

TP 4 ELECTROMAGNETISME

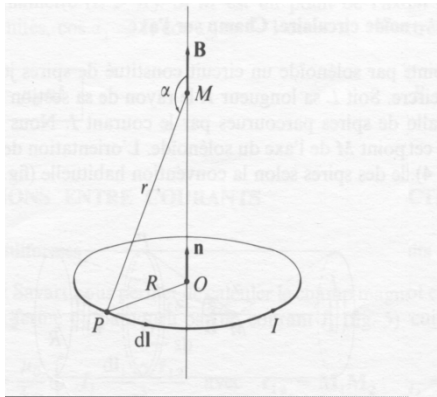
1) ETUDE THEORIQUE.

1- Champ créé par un courant circulant dans un circuit filiforme.

- a- Un élément de circuit $d\vec{l}$ situé en P, parcouru par un courant i crée en M le champ magnétique élémentaire : $d\vec{B} = \frac{\mu_0 i d\vec{l} \wedge \vec{u}}{4\pi r^2}$ où $r = PM$ et $\vec{u} = \frac{\vec{PM}}{PM}$. **Loi de Biot et Savart.**

b- Champ sur l'axe d'une spire circulaire.

x



Montrer que
$$\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{2} \frac{R^2}{r^3} \vec{e}_x = \frac{\mu_0 i}{2R} \sin^3 \alpha \vec{e}_x$$

Au centre en $x = 0$, $\alpha = \pi/2$, le champ vaut :
$$\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{2R} \vec{e}_x$$

c- Champ sur l'axe d'une bobine plate.

Une bobine plate est constituée de N spires dont l'enroulement possède une épaisseur négligeable.

Par superposition des effets magnétiques, le champ est N fois plus grand que celui créé par une spire seule.

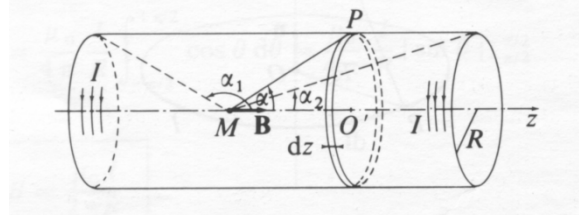
Sur l'axe :
$$\vec{B} = \frac{\mu_0 Ni}{2} \frac{R^2}{r^3} \vec{e}_x = \frac{\mu_0 Ni}{2R} \sin^3 \alpha \vec{e}_x$$

Au centre :
$$\vec{B} = \frac{\mu_0 Ni}{2R} \vec{e}_x$$

d- Champ sur l'axe d'un solénoïde.

Pour un solénoïde de longueur l comportant N spires, soit $n = N/l$ spires par mètre, montrer que :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 ni}{2} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \vec{e}_x$$



Pour un solénoïde "infini" tel que $l \gg R$, $\alpha_1 = \pi$ et $\alpha_2 = 0$:

$$\vec{B} = \mu_0 ni \vec{e}_x$$

2- Flux du champ magnétique.

Le flux Φ d'un champ \vec{B} à travers une surface S est défini par: $\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$ en $T \cdot m^2$ ou Weber (Wb)

Si \vec{B} traverse N spires de surface S , nous aurons donc: $\Phi = \iint_{NSpires} \vec{B} \cdot d\vec{S} = N \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$

II) ETUDE EXPERIMENTALE : LOIS DE L'INDUCTION

1- Mise en évidence expérimentale :

La bobine la plus longue, l'inducteur, est alimentée par la sortie alternative 24 V de l'alimentation 0-24 V, le circuit série comportant également un rhéostat de 295Ω pour pouvoir faire varier l'intensité de 0 à 2 A.

La deuxième bobine, l'induit, aux bornes de laquelle on branchera un oscilloscope entoure le premier circuit.

Quelle est la fréquence de la fem induite ?

Décrire l'influence du noyau de fer doux sur la fem induite.

En présence du noyau faire varier l'intensité du courant.

2- Vérification expérimentale de la loi de Faraday :

Dans le montage ci-dessous, le circuit primaire est alimenté par une tension triangulaire, le champ magnétique au primaire est donc de la forme $B_1 = k i_1$, le courant i_1 sera déduit de la tension visualisée en Y_1 . Donner l'expression de la fem induite au secondaire $U_2 = e$ en fonction de N_2 , R , U_{1cc} , S_{moy} (surface moyenne des spires des bobines) k et f , fréquence du signal.

Déterminer le coefficient d'inductance mutuelle M .

