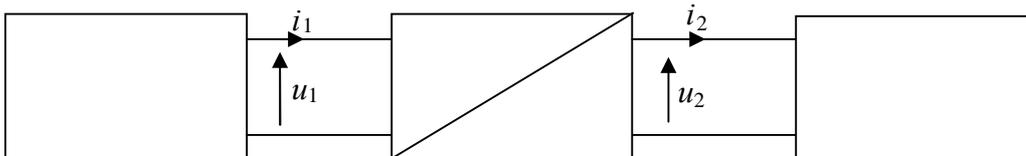


TRANSFORMATEUR MONOPHASE

I. FONCTION DU TRANSFORMATEUR

Le transformateur est un d'énergie électrique Il transfère, en, une puissance d'une à une, en adaptant les valeurs de la tension (ou du courant) au récepteur.



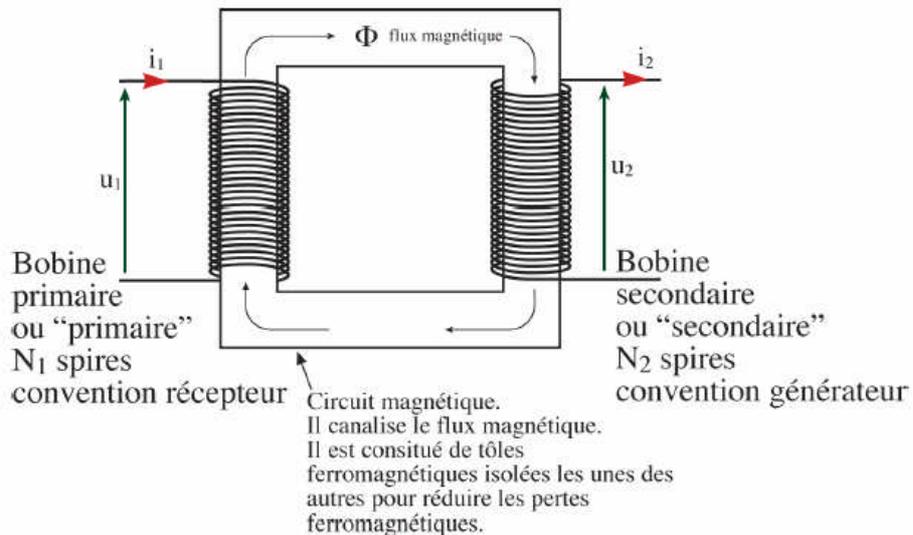
Le rôle d'un transformateur est en général, de d'une tension sans en changer ni (sinusoïdale), ni

U_1 et U_2 sont respectivement les valeurs efficaces des tensions u_1 et u_2 .

Si $U_2 > U_1$: si $U_2 < U_1$:

II. PRESENTATION DU TRANSFORMATEUR

1. Description et symbole



Un transformateur est constitué d'un sur lequel sont disposés :
.....

Nous noterons le nombre de spires du primaire et celui du secondaire.

De manière générale, les grandeurs du seront indicées et les grandeurs du indicées

On utilise 2 symboles normalisés pour le transformateur.

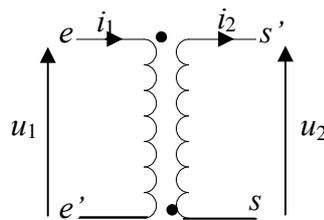
2. Conventions

PRIMAIRE : le bobinage du primaire est celui qui : il joue le rôle d'un et, pour cette raison, nous adoptons au primaire une convention

SECONDAIRE : le bobinage du secondaire est celui qui : il a un rôle de et, pour cela, nous adoptons au secondaire une convention

BORNES HOMOLOGUES : le primaire et le secondaire sont orientés de façon que des courants d'intensité i_1 et i_2 de même signe, engendrent des dont les lignes de champ magnétique

Les bornes d'entrée de ces courants de même signe sont appelées bornes homologues.



