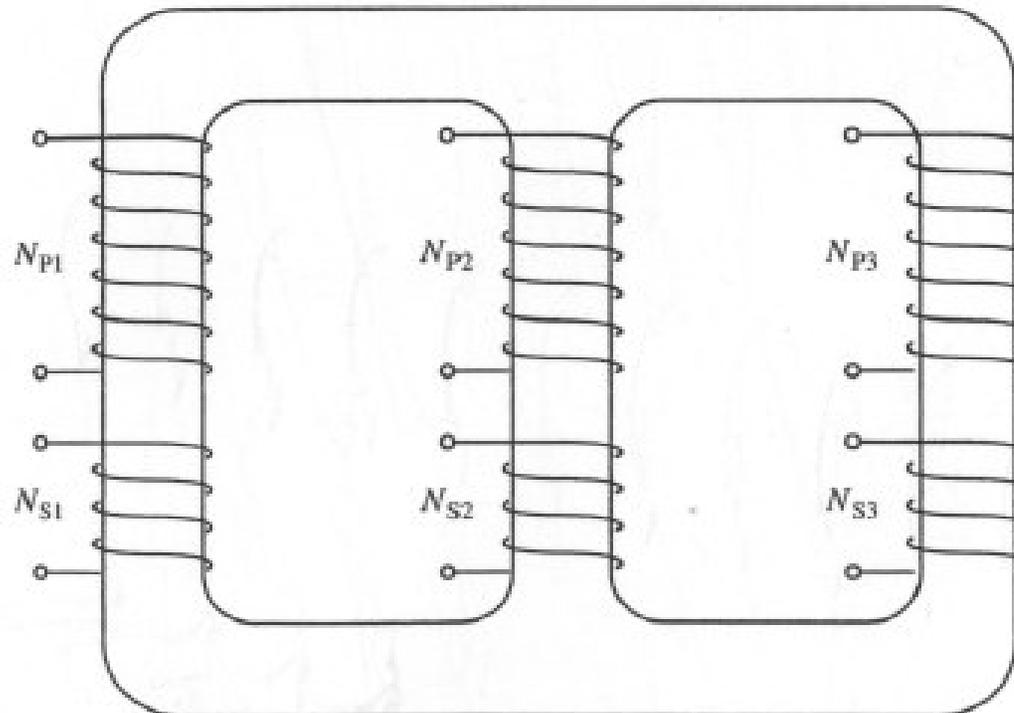
- La majorité de la génération et distribution de puissance est réalisée par des systèmes triphasés.
- Ils peuvent être construits de 2 façons.
- A l'aide de 3 transformateurs monophasés que l'on connecte ensemble où chacun d'entre eux peut être remplacé individuellement.





Les transformateurs triphasés

- Ou à l'aide d'un noyau constitué de 3 ensembles de bobine. Cette configuration a l'avantage d'être plus compacte, plus efficace, contient moins de pertes et est plus économique.



