

# CHAPITRE 2

Année universitaire  
2024/2025

## Les transformateurs électriques (Le résumé du cours)

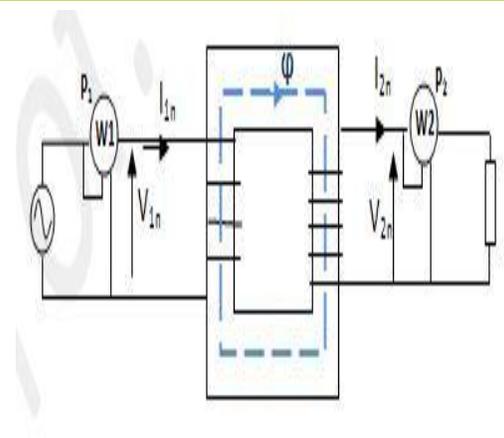
Electrotechnique Fondamentale 2

2<sup>eme</sup> année License tronc commun ST

Filière électrotechnique

**Prof. Megherbi Ahmed chaouki**  
Chargé de Cours

Département de Génie électrique  
Université Mohammed Khider Biskra



### Contenu du chapitre 2

Ce chapitre couvre les points suivants :

- Constitution d'un transformateur et principe de fonctionnement
- Le rapport de transformation
- Le transformateur idéal et le transformateur réel
- Bilan énergétique (puissance)
- Le rendement d'un transformateur réel
- Schéma électrique équivalent d'un transformateur réel

## Chapitre II Transformateurs électriques

### II.1. Introduction

Les transformateurs sont des machines statiques qui possèdent un bon rendement. Leur utilisation est primordiale dans les réseaux électriques pour le transport d'énergie électrique. Ils assurent l'élévation de la tension entre les alternateurs (source) et le réseau de transport, puis ils abaissent la tension du réseau pour l'exploiter par les utilisateurs.

### II.2. Schéma et constitution d'un transformateur

Un transformateur est constitué d'un circuit magnétique fermé, de grande perméabilité sur lequel sont enroulés deux circuits électriques ; l'un est appelé primaire de  $N_1$  spires qui reçoit l'énergie électrique, l'autre secondaire de  $N_2$  spires qui fournit cette énergie à la charge.

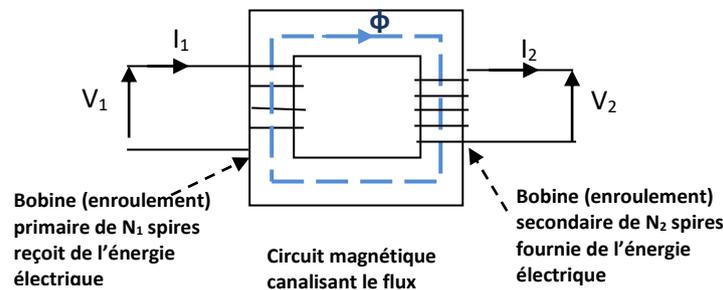


Fig.2.1 Schéma de constitution d'un transformateur

$V_1$ ,  $V_2$ ,  $I_1$  et  $I_2$  sont les tensions et courants respectivement au primaire et au secondaire. Les enroulements sont isolés électriquement et sont couplés par le flux magnétique  $\varphi$ .

### II.3. Principe de fonctionnement

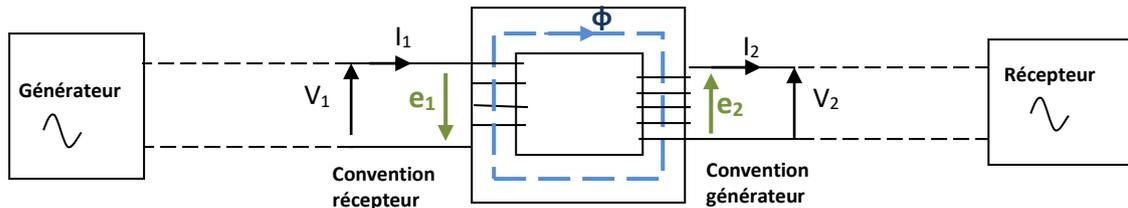
Le principe de fonctionnement est basé sur la loi de Faraday qui s'énonce qu'une variation de flux à travers la surface d'une spire crée une force électromotrice f.e.m  $e(t)$  :