... et sont des bornes homologues ainsi que et

3. Principe de fonctionnement

Rappel : **LOI DE FARADAY**

Une à travers une spire crée une
Inversement une dans une spire crée une à travers celle-ci.

$$e = \dots\dots\dots$$

Le bobinage du primaire est alimenté sous une

Il est alors parcouru par un qui crée un

dans le Le bobinage du secondaire, traversé par ce , est le siège d'une La tension au secondaire est , de même que la tension au primaire de valeur efficace U_2 de la valeur efficace U_1 de la tension au primaire.

III. MODELE EQUIVALENT DU TRANSFORMATEUR PARFAIT.

1. hypothèse

Un transformateur est parfait lorsqu'il ne provoque d'énergie. Cette définition implique la réalisation simultanée des 3 conditions suivantes :

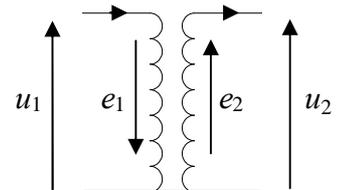
- ✓ Il n'y a pas de , donc la résistance R_1 et R_2 des deux enroulements sont
- ✓ Il n'y a pas de , donc ni , ni
- ✓ Il n'y a pas de , donc les lignes de champ sont caractérisées par le Cette hypothèse entraîne aussi que , ne pas et que la perméabilité relative μ_r est

2. Relations du transformateur parfait.

2.1. Relations entre les tensions.

L'enroulement du primaire, formé de N_1 spires est le siège d'une f.é.m. :

Loi de Faraday : $e_1 = \dots\dots\dots$ et $e_1 = \dots\dots\dots$ u_1 est sinusoïdal.



Le flux ϕ traverse toute spire du secondaire puisque nous avons supposé qu'il n'y avait pas de fuites magnétiques.

$e_2 = \dots\dots\dots$

$$\frac{d\phi}{dt} = -\dots\dots\dots = -\dots\dots\dots \Rightarrow \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$\dots\dots\dots = -\dots\dots\dots = \dots\dots\dots$ le signe - indique une de phase

En valeur efficace : $\dots\dots\dots = \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$

Le rapport $\frac{U_2}{U_1}$ est noté et nous l'appelons rapport de transformation du transformateur.

$$u_2 = \dots\dots\dots \text{ d'où } U_2 = \dots\dots\dots$$

2.2. Relations entre les intensités des courants primaire et secondaire.

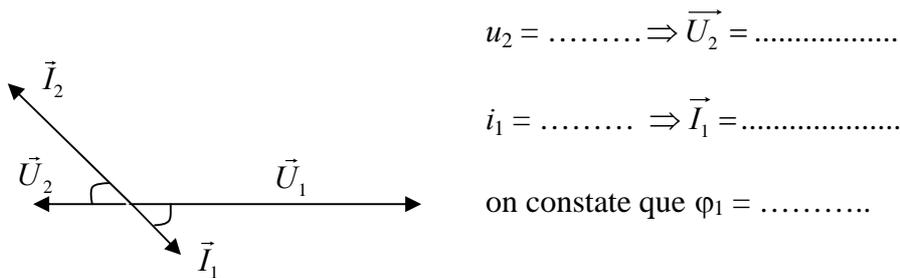
Les flux étant et le, le théorème d'..... s'écrit :

$$N_1 \cdot i_{1v} (\text{à vide}) = \dots\dots\dots \approx 0 \Rightarrow \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

$$\text{On en déduit: } \frac{U_2}{U_1} = - \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow i_1 = \dots\dots\dots \Rightarrow I_1 = \dots\dots\dots$$

Remarque: selon la loi de Lenz, les Ampères-tours du secondaire s'opposent au primaire.

