

Chapitre 5 : TRANSFORMATEUR MONOPHASE

I. GENERALITES

Un **transformateur** est une machine **statique** permettant de modifier un **système de tension** et de **courant alternatif** en un **système de tension** et de **courant** toujours **alternatif** de valeurs différentes mais de **même fréquence**. En d'autres termes, il permet d'élever (ou d'abaisser) la tension tout en abaissant (ou élevant) l'intensité avec un excellent rendement.

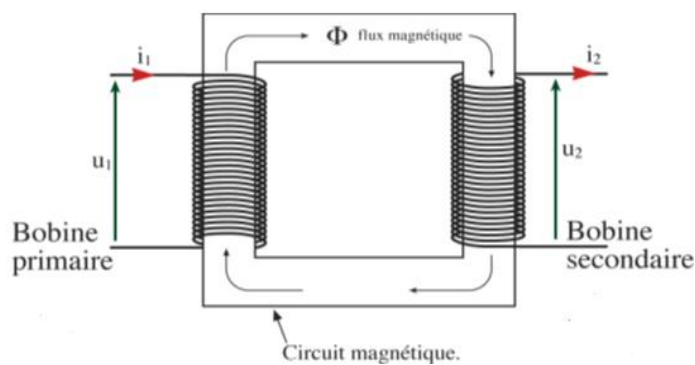
Le **transport** de l'énergie électrique à **longue distance** impose l'utilisation de tensions élevées (**MT**, **HT** ou **THT**) afin de limiter les pertes joule (RI^2) en ligne et son usage **domestique** pour des raisons de sécurité n'est possible qu'en **BT**.

Le transformateur sert aussi à abaisser la tension **BT** (220V) jusqu'à obtenir la valeur recherchée en **TBT** pour construire une alimentation à courant continue nécessaire pour tout appareil transistorisé (ampli, ordinateur, radio, télé, magnétoscope, etc.) consommant trop de puissance pour être alimenté par des piles électriques.

1.1. Constitution :

Le transformateur monophasé est constitué d'un **circuit magnétique** sur lequel est bobiné deux **bobines ou enroulements** électriquement isolés :

- Bobine primaire comporte N_1 spires
- Bobine secondaire comporte N_2 spires



1.1.1. Circuit magnétique

Le Circuit magnétique assure le couplage des bobines en canalisant le flux magnétique. Il est constitué par un empilage de tôles d'acier au silicium, isolées entre elles par une couche de vernis synthétique : on dit qu'il est **feuilleté**. Ce **feuilletage** est effectué dans le but de réduire les pertes d'énergie due à la progression des courants de Foucault : c'est ce qu'on appelle **pertes par courants de Foucault**.

La nature des tôles (alliage d'acier et de silicium) est choisie en fonction du cycle d'hystérésis des matériaux afin de réduire les pertes d'énergies qu'elle crée, ainsi qu'une déformation de la forme du courant (sinusoïde) : c'est ce qu'on appelle **pertes par hystérésis**.

1.1.2. Enroulements

Ils sont au nombre de deux et sont placés autour du circuit magnétique afin de diminuer les fuites magnétiques. Ils ont des nombres de spires différents (sauf dans le cas des transformateurs d'isolement). L'enroulement qui comporte le nombre de spires le plus élevé est l'enroulement **haute tension (HT)**, l'autre étant l'enroulement **basse tension (BT)**.

L'enroulement alimenté par une source de tension sinusoïdale est le **primaire**, il fonctionne en **récepteur**. L'autre enroulement aux bornes duquel on branche **une charge** est le **secondaire**, il fonctionne en **générateur**.

1.2. Symboles

Il existe deux(2) symboles pour représenter un transformateur monophasé :



II. PRINCIPE

Ce principe est fondé sur le phénomène de l'induction mutuelle (loi de Faraday sur l'induction électromagnétique)

❖ Rappel : loi de Faraday - f.é.m induite

Toute variation de flux magnétique à travers une bobine crée aux bornes de cette bobine une force électromotrice (fém.) induite qui a pour expression : $e = -N \frac{d\phi}{dt}$

☞ La bobine primaire est soumise à une tension sinusoïdale : $u_1 = U_{1\max} \sin(\omega t)$

☞ L'inductance de cette bobine est très grande devant sa résistance : $l\omega \gg r$