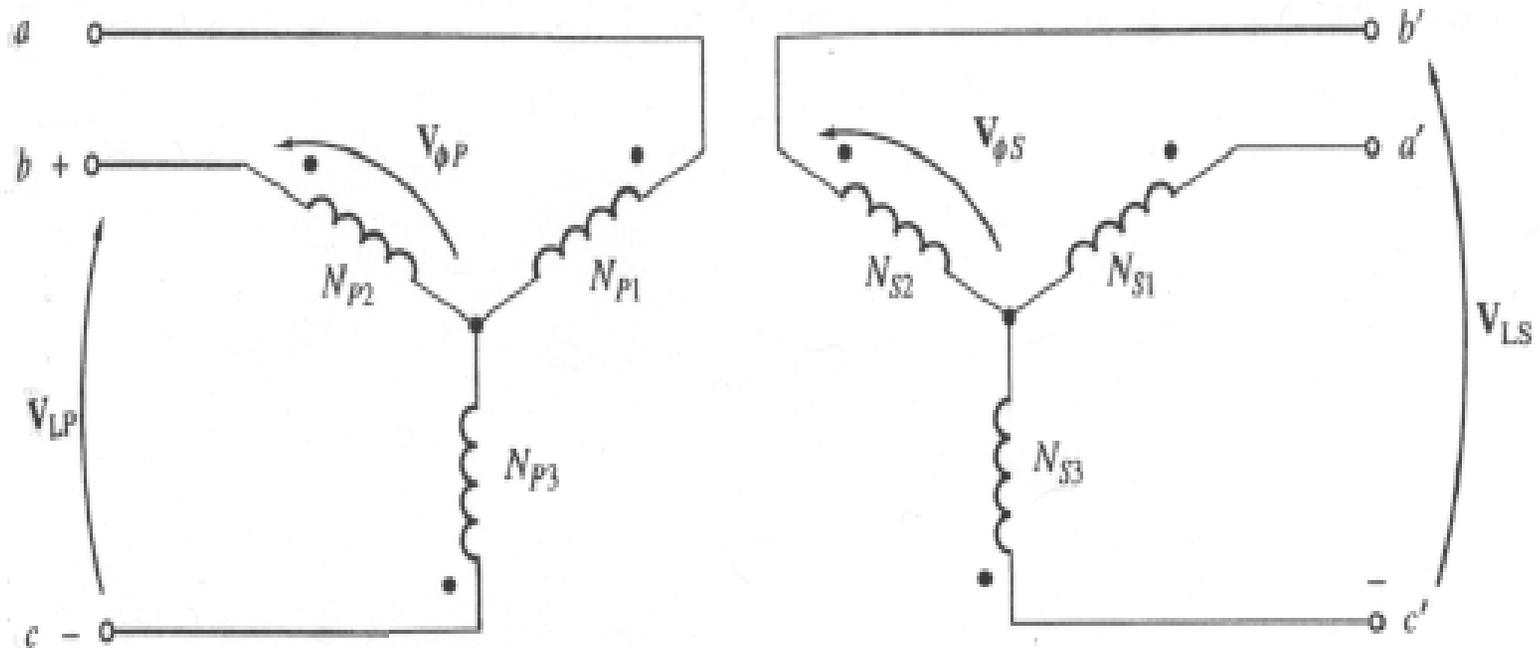


Connectivités/Configurations

- Il existe 4 types de connectivités ou configurations possibles :
 - Etoile - Etoile (Y-Y)
 - Etoile - Delta (Y- Δ)
 - Delta - Etoile (Δ -Y)
 - Delta - Delta (Δ - Δ)
- L'analyse du triphasé est similaire à celle du monophasé. Chacune des phase a les même caractéristiques que les autres et ne diffère que de 120° avec les autres.

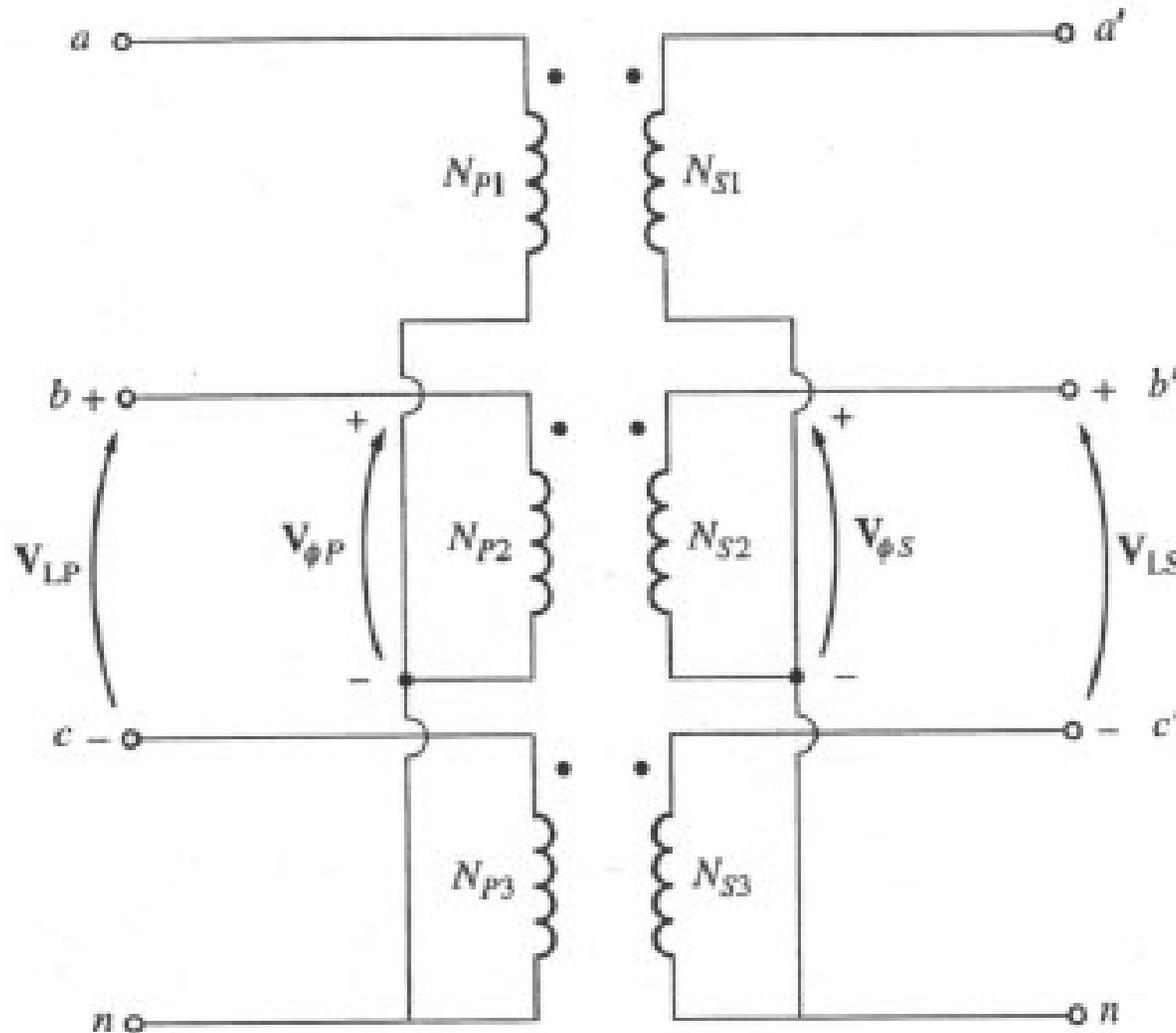


La configuration Y-Y





La configuration Y-Y





La configuration Y-Y

- On rappelle que dans la configuration étoile (Y), le voltage de chaque phase est :

$$V_{\phi} = V_L / \sqrt{3}$$

- Et que donc : $\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}} = a$

- Des charges non balancées rendrons les voltages sévèrement instables.
- Les voltages du troisième harmonique peuvent être larges à cause de la non-linéarité du noyau qui se superpose au voltage fondamental situé au 50/60 Hz.

