

Chapitre 3 : Le transformateur

I / Présentation

1. *Constitution*
2. *Symbole et convention*

II / Transformateur parfait en sinusoïdal

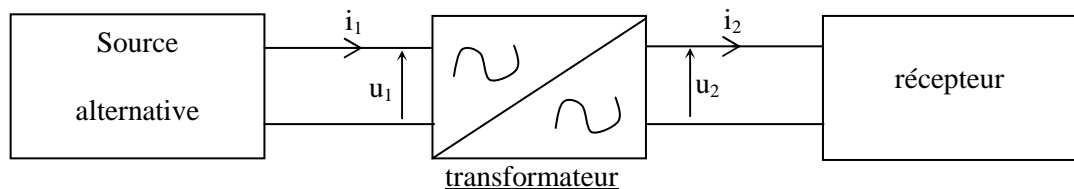
1. *relation entre les tensions*
2. *formule de Boucherot*
3. *les intensités*
4. *les puissances*

III / Transformateur réel

1. *plaque signalétique*
2. *les pertes*
 - a) *pertes par effet Joule*
 - b) *pertes magnétiques*
 - c) *fuites magnétiques*
 - d) *modèle équivalent*
3. *modèle du transformateur ramené au secondaire*
 - a) *hypothèse de Kapp*
 - b) *modèle de Thévenin*
4. *détermination des pertes et du modèle*
 - a) *essai à vide*
 - b) *essai en court circuit*
5. *rendement*
6. *chute de tension en charge*

I / Présentation

- Le transformateur est une machine statique permettant, en alternatif, la modification de certaines grandeurs (tension, intensité) sans changer leur fréquence.
- Il assure la transmission de la puissance avec un excellent rendement.

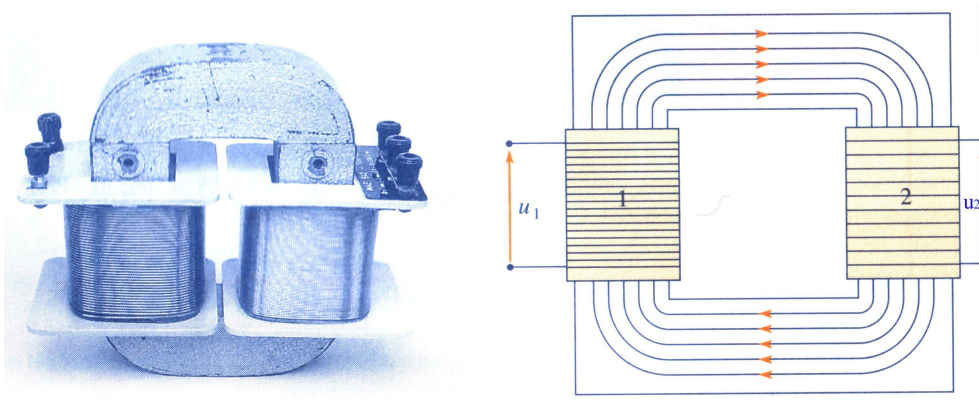


- U_1 et U_2 sont les valeurs efficaces de u_1 et u_2 :
 - . Si $U_2 > U_1$, le transformateur est élévateur de tension
 - . Si $U_2 < U_1$, il est abaisseur de tension
 - . Si $U_2 = U_1$, il assure l'isolement électrique entre la source et la charge.

1. Constitution

Le transformateur est un quadripôle constitué d'un circuit magnétique fermé sur lequel on a bobiné deux enroulements électriquement indépendants.

La tension sinusoïdale u_1 au primaire crée un champ magnétique variable qui, guidé par le noyau, traverse l'enroulement secondaire. Celui-ci est donc le siège d'une tension induite u_2 .



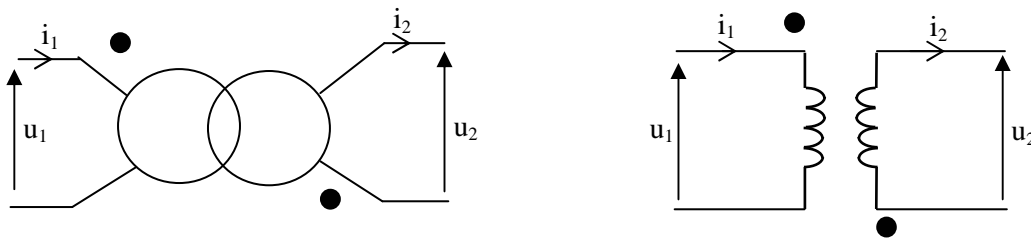
Doc 1

L'enroulement primaire comporte N_1 spires et le secondaire N_2 .

