

## Le transformateur

par Alain DENTS,  
Lycée Laplace, 14000 Caen.

Le transformateur est constitué de deux enroulements électriquement indépendants (primaire et secondaire) bobinés sur un même circuit magnétique.

Il fonctionne en régime sinusoïdal et permet le changement de la valeur efficace de la tension en assurant le transfert de la puissance électrique du circuit primaire vers le circuit secondaire.

### I. THEORIE DU TRANSFORMATEUR.

#### 1) Le transformateur idéal.

*Hypothèses :*

- la résistance des enroulements est nulle ;
- le couplage magnétique est parfait (flux à travers une section du circuit magnétique = flux à travers une spire du primaire = flux à travers une spire du secondaire) ;
- la perméabilité magnétique est infinie.

*Schéma du transformateur :*

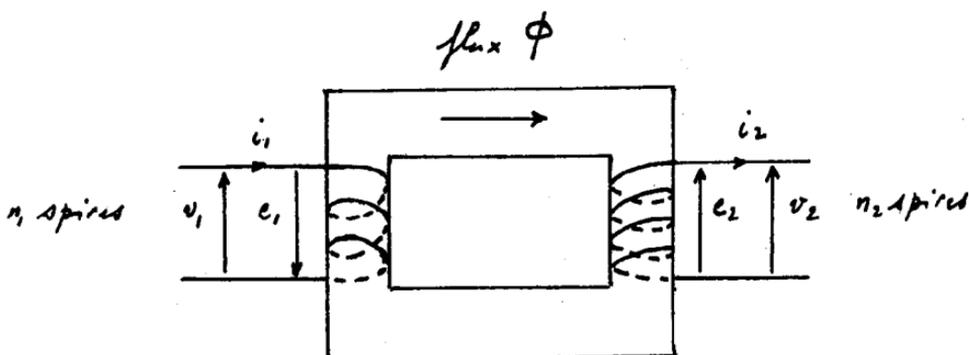


Fig. 1

*F.é.m. d'induction :*

Soit  $\phi$  le flux à travers une spire du primaire :

Flux à travers la bobine primaire :  $\psi_1 = n_1 \phi$  ; f.é.m. in-

$$\text{duite } e_1 = -n_1 \frac{d\phi}{dt}.$$

Flux à travers la bobine secondaire :  $\psi_2 = n_2 \phi$  ; f.é.m. induite  $e_2 = -n_2 \frac{d\phi}{dt}$ .

*Tensions aux bornes des enroulements :*

$$v_1 = -e_1 = n_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$v_2 = e_2 = -n_2 \frac{d\phi}{dt}.$$

*Circuit magnétique :*

$$n_1 i_1 + n_2 i_2 = \mathfrak{R} \phi \quad \mathfrak{R} = \frac{1}{\mu} \frac{l}{s} \quad \mu \infty \Rightarrow \mathfrak{R} = 0.$$

$$n_1 i_1 + n_2 i_2 = 0$$

*Régime sinusoïdal :*

On utilise les grandeurs complexes. Le module représente la valeur efficace.

Le flux  $\phi$  est pris comme origine des phases  $\phi = \phi_m \cos \omega t$ .

$$\text{On a donc : } \bar{\Phi} = \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{S B_m}{\sqrt{2}}.$$

$$\text{Equations : } \bar{V}_1 = -\bar{E}_1 = j n_1 \omega \bar{\Phi}$$

$$\bar{V}_2 = \bar{E}_2 = -j n_2 \omega \bar{\Phi}$$

$$n_1 \bar{I}_1 + n_2 \bar{I}_2 = 0.$$

$B_m$  : valeur maximale du champ magnétique ; S : section du circuit magnétique.

*Rapport de transformation :*

$$\text{Définition : } m = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{d'où : } \begin{cases} \bar{V}_2 = -m \bar{V}_1 \\ \bar{I}_2 = -\frac{\bar{I}_1}{m} \end{cases}$$

*Schéma vectoriel :*

L'angle de phase  $\varphi_2 = (\bar{I}_2, \bar{V}_2)$  est fixé par le dipôle branché aux bornes du secondaire.

$\bar{I}_1$  et  $\bar{I}_2$  étant en opposition de phase, de même que  $\bar{V}_1$  et  $\bar{V}_2$ , il en résulte que  $\varphi_1 = \varphi_2$ .

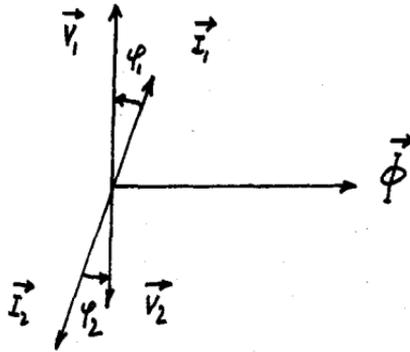


Fig. 2

*Bilan de puissance :*

On rappelle l'expression de la puissance complexe  $\bar{S}$  :

$$\bar{S} = \bar{V} \bar{I}^* = P + jQ.$$

Puissance complexe entrante au primaire :  $\bar{S}_1 = \bar{V}_1 \bar{I}_1^*$ .

