

# MACHINES A COURANT ALTERNATIF

## 1. Principe de fonctionnement des machines à courant alternatif.

Dans les machines électriques à courant alternatif (synchrone et asynchrone), le couple électromagnétique est dû à l'interaction de deux champs magnétiques tournants, le champ tournant créé par le courant circulant dans l'enroulement rotorique et le champ tournant produit par les courants sinusoïdaux qui parcourent les enroulements du stator.

## 2. Notion de champ tournant

### 2.1 Utilisation d'un aimant permanent

#### Expérience

On dispose une petite aiguille aimantée dans l'entrefer d'un aimant en U : elle s'oriente sous l'action du champ magnétique créé par l'aimant (Fig. 1).

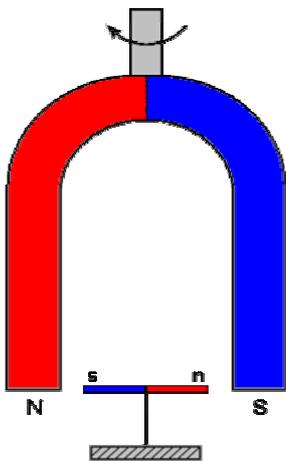


Figure 01

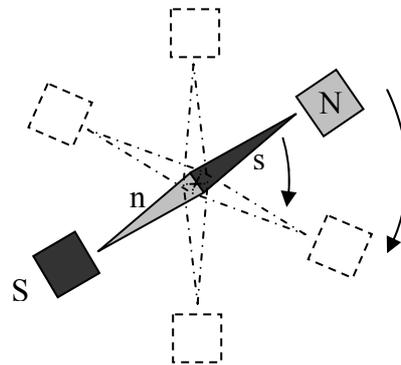


Figure 02

Si l'on entraîne l'aimant en U à l'aide d'un système mécanique tournant à vitesse constante, l'aiguille aimantée tourne dans le même sens, à la **même vitesse** : il s'agit d'une rotation **synchrone** (Fig. 2).

→ La rotation de l'aimant crée un champ magnétique tournant.

### 2.2 Utilisation d'un système triphasé de courants

Expérience 1 : Soient trois bobines identiques ( $B_1$ ,  $B_2$  et  $B_3$ ) décalées spatialement de  $120^\circ$  l'une par rapport à l'autre et alimentées par des courants sinusoïdaux de même pulsation, de même amplitude et déphasés temporellement de  $120^\circ$  les uns par rapport aux autres (Fig. 3). En plaçant une aiguille aimantée au centre du système, celle-ci tourne spontanément et sa fréquence de rotation, mesurée à l'aide d'un stroboscope, est  $n_s = 50$  tr/s. En permutant les liaisons électriques des bobines  $B_2$  et  $B_3$  : L'aiguille aimantée tourne encore spontanément mais en sens inverse ; sa fréquence de rotation reste identique.

→ L'ensemble des trois bobines, convenablement alimentées, crée un champ tournant. Celui-ci est mis en évidence par l'aiguille aimantée dont la fréquence de rotation est exactement égale à la fréquence des courant :  $n_s = f$ .

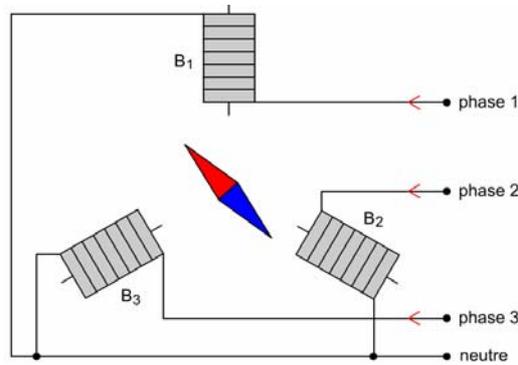


Figure 03

**Expérience2 :** L'aiguille aimantée est remplacée par un cylindre creux en cuivre (Fig. 4). Le système des bobines et son alimentation sont inchangés. Dès que les trois bobines sont alimentées, le cylindre se met à tourner. Ce mouvement s'explique par la loi de Lenz. Le déplacement relatif du champ et du disque crée des courants induits dans celui-ci et l'action électromagnétique qui en résulte tend à faire disparaître la cause qui leur a donné naissance. Pour faire disparaître le déplacement relatif, le disque tourne dans le même sens que le champ. La fréquence de rotation observée est assez faible, et dans les conditions de notre expérience, très inférieure à la fréquence de synchronisme : la rotation est asynchrone.

