Fichier 1 : Cours : Master 1
Matière : Modélisation et optimisation des réseaux électriques

Fichier 2 : T.D
N°=1 , N° 2

Enseignant : BENATTOUS DJILANI

Modélisation des éléments du réseau Electrique

Source :

Du point de Vue des Réseaux Electriques, la machine synchrone ou Alternateur est un convertisseur électromagnétique qui à partir de l'énergie mécanique fournie par un moteur, renvoie dans le réseau de l'énergie Electrique sous forme triphasé

Constitution :

- Rotor (Inducteur)

Il est constitué d'un enroulement parcouru par un courant d'excitation J continu créant un champ magnétique 2p polaire. Il possède donc p paires de pôles.
Le rotor peut être constitué par un aimant permanent.

- stator (induit)

Les enroulements du stator sont le siège de courants alternatifs monophasé ou triphasés. Il possède le même nombre de paires de pôle p.

- champ tournant :

Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à la pulsation $\Omega_s = \frac{w}{p}$ en rad/s

ou $n_s = \frac{f}{p}$ en tr/s. ou encore $n_s = \frac{60.f}{p}$ tr/mn

avec : Ω_s : Vitesse de rotation du champ tournant rad/s
w : pulsation des courants alternatifs $(w = 2\pi f)$

- Synchronisme :

Le champ ~~tournant~~ tournant du stator accroche le champ inducteur solidaire du rotor.

②

Le rotor ne peut donc tourner qu'à la vitesse de synchronisme Ω_s !

On considère deux circuits couplés magnétiquement C_1 et C_2

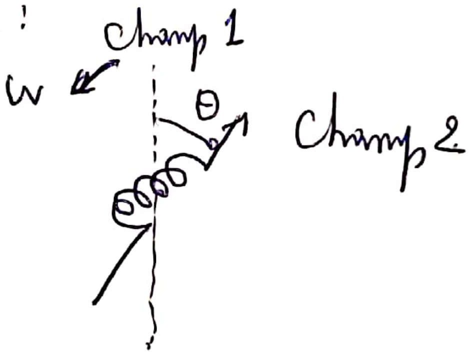
- Les enroulements du circuit C_1 sont parcourus par des courants triphasés sinusoïdaux et équilibrés

Les enroulements du circuit C_2 sont parcourus par un courant continu.

Les enroulements de C_1 créent un champ tournant à ω.

Les enroulements de C_2 créent un champ fixe.

En représentation simplifiée on a :



Pour que le couple électromagnétique travaille, il doit avoir une valeur non nulle. Pour que la machine tourne, l'angle entre le rotor et l'axe statorique doit varier.

Le circuit 2 tournant appelé rotor, doit tourner à la même pulsation que celle du champ tournant. Cette machine est appelée machine synchrone.

FEM induite :

Un enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant dans l'entrefer est le siège d'une f.em ~~e(t)~~) e/H de valeur efficace E

$E = KN\phi$

Mode de fonctionnement :

La machine synchrone est réversible.

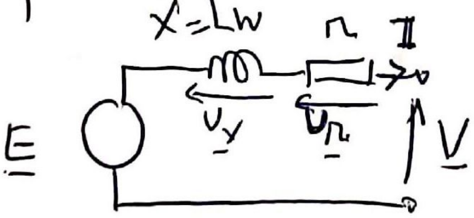
Fonctionnement en Alternateur :

Le rotor est entraîné par une turbine. Les bobines de l'induit sont alors le siège de f.é.m alternative de pulsation $w = p.\Omega_s$

Réaction magnétique de l'induit :

En charge, le courant dans l'induit crée un champ magnétique qui modifie les caractéristiques de la machine. C'est ce que l'on nomme la réaction magnétique d'induit.

Modèle équivalent d'un enroulement.



L'inductance L du schéma tient compte de l'inductance réelle de l'enroulement et ~~de~~ la réaction magnétique d'induit.

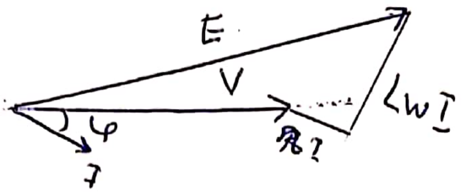
Le courant est orienté en convention générateur.

