TRANSFORMATEUR MONOPHASE

Le **transformateur monophasé** est un **convertisseur statique** qui convertit un signal alternatif en un autre signal alternatif de **même fréquence**, mais de valeur efficace différentes.

Notations :

On adopte différentes notations suivant les parties de transformateur que l'on décrit :

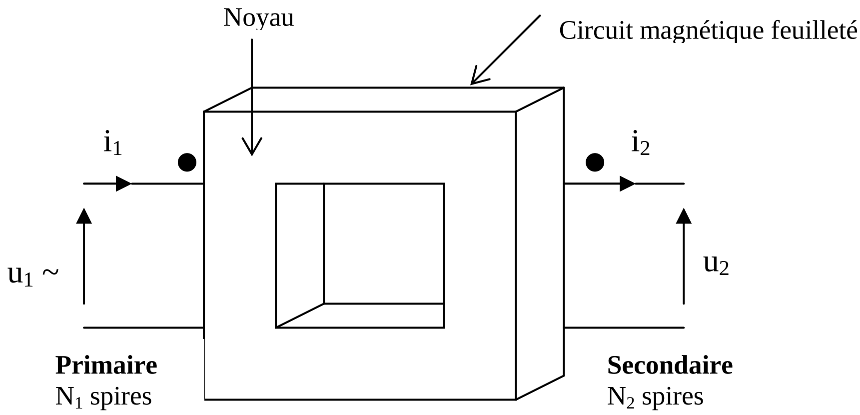
- Primaire : indice **1** ;
- Secondaire : indice **2** ;
- Grandeurs à vide : indice **0** ;
- Grandeurs nominales : indice **n** ;
- Grandeurs en court-circuit : indice **c-c** ;

I. Présentation et Constitution

Il est constitué de :

* un circuit **magnétique** en matériau **ferromagnétique** doux et feuilleté ;
* une bobine de N_1 spires alimentée par le réseau (**PRIMAIRE**) ;
* une bobine de N_2 spires qui fournit une tension à la charge (**SECONDAIRE**).

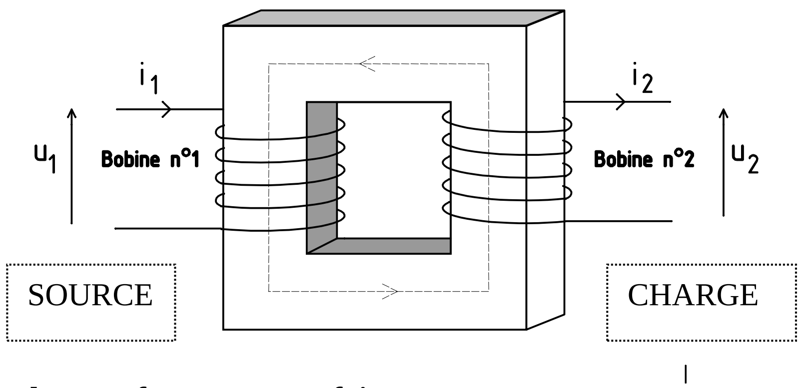
L'appellation primaire-secondaire correspond au sens prévu pour le transfert d'énergie, mais un transformateur est réversible.



Convention des bornes homologues :

Le sens d'enroulement des bobinages du primaire et du secondaire est identique vu des bornes homologues (●). Conséquence :

- des tensions pointant vers des bornes homologues sont de même signe (donc en phase en régime sinusoïdal) → u_1 et u_2 sont en phase.
- un courant entrant par une borne homologue contribue à des ampères-tours de signe pris conventionnellement positif (et donc négatif pour un courant sortant) → $\varepsilon = N_1 i_1 - N_2 i_2$.



