

## Questionnaire à choix multiple : Machine à courant continu à collecteur

### Corrigé

1. La source qui alimente le circuit inducteur d'une machine à courant continu à collecteur et à excitation séparée fournit une puissance égale aux pertes Joule dans cet enroulement.
  - c'est toujours vrai
  - ce n'est vrai qu'en régime permanent
  - c'est toujours faux
  
2. Dans une machine à courant continu à collecteur, le courant qui circule dans les sections commutantes est sans effet sur l'inducteur.
  - c'est toujours vrai
  - ce n'est vrai qu'en régime permanent
  - c'est toujours faux
  
3. Dans un moteur à courant continu à collecteur, à aimants permanents ou à excitation indépendante, le couple électromagnétique fourni au système mécanique (constitué du rotor de la machine et de la charge mécanique qui lui est accouplée) est proportionnel au courant d'induit.
  - vrai
  - faux

La force électromotrice qui apparaît dans le circuit d'induit est proportionnelle à la vitesse de rotation.

- vrai
- faux

Si le courant d'induit est exprimé en ampères, la force électromotrice en volt, le couple en newton.mètre et la vitesse de rotation en radian par seconde, les constantes de proportionnalité entre courant et couple d'une part et entre vitesse et force électromotrice d'autre part sont les mêmes.

- vrai
- faux

4. En vertu de la loi  $Bli$ , la force qui s'exerce sur les conducteurs de l'induit d'une machine à courant continu à collecteur est proportionnelle au champ d'entrefer créé par l'inducteur et au courant qui circule dans ces conducteurs.

C'est d'ailleurs pour éviter que cette force ne déforme les conducteurs que ceux-ci sont placés dans des encoches.

- vrai
- faux

5. Dans le cas d'une machine à courant continu, on utilise un rhéostat de démarrage connecté en série avec l'induit :

- pour augmenter le couple durant la phase initiale de démarrage (c'est à dire lorsque la vitesse de rotation est faible).

- vrai
- faux

- pour limiter le courant absorbé au réseau durant la phase initiale de démarrage.

- vrai
- faux

6. On règle facilement la vitesse d'une machine à courant continu à collecteur, à aimants permanents ou à excitation indépendante, en modifiant la tension d'alimentation de son circuit d'induit.

- vrai
- faux

7. Le couple électromagnétique fourni par une machine à courant continu à collecteur à aimants permanents ou à excitation séparée étant proportionnel au produit des courants d'induit  $i_a$  et d'inducteur  $i_f$  :

$$C_{em} = \frac{\mu_0 n_b n_f}{e'} R_e L_z \frac{\beta n}{\pi} i_a i_f,$$

on réglera avec tout autant de précision mais plus de facilité le couple électromagnétique de cette machine par action sur le courant  $i_f$  car la puissance qui transite dans le circuit inducteur est moins élevée (il n'est pas nécessaire d'utiliser un convertisseur électronique de puissance pour en assurer le réglage).

- vrai
- faux

8. Le couple électromagnétique développé par le moteur à courant continu à excitation série étant proportionnel au carré du courant d'induit, il est impossible de l'utiliser en génératrice pour freiner la charge qu'il entraîne.

- vrai
- faux

9. Lorsqu'on coupe le circuit inducteur d'une machine à courant continu à excitation séparée (c'est à dire lorsqu'on annule le courant inducteur  $i_f$ ), le couple électromagnétique produit par la machine s'annule et donc, si le couple de charge est principalement un couple de frottement, la machine s'arrête de tourner.

- vrai
- faux

10. La constante de temps électromécanique  $\tau_{em} = R_a J / (k\phi)^2$  où :

$R_a$  est la résistance d'induit ;

$J$  l'inertie du rotor ;

$k\phi$  la constante de couple du moteur (le rapport entre le couple et le courant d'induit) ;

correspond approximativement, pour les moteurs à courant continu à collecteur de faible puissance à aimants permanents au tiers du temps que met la vitesse du moteur à atteindre 95% de sa valeur lorsqu'on lui applique une tension  $u_a$  et qu'il est faiblement chargé.

- vrai
- faux

## Justifications

1. La source qui alimente le circuit inducteur d'une machine à courant continu à collecteur et à excitation séparée fournit outre l'énergie dissipée par effet Joule dans cet enroulement, une partie de l'énergie magnétique stockée dans la machine. Cette énergie magnétique étant constante en régime permanent, la puissance fournie par l'alimentation de l'inducteur se réduit alors (mais seulement dans ce cas) aux seules pertes ohmiques.
2. Le courant qui circule dans les sections commutantes génère toujours une force électromotrice dans le circuit inducteur. Cependant cet effet est, en moyenne, exactement compensé par les effets des autres sections de l'induit sur l'inducteur.
3. Dans une machine à courant continu à collecteur, à aimants permanents ou à excitation indépendante, le couple électromagnétique est effectivement proportionnel au courant d'induit ( $C_{em} = k_1 i_a$ ) tandis que la force électromotrice est proportionnelle à la vitesse ( $E = k_2 \omega_m$ ).