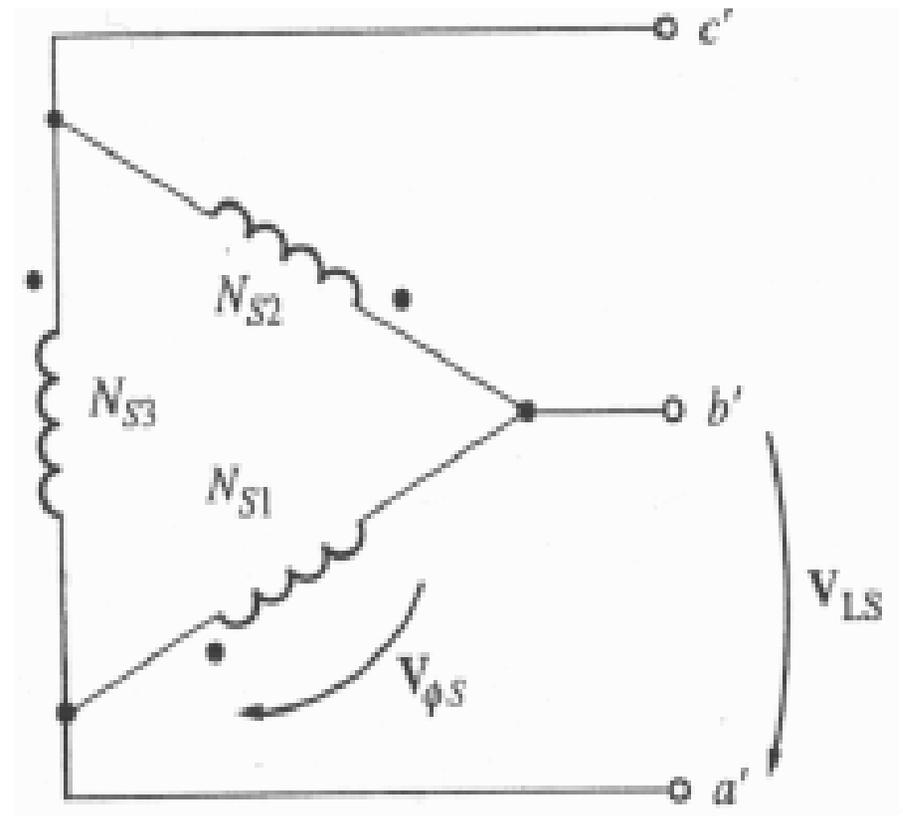
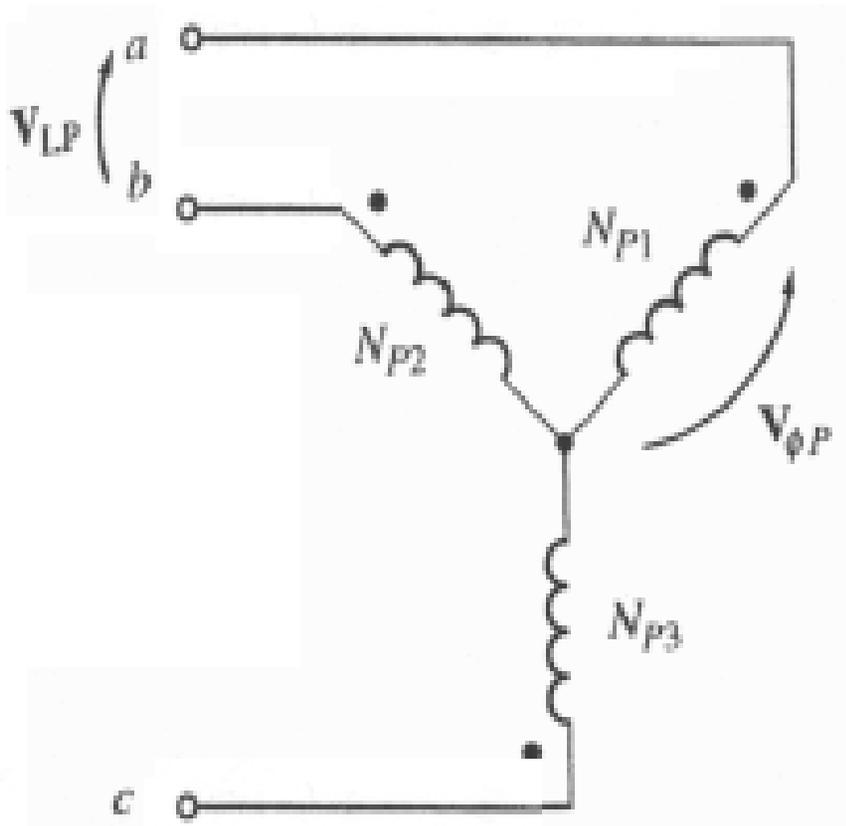


La configuration Y-Y

- On peut résoudre le problème du troisième harmonique ainsi que des charges non-balancées de la façon suivante :
- Une bonne mise à terre du point neutre/commun permet de réorienter le courant du troisième harmonique vers ce point, au lieu de créer de gros voltages, ainsi que ceux des courants non balancés des charges.
- L'addition d'une troisième bobine en delta dans le circuit permet de divertir le courant du troisième harmonique et donc d'en diminuer les effets. Actuellement la troisième bobine permet de délivrer de l'énergie, à une plus petite échelle, localement.

