



مكتبة الطلبة

3^{ème} ST

Electromécanique

Machine électrique

Chapitre 02

Pr: zine bachir

130DA

2019/2018

CH. II. Le Transformateur de puissance

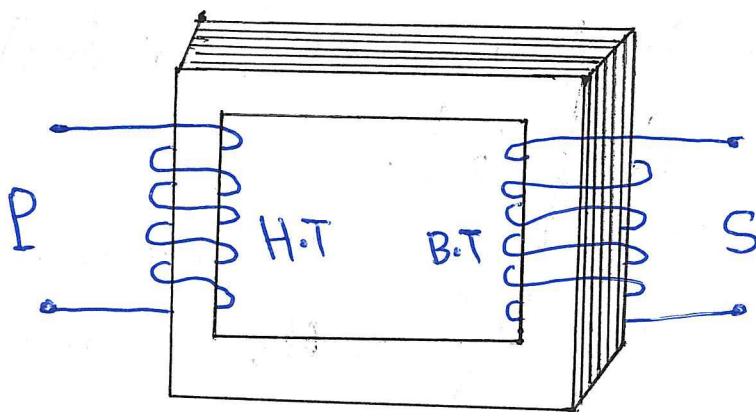
I-1) principe du transformateur :

Le transformateur est une machine électrique statique à courant alternatif qui permet d'obtenir à partir d'une tension et d'un courant alternatifs une autre tension et un autre courant alternatif de même fréquence, mieux adaptés au transport et à la distribution de l'énergie électrique.

Le transformateur de puissance comporte essentiellement deux enroulements =

- * le primaire (inducteur)
- * le secondaire (induit)

qui sont bobinés sur le même circuit magétique fermé, constituée par des toles feuilletées.

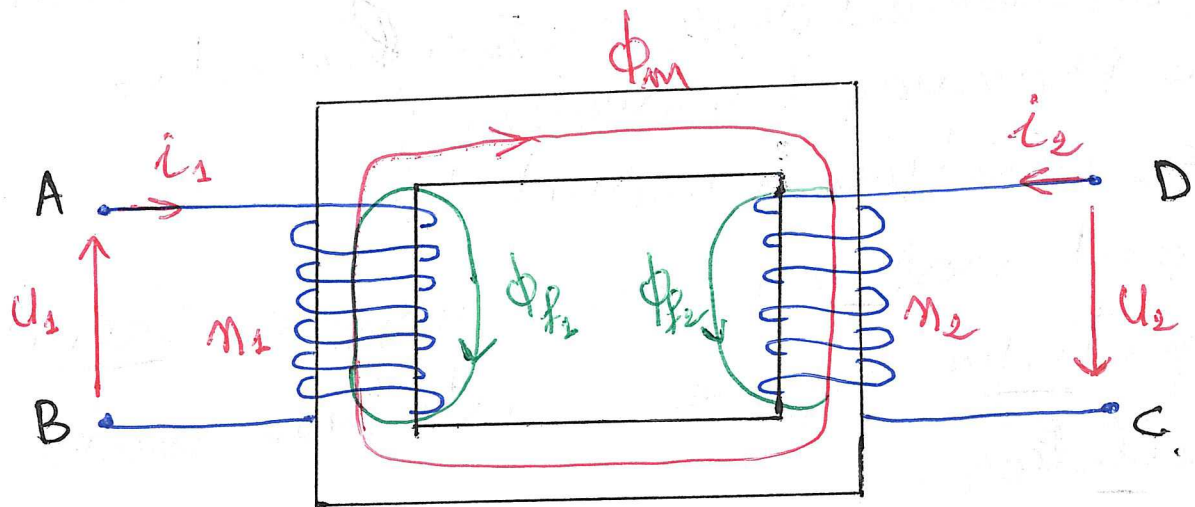


si l'on place une source de tension alternatif aux bornes de l'enroulement primaire, le courant qui circule, crée dans le fer une induction alternative.

L'enroulement de secondaire traversé par un flux alternatif est le siège d'une f.é.m. alternatif qui fait circuler un courant dans le réseau connecté aux bornes de l'enroulement

I-2) Equations du transformateur.

ona le circuit suivant :



- comptons la tension au primaire comme positive si c'est le point A qui est au potentiel plus élevé ($U_1 = \varphi_A - \varphi_B$).
- choisissons le sens positif du courant i_1 de A vers B [i_1 est positif si U_1 est positive].

- choisissons le sens positif du courant i_2 de façon qu' i_1 et i_2 sont positif, il crée dans le fer des inductions de même sens.
- le sens positive de u_2 est choisi en adaptant la convention Générateur au secondaire.
- lorsque les courants i_1 et i_2 circulent dans les enroulements, il existe (\exists) un flux commun (soit ϕ_m : le flux de magnétisation d'une spire). on peut alors écrire:

$$\phi_{T_{f_1}} = n_1 \cdot \phi_{f_1} = l_1 \cdot i_1 \quad [l_1: \text{l'inductance de fuite du primaire}]$$

démonstration:

ou Théorème d'Ampère

$$\boxed{H \cdot l = n \cdot i} \quad (1)$$

$$B = \mu_0 \mu_r \cdot H$$

$$B = \frac{\phi}{S}$$

$$\Rightarrow H = \frac{\phi}{S \cdot \mu_0 \mu_r} \Rightarrow \boxed{H \cdot l = \frac{l}{S \cdot \mu_0 \mu_r} \cdot \phi} \quad (2)$$

$$(1) = (2) \Rightarrow \frac{l}{S \cdot \mu_0 \mu_r} \cdot \phi = n \cdot i \Rightarrow \phi = \frac{n \cdot \mu_0 \mu_r \cdot S}{l} \cdot i$$

$$\Rightarrow n \cdot \phi = \frac{n^2 \cdot \mu_0 \mu_r \cdot S}{l} \cdot i \quad (3)$$

$$\Rightarrow \boxed{m \cdot \phi = L \cdot i}$$

tel que : L : l'inductance de bobine.

$$\phi_{Tf_2} = m_2 \cdot \phi_{f_2} = l_2 \cdot i_2 \quad / \quad l_2 = \text{l'inductance de fuite de l'enroulement } \textcircled{2} \text{ (secondaire)}$$

l_1 et l_2 sont constantes.

- le flux total à travers l'enroulement primaire est =

$$\boxed{\phi_1 = m_2 \cdot \phi_m + l_1 \cdot i_1}$$

- le flux total à travers l'enroulement secondaire est =

$$\boxed{\phi_2 = m_2 \cdot \phi_m + l_2 \cdot i_2}$$

- si r_1 et r_2 sont les résistances des enroulements $\textcircled{1}$ et $\textcircled{2}$ on peut écrire :

$$U_{AB} = V_1 = V_A - V_B = r_1 \cdot i_1 + \frac{d\phi_1}{dt} = r_1 \cdot i_1 + (m_2 \cdot \phi_m + l_1 \cdot i_1) \\ = r_1 \cdot i_1 + l_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + m_2 \cdot \frac{d\phi_m}{dt}$$

$$V_{DC} = V_D - V_C = r_2 \cdot i_2 + l_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + m_2 \cdot \frac{d\phi_m}{dt}$$

ona la loi du circuit magnétique d'un Reluctance R (Phénomène d'Ampère).