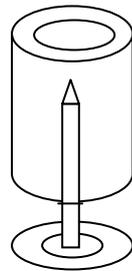
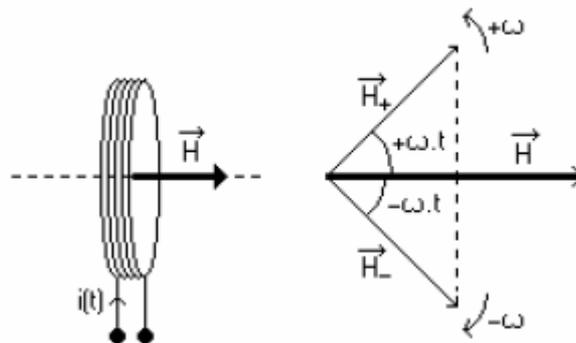


Figure 04

### 2.3 Théorème de Leblanc.

Considérons un bobinage d'axe  $Ox$  parcouru par un courant  $i(t) = I \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\omega t)$ . Ce dispositif permet de créer un champ sur l'axe  $Ox$  défini par  $\vec{H} = H_m \cdot \cos(\omega t) \cdot \vec{u}_x$



Considérons deux champs  $H_+$  et  $H_-$  de norme constante  $H_m/2$  qui tournent en sens inverse à des vitesses  $\omega$  et  $-\omega$ . On constate alors que :

$$\vec{H}_+ + \vec{H}_- = \left[ \frac{H_m}{2} \cdot \cos(\omega t) \cdot \vec{u}_x + \frac{H_m}{2} \cdot \sin(\omega t) \cdot \vec{u}_y \right] + \left[ \frac{H_m}{2} \cdot \cos(-\omega t) \cdot \vec{u}_x + \frac{H_m}{2} \cdot \sin(-\omega t) \cdot \vec{u}_y \right]$$

Soit :

$$\vec{H}_+ + \vec{H}_- = H_m \cdot \cos(\omega t) \cdot \vec{u}_x = \vec{H}$$

#### Théorème de Leblanc:

Un bobinage alimenté par un courant  $i(t) = I\sqrt{2} \cdot \cos(\omega t)$  crée un champ  $\vec{H} = H_m \cdot \cos(\omega t) \cdot \vec{u}_x$  qui est équivalent à la somme de deux champs de norme constante  $H_m/2$  qui tournent en sens inverse aux vitesses  $\omega$  et  $-\omega$ .

**Conclusion:** Ce théorème permet de comprendre comment obtenir un champ tournant au moyen d'un seul bobinage ce qui permet d'expliquer le fonctionnement des machines monophasées.

### 3. La machine synchrone

La machine synchrone est un système électrique permettant de convertir de l'énergie mécanique en énergie électrique (génératrice) et inversement (moteur). C'est ce type de machine qui fournit l'énergie électrique appelée par le réseau de distribution dans les centrales électriques (on parle d'alternateur). Néanmoins, on la rencontre peu dans les applications domestiques, car elle est plus coûteuse à fabriquer et moins robuste que la machine asynchrone que nous verrons par la suite et elle ne peut pas démarrer simplement de façon autonome...

#### 3.1. Structure.

Comme dans toutes les machines tournantes, on distingue la partie fixe appelée stator, de la partie tournante appelée rotor. Le stator permet de créer un champ tournant au moyen de courants alternatifs alors que le rotor va créer un champ continu qui va tourner lors de la rotation de la machine. Le couplage entre les deux champs nous permettra d'expliquer le fonctionnement du système.

##### 3.1.1 Le rotor.

Le rotor, portant le plus souvent l'inducteur, va permettre de créer un moment magnétique  $\vec{M}$ , soit à partir d'un aimant permanent (matériau dur) soit à partir d'un électroaimant alimenté par un courant continu  $J$ , appelé courant d'excitation. Dans les deux cas, le rotor comprend un circuit magnétique (matériau doux) qui permet de canaliser le flux, afin d'avoir un meilleur couplage possible entre rotor et stator.

On distingue les machines à pôles lisses, pour lesquelles l'ensemble rotor-stator présente une réluctance pratiquement constante, des machines à pôles saillants pour lesquelles cette réluctance varie notablement.

