

Les fiches techniques

34

Les machines tournantes Le moteur synchrone auto-piloté



34 Moteur synchrone auto-piloté

34.1 Moteur synchrone triphasé

L'induit (stator) est formé de 3 bobinages fixes dont les axes forment entre eux des angles de 120° électrique. Ces bobines étant parcourues par un système de courants triphasés équilibrés, on obtient la création d'un champ tournant à la vitesse n_s .

Le rotor de la machine synchrone, constitué d'un bobinage alimenté par une source à courant continu (ou d'aimants permanents), est accroché à ce champ tournant et tourne rigoureusement à la même vitesse que celui-ci. La rotation est synchrone.

Si le rotor comporte $2p$ pôles et le stator p bobines identiques par phases, la fréquence de rotation est :

$$n = \frac{f}{p}$$

34.1.1 Couple électromagnétique

Les pôles du rotor sont entraînés à la même vitesse que celle du champ tournant. Il se crée un couple électromagnétique qui résulte de l'interaction des deux champs tournants (au stator et au rotor).

Le moment de ce couple a pour expression :

$$T_{em} = k \times H_s \times H_r \times \sin \gamma = K \times \sin \gamma$$

T_{em} est maximal pour γ voisin de $\frac{\pi}{2}$.

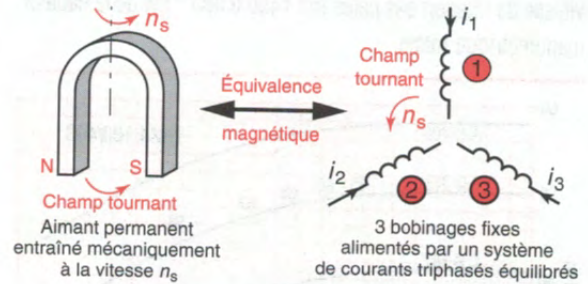
La valeur moyenne de T_{em} est différente de zéro si $\sin \gamma = Cte$ et non nul. En effet si les vitesses des champs statorique et rotorique sont différentes, γ varie de 0 à 360° et la valeur moyenne de $\sin \gamma$ est nulle.

Il faut noter que le moteur synchrone présente un couple moteur uniquement à la vitesse de synchronisme. Il ne peut pas démarrer en moteur synchrone directement branché sur le réseau d'alimentation.

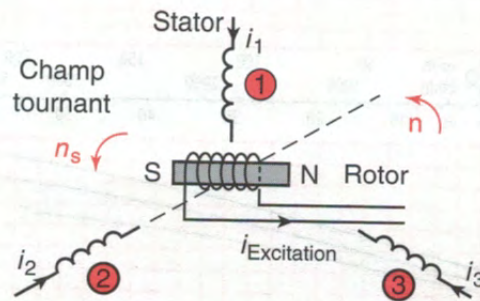
REMARQUES :

- H_s est proportionnel à l'amplitude des courants statiques i_1 , i_2 et i_3 .
- H_r est proportionnel à l'amplitude du courant rotorique.

PRODUCTION D'UN CHAMP TOURNANT

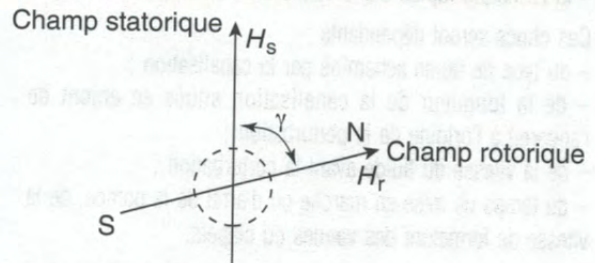


CONSTITUTION ÉLÉMENTAIRE DE LA MACHINE SYNCHRONE



VITESSE DU CHAMP TOURNANT STATORIQUE
$f = p \times n_s \Rightarrow n_s = \frac{f}{p} = \frac{\omega_s}{2 \times \pi \times p}$ $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$

MISE EN ÉVIDENCE DE L'INTERACTION DE DEUX CHAMPS TOURNANTS



VITESSE Ω_r DU ROTOR
$\sin \gamma = Cte \Rightarrow \Omega_s = \Omega_r$ $T_{moyen} \neq 0 \text{ si } \Omega_r = \frac{\omega_s}{p}$

Fonctionnement en charge

Dans un fonctionnement en charge, si on exerce un couple résistant sur l'arbre du moteur, l'axe des pôles rotoriques se décale instantanément par rapport au champ tournant pour obtenir en régime établi $T_{\text{moteur}} = T_{\text{résistant}}$.

