

LA MACHINE SYNCHRONE

I Généralités :

La machine synchrone est une machine à champ magnétique tournant qui présente $2p$ pôles magnétiques au rotor ainsi qu'au stator. p représente le nombre de paires de pôles (p pôles nord et p pôles sud).

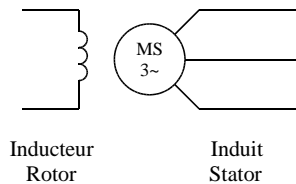
La vitesse de rotation n du rotor dépend directement de la fréquence f de la tension d'alimentation, on parle de vitesse de synchronisme.

La relation entre n et f est : $f = p.n$ avec $\begin{cases} f \text{ en [Hz]} \\ p: \text{ nbre de paires de pôles} \\ n \text{ en [tr/s]} \end{cases}$ soit, $n = \frac{f}{p}$

Si la fréquence $f = 50$ Hz, les vitesses synchrones possibles sont :

p	n [tr/s]	n [tr/min]
1	50	3000
2	25	1500
3	16,67	1000
4	12,5	750

Schéma d'une machine synchrone :



La machine synchrone peut fonctionner aussi bien en moteur synchrone ou génératrice synchrone (alternateur).

II L'alternateur triphasé :

Un alternateur triphasé permet de convertir une puissance mécanique en puissance électrique.

II.1 L'inducteur :

L'inducteur est la partie tournante de l'alternateur c'est-à-dire le rotor.

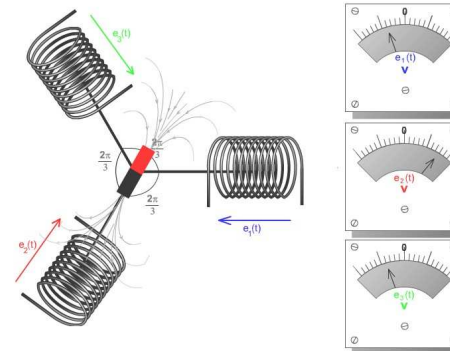
Pour que l'alternateur puisse fonctionner, il faut que le rotor se comporte comme un aimant. Ainsi, l'inducteur est :

- soit un aimant permanent,
- soit on crée artificiellement un aimant en alimentant l'inducteur avec une alimentation continue.
- Si on ne dispose pas d'une alimentation continue externe pour alimenter l'inducteur, on crée l'alimentation directement avec la machine; on parle alors de **machine auto-excitée**.

II.2 L'induit :

L'induit est la partie fixe de l'alternateur c'est-à-dire le stator.

L'induit est composé de $3p$ bobines chacune décalées entre-elles de $\frac{2\pi}{3.p}$.



Le rotor (aimant naturel ou artificiel) crée le flux Φ .

Lorsque le rotor tourne, chaque bobine est soumise à un flux magnétique variable et il se crée alors une tension alternative sinusoïdale $e(t)$ aux bornes de chaque enroulement du stator. On montre que la tension $e(t)$ a pour valeur efficace :

$$E = KNf\Phi$$

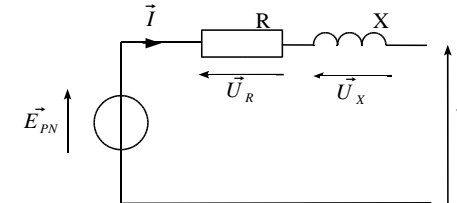
avec $\begin{cases} E \text{ en [V]} \\ K: \text{ coefficient de Kapp} \\ N: \text{ Nbre de conducteurs d'une phase} \\ f \text{ en [Hz]} \\ \Phi \text{ flux maximal pour une spire [Wb]} \end{cases}$

Comme $f = p.n$ alors $E = KNpn\Phi$

Si on utilise une alimentation continue pour alimenter l'inducteur, on montre que la tension E est aussi proportionnelle au courant d'excitation i_e .

II.3 Modèle équivalent d'une phase de l'alternateur :

Pour étudier l'alternateur triphasé, on modélise une phase de l'alternateur par une f.e.m. E_{PN} en série avec une résistance R et une réactance synchrone $X = L\omega$.

