Chapitre 1 : Les matériaux électrotechniques

- Loi de Lenz-Faraday :

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}$$

- Loi de Laplace :

$$d\overrightarrow{F_M} = \overrightarrow{J_M} \cdot dV \wedge \overrightarrow{B_M}$$

- Vecteurs :

$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}$ Déplacement électrique

$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}$ Excitateur magnétique

- Juxtaposition de 2 milieux <u>conducteurs</u> idéaux :
  - Conservation des composantes normales de $\vec{j}$: $\vec{J}_{mn_1} = \vec{J}_{mn_2}$
  - Composantes tangentielles sont dans le Rapport des conductivités :

$$\frac{\vec{J}_{mt_1}}{\gamma_1} = \frac{\vec{J}_{mt_2}}{\gamma_2}$$

Le courant est entièrement localisé dans l'un des 2 milieux si :

1. La conductivité de ce milieu $\gg$ l'autre
2. La composante normale de $j = 0$ dans ce milieu

- Juxtaposition de 2 milieux <u>magnétiques</u> idéaux :
  - Conservation des composantes normales du vecteur conducteur $\overrightarrow{B_{n_1}} = \overrightarrow{B_{n_2}}$
  - Composantes tangentielles sont dans le Rapport des perméabilités :

$$\frac{\overrightarrow{B_{t_1}}}{\mu_1} = \frac{\overrightarrow{B_{t_2}}}{\mu_2}$$

L'induction sera entièrement localisée dans l'un des 2 milieux si :

1. μ de ce milieu $\gg \mu$ de l'autre
2. Composante normale de $\vec{B} = 0$ dans ce milieu

- Vecteur Aimantation $\vec{M}$:
  - Comportement magnétique de la nature à l'échelle macroscopique
  - Son origine : moment magnétique orbital et spin de l'électron

$\vec{M}$ cherche à s'aligner avec $\vec{H}$ mais en réalité ils ne s'alignent pas complètement

- $\frac{B}{\mu_0} = \vec{H} + \vec{M}$
  - Dans le vide : $\vec{M} = 0$ $\Rightarrow \vec{B} = \mu_0 \vec{H}$
  - Matériau idéal : $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$ $\Rightarrow \vec{B} = \mu \vec{H}$ avec $\mu = \mu_0(1 + \chi_m)$
  - Matériau réel :

$$\frac{\vec{B}}{\mu} = \vec{H} + \vec{M}$$

- χ_m diminue avec la température : l'agitation thermique empêche l'orientation des dipôles selon le champ

- Si $\vec{H}$ augmente, $\vec{M}$ s'aligne positivement avec $\vec{H}$ jusqu'à un $\vec{H}_{max}$ (phénomène de saturation)
- Variation de la perméabilité totale : $M_{tot} = \frac{B}{H}$

- Matériau doux : Simplification

  - $B(H) \equiv$ Courbe de 1ère aimantation
  - Courbe de 1ère aimantation $\equiv$ droite : Zone linéaire
  - $\vec{M}, \vec{B}, \vec{H}$: presque colinéaires : $\vec{B} = \mu\vec{H}$

- μ_r perméabilité relative :

$$\mu_r = 1 + \chi_m \ \rightarrow \ 0 \text{ (domaine de saturation)} \qquad \mu_r = \mu/\mu_0$$

- Pertes :
  - Pertes par courants de Foucault : $P_F = K_F \times \gamma \times e^2 \times \hat{B}^2 \times f^2$
  - Pertes par cycle hystérésis : $P_H = K_H \times \hat{B}^2 \times f \qquad a \approx 1.6$

$P_{F_e} = P_F + P_H$: pertes ferromagnétiques totales

- Matériau à base de ferrites : $B_{sat} \ll B_{sat\ de\ ferromag}$

<u>Chapitre 2: Etude d'u circuit magnétique</u>

- Force magnéto-motrice : $\xi = n.I \qquad [At]$.

