

## Chapitre 6 : Machine Synchrone

### 1. Présentation :

La machine synchrone, appelée ALTERNATEUR si elle fonctionne en génératrice, fournit un courant alternatif. En fonctionnement MOTEUR sa fréquence de rotation est imposée par la fréquence du courant alternatif qui alimente l'induit.

### 2. Constitution :

L'alternateur possède deux parties principales :

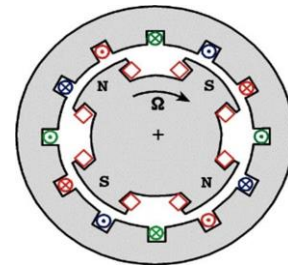
- L'inducteur porté le plus souvent par le rotor
- L'induit porté par le stator parcouru par des courants alternatifs

#### 2.1. Inducteur :

Le champ magnétique est créé par un aimant permanent ou par un électroaimant alimenté par un courant continu  $I_e$ , appelé courant d'excitation. Le rotor tourne à la fréquence  $f$ , et crée un nombre  $p$  de paires de pôles. Remarque : si  $I_e$  est constant, il crée un champ magnétique  $B$ , constant, tournant à la fréquence de synchronisme  $n_s = n$ .

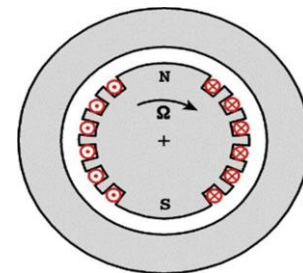
- Rotor à pôles saillants :

C'est un électroaimant dont les pôles sont alternativement nord et sud. Les enroulements sont alimentés en courant continu, ils sont placés autour des noyaux polaires. Le nombre de pôles est toujours pair, il varie suivant la machine.



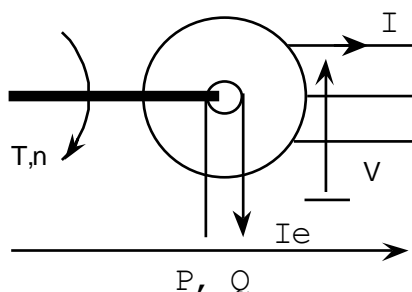
- Rotor à pôles lisses ou Turboalternateur :

Le rotor est un cylindre plein dans lequel on a usiné des encoches. Il possède le plus souvent deux pôles.



#### 2.2. Induit :

Il est au stator, bobines fixes, le plus souvent triphasé. Il est le siège de f.e.m induites



Convention générateur

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi$$

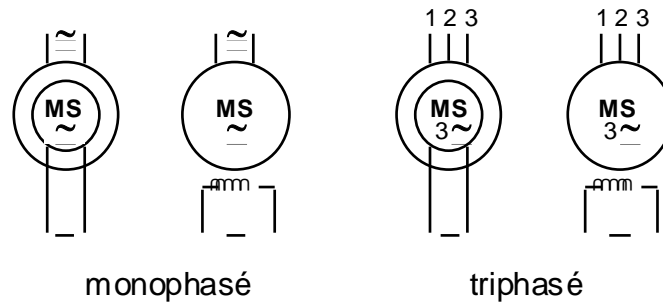
$\phi$  déphasage entrée et I

Il est soumis à un flux tournant, il est donc le siège d'hystérésis et de courants de Foucault. Comme pour le transformateur, nous raisonnerons sur un schéma équivalent.

**3. Utilisation :**

La puissance d'un alternateur à pôles saillants va de quelques kilovolts ampères à 250000 kVA. Il est principalement utilisé, dans les centrales hydrauliques, pour la production d'énergie électrique pour le réseau national. Le turboalternateur, est lui utilisé dans les centrales thermiques ou nucléaires, sa puissance est supérieure à 50000 kVA.

