

9 exercices corrigés d'Electrotechnique sur le transformateur

Exercice Transfo01 : transformateur à vide

Faire le bilan de puissance du transformateur à vide.

En déduire que la puissance consommée à vide est sensiblement égale aux pertes fer.

Exercice Transfo02 : courant de mise sous tension d'un transformateur

Un transformateur monophasé a les caractéristiques suivantes :

230 V / 24 V	50 Hz
63 VA	2 kg

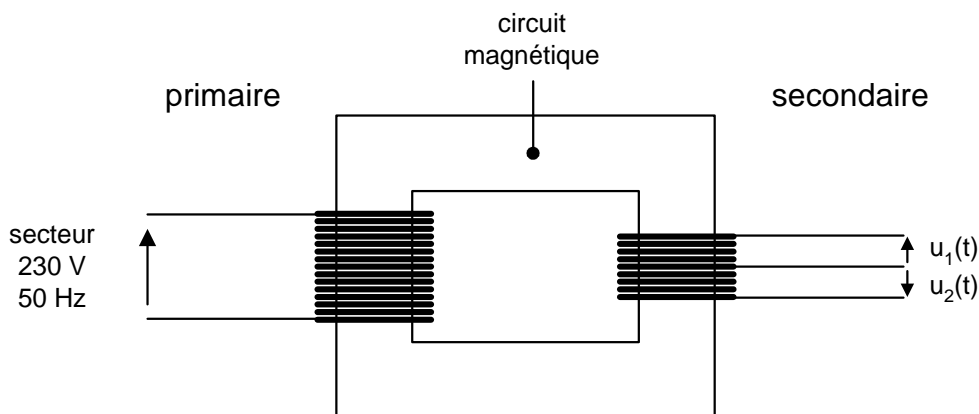
1- Calculer le courant primaire nominal I_{1N} et le courant secondaire nominal I_{2N} .

2- A la mise sous tension d'un transformateur, il se produit un courant d'appel très important (de l'ordre de 25 I_{1N}) pendant une dizaine de millisecondes.

Evaluer le courant de mise sous tension.

Exercice Transfo03 : transformateur à point milieu monophasé

Un transformateur à point milieu possède au secondaire deux enroulements ayant le même nombre de spires :



1- Quel est le rôle du circuit magnétique d'un transformateur ?

2- Justifier que : $u_2(t) = -u_1(t)$.

3- Calculer le nombre de spires des enroulements du secondaire pour que la valeur efficace des tensions $u_1(t)$ et $u_2(t)$ soit de 10 volts (le transformateur est supposé parfait).

On donne : nombre de spires du primaire : 460.

Exercice Transfo04 : transformateur de distribution

Un transformateur de distribution possède les caractéristiques nominales suivantes : $S_{2N} = 25 \text{ kVA}$, $p_{\text{Joule } N} = 700 \text{ W}$ et $p_{\text{fer}} = 115 \text{ W}$.

1- Calculer le rendement nominal pour :

- une charge résistive
- une charge inductive de facteur de puissance 0,8

2- Calculer le rendement pour :

- une charge résistive qui consomme la moitié du courant nominal

Exercice Transfo05 : transformateur monophasé

Un transformateur monophasé a les caractéristiques suivantes :

- tension primaire nominale : $U_{1N} = 5375 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$
- rapport du nombre de spires : $N_2/N_1 = 0,044$
- résistance de l'enroulement primaire : $R_1 = 12 \Omega$
- résistance de l'enroulement secondaire : $R_2 = 25 \text{ m}\Omega$
- inductance de fuite du primaire : $L_1 = 50 \text{ mH}$
- inductance de fuite du secondaire : $L_2 = 100 \mu\text{H}$

1- Calculer la tension à vide au secondaire.

2- Calculer la résistance des enroulements ramenée au secondaire R_S .

3- Calculer l'inductance de fuite ramenée au secondaire L_S . En déduire la réactance de fuite X_S .

Le transformateur débite dans une charge résistive $R = 1 \Omega$.