2.3. Diagramme de Fresnel



$$u_2 = \dots\dots\dots \Rightarrow \vec{U}_2 = \dots\dots\dots$$

$$i_1 = \dots\dots\dots \Rightarrow \vec{I}_1 = \dots\dots\dots$$

on constate que $\varphi_1 = \dots\dots\dots$

2.4. formule de Boucherot

u_1 est une fonction sinusoïdale du temps et $e_1 = \dots\dots\dots$ Or $e_1 = \dots\dots\dots$ ce qui implique que le flux φ soit aussi une

Posons :

$$\varphi = \dots\dots\dots \Rightarrow e_1 = \dots\dots\dots$$

or le flux s'exprime par la relation: $\hat{\phi} = \dots\dots\dots$

L'amplitude \hat{E}_1 de e_1 s'écrit: $\hat{E}_1 = \dots\dots\dots$ et sa valeur efficace

$$E_1 = \frac{\hat{E}_1}{\sqrt{2}} = \dots\dots\dots$$

Remarque:

De $e_1 = \dots\dots\dots$ on en déduit $E_1 = \dots\dots\dots$ et comme

$U_2 = \dots\dots\dots$

$U_2 = \dots\dots\dots$

2.5. Relations entre les puissances

Les relations établies précédemment: $\begin{cases} u_2 = \dots\dots\dots \\ U_2 = \dots\dots\dots \\ i_1 = \dots\dots\dots \\ I_1 = \dots\dots\dots \\ \varphi_1 = \dots\dots\dots \end{cases}$

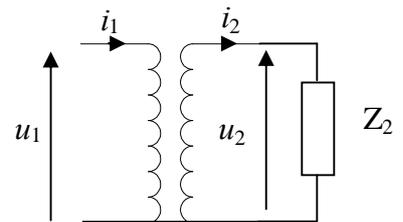
entraînent les relations suivantes entre les puissances:

- ✓ puissances instantanées: $p_1 = \dots\dots\dots$
- ✓ puissances actives: $P_1 = \dots\dots\dots$
- ✓ puissances réactives: $Q_1 = \dots\dots\dots$
- ✓ puissances apparentes: $S_1 = \dots\dots\dots$
- ✓ rendement du transformateur: $\eta = \dots\dots\dots$

2.6. Modèle équivalent

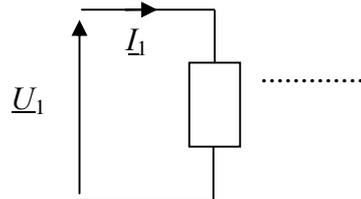
2.6.1. « Vu » du primaire

$\begin{cases} \underline{U}_2 = \dots\dots\dots \\ \underline{I}_1 = \dots\dots\dots \\ \underline{U}_2 = \dots\dots\dots \end{cases} \quad \underline{Z}_2 = \dots\dots\dots$



Pour la source de tension u_1 , le transformateur et sa charge sont équivalents à l'impédance

$Z_1 = \dots\dots\dots$



2.6.2. Vu du secondaire

Le transformateur parfait vu du secondaire se comporte comme une source de tension idéale de f.é.m. u_2 égale à

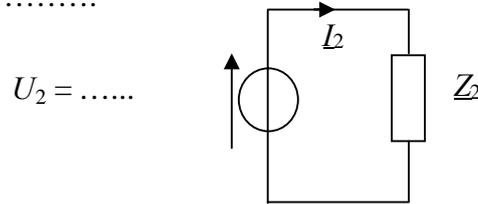


Schéma équivalent vu du secondaire

IV. LE TRANSFORMATEUR REEL

1. Plaque signalétique

Le rapport de transformation se mesure à vide ($I_2 = 0$) $m = \dots\dots\dots$

Selon la norme NFC 15100 elle indique:

- ✓ la valeur de la puissance apparente: $S_N = \dots\dots\dots$
- ✓ la tension d'alimentation du primaire
- ✓ la tension d'utilisation à vide du secondaire:
- ✓ la fréquence d'utilisation (en France $f = 50$ Hz)

Ces indications permettent le calcul théorique:

- ✓ du rapport de transformation défini par $m = \dots\dots\dots$
- ✓ des intensités efficaces des courants nominaux: $I_{1N} = \dots\dots\dots$ et $I_{2N} = \dots\dots\dots$

