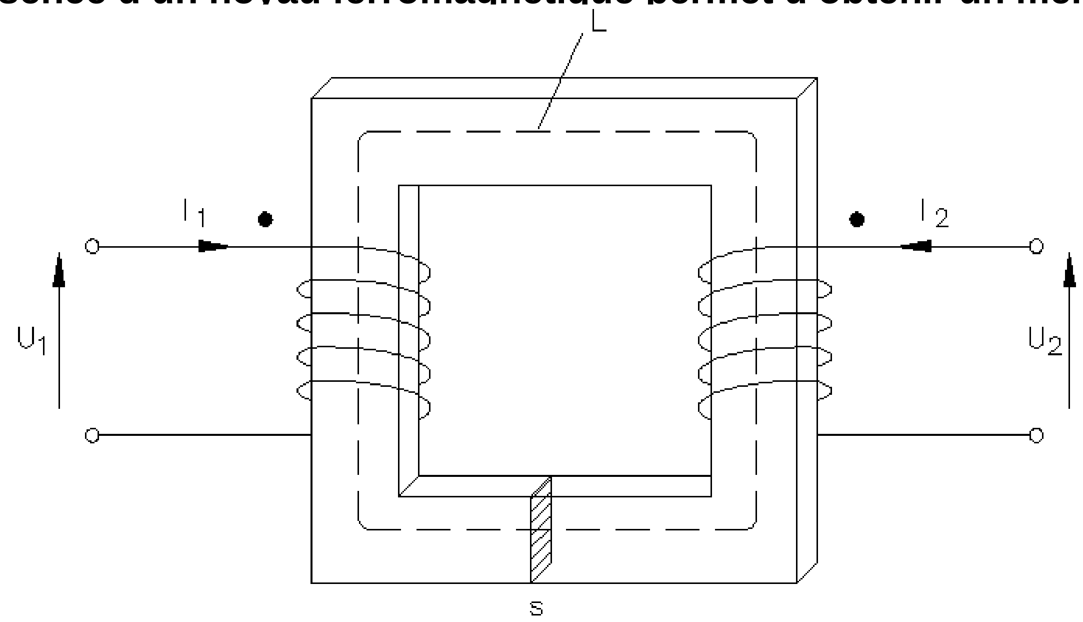
Structure des transformateurs

Bobines de fil électrique couplées magnétiquement.

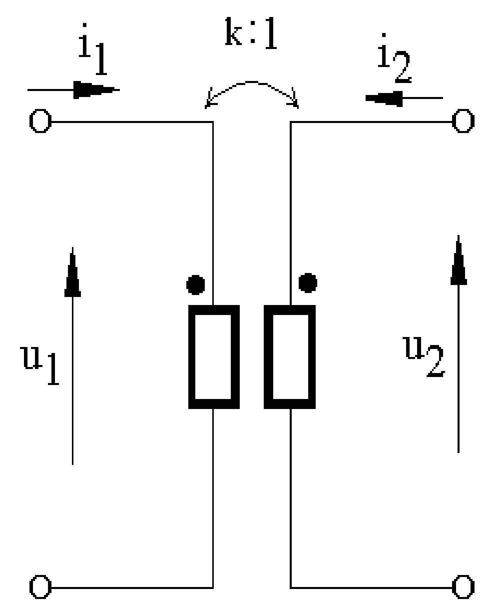
La présence d'un noyau ferromagnétique permet d'obtenir un meilleur couplage.



Si deux bobines séparées, on a l'avantage supplémentaire de l'isolation galvanique (souvent important du point de vue sécurité des personnes).

Transformateur idéal

Le transformateur idéal est un élément fondamental de la théorie des circuits. Nous le représenterons par le symbole



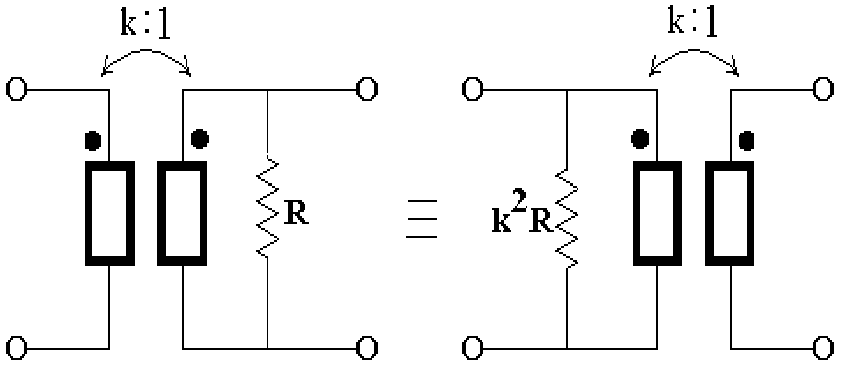
Avec les hypothèses simplificatrices, on a obtenu deux équations qui sont celles d 'un transformateur idéal de rapport

