MACHINE SYNCHRONE

1. **Présentation**

La machine synchrone est un convertisseur tournant transformant de façon réversible l’énergie électrique de type alternative (sinusoïdale) en énergie mécanique.

Comme elle est réversible, la machine synchrone possède deux types de fonctionnement :

* Moteur synchrone :

Le moteur synchrone convertit l’énergie électrique alternative en énergie \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.

* Génératrice synchrone appelée plus couramment **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**:

Un alternateur convertit de l’énergie mécanique en énergie électrique alternative. L’alternateur est l’appareil qui fabrique l’énergie électrique du réseau triphasé dans les centrales électriques.

1. **Constitution**
   1. **Principe de fonctionnement**

Dans le chapitre « champ tournant », nous avions vu qu’en générant un champ magnétique tournant grâce à 3p bobines disposées à 120°/p l’une de l’autre, alimentée en régime sinusoïdal triphasé, nous pouvions, au centre du dispositif, créer un \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ à une fréquence de rotation dont la valeur dépend de la \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ du réseau alimentant les bobines. La fréquence de rotation du champ magnétique tournant est appelée \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_, notée *ns* et vérifie la relation suivante :

Où *f* est la fréquence des tensions du réseau et *p* le \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ du dispositif. *ns* est alors exprimée en tr/s.

Pour exprimer *ns* en tr/min, il faut utiliser la relation suivante :

Si au centre du dispositif décrit précédemment, on place un aimant ou un électroaimant possédant le même nombre de paire de pôles qu’au stator, celui-ci suivra exactement la rotation du champ magnétique tournant à condition de le lancer.

C’est le principe de rotation du moteur synchrone dont la vitesse de rotation du rotor est rigoureusement égale à la vitesse de rotation du champ magnétique tournant :

*\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_*

A l’inverse, si l’aimant ou l’électroaimant du rotor est entraînée par un moteur externe accouplé à la machine synchrone. Le rotor crée un champ magnétique tournant à la fréquence *\_\_\_\_\_\_\_\_*. Les bobines du stator voient alors défiler ce champ magnétique, elles sont donc soumises à un flux variable et, d’après la \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_, sont sièges d’une fem induite. Ainsi, le stator crée, par induction électromagnétique, un système triphasé de tensions sinusoïdales de fréquence *f* telle que :

*\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_*

C’est le principe de fonctionnement de \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

* 1. **L’inducteur ou rotor**

Il est constitué d’électroaimants alimentés en courant continu ou d’aimants permanents créant 2p pôles inducteurs, successivement nord et sud.

Dans les alternateurs industriels, il existe deux types de rotors :

* Les rotors à pôles lisses des alternateurs des centrales thermiques ou nucléaires, entraînés par des turbines à vapeur, tournent à grande vitesse et possède peu de pôles (2 à 4). (cf fig 1)
* Les rotors à pôles saillants, ou roues polaires, des centrales hydrauliques sont entraînés par des chutes d’eau. Ils comportent davantage de pôles et tournent plus lentement. (cf fig 2)

Les groupes électrogènes, plus petits, sont construits de cette façon.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Fig 1 : schéma de principe d’un alternateur à deux paires de pôles lisses. | Fig 2 : Schéma de principe d’un alternateur à trois paires de pôles saillants. |

* 1. **L’induit ou stator**

Des conducteurs placés dans des encoches autour de la carcasse de la machine sont groupés pour former 3p bobines chacune placée à 120°/p l’une de l’autre.

* 1. **Symbole de l’alternateur ou génératrice synchrone**

Induit ou stator

Inducteur ou rotor



1. **Expression des forces électromotrices induites**

La fem induite est créée par induction électromagnétique par l’intermédiaire de la loi de Faraday. Sa valeur est d’autant plus intense que :

* La valeur du \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ *max* sous un pôle inducteur est intense.
* La valeur de la \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ donc la valeur de la fréquence *f* des tensions induites est élevée.
* Le \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ par phase du stator *N* est élevé.