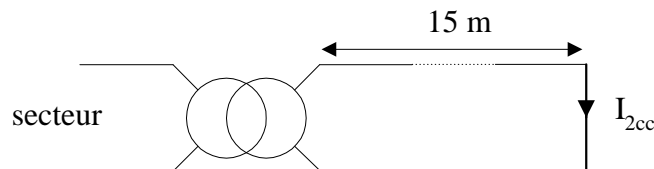
4- Calculer la tension aux bornes du secondaire U_2 et le courant qui circule dans la charge I_2 .

Exercice Transfo06 : transformateur de commande et de signalisation monophasé

Un transformateur de commande et de signalisation monophasé a les caractéristiques suivantes :

230 V / 24 V 50 Hz 630 VA 11,2 kg

- 1- Les pertes totales à charge nominale sont de 54,8 W.
Calculer le rendement nominal du transformateur pour $\cos \varphi_2 = 1$ et $\cos \varphi_2 = 0,3$.
- 2- Calculer le courant nominal au secondaire I_{2N} .
- 3- Les pertes à vide (pertes fer) sont de 32,4 W.
En déduire les pertes Joule à charge nominale.
En déduire R_s , la résistance des enroulements ramenée au secondaire.
- 4- La chute de tension au secondaire pour $\cos \varphi_2 = 0,6$ (inductif) est de 3,5 % de la tension nominale ($U_{2N} = 24$ V). En déduire X_s , la réactance de fuite ramenée au secondaire.
- 5- Un court-circuit a lieu à 15 mètres du transformateur.



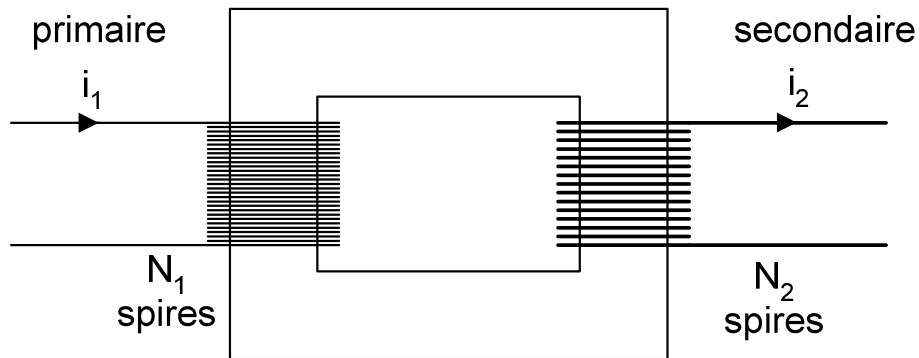
Le câble de ligne en cuivre a une section de $1,5 \text{ mm}^2$.

- 5-1- Calculer sa résistance totale R sachant que la résistivité du cuivre est :
 $\rho = 0,027 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

- 5-2- Montrer que le courant de court-circuit s'écrit :
$$I_{2cc} = \frac{U_{2N}}{\sqrt{(R_s + R)^2 + X_s^2}}$$

Faire l'application numérique (on pourra prendre $R_s \approx 30 \text{ m}\Omega$ et $X_s \approx 15 \text{ m}\Omega$).

Exercice Transfo07 : enroulements d'un transformateur monophasé



Rapport du nombre de spires : $N_1 / N_2 = 20$

Résistance de l'enroulement du primaire : $R_1 = 10 \Omega$

1- On suppose le transformateur parfait pour les courants : $\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$

Calculer la résistance de l'enroulement du secondaire R_2 pour que les pertes Joule au secondaire soient égales aux pertes Joule au primaire.

$R_2 =$

2- La résistance R d'un fil électrique est donnée par la relation : $R = \rho \frac{L}{S}$

Que désigne ρ ?

Que désigne L ?

Que désigne S ?

3- Les spires du secondaire et du primaire sont de mêmes circonférences.

Calculer le rapport entre la section du fil du secondaire et la section du fil du primaire.