$$e(t) = - \frac{d\varphi}{dt}$$

En effet, la tension alternative au primaire va créer un flux magnétique alternatif qui traversant l'enroulement secondaire produira une f.e.m induite : donc au niveau des bornes du secondaire, apparaît

alors une tension sinusoïdale dont la fréquence est la même que celle de la tension appliquée au primaire, mais dont l'amplitude est différente.

**II.4. Convention générateur et récepteur dans un transformateur**



**Fig. 2.2 convention dans un transformateur**

L'enroulement primaire absorbe l'énergie du générateur, il se comporte comme un récepteur :  $V_1$  et  $I_1$  sont donc liés par la convention des récepteurs et leurs sens positifs sont pris en opposition.

$$V_1(t) = -e_1(t)$$

L'enroulement secondaire se comporte comme un générateur et fournit de l'énergie au récepteur, ils sont reliés par la convention des générateurs et le sens positif de  $V_2$  est pris dans le même sens que celui de  $I_2$ .

$$V_2(t) = e_2(t)$$

**II.5. Symboles électriques du transformateur**

Le transformateur peut être représenté par l'un des deux symboles de la figure 2.3



**Fig. 2.3 Symboles électriques du transformateur**

**II.6. Transformateur parfait (idéal) :**

Un transformateur parfait ne présente aucune perte de puissance (de point de vue puissance  $\sum \text{pertes dans le transformateur} = 0$ ), cela se traduit par l'établissement des hypothèses suivantes :

- Résistances des enroulements primaires et secondaires sont nulles (pas d'effet Joule).
- Les enroulements primaire et secondaire parfaitement couplés.
- Le circuit magnétique idéal (la perméabilité relative du matériau ferromagnétique  $\mu_r$  est infinie et les pertes fer nulles).

## II.7. Le rapport de transformation

Le rapport de transformation d'un transformateur est défini par la relation suivante :

$$m = \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

Selon la valeur qui prend  $m$ , on peut distinguer :

Si  $m > 1 \Rightarrow V_2 > V_1$  le transformateur est dit **Transformateur élévateur de tension, abaisseur de courant.**

Si  $m < 1 \Rightarrow V_2 < V_1$  le transformateur est dit **Transformateur abaisseur de tension, élévateur de courant.**

Si  $m = 1 \Rightarrow V_2 = V_1$  le transformateur est dit **Transformateur d'isolement.**

## II.8. Equations de fonctionnement

### II.8.1. Expression des f.é.m. dans le transformateur parfait :

Selon la loi de Faraday, les f.é.m.  $e_1(t)$  et  $e_2(t)$  dépendent de la variation du flux  $\varphi(t)$  :

$$e_1(t) = -N_1 \frac{d\varphi}{dt}$$

$$e_2(t) = -N_2 \frac{d\varphi}{dt}$$

### II.8.2. Relation entre les tensions dans le cas parfait

Selon les relations (5.1), dans le cas du transformateur idéal la tension primaire et celle du secondaire vérifient les relations suivantes :

$$v_1 = -e_1(t) = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad (5.*)$$

$$v_2 = e_2(t) = -N_2 \frac{d\varphi}{dt}$$

Le rapport des équations ( ) et ( ) donne :

$$\frac{v_2}{v_1} = -\frac{N_2}{N_1} = -m$$

On peut écrire aussi :  $v_2 = -m v_1$

Les tensions  $v_1$  et  $v_2$  sont en opposition de phase

**II.8.3. Relation sur les courants**

Selon la loi de Hopkinson on a :

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 = \mathcal{R} \varphi$$

D'après les hypothèses d'un transformateur parfait, le circuit magnétique étant idéal ( $\mu_r$  tend vers l'infini) donc la reluctance du circuit magnétique est nulle ( $\mathcal{R} = 0$ )