La puissance électrique transformée en puissance mécanique étant égale à  $E i_a = C_{em} \omega_m$ , il en résulte que les constantes de proportionnalité  $k_1$  et  $k_2$  sont identiques ( $k_1 = k_2 = k\phi$ ).

4. 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 §6.1.6 du chapitre 6 du [livre](#)) (lien cliquable). 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  $\vec{B}_e$  créé par l'inducteur.

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.

5. À vitesse nulle le courant d'induit d'une machine à excitation séparée vaut  $i_a = u_a / R_a$  où  $u_a$  est la tension d'alimentation de l'induit et  $R_a$  la résistance d'induit. Pour une machine ayant une tension nominale de 220V, un courant nominal de 16A et présentant une résistance d'induit de 1,6 $\Omega$ , on obtient ainsi un courant de démarrage de 137A soit plus de 8 fois et demi le courant nominal. Un tel courant risque d'entraîner la destruction de la machine.

En plaçant une résistance  $R_d$  en série avec l'induit, on réduit ce courant à  $i_a = u_a / (R_a + R_d)$ . Ainsi, par exemple, en plaçant un rhéostat dont la résistance initiale vaut 9,9 $\Omega$ , on limite le courant de démarrage à 1,2 fois le courant nominal.

Le couple électromagnétique qui est proportionnel au courant d'induit (ou au carré de ce courant dans le cas d'une machine à excitation série) s'en trouve également limité à une valeur égale à 1,2 fois le couple nominal (1,4 fois le couple nominal dans le cas d'une machine à excitation série).

6. En modifiant la tension d'alimentation d'induit on agit directement sur la vitesse puisque celle-ci est, en régime permanent et aux chutes ohmiques près proportionnelle à la vitesse de rotation :

$$u_a = R_a i_a + k\phi\omega_m$$

7. Le réglage du point de fonctionnement de la machine à courant continu à collecteur peut effectivement s'effectuer par action sur le courant inducteur. Dans la mesure où la puissance qui transite par l'inducteur est généralement très faible, c'est même une méthode très peu coûteuse : une simple résistance de valeur variable en série avec l'alimentation de l'inducteur suffit.

Cependant, le réglage du couple par le courant d'inducteur suppose que le courant d'induit soit par ailleurs maintenu constant. Celui-ci est égal à  $(U_a - k\phi\omega_m)/R_a$ . Le maintenir constant en dépit des variations possible de la vitesse de rotation  $\omega_m$ , suppose donc que l'on dispose d'un moyen de régler avec précision la tension d'induit  $U_a$  ce qui nécessite l'emploi d'un convertisseur électronique de puissance. On ne gagne donc rien en terme de coût et de facilité de mise en œuvre puisqu'à la difficulté de régler le courant d'induit s'ajoute celle de régler le courant inducteur.

Or la constante de temps du circuit inducteur étant en général beaucoup plus élevée que la constante de temps du circuit d'induit, les performances dynamiques que l'on peut attendre d'une régulation du couple par le courant  $i_f$  sont bien plus faibles.

À cela s'ajoute enfin qu'en maintenant le courant d'induit  $i_a$  autour de sa valeur nominale, on maintient les pertes Joule au rotor à un niveau élevé ce qui peut poser des problèmes thermiques non négligeables.

8. Pour changer le signe du couple fournit par une machine à courant continu à excitation série, il suffit de changer le sens relatif des connections de l'induit et de l'inducteur (fig. 1).

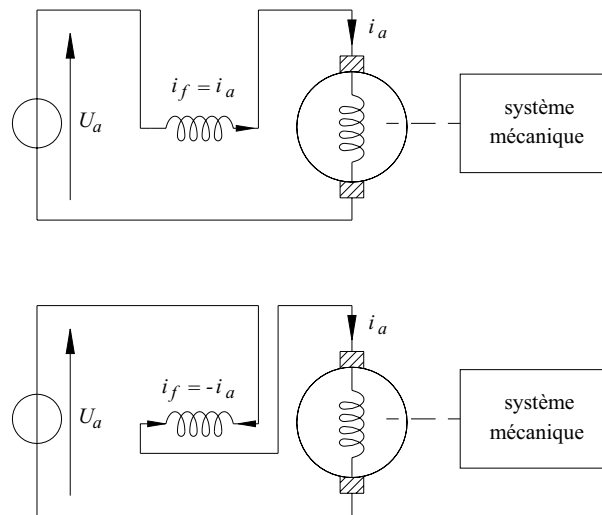


FIG. 1 – Changement du sens relatif des connections de la machine série

9. Lorsque l'on coupe le circuit inducteur d'une machine à courant continu à excitation séparée, le flux inducteur ne s'annule pas tout à fait avec  $i_f$  : il subsiste un flux rémanent  $\phi_{rem}$  résultant du

phénomène d'hystérésis (glossaire). On se situe dès lors sur une nouvelle caractéristique couple-vitesse de la machine (Figure 2). Il s'agit d'une droite qui coupe l'axe des abscisses pour un couple inférieur dans un rapport  $\phi_{rem}/\phi_{nom}$  au couple à l'arrêt de la machine sous flux nominal et qui coupe l'axe des ordonnées pour une vitesse supérieure dans un rapport  $\phi_{nom}/\phi_{rem}$  à la vitesse à vide sous flux nominal (Figure 2)