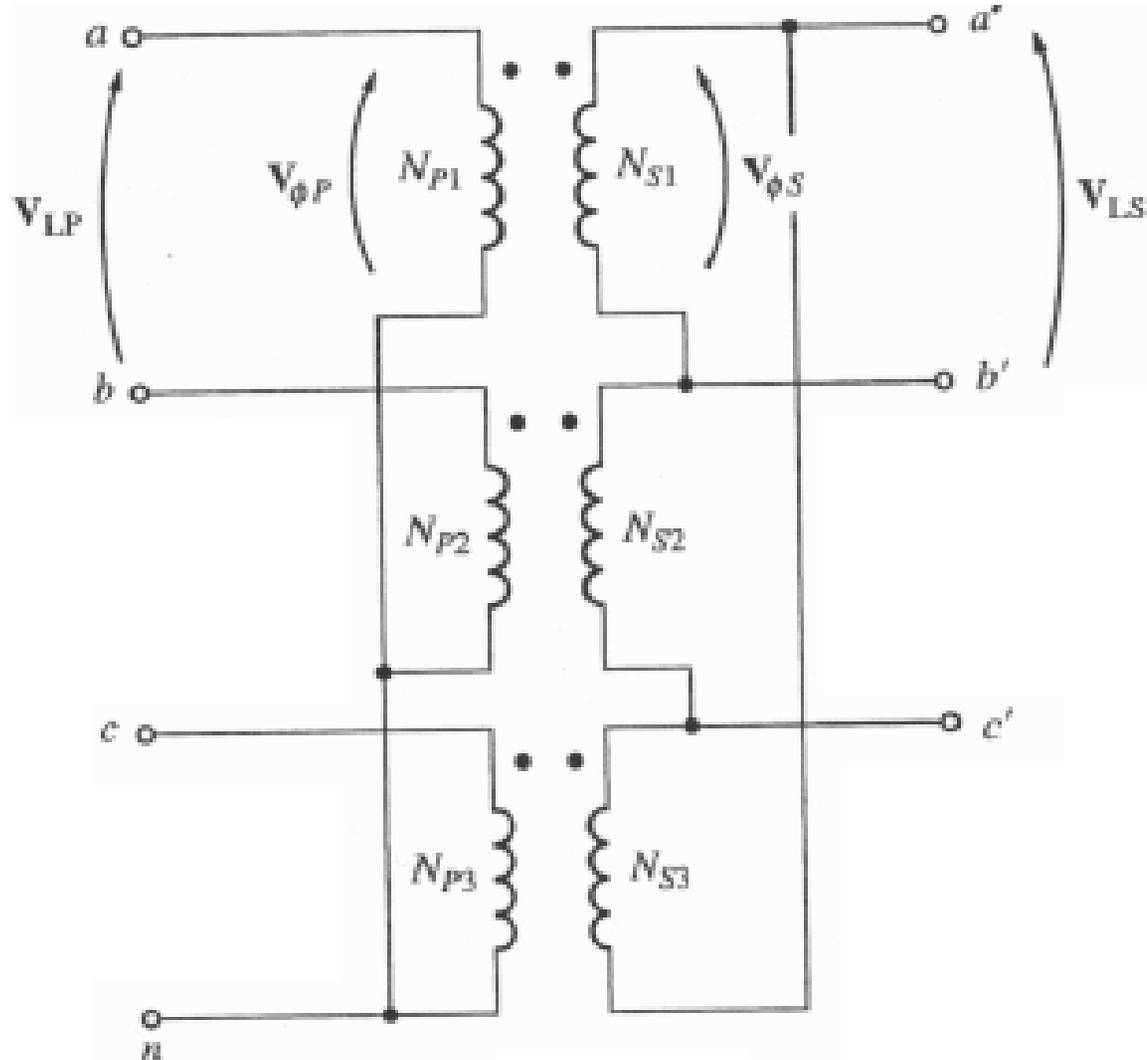


La configuration Y- Δ





La configuration Y- Δ





La configuration Y- Δ

- Remarque: le secondaire est toujours en retard par rapport au primaire.

- Du coté primaire (Y) on a : $V_{LP} = \sqrt{3}V_{\phi P}$

- Alors que du coté secondaire (Δ), $V_{LS} = V_{\phi S}$.

- On aura donc : $\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = \sqrt{3}a$

- Grace au delta, cette topologie ne souffre pas d'effet du troisième harmonique, elle est aussi plus stable que la précédente concernant l'issue des charges non-balancées.