$$M_1 \cdot i_1 + M_2 \cdot i_2 = R \cdot \phi_m$$

pour avoir une tension secondaire positive lorsqu'il circule un courant i_2 positif dans le circuit extérieure, on pose:

$$V_c - V_D = V_2$$

on a alors le système d'équation:

$$\begin{cases} V_1 = M_1 \cdot \frac{d\phi_m}{dt} + r_1 \cdot i_1 + l_1 \cdot \frac{di_1}{dt} \\ V_2 = -M_2 \cdot \frac{d\phi_m}{dt} - r_2 \cdot i_2 - l_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \end{cases}$$

$$M_1 \cdot i_1 + M_2 \cdot i_2 = R \cdot \phi_m$$

on fait souvent apparaître la f.c.è.m, et la f.c.è.m

$$e_2 = -M_2 \cdot \frac{d\phi_m}{dt}$$

$$e_1 = M_1 \cdot \frac{d\phi_m}{dt}$$

Par le flux commun ϕ_m le système devient:

$$V_1 = e_1 + r_1 \cdot i_1 + l_1 \cdot \frac{di_1}{dt}$$

$$V_2 = e_2 - r_2 \cdot i_2 - l_2 \cdot \frac{di_2}{dt}$$

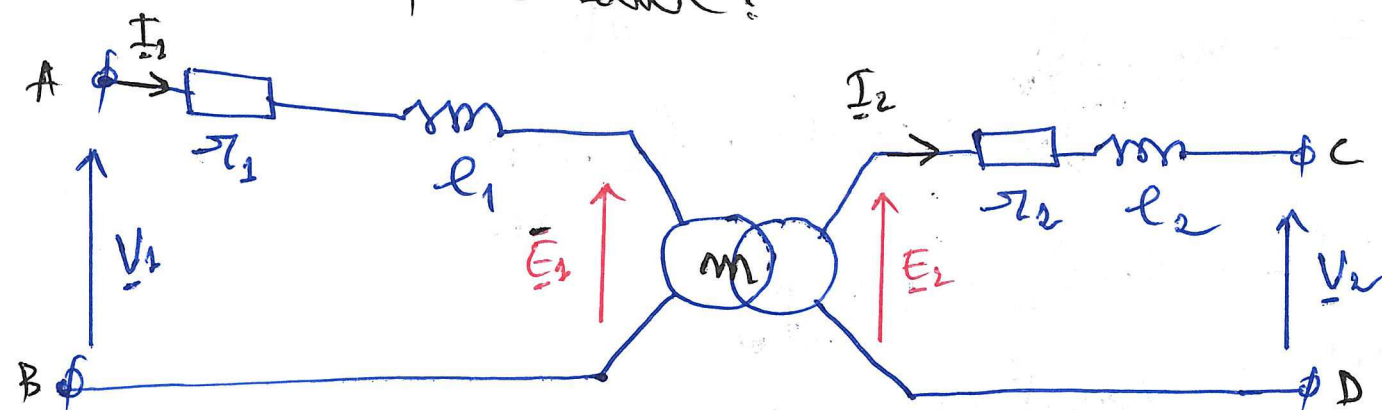
$$-M_1 \cdot i_1 + M_2 \cdot i_2 = R \cdot \phi_m$$

les f.é.m e_1 et e_2 s'appellent f.é.m de transformateur, leur rapport $\left(\frac{e_2}{e_1} = \frac{N_2 \cdot \frac{d\phi_m}{dt}}{N_1 \cdot \frac{d\phi_m}{dt}} \right)$ est égal au rapport des nombres de spires des deux enroulement du transformateur.

$$m = \frac{N_2}{N_1}$$

I-3) transformateur parfait :

Schemas équivalent :



$$\underline{V}_1 = \underline{E}_1' \quad \frac{\underline{E}_2}{\underline{E}_1} = m$$

$$\underline{V}_2 = \underline{E}_2' \quad \frac{\underline{E}_2}{\underline{E}_1} = m$$

$$\underline{E}_1 = j\omega N_1 \cdot \underline{\phi}_m$$

$$\underline{E}_2 = -j\omega \cdot N_2 \cdot \underline{\phi}_m$$

$$\begin{cases} \underline{V}_1 = r_1 \cdot \underline{I}_1 + j\omega l_1 \cdot \underline{I}_1 + jN_1 \cdot \omega \underline{\phi}_m \\ \underline{V}_2 = r_2 \cdot \underline{I}_2 + j\omega l_2 \cdot \underline{I}_2 + jN_2 \cdot \omega \underline{\phi}_m \\ N_1 \cdot \underline{I}_1 + N_2 \cdot \underline{I}_2 = R_c \cdot \underline{\phi}_m \end{cases}$$

(6)

$\underline{Z}_1 = r_1 + j l_1 \cdot \omega$ = impédance de fuites primaires

$\underline{Z}_2 = r_2 + j l_2 \cdot \omega$ = impédance de fuites secondaires

- En pratique l'impédance de fuites est très faible de sorte que $\underline{E}_1' \approx \underline{V}_1 \approx M_2 \omega \cdot \underline{\phi}_m$

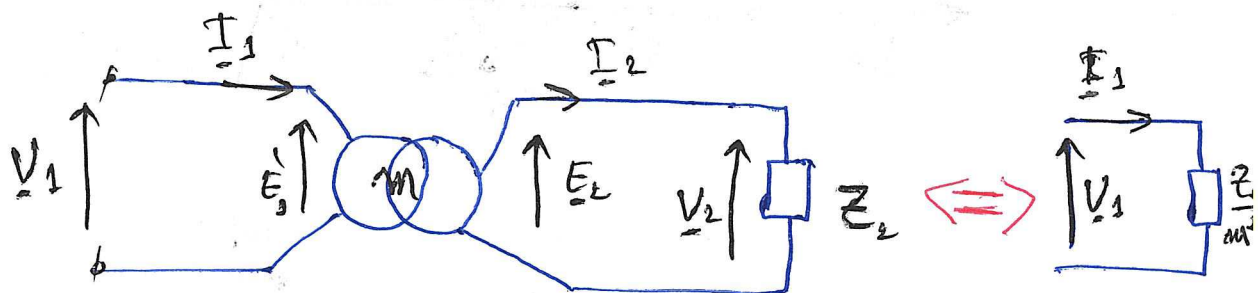
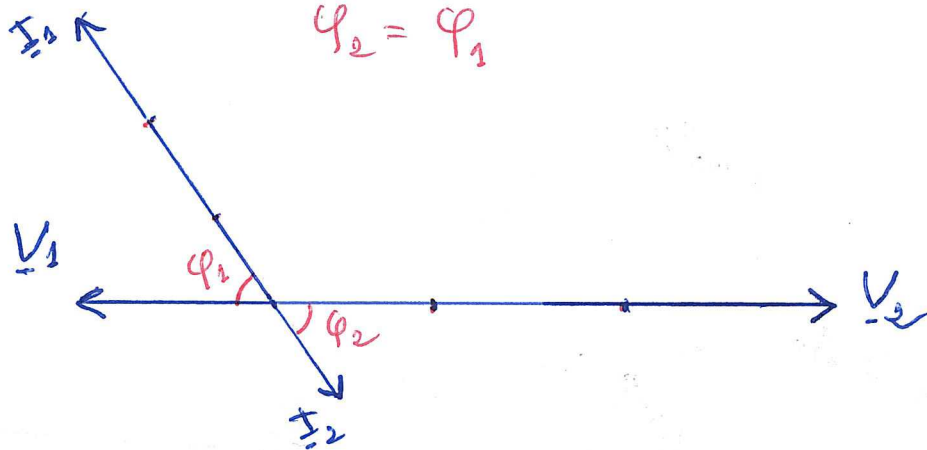
$$\Rightarrow \underline{\phi}_m \approx \frac{\underline{V}_1}{M_1 \cdot \omega}$$

$$\frac{\underline{V}_2}{\underline{V}_1} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2} = \frac{M_2}{M_1} = m.$$

Diagramme Vectorielle d'un transformateur parfait

$$m = 3$$

$$\varphi_2 = \varphi_1$$



$$\underline{I}_1 = -m \cdot \underline{I}_2 = -m \cdot \frac{\underline{V}_2}{\underline{Z}_2}$$

$$\underline{V}_1 = \underline{E}_1' = -\frac{\underline{V}_2}{m} = -\frac{\underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_2}{m} = -\frac{\underline{Z}_2}{m} \left(-\frac{\underline{I}_1}{m} \right) = \frac{\underline{Z}_2}{m^2} \cdot \underline{I}_1$$