☞ L'intensité à travers cette bobine est presque en arrière de $\frac{\pi}{2}$ sur la tension :

$$i_1 = I_{1\max} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

☞ Ce courant i_1 produit un flux ϕ en phase, soit $\phi = \phi_{\max} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$

Ce flux ϕ_1 variable est lié à la fois aux deux enroulements et va induire une force électromotrice au

niveau de chaque enroulement soit $e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$ et $e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$

☞ En remplaçant ϕ_1 par son expression on aura :

$$e_1 = -N_1 \frac{d[\varphi_{\max} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})]}{dt} = -N_1 \varphi_{\max} \omega \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = -N_1 \varphi_{\max} \omega \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2} + \pi\right) = N_1 \varphi_{\max} \omega \cdot \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

De même $e_2 = N_2 \varphi_{\max} \omega \cdot \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$

☞ Les valeurs maximales des forces électromotrices (fém.) sont :

- Pour le primaire : $E_{1\max} = N_1 \varphi_{\max} \omega$
- Pour le secondaire : $E_{2\max} = N_2 \varphi_{\max} \omega$

2.1. Formule de BOUCHEROT

Le flux maximal étant défini par la relation $\varphi_{\max} = S \cdot B_{\max}$. Où B_{\max} est le champ magnétique maximal à travers les spires et S la section (supposée constante) du circuit magnétique.

L'expression efficace de la f.é.m. est :

$$E_2 = \frac{E_{2\max}}{\sqrt{2}} = \frac{N_2 \varphi_{\max} \omega}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi \times N_2 B_{\max} S f}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_2 B_{\max} S f$$

$$E_2 = 4.44 N_2 f B_{\max} S \quad \text{et} \quad E_1 = 4.44 N_1 f B_{\max} S$$

La force électromotrice secondaire E_2 donnée par la formule de Boucherot est la même que celle qui serait mesurée au secondaire du transformateur à vide U_{20} ou U_{2v} :

$$E_2 = 4.44 N_2 B_{\max} S f \approx U_{20}$$

2.2. Rapport de transformation m

C'est le quotient entre la fém. recueillie au secondaire par celle recueillie au primaire.

$$m = \frac{E_2}{E_1} = \frac{4.44 N_2 B_{\max} S f}{4.44 N_1 B_{\max} S f} = \frac{N_2}{N_1}$$

- Si $N_2 > N_1$ \Rightarrow $m > 1$: le transformateur est élévateur de tension
- Si $N_2 < N_1$ \Rightarrow $m < 1$: le transformateur est abaisseur de tension.
- Si $N_2 = N_1$ \Rightarrow $m = 1$: transformateur est isolateur.

2.3. Les pertes dans un transformateur monophasé

On note principalement deux types de pertes : les pertes dans le fer notées P_F et les pertes par effets joules (ou pertes cuivres) notées P_c .

Les pertes fer sont occasionnées par le circuit magnétique, alors que les pertes joules sont occasionnées par les enroulements (primaire et secondaire).

- **Les Pertes dans le fer :**

Elles sont dues aux fuites magnétiques, à la reluctance \mathcal{R} du circuit magnétique (la réluctance est tout ce qui s'oppose au passage du flux dans le circuit magnétique) à l'hystérésis et au courant de Foucault. Elles sont réparties en deux groupes :

- Les Pertes d'énergies actives causées par la résistance du fer R_F
- Les pertes d'énergies réactives causées par l'inductance du fer L_m

- **Les pertes par effets joules ou pertes cuivres :**

Ces pertes sont occasionnées par le passage du courant dans les enroulements du primaire et du secondaire :

- Les Pertes d'énergies actives occasionnées par les résistances de fuites R_1 et R_2
- Les pertes d'énergies réactives occasionnées par les inductances de fuites L_1 et L_2

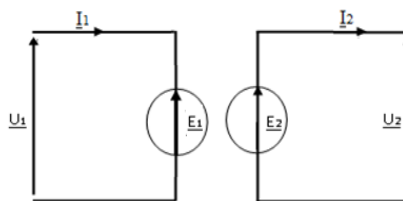
III. Etude du transformateur Parfait

3.1. Définition

Un transformateur parfait est un transformateur idéal dans lequel on néglige d'une part les éléments qui consomment de l'énergie active (résistance primaire et secondaire, hystérésis et courants de Foucault du circuit magnétique), d'autre part les éléments qui consomment de l'énergie réactive (inductances de fuites des enroulements et reluctance du circuit magnétique).

