

Illustrations et compléments : Notion de champ tournant¹

1. Enroulement assurant une répartition sinusoïdale du champ d'entrefer

On considère un convertisseur à pôles lisses comportant un enroulement à une paire de pôle assurant dans l'entrefer une répartition du champ qui est sinusoïdale ou du moins dont on ne retient que la contribution du premier harmonique.

On représente cet enroulement sur la figure ci-dessous par une seule spire placée de telle sorte que son axe magnétique corresponde à celui de l'enroulement. Le courant i_a qui parcourt l'enroulement est compté positif quand il circule de l'avant vers l'arrière dans le conducteur de droite (marqué d'une croix) et donc de l'arrière vers l'avant dans le conducteur de gauche (marqué d'un point). Si ce courant i_a est continu, cet enroulement produit, en tout point M de l'entrefer, repéré par sa coordonnée angulaire θ (figure 1), un champ radial dont la valeur $B_{e,a}$ est égale à :

$$B_{e,a} = K.i_a.\cos(\theta - \theta_a)$$

où θ_a correspond à la position de l'axe magnétique de l'enroulement, ici égale à 0 et où K est un coefficient qui dépend de la façon dont l'enroulement est réalisé (on trouvera dans le laboratoire virtuel un exemple de calcul de ce coefficient) "*Réalisation d'un enroulement réparti assurant une répartition quasi-sinusoïdale du champ d'entrefer*" ([lien cliquable](#)).

Une valeur positive de $B_{e,a}$ correspond à un champ dirigé du rotor vers le stator, une valeur négative à un champ dirigé du stator vers le rotor.

Justification

Les hypothèses qui conduisent à cette répartition de champ sont exposées dans le livre au chapitre 2, § 2A.1.3 du livre "*Électromécanique : convertisseurs d'énergie et actionneurs*".

Elles consistent à supposer que :

- la perméabilité des matériaux magnétiques est suffisamment grande pour qu'on puisse la supposer infinie ou ce qui revient au même que le champ H dans ces matériaux a une valeur suffisamment faible pour qu'on puisse la supposer nulle ;
- l'entrefer est mince de sorte que sur le champ qui est radial au droit des surfaces de séparation de l'entrefer avec les couronnes statoriques reste radial dans l'entrefer et garde une valeur constante le long de chaque ligne de champ.

¹**Avertissement** : Il est possible que quelques erreurs subsistent dans ce document par rapport à la version définitive du site. Si tel était le cas, n'hésitez pas à le signaler aux auteurs du site.

FIG. 1 – Animation

2. Evolution du champ d'entrefer créé en fonction du courant circulant dans l'enroulement

Questions

- *Quelle est l'allure de la courbe représentant la valeur $B_{e,a}$ du champ d'entrefer en fonction de l'angle θ ?*
- *Comment cette courbe évolue-t-elle en fonction de la valeur du courant ?*

FIG. 2 – Animation

3. Variation sinusoïdale du courant en fonction du temps

Si le courant i_a varie de façon sinusoïdale en fonction du temps :

$$i_a = I_{max} \cdot \cos(\omega t)$$

on a :

$$B_{e,a} = K \cdot I_{max} \cdot \cos(\theta - \theta_a) \cdot \cos(\omega t)$$

Question

Comment évolue, au cours du temps, la courbe représentant $B_{e,a}$ en fonction de θ ?

FIG. 3 – Animation

On constate que le champ $\vec{B}_{e,a}$ est un **champ pulsé**, équivalent à une **onde stationnaire**. Son amplitude en tout point de l'entrefer varie en fonction du temps, mais

- les positions pour laquelle cette amplitude est maximale (en valeur absolue) sont invariantes. Il s'agit des angles $\theta = k \cdot \pi$ (k entier) qui correspondent à des "ventres" de l'onde stationnaire.

- les positions pour laquelle l’amplitude est nulle sont également invariantes. Il s’agit des angles $\theta = (2k + 1)\pi/2$ (k entier) qui correspondent à des ”noeuds” de l’onde stationnaire.