Le primaire reçoit de la puissance du réseau : il se comporte comme un récepteur (convention récepteur)

Le secondaire fournit de la puissance à la charge : il se comporte comme un générateur (convention générateur)

2. symboles



Les bornes sont homologues, repérées par des points sur le schéma, si i_1 entrant par l'une et i_2 entrant par l'autre créent dans le circuit magnétique des champs magnétiques de même sens.

II / Transformateur parfait en sinusoïdal

1. relation entre les tensions

$$\frac{u_2}{u_1} = -\frac{e_2}{e_1} = -\frac{N_2}{N_1} = -m \quad \text{où } m : \text{ rapport de transformation}$$

en complexe : $\underline{U}_2 / \underline{U}_1 = -m$

en valeur efficace : $U_2 / U_1 = m$

2. formule de Boucherot

$$E_1 = 4,44 N_1 B_{\max} S f$$

E_1 : valeur efficace de la fém e_1 (V)

N_1 : nombre de spire au primaire

B_{\max} : valeur max du champ magnétique dans le circuit (Tesla T)

f : fréquence d'alimentation (Hz)

S : section du circuit magnétique (m^2)

3. les intensités

De même,

En valeurs instantanées : $i_1 = -m \cdot i_2$

en complexe : $\underline{I}_1 = -m \cdot \underline{I}_2$

en valeur efficace : $I_2 / I_1 = 1/m$

4. les puissances

puissances apparentes : $S_1 = U_1 \times I_1 = \frac{U_2}{m} \times m \times I_2 = U_2 \times I_2$ donc $S_1 = S_2$

puissances actives : d'après la définition du transformateur parfait $P_1 = P_2$
 $P_1 = S_1 \times \cos \varphi_1 = S_2 \times \cos \varphi_2$

puissances réactives : $Q_1 = S_1 \times \sin \varphi_1 = S_2 \times \sin \varphi_2 = Q_2$

Exercice : Le primaire d'un transformateur parfait, de rapport de transformation $m=0,4$ est alimenté par une tension sinusoïdale de valeur efficace 220V et de fréquence 50Hz. Le secondaire alimente une bobine de résistance 10Ω et d'inductance 0,03H
 Calculer les différentes puissances fournies par le secondaire.

$$U_2 = m \cdot U_1 = 0,4 \times 220 = 88 \text{ V}$$

$$Z_2 = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2} = 13,7 \Omega$$

$$I_2 = U_2 / Z_2 = 88 / 13,7 = 6,4 \text{ A}$$

$$\tan \varphi_2 = 2\pi f L / R = 0,942 \Rightarrow \varphi_2 = 43^\circ$$

Donc :

$$S_2 = U_2 \cdot I_2 = 563 \text{ VA}$$

$$P_2 = S_2 \cdot \cos \varphi_2 = 410 \text{ W}$$

$$Q_2 = S_2 \cdot \sin \varphi_2 = 386 \text{ VAR}$$

III / Transformateur réel

1. plaque signalétique

Elle indique : U_1 : tension d'alimentation du primaire
 S_n : puissance apparente nominale
 U_{20} : tension d'utilisation à vide du secondaire
 f : fréquence d'utilisation

on peut alors calculer : le rapport de transformation $m = U_{20} / U_1$
 les intensités des courants nominaux $I_{1n} = S_n / U_1$ et $I_{2n} = S_n / U_{20}$

2. les pertes

le transformateur réel est un transformateur parfait avec des pertes (Joule, magnétique, fuites)

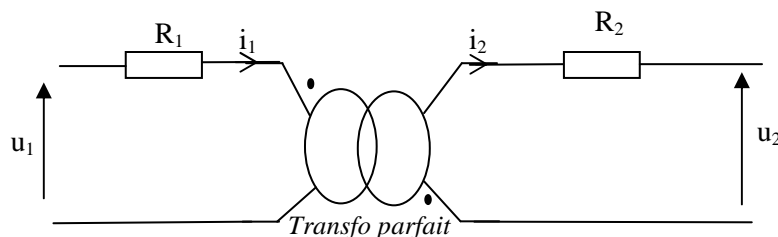
- les pertes par effet Joule dans les enroulements
- les pertes magnétiques (Foucault, hystérésis)
- les fuites magnétiques : toutes les lignes de champ ne sont pas canalisées par le circuit magnétique fermé.