uOttawa

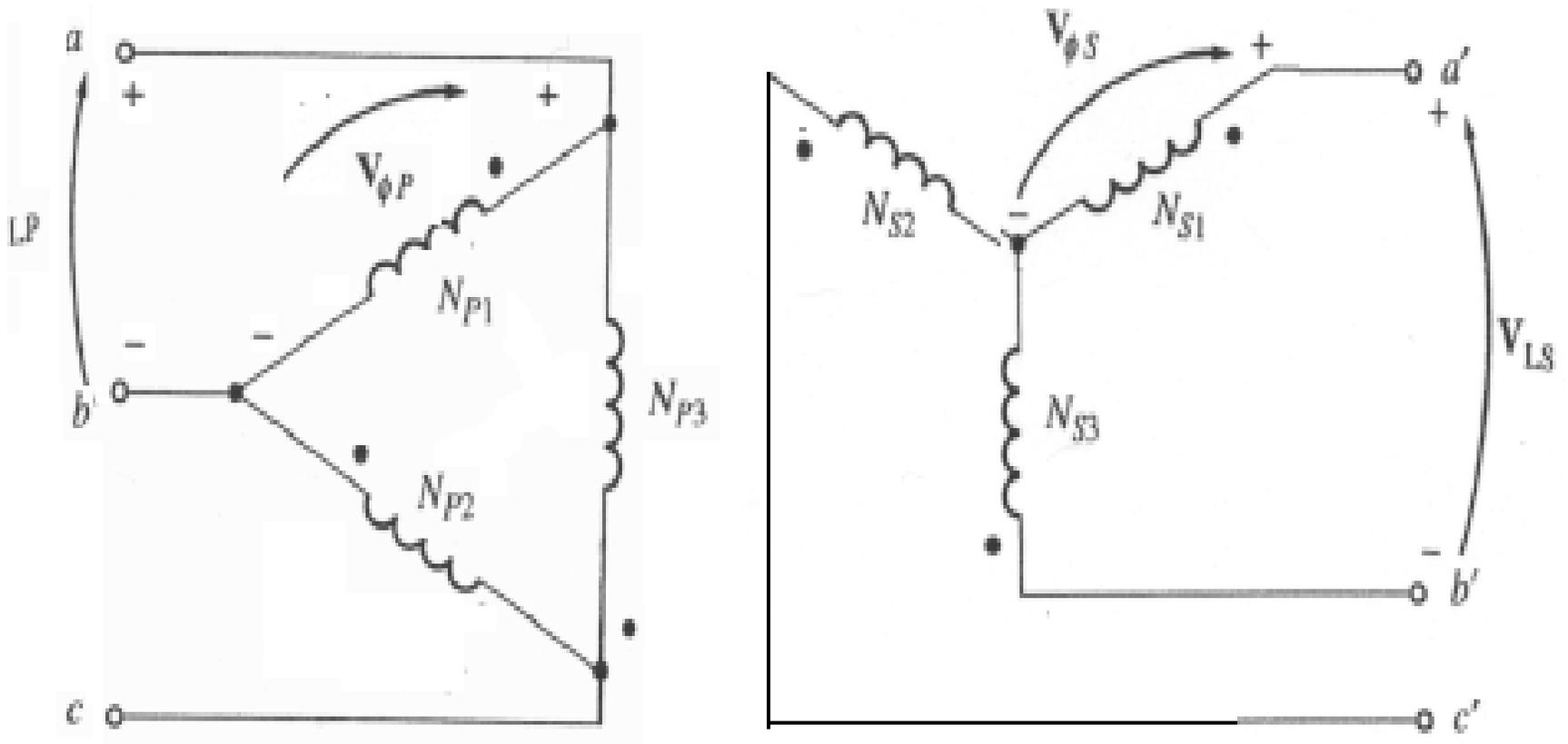
L'Université canadienne
Canada's university

La configuration Y- Δ

- Par contre, à cause du type de connexion, le secondaire est décalé de 30° par rapport au primaire. Comme les angles de phases aux secondaires lorsque des transformateurs sont mis en parallèles doivent être égaux, nous devons faire particulièrement attention de la polarité ou sens de décalage de 30° de chacun de ces secondaires.
- Aux USA, la norme est que toutes nouvelles installations doit avoir **un retard** du secondaire par rapport au primaire.