##### *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.

##### **Remarques :**

- Nous verrons que, quand la machine fonctionne, le rotor tourne à la même vitesse que le champ tournant créé par le stator. Il n'y a donc pas de phénomènes inductifs à prendre en compte dans la partie massive du rotor, qui n'a pas besoin d'être feuilleté (fabriqué à partir de tôles isolées), ce qui augmente la solidité de l'ensemble.
- Il faut apporter le courant continu  $I_e$  à l'inducteur par l'intermédiaire de bagues et de balais.

### 3.1.2. Le stator

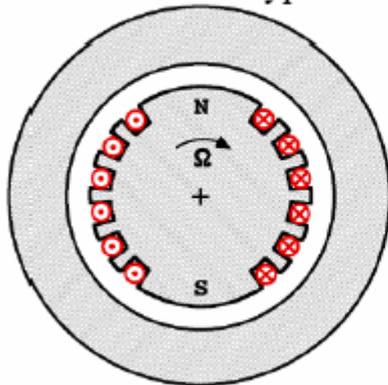
Il porte le bobinage triphasé (induit) qui permet de créer un champ tournant.

#### Remarques :

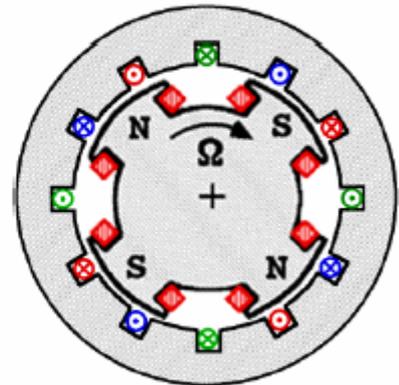
- Contrairement au rotor, le stator est siège de variations temporelles de flux magnétique. Pour éviter les courants de Foucault, il va devoir être **feuilleté**.
- La partie séparant rotor et stator est appelé **entrefer**.
- Les stators sont conçus (circuit magnétique, bobinages...), de telle sorte que le champ créé dans l'entrefer soit radial à répartition spatiale sinusoïdale, i.e. qu'il soit de direction radiale, quelle que soit la position angulaire dans l'entrefer et qu'à tout instant, il prenne le plus possible la forme d'une fonction sinusoïdale de la position angulaire. De ce fait, on évite de créer des champs tournants harmoniques qui sont préjudiciables au bon fonctionnement des machines (pertes supplémentaires occasionnées au rotor...).

### 3.1.3. Vue d'ensemble

Représentation de deux types de machines synchrones.



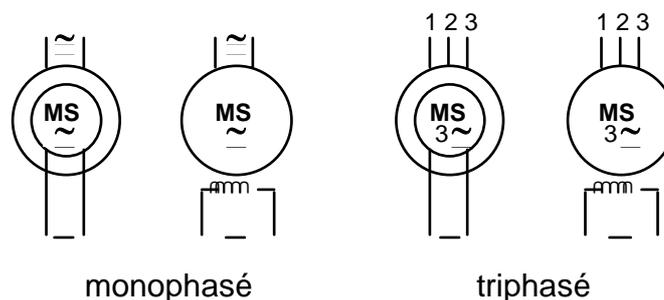
Machine à pôles lisses



Machine à pôles saillants

**rq:** La réalisation du bobinage au stator est très complexe. En fait, le bobinage d'une phase est réparti dans des encoches réalisées sur toute la surface en regard avec le rotor. La position et le nombre de conducteurs des encoches sont calculés pour obtenir un champ à répartition spatiale sinusoïdale.

#### SYMBOLE :



#### 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.

### 3.2. Remarque sur la vitesse de rotation.

Dans la pratique, pour limiter la vitesse des machines, on peut augmenter le nombre de paires de pôles. La vitesse de rotation  $\Omega$  de la machine est alors proportionnelle à la pulsation  $\omega$  des courants au stator et la relation entre elles est :

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \quad \text{ou} \quad n_s = \frac{f}{p}$$

où  $p$  est le nombre de paires de pôles de la machine.

Pour une machine à 1 paire de pôles alimentée par des courants à 50 Hz, on a  $\Omega=100.\pi\text{rad/s}$  soit 3000 t/min. Pour une machine à 2 paires de pôles, la vitesse de rotation sera de 1500 t/min.