Cela peut se traduire par un décrochage de la machine si $T_{\text{résistant}} > T_{\text{moteur}}$ maximum pour $\gamma = \frac{\pi}{2}$.

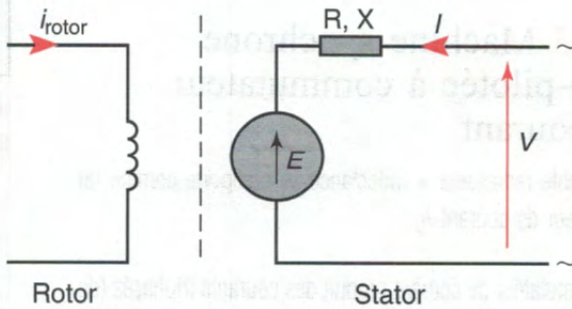
Pour contrôler le couple électromagnétique de la machine synchrone, il faut maîtriser la valeur de l'angle γ .

Pour éviter le décrochage et conserver γ constante, il faut : $\omega_s = p \times \Omega_r$.

34 ■ 12 Schéma équivalent d'une phase de la machine

Hypothèses

- Machine à pôles rotoriques lisses.
- Aucune saturation magnétique.
- R négligeable.
- Répartition sinusoïdale du champ.



$$V = E + jXI \quad E = k_1 \times \Omega_r \times i_r$$

$$P_{\text{électromagnétique}} = 3 \times V \times I \times \cos \varphi = T_{\text{em}} \times \frac{\omega_s}{p}$$

$$\text{Couple électromagnétique : } T_{\text{em}} = \frac{3 \times V \times p \times I \times \cos \varphi}{\omega_{\text{stator}}}$$

DIAGRAMME DE FRESNEL

Ici, le courant \vec{I} est représenté en avance sur la tension \vec{V} .

Graphiquement : $E \times \cos \alpha = V \times \cos \varphi$

$$P_{\text{em}} = 3 \times E \times I \times \cos \alpha \quad T_{\text{em}} = \frac{3 \times E \times p \times I \times \cos \alpha}{\omega_s}$$

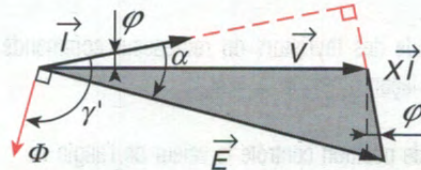
$$E = j \cdot \omega_s \cdot \Phi_r \quad \Rightarrow T_{\text{em}} = 3 \times p \times \Phi_r \times I \times \cos \alpha$$

$$\gamma' = \alpha + \pi/2 \quad \Rightarrow \cos \alpha = \sin(\alpha + \pi/2) = \sin \gamma'$$

$$T_{\text{em}} = 3 \times p \times \Phi_r \times I \times \sin \gamma' \quad \Rightarrow T_{\text{em}} = K_0 \times H_s \times H_r \times \sin \gamma'$$

Cette expression est équivalente à celle établie au paragraphe précédent : H_s est proportionnel à I_s .

H_r est proportionnel à Φ_r , donc à I_r .

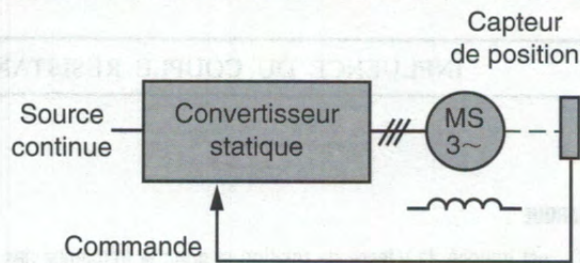


L'action sur α et I permet de contrôler le couple électromagnétique.