La fem d’une phase du rotor vérifie la relation suivante :

*\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_*

Suivant le couplage, cette fem correspond à:

* En étoile, la fem entre phase et neutre. On la notera alors *EPN.*
* En triangle, la fem entre deux et phases. On la notera alors *EPP.*

*K* est \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ de l’alternateur.

Remarque : en alternateur, la machine synchrone est toujours couplée en étoile pour éviter les courants de circulation à vide entre les branches du triangle.

1. **Fonctionnement de l’alternateur**
   1. **Excitation de l’alternateur**

Une source extérieure de tension continue fournit l’énergie au rotor par l’intermédiaire de balais frottant sur des bagues isolées.

* 1. **Etude à vide**

Le rotor est entraîné à fréquence de rotation constante.

On relève les variations de la \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ *EPN* en fonction du \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ *ie* du rotor. *EPN* est égale à la tension à vide de l’alternateur : *EPN = V0.*

On relève donc *\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.*

Pour cela, on réalise le montage suivant :

3

*U0*

*ue*

2

*nsN*

*I = 0*

-

1

+



*ie*

*V0*

N

Comme *EPN = K.N.f.max = K.N.p.n.max(ie) = K’.max(ie)* où *K’* est une constante.

La caractéristique obtenue donne donc les propriétés du \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_, elle correspond à la courbe de \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ de ce circuit magnétique.

B

*EPN (V)*

A

*n = cte*

*ie (A)*

*0*

Trois zones de fonctionnement :

* Avant A : fonctionnement \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_, le circuit magnétique n’est pas \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.
* De A à B : \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_, le circuit magnétique reste peu saturé.
* Après B : le circuit magnétique est \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.

Si on souhaite éviter la saturation du circuit magnétique, on choisira le courant d’excitation nominal au point A.

* 1. **Etude en charge**

Le rotor est entraîné à fréquence de rotation constante. Le courant d’excitation est maintenu constant égal à sa valeur nominale.

Le stator est couplé en étoile et débite dans une charge triphasée équilibré réglable. On relève *V = f(I).*

Pour cela, on realise le montage suivant :

1

2

3

N

*I*

*U*

*V*



*ieN*

*ue*

+

-

*nsN*

Charge

électrique

On remarque que la chute de tension aux bornes de l’induit augmente avec la charge.

*V (V)*

*I (A)*

*0*

*EPN*

Cette chute de tension dépend du facteur de puissance de la charge et de la valeur efficace de l’intensité du courant de ligne qu’elle appelle.

* 1. **Modèle équivalent d’une phase de l’alternateur**

Chaque phase de l’alternateur se comporte comme un générateur de tension parfait de fem *EPN* et d’une impédance de nature \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ dû à \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ et à la \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ d’un enroulement. On modélisera alors une phase de l’alternateur par le schéma équivalent ci-dessous :



*EPN*

# V

*X*

# R

*I*

* *EPN* est la fem d’une phase (entre phase et neutre) exprimée en Volt (V).
* *X = L* est la \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ d’une phase exprimée en Ohm ().
* *R* est la \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ d’un enroulement.
* *I* est la valeur efficace du \_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.
* *V* est la tension entre phase et neutre (\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_).

Si on applique la loi des mailles sur le schéma équivalent, on obtient la relation suivante :

*\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_*

Attention, cette loi des mailles ne peut être appliquée que sur les valeurs instantanées, ou les grandeurs complexes associées, ou les vecteurs de Fresnel associées.

* 1. **Diagramme synchrone d’une phase**

Le diagramme synchrone d’une phase est le diagramme de Fresnel associé à la loi des mailles obtenues au paragraphe précédent. Il porte aussi le nom de diagramme de Behn-Eschenburg.

Ainsi, vectoriellement, on écrit :

Comme il s’agit d’un schéma série, où le courant et commun à chaque élément du montage, le vecteur  est choisit comme référence des phases :

φ

*φ* est le déphasage entre une \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ et son \_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_, donc *cos φ* correspond au \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ de la charge électrique alimentée.