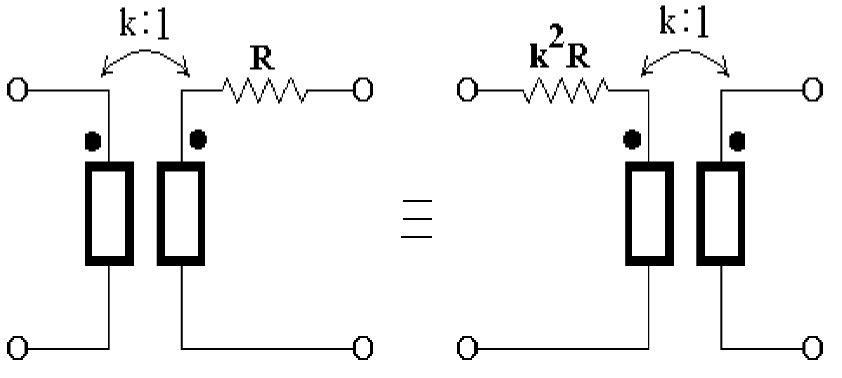
$k = n_1 / n_2$

à savoir $u_1 = k\, u_2$

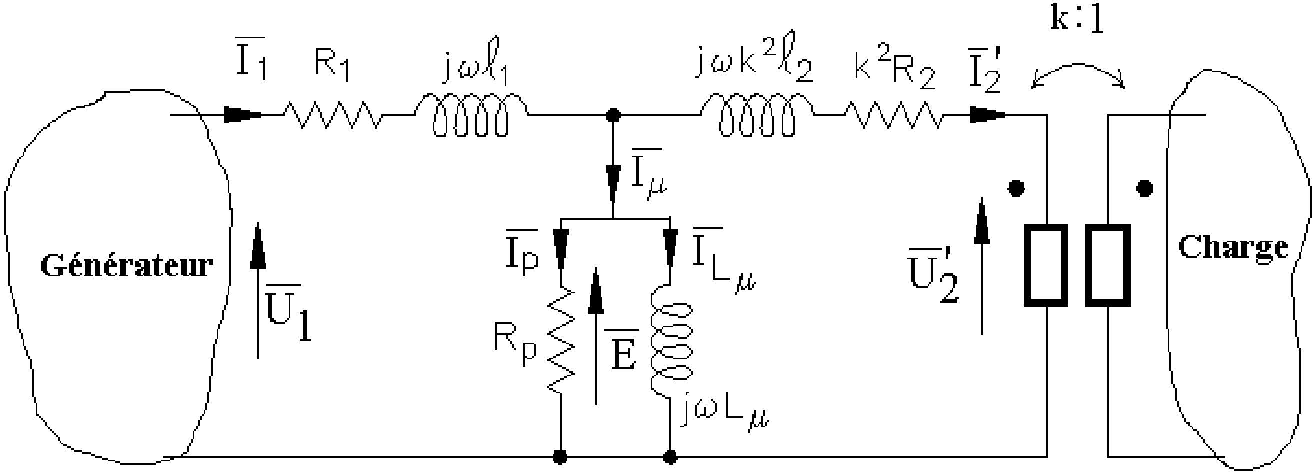
et $i_1 = -(1/k)\, i_2$

Propriétés du transformateur idéal

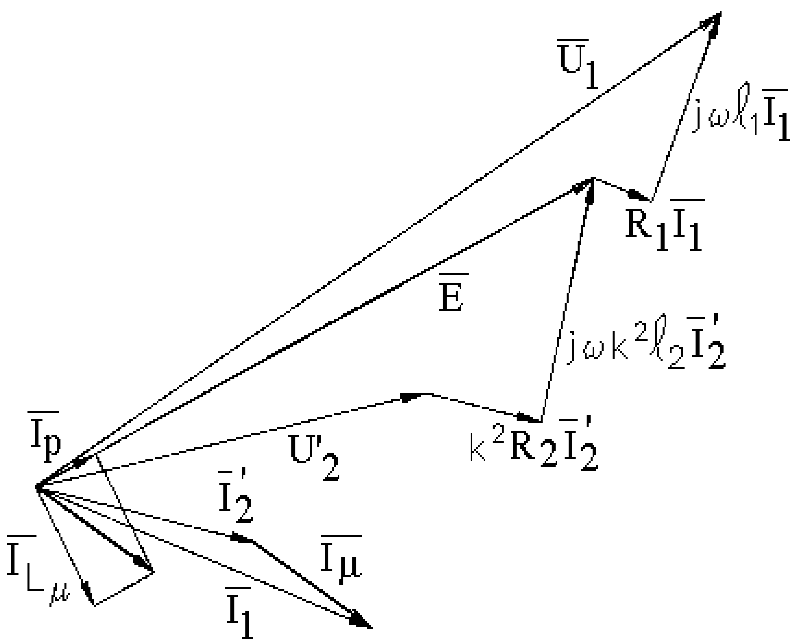




Analyse détaillée



On tient compte des résistances, des inductances de fuite et du courant de magnétisation

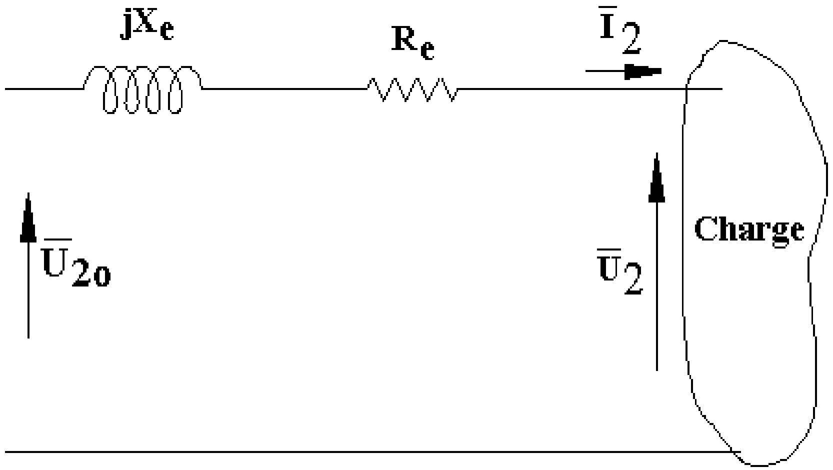