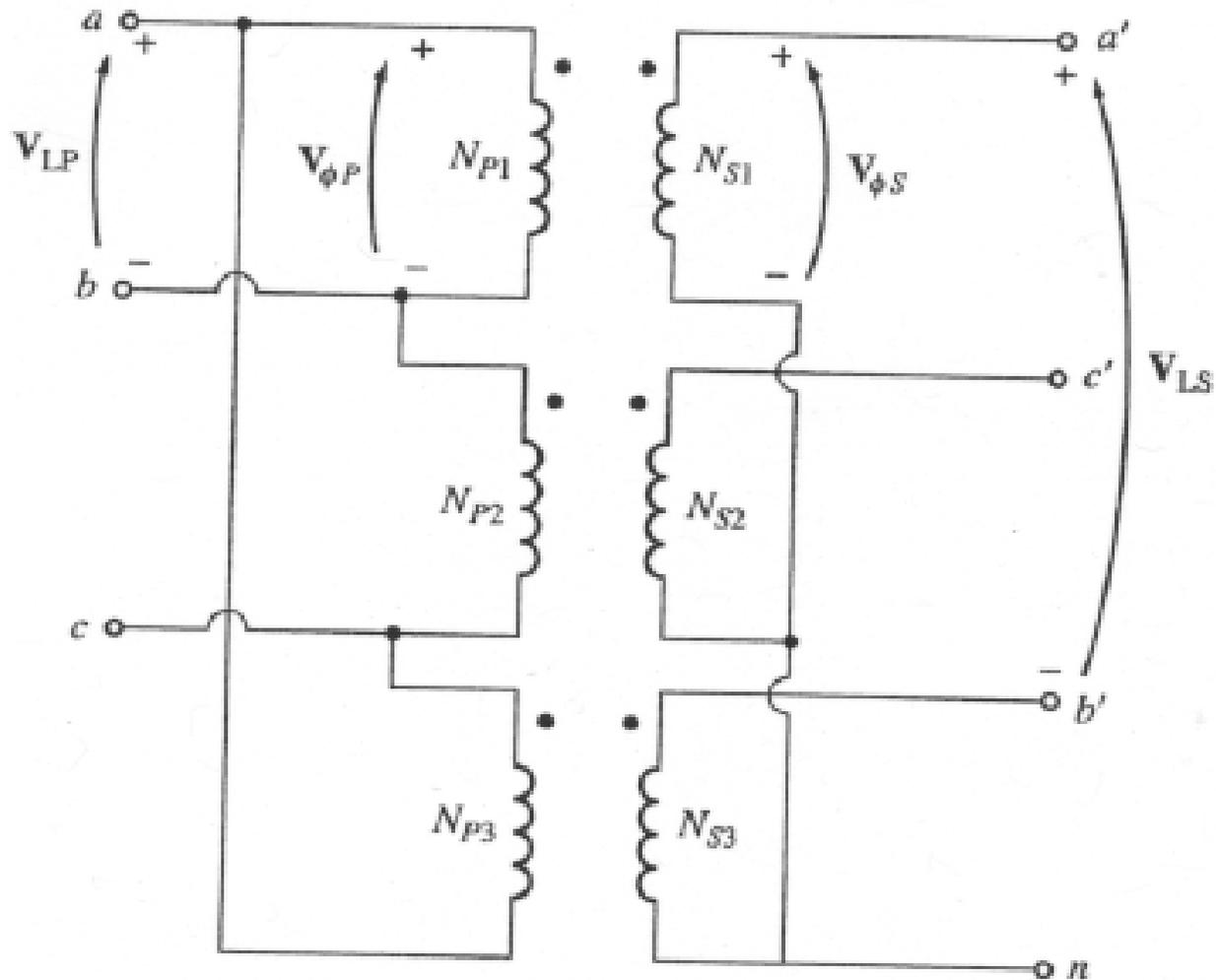


La configuration Δ -Y





La configuration Δ -Y



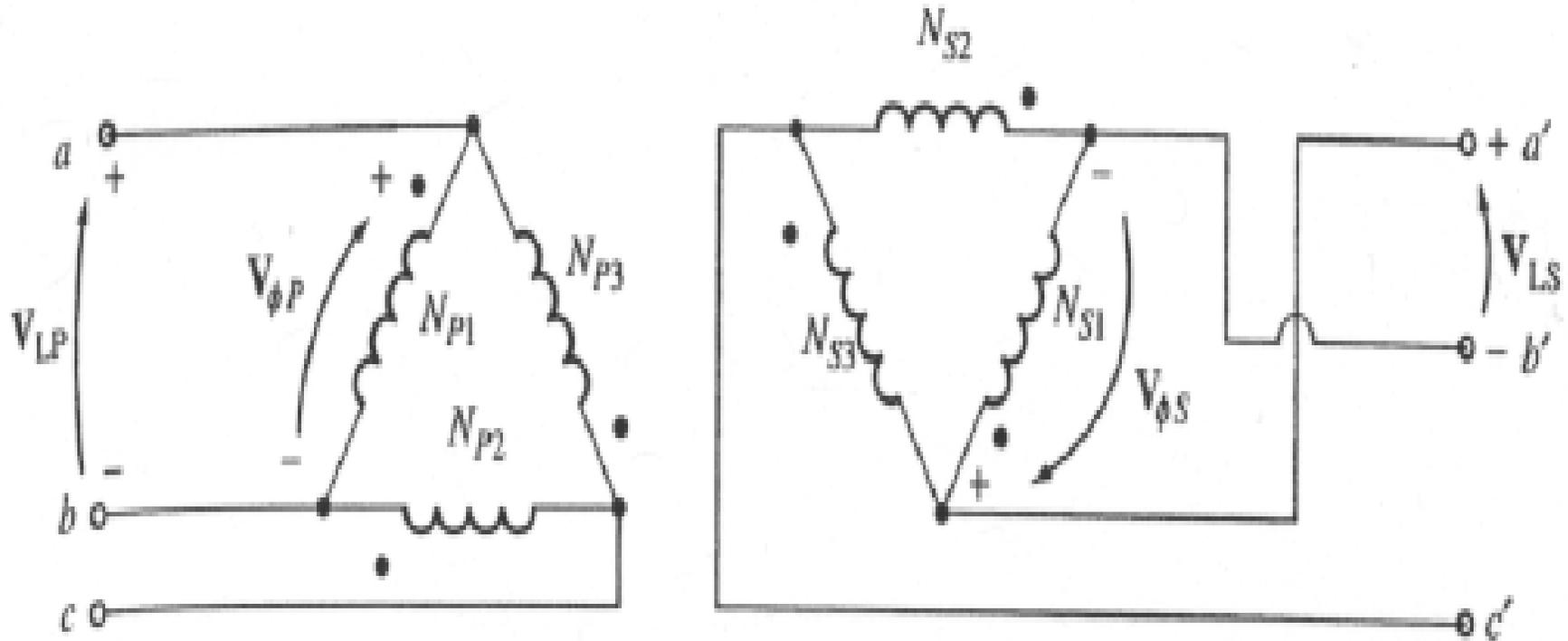


La configuration Δ -Y

- Du côté primaire (Δ) on a : $V_{LP} = V_{\phi P}$
- Alors que du côté secondaire (Y) : $V_{LS} = \sqrt{3}V_{\phi S}$
-
- On obtient donc : $\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{a}{\sqrt{3}}$
- Les propriétés de cette topologie sont similaires de ceux de la précédente, le secondaire a un déphasage de 30° par rapport au primaire.