$S_2 / S_1 =$

En déduire le rapport entre le diamètre du fil du secondaire et le diamètre du fil du primaire.

$D_2 / D_1 =$

4- On note m_1 la masse de cuivre de l'enroulement du primaire et m_2 la masse de cuivre de l'enroulement du secondaire.

Cocher la bonne réponse :

- $m_1 = m_2$
 $m_1 > m_2$
 $m_1 < m_2$

Exercice Transfo08 : transformateur monophasé

Les essais d'un transformateur monophasé ont donné :

A vide : $U_1 = 220$ V, 50 Hz (tension nominale primaire) ; $U_{2v} = 44$ V ; $P_{1v} = 80$ W ; $I_{1v} = 1$ A.

En court-circuit : $U_{1cc} = 40$ V ; $P_{1cc} = 250$ W ; $I_{2cc} = 100$ A (courant nominal secondaire).

En courant continu au primaire : $I_1 = 10$ A ; $U_1 = 5$ V.

Le transformateur est considéré comme parfait pour les courants lorsque ceux-ci ont leurs valeurs nominales.

1- Déterminer le rapport de transformation à vide m_v et le nombre de spires au secondaire, si l'on en compte 500 au primaire.

2- Calculer la résistance de l'enroulement primaire R_1 .

3- Vérifier que l'on peut négliger les pertes par effet Joule lors de l'essai à vide (pour cela, calculer les pertes Joule au primaire).

4- En admettant que les pertes dans le fer sont proportionnelles au carré de la tension primaire, montrer qu'elles sont négligeables dans l'essai en court-circuit.
Faire l'application numérique.

5- Représenter le schéma équivalent du transformateur en court-circuit vu du secondaire.
En déduire les valeurs R_s et X_s caractérisant l'impédance interne.

Quels que soient les résultats obtenus précédemment, pour la suite du problème, on prendra $R_s = 0,025$ Ω et $X_s = 0,075$ Ω .

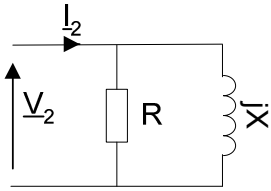
Le transformateur, alimenté au primaire sous sa tension nominale, débite 100 A au secondaire avec un facteur de puissance égal à 0,9 (charge inductive).

6- Déterminer la tension secondaire du transformateur.
En déduire la puissance délivrée au secondaire.

7- Déterminer la puissance absorbée au primaire (au préalable calculer les pertes globales).
En déduire le facteur de puissance au primaire et le rendement.

Exercice Transfo09 : transformateur monophasé

1- La charge du transformateur est :



On admet que :

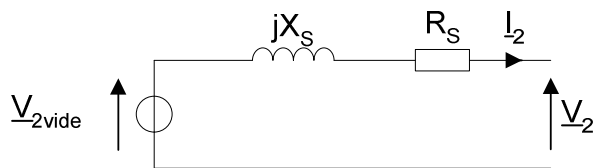
$$Z = \frac{V_{\text{eff}}}{I_{\text{eff}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X^2}}}$$
$$\cos \varphi_{v/i} = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X^2}}}$$

avec: $X = L\omega$

Calculer l'impédance Z et le facteur de puissance de la charge.

On donne : $f = 50 \text{ Hz}$, $R = 2 \Omega$ et $L = 10 \text{ mH}$.

2- Le schéma équivalent ramené au secondaire du transformateur est :



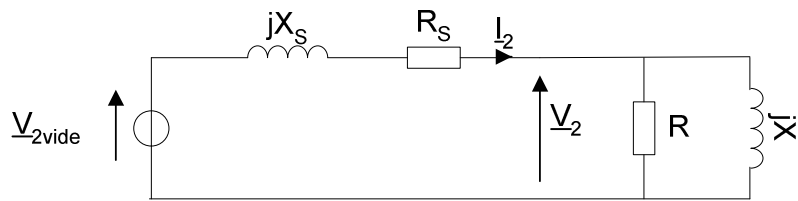
$$R_S = 80 \text{ m}\Omega$$

$$X_S = 160 \text{ m}\Omega$$

$$V_{2 \text{ vide}} = 240 \text{ V}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