On peut tracer le diagramme des phases facilement si on part de la charge, c-à-d. si on suppose connus

Caractéristique externe

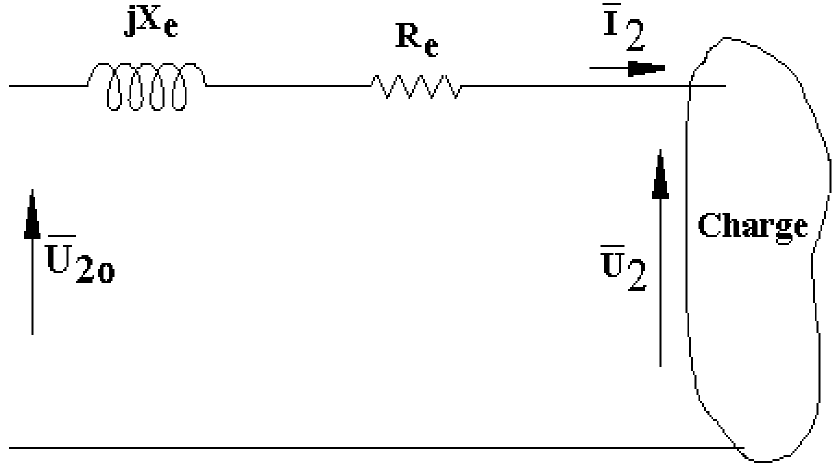
On cherche la relation entre U_2 et I_2 pour U_1 fixé.

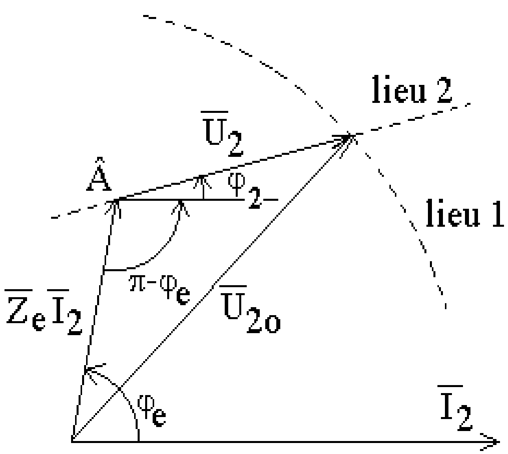
U_1 étant supposé connu, on prend comme modèle un équivalent de Thévenin (rigoureux seulement si le circuit équivalent est linéaire).