3.2. Propriétés du transformateur parfait :

3.2.1. Modèle équivalent :



3.2.2. Relations entre les grandeurs :

Considérons les grandeurs : $U_1 = E_1$ et $U_2 = E_2$

$$P_1 = P_2 ; S_1 = S_2 \text{ alors } Q_1 = Q_2$$

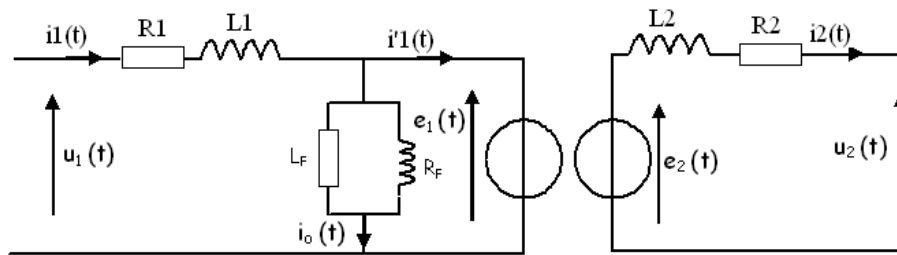
$$\text{Vu que } S_1 = S_2 \text{ alors } U_1 I_1 = U_2 I_2 \text{ d'où } \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = m$$

On constate alors que pour un transformateur parfait en fonctionnement toute la puissance absorbée par le primaire est restituée au secondaire, d'où le rendement est égal à 1.

IV. Etude du transformateur réel

Un transformateur est dit réel s'il fonctionne avec des pertes d'énergie active et réactive.

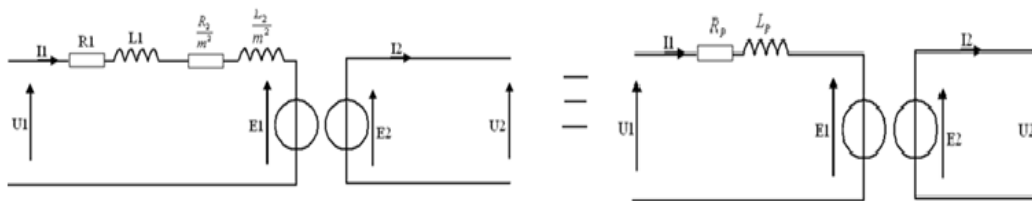
La puissance P_1 absorbée par le transformateur est plus grande que la puissance utile P_2 disponible au secondaire du transformateur. La différence entre ces deux puissances représente les différentes pertes. Le schéma équivalent d'un transformateur réel est alors le suivant :



4.2. Transfert d'impédance :

Dans l'hypothèse de Kapp, on négligera le courant à vide I_{1v} devant le courant primaire I_1 ; ce qui permet de négliger le circuit magnétique.

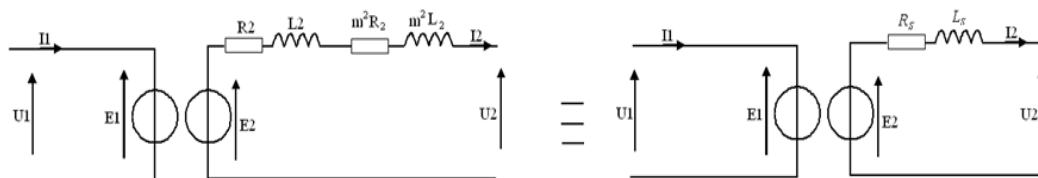
4.2.1. Vers le primaire :



R_p et L_p représentent la résistance et l'inductance ramenées au primaire.

$$R_p = R_1 + \frac{R_2}{m^2} ; L_p = L_1 + \frac{L_2}{m^2} \text{ alors } X_p = X_1 + \frac{X_2}{m^2}$$

4.2.2. Vers le secondaire :



R_s et L_s représentent la résistance et l'inductance ramenées au secondaire.