(7)

$$\underline{V}_1 = \frac{t_2}{n_2} \cdot \underline{I}_1$$

I-4) Diagramme complet du transformateur

$$\underline{V}_1 = -r_1 \cdot \underline{I}_1 + j\ell_1 \cdot \omega \cdot \underline{I}_1 + \underline{E}_1 \quad \text{--- (1)}$$

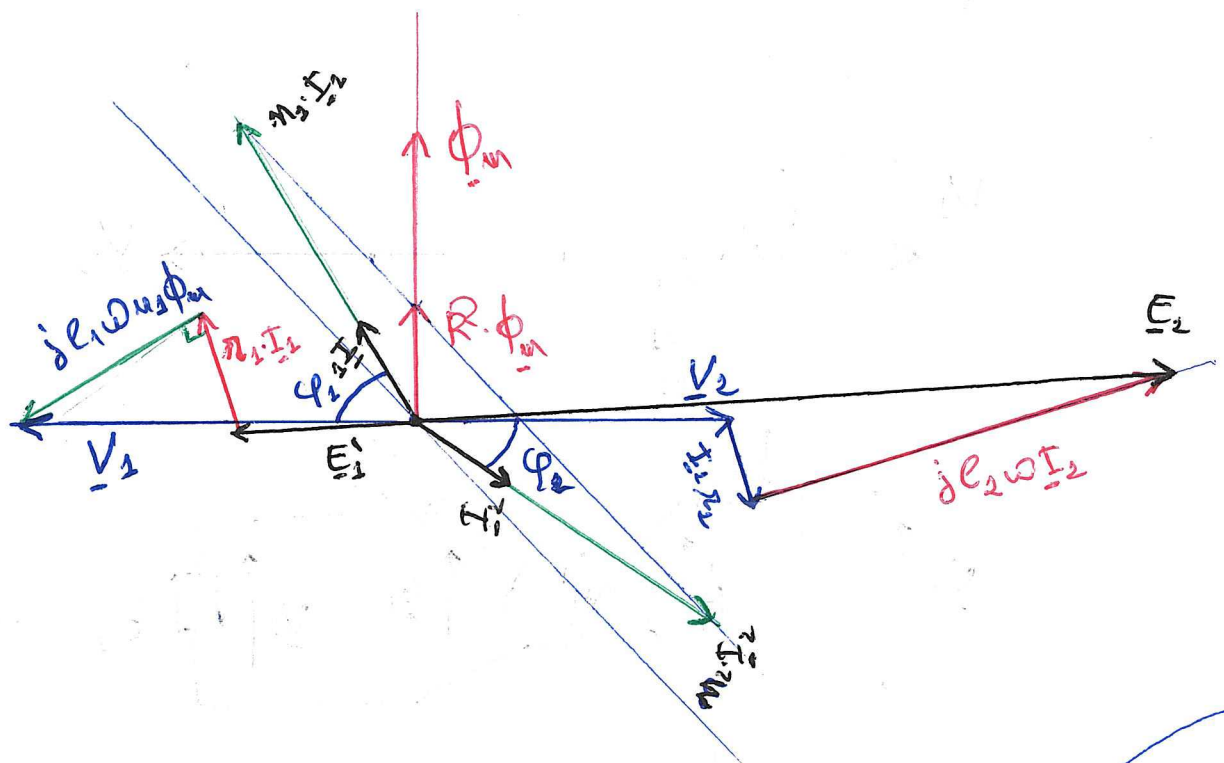
$$\underline{V}_2 = -r_2 \cdot \underline{I}_2 - j\ell_2 \cdot \omega \cdot \underline{I}_2 + \underline{E}_2 \quad \text{--- (2)}$$

$$n_1 \cdot \underline{I}_1 + n_2 \cdot \underline{I}_2 = R \cdot \phi_m \quad \text{--- (3)}$$

$$\underline{E}_1 = j\omega \cdot n_1 \cdot \phi_m \quad \text{--- (4)}$$

$$\underline{E}_2 = -j\omega n_2 \cdot \phi_m \quad \text{--- (5)}$$

$$\phi_m = j \cdot \frac{\underline{E}_2}{n_2 \cdot \omega} \quad \text{--- (6)}$$



I-5) - circuit équivalent ramené au primaire.

Il est très utile dans l'étude d'un transformateur de le remplacer par un circuit électrique équivalent. Un tel circuit sera dit "référé" ou "ramené" à un des côtés du transformateur parce que les tensions à ses bornes ne représente plus directement les tensions aux bornes du transformateur. Pour obtenir un tel circuit, choisissons par exemple de ramener le transformateur à son primaire indice (1), et considérons la fig. 5

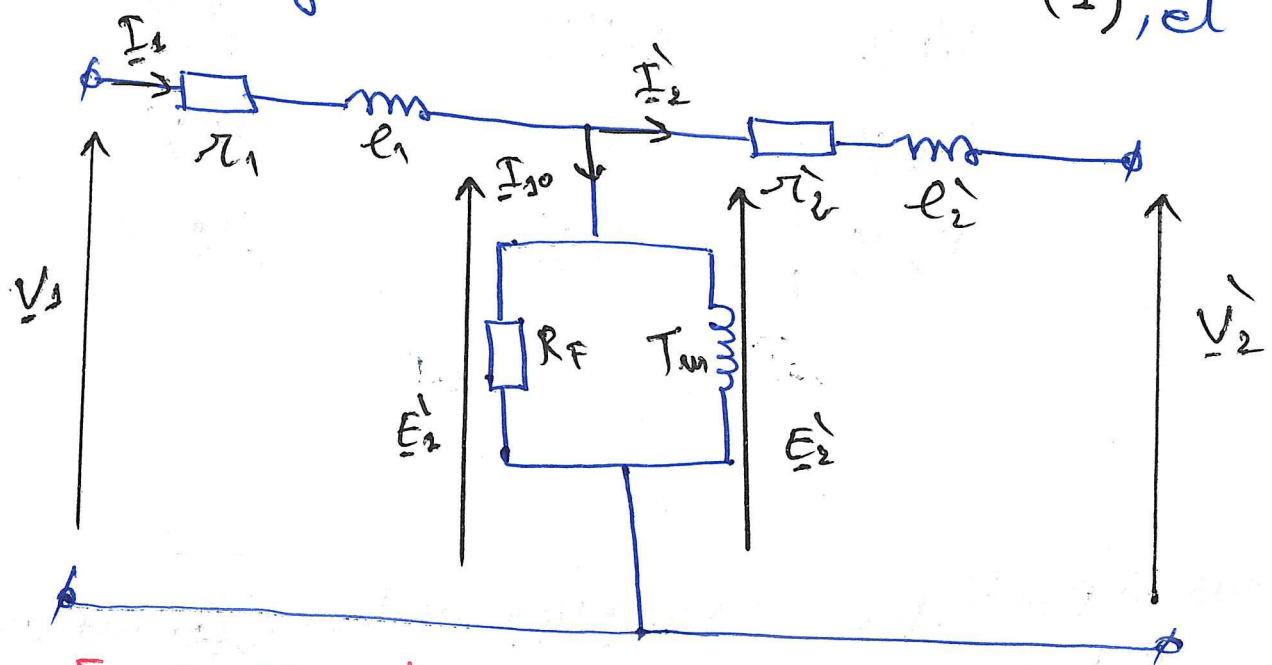


Fig. 5. circuit équivalent ramené au primaire

$$\begin{cases} I_2' = -m \cdot I_2 & E_2' = -\frac{E_2}{m} \\ V_2' = \frac{V_2}{m} \\ r_2' = \frac{r_2}{m^2} & E_1' = E_2' \\ l_2' = \frac{l_2}{m^2} \end{cases}$$

- Pratiquement, les valeurs des chutes de tension "active" et "réactive" et du courant de magnétisation sont assez faibles, et dépendent beaucoup de la puissance nominale du transformateur, habituellement on exprime les chutes de tension en pourcentage de la tension nominale, et le courant de magnétisation en pourcentage du courant nominal.