Loi de maille :

$e = v + rI + L\frac{dI}{dt}$. on peut écrire en complexe.

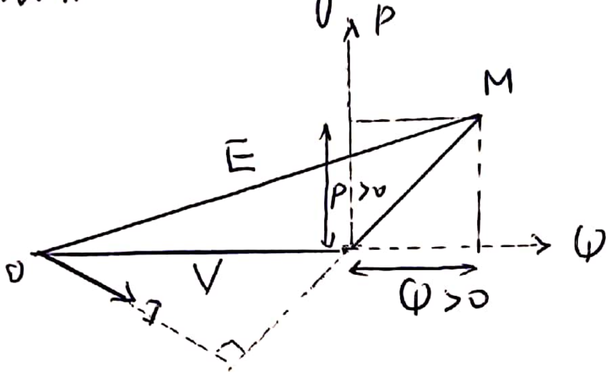
$\underline{E} = \underline{V} + r\underline{I} + jLw\underline{I}$

Diagramme de Fresnel :

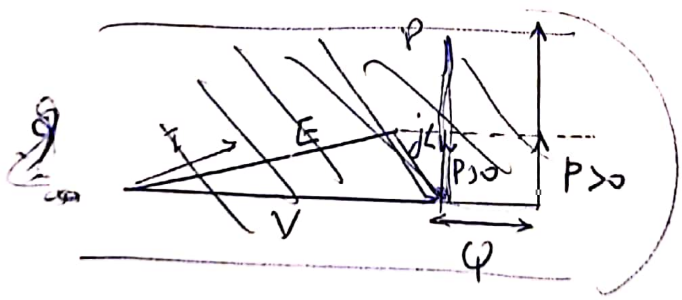


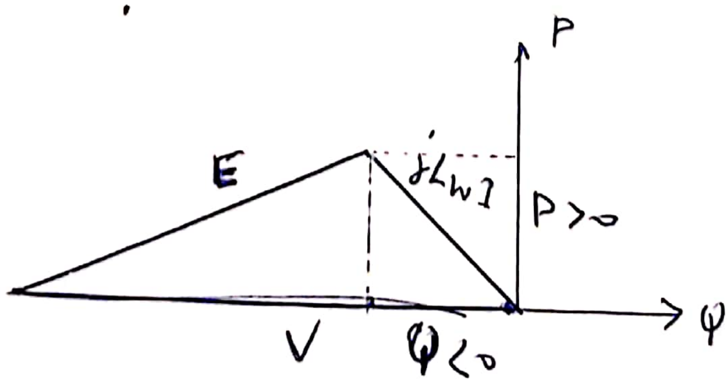
$r = 0$

Utilisation du diagramme :

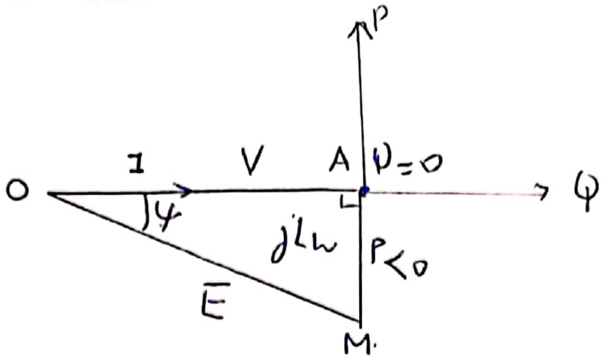


La machine synchrone fonctionnant en Alternateur sur excité fournissant à la fois de la puissance active et de la puissance réactive au réseau