Ne pas confondre R_e avec R_2 , ni X_e avec X_2 .

Caractéristique externe (suite)





On pose $Z_e = \sqrt{R_e^2 + X_e^2}$ et $\varphi_e = \mathrm{arctg}\,\dfrac{X_e}{R_e}$.

La solution peut prendre la forme du diagramme ci-dessous, qui est construit en prenant le courant secondaire comme référence de phase (diagramme de Kapp).

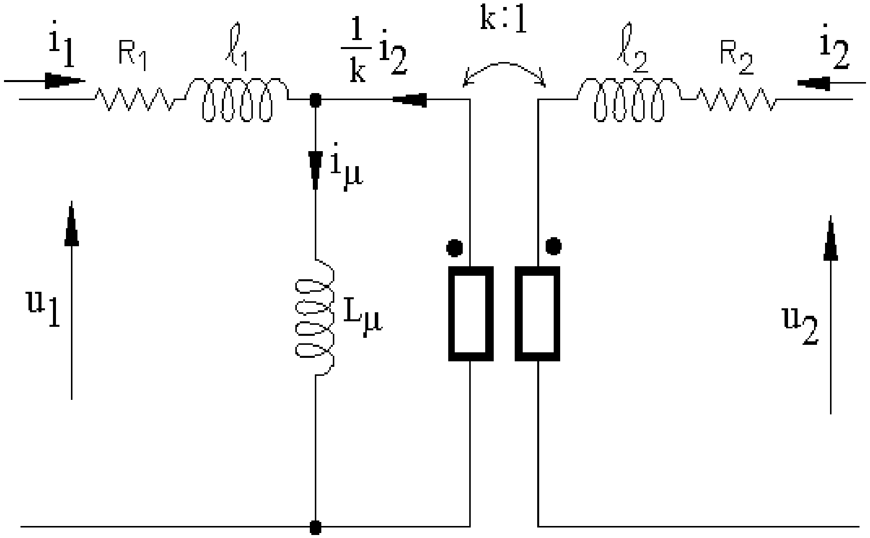
$$U_{2o}^2 = U_2^2 + 2\,U_2\,Z_e\,I_2\cos(\varphi_e - \varphi_2) + (Z_e I_2)^2$$

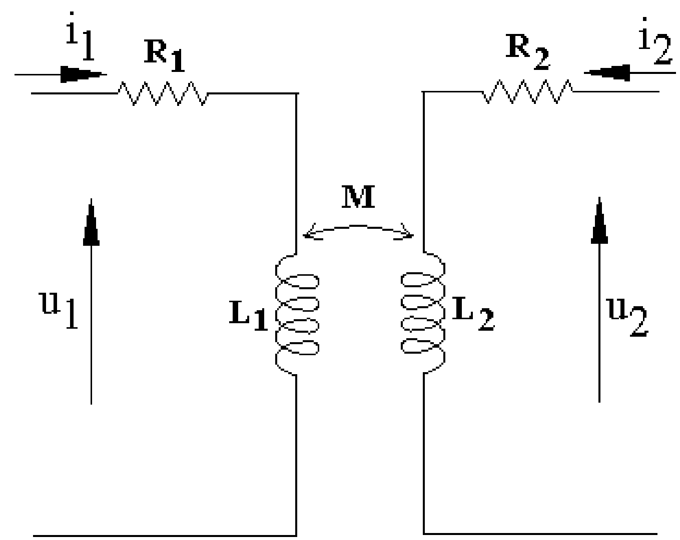
Modèle à inductances couplées

Si on néglige la saturation et les pertes magnétiques, l'élément parallèle du circuit équivalent est une inductance idéale (linéaire et sans pertes, donc ni saturation ni pertes magnétiques), le circuit équivalent obtenu (gauche) est équivalent à un circuit sans transformateur idéal mais comportant une inductance couplée (droite) avec

$M = L_\mu / k$, $L_1 = L_\mu + l_1$ et $L_2 = L_\mu / k^2 + l_2$

La transformation inverse aussi est utile.