L'équation précédente s'écrit sous la forme :

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 = 0$$

Ce qui implique :  $\frac{i_1}{i_2} = -\frac{N_2}{N_1} = -m$

**Remarque :**

Pour le calcul du rapport de transformation, est l'inverse de celui des tensions

En valeur efficace des courants le rapport de transformation s'écrit :

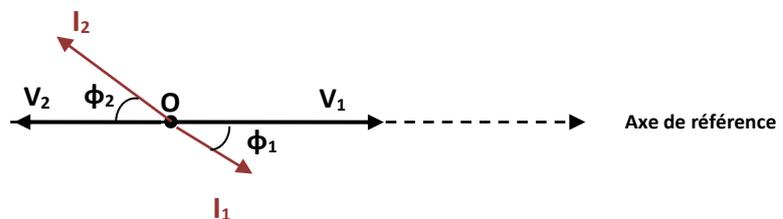
$$m = \frac{I_1}{I_2}$$

**II.9. Diagramme de Fresnel**

On va représenter Les tensions  $v_1$  et  $v_2$  dans un diagramme vectoriel la relation mathématiques on prenant comme grandeurs de référence les tensions  $v$

Ce diagramme de Fresnel représente donc les différentes grandeurs électriques dans le cas du transformateur idéal à travers leurs valeurs efficaces et leurs déphasages.

D'après les équations suscitées, les vecteurs  $V_1$  et  $V_2$  sont alignées et il en va de même pour les vecteurs courants  $I_1$  et  $I_2$ .



**Fig. 2.4. Diagramme de Fresnel dans le cas d'un transformateur parfait**

Par conséquent, les déphasages  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$  sont nécessairement les mêmes :  $\varphi_1 = \varphi_2$

**II.10. Relation de Boucherot**

La tension d'alimentation appliquée au primaire du transformateur est sinusoïdale, alors le flux magnétique est aussi sinusoïdal (de même pour l'induction magnétique B).

On considère le flux magnétique comme référence donc :  $b(t) = B_{max} \sin(\omega t)$

De l'équation (5.\*) :  $v_1 = -e_1(t) = N_1 \frac{d\varphi}{dt}$

$\varphi(t) = b(t) S$  où  $S$  est la section du circuit magnétique

$$\varphi(t) = B_{max} S \sin(\omega t)$$

La tension au primaire vaut :

$$\begin{aligned} v_1 &= N_1 \frac{d(B_{max} S \sin(\omega t))}{dt} \\ v_1 &= N_1 B_{max} S \frac{d(\sin(\omega t))}{dt} \\ v_1 &= N_1 B_{max} S \omega \cos(\omega t) \\ v_1 &= N_1 B_{max} S \omega \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (5.**)$$

La tension  $v_1(t)$  est en avance de  $90^\circ$  par rapport au flux magnétique.

Le terme  $(N_1 B_{max} S \omega)$  de l'expression de la tension  $v_1(t)$  représente la tension Maximale  $V_{1max}$

$$V_{1max} = V_1 \sqrt{2} = (N_1 B_{max} S \omega)$$

$V_1$  la valeur efficace de la tension instantanée  $v_1(t)$ ,  $\omega = 2\pi f$

Donc : 
$$V_1 = \frac{2\pi f N_1 B_{max} S}{\sqrt{2}}$$

On obtient l'expression de la valeur efficace  $V_1$  :

$$V_1 = 4.44 N_1 f B_{max} S$$

C'est la **formule de Boucherot**

Le flux maximal  $\varphi_{max}$ , le champ magnétique maximal  $B_{max}$  et la section droite  $S$  du circuit magnétique sont reliés par la relation  $\varphi_{max} = B_{max} S$

La relation de Boucherot peut s'écrire aussi :

$$V_1 = 4.44 N_1 f \varphi_{max}$$

### II.11. Bilan de puissance (lois de conservation)

Le transformateur parfait conserve les puissances actives, réactives et apparentes (toutes les pertes sont négligées). Il conserve aussi le déphasage, cela se traduit par les relations suivantes :