En charge, le schéma équivalent du circuit est donc :



Calculer :

- La tension efficace au secondaire V_2
- La chute de tension au secondaire ΔV_2
- Le courant efficace consommé par la charge I_2
- La puissance active consommée par la charge P_2

Corrigés

Exercice Transfo01 : transformateur à vide

Faire le bilan de puissance du transformateur à vide.

$$P_1 = P_2 + \text{pertes Joule} + \text{pertes Fer}$$

A vide, la puissance fournie au secondaire est nulle : $P_2 = 0$

$$P_1 \text{ à vide} = \text{pertes Joule} + \text{pertes Fer}$$

En déduire que la puissance consommée à vide est sensiblement égale aux pertes fer.

A vide, un transformateur consomme peu de courant : les pertes Joule sont donc négligeables devant les pertes Fer.

$$P_1 \text{ à vide} \approx \text{pertes Fer}$$

Exercice Transfo02 : courant de mise sous tension d'un transformateur

Un transformateur monophasé a les caractéristiques suivantes :

$$\begin{array}{ll} 230 \text{ V} / 24 \text{ V} & 50 \text{ Hz} \\ 63 \text{ VA} & 2 \text{ kg} \end{array}$$

1- Calculer le courant primaire nominal I_{1N} et le courant secondaire nominal I_{2N} .

$$I_{1N} = S_N / U_{1N} = 63 / 230 = 0,27 \text{ A}$$

$$I_{2N} = S_N / U_{2N} = 63 / 24 = 2,6 \text{ A}$$

2- A la mise sous tension d'un transformateur, il se produit un courant d'appel très important (de l'ordre de 25 I_{1N}) pendant une dizaine de millisecondes.

Evaluer le courant de mise sous tension.

$$25 \times 0,27 = 6,8 \text{ A}$$

Exercice Transfo03 : transformateur à point milieu monophasé

1- Le circuit magnétique d'un transformateur permet de canaliser les lignes de champ magnétique entre le primaire et le secondaire.

2- Les deux enroulements ayant le même nombre de spires, les deux tensions ont la même amplitude. De plus, elles sont en opposition de phase à cause de la convention de signe choisie pour les tensions : $u_2(t) = -u_1(t)$

3- Nombre de spires d'un des enroulements du secondaire : $460 \times (10/230) = 20$

Exercice Transfo04 : transformateur de distribution

Un transformateur de distribution possède les caractéristiques nominales suivantes :
 $S_{2N} = 25 \text{ kVA}$, $p_{\text{Joule N}} = 700 \text{ W}$ et $p_{\text{fer}} = 115 \text{ W}$.

1- Calculer le rendement nominal pour :

- une charge résistive

$$P_2 = S_2 \cos \varphi_2$$

La charge est résistive : $\cos \varphi_2 = 1$

$$P_{2N} = 25000 \times 1 = 25 \text{ kW}$$

$$P_1 = P_2 + \text{pertes Joule} + \text{pertes Fer} = 25000 + 700 + 115 = 25,815 \text{ kW}$$

$$\text{Rendement nominal : } P_2/P_1 = 96,8 \%$$

- une charge inductive de facteur de puissance 0,8

$$(25000 \times 0,8) / (25000 \times 0,8 + 700 + 115) = 96,1 \%$$

2- Calculer le rendement pour :

- une charge résistive qui consomme la moitié du courant nominal

$$P_2 = S_2 \cos \varphi_2$$

$$I_2 = I_{2N}/2 \quad \text{donc : } P_2 \approx P_{2N}/2 \approx 12,5 \text{ kW}$$

Les pertes Joule sont proportionnelles au carré des courants (Loi de Joule).

$$700 \times (1/2)^2 = 175 \text{ W}$$

$$(12500) / (12500 + 175 + 115) = 97,7 \%$$

Exercice Transfo05 : transformateur monophasé

Un transformateur monophasé a les caractéristiques suivantes :