* 1. **Exercice d’application**

On donne *EPN = 240 V* , *R = 0,5 * , *X = 25*  Déterminer la valeur efficace de la tension entre deux bornes de phases de l’alternateur (stator couplé en étoile), lorsqu’il débite *5 A* dans une charge triphasée équilibrée inductive de facteur de puissance *0,85*.

Echelle 1 cm : 20 V

* 1. **Détermination des éléments du modèle équivalent**

La fem est déterminée par un \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ comme décrit au paragraphe 4.2.

La résistance d’une phase est mesurée par une méthode \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.

Pour déterminer la valeur de la réactance synchrone, on réalise un \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ au cours duquel on relève les valeurs de la valeur efficace du courant de court-circuit *ICC* en fonction du courant d’excitation *ie*.

Si l’induit est court-circuité, le schéma équivalent devient :



*EPN*

# ICC

*X*

# R

La loi des mailles devient :

Comme généralement *R* est négligeable devant *X*, *\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_*, équation aussi vérifiée en valeur efficace, donc :

1. **Bilan de puissance (en fonctionnement alternateur)**
   1. **Puissance absorbée**

La puissance absorbée est de type \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_, fournie par le moteur d’entraînement. Si le moteur d’entraînement fournit un couple mécanique *TM* à l’alternateur et l’entraîne à la vitesse **, alors la puissance fournie par le moteur vérifie la relation suivante :

*\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_*

Au totale, la puissance absorbée par l’alternateur est égale à la puissance mécanique fournie par le moteur plus la puissance absorbée à \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ :

*\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_*

* 1. **Puissance utile et rendement**

La puissance utile est la puissance électrique que reçoit la charge électrique triphasée dans laquelle l’alternateur débite :

*\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_*

Le facteur de puissance ainsi que la valeur efficace de l’intensité en ligne sont \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ par la charge.

Le rendement vérifie la relation :



* 1. **Les pertes**
* Pertes par effet Joule dans l’inducteur : *\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_*
* Pertes par effet Joule dans l’induit :
  + Si *R* est la résistance mesurée entre deux bornes du stator déjà couplé alors : *pJi = .R.I²*
  + Si *R* est la résistance d’un enroulement alors : *pJi = 3.R.I²* (couplage étoile)
    - Pertes collectives ou pertes constantes :

*pc = pf + pmèca*

Déterminées lors d’un essai à vide à vitesse de rotation nominale :

*pc = P0 – pJi0*

Où *P0* est la puissance absorbée au stator à vide

1. **Réglage d’un alternateur triphasé**
   1. **Cas d’un alternateur seul (groupe électrogène)**
      1. **Position du problème**

En utilisation normale, un groupe électrogène doit fournir une tension dont la valeur efficace et la fréquence sont les plus constantes possible. La charge pouvant varier dans des proportions importantes, un dispositif électronique de régulation (asservissement), agissant sur l’intensité du courant d’excitation, est donc nécessaire.

Cependant, si l’on doit accepter un mode dégradé, celui-ci impliquera d’accepter préférentiellement une baisse de la fréquence des tensions générées plutôt qu’une baisse de la valeur efficaces de celles-ci.

* + 1. **Exemple de réglage**

Pour cette étude, on utilisera le \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ de l’alternateur pour lequel on néglige la résistance d’une phase devant sa réactance :



*EPN*

# V

*X*

*I*

Comme le but est de maintenir une tension de valeur efficace (et de fréquence) constante, nous tracerons le diagramme synchrone en prenant la tension simple comme référence des phases. Ce qui donne le diagramme suivant :

0

Axe des puissances réactives

Axe des puissances actives

Q

P

Δ

φ

φ

θ

La longueur du vecteur doit rester \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.

*φ* est le déphasage entre une tension simple et son courant de ligne.

Donc *XI.cos φ* , c’est-à-dire le \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_, est une image de la \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ fournie par l’alternateur à sa charge électrique.

