Chapitre 8

Transformateur

8.1 Introduction

Le transformateur permet de transférer de l'énergie (sous forme alternative) d'une source à une charge, tout en modifiant la valeur de la tension. La tension peut être soit augmentée ou abaissée selon l'utilisation voulue. Le changement d'un niveau de tension à un autre se fait par l'effet d'un champ magnétique.

Parmi les applications des transformateurs, on note :

1. Électronique :
   (a) alimentation à basse tension
   (b) adaptation d'impédance
2. Électrotechnique :
   (a) transformation de la tension pour le transport et la distribution d'électricité
   (b) alimentation à basse tension (par exemple, lampes hallogènes)
3. Mesure :
   (a) transformateurs d'intensité de courant
   (b) transformateurs de potentiel

Il y a deux types principaux de transformateurs, le type *cuirassé* et le type *à colonnes*. Dans le type cuirassé, on utilise un circuit magnétique à trois branches, et les enroulements sont autour de la branche centrale. Dans le type à colonnes, un circuit magnétique à deux colonnes est utilisé.

8.1.1 Principe de fonctionnement

Le transformateur est constitué de deux enroulements (ou plus) couplés sur un noyau magnétique, comme à la figure 8.1.

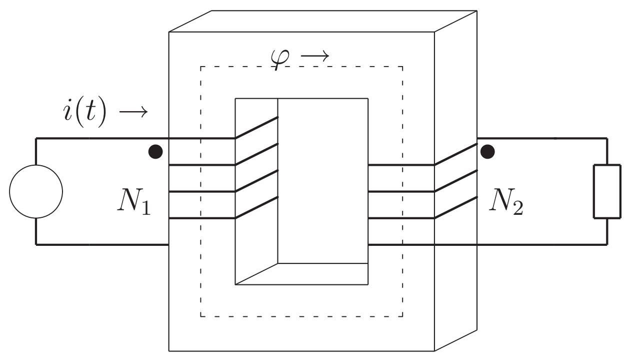


FIG. 8.1 – Le transformateur

Le coté de la source est appellé le **primaire**. Le coté de la charge est appellé le **secondaire**. Le flux φ est le flux mutuel. Le "$\bullet$" indique la polarité des tensions. Par convention, un courant qui entre dans un "$\bullet$" indique un flux positif.

Il faut remarquer qu'il n'existe aucune connexion électrique entre le primaire et le secondaire. Tout le couplage entre les deux enroulements est magnétique.

Lorsqu'on applique une tension alternative à la source, ceci crée un flux alternatif dans le noyau magnétique. Selon la loi de Faraday, ce flux crée des forces électromotrices dans les bobines. La force électromotrice induite est proportionnelle au nombre de tours dans la bobine et au taux de variation du flux. Selon le rapport du nombre de tours entre le primaire et le secondaire, le secondaire alimente la charge avec une tension différente de celle de la source.

8.1.2 Transformateur idéal

Si on reprend la bobine de la figure 8.1, on définit un transformateur idéal ayant les caractéristiques suivantes :

1. La résistance dans les fils (au primaire et secondaire) est nulle.
2. Le noyau magnétique est parfait ($\mu_r = \infty$, $\rho = 0$).

Si on étudie les implications de ces simplifications, on voit que la réluctance du noyau sera nulle, et donc il n'y a pas de fuite. Le flux est donc totalement contenu à l'intérieur du noyau. Le couplage magnétique entre le primaire et le secondaire est parfait ; tout le flux du primaire se rend au secondaire. [Un paramètre de couplage, k, est définit dans le cas non-idéal ; pour un transformateur idéal, $k = 1$.]

Le circuit équivalent du transformateur idéal est donné dans la figure 8.2 :

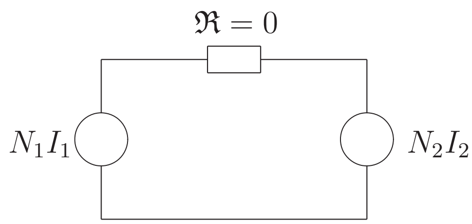


Fig. 8.2 – Circuit équivalent du transformateur idéal

Selon le circuit précédent, on a :

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = \mathfrak{R}\varphi = 0 \tag{8.1}$$

8.1.3 Fonctionnement à vide

Le fonctionnement à vide du transformateur est obtenu lorsqu'on ne branche aucune charge au secondaire. Ceci nous donne le circuit suivant :

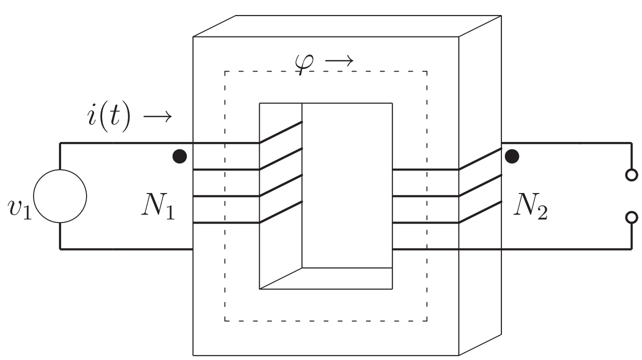


Fig. 8.3 – Le transformateur à vide

Dans ce cas, on obtient la relation suivante :

$$v_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \tag{8.2}$$

qu'on peut réarranger pour obtenir :

$$\varphi = \frac{1}{N_1} \int v_1 dt \tag{8.3}$$

Le flux magnétique total couplé au secondaire est proportionnel au nombre de tours N_2 :

$$\Lambda_2 = N_2 \varphi = N_2 \left\{ \frac{1}{N_1} \int v_1 dt \right\} \tag{8.4}$$

