

Questionnaire à choix multiple :  
**Principe de fonctionnement des convertisseurs  
électromagnétiques à champ tournant**

**Corrigé**

1. Si on fait circuler dans les enroulements statoriques et rotoriques des systèmes triphasés équilibrés directs de courants sinusoïdaux de pulsation  $\omega_s$  au stator et  $\omega_r$  au rotor, la relation

$$\omega_s - \omega_r - p\omega_m = 0$$

où  $\omega_m$  est la vitesse angulaire du rotor et  $p$  le nombre de paires de pôles de la machine est...

- ... une condition nécessaire...
- ... une condition suffisante...
- ... une condition nécessaire et suffisante...

... pour que le couple électromagnétique ait une valeur constante non nulle.

2. On peut obtenir un fonctionnement en régime permanent à couple constant non nul en alimentant les enroulements du stator par un système triphasé équilibré de tensions sinusoïdales et en mettant les enroulements rotoriques en court-circuit.

- vrai
- faux

3. Lorsque les sources qui alimentent le stator et le rotor y font circuler en régime permanent des systèmes triphasés équilibrés directs de courants de pulsation  $\omega_s$  au stator et  $\omega_r$  au rotor vérifiant

$$\omega_s - \omega_r - p\omega_m = 0$$

où  $\omega_m$  est la vitesse angulaire du rotor et  $p$  le nombre de paires de pôles de la machine, la machine fonctionne à couple électromagnétique et énergie magnétique stockée constants.

- vrai
  - faux
4. Pour les conditions de fonctionnement décrites à la question 3, la puissance électrique fournie ou absorbée par la machine est toujours égale, aux pertes internes près, à la puissance mécanique absorbée ou fournie par le système mécanique connecté à la machine.

- vrai.
- faux.

5. Pour les conditions de fonctionnement décrites à la question 3, la puissance convertie d'énergie électrique en énergie mécanique...

- ... provient uniquement de la source qui alimente le stator.
- ... provient uniquement de la source qui alimente le rotor.
- ... peut provenir *a priori* tant de la source qui alimente le stator que de celle qui alimente le rotor.

6. Lorsqu'on fait circuler dans les enroulements rotoriques des courants continus (de somme nulle), la machine ne peut fonctionner, en régime permanent, à couple constant que si la pulsation des courants statoriques est égale à la vitesse du rotor multipliée par le nombre de paires de pôles de la machine.

- vrai
- faux

7. Si on alimente les enroulements statoriques par une source triphasée équilibrée de tensions sinusoïdales et qu'on met les enroulements rotoriques en court-circuit, le sens de rotation de la machine en fonctionnement moteur dépend du fait que le système de tensions statoriques est un système direct ou un système inverse.

- vrai
- faux

8. Lorsque les sources font circuler dans les enroulements statoriques et rotoriques des systèmes triphasés équilibrés de courant sinusoïdaux, de pulsation  $\omega_s$  au stator et  $\omega_r$  au rotor, vérifiant la relation

$$\omega_s - \omega_r - p\omega_m = 0$$

où  $\omega_m$  est la vitesse angulaire du rotor et  $p$  le nombre de paires de pôles de la machine, les champs d'entrefer créés respectivement par le système triphasé de courants qui circule dans les enroulements du stator et par celui qui circule dans ceux du rotor, sont des champs tournants à la même vitesse (champs tournants synchrones). Cette affirmation...

- ... est toujours vraie.
  - ... n'est vraie que dans le cadre de la marche en machine synchrone.
  - ... est toujours fausse.
9. Pour les conditions de fonctionnement décrites à la question 8, les systèmes triphasés de courants qui circulent dans les enroulements statoriques et rotoriques produisent un couple électromagnétique d'autant plus grand que le déphasage entre les champs d'entrefer qu'ils produisent est proche de  $\pi/2$ .
- vrai
  - faux
10. En vertu de la loi  $Bli$ , la force qui s'exerce sur les conducteurs d'une encoche du rotor est proportionnelle au produit du courant qui y circule par la valeur, face à l'encoche, du champ d'entrefer produit par le système de courants circulant au stator. C'est d'ailleurs pour éviter que cette force ne déforme les conducteurs que ceux-ci sont placés dans des encoches.
- vrai
  - faux

## Justification

1. La relation  $\omega_s - \omega_r - p\omega_m = 0$  est une condition nécessaire pour avoir un couple électromagnétique de valeur constante non nulle (si cette condition n'est pas vérifiée on a un couple pulsatoire de pulsation  $\omega_s - \omega_r - p\omega_m$ ).

Ce n'est toutefois pas une condition suffisante. Le couple s'écrit

$$C_{em} = \frac{9}{2}pM_{sr}I_sI_r \sin(\varphi_s - \varphi_r - \theta_{e0}),$$

encore faut-il que la position initiale du rotor  $\theta_{e0}$  et les phases à l'origine  $\varphi_s$  et  $\varphi_r$  des systèmes de courant respectivement du stator et du rotor, vérifient :

$$\varphi_s - \varphi_r - \theta_{e0} \neq 0 \text{ ou } \pi$$

Voir aussi § 3.3 du livre.