*XI.sin φ* , c’est-à-dire le \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_, est une image de la \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ fournie par l’alternateur à sa charge électrique.

La droite Δ est la droite d’équipuissance active.

Si la machine est \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ (*EPN* trop faible) alors \_\_\_\_\_\_\_\_\_. Le comportement de l’alternateur est \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.

Si la machine est \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ (*EPN* trop grand) alors \_\_\_\_\_\_\_. Le comportement de l’alternateur est \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_.

Seul générateur sur le réseau, le réglage du comportement s’effectue en jouant sur le \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_, donc la fem de l’alternateur selon les caractéristiques de la charge afin de maintenir une tension constante.

Exercice d’application :

On considère un alternateur de 10 kVA remplaçant, dans un groupe électrogène de secours, un réseau triphasé 400 V – 50 Hz. On supposera le circuit magnétique non saturé et Epn = 50 Ie. La réactance synchrone d’une phase vau alors Xs = 8,5 Ω.

Déterminer, pour une charge nominale de facteur de puissance 0,89, la valeur du courant d’excitation.

Même question pour une charge à la moitié de la puissance nominale et un facteur de puissance de 0,928.

* 1. **Cas d’un alternateur couplé sur un réseau de puissance infinie (centrale de production d’énergie électrique)**
     1. **Couplage d’un alternateur sur le réseau de distribution de l’énergie électrique**

L’alternateur étant entraîné par une machine d’entraînement (turbine, moteur électrique ou moteur thermique), les conditions de couplage d’un alternateur sur le réseau sont les suivantes :

* La tension de l’alternateur doit être égale à celle du réseau.
* La fréquence de l’alternateur doit être égale à celle du réseau.
* La tension de l’alternateur doit être en phase avec celle du réseau.
* L’ordre des phases de l’alternateur doit être la même que celle du réseau.

3

2

1

Réseau

Lorsque l’on branche un alternateur sur un réseau comportant plusieurs centaines d’autres alternateurs, le réseau est tellement puissant qu’il impose la tension et la fréquence. On parle alors de réseau infini.