La force électromotrice induite dans la bobine secondaire est donnée par la loi de Faraday :

$$e_2 = \frac{d\Lambda_2}{dt} = \frac{N_2}{N_1} \frac{d}{dt} \left\{ \int v_1 dt \right\} = \frac{N_2}{N_1} v_1 \tag{8.5}$$

(e_2 représente la tension aux bornes du noyau, entre les deux bornes de l'enroulement. Si la résistance du fil de cuivre est nulle, $e_2 = v_2$). La force électromotrice induite dans le primaire est :

$$e_1 = \frac{d\Lambda_1}{dt} = \frac{d}{dt} \{n_1 \varphi\} = \frac{d}{dt} \left\{ N_1 \frac{1}{N_1} \int v_1 dt \right\} = v_1 \tag{8.6}$$

On obtient donc :

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \tag{8.7}$$

On définit le rapport de transformation a comme étant le rapport du nombre de tours du transformateur. Donc :

$$a = \frac{N_1}{N_2} \tag{8.8}$$

Le circuit équivalent du transformateur à vide est (figure 8.4) :

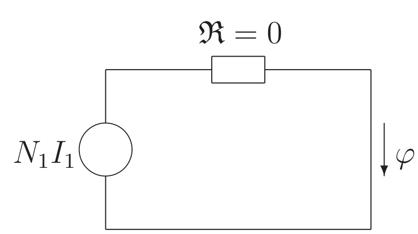


Fig. 8.4 – Circuit équivalent du transformateur à vide

Le flux magnétique φ est différent de zéro mais la force magnétomotrice de la bobine au primaire est nulle, puisque $N_1 I_1 = \mathfrak{R}\varphi = 0$. Le courant dans la bobine au primaire est nul.

8.1.4 Fonctionnement en charge du transformateur idéal

Lorsqu'on branche une charge au secondaire, avec une source sinusoïdale, on obtient le circuit suivant (figure 8.5) :

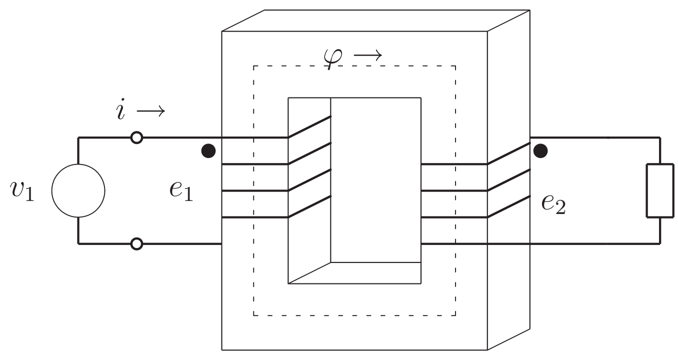


FIG. 8.5 – Le transformateur en charge

On obtient le circuit équivalent suivant (figure 8.6) :

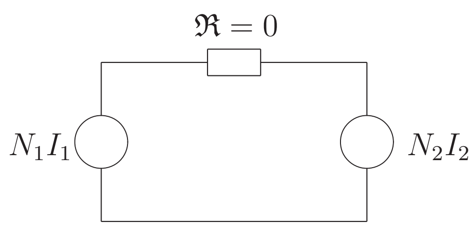


FIG. 8.6 – Circuit équivalent du transformateur idéal

La réluctance est nulle parce que la perméabilité est infinie. Donc, on obtient :

$$N_1I_1 - N_2I_2 = \mathfrak{R}\varphi = 0 \tag{8.9}$$

d'où on retrouve :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \tag{8.10}$$

La puissance instantanée est :

$$v_1i_1 = v_2i_2 \tag{8.11}$$

8.1.5 Modèle du transformateur idéal

Un transformateur peut être représenté par le circuit de la figure 8.7.

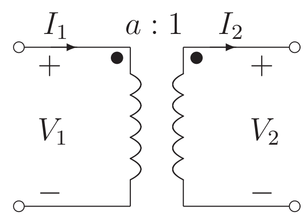


FIG. 8.7 – Circuit équivalent du transformateur idéal, en charge

Dans ce circuit, on a :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \tag{8.12}$$

8.1.6 Transformateur idéal en régime sinusoïdal permanent

Si on considère le cas où $v_1 = V_m \cos(\omega t)$, le flux dans le noyau sera :

$$\varphi(t) = \frac{1}{N_1}\int v_1 dt = \frac{1}{N_1}\int V_m \cos(\omega t) dt = \frac{V_m}{N_1 \omega}\sin(\omega t) = \varphi_m \sin(\omega t) \tag{8.13}$$

Le flux maximum dans le noyau est :

$$\varphi_m = \frac{V_m}{N_1 \omega} = 0.225\frac{V_1}{N_1 f} \tag{8.14}$$

où V_1 est la valeur efficace de v_1 et f est la fréquence de v_1.