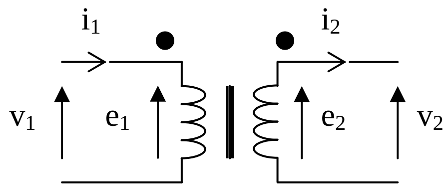
II. Modèle du transformateur parfait

Un système est dit parfait lorsqu'il ne présente aucune perte, c'est à dire :

PUISSANCE ABSORBEE = PUISSANCE FOURNIE (UTILE)

On néglige :

- les résistances des enroulements ;
- les inductances de fuite ;
- la réluctance du circuit magnétique.



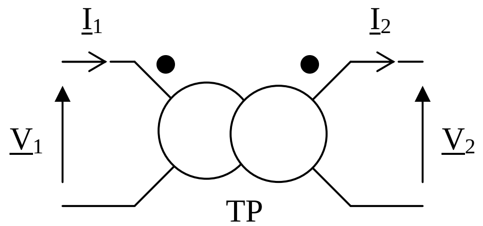
Les courants i_1 et i_2 sont à l'origine d'un champ magnétique variable qui induit aux bornes du primaire et du secondaire les f.e.m. e_1 et e_2 telles que : $\frac{e_2}{e_1} = \frac{N_2}{N_1}$

⇘ $\frac{v_2}{v_1} = \frac{N_2}{N_1} = m$ avec m: rapport de transformation du transformateur= $\frac{N_2}{N_1}$

Pour établir la relation entre i_1 et i_2, il faut appliquer le théorème d'Ampère le long d'une ligne de champ moyenne du circuit magnétique :

⇘ $\Re\phi \approx 0 = N_1 i_1 - N_2 i_2 \rightarrow \frac{i_2}{i_1} = \frac{1}{m}$

Pour la suite, le transformateur monophasé parfait sera remplacé par le symbole :



Avec : $\frac{\underline{V}_2}{\underline{V}_1} = m$; $\frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_1} = \frac{1}{m}$; $m = \frac{N_2}{N_1}$

Remarque :

* si $m < 1 \rightarrow U_2 < U_1$: le transformateur est dit **abaisseur**.

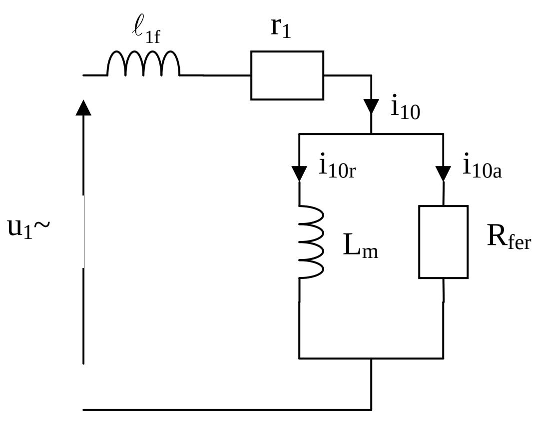
* si $m > 1 \rightarrow U_2 > U_1$: le transformateur est dit **élévateur**.

* si $m = 1 \rightarrow U_2 = U_1$: le transformateur est dit d'**isolement.**

III. Modèle du transformateur réel

1) Schéma électrique équivalent à vide

Le transformateur monophasé réel est équivalent à vide ($i_2=0$) à une bobine à noyau ferromagnétique et peut donc se modéliser par le schéma électrique suivant:



Il apparaît au secondaire du transformateur une tension v_{20} telle que $\frac{V_{20}}{u_1} = m$

2) Schéma électrique équivalent en charge

Théorème d'Ampère :