Puissance complexe sortante au secondaire :  $\bar{S}_2 = \bar{V}_2 \bar{I}_2^*$ .

On obtient :  $\bar{V}_1 \bar{I}_1^* = \bar{V}_2 \bar{I}_2^*$  soit  $P_1 = P_2$   $Q_1 = Q_2$ .

La puissance entrante en primaire est égale à la puissance sortante au secondaire (valable pour les puissances active et réactive).

*Schéma conventionnel du transformateur parfait :*

C'est un quadripôle qui vérifie :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{V}_2 = -m \bar{V}_1 \\ \bar{I}_2 = -\frac{\bar{I}_1}{m} \end{array} \right.$$

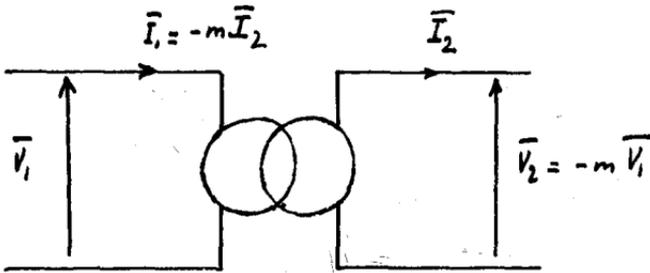


Fig. 3

2) Le transformateur réel.

a) La réluctance du circuit magnétique n'est pas négligeable :

$$\begin{aligned} \text{Equations : } \bar{V}_1 = -\bar{E}_1 = j n_1 \omega \bar{\Phi}; \quad \bar{V}_2 = \bar{E}_2 = -j n_2 \omega \bar{\Phi} \\ n_1 \bar{I}_1 + n_2 \bar{I}_2 = \mathcal{R} \bar{\Phi}. \end{aligned}$$

Si on impose la tension  $\bar{V}_1$ , le flux  $\bar{\Phi}$  est déterminé : il ne dépend pas des courants débités.

Pour connaître l'expression  $\mathcal{R} \bar{\Phi}$ , envisageons le régime particulier où le secondaire est à vide ( $\bar{I}_2 = 0$ ). Le courant primaire prend alors une valeur particulière notée  $\bar{I}_0$  (courant primaire à vide) :

$$n_1 \bar{I}_1 + n_2 \bar{I}_2 = \mathcal{R} \bar{\Phi} = n_1 \bar{I}_0$$

soit :

$$\bar{I}_1 + m \bar{I}_2 = \bar{I}_0$$

ou :

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + (-m \bar{I}_2).$$

Cette équation représente une loi aux nœuds : on en déduit le schéma suivant :

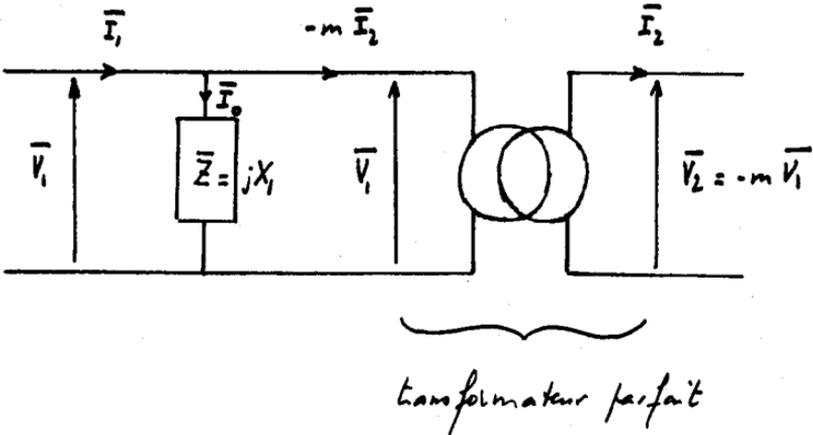


Fig. 4

Nature de l'impédance  $\bar{Z}$  :

$$\bar{Z} = \frac{\bar{V}_1}{\bar{I}_0} = \frac{j n_1 \omega \bar{\Phi}}{\mathcal{R} \bar{\Phi} / n_1} = j \frac{n_1^2 \omega}{\mathcal{R}} = j X_1.$$

C'est une impédance purement réactive.

Schéma vectoriel :

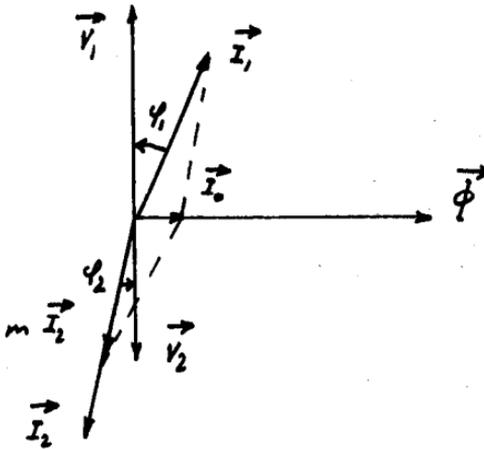


Fig. 5

L'angle  $\varphi_2$  est fixé par le dipôle branché aux bornes du secondaire et on utilise  $\vec{I}_1 + m \vec{I}_2 = \vec{I}_0$  pour déterminer  $\varphi_1$ .