### 3.3 f.é.m. induite

Un enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant de l'entrefer est le siège d'une f.é.m.  $e(t)$  de valeur efficace  $E$ .

$$E = KN\Phi f = KN\Phi p n_s = K' \Phi n_s \quad \text{finalement : } \boxed{E = K' \Phi n_s}$$

$E$  : f.é.m. induit (V)

$K$  : coefficient de Kapp (caractéristique de la machine) (En général proche de 2,22)

$N$  : nombre de conducteurs d'une phase de la machine (1 spire = 2 conducteurs)

$\Phi$  : flux maximum à travers un enroulement (Wb)

$f$  : fréquence du courant statorique

$p$  : nombre de paires de pôles

$n_s$  : vitesse de rotation ( $\text{trs.s}^{-1}$ )

$K' = KNp$  : constante globale (caractéristique du moteur)

#### Remarques :

Cette valeur efficace est celle de la f.é.m à vide aux bornes de l'alternateur monophasé ou bien celle aux bornes d'une phase et du neutre de l'alternateur triphasé. Dans ce dernier cas, on obtient trois f.é.m.  $e_1(t)$   $e_2(t)$  et  $e_3(t)$  de même valeur efficace  $E$  et déphasées de  $2\pi/3$ .

### 3.4 Modes de fonctionnement

La machine synchrone est réversible.

#### 3.4.1 Fonctionnement en moteur

Le champ tournant du stator « accroche » le champ lié au rotor à la vitesse  $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$ .

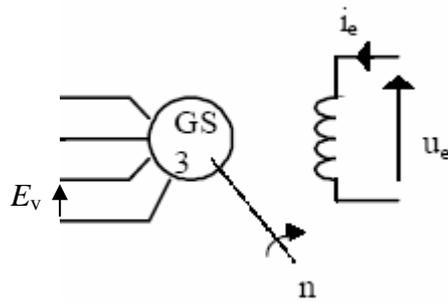
#### 3.4.2 Fonctionnement en alternateur (génératrice)

Le rotor et son champ sont entraînés par une turbine. Les bobines de l'induit sont alors le siège de f.é.m. alternative de pulsation  $\omega = p.\Omega_s$  ( $f = p.n_s$ ).

**Rappel :** toute variation de champ magnétique à travers une bobine crée aux bornes de la bobine une f.é.m. induite.

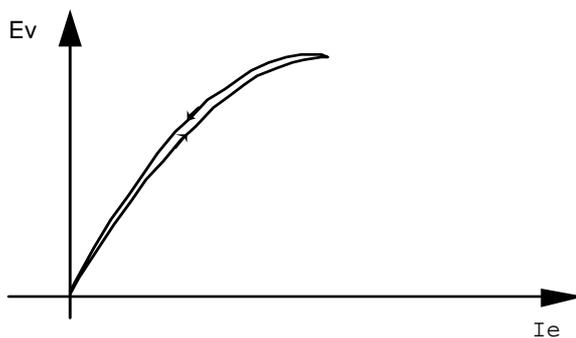
### 3.5 Caractéristiques d'un alternateur

#### 3.5.1 A vide $E_v (i_e)$ à fréquence de rotation constante



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.é.m induites sinusoïdales de valeur efficace  $E_v$ , aux bornes du stator.

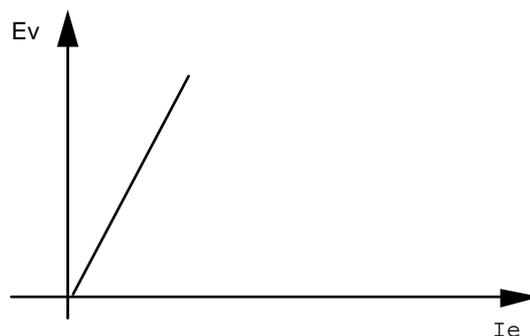
En variant  $I_e$  par valeurs croissantes puis décroissantes, nous relevons  $E_v$ , tension à vide aux bornes d'une phase.