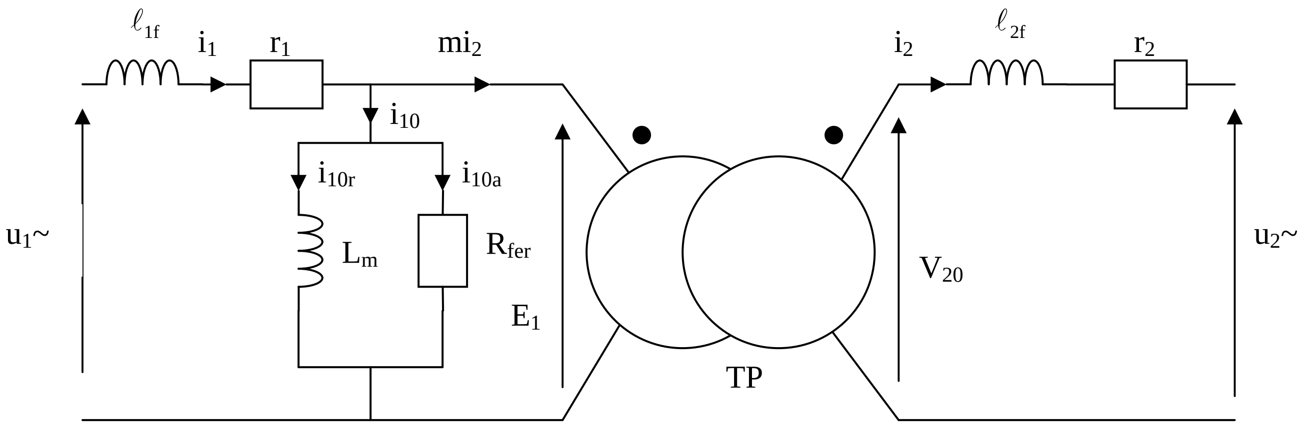
A vide : $\Re\phi_0 = N_1 i_{10}$

En charge : $\Re\phi_{ch} = N_1 i_1 - N_2 i_2$

Or $\phi_0 = \phi_{ch}$ car le flux est forcé par la valeur efficace de u_1 : $u_1 \approx E_1 = 4,44 \times N_1 \times f \times \hat{\phi}$ (formule de Boucherot)

d'où $N_1 i_{10} = N_1 i_1 - N_2 i_2 \Leftrightarrow N_1 i_1 = N_1 i_{10} + N_2 i_2$ soit $i_1 = i_{10} + m \times i_2$

Le courant $m \times i_2$ correspond au courant appelé au primaire par un transformateur parfait débitant au secondaire un courant i_2 ; on en déduit le schéma équivalent au transformateur réel:



IV. Modèle de Kapp

L'approximation de Kapp consiste à négliger le courant i_{10} devant i_1 lorsque le transformateur fonctionne en charge. Vu du secondaire, le transformateur est alors équivalent à une f.e.m. ($\underline{E}_s$) en série avec une impédance ($\underline{Z}_s$) :

En effet :

$$\underline{u}_2 = \underline{V}_{20} - r_2 \underline{I}_2 - j\ell_{2f}\omega \underline{I}_2$$

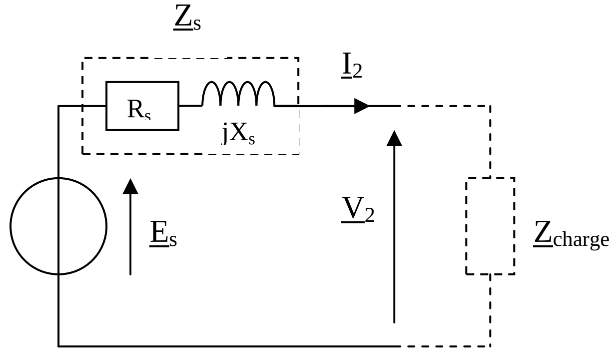
$$\Rightarrow \underline{u}_2 = m\underline{E}_1 - r_2 \underline{I}_2 - j\ell_{2f}\omega \underline{I}_2$$

$$\Rightarrow \underline{u}_2 = m\left(\underline{u}_1 - r_1 \underline{I}_1 - j\ell_{1f}\omega \underline{I}_1\right) - r_2 \underline{I}_2 - j\ell_{2f}\omega \underline{I}_2$$