La puissance apparente :

$$S_1 = S_2 \Leftrightarrow V_1 I_1 = V_2 I_2$$

La puissance active

$$P_1 = P_2$$

La puissance réactive

$$Q_1 = Q_2$$

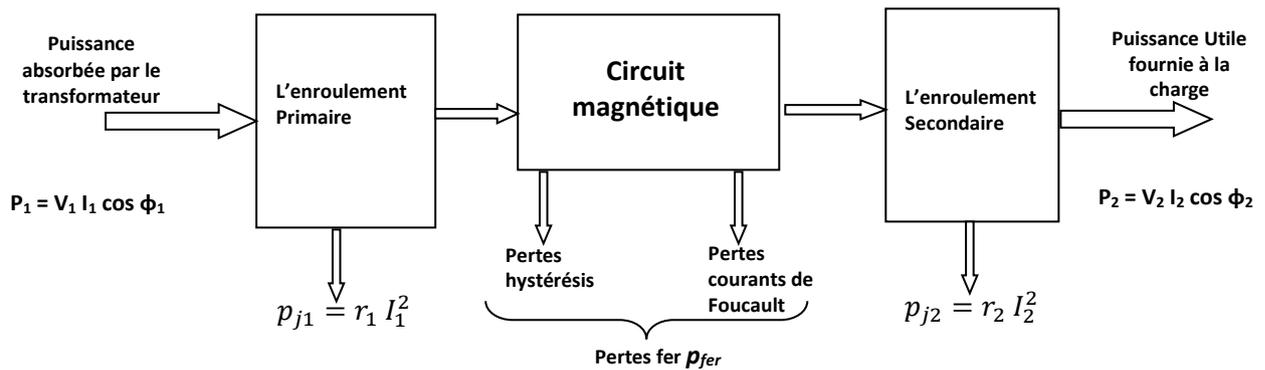
Les puissances active et réactive absorbées par le primaire seront totalement transmises à la charge connectée au secondaire (pas des pertes). Le rendement d'un transformateur parfait est égal à 1.

**II.12. Le transformateur réel**

Dans un transformateur réel on tient compte des pertes de puissance ( $\sum pertes \neq 0$ )

**II.13. Bilan énergétique (puissance) dans un transformateur réel**

La puissance demandée par le transformateur au primaire va être en partie dissipée sous forme de chaleur dans le transfo (pertes cuivre et pertes fer) et fournie à la charge depuis le secondaire comme le montre le bilan de puissance dans la figure ci-dessous



**Fig.2.5. Bilan de puissance dans un transformateur réel**

$p_{j1}$  les pertes joules dans l'enroulement primaire de résistance  $r_1$ ,

$p_{j2}$  les pertes joules dans l'enroulement secondaire de résistance  $r_2$ ,

Les pertes cuivre est la somme des pertes joules dans les enroulements primaire et secondaire :  
 $p_{cuivre} = p_{j1} + p_{j2}$

Les pertes fer dans le circuit magnétique :  $p_{fer} = p_{hysteéresis} + p_{courant\ de\ foucault}$

Le bilan de puissance d'un transformateur réel qui alimente une charge s'écrit :

$$P_1 = P_2 + \sum pertes$$

$$P_1 = P_2 + p_{j1} + p_{j2} + p_{fer}$$

**II.14. Le rendement d'un transformateur réel**

Le rendement  $\eta$  est le rapport entre la puissance utile fournie à la charge au secondaire  $P_2$  et la puissance absorbée par le transformateur  $P_1$  au primaire :

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

Si on connaît la valeur des pertes et la puissance mesurée au primaire  $P_1$ , le rendement s'écrit selon la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_1 - p_{j1} - p_{j2} - p_{fer}}{P_1}$$

Si on connaît la puissance mesurée au secondaire  $P_2$ , le rendement vaut :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + p_{j1} + p_{j2} + p_{fer}}$$

**Remarque :**

1-Le rendement généralement est exprimé en pourcentage %, dans un transformateur réel  $P_2 < P_1$ , le rendement  $\eta < 1$ .