Le tableau suivant donne quelques ordre de grandeurs numériques:

	grand-tranfo ($S > 1 \text{ MVA}$)	petites-tranfo ($1 \text{ kVA} < S < 50 \text{ kVA}$)
$V_R \%$	0,5%	2%
$V_X \%$	8%	4%
$I_m \%$	4%	12%

I-6) Etude simplifiée, en négligeant le courant de Magnétisation, Diagramme de Kapp.

Dans la pratique les noyaux de transformateurs sont constitués de plaques d'acier au silicium à grains orientés, dont la réluctance est très faible (μ_r : très grande).

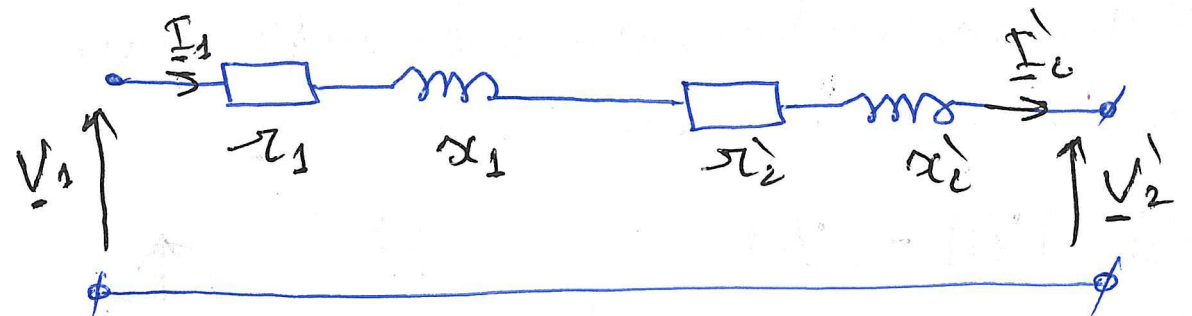
cela signifie que le courant de magnétisation I_m

est également très faible.

$$M_1 \cdot \dot{i}_m = R \cdot \phi_m \Rightarrow \dot{i}_m = \frac{R \cdot \phi_m}{M_1} = \text{faible.}$$

on peut alors faire une étude abrégée en négligeant \dot{i}_m , mais sans négliger les fuites internes dues aux bobines elles-mêmes. (résistance et inductance de fuite).

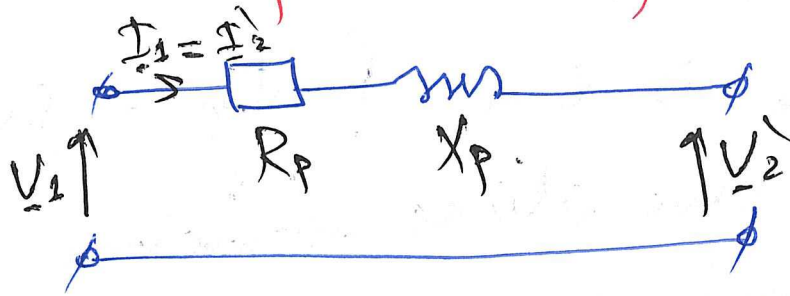
I-6-1) Circuit simplifié et Diagramme de Kapp.
 $I_m \approx 0 \Rightarrow$ branche parallèle d'impédance infinie d'où le circuit simplifié.



$x_1 = l_1 \cdot \omega$: réactance de fuite de l'enroulement primaire.

$r_2' = \frac{r_2}{M^2}$, $x_2' = \frac{l_2 \cdot \omega}{M^2}$, résistance et réactance de fuite de l'enroulement secondaire ramené au primaire.

Schéma équivalent final :



- circuit électrique équivalent simplifié ramené au primaire.

$$R_p = r_1 + r_2' = r_1 + \frac{r_2}{M^2}$$

$$X_p = x_1 + x_2' = l_1 \cdot \omega + \frac{l_2 \cdot \omega}{M^2}$$

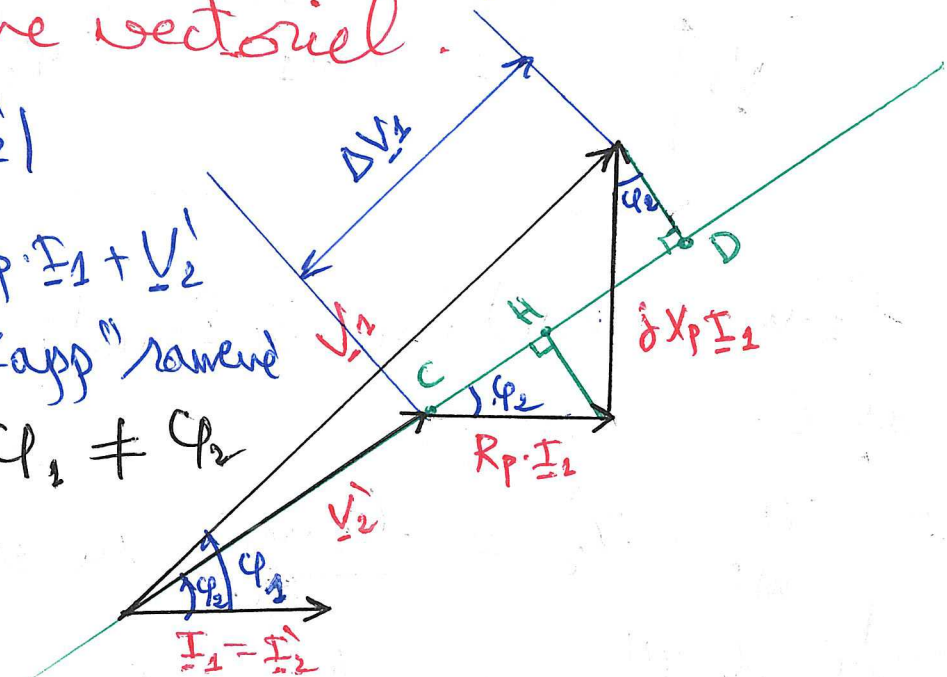
R_p et X_p sont la résistance et la réactance équivalentes raménées au primaire.

- Diagramme vectoriel.

$$\Delta V_1 = |V_1| - |V_2'|$$

$$V_1 = R_p \cdot I_1 + j X_p \cdot I_1 + V_2'$$

Diagramme de Kapp "ramené au primaire" $\varphi_1 \neq \varphi_2$



I-6-2) chute de tension de résistance et chute de tension de réactance.

* chute de tension de résistance :

$$V_{R_1} = R_p \cdot I_1$$

* chute de tension et réactance.

$$V_{X_1} = X_p \cdot I_1$$

- Comme ces valeurs dépendent du côté ou quel on a ramené le transformateur, on préfère les définir en % de la valeur nominale de tension correspondante (elles seront alors égales des deux côtés).

$$V_R \% = 100 \cdot \frac{R_p \cdot I_1}{V_1}$$

$$V_X \% = 100 \cdot \frac{X_p \cdot I_1}{V_1}$$

I. 6-3) Régulation de tension

La chute de tension totale :

$$\Delta V_1 = |V_1| - |V_2| = |V_1| - \left| \frac{V_2}{m} \right|$$

$$\Delta V_1 = |V_1| - |V_2| = CD = CH + HD$$

ona donc :

$$\Delta V_1 = CH + HD = R_p \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_2 + X_p \cdot I_1 \cdot \cos(90^\circ - \varphi_2)$$

$$\Delta V_1 = R_p \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_2 + X_p \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_2$$

- De la même façon que pour les chutes de tension résistive et réactive, on préfère définir cette

chute de tension totale de façon relative en % de la tension correspondante, on l'appelle lors la régulation de tension

$$R.T\% = 100 \cdot \frac{\Delta V}{V}$$

- si le circuit est ramené au primaire, V_1 : réfère

donc

$$R.T\% = 100 \cdot \frac{V_1 - \frac{V_2}{m}}{V_1}$$

si le circuit est ramené au secondaire :

$$R.T\% = 100 \cdot \frac{m \cdot V_2 - V_2}{m \cdot V_1}$$

I-7) Détermination des paramètres par des essais:

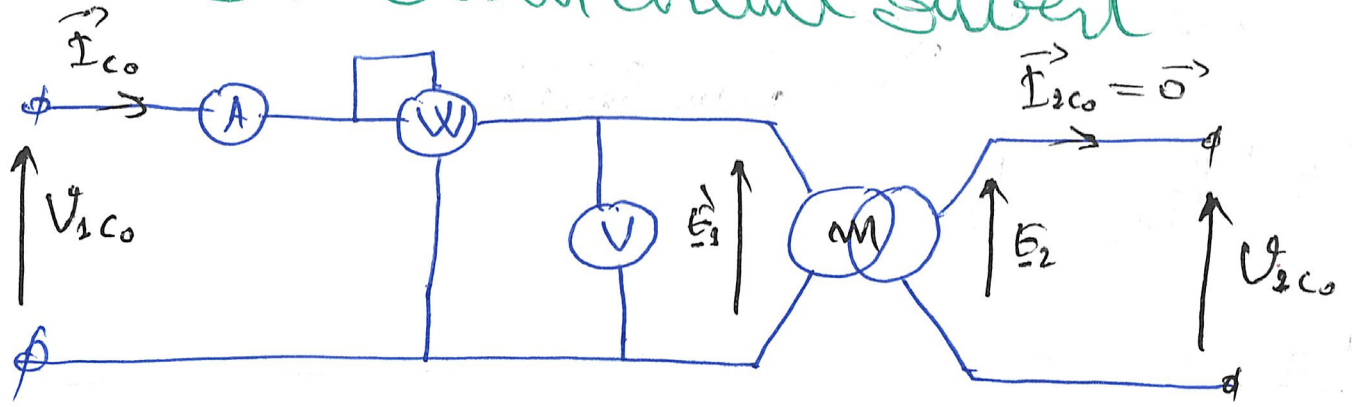
Lorsqu'on ne dispose pas des données de fabrication on peut déterminer les paramètres et les différentes pertes qui interviennent dans un transformateur au moyen d'essai:

- Méthode Volt - Ampère. métrique.

car $R = \frac{V}{I}$, donc on a besoin d'un (V) et (A) pour mesurer les résistances

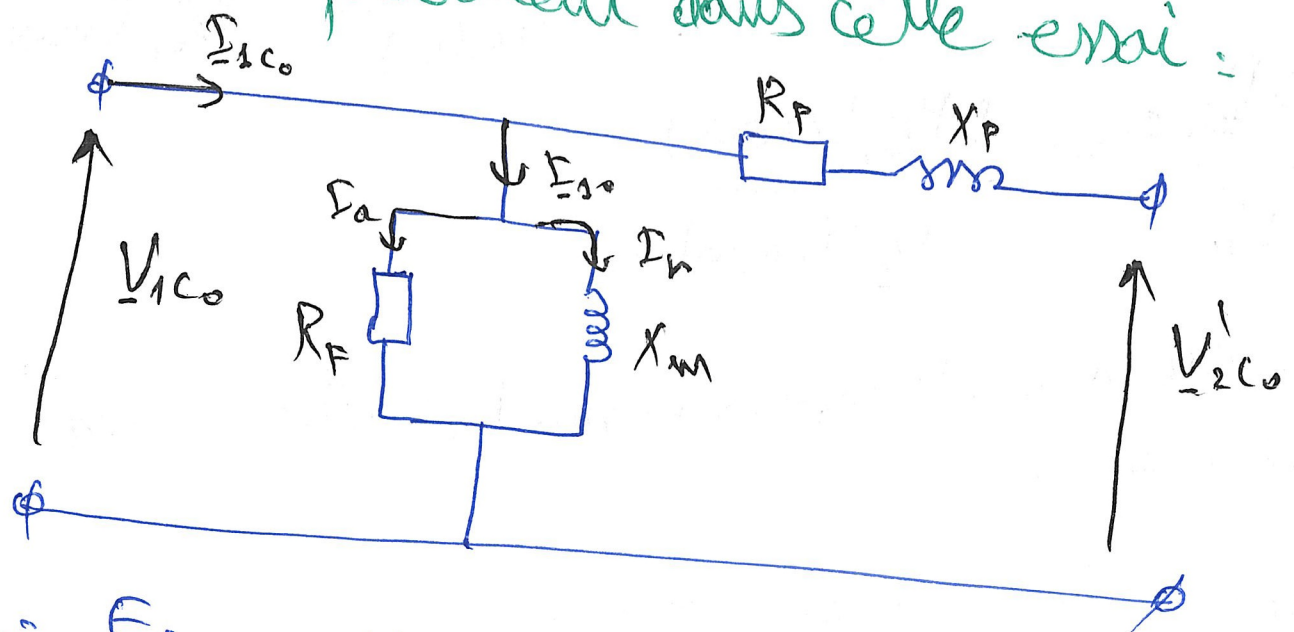
des enroulements.

- essai à vide ou en circuit ouvert



- on applique : V_{1c0} , et on mesure $\left\{ \begin{array}{l} I_{1c0} \\ P_{1c0} \\ \underline{V}_{2c0} \end{array} \right.$

- schéma équivalent dans cette essai :



ona : $\frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1}$, pour l'essai à vide :

$E_2 = V_{2c0}, E_1 \approx V_{1c0} \Rightarrow \boxed{M = \frac{V_{2c0}}{V_{1c0}}}$

- l'essai à vide permet de déterminer le rapport de transformation.

$P_{c0} = \underbrace{\Delta P_{\text{no}}}_{\text{faible}} + \Delta P_{\text{fer}} \}$ réellement

$$\Delta P_{\delta 10} = r_1 (I_{1c0})^2 \approx 0$$

↳ plus faible

$$\Rightarrow \Delta P_{\text{fer}} = P_{1c0}$$

Rq

$$\Delta P_{\text{fer}} \approx B_{\text{max}}^2 \approx V_1^2$$

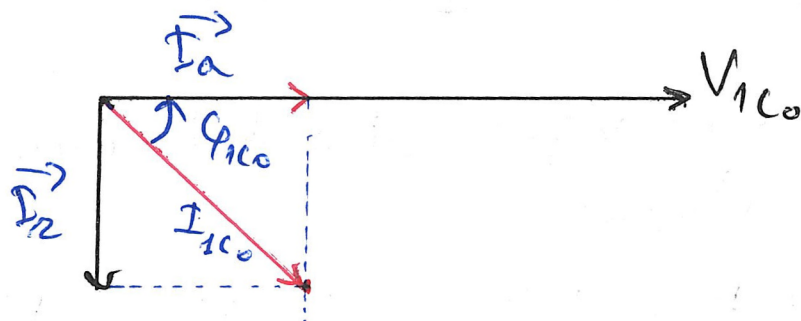
si l'essai à vide est réalisé avec la tension nominale au primaire $\Delta P_{\text{fer}(c0)} = \Delta P_{\text{fer}}(\text{nominale})$

$$\frac{\Delta P_{\text{fer}(c0)}}{V_{10}^2} = \frac{\Delta P_{\text{fer}}(\text{nom})}{V_1^2(\text{nom})}$$

- l'essai à vide nous permet de déterminer les pertes fer.