En régime sinusoïdal permanent, on peut représenter les tensions et courants par des phaseurs. On obtient donc les relations suivantes :

$$V_1 = \frac{N_1}{N_2}V_2 = aV_2 \tag{8.15}$$

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1}I_2 = \frac{I_2}{a} \tag{8.16}$$

On sait que

$$V_2 = Z_2 I_2 \tag{8.17}$$

Si on relie la tension et le courant au primaire :

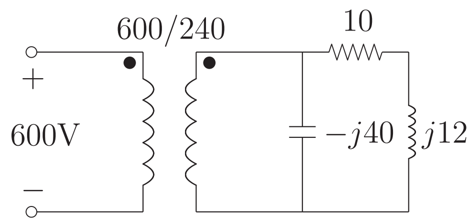
$$\frac{V_1}{I_1} = a^2\frac{V_2}{I_2} = a^2 Z_2 \tag{8.18}$$

Ceci veut dire que l'impédance vue au primaire est $a^2 Z_2$, ou a^2 fois l'impédance de la charge. D'une autre façon, on peut dire que le transformateur a transformé l'impédance par un facteur de a^2.

On peut utiliser cette dernière relation pour simplifier le circuit équivalent. On utilisera un exemple pour démontrer ce principe.

Exemple 1

Soit le circuit suivant.



On veut calculer le courant au primaire et le facteur de puissance vu par la source.

Le rapport de transformation est :

$$a = \frac{600}{240} = 2.5$$

L'impédance équivalente au secondaire est :

$$Z_2 = (-j40)//(10 + j12) = 21\angle(30.5^\circ)$$

L'impédance de charge vue au primaire est :

$$Z_2' = a^2 Z_2 = 2.5^2 \cdot 21\angle(30.5^\circ) = 131.25\angle(30.5^\circ)$$

Le courant au primaire :

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_2'} = \frac{600}{131.25\angle(30.5^\circ)} = 4.57\angle(-30.5^\circ)$$

Le facteur de puissance au primaire est :

$$F_p = \cos(30.5) = 0.862 \text{ arrière}$$

8.2 Transformateur réel

Le transformateur réel ne possède pas des caractéristiques parfaites comme le transformateur idéal. On doit tenir compte de :

1. Noyau magnétique. Le noyau possède une charactéristique B(H) non-linéaire, avec hystérésis, et une perméabilité non-infinie ($\mu_r \neq \infty$).
2. Bobinages. Les bobinages sont en cuivre, ayant une résistivité non-nulle ($\rho \neq 0$).

Compte tenu de ces caractéristiques, on peut déduire six sources de pertes dans le transformateur :

1. Puisque la perméabilité du noyau est non-infinie, la réluctance du noyau ne sera pas nulle. Il y a par conséquent des fuites de flux :
   (a) au primaire
   (b) au secondaire
2. On a déjà vu qu'il existait des fuites par hystérésis et des fuites par courants de Foucault.
3. La résistivité des fils de cuivre implique une résistance interne au primaire et au secondaire.

Les conséquences de ces phénomènes parasites sont :
- Le rendement du transformateur est inférieur à 100%.
- Le rapport de tension entre le primaire et le secondaire ne sera pas exactement égal au rapport du nombre de tours. La tension au secondaire variera aussi en fonction de la charge.

8.2.1 Circuit équivalent du transformateur réel

Avec tous les phénomènes parasites vus dans la section précédente, on peut représenter ces pertes par des éléments de circuit équivalent de la figure 8.8. On regardera ensuite la raison pour chacun de ces éléments.

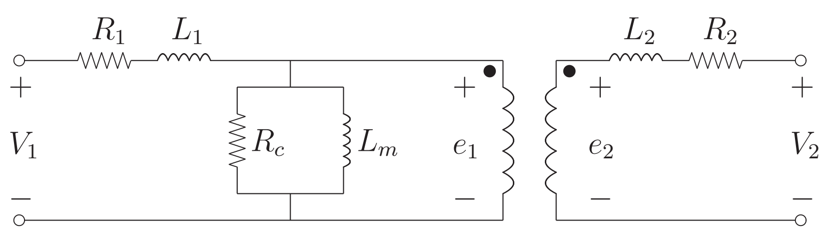


Fig. 8.8 – Circuit équivalent du transformateur

Effet de μ

Puisque la perméabilité du noyau est finie, la réluctance sera non-nulle. Par conséquent, pour créer le flux φ dans le noyau, il faut un courant i_m. Ceci peut être représenté par une inductance L_m, qu'on appelle une *inductance magnétisante*.

Pertes dans le noyau

On représente les pertes dans le noyau par une résistance R_c en parallèle avec l'inductance magnétisante L_m.

Fuites au primaire et secondaire

On représente ces pertes par des inductances L_1 et L_2, pour le primaire et le secondaire, respectivement.

Résistance des fils

On représente la résistance des fils de cuivre par des résistances R_1 et R_2 pour le primaire et le secondaire, respectivement.

8.2.2 Transformateur en régime sinusoïdal permanent

Si on branche un charge au secondaire, on a le circuit suivant (figure 8.9) :

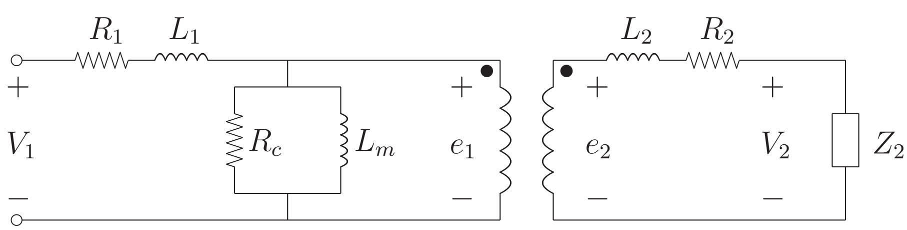


FIG. 8.9 – Circuit équivalent du transformateur avec charge au secondaire

Pour faciliter l'analyse du circuit, on ramène les impédances du secondaire au primaire. On obtient alors le circuit de la figure 8.10.