2-Le rendement varie selon les conditions de fonctionnement de transformateur, le bon rendement est obtenu pour les valeurs nominales indiquées sur la plaque signalétique du transformateur.

**II.15. Evaluation du rendement d'un transformateur**

Le calcul du rendement peut s'effectuer par deux méthodes :

**II.15.1 -Méthode de mesure directe :**

Dans cette méthode on mesure la puissance absorbée et la puissance et la puissance fournie à la charge en utilisant deux wattmètres comme il est illustré sur la figure suivante :

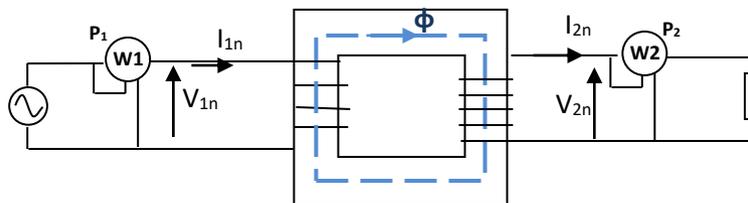


Fig .2.6. Evaluation du rendement par mesure directe

Après mesure le rendement se calcule selon la relation :  $\eta = \frac{P_2}{P_1}$

**II.15.2.- Mesure par la méthode des pertes séparée :**

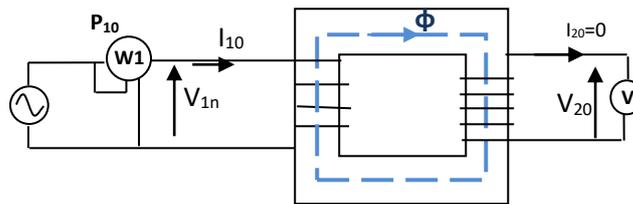
La méthode des pertes séparées s'appuie sur l'observation que les pertes d'un transformateur ont deux origines :

- Les pertes cuivre les pertes par effet Joules dans les enroulements.
- Les pertes fer les pertes magnétiques dans le circuit magnétique.

Deux essais particuliers du transformateur permettent de mesurer séparément ces pertes dans les conditions nominales :

**II.15.2.1. Essai à vide d'un transformateur:**

Le primaire du transformateur est sous une tension nominale  $V_{10}=V_{1n}$ , (indice 0 indique l'essai à vide), Le secondaire n'alimente aucune charge (transformateur à vide) on place un voltmètre pour mesurer la tension  $V_{20}$  dans ces conditions comme le montre la figure



**Fig. 2.7. Montage d'un essai à vide d'un transformateur**

Dans l'essai à vide (le transformateur n'alimente aucune charge)  $I_{20} = 0$  donc  $p_{j2} = 0$  et la puissance fournie  $P_2 = 0$

Le bilan de puissance du transfo lors d'un essai à vide est :

$$P_{10} = p_{j1} + p_{fer}$$

à vide le courant  $I_{10}$  est faible par conséquent :

$$P_{10} \approx p_{fer}$$

La lecture du wattmètre 1 dans l'essai à vide indique les pertes fer.

**II.15.2.2. Essai en court-circuit d'un transformateur:**

Le secondaire du transformateur est court-circuité, un ampèremètre est placé pour mesurer le courant  $I_{2cc}$ , l'alimentation du primaire doit être sous tension réduite  $V_{1cc} \ll V_{1n}$  (ne dépasse pas les 10% de la tension nominale) le montage est bien illustré dans la figure

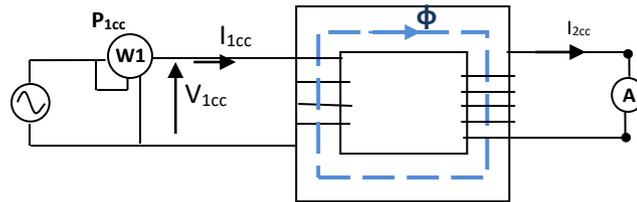


Fig.2.8. Montage d'un essai en court-circuit du transformateur

Les bornes de l'enroulement secondaire sont court-circuitées.