$$P_{1c0} = V_{1c0} \cdot I_{1c0} \cdot \cos \varphi_{1c0}$$

$$\Rightarrow \cos \varphi_{1c0} = \frac{P_{1c0}}{V_{1c0} \cdot I_{1c0}}$$



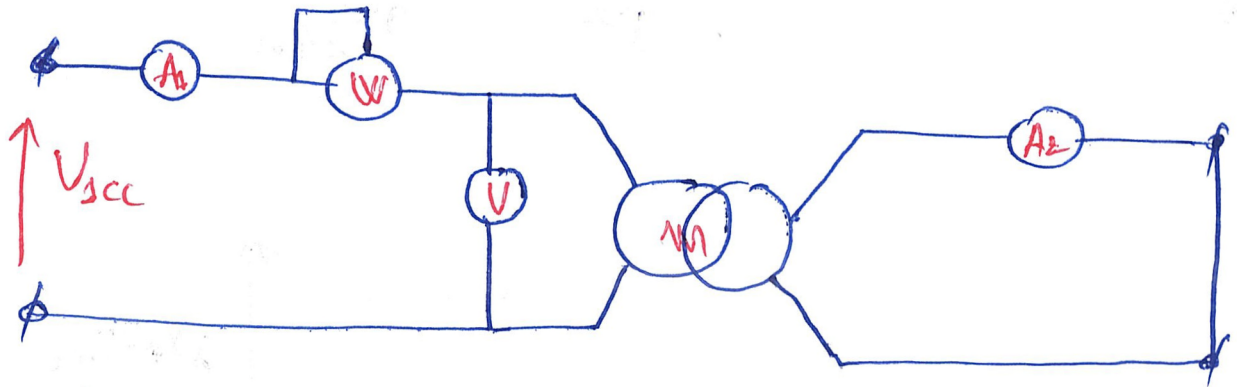
$$\begin{cases} I_a = I_{1c0} \cdot \cos \varphi_{1c0} \\ I_2 = I_{1c0} \cdot \sin \varphi_{1c0} \end{cases}$$

$$U_{RF} = R_F \cdot I_a = V_{1c0} \Rightarrow R_F = \frac{V_{1c0}}{I_a} = \frac{V_{1c0}^2}{P_{1c0}}$$

$$U_{Xm} = X_m \cdot I_2 = V_{2c0} \Rightarrow X_m = \frac{V_{2c0}}{I_2}$$

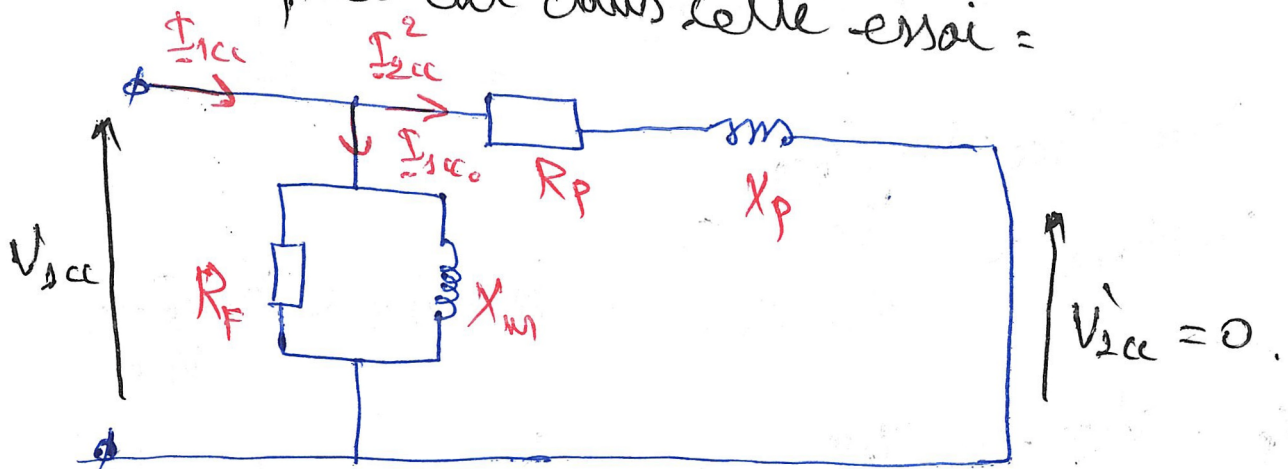
* Essai en court-circuit:

- Schéma de l'essai



V_{scc} : doit être faible (5% de V_{snom})
 on mesure $\left\{ \begin{array}{l} V_{scc}, P_{scc}, I_{scc} \\ I_{2cc} \end{array} \right\}$

- Schéma équivalent dans cette essai =



Pratiquement $I_{1cc} \approx 0$

I_{scc0} : le courant qui circule dans la branche parallèle

- dans l'espace en court-circuit

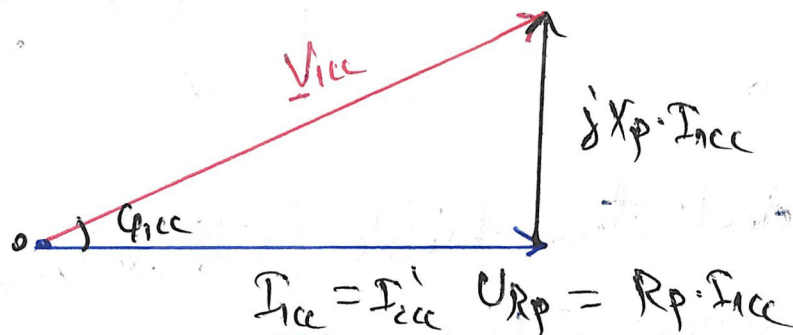
$$I_{1cc} = I_{2cc} = -m \cdot I_{2cc}$$

en module \Rightarrow $m = \frac{I_{1cc}}{I_{2cc}}$

$$P_{1cc} = \Delta P_{\delta}$$

$$\Delta P_{\delta} \sim I^2$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta P_{\delta}}{I^2} = \frac{\Delta P_{\delta \text{ non}}}{I_{\text{non}}^2}$$



$$P_{1cc} = \Delta P_{\delta} = R_p \cdot I_{cc}^2$$

$$\Rightarrow R_p = \frac{P_{1cc}}{I_{cc}^2}$$

$$R_p = r_1 + r_2'$$

$$r_1 = r_2' = \frac{R_p}{2} = \frac{r_c}{m^2}$$

$$P_{1cc} = V_{cc} \cdot I_{cc} \cdot \cos \phi_{cc}$$

$$\Rightarrow \cos \phi_{cc} = \frac{P_{1cc}}{V_{cc} \cdot I_{cc}}$$

$$\sin \phi_{cc} = \frac{X_p \cdot I_{cc}}{V_{cc}}$$

$$\Rightarrow X_p = \frac{V_{cc} \cdot \sin \phi_{cc}}{I_{cc}} = x_1 + x_2'$$

$$x_1 = x_2' = \frac{X_p}{2}$$

I-8) Etude énergétique du transformateur monophasé.

En tenant compte que

$$\underline{E}_2 = -M \cdot \underline{E}_1' = -\frac{M_2}{M_1} \cdot \underline{E}_1'$$

on peut écrire les équations:

$$\begin{cases} \underline{V}_1 = \underline{E}_1' + r_1 \cdot \underline{I}_1 + j l_1 \omega \cdot \underline{I}_1 \\ \underline{V}_2 = -M \cdot \underline{E}_1' - r_2 \cdot \underline{I}_2 - j l_2 \omega \cdot \underline{I}_2 \\ \underline{V}_2 = -\frac{M_2}{M_1} \cdot \underline{E}_1' - r_2 \cdot \underline{I}_2 - j l_2 \omega \cdot \underline{I}_2 \\ \underline{I}_1 + \frac{M_2}{M_1} \cdot \underline{I}_2 = \underline{I}_{10} \end{cases}$$

- Calculons les puissances complexes:

$$\underline{V}_1 \cdot \underline{I}_1^* = \underline{E}_1' \cdot \underline{I}_1^* + r_1 \cdot \underline{I}_1^2 + j l_1 \omega \cdot \underline{I}_1^2$$

$$\underline{V}_2 \cdot \underline{I}_2^* = -\frac{M_2}{M_1} \cdot \underline{E}_1' \cdot \underline{I}_2^* - r_2 \cdot \underline{I}_2^2 - j l_2 \omega \cdot \underline{I}_2^2$$