**4. Symbole :**

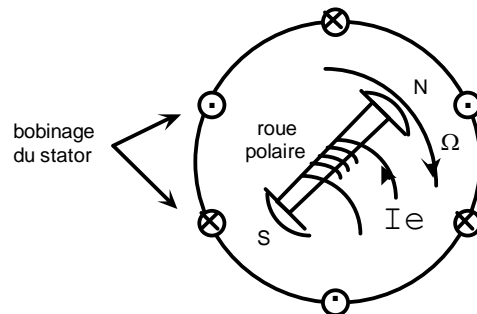


**5. La f.e.m a vide dans un alternateur :**

**5.1. ESSAI A VIDE :**

**5.1.1. Présentation :**

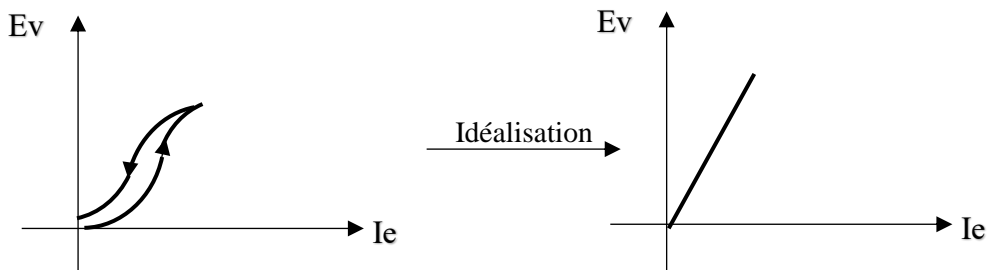
Le stator n'est traversé par aucun courant.  
Le champ tournant est issu de la roue polaire (Traversée par un courant d'excitation  $I_e$ ), entraîné par un système auxiliaire.



Nous récupérons trois f.e.m induites sinusoïdales de valeur efficace  $E_v$ , aux bornes du stator.

**5.1.2. Caractéristique à vide :**

Il varie par valeurs croissantes puis décroissantes, nous relevons  $E_v$ , tension à vide aux bornes d'une phase.



Nous noterons le phénomène d'hystérésis sur la courbe. Ainsi que la saturation de la machine.

**5.1.3. Idéalisation de la caractéristique à vide :**

Nous supposons que la machine n'est pas saturée, seule la partie linéaire de la caractéristique ne sera retenue, pour la suite de notre étude,  $E_v$  restera proportionnelle à  $I_e$ .

## 6. Etude de la f.e.m à vide :

### 6.1. Valeur théorique :

La f.e.m induite  $e_V(t) = E_V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$  est sinusoïdale. Elle est créée par le flux  $\varphi(t)$  issu du champ magnétique tournant porté par la roue polaire, ce flux a pour expression  $\varphi(t)$  avec :

$$\varphi(t) = \varphi_{\max} \cdot \cos(\omega t).$$

Le stator comporte N conducteurs, donc N/2 spires; ainsi :

$$e_V(t) = - \frac{N}{2} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{N}{2} \omega \cdot \varphi_{\max} \cdot \sin(\omega t) = E_V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$$

La valeur théorique de la valeur efficace de la f.e.m  $E_V$  est donc :

$$E_V = \frac{N}{\sqrt{2}} \cdot \pi \cdot f \cdot \varphi_{\max}.$$

Cette valeur efficace est celle de la f.e.m à vide aux bornes de l'alternateur monophasé ou bien celle aux bornes d'une phase et du neutre de l'alternateur triphasé.

### 6.2. Valeur réelle :

En réalité  $\varphi(t)$  n'est pas vraiment sinusoïdale et les différentes f.e.m ne sont pas en phase. La résultante  $e_V(t)$  est le module d'une somme vectorielle. Pour traduire ces imperfections, on introduit un coefficient K qui caractérise la machine. La valeur efficace réelle de la f.e.m à vide s'exprime par la relation :

- **En monophasé :**

A l'intérieur d'une même spire, les forces électromotrices induites s'ajoutent et les différentes spires sont mises en série : tous les conducteurs sont finalement en série. Pour l'enroulement, on aura donc :

$$E_V = K \cdot f \cdot N \cdot \varphi_{\max} \quad \text{avec :}$$

$E_V$  F.e.m induite dans un enroulement en volts

f Fréquence des f.e.m induites en hertz

$\varphi_{\max}$  Flux utile maximal sous un pôle en webers

N Nombre de conducteurs par phase.

K **Coefficient de Kapp** constant pour un alternateur donné tel que :  $K = 2,22 \cdot K_D \cdot K_F$

$K_D$  facteur de distribution voisin de 0,7 et  $K_F$  facteur de forme voisin de 1,05

- **En triphasé :**

Trois enroulements monophasés identiques sont décalés d'un tiers de l'intervalle compris entre deux pôles consécutifs de même nom. L'alternateur est ainsi équivalent à trois alternateurs monophasés identiques que l'on couple soit en triangle soit en étoile. La force électromotrice entre deux enroulements dépend du mode de couplage : la relation précédente donne donc la valeur efficace d'une tension simple si les enroulements sont couplés en étoile, et la valeur d'une tension composée s'ils sont couplés en triangle.