- tension primaire nominale : $U_{1N} = 5375 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$
- rapport du nombre de spires : $N_2/N_1 = 0,044$
- résistance de l'enroulement primaire : $R_1 = 12 \Omega$
- résistance de l'enroulement secondaire : $R_2 = 25 \text{ m}\Omega$
- inductance de fuite du primaire : $L_1 = 50 \text{ mH}$
- inductance de fuite du secondaire : $L_2 = 100 \mu\text{H}$

1- Calculer la tension à vide au secondaire.

$$5375 \times 0,044 = 236,5 \text{ V}$$

2- Calculer la résistance des enroulements ramenée au secondaire R_S .

$$R_S = R_2 + R_1 m_v^2 = 0,025 + 12 \times 0,044^2 = 48,2 \text{ m}\Omega$$

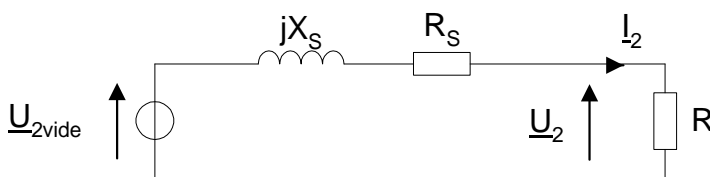
3- Calculer l'inductance de fuite ramenée au secondaire L_S . En déduire la réactance de fuite X_S .

$$L_S = L_2 + L_1 m_v^2 = 100 \cdot 10^{-6} + 50 \cdot 10^{-3} \cdot 0,044^2 = 197 \mu\text{H}$$
$$X_S = L_S \omega = 197 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi \cdot 50 = 61,8 \text{ m}\Omega$$

Le transformateur débite dans une charge résistive $R = 1 \Omega$.

4- Calculer la tension aux bornes du secondaire U_2 et le courant qui circule dans la charge I_2 .

Schéma électrique équivalent :



Impédance complexe totale : $\underline{Z} = (R_S + R) + jX_S$

Impédance totale : $Z = ((R_S + R)^2 + X_S^2)^{1/2}$

Courant au secondaire : $I_2 = U_{2 \text{ vide}} / Z$

$$I_2 = \frac{U_{2v}}{\sqrt{(R_S + R)^2 + X_S^2}} = 225,2 \text{ A}$$

Loi d'Ohm : $U_2 = R I_2 = 225,2 \text{ volts}$

Autre méthode :

$$\Delta U_2 = U_{2V} - U_2 \approx (R_S \cos \varphi_2 + X_S \sin \varphi_2) I_2$$

La charge est résistive : $\cos \varphi_2 = 1$

$$\text{D'où} \quad \Delta U_2 \approx R_S I_2 \quad (1)$$

$$\text{D'autre part :} \quad U_2 = R I_2 \quad (2)$$

$$(1) (2) \quad I_2 \approx U_{2V} / (R_S + R) \approx 225,6 \text{ A}$$

$$U_2 \approx 225,6 \text{ V}$$

Exercice Transfo06 : transformateur de commande et de signalisation monophasé

1- Calculer le rendement nominal du transformateur pour $\cos \varphi_2 = 1$ et $\cos \varphi_2 = 0,3$.

$$(630 \times 1) / (630 \times 1 + 54,8) = 92 \%$$
$$(630 \times 0,3) / (630 \times 0,3 + 54,8) = 77,5 \%$$

2- Calculer le courant nominal au secondaire I_{2N} .

$$630 / 24 = 26,25 \text{ A}$$

3- Les pertes à vide (pertes fer) sont de 32,4 W.