En retranchant les deux équations et en tenant

compte que $\underline{I}_1^* + \frac{M_2}{M_1} \cdot \underline{I}_2^* = \underline{I}_{10}^*$

on a:

$$\begin{aligned} \underline{V}_1 \cdot \underline{I}_1^* - \underline{V}_2 \cdot \underline{I}_2^* &= \underline{E}_1' \left(\underline{I}_1^* + \frac{M_2}{M_1} \cdot \underline{I}_2^* \right) + r_1 \cdot \underline{I}_1^2 + r_2 \cdot \underline{I}_2^2 \\ &+ j (l_1 \omega \cdot \underline{I}_1^2 + l_2 \omega \cdot \underline{I}_2^2) \end{aligned}$$

en partie à magnétiser le circuit

$$(E_2 \cdot I_{10} \cos \delta \neq E_1 \cdot I_{10})$$

- Le terme $E_2 \cdot I_{10}$ est encore appelé puissance magnétisante et le courant I_{10} : courant magnétisant

$$r_1 \cdot I_1^2 + r_2 \cdot I_2^2 = \text{Pertes Joule (Variable)}$$

$$E_2 \cdot I_{10} \cos \delta = \text{Pertes fer (constante)}$$

- Rendement des transformateurs.

$$\eta_{\text{industrielle}} = \eta_i = \frac{P_2}{P_2 + \sum \Delta P} = \frac{P_2 - \sum \Delta P}{P_1}$$

$$\eta_i = \frac{P_2}{P_2 + \sum \Delta P} = \frac{V_2 \cdot I_2 \cos \phi_2}{V_2 \cdot I_2 \cos \phi_2 + r_1 \cdot I_1^2 + r_2 \cdot I_2^2 + \Delta P_{\text{fer}}}$$

en tenant compte que pratiquement

$$I_1^2 \approx m^2 \cdot I_2^2, \text{ on a } =$$

$$\eta = \frac{V_2 \cdot \cos \phi_2}{V_2 \cdot \cos \phi_2 + (m^2 r_1 + r_2) I_2 + \frac{\Delta P_{\text{fer}}}{I_2}}$$

Rq1

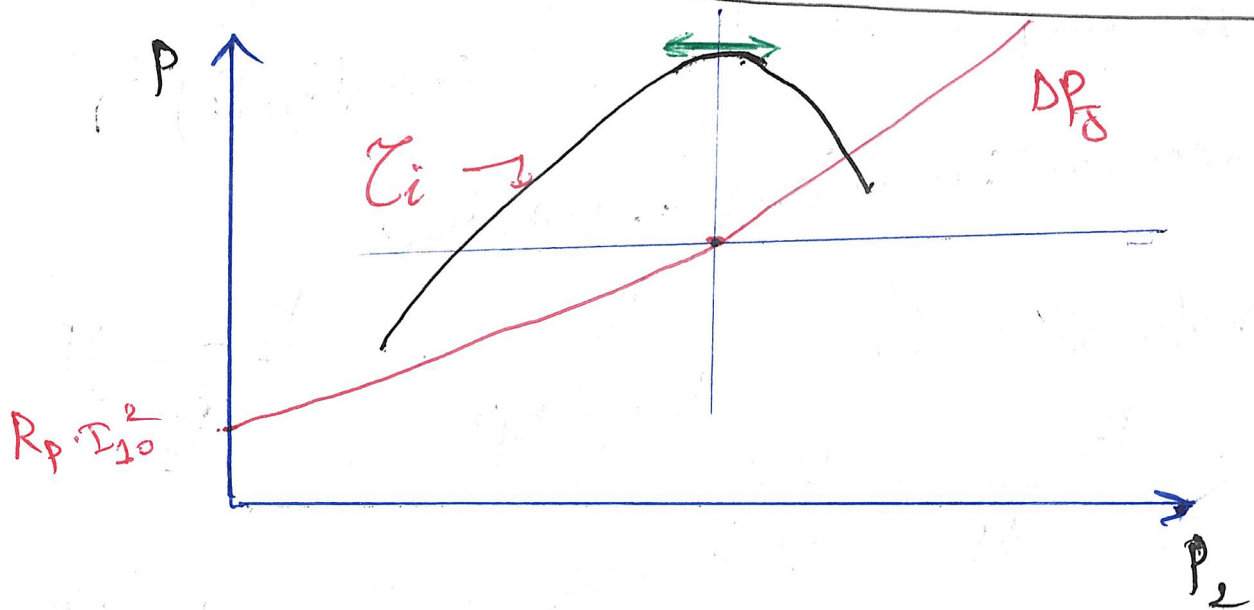
La somme des deux termes $(m^2 r_1 + r_2) I_2$ et $\frac{\Delta P_{\text{fer}}}{I_2}$ dont le produit est constant est minimum $\overline{I_2}$ lorsque ces deux termes sont égaux (Théorème)

Rq2

Le rendement maximum correspond à l'égalité des pertes dans le fer et dans le cuivre.

$$(M^2 R_1 + r_2) \cdot I_2 = R_s \cdot I_2 = \Delta P_{\text{fer}}$$

$$\Leftrightarrow R_s \cdot I_2^2 = \Delta P_{\text{fer}} \Rightarrow \zeta \rightarrow \text{est maximal.}$$



II-) Transformateurs triphasés:

- dans une installation triphasée, on peut utiliser soit trois transformateurs monophasés, soit un transformateur triphasé.

- La première solution est couramment employée pour les transformateurs de fortes puissances

($S > 40\,000\text{ kVA}$), pour de tensions très élevées (220 kV et plus). La fabrication et le transport sont plus aisés (facile) et pour le groupe il suffit d'un seul appareil de réserve en secours.

- La deuxième solution est moins coûteuse ?
puisque les enroulements sont montés sur un circuit magnétique unique.

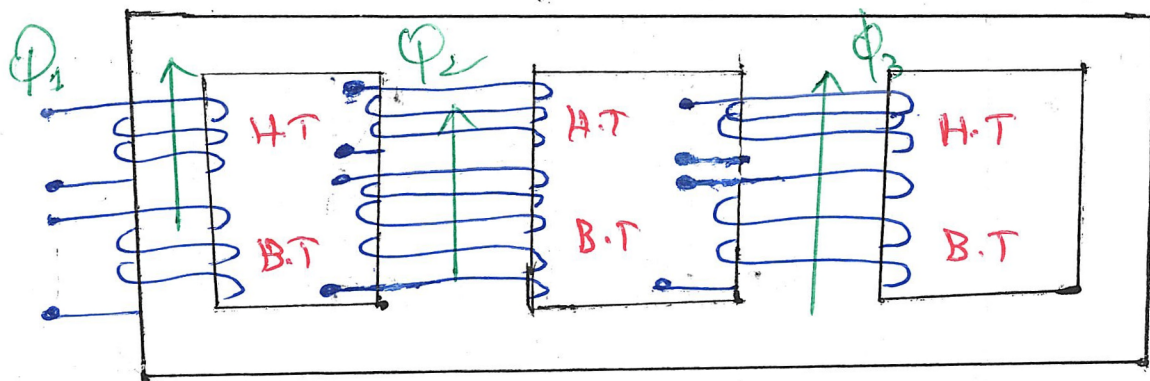


Fig. II. 1.

avec la disposition de la figure II.2 - les enroulements triphasés créent des flux Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 triphasés. et flux dans le quatrième noyau et $(\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3)$ qui est nul pour un système équilibré.