34 ■ 2 Auto-pilotage

La fréquence des courants statoriques est imposée par la fréquence de rotation du rotor. Un convertisseur est autopiloté de manière à fixer les phases relatives des champs statorique et rotorique. Le champ statorique progresse de façon synchrone avec la vitesse du rotor : $\omega_s = p \Omega_r$.

Le capteur de position calé mécaniquement sur le rotor permet de contrôler la position angulaire de celui-ci par rapport au stator et de générer les ordres d'amorçage des interrupteurs statiques au fur et à mesure du déplacement du rotor afin de conserver $\Omega_s = \Omega_r$.



Le convertisseur statique peut avoir deux structures différentes :

- commutateur de courant,
- onduleur de tension.

Structure du convertisseur statique

La structure utilisée dépend de l'inertie de la charge mécanique entraînée.

On montrera, dans le paragraphe suivant, que l'autopilotage par commutateur de courant entraîne une ondulation importante du couple électromagnétique.

34.3 Machine synchrone auto-pilotée à commutateur de courant

L'ensemble redresseur + inductance se comporte comme un générateur de courant I_0 .

Le commutateur de courant produit des courants triphasés (de fréquence variable, de forme rectangulaire et de durée de $T/3$) pour fournir le couple moteur.

Les instants de commutation des interrupteurs statiques (K_1, K_2, \dots, K_3) du commutateur de courant dépendent de la position du rotor donnée par le capteur de position angulaire du rotor.

La commande des thyristors du redresseur commandé est asservie de façon à obtenir $I_0 = I_{0\text{référence}}$.

Le capteur de position contrôle la valeur de l'angle α .

Ce dispositif permet de contrôler le couple électromagnétique T_{em} à l'aide des variables I_0 et α .

Charge de forte inertie : on admet les ondulations du couple électromagnétique.

Solution : commutateur de courant.

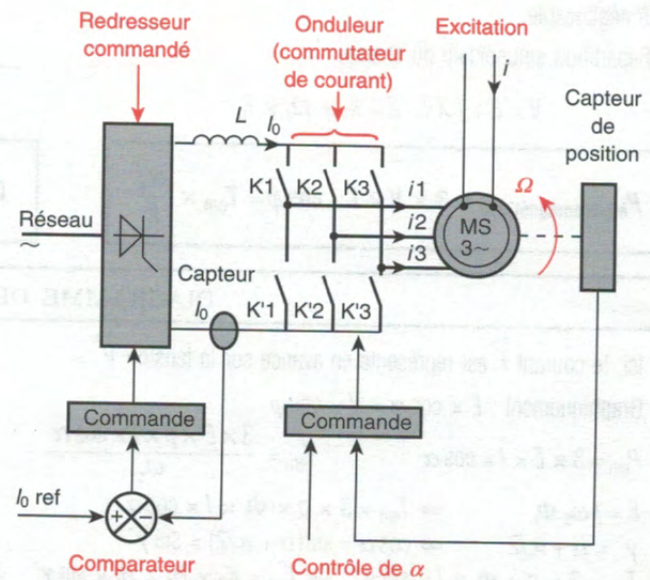
Exemple d'application : TGV atlantique.

Charge de faible inertie : on supprime les ondulations du couple électromagnétique. Il faut que les courants statoriques soient quasi sinusoïdaux.

Solution : onduleur de tension commandé par Modulation de Largeur d'Impulsions.

Exemple d'application : robotique.