Pertes

On distingue deux types de pertes (sous-entendu d ’énergie)

Les pertes « magnétiques »

$$\frac{E^2}{R_p} \approx \frac{U_1^2}{R_p}$$

(sous-entendu, par unité de temps)

Elles sont pratiquement constantes : on les appelle aussi « pertes fixes »

Les pertes « par effet Joule »

$R_1\ I_1^2 + R_2\ I_2^2 \approx R_e\ I_2^2$ avec $R_e = R_1/k^2 + R_2$

Elles dépendent du carré du courant de charge : on les appelle aussi « pertes dues à la charge »

Rendement

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \text{pertes}} \approx \frac{U_2\, I_2 \cos\varphi_2}{U_2\, I_2 \cos\varphi_2 + p_{magn.} + R_e\, I_2^2}$$

Si U_1 est fixé, donc aussi approximativement U_2 , le rendement est maximum pour $\cos\varphi_2 = 1$

$$0 = \frac{\partial\eta}{\partial I_2} = \frac{U_2 \cos\varphi_2}{(...)^2}\,(p_{magn.} - R_e\, I_2^2)$$

Le rendement est donc maximum pour un courant I_2 tel que les pertes « dues à la charge » soient égales aux « pertes fixes ». La position de cet optimum peut se fixer par construction.

Essai en court-circuit

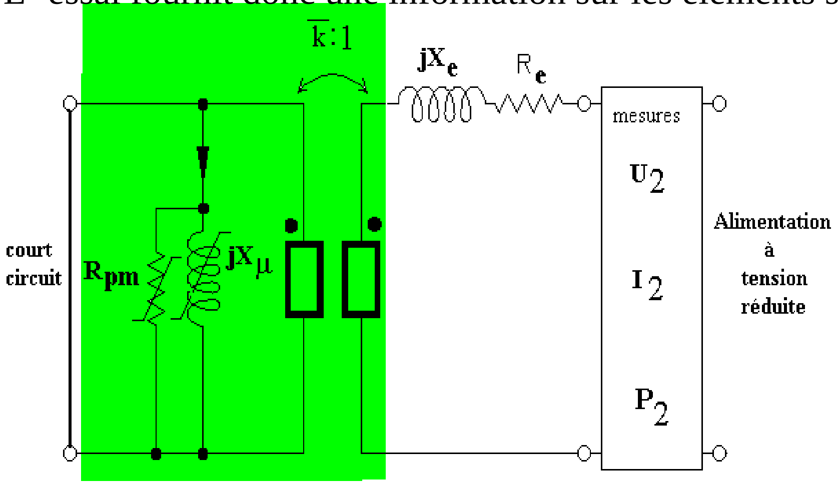
On alimente un enroulement via des appareils de mesure, l ’autre étant court-circuité.

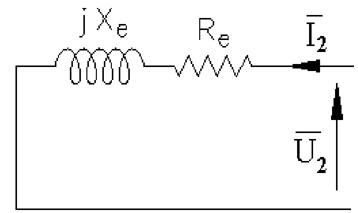
Des normes imposent **$0.25\ I_{nom} \leq I \leq I_{nom}$** . On doit utiliser une **$U \ll U_{nom}$** pour limiter le courant.

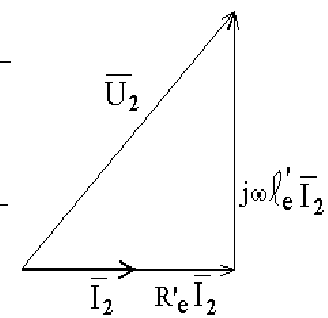
On peut faire l ’essai par le primaire ou par le secondaire (cela dépend de la disponibilité d ’une alimentation, des appareils de mesure….).

Si on fait l ’essai par le secondaire, on « voit » R_e et X_e (et pas R_{pm} ni X_μ).

L ’essai fournit donc une information sur les éléments série







$$Z_e = \frac{U_2}{I_2} \qquad \cos\varphi_e = \frac{P_e}{U_2\, I_2}$$

En utilisant le circuit équivalent série d ’une impédance,

on obtient $R_e = Z_e \cos\varphi_e$ et $X_e = Z_e \sin\varphi_e$

Essai en court-circuit (suite)

Les éléments série sont linéaires (ils ne dépendent pas du niveau de courant auquel on les détermine).