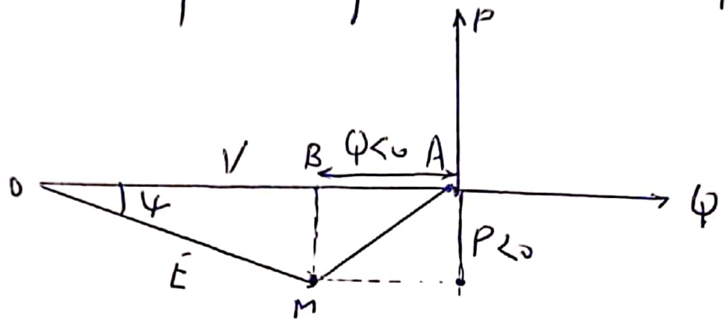




la machine synchrone fonctionnant en Alternateur sous excité fournissant la puissance active au réseau et absorbant de la puissance réactive sur le même réseau.



machine synchrone à l'excitation normale fonctionnant en moteur n'absorbant que de la puissance active sur le réseau



absorbant à la fois de la puissance active et de la puissance réactive sur le réseau

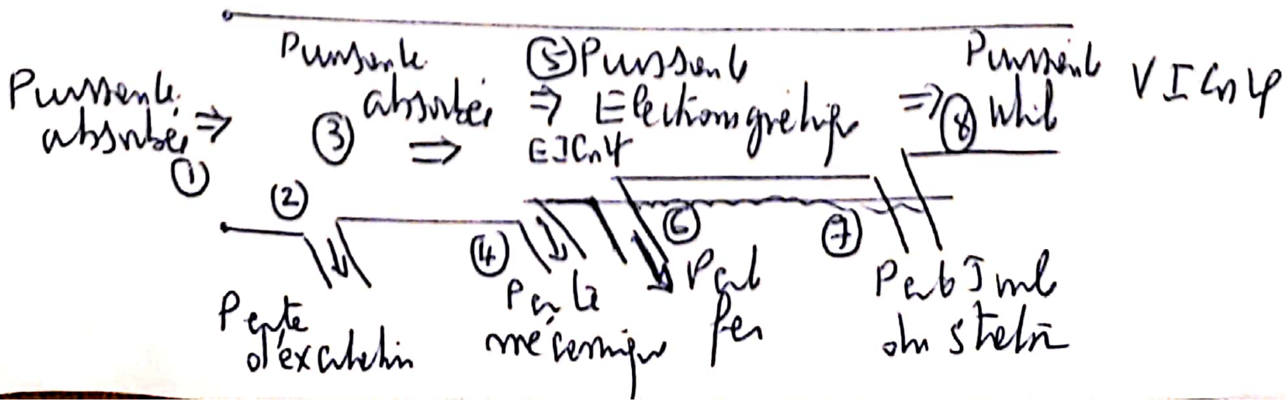
Bilan des puissances

Si l'alternateur n'est pas auto excité, en plus de la puissance mécanique, l'alternateur absorbe une puissance d'excitation qui se transforme totalement en perte par effet Joule du circuit de l'inducteur

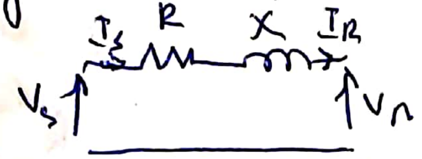
$$P_a = P_{méc} + U_e I_e$$

Le dispositif d'entraînement (la turbine) fournit une puissance mécanique

$$P_{méc} = C_m \Omega_s$$



Ligne Courte :

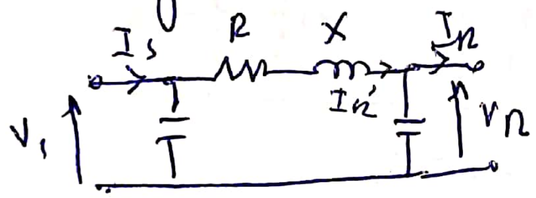


$$\bar V_S = \bar V_R + \bar Z \bar I_R$$
$$\bar I_S = I_R$$

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

$$\bar V_S = A\bar V_R + B\bar I_R \qquad A = 1 \qquad B = \bar Z$$
$$\bar I_c = C\bar V_R + D\bar I_R \qquad C = 0 \qquad D = 1$$