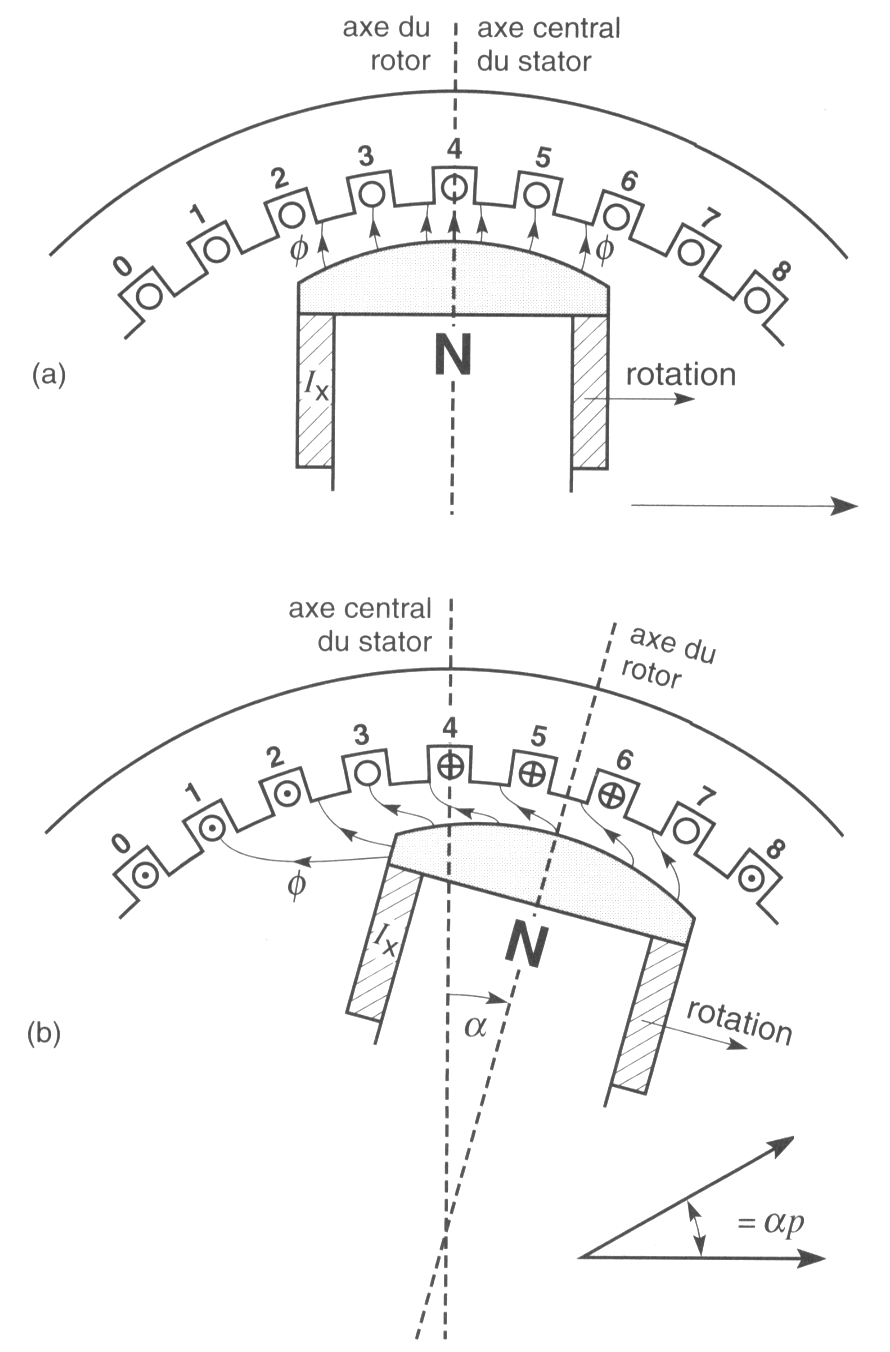
On ne peut plus faire varier alors que deux paramètres :

* \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_
* \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Lorsque l’on synchronise un alternateur, la tension induite *EPN* est égale à la tension simple *V* du réseau. Il n’existe donc aucune différence de potentiel aux bornes de la réactance synchrone. Par conséquent le courant *I* est nul et, bien que l’alternateur soit raccordé au réseau, il n’y débite aucune puissance. On dit que l’alternateur « flotte » sur le réseau.

* + 1. **Réglage d’un alternateur couplé sur le réseau de distribution de l’énergie électrique**

Considérons un alternateur qui flotte sur le réseau pour lequel *\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_*. Augmentons le courant l’excitation, la fem *EPN* augmente et la réactance synchrone *X* est soumise à une tension *\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_*. Un courant s’établit dans le circuit. Il est déphasé en arrière de *EPN* et donc de *V* aussi. Donc le réseau voit l’alternateur comme une \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_, c’est-à-dire que celui-ci fournit de la puissance \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ comme le montre le diagramme synchrone ci-dessous. On parle de \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_, la machine synchrone (elle fonctionne ici en moteur) permet ici de compenser l’énergie réactive absorbée par l’installation (si la machine est bien réglée).



θ

Considérons de nouveau un alternateur qui flotte sur le réseau. Augmentons maintenant le couple mécanique fournit par la machine d’entraînement (on ouvre les vannes de la turbine par exemple). Celle-ci tant à accélérer, mais comme fréquence de rotation de l’alternateur est imposée par celle du réseau, la conséquence est que les pôles du rotor se \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ en avance par rapport au pôle du stator. On parle d’angle de \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ de l’alternateur (cf figure ci-contre).

Cet angle *α* est lié à l’angle *θ* entre le vecteur et le vecteur par la relation *\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_*, où p est le nombre de paire de pôles. Plus l’angle de décalage augmente, plus l’alternateur va fournir de la puissance \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ au réseau.