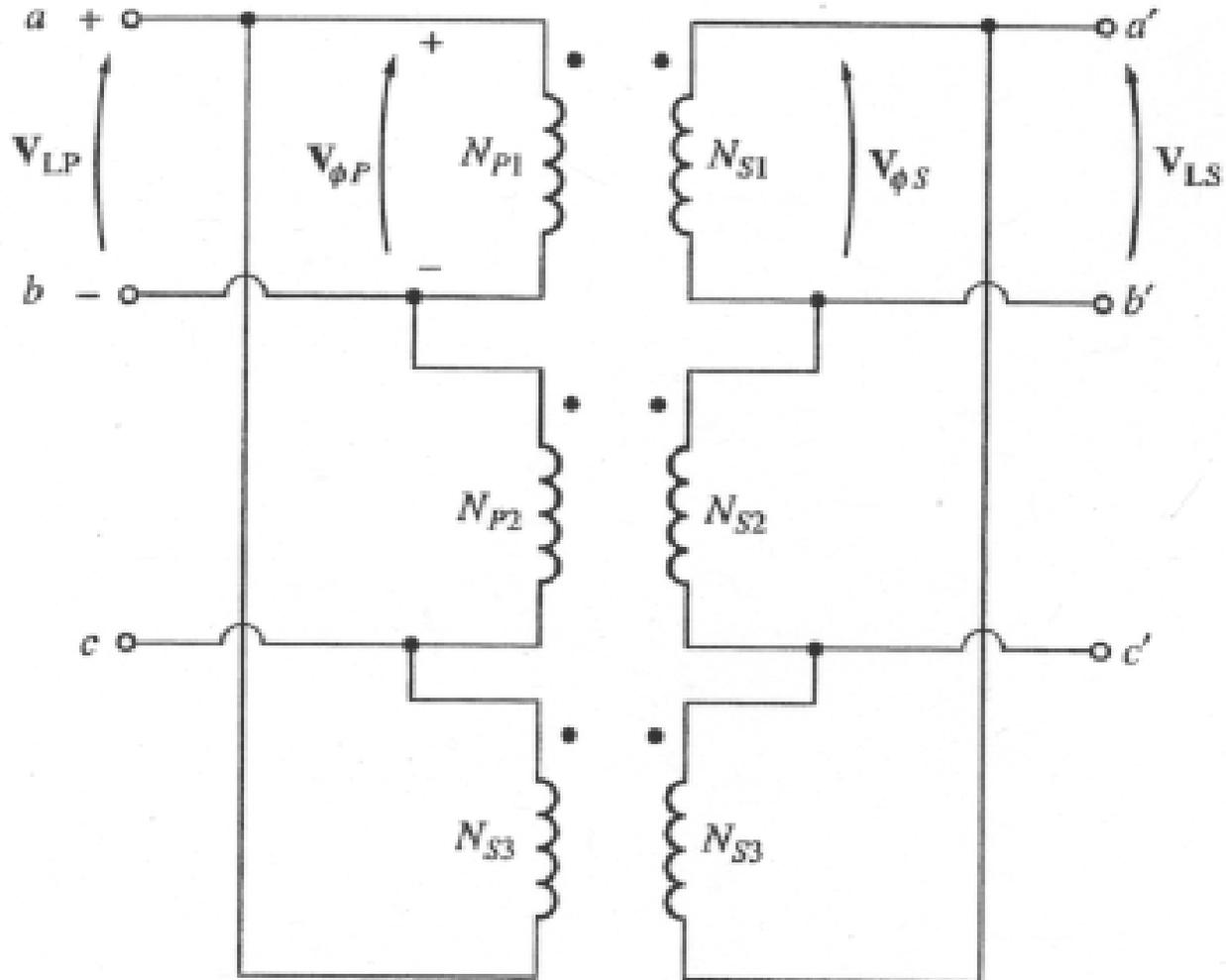


La configuration Δ - Δ





La configuration Δ - Δ





La configuration Δ - Δ

- Des 2 cotés la configuration est Δ on a donc : $V_L = V_\Phi$
- Le rapport de voltages du système est donc :

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\Phi P}}{V_{\Phi S}} = a$$

- La topologie Δ - Δ ne présente pas de problème de déphasage au secondaire ni de charge non-équilibrée.



Le T triphasé par unité de système

- Les principes et relations sont similaires à ceux du transformateur monophasé.
- Si on définit S_{base} comme la puissance totale du triphasé, la puissance de chacune des phases est $S_{i\phi} = S_{\text{base}}/3$ à partir de laquelle on dérive les reste des relations :

$$I_{\phi,\text{base}} = \frac{S_{1\phi,\text{base}}}{V_{\phi,\text{base}}} = \frac{S_{\text{base}}}{3 V_{\phi,\text{base}}}$$

$$Z_{\text{base}} = \frac{(V_{\phi,\text{base}})^2}{S_{1\phi,\text{base}}} = \frac{3(V_{\phi,\text{base}})^2}{S_{\text{base}}}$$



Le T triphasé par unité de système

- Les entités de base des lignes se dérivent à partir des précédentes en tenant compte des configurations en questions :