a) pertes par effet Joule

- elles se produisent dans les résistances R_1 et R_2 des enroulements traversés par les courants

$$i_1 \text{ et } i_2 : \quad P_{\text{Joule}} = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2$$

- on ajoute donc sur le schéma équivalent du transfo parfait, les résistances R_1 et R_2



b) pertes magnétiques

Le circuit magnétique est le siège de pertes magnétiques :

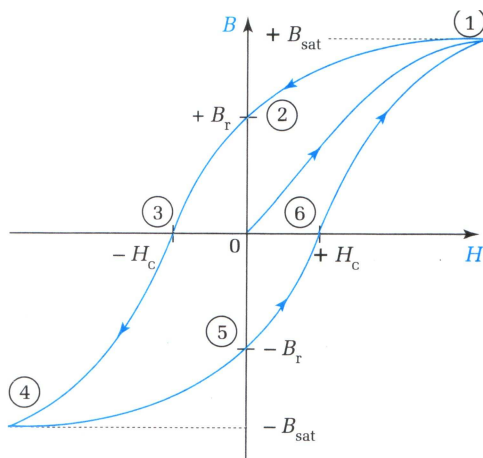
- pertes par courants de Foucault (\Rightarrow échauffement).
- Pertes par hystérésis.

\Rightarrow on limite les pertes par courants de Foucault, en utilisant un circuit magnétique feuilleté (les courants passent plus mal)

par hystérésis, en utilisant des aciers doux (cycle hystérésis étroits)

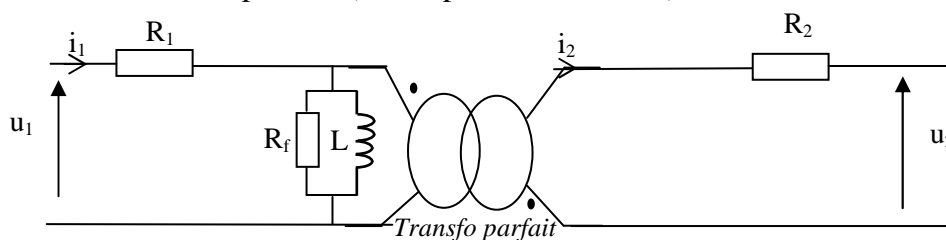
Rappels magnétiques

- Courants de Foucault : courants induits dans un conducteur soumis à un champ variable.
- Hystérésis d'un matériaux :



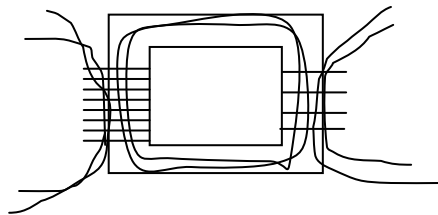
La désaimantation se fait avec un retard par rapport à l'aimantation.

- Les pertes magnétiques dépendent de U_1 et f .
- ces pertes se produisent dans le circuit magnétique, dès que le primaire est alimenté.
- Ces pertes se traduisent par une consommation supplémentaire de puissance réactive (comme une inductance pure : L_F) et de puissance active (comme une résistance R_F)



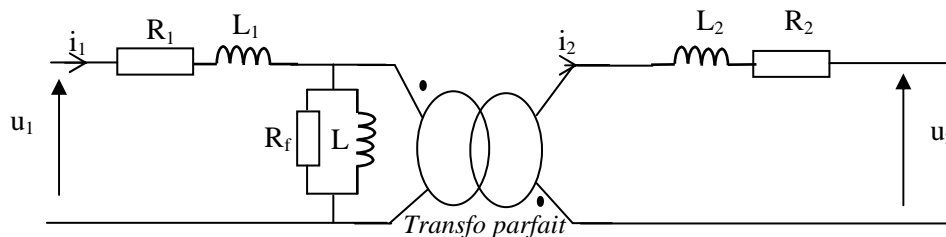
c) fuites magnétiques

toutes les lignes de champ ne sont pas canalisées par le circuit magnétique, certaines se referment dans l'air.