$\oint \vec{H}.\vec{dl} = n.I \ \rightarrow \boxed{H.l = n.I = \xi}$ (Utilisé es saturation)

$\boxed{\xi = \Re.\varphi}$ (régime linéaire)

- Flux : $\varphi = \iint \vec{B}.\vec{dS} = B.S \qquad [Wb]$

$\varphi = B.S = \mu.H.S$ (dans le cas linéaire où $B = \mu.H$)

On aura donc :

$$\boxed{n.I = \frac{l}{\mu.S}\varphi}$$

- Réluctance :

$$\boxed{\Re = \frac{l}{\mu.S}} \quad \left[\frac{At}{Wb}\right] = [H^{-1}]$$

Perméance :

$$\boxed{\wp = \frac{1}{\Re}} \quad [H]$$

- Perméabilité :
  - Régime linéaire : $\mu = \frac{B}{H} = cte \qquad \left[\frac{H}{m}\right]$
  - Régime saturé : $\mu \neq cte$

- Dans l'entrefer, la perméabilité est égale à $\mu_0 = cte$.

- Coefficient de Hopkinson :

$\boxed{\nu = \frac{\varphi_1}{\varphi_u}}$ $\quad (1 < \nu \leq 2)$

- Inductance propre :

$n_1.\varphi_1 = L_1.i_1 \quad avec \quad n_1.i_1 = \Re_{app}.\varphi_1$

$\boxed{L_1 = \frac{n_1^2}{\Re_{app}}}$ $[H]$

- Inductance de fuite :

$\boxed{L_f = (1 - \frac{1}{\nu})L_1}$

$n_1\varphi_f = L_f i_1 \rightarrow L_f = n_1\frac{\varphi_f}{i_1}$

- Entrefer :
  - Effet démagnétisant.
  - Eloigner les zones de saturation.

- Quand on passe de la zone linéaire à la zone saturée :

$\mu \searrow \Rightarrow \ fuites \nearrow \Rightarrow \ L \searrow \Rightarrow \nu \nearrow$

Remarque : plus μ augmente, plus le champ magnétique passe dans le matériau.

Chapitre 3 : Couplage Magnétique

- Transformateur parfait :

$e_1 = -\frac{d\phi_1}{dt} \Rightarrow \phi_1 = n_1\varphi \quad ; \quad e_2 = -\frac{d\phi_2}{dt} \Rightarrow \phi_2 = n_2\varphi$

$v_1 = -e_1 \,; \ v_2 = e_2 \qquad \Rightarrow \ \frac{e_1}{e_2} = \frac{n_2}{n_1} = -\frac{v_2}{v_1} = m$

$n_1 i_1 + n_2 i_2 = \Re_{app.}\varphi \approx 0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{\frac{i_2}{i_1} = -\frac{1}{m}}$

Puis $P_1 = i_1 v_1 \ ; \ P_2 = i_2 v_2$

$\Rightarrow \boxed{P_1 = P_2}$ Conservation de la puissance

- Régime sinusoïdal :

$$\bar{E}_K = \bar{E}_{Keff}\sqrt{2} = -\frac{d\bar{\bar{\phi}}_K}{dt} = -j\omega\bar{\bar{\phi}}_K = -j\omega n_k\bar{\bar{\phi}} = -j\omega n_k S\bar{\bar{B}}$$

- Inductances Propre et Mutuelle

$\phi_1 = L_1 i_1 + M_{i2} \qquad \Rightarrow L_1 = \left.\frac{\phi_1}{i_1}\right|_{i_2=0} \qquad M = \left.\frac{\phi_2}{i_1}\right|_{i_2=0}$

$\phi_2 = L_2 i_2 + M_{i1} \qquad \Rightarrow L_2 = \left.\frac{\phi_2}{i_2}\right|_{i_1=0} \qquad M = \left.\frac{\phi_1}{i_2}\right|_{i_1=0}$

- Coefficient de dispersion :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}$$

Chapitre 4 : Transformateur Monophasé

- Grandeur Nominale/Réduite
  - Puissance apparente Nominale : $S_n = V_{1n} I_{1n} = V_{2n} I_{2n}$ [KVA]
  - Tension nominale : Primaire : $V_{1n}[V]$