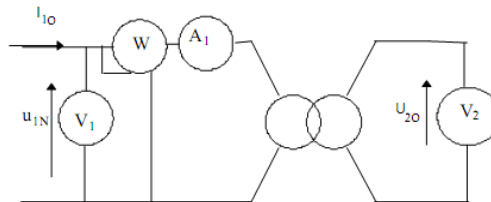
$$R_s = m^2R_1 + R_2 ; L_s = m^2L_1 + L_2 \text{ alors } X_s = m^2X_1 + X_2$$

Par analogie : $R_s = m^2R_p ; L_s = m^2L_p$ alors $X_s = m^2X_p$

4.3. ETUDE A VIDE :

On alimente le primaire du transformateur avec une tension U_1 et le secondaire est en circuit ouvert avec une tension U_{20} à ses bornes.

❖ Schéma de montage :



Puisque le courant au secondaire est nulle ($I_{20} = 0$), la puissance P_{20} ainsi les pertes par effet joule au secondaire du transformateur sont nulles.

Donc toute la puissance absorbée par le transformateur est consommé par le fer et la résistance de la bobine du primaire : $P_{1V} = P_{j1V} + P_F$ avec $P_{j1V} = r_1 I_{1V}^2$

Dans cet essai à vide, le courant I_{1V} est faible (**10% I_n**).

Ainsi toute la puissance absorbée dans l'essai à vide représente les pertes dans le fer : **$P_{10} = P_F$**

- Puissance active P_{1V} ou P_{10} : **$P_{10} = U_{1N} I_{10} \cos \phi_{10} = \frac{U_{1N}^2}{R_F}$**
- La puissance réactive Q_{1V} ou Q_{10} : **$Q_{10} = U_{1N} I_{10} \sin \phi_{10} = \frac{U_{10}^2}{X_F} = P_{10} \tan \phi_{10}$**
- Le rapport de transformation à vide : **$m = \frac{U_{20}}{U_{1N}}$**
- La puissance apparente à vide : **$S_{10} = U_{1N} I_{10}$**

Activité 1 :

Les essais d'un transformateur monophasé 220 V / 24 V , 50 Hz , 200 VA sont les suivants :

- Essai en continu au primaire : $U_1 = 6$ V ; $I_1 = 0,95$ A.
- Essai à vide : $U_1 = 220$ V, $P_{1V} = 6$ W, $I_{1V} = 0,11$ A et $U_{2V} = 24$ V.

La section droite (constante) du circuit magnétique est **$S = 60 \text{ cm}^2$** . La valeur maximale du champ magnétique est **$B = 1,1$ T**.

- 1- Calculer le nombre de spires de chaque enroulement.
- 2- Calculer la résistance de l'enroulement du primaire R_1 et le courant I_{2N} au secondaire.
- 3- Proposer un montage permettant de réaliser l'essai à vide.

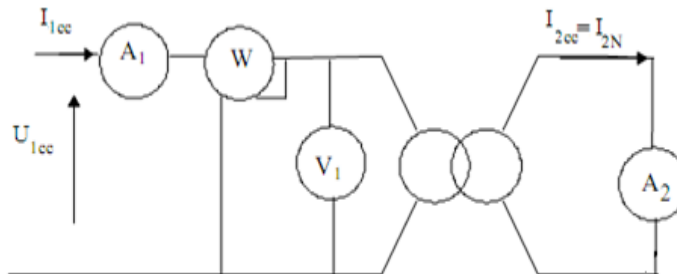
En déduire de cet essai :

- 3-1 le rapport de transformation m
- 3-2 les pertes par effet Joule à vide
- 3-3 les pertes dans le fer P_{fv} .
- 3-4 Montrer que la puissance absorbée dans cet essai est égale aux pertes fer.

4.4. ETUDE EN COURT CIRCUIT :

Le secondaire étant court-circuité par un câble de section suffisante, une tension réduite (de l'ordre de $5\%U_1$) appliquée sur le primaire permet d'obtenir le courant nominal au secondaire du transformateur.

❖ Schéma de montage :



$$P_{1cc} = P_{Jcc} + P_{Fcc} \text{ avec } P_{Fcc} = \frac{U_{1cc}^2}{R_F}$$

U_{1cc} est faible, U_{1cc}^2 sera donc très faible, on néglige alors les pertes fer dans l'essai en court-circuit.