Nous noterons le phénomène d'hystérésis sur la courbe, ainsi que la saturation de la machine

#### - c - 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  $I_e$ .



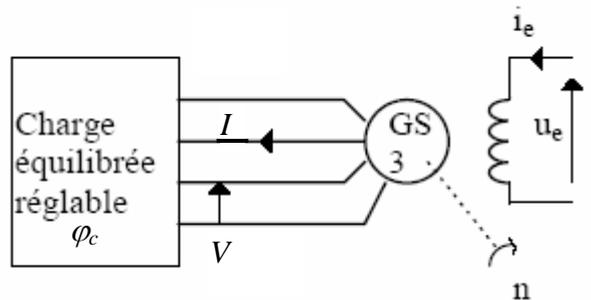
### 3.5.2 ALTERNATEUR EN CHARGE

#### - A - ETUDE EN CHARGE :

##### - a - présentation :

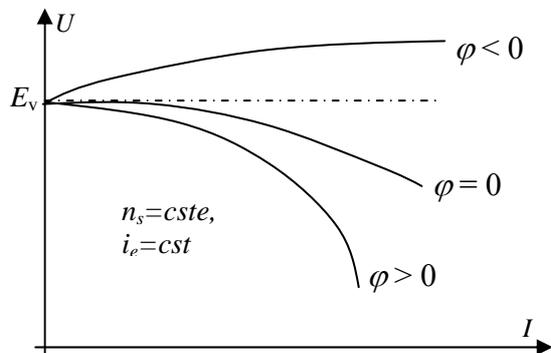
L'état de l'alternateur est fixé par le point de fonctionnement P, qui dépend de deux paramètres variables et trois paramètres constants  $P = f(V ; I ; n_s ; I_e ; \varphi)$

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



##### - b - 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

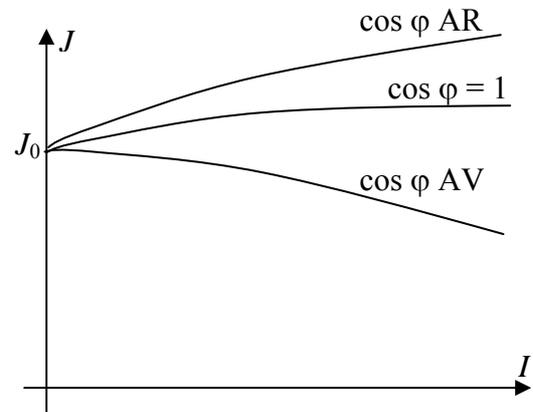
Les chutes de tension sont importantes (20 à 30 fois plus grandes que pour le transformateur) elles ne sont que très partiellement dues aux résistances des enroulements (1 % seulement), la cause principale de ces chutes de tension est l'existence du champ magnétique  $B_i$ , créé par le stator. Lorsque 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.

##### - c - Réaction magnétique d'induit

Le stator, dont les enroulements sont maintenant traversés par des courants induits triphasés, créent un champ magnétique tournant à la fréquence de synchronisme. Si le circuit magnétique n'est pas saturé, ce champ se compose à chaque instant vectoriellement à celui du rotor, qui tourne à la même vitesse. Le champ résultant, donc le flux est modifié, ce qui entraîne une modification de la f.é.m induite.

- d – Caractéristique de réglage:  $J=f(I)$

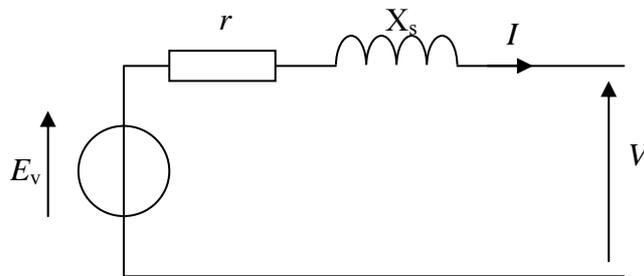
Il y a une caractéristique de réglage  $J=f(I)$  à  $V$  constante pour chaque valeur de  $\varphi$ . Plus le récepteur est inductif plus il faut augmenter le courant d'excitation  $J$  pour maintenir  $V$  constante quand  $I$  augmente.



- B - MODELE EQUIVALENT D'UNE PHASE DE L'ALTERNATEUR :

**Modèle équivalent de Behn Eschenbourg :**

Lorsque la machine synchrone n'est pas saturée, on peut, pour étudier son fonctionnement, proposer le modèle équivalent de Behn Eschenbourg :



La résistance  $r$ , correspond à la résistance de l'induit par phase. On la détermine par une mesure voltampéremétrique, à chaud et en continu.

$X_s=L_s.\omega$  correspond à la réactance synchrone.  $L_s$  est appelée inductance synchrone et englobe l'inductance de fuite par phase et l'inductance équivalente qui traduit la chute de tension due à la réaction magnétique d'induit (machine à pôles lisses).

$E_v$  correspond à la force électromotrice à vide de la machine, et dépend, du courant d'excitation circulant dans la roue polaire.