La puissance  $P_{1cc}$  au primaire en court circuit correspond à :

$$P_{1cc} = p_{j1cc} + p_{j2cc} + p_{fer}$$

Suite à que la mesure est faite sous tension  $V_1$  réduite, par conséquent les pertes fer  $p_{fer}$  sont négligeables devant les pertes cuivre :

$$P_{1cc} = p_{j1cc} + p_{j2cc}$$

II.16. Transfert d'impédance

On considère un transformateur monophasé parfait de rapport de transformation  $m$ , qui alimente une impédance  $Z$ . L'objectif est de transférer l'impédance  $Z$  du côté secondaire au côté primaire.

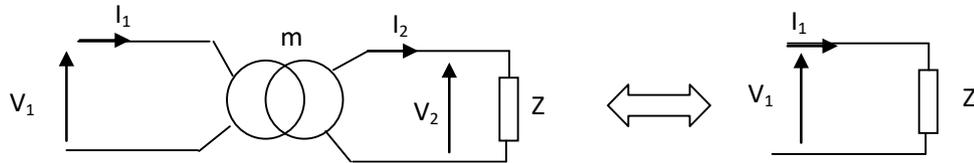


Fig 2.9 Transfert d'impédance

$$V_2 = Z * I_2$$

Or  $V_2 = m * V_1$  et  $I_2 = \frac{I_1}{m}$

$$m * V_1 = Z * \frac{I_1}{m}$$

$$V_1 = I_1 * \frac{Z}{m^2}$$

On pose  $Z' = \frac{Z}{m^2}$  donc on obtient

$$V_1 = I_1 * Z'$$

Finalement, tout se passe, comme si le réseau primaire (la source) alimentait directement l'impédance  $Z'$ , ayant des caractéristiques mieux adaptées à la source. En conclusion, le fonctionnement n'est pas modifié si on respecte les règles suivantes :

**Règle 1** : on peut transférer(ou ramener) une impédance, située initialement au secondaire, vers le primaire. En la divisant par  $m^2$ .

**Règle 2** : on peut transférer (ou ramener) une impédance, située initialement au primaire, vers le secondaire. En la multipliant par  $m^2$ .

17.1-Schéma équivalent d'un transformateur

Si on note respectivement par :

- $r_1(\Omega)$  :résistance de l'enroulement primaire
- $r_2 (\Omega)$  : résistance de l'enroulement secondaire
- $X_1(\Omega)$  : réactance de l'enroulement primaire
- $X_2 (\Omega)$  : réactance de l'enroulement secondaire

- $R_f (\Omega)$  : résistance de circuit magnétique
- $X_m (\Omega)$  : réactance de circuit magnétique