De ce circuit, on définit :

$$X_2' = a^2 X_2 \qquad R_2' = a^2 R_2 \qquad I_2' = \frac{I_2}{a} \qquad V_2' = a^2 V_2$$

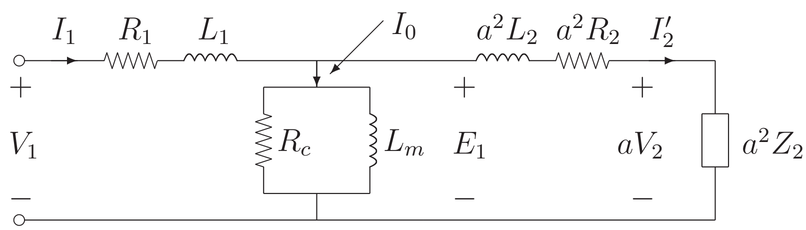


Fig. 8.10 – Circuit équivalent du transformateur vu du primaire.

On obtient alors les relations suivantes :

$$
\begin{aligned}
V_1 &= R_1I_1 + jX_1I_1 + E_1 \\
E_1 &= R_2^{'}I_2^{'} + jX_2^{'}I_2^{'} + V_2^{'} \\
I_0 &= I_c + I_m \\
I_1 &= I_0 + I_2^{'}
\end{aligned}
$$

On peut représenter ces relations par un diagramme vectoriel (figure 8.13).

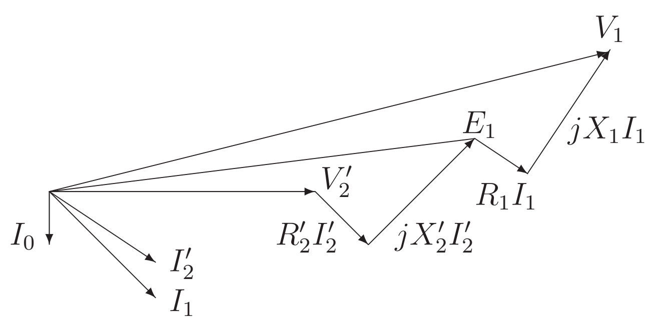


Fig. 8.11 – Diagramme vectoriel des tensions et courants du transformateur.

Dans un transformateur typique, le courant I_0 est seulement 2 à 4% de la valeur du courant I_1. Pour simplifier l'analyse, on peut donc négliger le courant I_0. On va donc supposer que le noyau a des pertes Fer négligeables et une perméabilité élevée.

On obtient alors le circuit suivant :

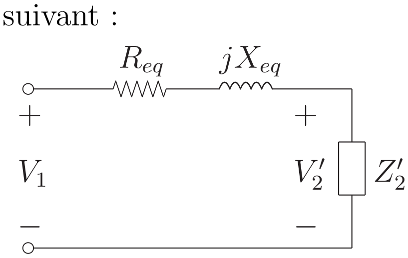


Fig. 8.12 – Circuit équivalent simplifié du transformateur.

où

$$R_{eq} = R_1 + R_2^{'} = R_1 + a^2 R_2 \tag{8.19}$$
$$X_{eq} = X_1 + X_2^{'} = X_1 + a^2 X_2 \tag{8.20}$$

On obtient alors les relations suivantes :

$$V_1 = R_{eq} I_1 + jX_{eq} I_1 + V_2^{'} \tag{8.21}$$
$$I_2^{'} = I_1 \tag{8.22}$$

Et ainsi un diagramme vectoriel simplifié.

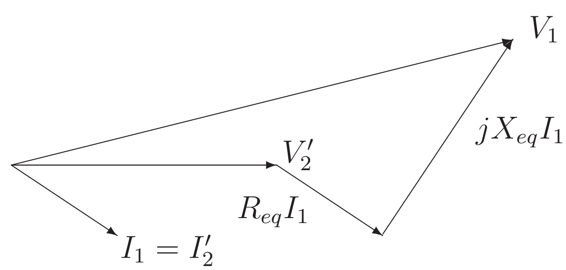


Fig. 8.13 – Diagramme vectoriel des tensions et courants du transformateur simplifié.

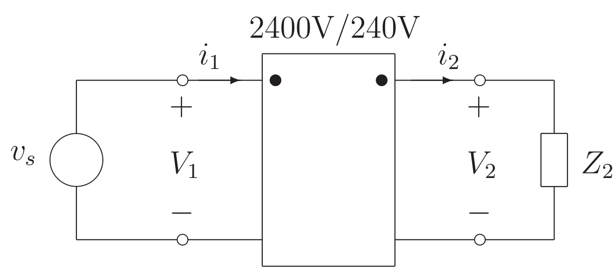
À l'aide des relations précédentes, on peut calculer les courants et tensions au primaire.