Donc on ajoute L_1 et L_2 sur le schéma précédent, et on obtient le modèle équivalent définitif

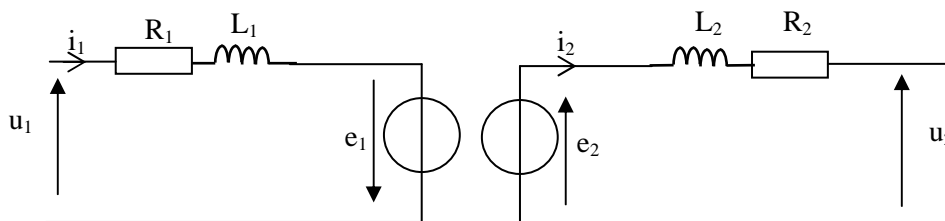
d) modèle équivalent



3. modèle du transformateur ramené au secondaire

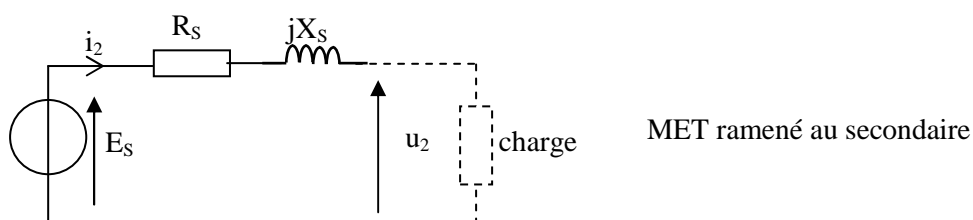
a) hypothèse de Kapp

on néglige i_{10} devant i_1 et i_2 au fonctionnement nominal



Alors comme pour un transfo parfait, on a : $I_1 = m \cdot I_2$

b) Modèle de Thévenin



Avec $\underline{Z}_s = \underline{R}_s + j \cdot \underline{X}_s$ où $\begin{cases} R_s = R_2 + m^2 R_1 \\ X_s = X_2 + m^2 X_1 \end{cases}$

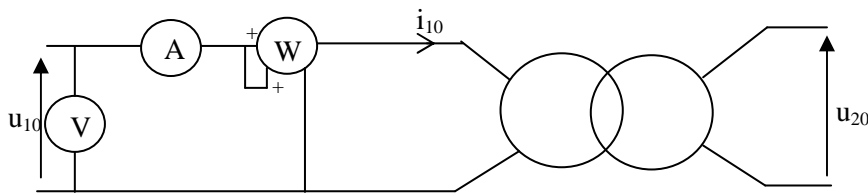
R_S : résistance du transfo ramenée au secondaire
(rend compte des résistances des enroulements)

X_S : réactance du transfo ramenée au secondaire
(rend compte des fuites magnétiques)

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_S - \underline{Z}_S \cdot \underline{I}_2$$

4. détermination des pertes et du modèle

a) essai à vide



- On se place à U_1 nominal
- Le wattmètre mesure la puissance absorbée à vide par le transfo : P_{10}
- $P_{10} = P_{Fe} + R_1 I_{10}^2$

Perte
Fer

Perte
joule à
vide

or I_{10} très faible (car à vide donc I_2 nul)

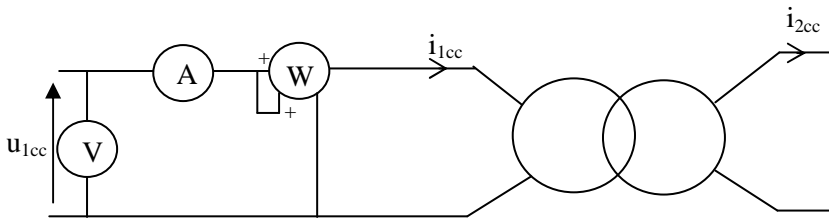
donc $R_1 I_{10}^2 \ll P_{Fe}$

Et finalement

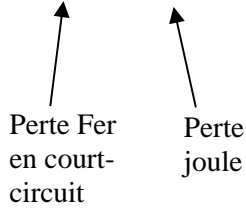
$$P_{10} = P_{Fe}$$

- l'essai à vide permet de mesurer les pertes Fer
- les pertes Fer dépendent de U_1
- A vide : $I_2 = 0 \Rightarrow \underline{E}_S = \underline{U}_{20}$

b) essai en court circuit



- on se place à U_{1cc} réduite, de façon à avoir $i_{2cc} = i_{2n}$ (valeur nominale)
- le wattmètre mesure la puissance absorbée en court-circuit par le transfo : P_{1cc}
- $P_{1cc} = P_{Fecc} + P_{Joule}$



or U_{1cc} faible
donc P_{Fecc} négligeable

finalement $P_{1cc} = P_{Joule}$

- l'essai en court-circuit permet de mesurer les pertes Joule

- En court circuit : on détermine :