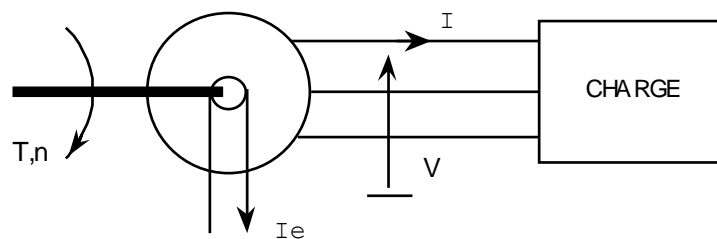
## 7. Alternateur en charge :

### 7.1. ETUDE EN CHARGE :

#### 7.1.1. Présentation :

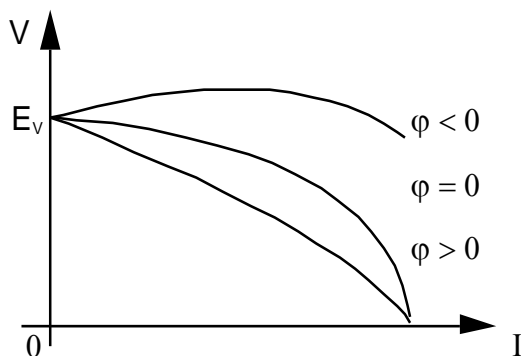
L'état de l'alternateur est fixé par le point de fonctionnement P, qui dépend de deux paramètres variables et trois paramètres constants  $P = f(V ; I ; n ; I_e ; \phi)$

V	tension entre phase et neutre	en volts
I	courant dans un fil de phase	en ampères
n	fréquence de rotation de l'alternateur	en tr / s
$I_e$	courant d'excitation	en ampères
$\phi$	déphasage entre v et i.	



#### 7.1.2. Caractéristique électrique $V = f(I)$ :

L'alternateur triphasé est entraîné à vitesse constante. Il alimente une charge équilibrée. L'intensité  $I_e$  du courant d'excitation est maintenue constante, le déphasage tension courant est imposé par la charge.



Nous remarquons l'effet démagnétisant (qui contraint d'augmenter  $I_e$ ) d'une charge inductive et l'effet magnétisant d'une charge capacitive.

Les chutes de tension sont importantes (20 à 30 fois plus grandes que pour le transformateur) elles ne sont que très partiellement dues aux résistances des enroulements (1 % seulement), la cause principale de ces chutes de tension est l'existence du champ magnétique  $B_i$ , créé par le stator. Lorsque l'induit débite du courant, il crée un champ magnétique, appelé **Réaction Magnétique d'Induit, R.M.I**, qui vient modifier le champ issu de l'inducteur.

**7.1.3. Etude de la R.M.I :**

L'inducteur, porté par le rotor, crée un flux,  $\varphi(t)$ , à l'origine d'une f.e.m induite  $E_v$  au stator (induit). Lorsque l'induit est fermé sur une charge, il est parcouru par des courants sinusoïdaux induits,  $i_1, i_2$  et  $i_3$  qui vont à leurs tours créer un flux variable  $\varphi_i(t)$  qui va diminuer considérablement (cas d'une charge R/L) le flux  $\varphi_{ch}(t)$  résultant, en charge, donc agir sur la f.e.m  $E_{ch}$  de la machine. Cette diminution de  $E_{ch}$  par rapport à  $E_v$  implique une diminution importante de la tension  $V$ .

Le flux  $\varphi$  crée par l'inducteur, induit :  $\underline{E}_v = -j\omega \varphi$

La R.M.I introduit le flux  $\varphi_i$  qui induit :  $\underline{E}_i = -j\omega \varphi_i$

Le flux résultant  $\varphi_{ch}$  s'exprime par la relation vectorielle :  $\vec{\varphi}_{ch} = \vec{\varphi} + \vec{\varphi}_i$

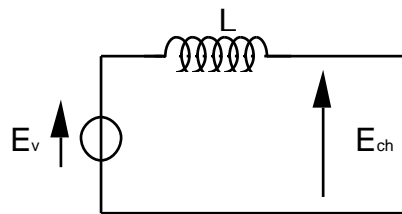
En charge, la f.e.m est donc donnée pour une machine non saturée par la relation :  $\underline{E}_{ch} = \underline{E}_v + \underline{E}_i$