*Interprétation du courant  $\bar{I}_0$  :*

On peut définir le courant  $\bar{I}_0$  comme suit : c'est la partie du courant  $\bar{I}_1$  qui assure l'existence du flux magnétique : il est appelé courant magnétisant. Il ne dépend que de la tension  $\bar{V}_1$  comme le flux  $\Phi$ .

*Bilan de puissance :*

En tenant compte des différentes équations, on peut écrire :

$$\bar{V}_1 \bar{I}_1^* = \bar{V}_2 \bar{I}_2^* + \bar{V}_1 \bar{I}_0^*$$

avec :  $\begin{cases} R_e(\bar{V}_1 \bar{I}_0^*) = 0 \\ \mathfrak{I}_m(\bar{V}_1 \bar{I}_0^*) = Q_m \text{ puissance réactive magnétisante.} \end{cases}$

Les bilans de puissance sont :  $\begin{cases} P_1 = P_2 \\ Q_1 = Q_2 + Q_m. \end{cases}$

Le circuit magnétique consomme la puissance réactive  $Q_m$ .

*b) Les pertes Fer ne sont pas négligeables :*

On appelle pertes fer, les pertes d'énergie électrique sous forme de chaleur dans le fer à cause des phénomènes d'hystérésis

et des courants de FOUCAULT. Ces pertes sont proportionnelles à  $B_m^2$  ( $B_m$  valeur maximale du champ magnétique) donc à  $|\bar{\Phi}|^2$ .

Conséquences pour le courant  $\bar{I}_0$  :

On a :

$$\vec{V}_1 \vec{I}_1^* = V_2 I_2^* + V_1 I_0^*$$

soit :

$$P_1 = P_2 + R_e(\bar{V}_1 \bar{I}_0^*) \quad Q_1 = Q_2 + \mathcal{J}_m(\bar{V}_1 \bar{I}_0^*) = Q_2 + Q_m$$

$R_e(\bar{V}_1 \bar{I}_0^*)$  représente les pertes Fer :  $R_e(\bar{V}_1 \bar{I}_0^*) > 0$ .

Les vecteurs  $\vec{I}_0$  et  $\vec{V}_1$  ne sont plus déphasés de  $\frac{\pi}{2}$ . On a :

$$(I_0, V_1) = \varphi_0 < \frac{\pi}{2} \quad R_e(\bar{V}_1 \bar{I}_0^*) = V_1 I_0 \cos \varphi_0.$$

Les vecteurs  $\vec{I}_0$  et  $\vec{\Phi}$  ne sont plus en phase.

L'équation  $\Re \bar{\Phi} = n_1 \bar{I}_0$  est valable à condition de considérer  $\Re$  comme une grandeur complexe (la perméabilité devient complexe).

*Schéma vectoriel :*

L'angle  $\varphi_2$  est déterminé par le dipôle branché aux bornes du secondaire.

On utilise  $\vec{I}_1 + m \vec{I}_2 = \vec{I}_0$  pour trouver  $\varphi_1$ .

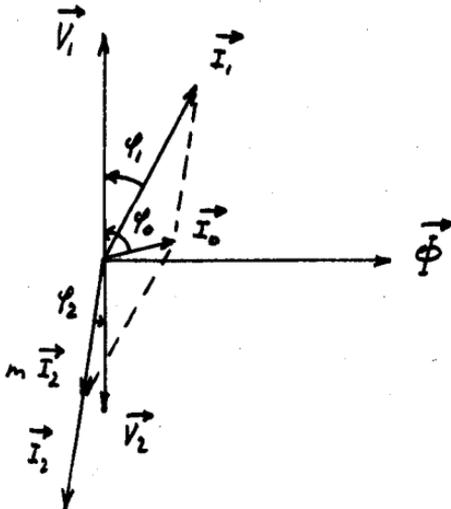


Fig. 6

Schéma électrique équivalent :

L'équation  $\vec{I}_1 = \vec{I}_0 + (-m \vec{I}_2)$  traduit une loi aux nœuds :

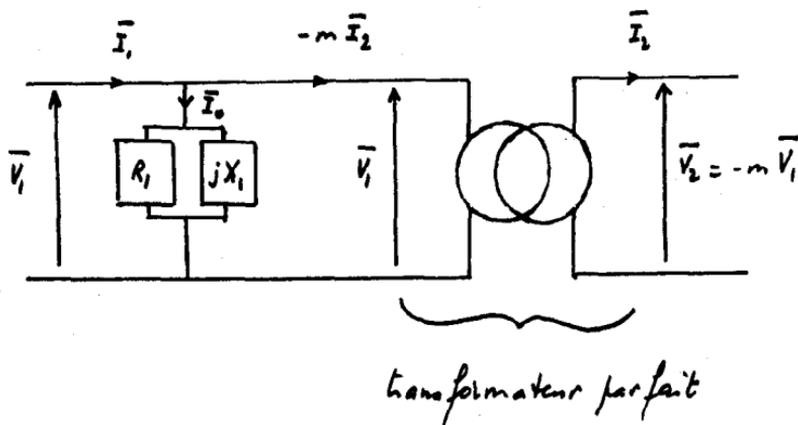


Fig. 7

Recherche de la structure parallèle ( $R_1 // X_1$ ) de l'impédance  $\bar{Z}$  :