En déduire les pertes Joule à charge nominale.

$$\text{Bilan de puissance : } 54,8 - 32,4 = 22,4 \text{ W}$$

En déduire R_S , la résistance des enroulements ramenée au secondaire.

$$\text{Loi de Joule : } 22,4 / 26,25^2 = 32,5 \text{ m}\Omega$$

4- La chute de tension au secondaire pour $\cos \varphi_2 = 0,6$ (inductif) est de 3,5 % de la tension nominale ($U_{2N} = 24 \text{ V}$). En déduire X_S , la réactance de fuite ramenée au secondaire.

$$\text{Chute de tension au secondaire : } \Delta U_2 = 0,035 \times 24 = 0,84 \text{ V}$$

$$\Delta U_2 = (R_S \cos \varphi_2 + X_S \sin \varphi_2) I_{2N}$$

$$X_S = (0,84 / 26,25 - 0,0325 \times 0,6) / 0,8 = 15,6 \text{ m}\Omega$$

5- Un court-circuit a lieu à 15 m du transformateur.

Le câble de ligne en cuivre a une section de 1,5 mm².

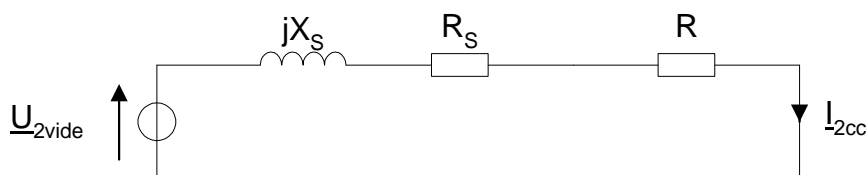
5-1- Calculer sa résistance totale R sachant que la résistivité du cuivre est :

$$\rho = 0,027 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}.$$

$$R = \rho L / S = 0,027 \times 2 \times 15 / 1,5 = 540 \text{ m}\Omega$$

4-5-2- Montrer que le courant de court-circuit s'écrit : $I_{2cc} = \frac{U_{2N}}{\sqrt{(R_S + R)^2 + X_S^2}}$

Schéma électrique équivalent :



Impédance complexe totale : $\underline{Z} = (R_S + R) + jX_S$

Impédance totale : $Z = ((R_S + R)^2 + X_S^2)^{1/2}$

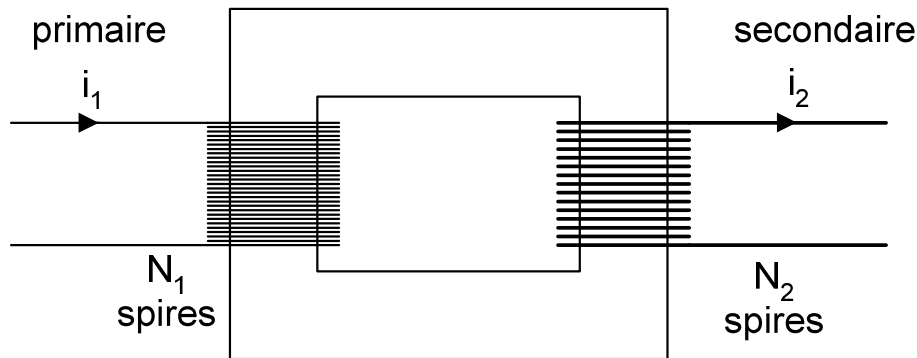
Courant de court-circuit : $U_{2 \text{ vide}}/Z \approx U_{2N}/Z = U_{2 \text{ vide}}/((R_S + R)^2 + X_S^2)^{1/2}$

Faire l'application numérique.

$$Z = ((0,0325 + 0,540)^2 + 0,0156^2)^{1/2} = 573 \text{ m}\Omega$$

$$24/0,573 = 42 \text{ ampères}$$

Exercice Transfo07 : enroulements d'un transformateur monophasé



Rapport du nombre de spires : $N_1 / N_2 = 20$

Résistance de l'enroulement du primaire : $R_1 = 10 \Omega$

1- On suppose le transformateur parfait pour les courants : $\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$

Calculer la résistance de l'enroulement du secondaire R_2 pour que les pertes Joule au secondaire soient égales aux pertes Joule au primaire.

$$R_1 I_1^2 = R_2 I_2^2$$

$$R_2 = \frac{R_1}{\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2} = \frac{10}{20^2} = 25 \text{ m}\Omega$$

2- La résistance R d'un fil électrique est donnée par la relation : $R = \rho \frac{L}{S}$

Que désigne ρ ? **résistivité électrique du matériau (en $\Omega \cdot \text{m}$)**

Que désigne L ? **longueur du fil (en m)**

Que désigne S ? **section du fil (en m^2)**

3- Les spires du secondaire et du primaire sont de mêmes circonférences.