Ligne moyenne :



$$\bar V_S = \bar Z \bar I_R' + \bar V_R = \bar Z\left(\frac{Y}{2}\bar V_R + \bar I_R\right) + \bar V_R$$

$$\bar V_R = \underbrace{\left(1 + \frac{ZY}{2}\right)}_{A} V_R + \underbrace{\bar Z \bar I}_{B} \qquad A = 1 + \frac{ZY}{2}, \quad B = \bar Z$$

$$\bar I_S = \frac{Y}{2}\bar V_S + \frac{Y}{2}\bar V_R + \bar I_R = \frac{Y}{2}\left[\left(1+\frac{ZY}{2}\right)\bar V_R + Z\bar I_R\right] + \frac{Y}{2}\bar V_R + \bar I_R$$

$$\bar I_S = \frac{Y}{2}\left(1 + \frac{ZY}{2}\right) V_R + \frac{ZY}{2}\bar I_R + \frac{Y}{2} V_R + \bar I_R$$

$$\bar I_S = \frac{Y}{2}\left[1 + \frac{ZY}{2} + 1\right] V_R + \left(1 + \frac{ZY}{2}\right)\bar I_R$$

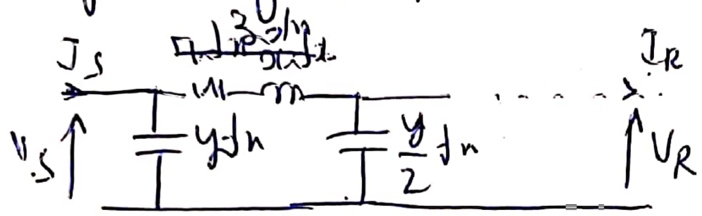
$$\bar I_S = \frac{Y}{2}\left[2 + \frac{ZY}{2}\right]\bar V_R + \left(1 + \frac{ZY}{2}\right)\bar I_R$$

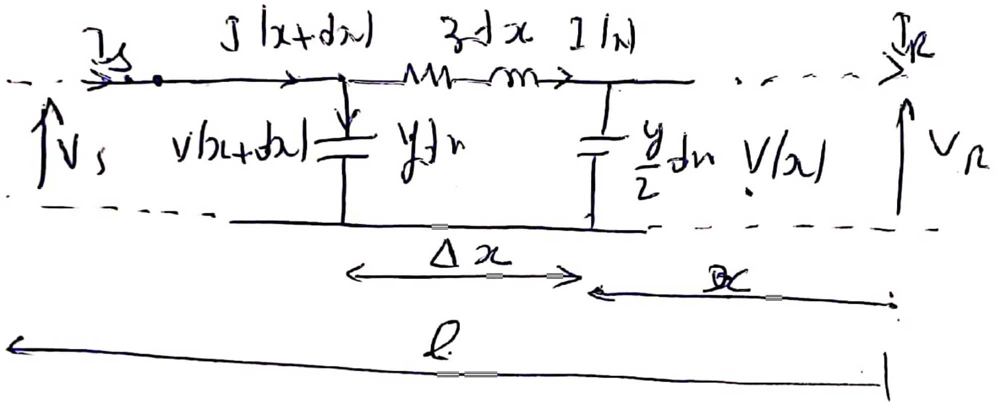
$$\bar I_S = \underbrace{Y\left(1 + \frac{ZY}{4}\right)}_{C}\bar V_R + \underbrace{\left(1 + \frac{ZY}{2}\right)}_{D}\bar I_R$$

Modèle d'une ligne longue :

Ligne courte, ligne moyenne : les paramètres sont constantes localisés.

Ligne longue : paramètres distribués (dépend de x)





$$V(x+\Delta x) = V(x) + z\,\Delta x\, I(x)$$

$$\frac{V(x+\Delta x) - V(x)}{\Delta x} = z\, I(x).$$

$\Delta x \to 0$
$$\frac{dV}{dx} = z\, I(x) \qquad (1)$$

$$I(x+\Delta x) = I(x) + y\,\Delta x \,.\, V(x+\Delta x)$$

$$\frac{I(x+\Delta x) - I(x)}{\Delta x} = y\, V(x+\Delta x)$$

$\Delta x \to 0$
$$\frac{dI}{dx} = y\, V(x) \qquad (2)$$

Scanned with CamScanner

dérivons l'équation (1)

$$\frac{d^2V}{dx^2} = z\,\frac{dI(x)}{dx} = zy\,V(x).$$

mettons $\gamma^2 = zy$

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \gamma^2\,V(x)$$

La solution $\quad V(x) = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x}$.