puissance complexe :  $\vec{V}_1 \vec{I}_0^*$ ,

puissance active (pertes fer) :

$$P_F = R_e(\vec{V}_1 \vec{I}_0^*) = V_1 I_0 \cos \varphi_0 = \frac{V_1^2}{R_1},$$

puissance réactive :  $Q_m = \mathcal{I}_m(\vec{V}_1 \vec{I}_0^*) = V_1 I_0 \sin \varphi_0 = \frac{V_1^2}{X_1}$

d'où les éléments :  $R_1$  et  $X_1$  :

$$R_1 = \frac{V_1}{I_0 \cos \varphi_0}$$

$$X_1 = \frac{V_1}{I_0 \sin \varphi_0}.$$

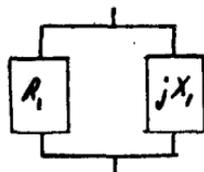


Fig. 8

Interprétation du courant  $I_0$  :

C'est la partie du courant primaire  $\vec{I}_1$  qui assure l'existence du flux magnétique et qui fournit la puissance nécessaire aux pertes Fer. Il ne dépend que de  $\vec{V}_1$ .

c) Inductances de fuite et résistances des enroulements non négligeables :

Inductances de fuite non négligeables : le couplage n'est pas parfait. Une partie du flux qui traverse le primaire ne traverse

pas le secondaire et inversement. Soit  $\bar{\psi}_{r1}$  le flux de fuite du primaire : l'inductance de fuite du primaire est définie par  $l_1 = \frac{\bar{\psi}_{r1}}{\bar{I}_1}$ . On définit de même l'inductance de fuite du secondaire  $l_2 = \frac{\bar{\psi}_{r2}}{\bar{I}_2}$ . Aux inductances  $l_1$  et  $l_2$  correspondent les impédances  $j l_1 \omega$  et  $j l_2 \omega$ .

En tenant compte des résistances des bobines, on obtient les équations :

$$\begin{aligned} \bar{u}_1 &= (r_1 + j l_1 \omega) \bar{I}_1 + j n_1 \omega \bar{\Phi} \\ -\bar{u}_2 &= (r_2 + j l_2 \omega) \bar{I}_2 + j n_2 \omega \bar{\Phi}. \end{aligned}$$

Notations :

$$\begin{aligned} \bar{z}_1 &= r_1 + j l_1 \omega \\ \bar{z}_2 &= r_2 + j l_2 \omega \\ \bar{V}_1 &= \bar{E}_1 = j m_1 \omega \bar{\Phi} \\ \bar{V}_2 &= \bar{E}_2 = -j n_2 \omega \bar{\Phi} = -m \bar{V}_1. \end{aligned}$$

L'équation  $\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + (-m \bar{I}_2)$  est toujours valable.

Schéma vectoriel :

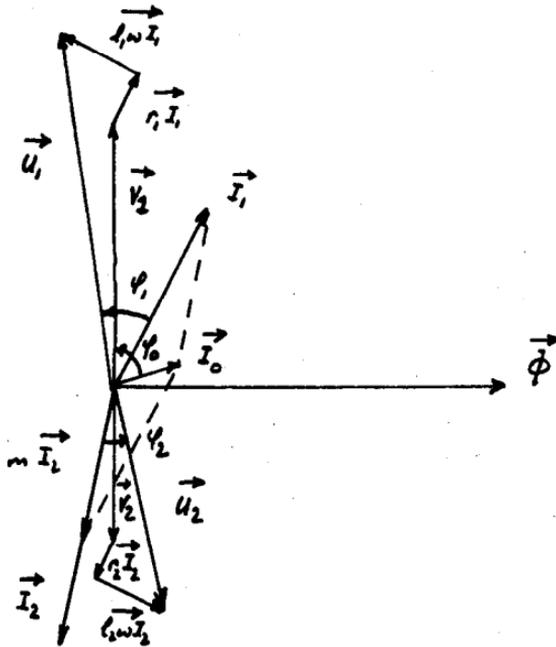


Fig. 9

Le courant  $\bar{I}_2$  et l'angle de phase  $\varphi_2$  sont imposés par le dipôle branché aux bornes du secondaire.

On utilise  $\bar{I}_1 + m \bar{I}_2 = \bar{I}_0$  pour déterminer  $\bar{I}_1$ .