On peut donc facilement retrouver par calcul la valeur de la tension que l 'on aurait si l 'essai était fait à courant nominal. C 'est cette tension que l 'on appelle la tension de court-circuit.

$$U_{2cc} = U_2 \frac{I_{2N}}{I_2}$$

De même, on peut calculer le courant qui existerait si l 'essai était fait à tension nominale. C 'est ce courant que l 'on appelle le courant de court-circuit I_{cc} . I_{cc} est normalement bc plus grand que I_N et donc inaccessible à l 'expérience.

$$I_{2cc} = I_2 \frac{U_{2N}}{U_2} >> I_{2N}$$

Les pertes « dues à la charge » sont proportionnelles au carré du courant. A courant nominal, elles vaudraient donc

$$P_{2\,\text{mesurée}} \left(\frac{I_{2N}}{I_{2\,\text{mesuré}}} \right)^2$$

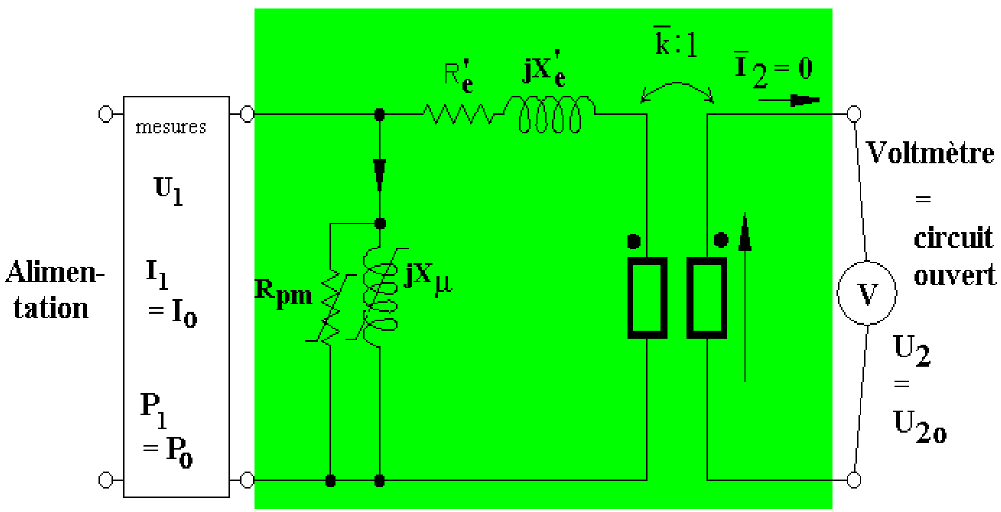
On définit encore la puissance de court-circuit $S_{2cc} = I_{2cc}\, U_{2N} >> S_{2N}$

Essai à vide

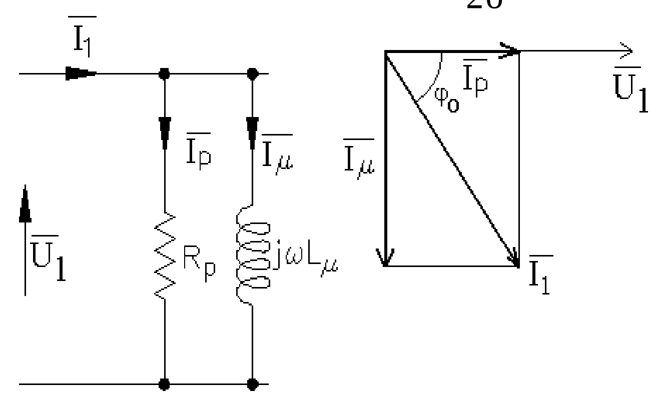
On alimente un enroulement via des appareils de mesure, l 'autre étant en circuit ouvert. Des normes imposent d 'effectuer l 'essai à vide standard à la tension nominale (raison : non-linéarités) !

On peut faire l 'essai par le primaire ou par le secondaire (cela dépend de la disponibilité d 'une alimentation, des appareils de mesure….).

Si on fait l 'essai par le primaire, on « voit » R_{pm} et X_μ (et pas R_e ni X_e). L 'essai fournit donc une information sur les éléments parallèle. On mesure aussi la tension de l 'enroulement non alimenté.



$$k \approx |\bar{k}| = \frac{U_1}{U_{2o}}$$



$$Z_\mu \approx \frac{U_1}{I_{1o}} \qquad \cos\varphi_\mu \approx \frac{P_{1o}}{U_1\, I_{1o}}$$

Équivalent parallèle d 'une impédance

$$R_{pm} = \frac{Z_\mu}{\cos\varphi_\mu} \qquad X_\mu = \frac{Z_\mu}{\sin\varphi_\mu}$$