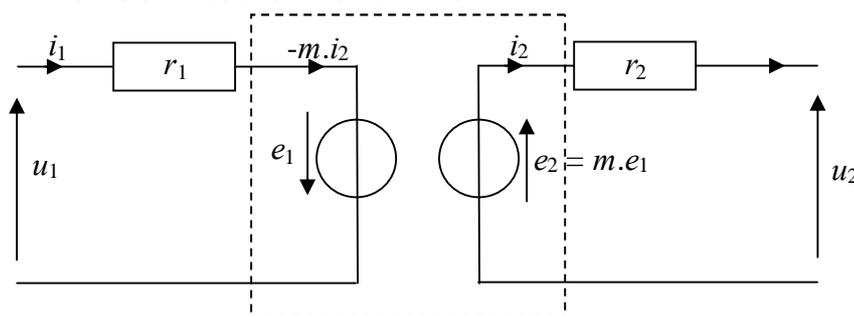
2. Analyse des pertes du transformateur

2.1. Pertes par effet Joule

Les enroulements primaire et secondaire présentent des résistances que nous noterons r_1 et r_2 . Le transformateur sera le siège de pertes par effet Joule (encore appelées

$P_{cu} = \dots\dots\dots$

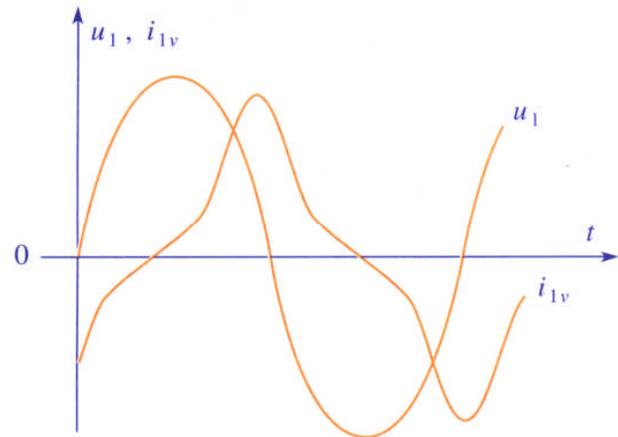
Remarques: On complète le schéma équivalent établi pour le transformateur parfait en y incorporant les résistances des enroulements.



2.2. Pertes magnétiques

Le circuit magnétique n'est pas parfait, il présente le phénomène de

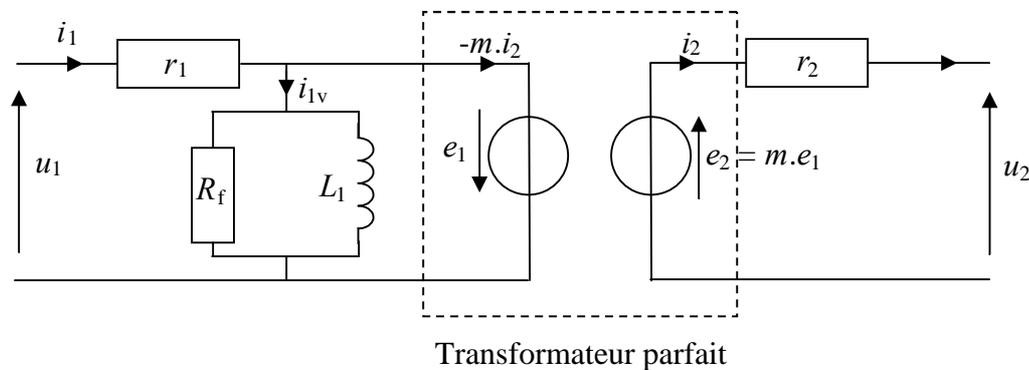
..... Il est donc le siège de pertes par (l'aimantation absorbe de l'énergie. Au cours de la désaimantation, le matériau ne restitue pas toute l'énergie reçue pendant l'aimantation. Une partie de l'énergie électrique fournie est dissipée en chaleur dans le circuit magnétique) et de pertes par de (le flux alternatif ϕ crée des courants induits, appelés courant de Foucault qui entraînent l'échauffement du circuit magnétique). Ces pertes sont minimisées grâce au feuilletage du circuit magnétique dont la somme constitue les pertes dans le fer.