    Secondaire : $V_{2n}[V]$

    $$m = \frac{V_{2n}}{V_{1n}}$$
  - Courant nominale : Primaire : $I_{1n}[A]$

    Secondaire : $I_{2n}[A]$

    $$m = \frac{I_{1n}}{I_{2n}}$$
  - Fréquence nominale : $f_n[Hz]$
  - Impédance nominale : Primaire : $Z_{1n} = V_{1n}/I_{1n}$

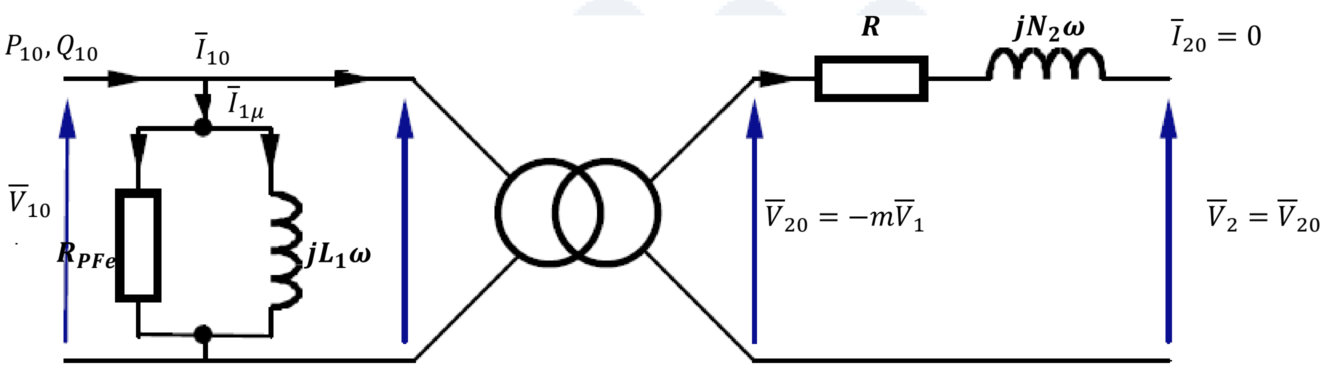
    Secondaire : $Z_{2n} = \frac{V_{2n}}{I_{2n}}$

    $$Z_{2n} = m^2 Z_{1n}$$
- Valeur réduite d'une impédance : Primaire : $z_1 = \frac{Z_1}{Z_{1n}}$ $[pu]$ ou [%]

  Secondaire : $z_2 = \frac{Z_1}{Z_{2n}}$

N.B. : Une impédance réduite a même valeur au primaire et au secondaire.

- Essai à vide directe (Fonctionnement à vide) :1[er] alimenté, 2[e] en couvert



On mesure $V_{10}, V_{20}, P_{10}, I_{10}$:

$P_{10} = V_{10} I_{10} \cos\varphi_{10}$ (Pertes actives)

$\rightarrow P^2 + Q^2 = (VI)^2$

$$m = \frac{M}{L_1} = \frac{V_{20}}{V_{10}}\bigg|_{V_{10}=V_{1\mu}}$$

$S_{10} = V_{10} I_{10}$ (Puissance apparente à vide)

$\cos\varphi_{10} = \frac{P_{10}}{S_{10}}$ (facteur de Puissance)

$(V_2 = V_{20} = mV_{10})$ $(I_{1\mu} = I_{10}$ courant magnétique)