Calculer le rapport entre la section du fil du secondaire et la section du fil du primaire.

$$R_1 = \rho \frac{L_1}{S_1} = \rho \frac{N_1 L}{S_1} \quad R_2 = \rho \frac{N_2 L}{S_2} \quad L : \text{longueur moyenne d'une spire.}$$

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{N_2}{N_1} \frac{R_1}{R_2} = \frac{N_1}{N_2} = 20$$

En déduire le rapport entre le diamètre du fil du secondaire et le diamètre du fil du primaire.

$$S_1 = \pi D_1^2 / 4 \quad S_2 = \pi D_2^2 / 4$$

$$\frac{D_2}{D_1} = \sqrt{\frac{S_2}{S_1}} = \sqrt{\frac{N_1}{N_2}} = \sqrt{20} = 4,47$$

4- On note m_1 la masse de cuivre de l'enroulement du primaire et m_2 la masse de cuivre de l'enroulement du secondaire.

Cocher la bonne réponse :

$m_1 = m_2$

$m_1 > m_2$

$m_1 < m_2$

(En effet :

Volume de cuivre du primaire : $V_1 = L_1 S_1 = N_1 L S_1$

Masse de cuivre du primaire : $m_1 = \rho V_1 = \rho N_1 L S_1$

Masse de cuivre du secondaire : $m_2 = \rho V_2 = \rho N_2 L S_2$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{N_1 S_1}{N_2 S_2} = 1 \quad)$$

Exercice Transfo08 : transformateur monophasé

Les essais d'un transformateur monophasé ont donné :

A vide : $U_1 = 220 \text{ V}$, 50 Hz (tension nominale primaire) ; $U_{2v} = 44 \text{ V}$; $P_{1v} = 80 \text{ W}$; $I_{1v} = 1 \text{ A}$.

En court-circuit : $U_{1cc} = 40 \text{ V}$; $P_{1cc} = 250 \text{ W}$; $I_{2cc} = 100 \text{ A}$ (courant nominal secondaire).

En courant continu au primaire : $I_1 = 10 \text{ A}$; $U_1 = 5 \text{ V}$.

Le transformateur est considéré comme parfait pour les courants lorsque ceux-ci ont leurs valeurs nominales.

1- Déterminer le rapport de transformation à vide m_v et le nombre de spires au secondaire, si l'on en compte 500 au primaire.

$$m_v = 44 / 220 = 0,2$$
$$N_2 = 500 \times 0,2 = 100 \text{ spires}$$

2- Calculer la résistance de l'enroulement primaire R_1 .

$$R_1 = 5 / 10 = 0,5 \Omega$$

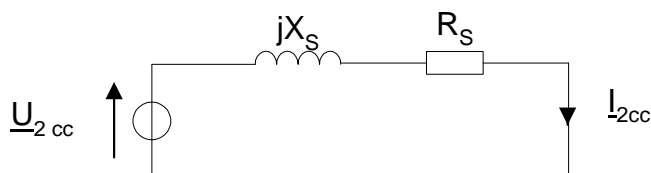
3- Vérifier que l'on peut négliger les pertes par effet Joule lors de l'essai à vide (pour cela, calculer les pertes Joule au primaire).

$$\text{Pertes Joule au primaire} = R_1 I_{1v}^2 = 0,5 \text{ W} \ll 80 \text{ W} \text{ donc négligeables.}$$

4- En admettant que les pertes dans le fer sont proportionnelles au carré de la tension primaire, montrer qu'elles sont négligeables dans l'essai en court-circuit. Faire l'application numérique.

$$80 \times (40 / 220)^2 = 2,6 \text{ W}$$
$$2,6 \text{ W} \ll 250 \text{ W} \text{ donc négligeables.}$$