Exemple 2

Soit le transformateur suivant, 50kVA, 60Hz, 2400V/240V. Les paramètres du transformateur sont :

$$R_1 = 0.75\Omega, R_2 = 0.0075\Omega, X_1 = 1.0\Omega, X_2 = 0.01\Omega, X_m = 5000\Omega, R_c = 33333\Omega$$

On connecte une impédance $Z_2 = 1.2 + j0.8$ au secondaire.



On désire calculer le courant au primaire I_1 et la tension au secondaire V_2.

On utilise le modèle simplifié (R_c et $X_m >> R_1, R_2, X_1, X_2$).

Le rapport de transformation est $a = 10$.

La résistance équivalente est :

$$R_{eq} = R_1 + a^2 R_2 = 0.75 + (10^2)(0.0075) = 1.5\Omega$$

La réactance équivalente est :

$$X_{eq} = X_1 + a^2 X_2 = 1.0 + (10^2)(1.0) = 2.0\Omega$$

L'impédance de la charge vue au primaire est :

$$Z_2' = a^2 Z_2 = (10^2)(1.2 + j0.8) = 120 + j80\Omega$$

Le courant au primaire est donné par :

$$I_1 = \frac{V_1}{R_{eq} + jX_{eq} + Z_2'} = \frac{2400}{1.5 + j2 + 120 + j80} = 16.37\angle(-34°)$$

La tension V_2' est :

$$V_2' = V_s \frac{Z_2'}{R_{eq} + jX_{eq} + Z_2'} = 2361.4\angle(-0.32°)$$

La tension au secondaire est :

$$V_2 = \frac{V_2'}{a} = 236.14\angle(-0.32°)$$

8.2.3 Notion de charge d'un transformateur

La charge d'un transformateur est définie en fonction du courant au secondaire, I_2. La différence entre la *charge* d'un transformateur et *l'impédance de charge* d'un transformateur est donnée dans le tableau suivant :

Charge	**Courant au secondaire $\lvert I_2\rvert$**	**Impédance de charge $\lvert Z_2\rvert$**
Pleine charge	I_2 (nominal)	Z_2 (nominal)
3/4 charge	$0.75I_2$ (nominal)	$1.33Z_2$ (nominal)
1/2 charge	$0.50I_2$ (nominal)	$2Z_2$ (nominal)
1/4 charge	$0.25I_2$ (nominal)	$4Z_2$ (nominal)
Sans charge (à vide)	0	∞

Tension au secondaire en fonction de la charge

Dans un transformateur, la tension au secondaire varie selon la nature de la charge.
- Charge résistive : la tension V_2' et le courant I_2' sont en phase.
- Charge inductive : le courant I_2' est en retard par rapport à la tension V_2'.
- Charge capacitive : le courant I_2' est en avance par rapport à la tension V_2'.

8.2.4 Rendement d'un transformateur

Le rendement (η) d'un transformateur est définit comme le rapport de la puissance active au secondaire sur la puissance active au primaire.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \tag{8.23}$$

Ceci donne

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{V_2 I_2 \cos\phi_2}{V_1 I_1 \cos\phi_1} = \frac{V_2 I_2 \cos\phi_2}{V_2 I_2 \cos\phi_2 + \text{Pertes(Fer)} + \text{Pertes(Cuivre)}} && (8.24) \\ &= \frac{V_2 I_2 \cos\phi_2}{V_2 I_2 \cos\phi_2 + \frac{V_1^2}{R_c} + R_{eq}(I_2')^2} && (8.25) \\ &= \frac{V_2' I_2' \cos\phi_2}{V_2' I_2' \cos\phi_2 + \frac{V_1^2}{R_c} + R_{eq}(I_2')^2} && (8.26) \end{aligned}$$

Pour trouver le rendement maximum, on dérive η par rapport au courant I_2', on trouve que :

$$\frac{d\eta}{dI_2'} = 0 \;\; \text{lorsque} \;\; \frac{V_1^2}{R_c} = R_{eq}(I_2')^2 \tag{8.27}$$

Ceci veut dire que *le rendement d'un transformateur est maximum lorsque les pertes Fer sont égales aux pertes Cuivre.*

8.2.5 Facteur de régulation d'un transformateur

Le facteur de régulation d'un transformateur indique la variation relative de la tension au secondaire en fonction de la charge.

$$reg = \frac{V_2(\text{à vide}) - V_2(\text{charge nominale})}{V_2(\text{charge nominale})} \tag{8.28}$$

Dans certains cas, on fixe la tension au secondaire à sa valeur nominale, et alors la tension au primaire est plus élevée que la valeur nominale. Dans ce cas, le facteur de régulation est :

$$reg = \frac{V_1(\text{charge}) - V_1(\text{à vide})}{V_1(\text{à vide})} \tag{8.29}$$

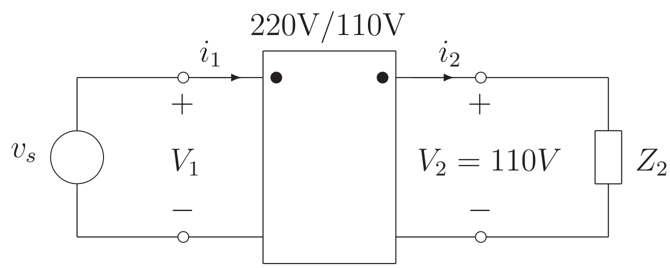
EXEMPLE 3

Un transformateur monophasé 5kVA, 60Hz, 220V/110V possède les caractéristiques suivantes :

$$R_1 = 0.24\Omega, R_2 = 0.06\Omega, X_1 = 0.6\Omega, X_2 = 0.15\Omega$$

Les pertes Fer à tension nominale sont 60W. On suppose que le courant de magnétisation est négligeable.