**8. Modelé équivalent d'une phase de l'alternateur :**

**8.1. Représentation du modèle :**

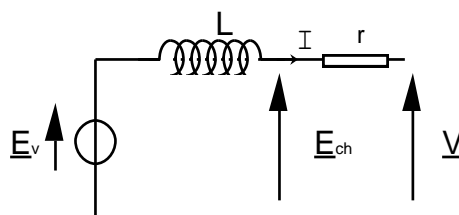
Les hypothèses simplificatrices suivantes seront respectées dans toute la suite de notre étude :

- Charge équilibrée
- Régime permanent
- Rotor à pôles lisses
- Machine non saturée
- Pour tenir compte de la R.M.I, on la modélise électriquement par une bobine d'inductance L :



$X = L\omega$  : appelée réactance synchrone.

Schéma, auquel il faut ajouter une résistance qui rendra compte des pertes par effet joule dans les enroulements. Soit,  $r$ , la résistance d'un enroulement, le modèle équivalent d'une phase de l'alternateur est :



$$v = e_v - L \frac{di}{dt} - r.i$$

$$\underline{V} = \underline{E}_v - j.L.\omega. \underline{I} - r.I$$

Soit :  $X = L\omega$  : la réactance synchrone.

Soit :  $Z = \sqrt{r^2 + L\omega^2}$  : l'impédance synchrone

**8.2. Diagramme de BEHN - ESCHENBOURG :**

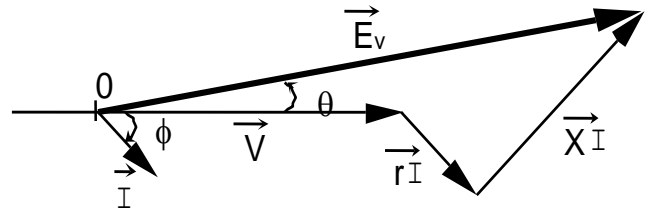
La loi des mailles s'écrit :  $\bar{v} = \bar{e}_v - \bar{u}_L - r.\bar{i}$  Donc  $\vec{V} = \vec{E}_v - X \vec{I} - r \vec{I}$

Connaissant :  $\phi$  Déphasage courant tension, angle imposé par la charge.

- $X = L.\omega$  Réactance synchrone
- $I$  Intensité du courant dans la charge
- $V$  Tension simple

Nous pouvons calculer  $E_v$  :

- On trace  $\vec{V}$ .
- Connaissant  $\phi$ , on trace  $\vec{I}$ , puis  $r\vec{I}$ ,  
colinéaire à  $\vec{I}$ .
- On trace  $X\vec{I}$ .
- On en déduit  $\vec{E}_v$ .
- On peut mesurer  $\Theta$ ,  
angle de décalage interne,  $(\vec{V}; \vec{E}_v)$ .



**Remarque :** nous pouvons utiliser le même procédé pour évaluer  $\vec{V}$ , connaissant  $\vec{E}_v$ . Pour cela : Tracer une droite symbolisant la direction de  $\vec{I}$ , puis tracer  $r\vec{I}$ ,  $X\vec{I}$ , tracer la direction de  $\vec{V}$ , et enfin à l'aide d'un compas rechercher le point d'intersection de  $\vec{V}$  et  $\vec{E}_v$ .

## 9. Détermination des éléments du modelé :

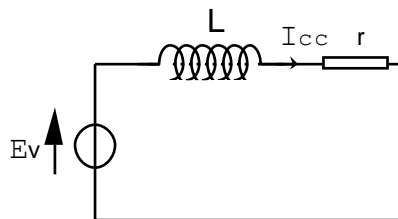
La détermination du modèle de l'alternateur non saturé se fait en trois étapes :

- Tracé de la caractéristique à vide :

La f.e.m synchrone est égale à la f.e.m à vide. On relève, donc, à vitesse constante,  $E_v$  en fonction de  $I_e$ , courant dans l'inducteur, on trace  $E_v = f(I_e)$

- Relevé de la caractéristique en court-circuit :

Les trois enroulements du stator sont couplés en étoile. Le modèle équivalent d'un enroulement de l'alternateur est le suivant :



$$\underline{E}_v = (r + jL\omega) \cdot \underline{I}_{cc} = \underline{Z} \cdot \underline{I}_{cc}$$

L'alternateur est entraîné à vitesse nominale, on mesure les intensités du courant d'excitation et d'un des courants de court-circuit débités dans l'induit, on trace  $I_{cc} = f(I_e)$ .