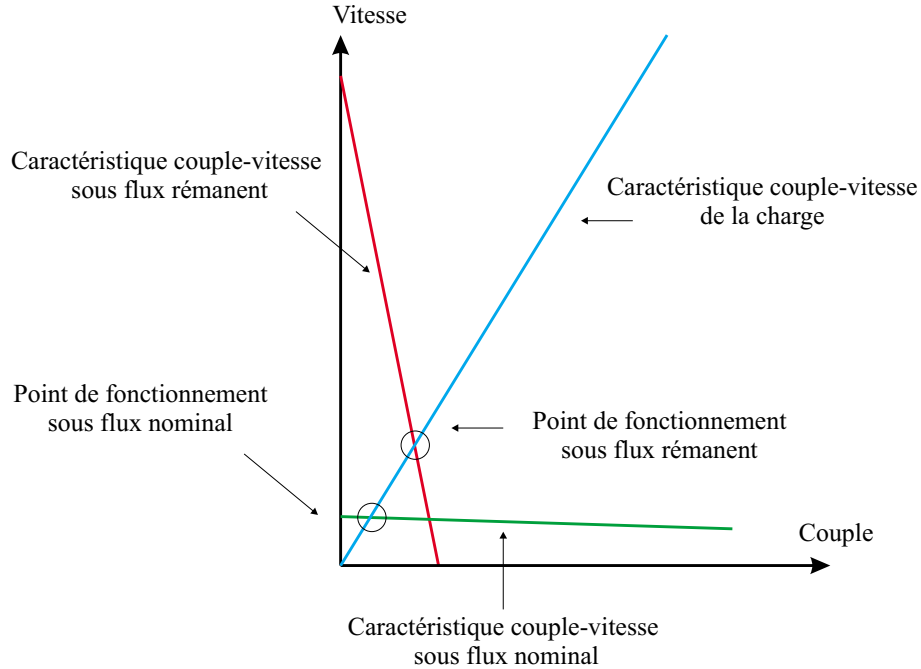


FIG. 2 – Augmentation de la vitesse de la machine à courant continu en cas de coupure du circuit inducteur

Pour autant que l'alimentation de l'induit soit capable de fournir la puissance correspondante, on assiste donc en cas de coupure du circuit inducteur à une augmentation de la vitesse de la machine. Si celle-ci est très faiblement chargée (fonctionnement à vide avec seulement les pertes mécaniques internes de la machine par exemple), on parle même d'emballement de la machine avec risque de destruction du rotor par effet centrifuge.

La coupure du circuit inducteur d'une machine à courant continu à excitation séparée est donc une éventualité contre laquelle il convient de se prémunir. C'est d'ailleurs pour les machines de faible puissance, une des raisons du succès malgré leur prix souvent plus élevé des machines utilisant pour l'excitation des aimants permanents.

10. Si on peut négliger les transitoires électriques devant le temps d'établissement de la vitesse (hypothèse de régime quasi-permanent électrique), le courant  $i_a$  qui circule dans le moteur à courant continu à collecteur, à aimants permanents ou à excitation séparée, est égal à tout instant à :

$$i_a = \frac{u_a - k\phi\omega_m}{R_a},$$

où  $u_a$  est la tension d'alimentation de l'induit et  $\omega_m$  la vitesse de rotation de la machine.

Le couple électromagnétique  $C_{em}$  que développe la machine est alors égal à :

$$C_{em} = k\phi i_a = \frac{k\phi u_a - (k\phi)^2 \omega_m}{R_a},$$

Si la machine est faiblement chargée, son équation mécanique se réduit en première approximation à celle d'une charge inertielle pure :

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = C_{em} = \frac{k\phi u_a - (k\phi)^2 \omega_m}{R_a},$$

soit encore :

$$\frac{R_a J}{(k\phi)^2} \frac{d\omega_m}{dt} + \omega_m = \frac{u_a}{k\phi}.$$

On a donc un système du premier ordre dont la réponse temporelle est donnée par :

$$\omega_m = \frac{u_a}{k\phi} \left( 1 - e^{-t/\tau_{em}} \right)$$

et qui atteint 95% de sa valeur de régime permanent  $u_a/k\phi$  (soit la vitesse à vide de la machine) au bout d'un temps égal à  $3\tau_{em}$ .