γ : constante de propagation

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{zy} = \sqrt{(r + jl\omega)(g + jc\omega)}.$$

α : constante d'atténuation $\qquad \alpha = \log\left|\frac{V_1}{V_2}\right| \frac{\text{input}}{\text{output}}$

β : constante de phase $\qquad$ rad/km .

$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}}$ impédance caractéristique de la ligne.

$Z_c = \sqrt{\frac{r + jl\omega}{g + jc\omega}}$ $\qquad$ ligne sans perte $\quad r = 0$, $g = 0$

$Z_c = \sqrt{\frac{l}{c}}$. (Ω) .

Détermination de A_1 et A_2 :

$$I(x) = \frac{1}{z}\frac{dV}{dx} = \frac{1}{z}\left[A_1\gamma e^{\gamma x} - A_2\gamma e^{-\gamma x}\right]$$

$$V(x) = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x}$$

$x = 0 \qquad V(x) = V_R \;; \qquad I(x) = I_R$

$$V_R = A_1 + A_2$$

$$I_R = \frac{\gamma}{z}\left[A_1 - A_2\right] = \frac{\sqrt{zy}}{z}\left[A_1 - A_2\right]$$

$$I_R = \sqrt{\frac{y}{z}}\left[A_1 - A_2\right] = \frac{1}{Z_c}\left[A_1 - A_2\right]$$

$$V_R = A_1 + A_2$$

$$Z_c I_R = A_1 - A_2 \Rightarrow A_1 = \frac{V_R + Z_c I_R}{2}$$

$$A_2 = \frac{V_R - Z_c I_R}{2}$$

$$V(x) = \left(\frac{V_R + Z_c I_R}{2}\right) e^{\gamma x} + \left(\frac{V_R - Z_c I_R}{2}\right) e^{-\gamma x}.$$

$$V(x) = \left(\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2}\right) V_R + Z_c \left(\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2}\right) I_R$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c}\left[A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}\right] =$$

$$\frac{1}{Z_c}\left[\left(\frac{V_R + Z_c I_R}{2}\right) e^{\gamma x} - \left(\frac{V_R - Z_c I_R}{2}\right) e^{-\gamma x}\right]$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c}\left(\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2}\right) V_R + \frac{1}{Z_c} \cdot Z_c \left(\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2}\right) I_R$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c}\left(\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2}\right) V_R + \left(\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2}\right) I_R$$

$$\cosh \gamma x = \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \; ; \quad \sinh \gamma x = \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2}$$

$$V(x) = (\cosh \gamma x) V_R + Z_c (\sinh \gamma x) I_R$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c}(\sinh \gamma x) V_R + (\cosh \gamma x) I_R.$$

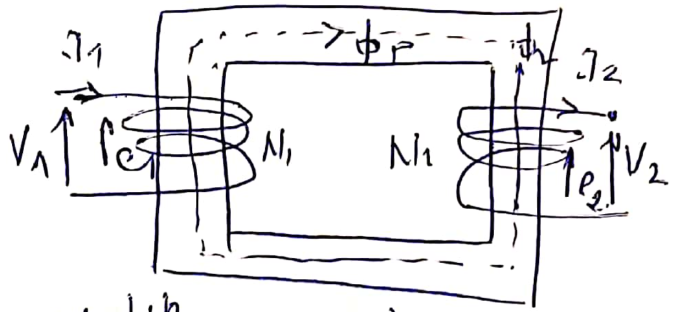
$$\begin{bmatrix} V(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma x & Z_c \sinh \gamma x \\ \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma x & \cosh \gamma x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

$x = l$

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_c \sinh \gamma l \\ \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

Modélisation du transformateur Électrique

Les transformateurs permet de transférer de l'énergie (sous forme alternative) d'une source à une charge, tout en modifiant la valeur de la tension. La tension peut être soit augmentée ou abaissée selon l'utilisation voulue.



$$e_1 = +N_1 \frac{d\phi_p}{dt} = N_1 \frac{d\varphi_1}{dt} = v_1$$

$$\phi_2 = -\phi_p$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\varphi_2}{dt} = N_2 \frac{d\varphi_p}{dt} = v.$$

$$e_1 = N_1 \frac{d\varphi_p}{dt}.$$

$$e_2 = N_2 \frac{d\varphi_p}{dt}.$$

Scanned with CamScanner

$\frac{e_2}{e_2} = \frac{N_2}{N_1} = m$ rapport de transformation.