Une charge nominale avec un facteur de puissance de 0.88 arrière est branchée au secondaire.



Calculer :
- la tension de la source au primaire
- le rendement du transformateur
- le facteur de régulation

Le courant nominal au secondaire est :

$$I_{2nom} = \frac{5000}{110} = 45.455\text{A}$$

L'amplitude de la charge est :

$$|Z_2| = \frac{110}{45.455} = 2.42\Omega$$

L'angle de l'impédance de la charge est :

$$\phi = \cos^{-1}(0.88) = 28.26°$$

On utilise le circuit équivalent simplifié du transformateur. Alors :

$$R_{eq} = R_1 + a^2 R_2 = 0.24 + (2^2)(0.06) = 0.48\Omega$$
$$X_{eq} = X_1 + a^2 X_2 = 0.60 + (2^2)(0.15) = 1.20\Omega$$

La tension de la source au primaire est :

$$V_1 = \frac{Z_2' + R_{eq} + X_{eq}}{Z_2'} V_2' = 243.283\angle(4.436°)$$

Les pertes Cuivre sont :

$$P_{Cu} = R_{eq} I_{1nom}^2 = 0.48(22.727^2) = 247.93\text{W}$$

La puissance active à la charge :

$$P_2 = F_p \cdot S = 0.88(5000) = 4400\text{W}$$

Le rendement est :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Cu} + P_{Fe}} = \frac{4400}{4400 + 60 + 247.93} = 0.935$$

Le facteur de régulation est :

$$reg = \frac{243.283 - 220}{220} = 0.106$$

8.3 Détermination des paramètres du transformateur

On peut déterminer les paramètres physiques d'un transformateur à l'aide de trois tests expérimentaux.

a. Essai à vide

On applique la tension nominale au primaire du transformateur.

On mesure :
- v_{1v}, la tension au primaire (avec un voltmètre AC)
- i_{1v}, le courant à vide (avec un ampèremètre AC)
- p_{1v}, la puissance dissipée à vide (avec un wattmètre AC)

À l'aide de ces mesures, on peut déterminer :
- La polarité du transformateur.

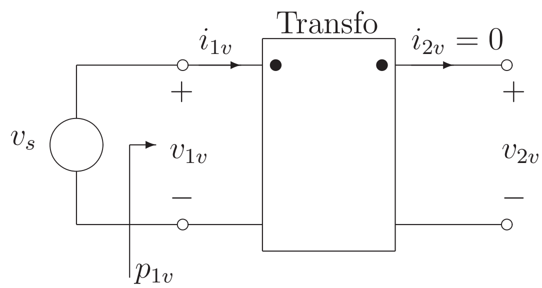


FIG. 8.14 – Essai à vide d'un transformateur

  - si v_{1v} et v_{2v} sont en phase, la polarité est bonne.
  - sinon, inverser.
- rapport de transformation a.

$$a = \frac{e_1}{e_2} = \frac{e_1}{v_2} = \frac{v_{1v}}{v_{2v}} \tag{8.30}$$

- valeurs de X_m et R_f
  - On suppose que $X_m >> X_1$ et $R_c >> R_1$, donc :

$$p_{1v} = \frac{v_{1v}^2}{R_c} \Rightarrow R_c = \frac{v_{1v}^2}{p_{1v}} \tag{8.31}$$

  - $s_{1v} = v_{1v} \cdot i_{1v}$

$$Q_{1v} = \sqrt{s_{1v}^2 - p_{1v}^2} = \sqrt{(v_{1v} i_{1v}^*) - p_{1v}^2} \tag{8.32}$$

$$Q_{1v} = \frac{v_{1v}^2}{X_m} \Rightarrow X_m = \frac{v_{1v}^2}{\sqrt{(v_{1v} i_{1v}) - p_{1v}^2}} \tag{8.33}$$

b. Essai en court-circuit

On ajuste la tension v_s pour obtenir un courant i_{1cc} qui est le courant nominal au primaire.

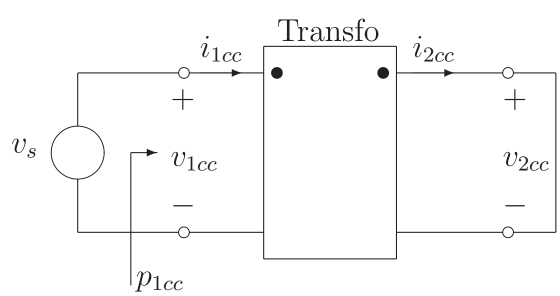


FIG. 8.15 – Essai en court-circuit d'un transformateur

On mesure :

- v_{1cc}, la tension au primaire (avec un voltmètre AC)
- i_{1cc}, le courant au primaire (avec un ampèremètre AC)
- p_{1cc}, la puissance dissipée à vide (avec un wattmètre AC)

Pour obtenir les paramètres, on suppose que R_c et X_m ont des effets négligeables. On obtient alors :

- Les résistances $R_{eq} = R_1 + a^2 R_2$.

$$p_{1cc} = i_{1cc}^2 R_{eq} \;\Rightarrow\; R_{eq} = \frac{p_{1cc}}{i_{1cc}^2} \tag{8.34}$$