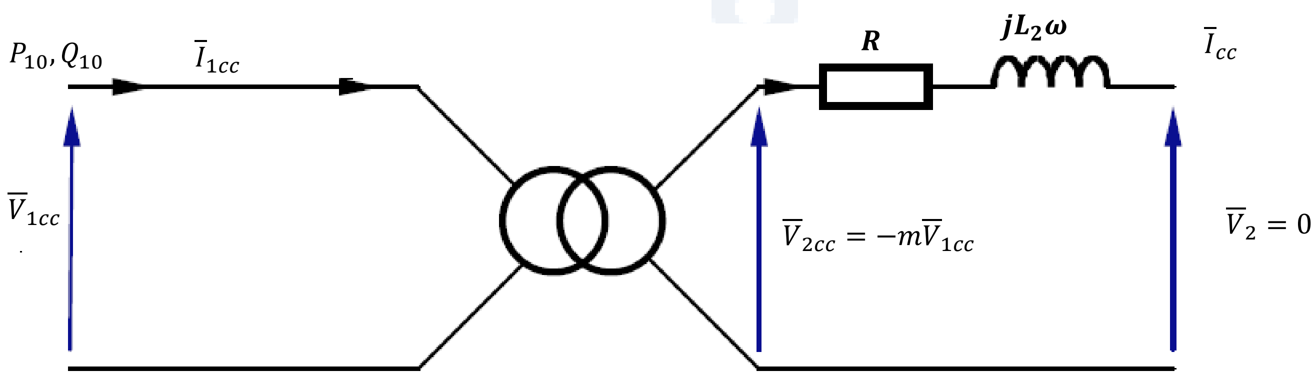
$Q_{10} = V_{10} I_{10} \sin\varphi_{10}$ (Puissance active absorbée)

$$R_{PFe} = \frac{V_{10}^2}{P_{10}} \qquad L_1\omega = \frac{V_{10}^2}{Q_{10}}$$

$$r_{PFe} = \frac{R_{PFe}}{Z_{1n}} \qquad l\omega = \frac{L_1\omega}{Z_{1n}} \qquad r_{PFe} = \frac{S_n V_{10}^2}{Q_{10}V_{1n}} = \frac{S_n}{Q_0}\bigg|_{V_1=V_{1n}}$$

N.B : Déphasage $\bar{V}_{10};\bar{I}_{10} \neq \frac{\pi}{2}\,(R_{PFe})$; $\bar{V}_{10}$ sinusoïdale $\Rightarrow \bar{I}_{10}$ non sinusoïdale (hystérésis, saturation) ; courant enclenchement (Réf. 82)

- Essai en court-circuit directe : 1er alimenté, 2nd en court-circuit



On mesure $V_{1cc}, I_{1cc}, P_{1cc}, I_{2cc}$:

$P_{1cc} = V_{1cc}I_{1cc}\cos\varphi_{cc}$ (Pertes actives, Pertes Joules)

$$R = \frac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2} \qquad N_2\omega = \frac{Q_{1cc}}{I_{2cc}^2}$$

$$r = \frac{R}{Z_{2n}} \qquad n\omega = \frac{N_2\omega}{Z_{2n}}$$

$$r = \frac{P_{1cc}I_{2n}^2}{S_n I_{2cc}^2} \qquad n\omega = \frac{Q_{1cc}I_{2n}^2}{S_n I_{2cc}} = \frac{Q_{1cc}}{S_n}\bigg|_{I_{2cc}=I_{2n}}$$

$(I_{1cc} = mI_{2cc})$

$$Q_{1cc} = V_{1cc}I_{1cc}\sin\varphi_{1cc} = P_{1cc}\tan\varphi_{1cc} = \sqrt{(V_{1cc}I_{1cc})^2 - P_{1cc}^2}$$

$S_{1cc} = V_{1cc}I_{1cc}$ (Puissance apparente)

$\cos\varphi_{1cc} = \frac{P_{1cc}}{S_{1cc}}$ (Facteur de puissance)

- $i_{2cc}^* = \frac{I_{2cc}}{I_{2n}} = \frac{v_{1cc}^*}{U_{cc}}$ avec $v_{1cc}^* = \frac{V_{1cc}}{V_{1n}}$; $u_{cc} = \sqrt{r^2 + (n\omega)^2}$
  - 1er cas : Défaut de court-circuit : $V_1 = V_{1n}$ puis court-circuit :

$$i_{2cc}^* = \frac{v_{1cc}^*}{U_{cc}\sim 5\%(I_{1cc} = I_{1n})} \sim 20\%$$

Courant dangereux : $(I_{2n} \times 20) \Rightarrow$ Effet Joule $\times (20)^2$

- 2e cas : Court-circuit contrôlé : Régler V_{1cc} pour $i_{cc} =^{max} i_{2n}$ $\Rightarrow$ $1 = \frac{v_{1cc}^*}{U_{cc}} \Rightarrow V_{1cc} = U_{cc} \times V_{1n}$