$$\Rightarrow \underline{u}_2 = m\underline{u}_1 - \left(r_2 \underline{I}_2 + m \times r_1 \underline{I}_1\right) - j\left(\ell_{2f}\underline{I}_2 + m \times \ell_{1f}\underline{I}_1\right)\omega$$

$$\Rightarrow \underline{u}_2 = m\underline{u}_1 - \left(r_2 + m^2 \times r_1\right)\underline{I}_2 - j\left(\ell_{2f} + m^2 \times \ell_{1f}\right)\omega \underline{I}_2$$

$$\Rightarrow \underline{u}_2 = m\underline{u}_1 - R_s \underline{I}_2 - jX_s \underline{I}_2$$



avec :
$\underline{E}_s = m\underline{u}_1 = \underline{V}_{20}$
$\underline{Z}_s = R_s + jX_s$
$R_s = m^2 \times r_1 + r_2$
$X_s = (m^2 \times \ell_{1f} + \ell_{2f})\omega$

Remarque :Les grandeurs du primaire sont multipliées par m² lorsqu'elles sont ramenées au secondaire

V. Exploitation du modèle de Kapp

Un des objectifs de la modélisation du transformateur est de prédire la chute de tension en charge $\Delta U_2 = V_{20} - U_2$

Méthode générale de détermination de ΔU_2 :

- à partir de l'impédance $\underline{Z}_c = R_c + jX_c$ de la charge, on détermine I_2 (valeur efficace) : $\underline{I}_2 = \frac{\underline{E}s}{\underline{Z}s + \underline{Z}c} \rightarrow I_2 = \frac{E_s}{\sqrt{(R_s+R_c)^2+(X_s+X_c)^2}}$ et $\varphi_2 = Arc\tan(\frac{X_c}{R_c})$
- on détermine ensuite graphiquement (diagramme de Fresnel) ou à l'aide de la formule approchée ΔV_2.

A partir du modèle, on écrit :$\underline{V}_{20} = \underline{u}_2 + jX_s\underline{I}_2 + R_s\underline{I}_2 \Leftrightarrow \overrightarrow{V_{20}} = \overrightarrow{u_2} + jX_s\overrightarrow{I_2} + R_s\overrightarrow{I_2}$

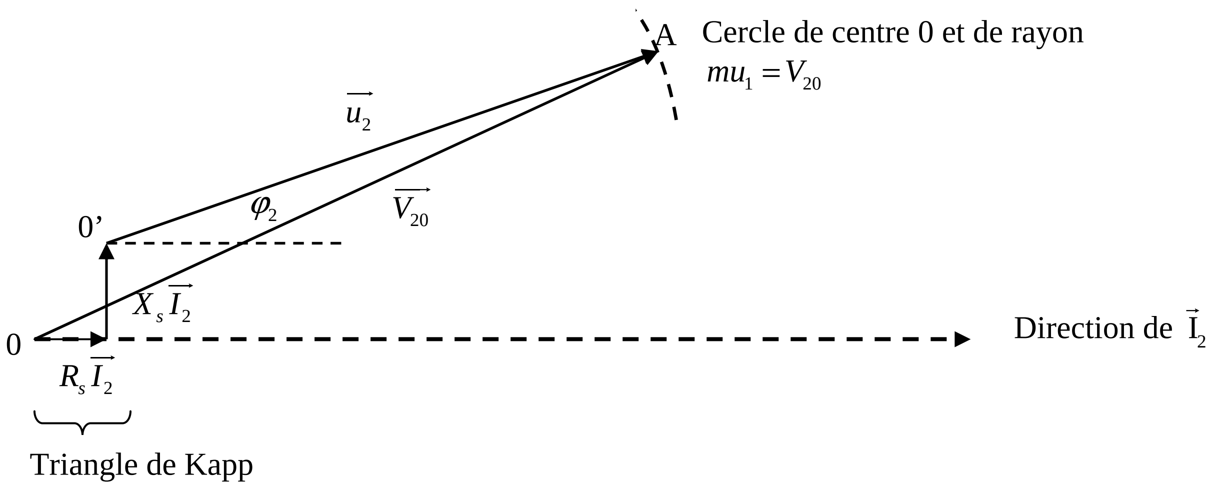
Les paramètres R_s et X_s étant connus, la chute de tension ΔU_2 au secondaire peut être déterminée à l'aide d'une construction graphique.
Connaissant la charge utilisée, les termes I_2 et φ_2 qui en dépendent, sont eux aussi connus.