- Les réactances équivalentes $X_{eq} = X_1 + a^2 X_2$.

$$Q_{1cc} = \sqrt{s_{1cc}^2 - p_{1cc}^2} = \sqrt{(v_{1cc} i_{1cc})^2 - p_{1v}^2} \tag{8.35}$$

$$Q_{1cc} = i_{1cc}^2 X_{eq} \;\Rightarrow\; X_{eq} = \frac{\sqrt{(v_{1cc} i_{1cc})^2 - p_{1cc}^2}}{i_{1cc}^2} \tag{8.36}$$

On suppose habituellement que $X_1 = X_2'$.

c. Essai en courant continu

Si on applique une tension v_c continue au primaire du transformateur, on obtient que :

$$R_1 = \frac{v_c}{i_1}$$

où i_1 est le courant au primaire. On peut alors trouver R_2' :

$$R_2' = R_{eq} - R_1$$

Exemple 4

Soit un transformateur monophasé 50kVA, 60Hz, 2400V/240V.

Les tests en circuit ouvert ont donné (secondaire alimenté) : 240V, 5.24A, 225W.
Les tests en court-circuit ont donné (primaire alimenté) : 55V, 20.833A, 720W.

Déterminer les paramètres du modèle de ce transformateur.

Test en circuit ouvert

$$R_c \text{ (au secondaire)} = \frac{V^2}{P} = \frac{240^2}{225} = 256\Omega$$
$$R_c \text{ (au primaire)} = a^2 R_c = 10^2(256) = 25.6\text{k}\Omega$$

Puissance apparente :

$$S_{1v} = VI = 240 \times 5.24 = 1258\text{W}$$

Puissance réactive :

$$Q^2 = 1258^2 - 225^2 \rightarrow Q = 1237\text{VAR}$$

La réactance est :

$$X_m \text{ (au secondaire)} = \frac{V^2}{Q} = \frac{240^2}{1237} = 46.553\Omega$$

$$X_m \text{ (au primaire)} = a^2 X_m = 10^2(46.553) = 4655.3\Omega$$

Test en court circuit

$$R_{eq} = \frac{P}{I^2} = \frac{720}{20.833^2} = 1.664\Omega$$

La puissance apparente est :

$$S_{1cc} = VI = 55 \times 20.833 = 1146\text{VA}$$

La puissance réactive est :

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{1146^2 - 720^2} = 891\text{VAR}$$

La réactance est :

$$X_{eq} = \frac{Q}{I^2} = \frac{891}{20.833^2} = 2.055\Omega$$

8.3.1 Capacité en puissance d'un transformateur

Les plaques signalétiques des transformateurs ressemblent typiquement à :

Transformateurs Cormier, Inc. 25 kVA, 600/120V 60 Hz, Z = 5%, 50°C

La capacité en puissance du transformateur (en VA, kVA ou MVA), est la *puissance apparente maximale* de sa charge. Cette capacité est déterminée principalement par l'élévation de la température du transformateur, causée par les pertes Joules dans les bobinages et par les pertes Fer (hystérésis et courants induits) dans le noyau.

Pour la température maximale d'opération, on indique parfois une température sur le transformateur, comme 50°C dans l'exemple ci-haut. Ce 50°C représente l'augmentation de la température due aux pertes, à une température d'opération de 40° et une utilisation aux conditions nominales. On limite habituellement la température d'opération en dessous de 120°C.

Pour déterminer la capacité en puissance d'un transformateur, on doit déterminer la tension et le courant nominaux.

Capacité en tension

La capacité en tension V_{nom} est limitée par la densité de flux maximale B_{max}. Pour un transformateur, on utilise habituellement B_{max} entre 1.3T et 1.6T. Alors :

$$B_{max} = \frac{\varphi_{max}}{A} = \frac{\left(\frac{V_m}{N\omega}\right)}{A} = \frac{V_m}{N\omega A} = \frac{\sqrt{2}V_{nom}}{N\omega A}$$

où N est le nombre de tours, $\omega = 2\pi f$ et A est la section du circuit magnétique. Alors :

$$V_{nom} = \frac{B_{max}N\omega A}{\sqrt{2}}$$

Capacité en courant

La capacité en courant I_{nom} est fixée par la densité de courant J_{nom} dans le fil des bobinages. Une valeur de J_{nom} entre 3A/mm^2 et 4A/mm^2 est habituellement utilisée. Donc :

$$I_{nom} = J_{nom}S$$

où S est la section du fil.

Capacité en puissance

La capacité en puissance est le produit des capacités en tension et en courant :

$$S_{nom} = V_{nom}I_{nom}$$

8.4 Autotransformateur

L'autotransformateur est constitué d'un enroulement primaire et secondaire bobinés sur le même circuit magnétique. Les deux enroulements ont une partie commune, et il n'y a pas d'isolation galvanique entre les deux enroulements.

Il y a deux configurations possibles pour l'autotransformateur : élévateur de tension, ou abaisseur de tension.