Le schéma équivalent du transformateur réel est représenté par la figure

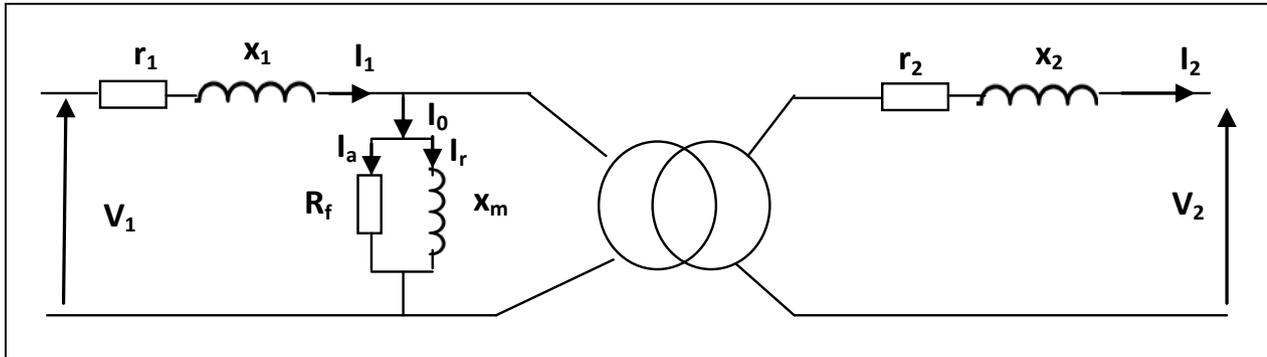


Fig 2.10. Le schéma équivalent du transformateur réel

### 17.2-Transformateur monophasé dans l'approximation de Kapp

L'hypothèse de Kapp consiste à négliger le courant  $I_{10}$  devant le courant  $I_1$  par conséquent le schéma équivalent ne va pas tenir compte de  $I_{10}$  ce qui revient à débrancher l'impédance magnétisante ( $R_f // X_m$ ), le schéma équivalent devient :

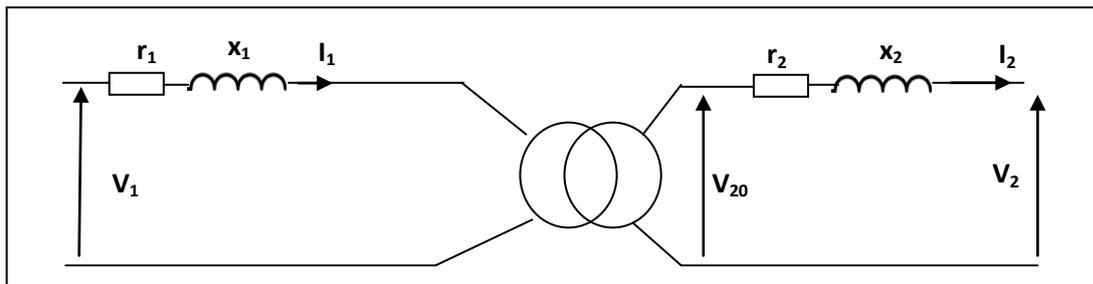


Fig. 2.11. Le schéma équivalent du transformateur (Kapp)

17.3. Schéma équivalent ramené au secondaire

On peut faire passer l'impédance  $Z_1 = r_1 + j x_1$  du primaire au secondaire, il suffit de la multiplier par  $m^2$ . On obtient le schéma suivant :

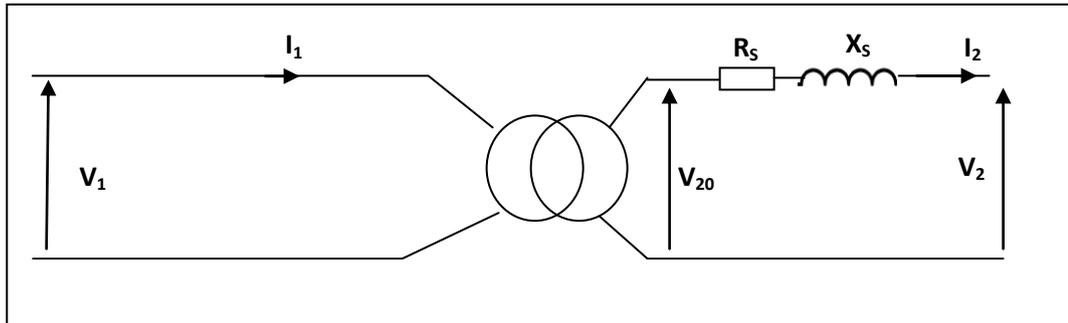


Fig 2.12 Schéma équivalent d'un transformateur ramené au secondaire

Avec :

$R_s = r_2 + m^2 r_1$ : la résistance du transformateur ramenée au secondaire

$X_s = x_2 + m^2 x_1$ : La réactance de fuites magnétiques ramenée au secondaire La loi des mailles appliquée au secondaire donne :  $V_2 = V_{20} - (R_s + jX_s) I_2$

18-Détermination des éléments du schéma équivalent :

On effectue deux essais :

**18.1.Essai à vide** : Cet essai consiste à alimenter l'enroulement primaire par sa tension nominale et on mesure la tension à vide au secondaire, le courant et la puissance à vide absorbées par le primaire.