Schéma électrique équivalent :

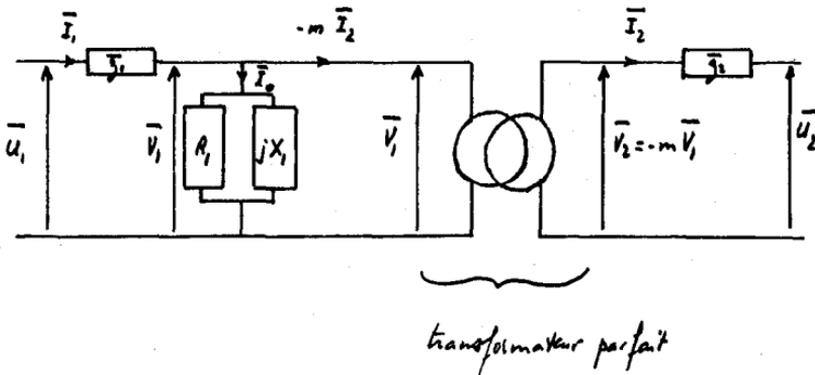
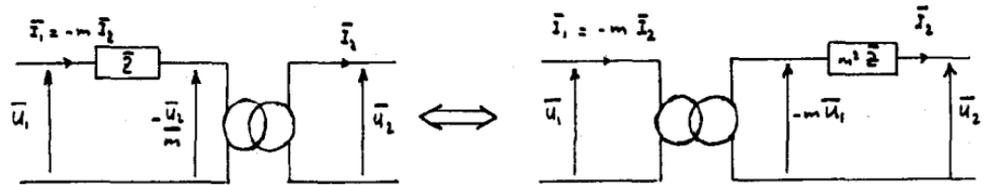


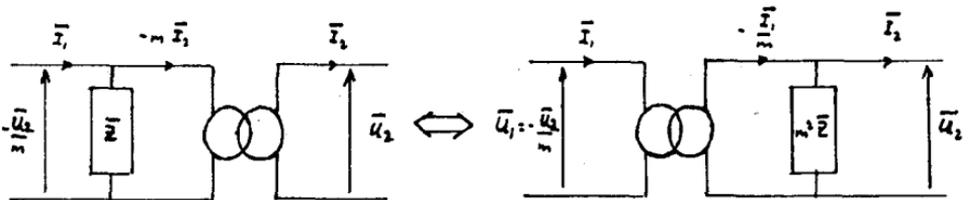
Fig. 10

Transformation du schéma équivalent :

On peut modifier le schéma précédent en utilisant les équivalences suivantes :



$$\bar{u}_1 = -\frac{\bar{u}_2}{m} - m \bar{I}_2 \bar{Z} \iff \bar{u}_2 = -m \bar{u}_1 - (m^2 \bar{Z}) \bar{I}_2$$



$$\bar{I}_1 = -\frac{\bar{u}_2}{m \bar{Z}} - m \bar{I}_2 \iff -\frac{\bar{I}}{m} = \frac{\bar{u}_2}{m^2 \bar{Z}} + \bar{I}_2$$

Fig. 11

Une impédance est ramenée au secondaire (resp. au primaire) par multiplication par  $m^2$  (resp.  $\frac{1}{m^2}$ ).

*Bilan de puissance :*

$$\begin{aligned}\bar{u}_1 &= \bar{z}_1 \bar{I}_1 + \bar{V}_1 & \Rightarrow & \bar{u}_1 \bar{I}_1^* = \bar{z}_1 \bar{I}_1^2 + \bar{V}_1 \bar{I}_1^* \\ -\bar{u}_2 &= \bar{z}_2 \bar{I}_2 - \bar{V}_2 & \Rightarrow & -\bar{u}_2 \bar{I}_2^* = \bar{z}_2 \bar{I}_2^2 - \bar{V}_2 \bar{I}_2^* \\ \bar{I}_1 &= \bar{I}_0 + (-m \bar{I}_2) & \Rightarrow & \bar{V}_1 \bar{I}_1^* = \bar{V}_1 \bar{I}_0^* + \bar{V}_2 \bar{I}_2^*\end{aligned}$$

On obtient :  $\bar{u}_1 \bar{I}_1^* = \bar{z}_1 \bar{I}_1^2 + \bar{z}_2 \bar{I}_2^2 + \bar{V}_1 \bar{I}_0^* + \bar{V}_2 \bar{I}_2^*$  dont la partie réelle donne :

$$P_1 = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2 + P_F + P_2$$

puissance active entrant au primaire	pertes par effet Joule (cuivre)	pertes fer	puissance active sortant au secondaire
---	---------------------------------------	---------------	---

La partie imaginaire donne le bilan de puissance réactive.

*Rendement :*

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{Cu} + P_{Fer}}$$

$$P_{Cu} = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2 \simeq (m^2 r_1 + r_2) I_2^2 = r_s I_2^2$$

$$P_2 = u_2 I_2 \cos \varphi_2$$

$$\text{soit : } \eta = \frac{u_2 \cos \varphi_2}{u_2 \cos \varphi_2 + r_s I_2 + P_{Fer}/I_2}$$

Pour  $u_2$  et  $\cos \varphi_2$  donnés (c'est-à-dire également pour  $u_1$  donné

$u_1 \simeq \frac{u_2}{m}$ ), le rendement est maximal pour  $I_2 = \sqrt{\frac{P_{Fer}}{r_s}}$ . On

a alors  $P_{Cu} = P_{Fer}$ . Remarquons que la valeur de  $I_2$  assurant  $\eta_{max}$  ne dépend pas de  $\cos \varphi_2$ .