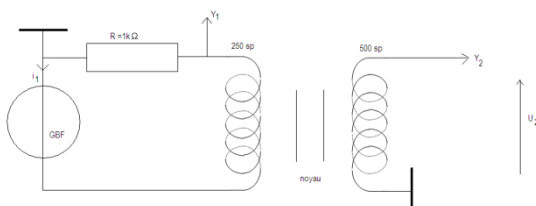
Réalisation pratique :

La bobine primaire alimentée par le GBF comporte 250 spires, la bobine secondaire 500 spires, on ajoute un noyau entre les bobines.

Fixer la tension au primaire à $U_{1cc} = 16V$ crête à crête. Après avoir estimé la surface moyenne S_{moy} des spires des bobines, exprimer e sous forme numérique. Quelle courbe doit-on tracer pour vérifier la loi de Faraday ?

Faire varier f de 100 Hz à 1 KHz et relever U_2 tous les 100 Hz en réajustant le niveau de U_1 si nécessaire. Tracer $U_2(f)$.

Déduire de ce qui précède la valeur numérique de k , préciser son unité. Calculer la valeur numérique du coefficient d'inductance mutuelle M , préciser son unité.



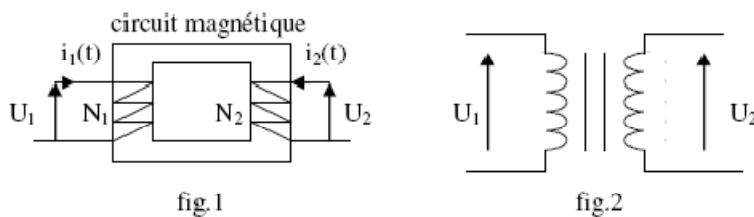
APPLICATION AU TRANSFORMATEUR

* Les transformateurs mettent en jeu le phénomène d'induction électromagnétique, ils sont constitués d'un bobinage primaire, alimenté par une source alternative (généralement sinusoïdale) et d'un bobinage secondaire sans liaison conductrice avec le primaire. Les deux bobinages sont montés autour d'un circuit magnétique (fig.1)

* Le primaire est caractérisé par: un nombre de spires N_1 , une résistance r_1 et une inductance l_1 ; de même le secondaire possède N_2 spires une résistance r_2 et une inductance l_2 .

* On les utilise pour élever ou abaisser une tension ou un courant, ou encore pour isoler électriquement deux circuits.

* Ils sont schématisés sur la fig.2:



I) PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ET EQUATIONS

* Le primaire alimenté par une tension sinusoïdale est traversé par un courant $i_1(t)$ qui crée un champ magnétique lui-même sinusoïdal. Le secondaire est traversé par le flux de ce champ magnétique, il est alors le siège d'une fem induite conformément à la loi de Faraday: $e_2(t) = -\frac{d\Phi}{dt}$ qui y fera circuler un courant $i_2(t)$, le primaire étant lui même le siège d'une fem induite $e_1(t)$.

* Les équations de fonctionnement sont, en convention récepteur:

→ Pour les tensions:

$$u_1(t) = r_1 i_1(t) - e_1(t) \text{ pour le primaire et } u_2(t) = r_2 i_2(t) - e_2(t) \text{ pour le secondaire.}$$

Soit avec $e_1(t) = -N_1 \frac{d\varphi_1}{dt}$ et $e_2(t) = -N_2 \frac{d\varphi_2}{dt}$ où φ_1 et φ_2 sont les flux aux primaire et secondaire

$$\text{traversant une spire: } u_1(t) = r_1 i_1(t) + N_1 \frac{d\varphi_1}{dt} \quad \text{et} \quad u_2(t) = r_2 i_2(t) + N_2 \frac{d\varphi_2}{dt}$$

→ Pour les courants:

Le théorème d'Ampère appliqué aux circuits magnétiques s'écrit:

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

où $\varphi = \varphi_1 = \varphi_2$ si l'on suppose qu'il n'y a pas de pertes de flux entre le primaire et le secondaire et où \mathcal{R} est la réluctance, grandeur caractéristique de la géométrie du circuit magnétique et de la nature du matériau le constituant.

II) LE TRANSFORMATEUR PARFAIT

* Les hypothèses pour supposer un transformateur parfait sont les suivantes:

→ Pas de perte par effet Joule au primaire et au secondaire, soit: $r_1 = r_2 = 0$.

III) LE TRANSFORMATEUR REEL

1) Théorème de transfert des impédances et modélisation du transformateur réel:

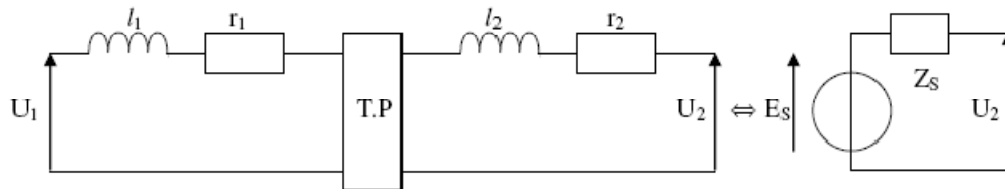
Pour un transformateur réel, les impédances des bobinages primaire et secondaire ne sont pas strictement inductives (résistances non nulles).