- La puissance mesurée au primaire correspond donc à la totalité des pertes par effet joule :

$$P_{1cc} = P_{Jcc} = P_c \text{ avec } P_{Jcc} = P_{j1cc} + P_{j2cc} = R_1 I_{1cc}^2 + R_2 I_{2cc}^2$$

$$P_{1cc} = U_{1cc} I_{1cc} \cos \phi_{cc}$$

- La puissance apparente : $Q_{1cc} = U_{1cc} I_{1cc} \sin \phi_{cc}$
- La puissance réactive : $S_{cc} = S_{1cc} = S_{2cc} = U_{1cc} I_{1cc} = U_{2cc} I_{2cc}$ alors $\frac{U_{2cc}}{U_{1cc}} = \frac{I_{1cc}}{I_{2cc}} = m$

Pour déterminer ces pertes, on utilise l'hypothèse de KAPP ce qui permet d'utiliser le modèle équivalent ramené au secondaire ou au primaire.

❖ Puissances et impédances au primaire :

Le transfert au primaire permet d'avoir les puissances et l'impédance :

$$P_{Jcc} = R_1 I_{1cc}^2 + R_2 I_{2cc}^2 \text{ avec } I_{2cc} = \frac{I_{1cc}}{m} \text{ alors } P_{Jcc} = R_1 I_{1cc}^2 + R_2 I_{1cc}^2 / m^2 = I_{1cc}^2 (R_1 + R_2 / m^2) = R_p I_{1cc}^2$$

$$Q_{cc} = X_p I_{1cc}^2 = \sqrt{Z_p^2 - R_p^2} \text{ Avec } Z_p = \frac{U_{1cc}}{I_{1cc}} = \frac{U_{2cc}}{m I_{2cc}}$$

❖ Analogie après transfert au secondaire :

$$P_{Jcc} = R_1 I_{1cc}^2 + R_2 I_{2cc}^2 \text{ avec } I_{1cc} = m I_{2cc} \text{ alors } P_{Jcc} = m^2 R_1 I_{2cc}^2 + R_2 I_{2cc}^2 = I_{2cc}^2 (m^2 R_1 + R_2) = R_s I_{2cc}^2$$

$$❖ Q_{cc} = X_s I_{2cc}^2 = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} \text{ Avec } Z_s = \frac{U_{2cc}}{I_{2cc}} = \frac{m U_{1cc}}{I_{2cc}}$$

L'essai en court-circuit permet de déterminer les éléments de Kapp ($R_p, X_p, Z_p, R_s, X_s, Z_s$) au primaire et au secondaire et aussi par approximation le rapport de transformation.

Activité 2 : Suite 1 de l'activité 1

- Essai en court – circuit : $I_{2CC} = I_{2N}$, $P_{1CC} = 11 \text{ W}$, $I_{1CC} = 0,91 \text{ A}$ et $U_{1CC} = 20 \text{ V}$.

3.1. Proposer un montage permettant de réaliser l'essai en court - circuit.

3.2. En déduire de cet essai :

3-2.1 Les pertes par effet Joule en court-circuit (peut-on négliger les pertes dans le fer ?)

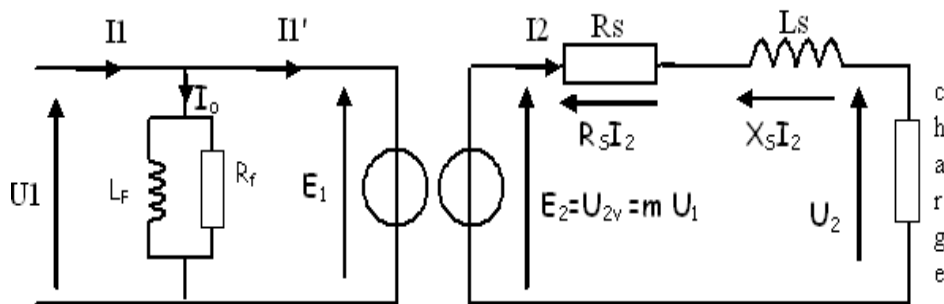
3-2.2 la résistance R_S et la réactance X_S des enroulements ramenés au secondaire ;

3-3.2 le modèle équivalent vu du secondaire du transformateur.

4.5. ETUDE EN CHARGE

Lorsque l'on branche une charge au secondaire d'un transformateur, celle-ci va alors imposer son facteur de puissance $\cos\phi_2$.