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_s = m^2 \frac{U_{1cc}}{I_{1cc}} \\ R_s = \frac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2} \end{array} \right.$$

en effet : $P_{1cc} = R_1 I_{1cc}^2 + R_2 I_{2cc}^2$ (on néglige les pertes Fer)
 $= m^2 R_1 I_{2cc}^2 + R_2 I_{2cc}^2$ car $I_{1cc} = m \cdot I_{2cc}$
 $= (m^2 R_1 + R_2) I_{2cc}^2$

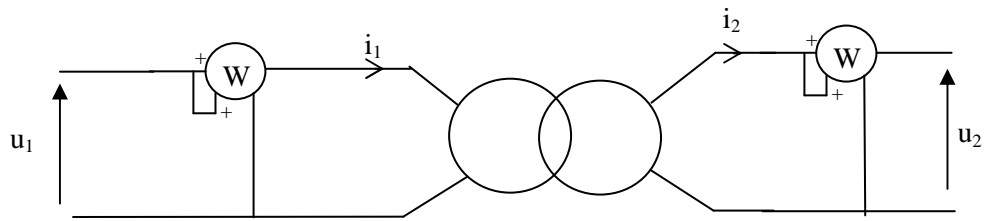
donc $R_s = P_{1cc}/I_{2cc}^2$

et donc on en déduit :

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2}$$

5. rendement

- méthode directe :



$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}$$

← Puissance au secondaire
 ← Puissance au primaire

- méthode des pertes séparées :

essai à vide : P_{Fer}

essai en court circuit : P_{Joule}

essai en charge : P_2

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{Fe}} + P_{\text{J}}}$$

Exercice :

Un transfo 230/24V ; 63VA

Un essai à vide : $P_{10} = 5\text{W}$

Un essai en court circuit : $P_{1\text{cc}} = 10\text{W}$

Un essai sur résistance permet de mesurer $P_2 = 50\text{W}$

Déterminer :

1/ I_{1n} ; I_{2n} ; m

2/ η

3/ R_1 et R_2 sachant que $R_2 = 100 \cdot R_1$

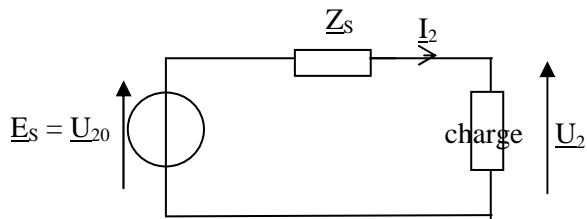
1/ $I_{1n} = 270\text{mA}$; $I_{2n} = 2,6\text{A}$; $m = 0,11$

2/ $\eta = 50 / (50 + 5 + 10) = 0,77$

3/ $R_1 \times 0,27^2 + R_2 \times 2,6^2 = 10$ et $R_2 = 100 \cdot R_1$

donc $R_1 = 15\text{m}\Omega$ et $R_2 = 1,5\Omega$

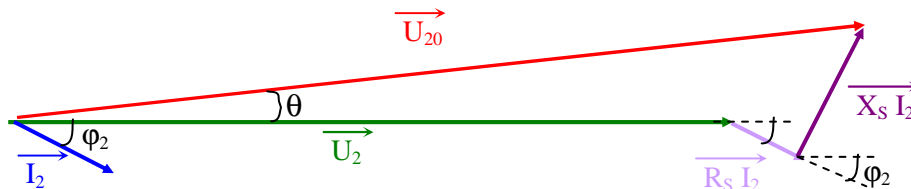
6. chute de tension en charge



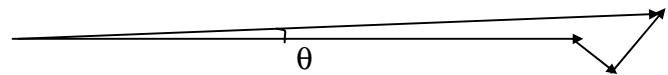
Loi des mailles $\underline{U}_{20} = \underline{U}_2 + \underline{Z}_s \cdot \underline{I}_2$

$$= \underline{U}_2 + \underline{R}_s \cdot \underline{I}_2 + j \underline{X}_s \cdot \underline{I}_2$$

Diagramme de Fresnel : $\vec{U}_{20} = \vec{U}_2 + \vec{R}_s \cdot \underline{I}_2 + \vec{X}_s \cdot \underline{I}_2$



θ faible, donc on fait l'approximation $\theta = 0$



d'où la formule approchée :

$$\Delta U_2 = R_s I_2 \cos \varphi + X_s I_2 \sin \varphi$$

Docs élève

Doc 1