### 3) Approximations sur les schémas équivalents.

a) *Approximation de Kapp :*

Si le régime de fonctionnement est tel que  $I_0 \ll I_1$ , on néglige  $I_0$  (la branche  $R_1//X_1$  est ouverte) : c'est l'approximation de KAPP.

Ramenons  $\bar{z}_1$  au secondaire et notons :

$$\bar{z}_s = m^2 \bar{z}_1 + \bar{z}_2 = r_s + j x_s.$$

Le schéma équivalent est :

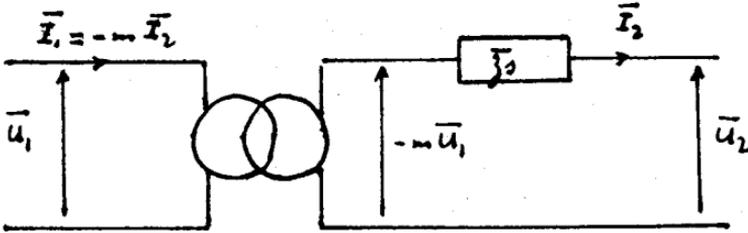


Fig. 12

Le diagramme vectoriel au secondaire est :

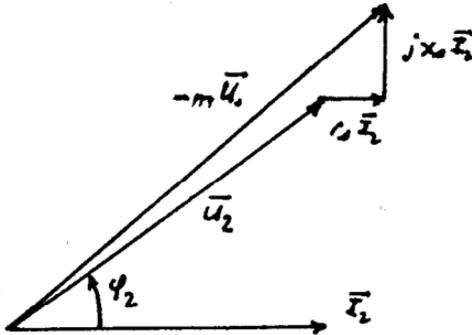


Fig. 13

b) *Impédances internes négligeables :*

Soit un régime de fonctionnement tel que :

$$|\bar{z}_1 \bar{I}_1| \ll u_1 \quad \text{et} \quad |\bar{z}_2 \bar{I}_2| \ll u_2.$$

Le schéma équivalent est alors celui du paragraphe 2) b).

## II. LES REGIMES DE FONCTIONNEMENT DU TRANSFORMATEUR.

### 1) Point du fonctionnement.

Un point de fonctionnement fixe les grandeurs de fonctionnement : valeurs efficaces des tensions et des intensités et valeurs des déphasages. La donnée de 3 grandeurs (Ex. :  $u_1$ ,  $I_2 \cos \varphi_2$ ) détermine complètement un point de fonctionnement.

### 2) Régime normal ou nominal.

Le régime nominal assure le rendement maximal du transformateur : il détermine les valeurs efficaces nominales des ten-

sions et des intensités. Remarquons qu'il ne précise pas le facteur de puissance : celui-ci est imposé par le récepteur branché au secondaire.

Les valeurs nominales sont indiquées sur une plaque signalétique. Ex. :  $U_{1N} U_{2N} S_{1N}$  (puissance apparente nominale). On en

déduit :  $I_{1N} = \frac{S_{1N}}{U_{1N}}$  et dans l'approximation du transformateur

parfait,  $m = \frac{U_{2N}}{U_{1N}}$  et  $I_{2N} = m I_{1N}$ .

Rappelons les équations de fonctionnement :

$$\begin{aligned} \bar{u}_1 &= (r_1 + j l_1 \omega) \bar{I}_1 + j n_1 \omega \bar{\Phi} & \bar{V}_1 &= j n_1 \omega \bar{\Phi} \\ -\bar{u}_2 &= (r_2 + j l_2 \omega) \bar{I}_2 + j n_2 \omega \bar{\Phi} & \bar{V}_2 &= j n_2 \omega \bar{\Phi} \\ \bar{I}_1 + m \bar{I}_2 &= \bar{I}_0 \text{ (équivalent à } n_1 \bar{I}_1 + n_2 \bar{I}_2 = \Re \bar{\Phi} \text{)}. \end{aligned}$$

Au voisinage du régime nominal, on a les inégalités suivantes :

- (1)  $|(r_1 + j l_1 \omega) \bar{I}_1| \ll |j n_1 \omega \bar{\Phi}|$
- (2)  $|(r_2 + j l_2 \omega) \bar{I}_2| \ll |j n_2 \omega \bar{\Phi}|$
- (3)  $|\bar{I}_0| \ll |\bar{I}_1|$ .

Ces inégalités conditionnent toutes les approximations.

Conséquences :  $|\bar{u}_1| \simeq |\bar{V}_1| = n_1 \omega \frac{\phi_m}{\sqrt{2}}$ .

Le flux ne dépend que de la valeur efficace de la tension primaire.

Notons également qu'au régime nominal, les pertes cuivre sont égales aux pertes fer (et donc du même ordre de grandeurs au voisinage de ce régime).

### 3) Fonctionnement à vide.

Les conditions sont les suivantes :

secondaire à vide  $\bar{I}_2 = 0$ ,

tension primaire  $u_{10}$  égale à (ou proche du)  $u_{1N}$ .

On a :  $\bar{I}_{10} = \bar{I}_0$ .

| L'essai à vide permet de connaître le courant  $\bar{I}_0$ .