On montre que toute impédance au primaire est "vue" du secondaire multipliée par le coefficient m^2 (m = rapport de transformation), ainsi l'impédance complexe du primaire: $z_1=r_1+jl_1\omega$ devient, vue du secondaire: m^2z_1 .

On peut donc considérer le transformateur, du point de vue du secondaire, comme un dipole générateur d'impédance totale: $Z_S= m^2z_1+z_2= (m^2r_1+r_2) +j\omega(m^2l_1+l_2)$, ceci à condition que le générateur qui alimente le primaire soit un **générateur de tension parfait** (i.e sans impédance). Si tel n'est pas le cas, il faudra renvoyer aussi au secondaire, l'impédance interne du générateur d'alimentation primaire par une multiplication par m^2 .

On peut ainsi modéliser le transformateur réel par un générateur équivalent de Thévenin de fem complexe $E_S=mU_1$ (d'après la loi des tensions) et d'impédance interne complexe Z_S .

Ce théorème est résumé par le schéma équivalent suivant (TP=transformateur parfait):



2) Mesure des pertes du transformateur réel:

2-a) Les pertes par hystérésis et courants de Foucault (dites pertes fer) P_F :

On les mesure par un essai à vide c'est à dire le secondaire ne débitant pas ($i_2=0$, pour cela on place un voltmètre au secondaire) sous tension secondaire nominale, un wattmètre placé au primaire permet d'évaluer la puissance perdue P_F .

2-b) Les pertes par effet Joule P_{CC}

Elles sont dues à la résistances des enroulements , on peut les mesurer soit en fonctionnement nominal en mesurant les courants primaires et secondaires: $P_J = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2$, soit par un essai en court-circuit sous courant secondaire nominal et tension primaire réduite: un ampèremètre court-circuite le secondaire, un wattmètre placé au primaire donne $P_J = P_{CC}$

Remarque importante:

*Lors de l'essai à vide le courant secondaire est nul et le courant primaire très faible devant le courant nominal, les pertes joules durant cet essai seront donc négligeable devant les pertes fer.

* Lors de l'essai en court-circuit, la tension primaire est faible devant la tension nominale (c'est nécessaire puisque le secondaire est en court-circuit!), et la tension secondaire est nulle, on travaille donc à flux magnétique très réduit, on pourra alors négliger les pertes fer lors de cet essai devant les pertes joules.

On peut donc ainsi découpler les deux types de pertes grâce à ces deux essais (on parle de la méthode des "pertes séparées").

3) Rendement du transformateur et estimation de Z_S :

3-a) Rendement du transformateur:

On fait débiter le transformateur sur une charge constitué du rhéostat de 123Ω en série avec une bobine d'inductance $L=0,13H$ sous un courant nominal $I_2=1,5A$, on mesure la puissance au secondaire P_2 , on peut

en déduire le rendement défini par : $\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_F + P_J}$ grâce aux deux essais précédents.

Attention le rendement est défini pour un fonctionnement nominal, il varie notamment si I_2 varie.

3-b) Mesure de Z_S :

L'essai en court-circuit permet d'obtenir l'impédance équivalente du générateur de Thévenin, en effet, vu du secondaire, on a un générateur de fem E_S et d'impédance Z_S , qu'on a court-circuité, donc

$I_{2CC} = I_2 = \frac{mU_{1CC}}{Z_S}$ en valeurs efficaces (voir schéma équivalent du IV-1) ; on en déduit le module de

l'impédance complexe $Z_S = R_S + jL_S\omega$. D'autre part, $P_{CC} = P_J = R_S I_2^2$ (puisque'on néglige les pertes fer dans cet essai), on peut donc déterminer L_S .

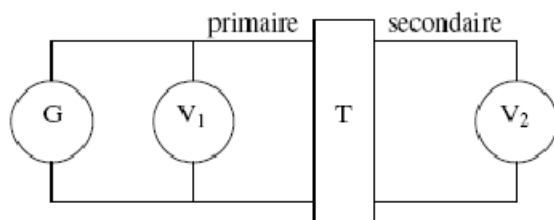
IV) TRAVAIL A EFFECTUER

Dans tous les montages qui suivent, le bobinage primaire comportant 250 spires est alimenté par l'autotransformateur (représenté par G dans les schémas de montage) lui même branché en sortie du transformateur d'isolement. Le bobinage secondaire comporte 500 spires.