$\sum FMM = \mathcal{R}\phi$ $\mathcal{R}$: reluctance.
ϕ : flux.
loi d'ohm.

$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu S}$.

transformateur ~~de~~ idéal : $\mathcal{R} = 0$

$N_1 i_1 - N_2 i_2 = \mathcal{R}\phi = 0 \Rightarrow$

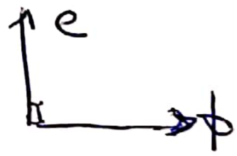
$N_1 i_1 = N_2 i_2 \Rightarrow$

$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = m$.

$\phi_p = \phi_m \sin \omega t$ $\frac{d\phi_p}{dt} = \omega \phi_m \cos \omega t$.

$E_1 = N_1 \frac{d\phi_p}{dt} = N_1 \omega \phi_m \cos \omega t = N_1 \omega \phi_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$

$E_{eff} = \frac{N_1 \omega \phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{N_1 . 2\pi f \phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f N_1 \phi_p$



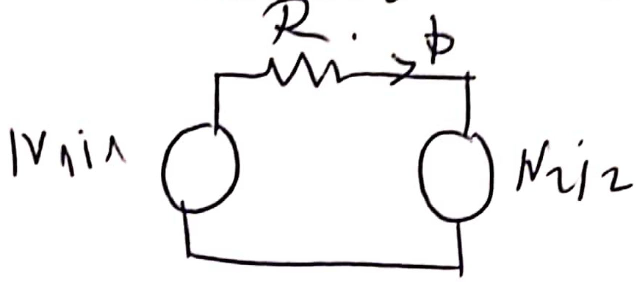
$E_{2eff} = 4,44 f N_2 \phi_p$.

$\frac{E_2}{E_1} = \frac{i_1}{i_2} = m = \frac{V_2}{V_1}$ $E_1 i_1 = E_2 i_2$

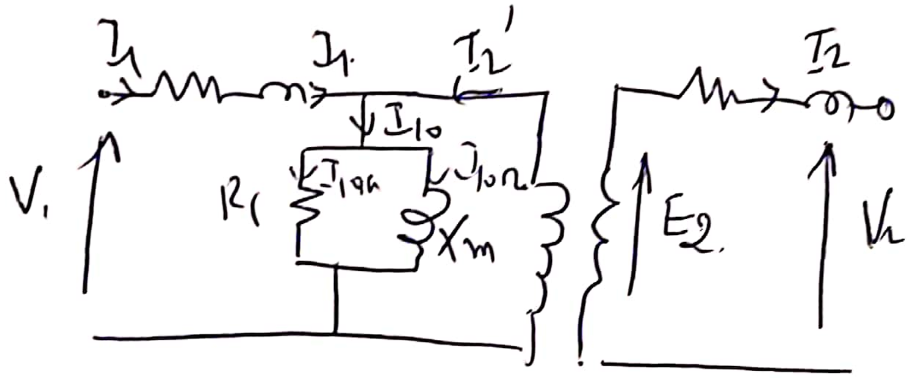
l'énergie électrique transférée par le transformateur est conservée mais avec différents niveaux de la tension et de courant.