2. Ce fonctionnement correspond à la marche en machine asynchrone des convertisseurs électromagnétiques à champ tournant. Voir aussi § 3.8.2 du livre.

3. Voir § 3.3.3 du livre.

4. L'énergie magnétique stockée étant dans ces conditions constante (voir § 3.3.3 du livre), la puissance électrique entrant dans la machine ne peut devenir que des pertes et de la puissance mécanique. Si la puissance électrique entrant dans la machine est positive, elle marche en moteur et convertit à ses pertes internes près l'énergie électrique reçue en énergie mécanique. Dans le cas contraire, elle marche en génératrice et convertit à ses pertes internes près l'énergie mécanique qu'elle reçoit en énergie électrique.

5. Dans les deux modes de fonctionnement les plus courants des convertisseurs à champ tournant (marche en machine synchrone, marche en machine asynchrone à rotor en court-circuit), il est vrai que la puissance électrique convertie en puissance mécanique ne provient que de la source alimentant le stator. C'est évidemment le cas pour la marche en machine asynchrone à rotor en court-circuit, dans la mesure où il n'y a pas de source connectée au rotor. C'est aussi le cas pour la marche en machine synchrone, la source alimentant le rotor ne fournissant en régime permanent que les pertes dans l'enroulement inducteur.

Cependant il existe d'autres modes de fonctionnement pour lesquelles cette affirmation est fautive. C'est par exemple lorsqu'on alimente, comme cela est expliqué à la fin du § 3.3.4 du livre, le rotor d'une machine asynchrone à rotor bobiné par un système de courant triphasé équilibré inverse de pulsation  $\omega_r$ .

La machine tourne alors à une vitesse  $\omega_m = (\omega_s + \omega_r)/p$  supérieure à la vitesse de synchronisme  $\omega_s/p$  (fonctionnement hypersynchrone), absorbant de la puissance tant

à la source alimentant le stator qu'à celle alimentant le rotor, puissance transformée aux pertes interne près, en puissance mécanique.

6. C'est cette condition qui justifie le nom de "marche en machine synchrone" donnée à ce mode de fonctionnement des convertisseurs électromagnétiques à champ tournant. Voir § 3.8.1 du livre.
7. Voir § 3.8.3 du livre.
8. Le champ tournant créé par le système des courants du stator tourne à la vitesse  $\omega_s/p$ . Celui créé par le système des courants du rotor tourne à la vitesse  $\omega_r/p$  dans le référentiel du rotor. Il est fixe dans ce référentiel dans le cas de la marche en machine synchrone ( $\omega_r=0$ ) et tourne donc à la vitesse du rotor  $\omega_m$ ; dans le cas de la marche en machine asynchrone, il tourne dans le référentiel du stator à la vitesse  $\omega_r/p + \omega_m$ . Compte-tenu de ce que  $\omega_s - \omega_r - p\omega_m = 0$ , les deux champs tournants créés respectivement par le système de courants du stator et par celui du rotor, sont dans les deux cas des champs tournants à la même vitesse (champs tournants synchrones).
9. Le déphasage entre les champs d'entrefer produits par les systèmes triphasés de courants qui circulent dans les enroulements statoriques et rotoriques est égal à  $\varphi_s - \varphi_r - \theta_{e0}$  où  $\theta_{e0}$  est la position initiale du rotor et  $\varphi_s$  et  $\varphi_r$  respectivement les phases à l'origine des systèmes de courant du stator et du rotor.

Le couple évolue comme le sinus de cet angle :

$$C_{em} = \frac{9}{2} p M_{sr} I_s I_r \sin(\varphi_s - \varphi_r - \theta_{e0}).$$

Il est nul quand les deux champs sont soit alignés ( $\varphi_s - \varphi_r - \theta_{e0} = 0$ ) soit en opposition ( $\varphi_s - \varphi_r - \theta_{e0} = \pi$ ). Il est maximum pour  $\varphi_s - \varphi_r - \theta_{e0} = \pi/2$  et minimum (négatif) pour  $\varphi_s - \varphi_r - \theta_{e0} = -\pi/2$ .

10. Si le couple qui s'exerce sur le rotor peut effectivement se calculer en utilisant la règle *Bli*, il est inexact d'en tirer des conclusions quant à la localisation des efforts qui s'exercent sur le rotor.

En effet pour déterminer le couple par la règle *Bli* et la force contre-électromotrice par la règle *Blv*, il est nécessaire de poser des hypothèses fortes (voir § 3.6 du livre). On doit considérer notamment que les conducteurs sont situés dans l'entrefer à la périphérie du rotor en face des encoches qui les abritent normalement et sont donc soumis au champ d'entrefer  $\vec{B}_{es}$  créé par les courants circulant dans les enroulements du stator.

En réalité, comme le flux magnétique passe de façon préférentielle par les dents du rotor, la champ à l'intérieur des encoches (et donc au niveau des conducteurs) est quasiment nul. Une analyse par éléments finis, basée sur la méthode des travaux virtuels

(calcul de la variation en fonction de la position de la co-énergie magnétique stockée)  
montre les efforts qui s'exercent sur le rotor se localisent principalement au niveau des  
dents ce qui est plus favorable d'un point de vue mécanique.