ON FERA VERIFIER TOUS LES MONTAGES AVANT DE METTRE LE CIRCUIT SOUS TENSION

1) Vérification de la loi des tensions

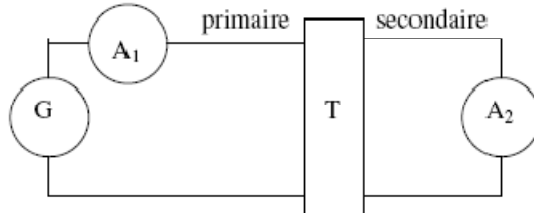
Réaliser le montage suivant où T représente le transformateur:



Faire varier la tension délivrée par G de 10 en 10V jusqu'à $U_1=100V$, relever à chaque fois U_2 et tracer $U_2=f(U_1)$. En déduire le rapport de transformation m .

2) Vérification de la loi des courants

Réaliser le montage suivant et **faire vérifier** (attention le secondaire est en court-circuit, manipuler avec des précautions le curseur de l'autotransformateur)



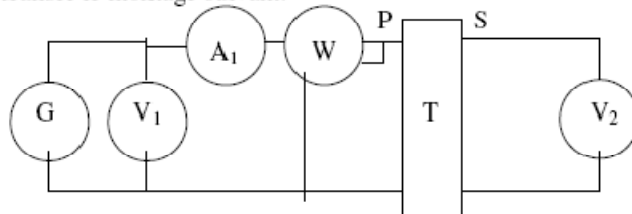
En partant de zéro, faire varier **très lentement** le courant délivré par G de 0,2 en 0,2A jusqu'à $I_1=2A$, relever à chaque fois I_2 et tracer $I_2=f(I_1)$. En déduire le rapport de transformation m .

3) Rendement du transformateur pour un fonctionnement nominal

On choisit un fonctionnement nominal défini par: $U_1=60V$, $I_2=1,5A$.

3-a) Mesure des pertes fer P_F (essai à vide)

Réaliser le montage suivant:

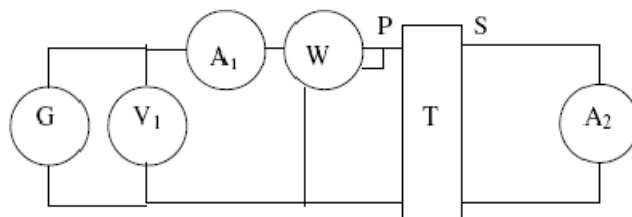


* Mesurer la puissance consommée par le transformateur sous la tension nominale $U_1=60V$.

* Comparer cette puissance à la puissance consommée par effet joule au primaire.

3-b) Mesure des pertes Joules P_J (essai en court-circuit)

Réaliser le montage suivant, ramener le curseur de G à 0 et faire **VERIFIER**



* Mesurer la puissance consommée par le transformateur $P_{CC}=P_J$, sous le courant nominal $I_2=1,5A$. Ce courant sera obtenu sous tension primaire U_{1CC} **réduite** par rapport à la tension nominale. Noter la valeur de U_{1CC} .

* Déduire de ces mesures les valeurs de:

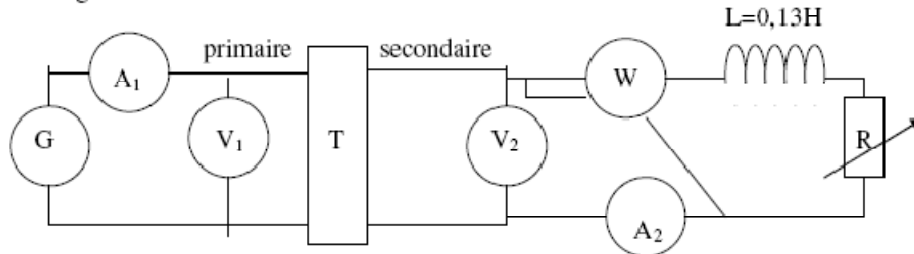
→ l'impédance Z_S "ramenée au secondaire".

→ la résistance R_S et l'inductance L_S "ramenées au secondaire".

* A partir des valeurs des résistances et inductances lues sur les bobines primaire et secondaire, calculer la valeur théorique $Z_{S_{th\epsilon o}}$ de Z_S , comparer au résultat précédent.

3-c) Mesure du rendement

Réaliser le montage suivant et le faire vérifier:



* En partant de la valeur maximale de la résistance du rhéostat, régler la tension primaire à $U_1=60V$, puis réduire la résistance pour atteindre la valeur $I_2=1,5A$.

* Mesurer la puissance P_2 et le courant I_1 , sous les valeurs nominales précédentes. En déduire le rendement du transformateur pour ce fonctionnement nominal.

* Calculer $P_J = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2$ puis $P_J = R_S I_2^2$. Comparer à la valeur mesurée lors de l'essai en court-circuit P_{CC} .