Soit le schéma équivalent suivant



Appliquons loi des mailles au secondaire : $\vec{U}_{20} - \vec{R}_S \vec{I}_2 - \vec{X}_S \vec{I}_2 - \vec{U}_2 = 0$

On peut, à partir du diagramme de Kapp déterminer la tension au secondaire.

4.5.1. Chute de la tension secondaire :

Au fur et à mesure que la charge augmente, la tension secondaire diminue. Cette chute de tension a pour origine la résistance des enroulements et les fuites du flux magnétique.

a. Chute de tension absolue

C'est la différence entre les tensions secondaires à vide et en charge. Elle s'exprime en volts.

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2 = Z_S I_2 : \text{Formule exacte}$$

Ce pendant la formule approchée est la plus utilisée : $\Delta U_2 = R_S I_2 \cos\phi_2 + X_S I_2 \sin\phi_2$

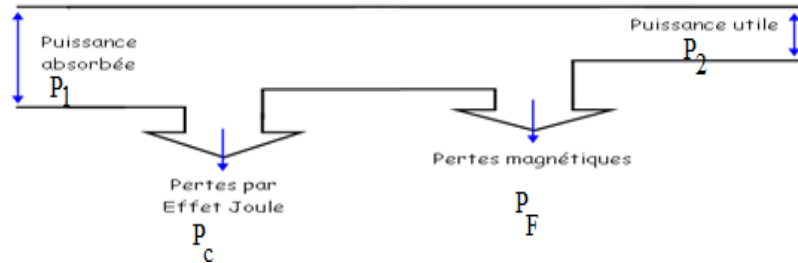
b. Chute de tension relative

C'est cette valeur qui est donnée sur les fiches techniques des constructeurs. Elle est notée δU_2 et elle s'exprime en pourcentage.

$$\delta U_2 = \frac{\Delta U_2}{U_2} = \frac{U_{20} - U_2}{U_2}$$

4.6. RENDEMENT

Le transformateur absorbe une puissance et en restitue une partie. Cette différence constitue les pertes du transformateur



4.6.1. Méthode directe

On place au primaire un wattmètre et au secondaire un second wattmètre pour relever les puissances absorbées et utile.

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

4.6.2. Méthode indirecte

Connaissant la puissance absorbée ainsi que les pertes, on a :

- A vide : $P_F = P_{10}$
- En court-circuit : $P_c = P_{1cc}$ à $I_{2cc} = I_{2N}$ si $I_{2cc} \neq I_{2N}$ alors $P_c = R_s I_2^2$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_F + P_c} \text{ avec } P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

4.6.3. Rendement maximal

Pour que le rendement soit maximal il faut que les pertes soient égales : $P_c = P_F = P_{10}$

$$R_s I_2^2 = P_{10} \text{ alors } I_{2opt} = \sqrt{\frac{P_{10}}{R_s}}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + 2P_{10}} \text{ avec } P_2 = U_2 I_{2opt} \cos \varphi_2$$

Activité 3 : Suite 2 de l'activité 1

4- Le transformateur, alimenté au primaire sous la tension nominale, débite un courant $I_2 = 8,3 \text{ A}$ dans une charge inductive de facteur de puissance 0,8.

4-1 Déterminer la valeur approchée de la chute de tension au secondaire.

4-2 En déduire la valeur de la tension au secondaire.

4-3 Calculer le rendement η de ce transformateur.

5. Déterminer l'intensité du courant optimal au secondaire et en déduire le rendement maximal.

EVALUATION FORMATIVE

Pour avoir une tension secondaire à vide $U_{2V} = 232V$, on a appliqué au primaire d'un transformateur monophasé une tension $U_1 = 5500V$.

- 1) Déterminer le rapport m_v de transformation à vide
- 2) Calculer les valeurs Z_s , R_s et X_s des paramètres du transformateur réduit au secondaire sachant qu'un essai en court circuit pour un courant secondaire nominal de 250A a donné :
 $P_{cc} = 1800W$ et $U_{1cc} = 300V$
- 3) En charge, le secondaire fournit un courant d'intensité $I_2 = 250A$ à un récepteur inductif dont le facteur de puissance est de 0,85.
Déterminer la tension secondaire U_2 délivré par le transformateur.
- 4) Déterminer le rendement du transformateur sachant que les pertes fer sont égales à 1500W.