Le transformateur est alimenté sous sa tension nominale U_{1n}, la tension E_s est donc :$V_{2o} = m.U_{1n}$.
Pour calculer la chute de tension ΔU_2 au secondaire, nous utiliserons la relation suivante :

$$\underline{u}_2 = \underline{V}_{20} - R_s\underline{I}_2 - jX_s\underline{I}_2$$

Réaliser la construction graphique comme suit :

- Il faut tout d'abord calculer les termes $Rs.I_2$ et $X_s\ I_2$.
- Tracer la direction de $\overrightarrow{I_2}$.
- Placer à partir de O, le vecteur $\overrightarrow{R_sI_2}$.
- Placer perpendiculairement et à la suite du premier vecteur, le vecteur $\overrightarrow{X_sI_2}$.
- La somme de ces deux vecteurs donne le vecteur OO'.
- Tracer à partir de O', la direction de $\overrightarrow{U_2}$ d'un angle φ_2 par rapport à $\overrightarrow{I_2}$.
- Tracer l'arc de cercle de centre O dont le rayon est égal à la valeur efficace de V_{2o}.
- Placer le point d'intersection A, entre les demies droites caractérisant U_2 et V_{2o}.
- Il ne reste plus qu'à mesurer le segment 0'A, image de la valeur de la tension U_2.



L'angle $(\vec{u}_2, \vec{E}_S)$ étant petit, on montre que $\Delta U_2 \approx R_S I_2 \cos\varphi_2 + X_S I_2 \sin\varphi_2$

VI. Rendement : $\boxed{\eta = \dfrac{P_u}{P_a} = \dfrac{P_2}{P_1} = \dfrac{V_2 I_2 \cos(\varphi_2)}{V_2 I_2 \cos(\varphi_2) + p_J + p_{fer}}}$

➷ Détermination directe : on mesure P_1 et P_2

➷ Détermination **indirecte** : on mesure P_2, p_J et p_{fer}

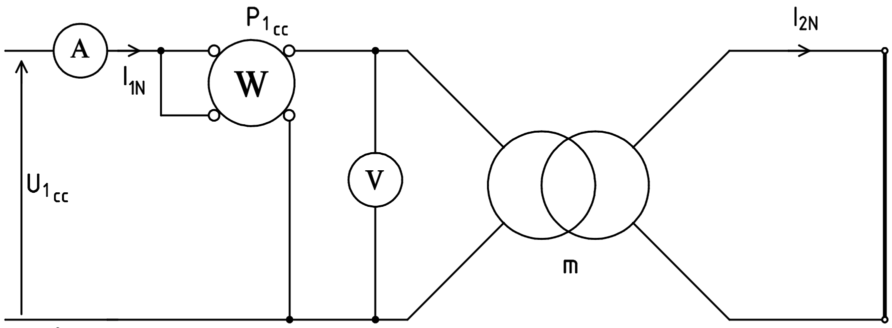
1. Les pertes Joules sont déterminées soit :

- à partir de r_1 et r_2 ou R_s: $p_j = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2 = R_s I_2^2$: Essai en continu, méthode voltampèremétrique :

On peut accéder à $R_s = m^2 r_1 + r_2$ en mesurant directement r_1 et r_2 en continu (il n'y a plus de f.e.m. induite en continu et le transformateur est équivalent à r_1 coté primaire et r_2 coté secondaire)

- à partir de l'essai en court-circuit : $P_{1cc} = p_{Jcc} + p_{fercc} \approx p_{Jcc}$ et $p_{Jcc} = p_{JN}$ si $I_{2cc} = I_{2N}$

On alimente sous tension réduite un transformateur dont le secondaire est court-circuité. On règle la tension U_1 de façon à obtenir nominales les intensités du courant au primaire et au secondaire.