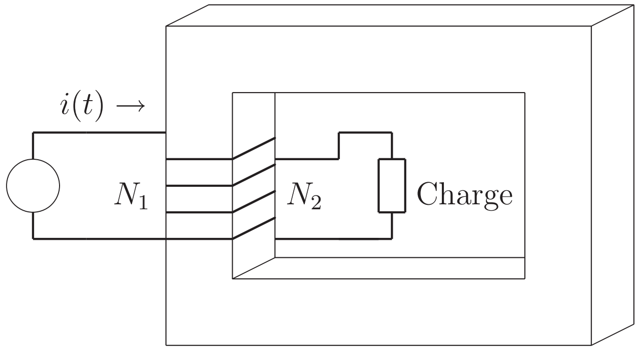
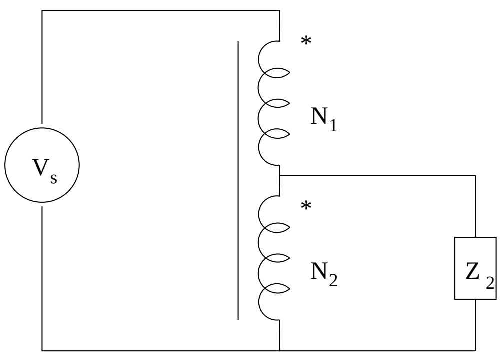
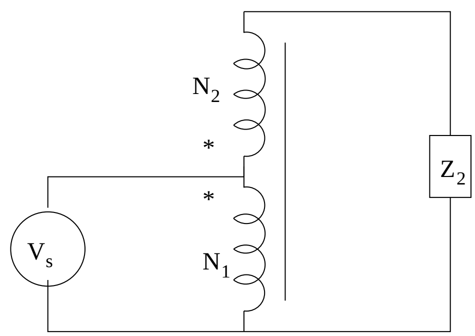


FIG. 8.16 – Autotransformateur

8.4.1 Autotransformateur abaisseur de tension

Il y deux configurations possibles :





$$a = \frac{N_1 + N_2}{N_2}$$

$$a = \frac{N_1}{N_1 - N_2}$$

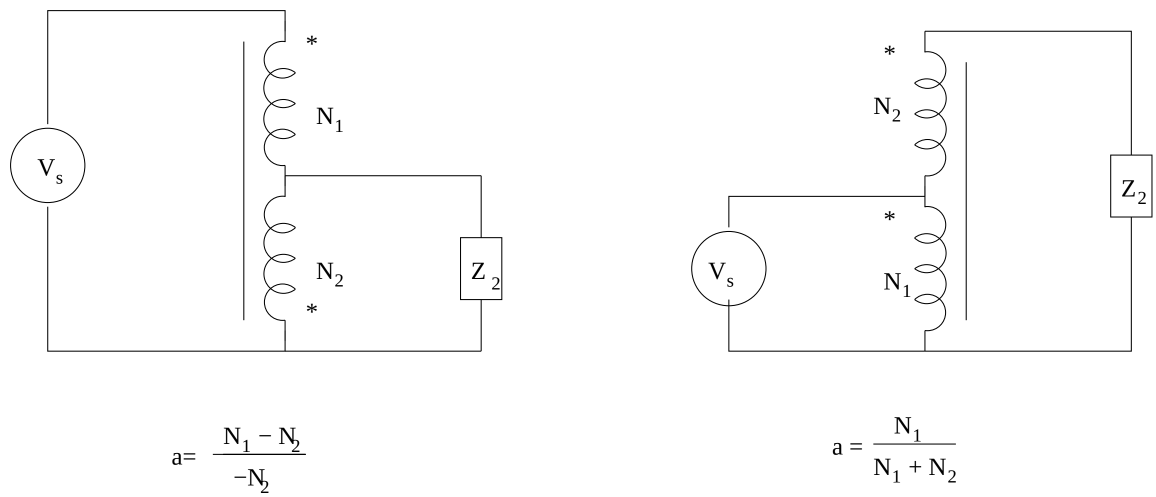
8.4.2 Autotransformateur élévateur de tension

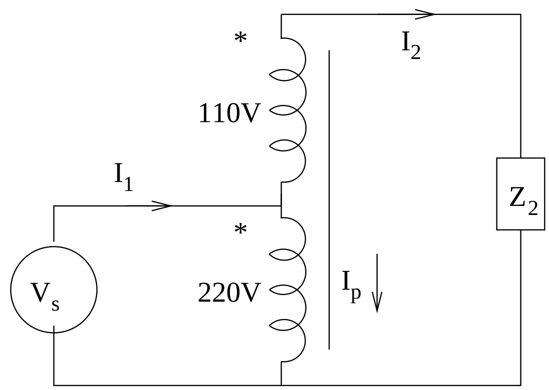
Il y deux configurations possibles :

EXEMPLE 5

Considérons le même transformateur 5kVA, 60Hz, 220V/110V utilisé à l'exemple 3. On connecte le primaire et le secondaire pour réaliser un autotransformateur 220V/330V. On branche une charge nominale au secondaire, ayant un facteur de puissance de 0.85 arrière.

Calculer le rendement.





Le courant au secondaire est le même, 45.455A. La capacité de l'autotransformateur est 330×45.455 = 15000VA.

La puissance active délivrée à la charge est :

$$P = 15000 \times 0.85 = 12750\text{W}$$

Les pertes Fer et Cuivre sont les mêmes, puisque le transformateur fonctionne dans les même conditions.

Le rendement est :

$$\eta = \frac{12750}{12750 + 60 + 247.9} = 0.976$$

Remarque : Avec le même bobinage et le même noyau, on a réalisé un transformateur ayant une plus grande capacité et un rendement supérieur.