Les phénomènes de saturation et d'hystérésis entraînent un fonctionnement du transformateur qui se traduit par un d'intensité bien que la tension primaire soit sinusoïdale.

2.3. Schématisation des pertes magnétiques

Le graphique précédent indique que le courant i_{1v} est en sur la tension u_1 . Le primaire de la puissance comme une inductance pure L_1 et de la puissance que l'on schématise par une résistance R_f en parallèle à L_1 .



Remarque: $I_{1v} \ll I_N$

2.4. Les fuites magnétiques

Les lignes de champ ne sont pas totalement canalisées par le circuit magnétique. Les flux de fuites ϕ_{f1} et ϕ_{f2} des deux enroulements sont proportionnels aux courants i_1 et i_2 qui le traversent.

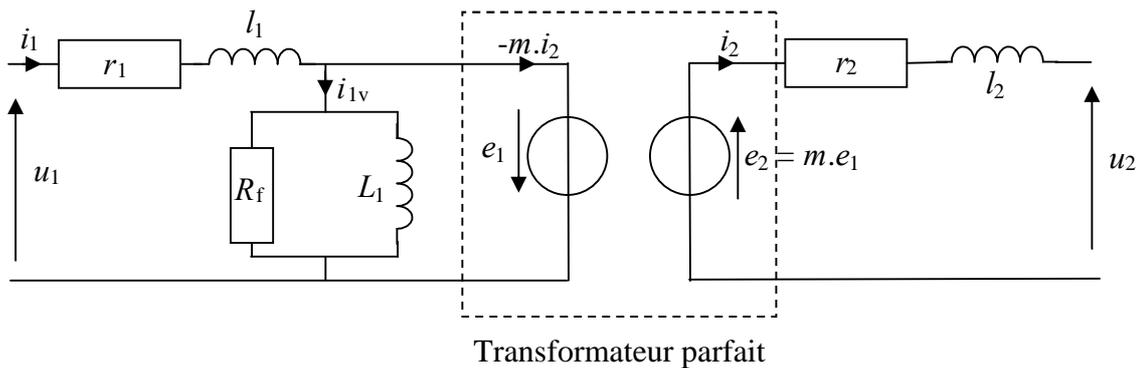
Les constantes de proportionnalités sont appelés inductances de fuites l_1 et l_2 :

$$\phi_{f1} = \dots\dots\dots \text{ et } \phi_{f2} = \dots\dots\dots$$

3. Modèle équivalent du transformateur réel

3.1. Linéarisation du circuit magnétique.

Si on utilise un matériau de cycle d'hystérésis et que l'on évite la en limitant de la tension u_1 , on peut admettre que le circuit magnétique est encore On représente alors le transformateur réel par un modèle équivalent linéaire, dans lequel R_f , L_1 , l_1 et l_2 sont des constantes indépendantes des courants i_1 et i_2 .



3.2. Chute de tension secondaire en charge

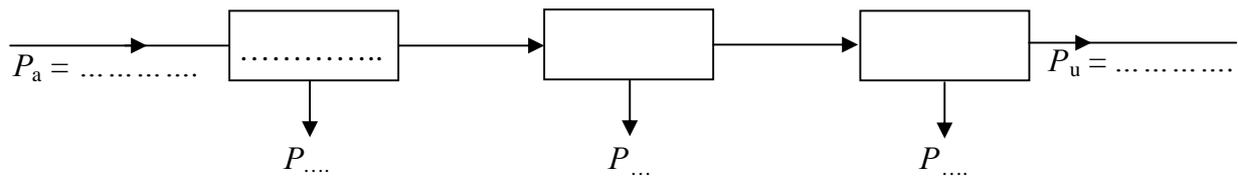
A cause des résistances des enroulements et des fuites magnétiques, la tension secondaire en charge u_2 est de la tension à vide u_{2v} . On appelle secondaire en charge, la différence entre les valeurs efficaces de ces tensions:

$$\Delta U_2 = \dots\dots\dots$$

4. Bilan des puissances

4.1. Rendement du transformateur.

A la puissance utile $P_2 = \dots\dots\dots$ fournie à la charge, il faut ajouter les pertes dans le cuivre $P_{CU} = \dots\dots\dots$ et les pertes dans pour obtenir la puissance absorbée par le primaire.