Transformateur réel :

Reluctance non nulle $\mathcal{R} \neq 0$



$N_1 i_1 - N_2 i_2 = \mathcal{R}\phi \neq 0$



$\overline{I_1} + m\overline{I_2} = \overline{I_{10}}$

$N_1 \overline{I_1} + N_2 \overline{I_2} = N_1 \overline{I_{10}}$

Essai à vide :

$P_{10} = P_{fer} = R_f I_{10a}^2 = R_f \cdot \left(\frac{U_1}{R_f}\right)^2 = R_f \frac{V_{1eff}^2}{R_f^2} \Rightarrow$

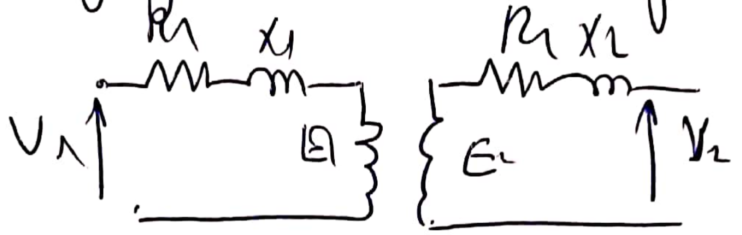
$$\boxed{R_f = \frac{V_{1eff}^2}{P_{10}}}$$

$S_{10} = U_1 I_{10}$

$Q_{10} = \sqrt{S_{10}^2 - P_{10}^2} = X_m I_{10r}^2 = X_m \cdot \left(\frac{V_{1eff}}{X_m}\right)^2$

$$X_m = \frac{U_{1eff}^2}{Q_{10}}$$

on néglige la branche magnétisante:



Ramené du côté secondaire.

$$R_s = R_2 + m^2 R_1 = R_{eq}.$$
$$X_s = X_2 + m^2 X_1 = X_{eq}.$$

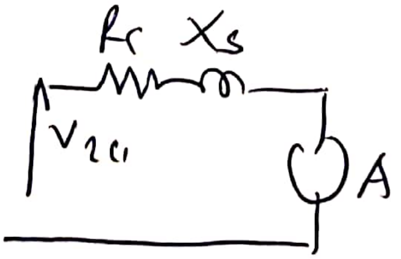
$$\overline{V_{20}} = \overline{V_2} + \overline{Z_s I_2}$$

$$R_s I_2^2 = R_2 I_2^2 + R_1 I_1^2.$$
$$R_s = R_2 + R_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2 = R_2 + m^2 R_1.$$

$$R_p = R_1 + \frac{R_2}{m^2}$$
$$X_p = X_1 + \frac{X_2}{m^2}.$$

Calcul des paramètres :

Essai en c.c :



$$I_{2cc} = I_{2n}.$$

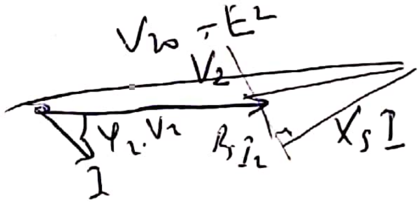
$$V_{2cc} = Z_s I_{2cc} = Z_s I_{2n}$$

$$u_{2cc}\% = \frac{U_{2cc}}{U_{2n}} \times 100 \qquad U_{2cc} = \sqrt{3} V_{2cc} = \sqrt{3} Z_s I_{2n}$$

$$V_{2cc} = \frac{u_{cc}\%}{100} \times V_{2n} = \sqrt{3}\, Z_s\, I_{2n} = \cancel{\sqrt{3}}\, Z_s \cdot \frac{S_n}{\cancel{\sqrt{3}}\, V_{2n}}$$

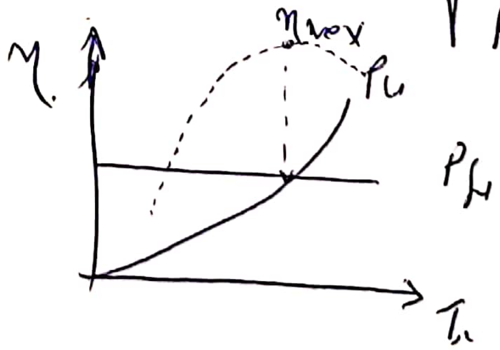
$$\boxed{Z_s = \frac{u_{cc}\%}{100} \cdot \frac{V_{2n}^2}{S_n}}$$

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



$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{fer} + P_{cu}} = \frac{P_2}{P_2 + P_{fr} + R_s I_2^2}$$

$$\eta_{max} \Rightarrow P_{cu} = P_{fer} = R_s I_2^2 \Rightarrow I_2 = \sqrt{\frac{P_{fer}}{R_s}}$$



Système unitaire : ①

Le système unitaire permet l'utilisation de grandeurs réduites au système per unité (p.u) ou en pourcentage (%) dans les réseaux de puissance.