La loi des mailles s'écrit :  $v = e_v - u_L - u_R \quad \Rightarrow \quad v = e_v - L \frac{di}{dt} - r.i$

En utilisant les complexes :  $\dot{V} = \dot{E}_v - jL\omega.\dot{I} - r.\dot{I}$

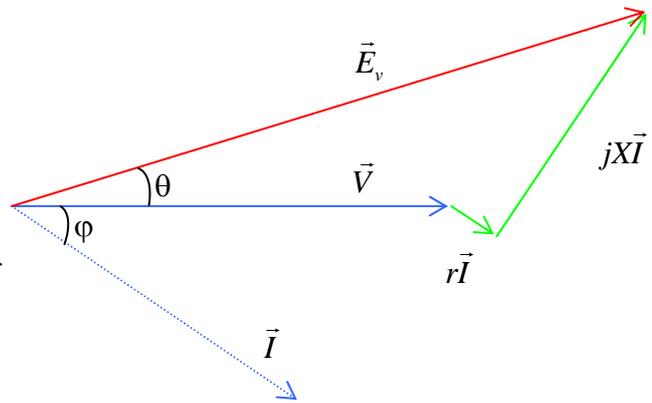
Donc :  $\vec{V} = \vec{E}_v - X\vec{I} - r\vec{I}$

Connaissant :

- $\varphi$  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  $\varphi$ , 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  $V$ , connaissant  $E_v$ . 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  $\vec{E}_v$ .

### Détermination des éléments du modèle :

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

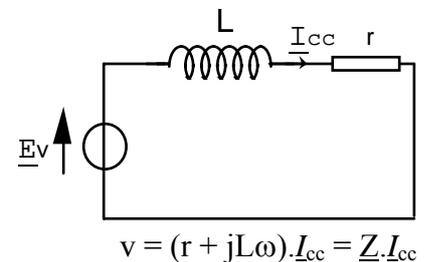
- *Tracé de la caractéristique à vide :*

La f.é.m synchrone est égale à la f.é.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 :

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 :  $Z = \frac{E_v}{I_{cc}}$

### 3.6 BILAN DES PUISSANCES :

- a - **PUISSANCE UTILE** :

U : Tension entre deux bornes de phases.  
 I : Intensité du courant de ligne.  
 $\cos\varphi$  : Facteur de puissance imposé par la charge.

En monophasé :  $P_u = UI.\cos\varphi$   
 En triphasé :  $P_u = \sqrt{3}.UI.\cos\varphi$

## - b - BILAN DES PERTES :

- La puissance reçue :

L'alternateur reçoit une puissance mécanique qui lui est fournie par le moteur d'entraînement :  $P_M = C_M \cdot \Omega$

- 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:  $P_{j_e} = U_e \cdot I_e$

$U_e$  : Tension aux bornes de l'inducteur.

$I_e$  : Intensité du courant d'excitation.

- Les pertes par effet Joule dans l'induit :

- En monophasé :  $P_j = r \cdot I^2$

$r$  : Résistance de l'enroulement induit.

$I$  : Intensité efficace du courant débité par l'induit.

- En triphasé :  $P_j = \frac{3}{2} r \cdot I^2$

$r$  : Résistance mesurée entre deux bornes de phase de la machine.

$I$  : Intensité efficace du courant de ligne.

- Rendement :  $\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{UI\sqrt{3}\cos\varphi}{UI\sqrt{3}\cos\varphi + P_m + P_{j_e} + P_j}$

## 9 Compléments sur le moteur synchrone

### a- Avantages et inconvénients.

L'inconvénient principal de la machine synchrone est que son démarrage n'est pas autonome. Elle est également plus coûteuse à réaliser que la plupart des machines asynchrones. Elle nécessite une excitation, c'est-à-dire une deuxième source d'énergie. Si le couple résistant dépasse une certaine limite, le moteur décroche et s'arrête.

Ses principaux avantages sont de tourner à vitesse constante et de pouvoir fournir des tensions triphasées équilibrées de fréquence stable. De plus, elle peut fournir du réactif (comme une capacité). La machine synchrone est plus facile à réaliser et plus robuste que le moteur à courant continu. Son rendement est proche de 99%.

## b- Utilisations

### Moteurs

• Ils sont utilisés en forte puissance (1 à 10 MW - compresseur de pompe, concasseur); toutefois pour faire varier la vitesse, il faut faire varier la fréquence des courants statoriques. Il a donc fallu attendre le développement de l'électronique de puissance pour commander des moteurs autosynchrones ou synchrones auto-pilotés.