Pour régler la puissance réactive, il ne reste plus qu’à régler le \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ sachant que le ratio Q/P est imposé par ce qu’attend le gestionnaire du réseau. Par exemple, EDF impose que la puissance réactive fournie soit égale à 40% de la puissance active.

Exercice d’application :

On considère un alternateur de centrale hydroélectrique de puissance apparente nominale Sn = 170 MVA. Il alimente un réseau de tension 15,5 kV – 50 Hz. Le circuit magnétique n'étant pas saturé, la force électromotrice à vide entre phases Ev est proportionnelle au courant d'excitation Iex selon la relation : Ev = 500 Iex (Ev en volts et Iex en ampères).

La caractéristique de court-circuit correspond à la relation : Icc = 300 Iex (Icc et Iex en ampères)

1. Calculer la valeur de la réactance synchrone de l’alternateur.
2. Celui-ci est accouplé au réseau et fonctionne dans les conditions nominales. Tracer le diagramme synchrone d’une phase sachant que le gestionnaire du réseau de distribution de l’énergie électrique impose un ratio puissance réactive / puissance active de 0,4.
3. En déduire la valeur de la fem, puis du courant d’excitation.
4. Calculer les valeurs de la puissance active et réactive fournie par l’alternateur.
5. Sachant qu’à 50 Hz, le groupe turbine alternateur tourne à 600 tr.min-1, et que le rendement de l’alternateur est de 96,2 %, calculer la puissance mécanique et moment du couple fournie par la turbine.
6. **Pilotage du moteur synchrone**
   1. **Relation entre diagramme vectoriel et champ tournant**

Considérons le schéma équivalent simplifié d’une phase en convention moteur :



*E*

# V

*X*

*I*

A ce diagramme, on associe la relation sur les grandeurs complexes suivante :

*V = E + jXI*

Ou bien sur les vecteurs de Fresnel associés :

Ce qui donne le diagramme synchrone suivant :

φ

θ

ψ

L’angle *φ* correspond au déphasage entre la tension simple et le courant de ligne correspondant.

L’angle *θ* correspond au décalage interne du moteur, c’est-à-dire à l’angle formé entre le rotor et le stator (si p =1).

L’angle *ψ* correspond au déphasage entre la fem et le courant de ligne.

Axe du stator

Axe du rotor

Sens de rotation

*θ*

*ψ*

*ΦI*

*ΦV*

*ΦE*

On déduit alors le diagramme des flux magnétiques à partir des relations suivantes :

*E = jωΦE; V = jωΦV; ΦI = LI*

Où *ΦI* est le flux crée par le champ tournant crée par les courants statoriques.

*ΦE* est le flux crée par le champ tournant crée par les courants rotoriques.

*ΦV* Est le flux crée par le champ tournant résultant.

Sachant que la multiplication par j correspond à une rotation de 90°, on passe aisément de *E* à *ΦE* et de *V* à *ΦV*. Le passage de *I* à *ΦI* correspond à une multiplication par la constante L, ces deux vecteurs sont donc colinéaires.

Pour maîtriser le couple du moteur synchrone, il faut fixer l’angle entre les champs du rotor et du stator. Le champ du rotor étant verrouillé sur celui du stator, la rotation de ce dernier entraînera la rotation du rotor. Pour obtenir un couple optimal, on cherche à annuler l’angle *ψ*. Les champs tournants du stator et du rotor sont donc perpendiculaires. Il faut donc que les courants de chaque phase du stator soit en phase avec la fem correspondante. Ceci s’effectue en asservissant à la fois la position du rotor par rapport au stator et les courant statoriques. C’est le principe de l’autopilotage de la machine synchrone.

* 1. **Expression du couple électromagnétique**

Chaque phase absorbe une puissance *V.I.cos* ou *E.I.cosψ*

Au total, la puissance électromagnétique absorbée s’écrit : *Pem = 3.V.I.cos E.I.cosψ*

Donc le couple électromagnétique : *Tem = =*

*Tem =*