Bilan des puissances :

Puissance fournie par le secondaire : $P_{2cc} = 0$ W (court-circuit)

Pertes cuivre : $(p_{CU})_{cc} = R_1.I_{1N}^2 + R_2.I_{2N}^2$ (nominales)

Pertes Fer : U_{1cc} très faible, donc $(p_{Fer})_{cc}$ seront négligeables

Puissance absorbée par le primaire : $P_{1cc} = P_{2cc} + (p_{Cu})_{cc} + (p_{Fer})_{cc}$

$$\mathbf{P_{1cc} = (p_{Cu})_{cc}}$$

Conclusion :

L'essai en court-circuit d'un transformateur alimenté permet de déterminer directement :

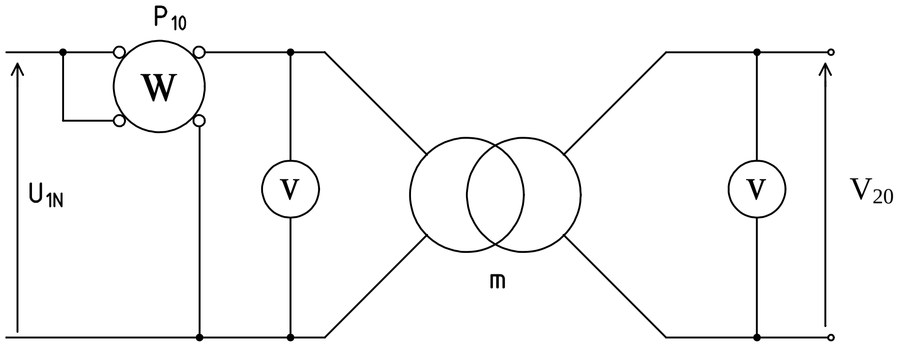
- **les pertes Cuivre nominales (P_{1cc})**

  On mesure u_{1cc}, I_{2cc} ou I_{1cc} et P_{1cc} ➔ on en déduit $Z_s = \dfrac{E_{scc}}{I_{2cc}} = \dfrac{mu_{1cc}}{I_{2cc}}$

  $P_{1cc} = p_{fercc} + p_{Jcc} \approx p_{Jcc} = R_s \times I_{2cc}^2$ ➔ $R_s \approx \dfrac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2}$ et $X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2}$

2. Les pertes fer sont déterminées à partir de l'essai à vide :

Le transformateur, alimentée sous tension primaire nominale, fonctionne à vide (pas de charge branchée au secondaire).



Bilan des puissances :

Puissance fournie par le secondaire : $P_{20} = 0$ W (pas de charge)

Pertes cuivre : $(p_{CU})_0 = R_1.I_{10}^2 + R_2.I_{20}^2$

$(p_{Cu})_0 = 0$ W (négligeables)

Pertes Fer : Elles ne dépendent que de U_1 et de f, qui, pour cet essai sont nominales. Les pertes Fer pour l'essai à vide seront donc nominales.