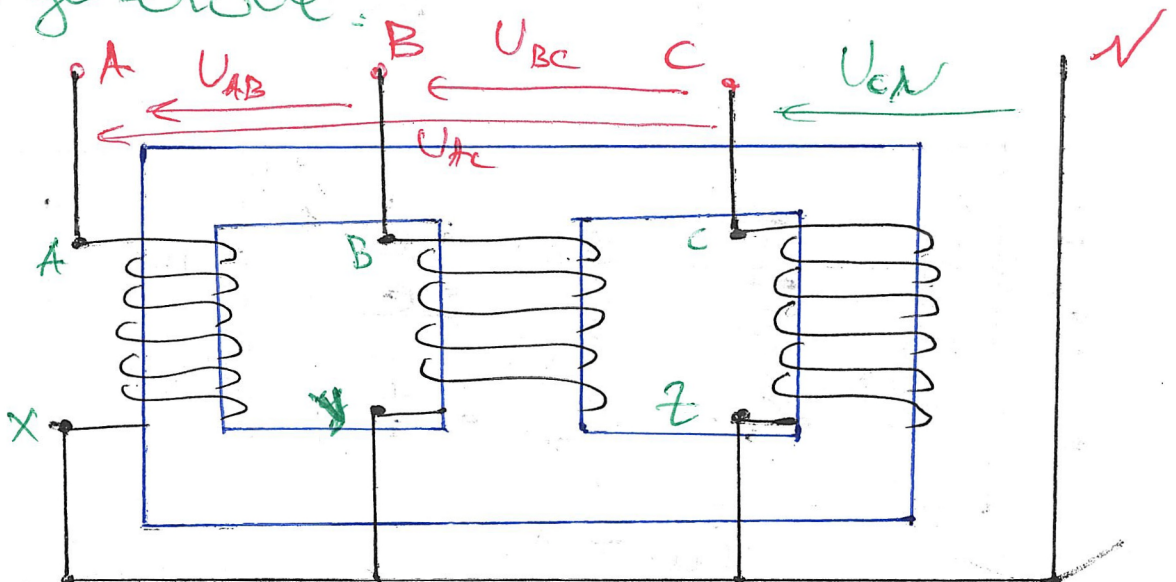
on peut donc se connecter de 03 manières pour les systèmes équilibrés.

- Couplage des enroulements:

les enroulements primaires et secondaires d'un transformateur triphasé peuvent être connectés en:

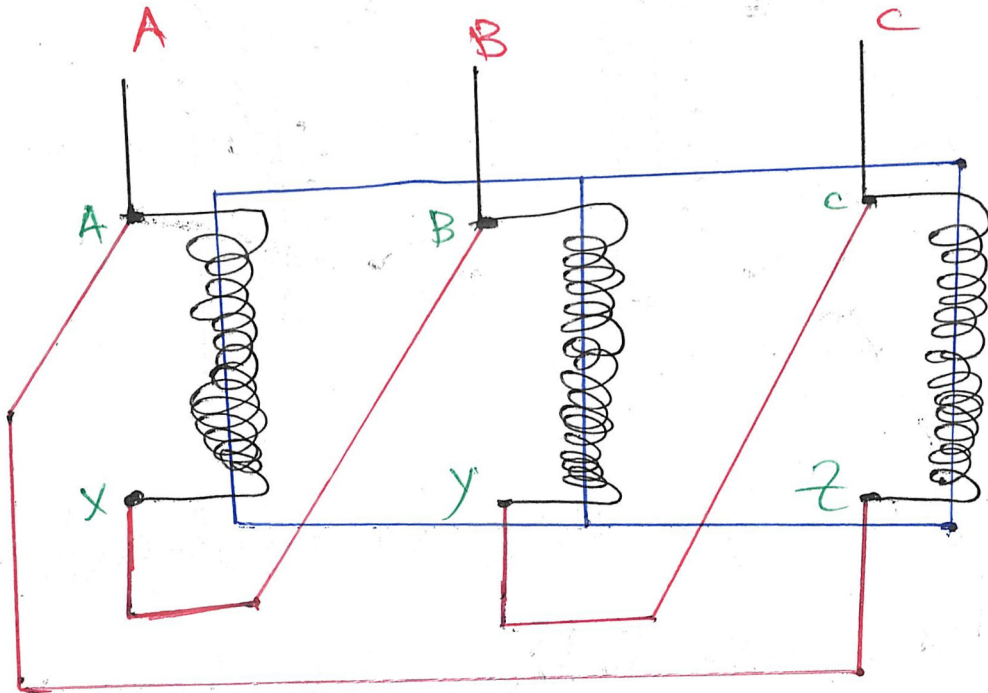
- étoile
- triangle
- zigzag.

a) couplage étoile.



Le couplage étoile permet le point d'appoint neutre, très utile en B.T. y'a deux tensions disponibles: la tension simple (U_{CN}) et la tension composée (U_{AB}).

b) couplage triangle =

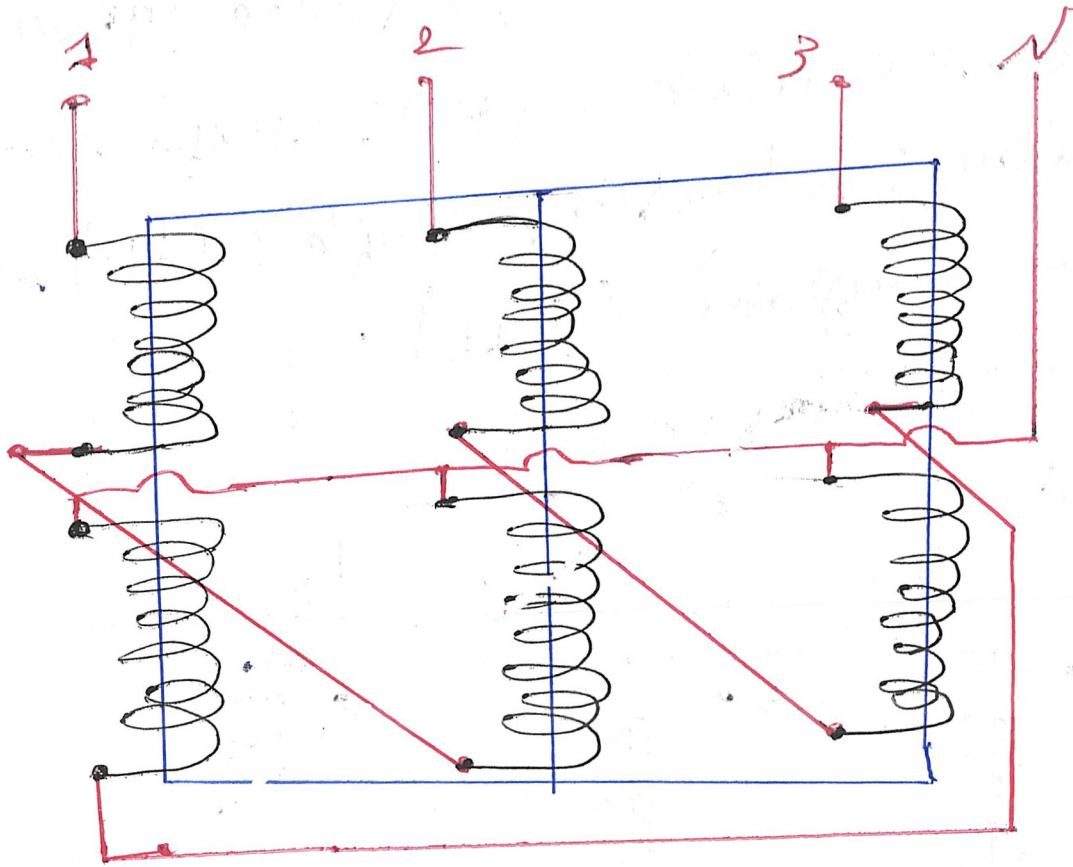


- pas de point neutre.

- seules les tensions composées sont disponibles.

c) couplage zig-zig

chaque enroulement comprend deux - demi - bobines placés sur des noyaux différents, la deuxième demi - bobine a ses sorties inversées les forces électromotrices de chaque demi - bobine sont déphasées de 120° électriques.



- Avec le couplage zig-zag, on obtient une meilleure répartition des tensions en cas de réseaux déséquilibrés côté B.T.