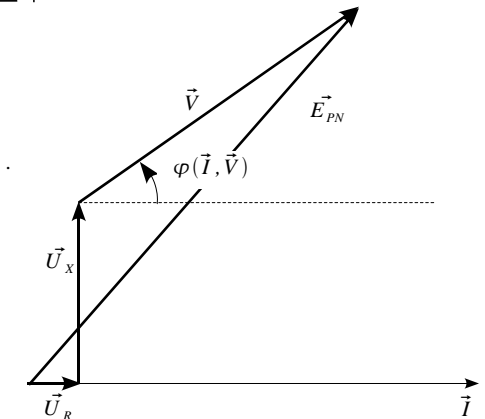


Équation de fonctionnement pour une phase :

$$\vec{E}_{PN} = \vec{U}_R + \vec{U}_X + \vec{V} \quad \text{avec :}$$

$$\vec{U}_R \begin{cases} U_R = R.I \\ \varphi(\vec{I}, \vec{U}_R) = 0 \end{cases}, \quad \vec{U}_X \begin{cases} U_X = X.I = L.\omega.I \\ \varphi(\vec{I}, \vec{U}_X) = +90^\circ \end{cases}$$

Diagramme synchrone d'une phase
(\vec{I} pris comme référence des phases)

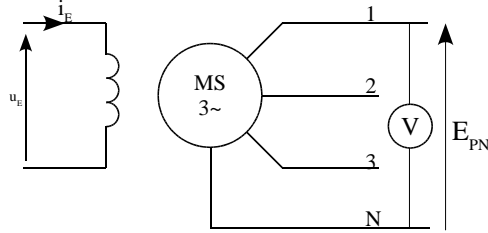


III Détermination des éléments du modèle d'une phase :

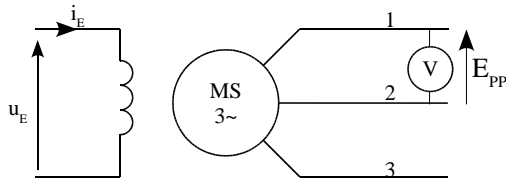
III.1 Détermination de la tension E_{PN} (réalisé par un essai à vide):

Pour ce qui suit, les enroulements du stator sont couplés en étoile.

Si les enroulements du stator sont couplés en étoile et que le fil de neutre est sorti, on peut mesurer directement la tension E_{PN} pour une vitesse n donnée.

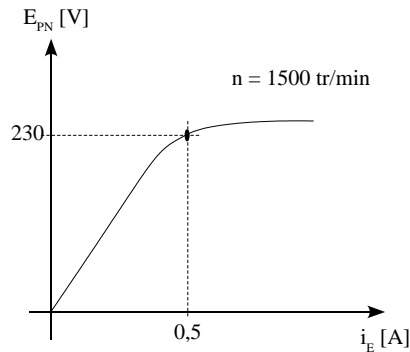


Si le fil de neutre n'est pas sorti, on mesure la tension entre phases E_{PP} :



Dans ce cas, la tension E_{PN} est : $E_{PN} = \frac{E_{PP}}{\sqrt{3}}$

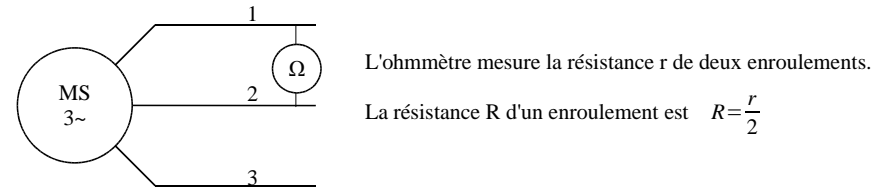
Pour une valeur fixe de la vitesse de rotation n , la caractéristique $E_{PN}(i_E)$ est la suivante :



On admet que la tension E_{PN} ne dépend que de l'intensité du courant d'excitation i_E .

III.2 Détermination de la résistance R

On peut pour cela utiliser une méthode voltampèremétrique ou brancher un ohmmètre entre deux phases de l'alternateur (cet essai se fait hors-tension):

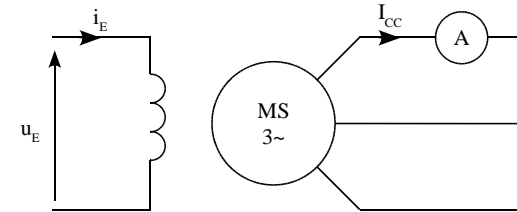


La résistance R est souvent négligeable devant la réactance synchrone X.