L'inégalité (1) est renforcée :  $\bar{u}_{10} \approx j n_1 \omega \bar{\Phi}$  ou  $\bar{u}_{20} = -j \omega n_2 \bar{\Phi}$

$$\text{d'où : } \frac{u_{20}}{u_{10}} = \frac{n_2}{n_1} = m.$$

| L'essai à vide permet de déterminer le rapport de transformation.

Remarquons que l'essai à vide correspond à l'approximation du paragraphe I.3 b).

Le bilan de puissance active s'écrit :  $P_{10} = P_{\text{Fer}}$  (les pertes cuivre sont négligeables).

| L'essai à vide permet de déterminer les pertes fer. Rappelons que celles-ci ne dépendent que de la tension  $u_1$  et sont en particulier indépendantes du courant  $I_2$ .

On en déduit également :

$$\text{— la résistance équivalente aux pertes fer : } R_1 = \frac{u_{20}^2}{P_{10}},$$

$$\text{— la réactance } X_1 : X_1 = \frac{u_{20}^2}{\sqrt{u_{10}^2 I_{10}^2 - P_{10}^2}},$$

$$\text{— le facteur de puissance à vide : } \cos \varphi_0 = \frac{P_{10}}{u_{10} I_{10}}.$$

#### 4) Fonctionnement en court-circuit.

Les conditions sont les suivantes :

secondaire en court-circuit  $\bar{u}_2 = 0$ ,

courant secondaire  $I_{2cc}$  égal à (ou au voisinage de) la valeur nominale.

Equations :

$$\bar{u}_{1cc} = (r_1 + j l_1 \omega) \bar{I}_{1cc} + j \omega n_1 \bar{\Phi}_{cc} \quad (1')$$

$$0 = (r_2 + j l_2 \omega) \bar{I}_{2cc} + j \omega n_2 \bar{\Phi}_{cc} \quad (2')$$

$$n_1 \bar{I}_{1cc} + n_2 \bar{I}_{2cc} = \Re \bar{\Phi}_{cc}. \quad (3')$$

La comparaison de l'équation (2') à l'équation de fonctionnement normal permet de conclure à l'inégalité  $\phi_{cc} \ll \Phi$ .

L'équation (1') comparée à l'équation de fonctionnement normal donne  $u_{1cc} \ll u_1$ .

| Lors de l'essai en court-circuit, la tension primaire est petite par rapport à sa valeur nominale.

Remarquons que le schéma équivalent est le suivant :

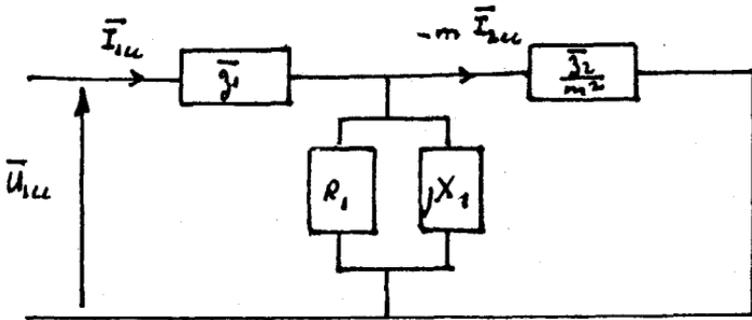


Fig. 14

Si l'impédance  $R_1/jX_1$  est grande devant  $\frac{\bar{z}_2}{m^2}$ , on peut ouvrir la branche de l'impédance  $R_1/jX_1$ , le transformateur est alors équivalent à  $\bar{z}_p = \bar{z}_1 + \frac{\bar{z}_2}{m^2}$  : c'est l'approximation de KAPP vue du primaire.

Dans ces conditions, l'essai en court-circuit permet de déterminer :

$$- \text{ la résistance : } r_p = r_1 + \frac{r^2}{m^2} = \frac{P_{1cc}}{I_{1cc}^2},$$

$$- \text{ la réactance : } X_p = X_1 + \frac{X_2}{m^2} = \frac{\sqrt{u_{1cc}^2 I_{1cc}^2 - P_{1cc}^2}}{I_{1cc}^2}.$$

On en déduit :  $r_s = m^2 r_p$  et  $x_s = m^2 x_p$ .

Le bilan de puissance active s'écrit :

$$P_{1cc} = P_{Cu} \text{ (les pertes fer sont négligeables).}$$

L'essai en court-circuit permet de déterminer les pertes cuivre. Celles-ci ne dépendent que du courant  $I_2$ . Elles sont en particulier indépendantes de la tension  $u_1$ .

On a en effet :

$$P_{Cu} = r_1 I_{1cc}^2 + r_2 I_{2cc}^2 \approx (m^2 r_1 + r_2) I_{2cc}^2 = r_s I_{2cc}^2.$$

### 5) Caractéristiques du fonctionnement en charge.

#### a) Chute de tension au secondaire :

On a :  $u_2 < m u_1$   $\Delta u_2 = m u_1 - u_2$  est la chute de tension. Si l'approximation de KAPP est valable en charge, la chute de tension s'interprète directement sur le diagramme vectoriel de KAPP, les éléments  $r_s$  et  $x_s$  ayant été déterminés par l'essai en court-circuit.