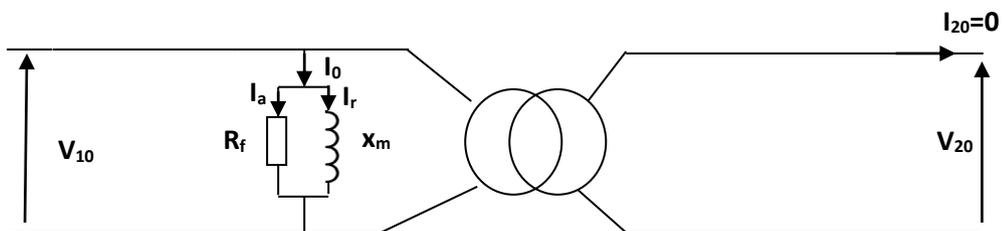


Fig 2.13. Le schéma équivalent du transformateur dans l'essai à vide

Selon le schéma équivalent du transformateur dans l'essai à vide :

Le courant actif peut être déterminé  $I_a = \frac{V_{10}}{R_f}$

Le courant réactif peut être déterminé  $I_{ra} = \frac{V_{10}}{X_m}$

Dans ce cas, on peut déterminer pratiquement :

- Le rapport de transformation  $m$  :  $m = \frac{V_{20}}{V_{10}} = \frac{V_{2n}}{V_{1n}}$
- La résistance de circuit magnétique  $R_f$  :  $R_f = \frac{V_{10}^2}{P_{10}}$
- La réactance magnétisante  $X_m$  :  $X_m = \frac{V_{10}^2}{Q_{10}}$

### 18.2. Essai en court-circuit

On applique au primaire une tension réduite  $V_{1cc} \ll V_{1n}$  (tension nominale), on augmente progressivement  $V_{1cc}$  depuis 0 jusqu'à avoir  $I_{2cc} = I_{2n}$

Le schéma équivalent ramené au secondaire (en court-circuit) est le suivant :

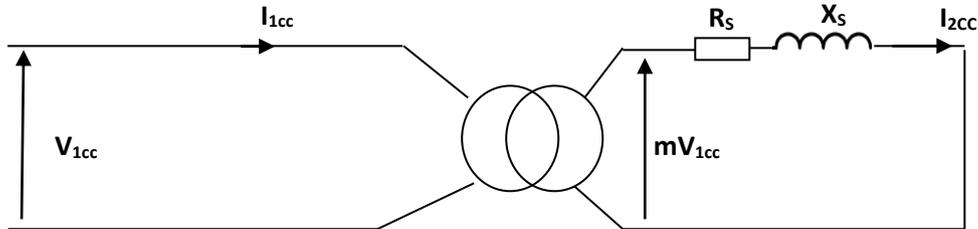


Fig 2.14. Le schéma équivalent du transformateur dans l'essai en court circuit

Les pertes fer lors de l'essai en court-circuit sont négligeables et par conséquent :

$$P_{1cc} = R_s \cdot I_{2cc}^2 \text{ ainsi on peut déduire : } R_s = \frac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2}$$

$$\text{L'impédance } Z_s \text{ peut être déterminée : } Z_s = \frac{m \cdot V_{1cc}}{I_{2cc}}$$

$$\text{On peut déduire La réactance } X_s : X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2}$$

### 19. Chute de tension

La chute de tension  $\Delta V_2$  est la différence entre valeurs efficaces de la tension à vide et la tension en charge :

$$\Delta V_2 = V_{20} - V_2$$

Pour déterminer la chute de tension on peut se servir de la relation approche suivante :

$$\Delta V_2 = V_{20} - V_2 \approx I_2 (R_s \cdot \cos \varphi_2 + X_s I_2 \sin \varphi_2)$$