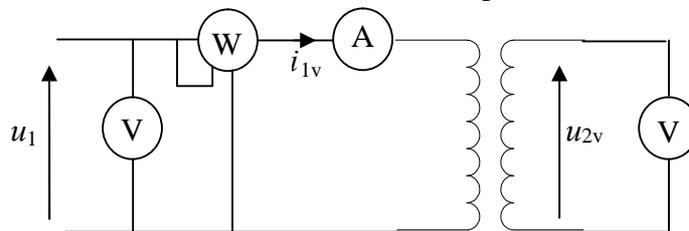


$P_a = \dots\dots\dots$

Le rendement : $\eta = \frac{P_u}{P_a} < 1$ mais en est proche.

4.2. Détermination des pertes fer

On effectue l'essai à vide sous tension nominale au primaire.



Il s'agit d'un montage dérivation (.....). i_{1v} n'étant pas sinusoïdal, il convient d'utiliser un ampèremètre (ou numérique) pour mesurer sa valeur efficace.

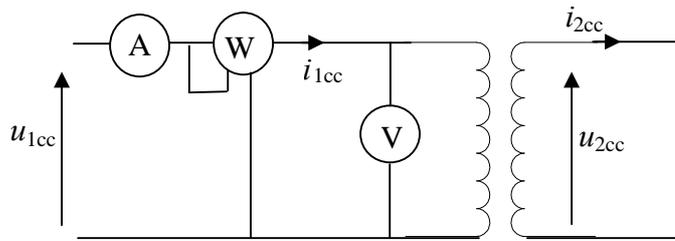
Le secondaire étant ouvert, $I_2 = \dots\dots\dots$ d'où $P_{j2} = \dots\dots\dots$. De même $P_u = \dots\dots\dots$

$P_{1v} = \dots\dots\dots$ or $P_{\dots\dots} \ll P_{\dots\dots}$ on en déduit $P_{1v} \approx \dots\dots\dots$

Remarque : les pertes fer dépendent essentiellement , donc de la et de la Comme ces deux grandeurs restent les mêmes , les pertes fer mesurées sont les mêmes que celle

4.3. Détermination des pertes Joule

On effectue un essai en , sous tension $\left(U_{1cc} < \frac{U_{1N}}{10} \right)$ et à courant secondaire



On utilise une

 pour mesurer I_{2cc}

Augmentons la valeur de U_1 jusqu'à obtenir $I_{2cc} = \dots\dots\dots$. On mesure alors $U_1 = U_{1cc}$ et I_{1cc} .

$P_a = \dots\dots\dots$ or $U_2 = \dots\dots\dots$ donc $P_{2cc} = \dots\dots\dots$

Les pertes dans le fer dans cet essai sont négligeables puisqu'elles dépendent de , très réduite par rapport à sa valeur nominale. $P_{fer} \approx \dots\dots\dots$