Puissance absorbée par le primaire : $P_{10} = P_{20} + (p_{Cu})_0 + (p_{Fer})_0 \Rightarrow \mathbf{P_{10} = (p_{Fer})_0}$

Conclusion :

L'essai à vide d'un transformateur alimenté sous tension nominale permet de déterminer directement :

*** les pertes Fer nominales (P_{10})**

On mesure u_1 et $V_{20}=E_s$ ➔ on en déduit $\boxed{m = \frac{V_{20}}{u_1}}$

Détermination de R_{fer} et de L_m : on mesure u_1, I_{10} et P_{10}

➭ en négligeant l'influence la chute de tension aux bornes de ℓ_{1f} et r_1, on a : $\boxed{R_{fer} = \frac{u_1^2}{P_{10}}}$ et

$\boxed{L_m\omega = \frac{u_1}{I_{10r}}}$ avec $I_{10r}=\sqrt{I_{10}^2-I_{10a}^2}$ et $I_{10a} = \frac{u_1}{R_{fer}}$

Remarques :

- la méthode directe peut se révéler imprécise car le rendement des transformateurs est généralement très bon donc la différence entre P_2 et P_1 est très faible et peut être de l'ordre de grandeur de la précision des wattmètres.

- à u_1 et φ_2 donnés, on montre que le rendement est maximum quand $p_{fer}=p_J$ soit pour $\boxed{I_2=\sqrt{\frac{p_{fer}}{R_s}}}$

- le circuit magnétique des transformateurs est feuilleté pour diminuer les pertes par courants de Foucault ; il est généralement formé d'acier au silicium pour limiter les pertes liées à l'hystérésis.

VII. Plaque signalétique

Sur un transformateur, on trouve toujours une plaque, dite plaque signalétique, sur laquelle apparaissent les indications suivantes :

S_N	U_{1N}	U_{20}	f
600 V.A	**220 V**	**24 V**	**50 Hz**

Exemple **:**

Ces indications permettent de déterminer :.

* le rapport de transformation : **$m = U_{20} / U_{1N}$** (0,109)

* L'intensité efficace du courant nominal au primaire : **$I_{1N} = S_N / U_{1N}$** (2,73 A)

* L'intensité efficace du courant nominal au secondaire : **$I_{2N} = S_N / U_{20}$** (25 A)

On trouve sur la plaque signalétique d'un transformateur industriel :

- la tension primaire nominale u_{1N}
- la tension secondaire à vide V_{20} → $m = \frac{V_{20}}{u_1}$
- la puissance apparente : $\boxed{S_N = u_{1N} I_{1N} = V_{20} I_{2N}}$

  ↳ $I_{1N} = \frac{S_N}{u_{1N}}$ et $I_{2N} = \frac{S_N}{V_{20}}$

VIII. TD :

Exercice 1 :

La plaque signalétique d'un transformateur monophasé indique:36 kVA ; 5000 / 240 V ; 50 Hz.

1 – Rappeler la signification de ces indications et en déduire les valeurs du rapport de transformation et des courants nominaux.

d'un essai à vide on mesure : U1 = 5000 V, I1V = 0,7 A, P1V = 500 W, U2V = 240 V.

2 - .a – Dessiner le schéma du montage à réaliser ; préciser si nécessaire les caractéristiques de certains appareils de mesures.

b – La résistance de l'enroulement primaire valant R1 = 1,3 Ω, calculer la valeur des pertes fer nominales.

d'un essai en court-circuit, on mesure : U_{1CC} = 400 V, I_{1CC} = 6 A, P_{1CC} = 700 W.

3 a – Pourquoi faut-il éviter d'utiliser un ampèremètre au secondaire pour mesurer I_{2CC} ?
b - Les pertes fer étant proportionnelles au carré de la tension primaire, montrer qu'elles sont négligeables en court-circuit. Que représente alors la puissance P_{1CC} ?

c – Calculer I_{2CC}.

d – Calculer l'impédance, la résistance et la réactance du modèle équivalent au transformateur « vu » du secondaire ?