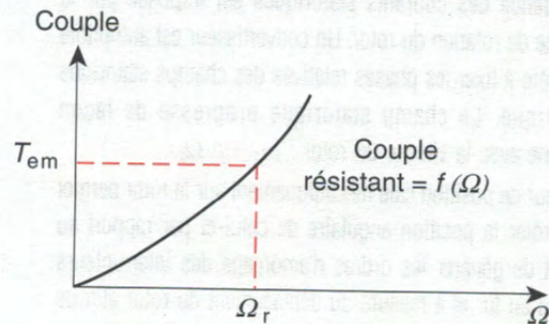
SCHÉMA DE PRINCIPE



INFLUENCE DU COUPLE RÉSIDANT SUR LA VITESSE DE ROTATION

REMARQUE :

Si T_{em} est imposé, la vitesse de rotation et donc la fréquence des grandeurs statoriques dépendent du couple résistant de la charge entraînée.



SÉQUENCES DE COMMANDE DES 6 INTERRUPTEURS STATIQUES DU COMMUTATEUR DE COURANT

On considère la valeur de l'inductance L (voir schéma de principe) suffisamment élevée afin d'admettre que la source de courant délivre un courant continu d'amplitude I_0 pratiquement constante.

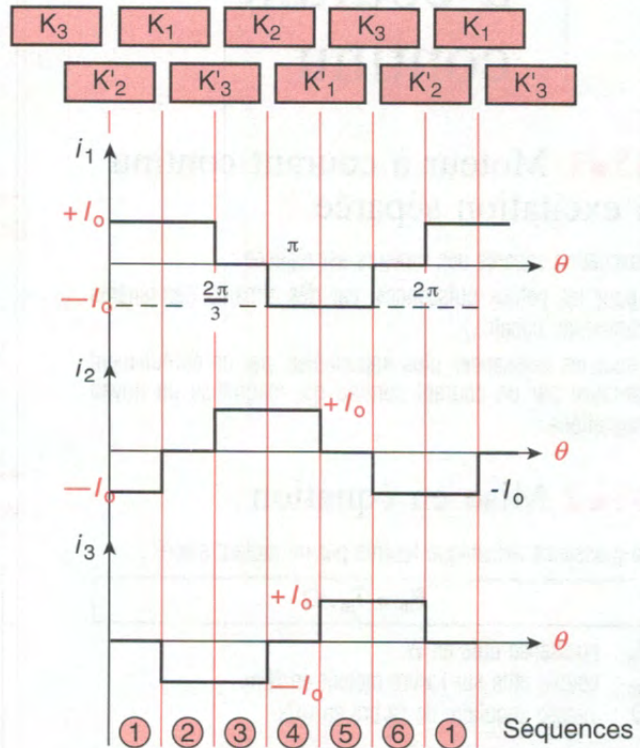
La commande des interrupteurs statiques (K_1, \dots, K'_3) est imposée. L'ordre des séquences est représenté ci-contre.

Un interrupteur statique commandé devient passant et est assimilé dans ce cas à un interrupteur fermé.

La forme des courants statoriques i_1, i_2 et i_3 est idéalisée. À chaque séquence, le champ statorique a une direction fixe. Le champ statorique progresse par bonds de 60° (voir étude des séquences ① et ②).

Le rotor suit la rotation du champ tournant. Il y a 6 commutations par période.

Le couple résistant présente une légère ondulation autour du couple moyen.



CONCLUSION

L'ensemble commutateur de courant + machine synchrone + capteur de position se comporte comme un moteur à courant continu à excitation indépendante (le commutateur de courant ayant une fonction équivalente au collecteur de la machine à courant continu).

Les propriétés du moteur synchrone autopiloté sont pratiquement identiques à celles d'une machine à courant continu.

■ Le convertisseur continu-alternatif est un dispositif statique de commutation. Avantage en forte puissance, la vitesse maximale est élevée, elle n'est pas limitée par le collecteur.

■ Le collecteur du moteur à courant continu est tournant : commutations difficiles pour les fortes intensités.

Une machine comprenant un stator avec des enroulements, un rotor à aimant permanent et un capteur de position lié mécaniquement au rotor peut aussi être désigné sous le nom de moteur Brushless (moteur à courant continu sans balai). C'est une machine auto-pilotable.

PROGRESSION DES CHAMPS STATORIQUE ET ROTORIQUE (étude des séquences 1 et 2)