III.3 Détermination de la réactance synchrone $X = L\omega$ (réalisé par un essai en court-circuit) :

Pour cet essai, la vitesse de rotation du rotor est n . Pour cette vitesse de rotation n et pour i_E connu, on connaît la tension E_{PN} déterminée lors de l'essai à vide.

On court-circuite les 3 phases du stator et on mesure l'intensité de court-circuit I_{CC} .



On détermine alors la valeur de X par : $X = \sqrt{\left(\frac{E_{PN}}{I_{CC}}\right)^2 - R^2}$.

On montre aussi que $I_{CC} = k \cdot i_E$.

IV Bilan énergétique

Si l'alternateur est auto-excité ou à aimant permanent, le terme $u_E \cdot i_E$ est à enlever des relations suivantes.

Puissance absorbée P_A :

Pour entraîner l'alternateur, il faut lui fournir la puissance mécanique $P_M = T_M \cdot \Omega$

T_M est le moment du couple utile [N.m] et Ω la vitesse angulaire de l'arbre du moteur [rad.s⁻¹]

Si n est exprimé en [tr.s⁻¹] alors $\Omega = 2 \pi n$

Si n est exprimé en [tr.min⁻¹] alors $\Omega = \frac{2 \pi n}{60}$

L'alimentation de l'excitation absorbe la puissance $P_{ex} = u_E \cdot i_E$.

Remarque : Si l'alternateur est auto-excité ou à aimant permanent, $P_{ex} = 0$

La puissance absorbée est donc égale à $P_A = P_M + P_{ex}$ soit $P_A = 2 \pi n \cdot T_M + u_E \cdot i_E$

Puissance utile P_U :

L'alternateur alimente une charge triphasée équilibrée qui a pour facteur de puissance $\cos \varphi$, qui absorbe une intensité I et qui est alimenté par une tension entre phases (ou tension composée) U .

La puissance utile est donc : $P_U = U I \sqrt{3} \cos \varphi$.

Les différentes pertes de l'alternateur :

Les pertes par effet Joule dans l'inducteur : $P_{J_s} = u_E \cdot i_E$

Les pertes par effet Joule dans l'induit :

Si R est la résistance d'une phase du stator et I l'intensité en ligne, $P_{J_s} = 3 \cdot R \cdot I^2$.

Si r est la résistance mesurée entre deux bornes du stator, $P_{J_s} = \frac{3}{2} r \cdot i^2$

Les pertes dites « constantes » : P_c .

Ces pertes sont déterminées lors de l'essai à vide et représentent les pertes mécaniques et magnétiques de l'alternateur.

Rendement de l'alternateur :

$$\eta = \frac{P_U}{P_A} \text{ soit } \eta = \frac{U I \sqrt{3} \cos \varphi}{U I \sqrt{3} \cos \varphi + u_E \cdot i_E + \frac{3}{2} r \cdot I^2 + P_c}$$

V Exercice d'application :

Un alternateur triphasé couplé en étoile fournit une tension de fréquence $f = 50$ Hz lorsque le rotor tourne à la vitesse $n = 1000$ tr/min.

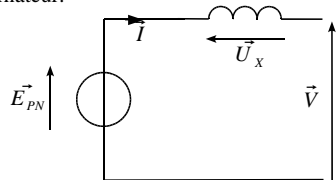
1- Calculer le nombre de pôles du rotor : $f = p \cdot n \Rightarrow p = \frac{f}{n}$ soit $p = \frac{50}{(1000/60)} = 3$ paires de pôles.