Pour Delta :

$$V_{L,base} = V_{\phi,base}$$

$$I_{\phi,base} = \sqrt{3} I_{base}$$

Pour Y :

$$V_{L,base} = \sqrt{3} V_{\phi,base}$$

$$I_{\phi,base} = I_{base}$$

- Dans les deux cas on a :

$$I_{L,base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} V_{L,base}}$$



Calibrage du voltage et de la fréquence

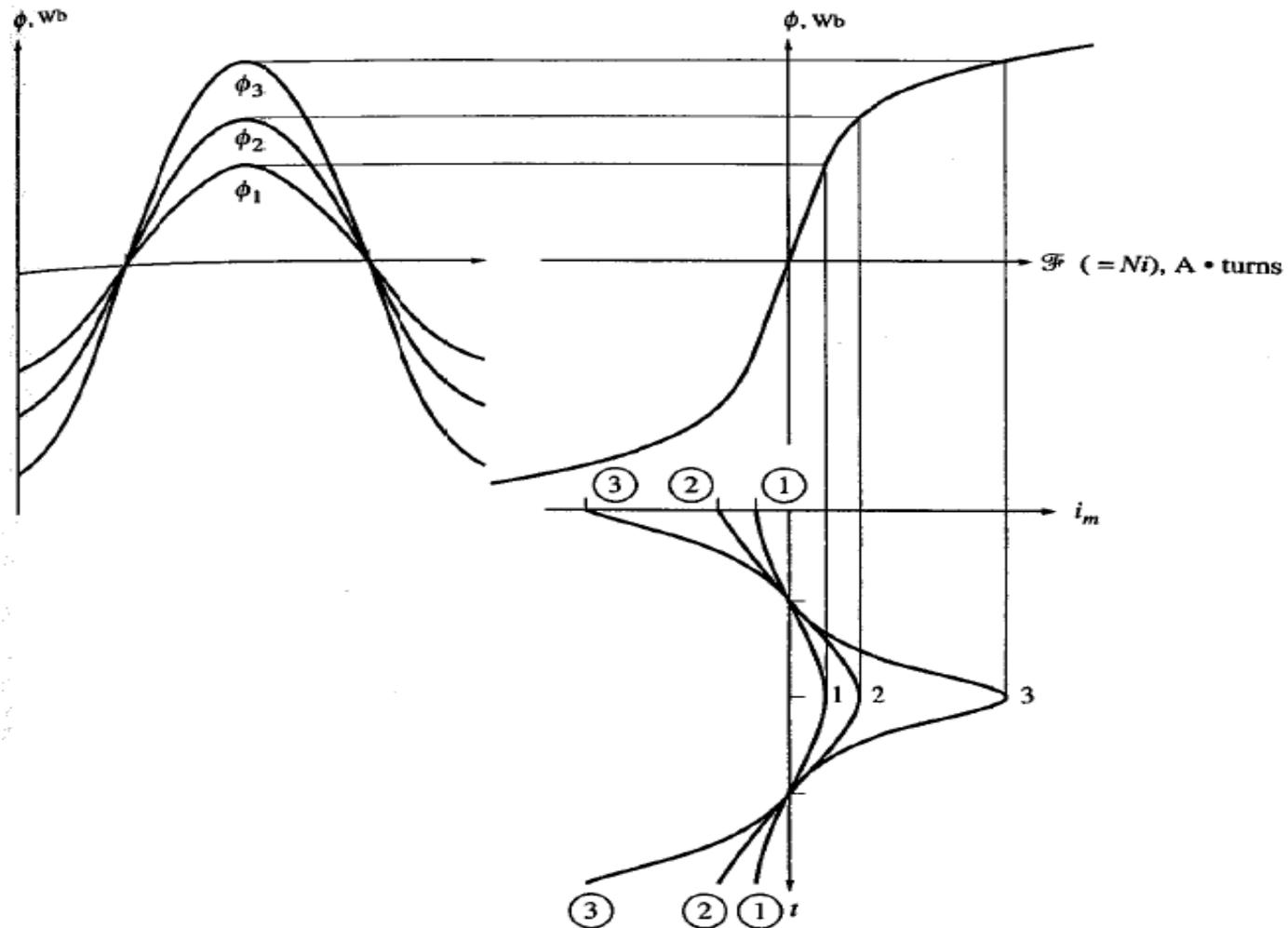
- Il est nécessaire de calibrer le voltage pour :
 - Protéger l'isolation de la bobine d'un survoltage excessif pour ne pas qu'elle se détruise.
 - La magnétisation et le courant induit.
- Si on a $v(t) = V_M \sin(\omega t)$ au primaire, le flux sera :

$$\phi(t) = \frac{1}{N_P} \int v(t) dt = \frac{1}{N_P} \int V_M \sin \omega t dt$$

$$\phi(t) = -\frac{V_M}{\omega N_P} \cos \omega t$$



Calibrage du voltage et de la fréquence





Calibrage du voltage et de la fréquence

- Une augmentation de 10% du voltage cause une augmentation du flux de 10% dans la marge linéaire.
- A l'extérieur de la marge linéaire du flux de magnétisation, une augmentation de 10% du flux correspond à une augmentation de plus de 10% du voltage.
- Donc le voltage maximum acceptable dépendra du maximum du courant de magnétisation permis qui aussi imposera la calibration de la fréquence du transformateur.