#### b) Rendement du transformateur :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{Fer}} + P_{\text{Cu}}},$$

$P_{\text{Cu}} = f(I_2)$   $P_{\text{Cu}}$  déterminé par l'essai en court-circuit,

$P_{\text{Fer}} = g(u_1)$   $P_{\text{Fer}}$  déterminé par l'essai à vide.

La connaissance du rendement ne nécessite que la mesure de la puissance  $P_2$  fournie par le secondaire du transformateur.

## III. EXPERIMENTATION.

### 1) Essai à vide.

Il est effectué par des tensions primaires proches de la tension nominale (entre  $0,7 u_{1N}$  et  $1,1 u_{1N}$ ) obtenues à l'aide d'un alternostat.

Schéma de montage :

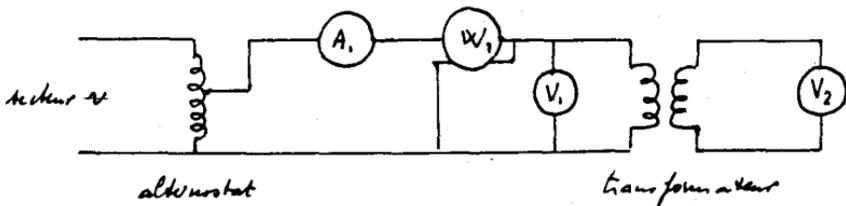


Fig. 15

### 2) Essai en court-circuit.

Il est effectué pour des intensités secondaires situées entre  $0,5 I_{2N}$  et  $1,1 I_{2N}$ . Noter que la tension primaire est très faible et que l'ampèremètre  $A_2$  doit avoir une résistance petite par rapport à la résistance du secondaire (vérifier l'influence de  $A_2$  et le remplacer si nécessaire par un court-circuit franc, l'intensité  $I_2$

étant obtenue indirectement par la relation  $I_2 \approx \frac{I_1}{m}$ ).

Schéma de montage :

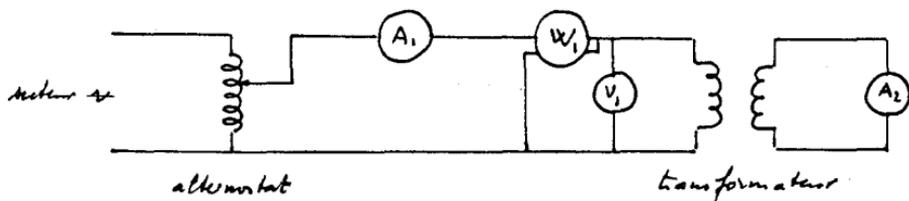


Fig. 16

### 3) Essai en charge.

On fixe 2 paramètres (Ex. :  $u_1 = u_{1N}$  et  $\cos \varphi_2 = 1$ ) et on fait varier le 3<sup>e</sup> paramètre ( $I_2$  varie entre  $0,5 I_{2N}$  et  $1,1 I_{2N}$ ).

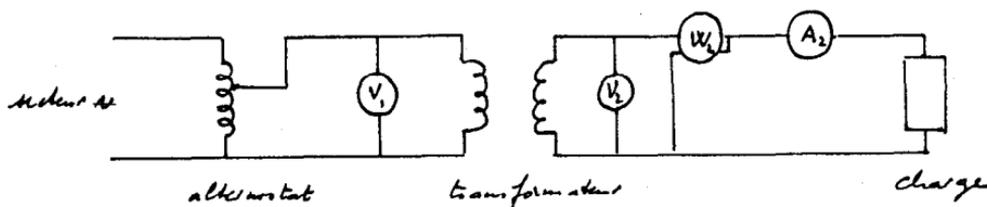


Fig. 17

### 4) L'utilisation du wattmètre.

Le remplacement des appareils électrodynamiques par des appareils ferrodynamiques a permis d'améliorer les performances au niveau de la sensibilité et de la consommation. L'existence d'un circuit de compensation permet d'annuler la consommation du circuit tension. Ces différents éléments simplifient l'emploi de l'appareil.

## IV. LES LIMITES DU MODELE PROPOSE.

L'étude a mis l'accent sur la construction d'un modèle approchant la réalité physique en ajoutant des éléments successifs à un modèle idéal, et sur la mise en parallèle des équations électriques, des schémas électriques équivalents et des diagrammes vectoriels.

Les limites du modèle proposé sont liées à :

- l'existence des phénomènes non linéaires : hystérésis et saturation : le courant réel, déformé par le cycle d'hystérésis, n'est pas sinusoïdal ; le modèle utilise un courant sinusoïdal défini par l'équivalence suivante :

même valeur efficace :  $I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$ ,

même puissance active consommée :  $P = UI \cos \varphi$  (d'où la phase  $\varphi$ ).

Indiquons une conséquence : l'ampèremètre utilisé dans le montage devra être ferromagnétique ;

- l'utilisation du théorème d'AMPÈRE : une discussion sur son application constituerait un modèle plus élaboré : elle sort du cadre de ce modèle.
-