5- Représenter le schéma équivalent du transformateur en court-circuit vu du secondaire. En déduire les valeurs R_s et X_s caractérisant l'impédance interne.



$$R_s = 250 / 100^2 = 0,025 \Omega$$
$$Z_s = m_v U_{1cc} / I_{2cc} = 0,080 \Omega$$

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2}$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} = 0,076 \Omega$$

Quels que soient les résultats obtenus précédemment, pour la suite du problème, on prendra $R_s = 0,025 \Omega$ et $X_s = 0,075 \Omega$.

Le transformateur, alimenté au primaire sous sa tension nominale, débite 100 A au secondaire avec un facteur de puissance égal à 0,9 (charge inductive).

6- Déterminer la tension secondaire du transformateur.
En déduire la puissance délivrée au secondaire.

$$\Delta U_2 = (R_s \cos \varphi_2 + X_s \sin \varphi_2) I_2 = 5,5 \text{ V}$$

$$U_2 = 44 - 5,5 = 38,5 \text{ V}$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = 3460 \text{ W}$$

7- Déterminer la puissance absorbée au primaire (au préalable calculer les pertes globales).
En déduire le facteur de puissance au primaire et le rendement.

$$\text{Pertes globales} = 80 + 250 = 330 \text{ W}$$

$$P_1 = 3460 + 330 = 3790 \text{ W}$$

$$\text{Rendement} : 3460 / 3790 = 91 \%$$

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 = U_1 m_v I_2 \cos \varphi_1$$

$$\text{D'où} : \cos \varphi_1 = 0,86$$

Exercice Transfo09 : transformateur monophasé

1- Calculer l'impédance Z et le facteur de puissance de la charge.

$$\begin{aligned} Z &= 1,6871 \text{ ohm} \\ \cos \varphi_2 &= 0,8436 \end{aligned}$$

2- Calculer :

- La tension efficace au secondaire V_2
- La chute de tension au secondaire ΔV_2
- Le courant efficace consommé par la charge I_2
- La puissance active consommée par la charge P_2

$$\begin{cases} V_{2\text{vide}} - V_2 \approx (R_s \cos \varphi_2 + X_s \sin \varphi_2) I_2 \\ V_2 = Z I_2 \end{cases}$$
$$I_2 \approx \frac{V_{2\text{vide}}}{R_s \cos \varphi_2 + X_s \sin \varphi_2 + Z} \approx \frac{240}{0,080 \cdot 0,8436 + 0,160 \cdot 0,5370 + 1,6871} = 130,4 \text{ A}$$
$$V_2 = Z I_2 \approx 220,0 \text{ V}$$
$$\Delta V_2 = 240 - 220,0 \approx 20,0 \text{ V}$$
$$P_2 = V_2 I_2 \cos \varphi_2 \approx 220,0 \cdot 130,4 \cdot 0,8436 = 24,2 \text{ kW}$$

Autre méthode (calcul exact) :

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{totale}} &= R_s + jX_s + \frac{jX \cdot R}{R + jX} \text{ avec } X = L\omega = 3,14 \Omega \\ &= \left(R_s + \frac{RX^2}{R^2 + X^2} \right) + j \left(X_s + \frac{R^2 X}{R^2 + X^2} \right) \\ I_2 &= \frac{V_{2\text{vide}}}{Z_{\text{totale}}} = \frac{V_{2\text{vide}}}{\sqrt{\left(R_s + \frac{RX^2}{R^2 + X^2} \right)^2 + \left(X_s + \frac{R^2 X}{R^2 + X^2} \right)^2}} = \frac{240}{1,8428} = 130,2 \text{ A} \\ V_2 &= 1,6871 \times 130,2 = 219,7 \text{ V} \\ \Delta V_2 &= 240 - 219,7 \approx 20,3 \text{ V} \\ P_2 &= 219,7 \cdot 130,2 \cdot 0,8436 = 24,1 \text{ kW} \end{aligned}$$