Le rotor possède 6 pôles magnétiques (3 pôles nord et 3 pôles sud)

2- Le coefficient de Kapp est $K = 2,2$; le nombre de conducteurs est $N = 300$ et le flux maximal sous un pôle est $\Phi = 8$ mWb. Calculer la f.e.m. E_{PN} .

$$E = KNf \Phi = 2,2 \times 300 \times 50 \times 8 \cdot 10^{-3} = 264 \text{ V}$$

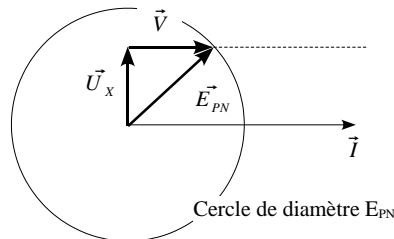
3- La résistance R est négligeable. La réactance synchrone $X = 13 \Omega$. Représenter le modèle d'une phase de l'alternateur.



4- On branche une charge résistive. L'intensité $I = 10$ A. Déterminer la valeur de V .

$$U_X = X \cdot I = 13 \times 10 = 130 \text{ V}$$

La relation vectorielle est : $\vec{E}_{PN} = \vec{U}_X + \vec{V}$



4 suite – On trouve graphiquement : $V = 229,8 \text{ V}$

5- Calculer la puissance apparente de l'alternateur:

$$S = U \cdot I \cdot \sqrt{3} = (230 \sqrt{3}) \times 10 \times \sqrt{3}$$

$$S = 6900 \text{ VA}$$

VI Le moteur synchrone :

VI.1 Principe de fonctionnement :

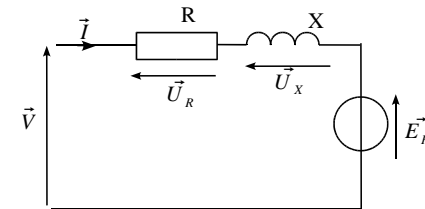
Le moteur synchrone converti la puissance électrique en puissance mécanique.

Pendant longtemps, ce moteur fût relativement peu utilisé en raison de sa difficulté à réguler sa vitesse. Ce problème est maintenant résolu grâce au progrès de l'électronique de puissance et des onduleurs qui lui sont associés.

Le stator de la machine est alimenté en triphasé ; il se crée alors un champ magnétique tournant à la fréquence de rotation $n = \frac{f}{p}$ ce qui fait que le rotor de la machine tourne lui-aussi à la fréquence de rotation n .

Comme pour l'alternateur, on modélise une phase du moteur par les éléments E_{PN} , R , X et V .

VI.2 Modèle d'une phase d'un moteur synchrone :



La relation entre les différentes tensions est : $\vec{V} = \vec{U}_R + \vec{U}_X + \vec{E}_{PN}$ avec :

$$\vec{U}_R \begin{cases} U_R = R \cdot I \\ \varphi(\vec{I}, \vec{U}_R) = 0 \end{cases} \text{ (souvent négligeable) et } \vec{U}_X \begin{cases} U_X = X \cdot I = L \omega \cdot I \\ \varphi(\vec{I}, \vec{U}_X) = +90^\circ \end{cases}$$

VI.3 Rendement d'un moteur synchrone :

Le rendement d'un moteur synchrone est $\eta = \frac{P_U}{P_A}$ soit $\eta = \frac{T_U \cdot \Omega}{U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi}$

VI.4 Exercice d'application :

Un moteur synchrone triphasé tétrapolaire est alimenté par un réseau triphasé 400 V ; 50 Hz. Il fournit une puissance utile de 4,5 kW et a un rendement $\eta = 97 \%$.

1- Quelle est la fréquence de rotation de ce moteur ? $n = \frac{f}{p} = \frac{50}{2} = 25$ tr/s = 1500 tr/min

2- Calculer le moment du couple utile T_U . $T_U = \frac{P_U}{\Omega} = \frac{4,5 \cdot 10^3}{2 \times \pi \times 1500} = 28,7 \text{ N.m}$

3- Calculer l'intensité en ligne I si le facteur de puissance du moteur est de 0,9 capacitif.

$$P_A = \frac{P_U}{\eta} = \frac{4,5 \cdot 10^3}{0,97} = 4,64 \text{ kW} \text{ et } P_A = U I \sqrt{3} \cos \varphi \Rightarrow I = \frac{P_A}{U \sqrt{3} \cos \varphi} = \frac{4,64 \cdot 10^3}{400 \times \sqrt{3} \times 0,9} = 7,44 \text{ A}$$