$$P_{1cc} = \dots\dots\dots$$

5. Modèle équivalent du transformateur réel

5.1. transformateur en fonctionnement au voisinage du régime nominal

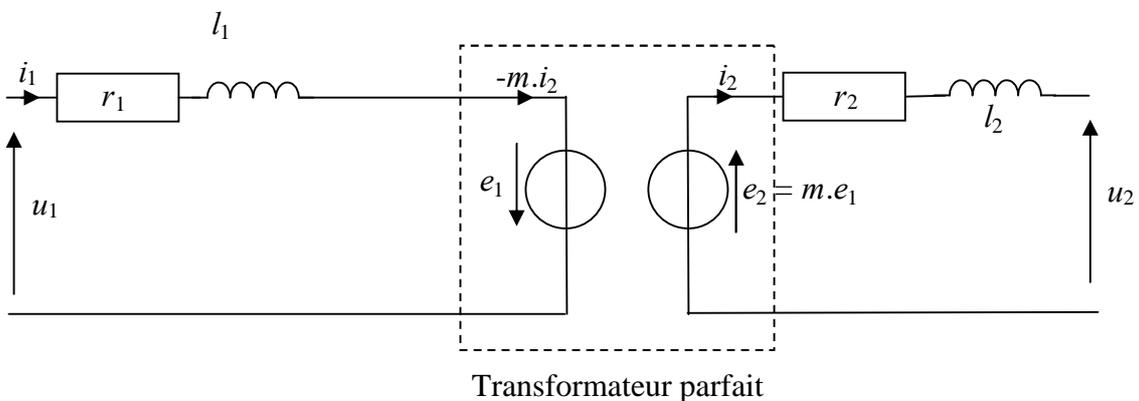
A vide et en charge, le flux se conserve : $N_1 \cdot i_{1v}$ (à vide) =

$$\Rightarrow i_1 + \frac{N_2}{N_1} i_2 = i_{1v} \text{ soit } i_1 = i_{1v} - \frac{N_2}{N_1} i_2 \text{ or } m = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow i_1 = i_{1v} - m \cdot i_2 \Rightarrow \underline{I_1} = \underline{I_{1v}} - m \underline{I_2}$$

hypothèse de Kapp : $i_{1v} \ll i_1$ et i_2 au voisinage du régime nominal. On suppose le circuit magnétique parfait $N_1 \cdot i_1 = 0 = N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2$

$$\Rightarrow \underline{I_1} = \dots\dots\dots \text{ d'où } \underline{I_1} = \dots\dots\dots$$

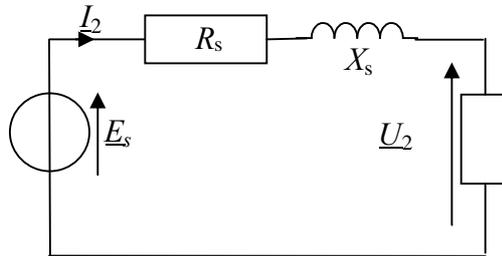
En charge, le transformateur réel se comporte, pour les courants, comme un transformateur parfait.



5.2. M.E.T. pour la charge

Pour la charge, le transformateur peut être assimilé à un de f.é.m. E_s et d'impédance Z_s qui lui fournirait le même courant I_2 , sous la même tension U_2 . On obtient ainsi :

$\underline{U}_2 = \dots\dots\dots$
 $\underline{Z}_s = \dots\dots\dots$
 $\underline{U}_2 = \dots\dots\dots$
 avec $X_s = \dots\dots\dots$



5.3. Détermination expérimentale de R_s et X_s

D'après l'essai en court-circuit : $P_{Cu} = \dots\dots\dots$

Or $I_1 = \dots\dots\dots$ d'ou $P_{Cu} = \dots\dots\dots$

avec $R_s = \dots\dots\dots$ $R_s = \dots\dots\dots$

D'après l'essai en charge :

$\underline{E}_s = \dots\dots\dots$

En court-circuit : $\underline{U}_2 = 0 \Rightarrow$

Or $\underline{Z}_s = \dots\dots\dots \Rightarrow Z_s^2 = \dots\dots\dots$ $X_s = \dots\dots\dots$

5.4. Détermination de la tension U_2 en charge



Pour prédéterminer quelle sera la valeur efficace U_2 de la tension secondaire pour une charge donnée (I_2 et φ_2 sont connus), nous utilisons soit les grandeurs complexes, soit le diagramme de Kapp (vecteurs de Fresnel)

$$\underline{E}_s = -m \underline{U}_1 = R_s \underline{I}_2 + jX_s \underline{I}_2 + \underline{U}_2 \Rightarrow -m \underline{U}_1 = R_s \underline{I}_2 + \underline{U}_x + \underline{U}_2$$

On en déduit la valeur approchée de la chute de tension au secondaire en charge : $\Delta U_2 = U_{2v} - U_2 = R_s \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + X_s \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2$