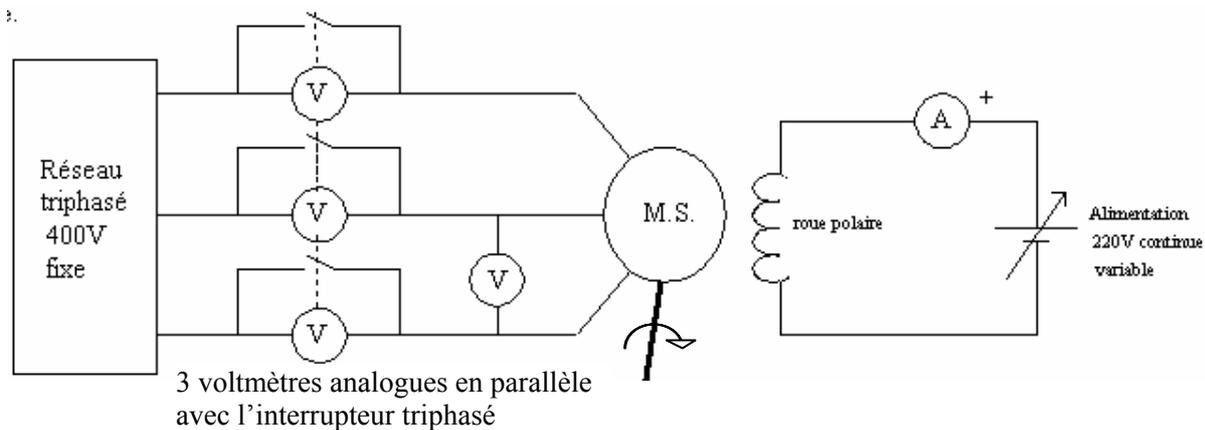
• Dans le domaine des faibles puissances, les rotors sont à aimants permanents. L'intérêt de ces moteurs réside dans la régularité de la vitesse de rotation (tourne-disque, appareil enregistreur, programmeur, servomoteur).

• Le moteur synchrone peut également être utilisé comme source de puissance réactive  $Q$  pour relever le facteur de puissance  $\cos j$  d'une installation électrique.

### Alternateurs

Ils fournissent l'énergie du réseau électrique. On les trouve dans les barrages.

### Couplage de l'alternateur sur le réseau



### Mode opératoire :

Dans un premier temps, **interrupteur triphasé ouvert**, on entraîne l'alternateur, puis on alimente l'inducteur (roue polaire). On augmente alors progressivement la tension, et on observe les voltmètres. Il est nécessaire à ce stade de vérifier que l'ordre des phases est le même pour le réseau triphasé de la table, et pour la machine synchrone. Il existe deux systèmes simples à mettre en œuvre pour effectuer cette vérification :

- La première est l'utilisation de 3 lampes (branchées à la place des voltmètres). Lorsque les lampes s'éclairent et s'éteignent simultanément, lorsque l'on s'approche de  $1500 \text{ tr.min}^{-1}$ , c'est que l'alternateur et le réseau sont de sens. On peut alors passer à l'étape suivante. Sinon, il est nécessaire de croiser deux phases.
- La deuxième est de remplacer les lampes par des voltmètres analogiques. On observera les déviations des aiguilles. Si elles évoluent de la même façon et en même temps, alors les deux réseaux sont de même sens, sinon, il faut croiser deux phases.

Une fois que l'on a vérifié l'ordre des phases, il faut, pour connecter l'alternateur sur le réseau, s'assurer de **l'égalité des tensions** et de **l'égalité des fréquences**. Pour cela, on se place à la vitesse de synchronisme ( $1500 \text{ tr.min}^{-1}$ ), puis on excite l'alternateur pour qu'il fournisse une tension égale à celle du réseau.

Comme il subsiste une petite différence de fréquence entre la tension du réseau et celle fournie par la machine synchrone, les voltmètres seront soumis à une différence de potentiel de fréquence égale aux différences des fréquences. Cette ddp, en valeur instantanée, augmentera et diminuera périodiquement. On cherchera à rendre cette période la plus grande possible en ajustant la vitesse de rotation du groupe. **Quand cette ddp passe par 0**, on peut, à cet instant, **fermer l'interrupteur triphasé**. L'alternateur est alors connecté au réseau.