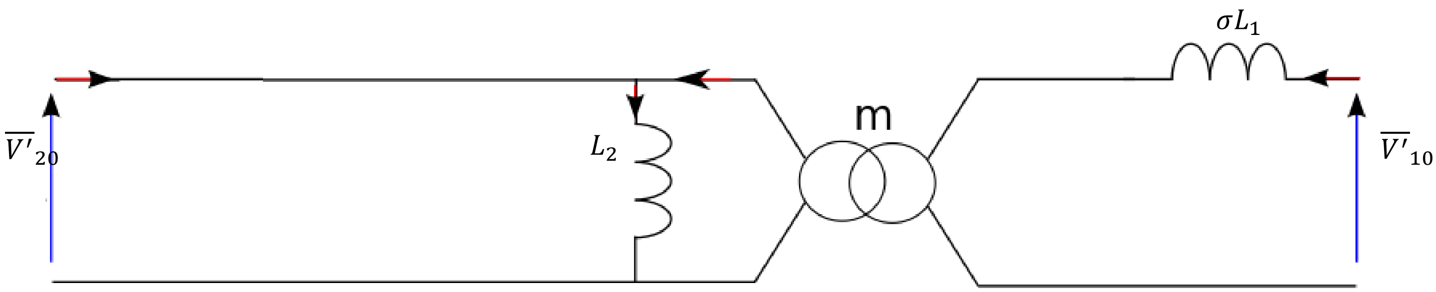
  V_{1cc} : Tension de court-circuit de transformateur

- Fonctionnement en charge :
  - $\Delta V_2 = V_{10} - V_2 = [R\cos\varphi_2 + N_2\omega\sin\varphi_2]I_2$
  - $\Delta v_2 = \frac{\Delta V_2}{V_{2n}} = [r\cos\varphi_2 + n\omega\sin\varphi_2]i_2^*$ $\qquad i_2^* = \frac{I_2}{I_{2n}}$

  $\bar{V}_{20} = \bar{V}_2 + (R + j\omega N_2)\bar{I}_2$

  Projection (avec $\theta \ll$) : $V_{20} = V_2 + [R\cos\varphi_2 + N_2\omega\sin\varphi_2]I_2$

- Essai à vide inverse : 1er en court-circuit, 2nd alimenté (V'_{20})



$$-m = -\frac{L_2}{M} \qquad m' = \frac{M}{L_2} = \frac{V'_{10}}{V'_{20}}\bigg|_{V'_{20}=V_{2n}} \qquad m = \frac{M}{L_1} = \frac{V_{20}}{V_{10}}\bigg|_{V_{10}=V_{1m}} \left(m \neq \frac{1}{m'}\right)$$

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} = 1 - mm'$$

- Ordres de grandeur

  $(r \ll n\omega) \lll (l\omega \ll r_{PFe})$

  - r: $0.05\% \rightarrow (1\% - 3\%)$

    $r = f(S_n) \searrow \qquad r = \frac{RI_{2n}^2}{S_n} = \frac{RI_{2n}^2}{V_{2n}I_{2n}} = \frac{P_{Jn}}{S_n}$
  - $n\omega$: $4\% \rightarrow 13\%$; $n\omega = f(S_n) \nearrow$
  - $l\omega$: $qq\ 1000\% \rightarrow qq\ 10000\%$; $l\omega = f(S_n) \nearrow$
  - r_{PFe} : $qq\ 1000\% \rightarrow qq\ 100000\%$
  - $i_{1\mu}^* = \frac{I_{1\mu}}{I_{1n}}$ $\qquad f(S_n) \searrow$