- Calcul de l'impédance synchrone :

Pour un courant **d'excitation donné**, le module de l'impédance synchrone est donné par la relation :

$$\underline{Z} = \frac{\underline{E}_v}{\underline{I}_{cc}}$$

**10. bilan des puissances :****10.1. PUISSANCE UTILE :**

U : Tension entre deux bornes de phases.  
 I : Intensité du courant de ligne.  
 Cos( $\phi$ ) Facteur de puissance imposé par la charge.

$$\begin{aligned} \text{En monophasé : } & P_u = UI \cdot \cos(\phi) \\ \text{En triphasé : } & P_u = UI \cdot \sqrt{3} \cdot \cos(\phi) \end{aligned}$$

**10.2. BILAN DES PERTES :**

- La puissance reçue :

L'alternateur reçoit une puissance mécanique  $P_M$  qui lui est fournie par le moteur d'entraînement :

$$P_M = T_M \cdot \Omega$$

- Les pertes collectives :

Ce sont des pertes mécaniques ( $P_m$ ), qui ne dépendent que de la fréquence de rotation et les pertes dans le fer ( $P_f$ ), qui ne dépendent que de la fréquence et de la valeur maximale du flux. Ces pertes seront mesurées au cours d'un essai à vide dans lequel la machine tourne à la fréquence de rotation nominale, sous une tension égale à la tension qu'elle aurait en charge. En effet, l'égalité des tensions efficaces entraîne celle des flux.

- Les pertes par effet Joule dans l'inducteur :

U<sub>e</sub> : Tension aux bornes de l'inducteur.  
 I<sub>e</sub> : Intensité du courant d'excitation.

$$P_{je} = U_e \cdot I_e$$

- Les pertes par effet Joule dans l'induit :

- En monophasé :

r : Résistance de l'enroulement induit.  
 I : Intensité efficace du courant débité par l'induit.

$$P_j = r \cdot I^2$$

- En triphasé :

r : Résistance mesurée entre deux bornes de phase de la machine.  
 I : Intensité efficace du courant de ligne.

$$P_j = \frac{3}{2} r \cdot I^2$$

- Rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{UI\sqrt{3}\cos\phi}{UI\sqrt{3}\cos\phi + P_m + P_{je} + P_j}$$

## 11. Avantages / Inconvénients.

Nous allons comparer les moteurs brushless à leurs concurrents les MCC à aimants. Ces 2 types de machines étant utilisés comme actionneurs électrique pour des applications demandant une dynamique très importante (robotique, machine-outil).

	<b>Moteur brushless</b>	<b>MCC à aimants</b>
<b>Avantages</b>	<p><b><u>Caractéristiques générales</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Pas d'entretien (pas de collecteur)→ Utilisable en atmosphère explosive, corrosive.</li> <li>■ Excellente dissipation thermique.(Pj au stator seulement).</li> </ul> <p><b><u>Caractéristiques dynamiques et statiques</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Puissance massique &gt;&gt; (P/m :kw/kg)</li> <li>■ Vitesse max &gt;&gt;. (pas de collecteur).</li> <li>■ Faible inertie (forte accélération).</li> <li>■ BP mécanique&gt;&gt;→(dynamique &gt;&gt; possible).</li> </ul>	<p><b><u>Caractéristiques générales</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Simplicité du variateur (hacheur).</li> <li>■ Prix bas.</li> <li>■ Pas d'électronique interne.</li> </ul> <p><b><u>Caractéristiques dynamiques et statiques</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Bien adaptée aux basses vitesses où elles ont une régularité de marche excellente.</li> </ul>
<b>Inconvénients</b>	<p><b><u>Caractéristiques générales</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Electronique interne.</li> <li>■ Prix élevé.</li> <li>■ Structure d'alimentation et de régulation complexe mais maîtrisée.</li> </ul> <p><b><u>Caractéristiques dynamiques et statiques</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ A basse vitesse les harmoniques peuvent créer des ondulations de couple.</li> </ul>	<p><b><u>Caractéristiques générales</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Entretien (balais, collecteurs).</li> <li>■ Se dégrade en atmosphère corrosive, explosive.</li> </ul> <p><b><u>Caractéristiques dynamiques et statiques</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Vitesse max limitée par le collecteur.</li> <li>■ Puissance massique &lt;&lt;MS</li> <li>■ Inertie &gt;&gt;MS</li> <li>■ BP mécanique &lt;&lt;MS</li> </ul>