4 – Le primaire du transformateur étant alimenté sous sa tension nominale, le secondaire débite 150 A dans une charge inductive de facteur de puissance égal à 0,80.

a – Dessiner le modèle équivalent du transformateur « vu » de la charge.

b – Déterminer graphiquement, dans l'hypothèse de Kapp, la tension aux bornes de la charge.

c – Vérifier cette valeur à l'aide de la formule approchée.

d – Calculer :
- La puissance active fournie à la charge ;
- La valeur des pertes cuivre ;
- La puissance absorbée par le primaire et le rendement du transformateur.

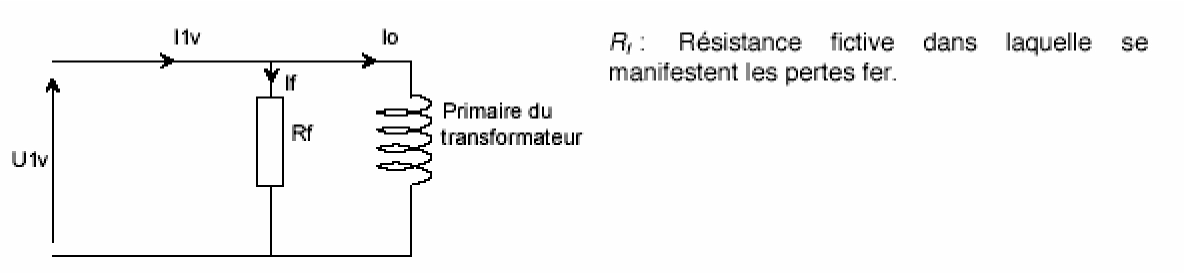
e – Quelle devrait être la nature de la charge et son facteur de puissance pour que la chute de tension secondaire soit nulle ?

Exercice 2 :

Un transformateur monophasé de puissance apparente S = 120 kVA, alimenté sous une tension sinusoïdale de fréquence 50 Hz est soumis à 2 essais.
a – Dans un essai à vide on note : U1v = 15000 V, I1v = 0,24 A, U20 = 226 V P1v = 1430 W.

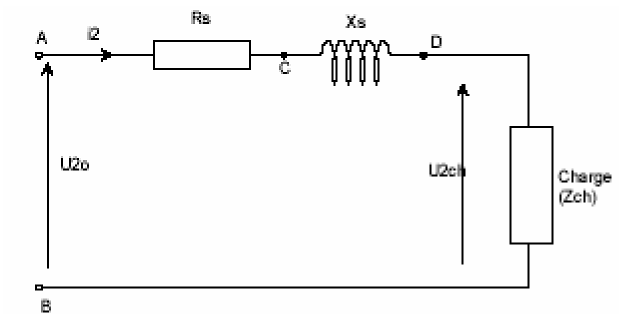
b – Dans un essai en court-circuit on relève : I2CC = 545 A, U1cc = 2980 V, P**1cc** = 1820 W.

1 – Calculer le rapport de transformation à vide et l'intensité du courant magnétisant I0 si on adopte pour l'essai à vide le schéma équivalent suivant :



2 – Etablir le circuit de Kapp équivalent au secondaire en court-circuit ainsi que le diagramme des tensions et intensité associé. Calculer en mΩ la résistance Rs et la réactance Xs des enroulements ramenées au secondaire. Ecrire l'expression complexe de l'impédance interne Zs des enroulements ramenés au secondaire (forme a + j b).

3 – Calculer de façon approchée la chute de tension en charge au secondaire lorsque I2 = 400 A et φ_2 = 30° (charge inductive). Quel est dans ce cas le rendement de ce transformateur ?



4 – On fait débiter le secondaire sur un récepteur d'impédance 0,5 Ω de facteur de puissance 0,8 inductif. Donner l'expression complexe Zch de l'impédance de ce récepteur ainsi que l'impédance générale ZAB du dipôle AB apparaissant dans le circuit équivalent de Kapp ramené au secondaire. En déduire l'intensité efficace du courant dans la charge et la tension efficace aux bornes de la charge U2ch.

***** FIN *****