L'utilisation des grandeurs réduites permet :

- de simplifier les problèmes (Δ, Y, $\sqrt{3}$)
- de nous informer davantage (V_n, I_n, P_n, etc)

On obtient une grandeur réduite en référant une grandeur à une autre de même dimension. La valeur de référence ou de base peut correspondre à la valeur nominale d'un appareil ou à valeur choisie arbitrairement qui minimise les calculs.

Choix des valeurs de base dans un réseau

Si on considère les puissances, les tensions, et les impédances d'un réseau 1 ϕ ou 3 ϕ, quatre valeurs de base peuvent être définies soit

- une puissance de base (apparente)
- une tension de base.
- un courant de base
- une impédance (ou admittance) de base.

Parmi ces quatre valeurs de base, seulement deux sont indépendantes. En effet, on en choisit deux, les deux autres peuvent être déduites

$$\text{Courant de base} = \frac{\text{Puissance apparente de base}}{\text{Tension de base}}.$$

$$\text{Impédance de base} = \frac{\text{Tension de base}}{\text{Courant de base}} = \frac{(\text{Tension de base})^2}{\text{Puissance apparente de base}}$$

c'est-à-dire si on choisit (S_{base}, V_{base})

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{V_{base}} \quad ; \quad Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}}$$

Changement de base :

$$Z(\text{en pu}) = \frac{Z(\Omega)}{Z_{base}} = \frac{Z(\Omega)}{Z_b} = \frac{Z\ \text{réelle}}{Z\ \text{base}}$$

$$Z'(\text{en pu}) = \frac{Z(\Omega)}{Z'_{base}} = \frac{Z(\Omega)}{\frac{V'^2_{base}}{S'_{base}}} = Z(\Omega) \cdot \frac{S'_{base}}{V'^2_{base}}$$

$$Z'(\text{en pu}) = Z(\text{en pu}) \cdot Z_{base} \cdot \frac{S'_{base}}{V'^2_{base}}$$

$$\boxed{Z'(\text{en pu}) = Z(\text{en pu}) \cdot \left(\frac{V_{base}}{V'_{base}}\right)^2 \cdot \frac{S'_{base}}{S_{base}}}$$

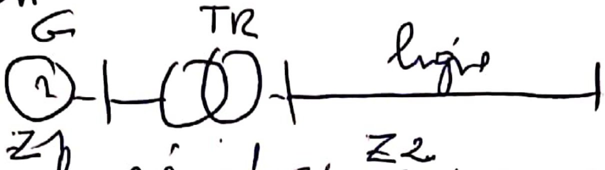
Scanned with CamScanner

Exemple :

Alternateur
20 MVA
13 kV
$X = 0{,}65$ pu

Transformateur
25 MVA
12/66 kV
$X = 7{,}5\,\%$

Ligne de transport
longueur = 50 km
66 kV
$X = 0{,}67\ \Omega/\text{km}$



Exprimer les réactances en p.u en choisissant comme base commune $S_b = 25$ MVA et $V_b = 66$ kV

Alternateur : $X = 0{,}65 \times \left(\frac{13}{12}\right)^2 \cdot \frac{25}{20} = 0.9536$ p.u.

Transformateur $X_T = \frac{7{,}5}{100} \times \left(\frac{66}{66}\right)^2 \cdot \frac{25}{25} = 0{,}075$ pu.

Ligne : $X_L = (0.67 \times 50) \times \left(\frac{66}{66}\right)^2 \cdot \frac{25}{66^2} = \frac{Z(\Omega)}{Z_b}$

$= 0.1923$ pu.

Zone 1 : $V_b = 66 \times \frac{12}{66} = 12$ kV.

Zone 2 : $V_b = 66$ kV.