4. Représentation du champ pulsé par un vecteur

Dans le plan de coupe du convertisseur, on peut représenter ce champ pulsé $\vec{B}_{e,a}$ par un vecteur :

- issu du centre du plan de coupe,
- dont la direction indique la position θ du maximum du champ $\vec{B}_{e,a}$,
- dont la largeur est proportionnelle à la valeur maximum du champ $\vec{B}_{e,a}$.

Comme les ventres de l’onde stationnaire que constitue $\vec{B}_{e,a}$ sont situés en $\theta = k\pi$, on obtient le vecteur représentatif du champ $\vec{B}_{e,a}$ en portant sur l’axe dont l’origine est le centre du plan de coupe et dont la direction $\theta = \theta_a = 0$ correspond à une longueur égale à :

$$B_{e,a}(0) = K \cdot I_{max} \cdot \cos(\omega t)$$

FIG. 4 – Animation

5. Champ d’entrefer créé par trois enroulements décalés spatialement de 120°

On considère à présent trois de ces enroulements a, b, c , déphasés **spatialement** de 120° l’un par rapport à l’autre. On a ainsi :

$$\begin{aligned} B_{e,a} &= K \cdot i_a \cdot \cos \theta & (\theta_a &= 0) \\ B_{e,b} &= K \cdot i_b \cdot \cos(\theta - 2\pi/3) & (\theta_b &= 2\pi/3) \\ B_{e,c} &= K \cdot i_c \cdot \cos(\theta - 4\pi/3) & (\theta_c &= 4\pi/3) \end{aligned}$$

Questions

- *Quelles seront les allures des courbes représentant $B_{e,a}, B_{e,b}$ et $B_{e,c}$ en fonction de θ ?*
- *Comment ces courbes évoluent-elles avec les valeurs des courants dans les différents enroulements ?*
- *Quelles seront les directions et les amplitudes des vecteurs représentatifs de ces champs ?*

FIG. 5 – Animation

6. Alimentation par des courants sinusoïdaux déphasés temporellement de 120°

On alimente ces trois enroulements par des courants sinusoïdaux, de même amplitude I_{max} , de même pulsation ω et déphasés **temporellement** de 120° les uns par rapport aux autres :

$$\begin{aligned}i_a &= I_{max} \cdot \cos(\omega t) \\i_b &= I_{max} \cdot \cos(\omega t - 2\pi/3) \\i_c &= I_{max} \cdot \cos(\omega t - 4\pi/3)\end{aligned}$$

Question

Comment évoluent, au cours du temps, les courbes représentatives de $B_{e,a}$, $B_{e,b}$ et $B_{e,c}$ en fonction de θ ?

FIG. 6 – Animation

Les trois champs $\vec{B}_{e,a}$, $\vec{B}_{e,b}$ et $\vec{B}_{e,c}$ sont des champs pulsés.

7. Expression du champ total d'entrefer résultant

En tout point de l'entrefer, la valeur B_e du champ total d'entrefer généré par les trois enroulements est égal à :

$$\begin{aligned}B_e &= B_{e,a} + B_{e,b} + B_{e,c} \\&= K \cdot I_{max} [\cos \theta \cdot \cos \omega t + \cos(\theta - 2\pi/3) \cdot \cos(\omega t - 2\pi/3) \\&\quad + \cos(\theta - 4\pi/3) \cdot \cos(\omega t - 4\pi/3)]\end{aligned}$$

Comme on a, $\forall x, \forall y, 2 \cos x \cdot \cos y = \cos(x - y) + \cos(x + y)$, on en déduit que B_e est la somme de six termes :

- 3 termes en $\cos(\theta - \omega t)$, de même amplitude $K I_{max}$ dont la somme vaut le triple de chacun des termes,
- 3 termes de même amplitude $K I_{max}$ respectivement en $\cos(\theta + \omega t)$, $\cos(\theta + \omega t - 4\pi/3)$ et $\cos(\theta + \omega t - 8\pi/3)$ dont la somme est nulle $\forall \theta, \forall \omega, \forall t$;

On a donc finalement

$$B_e = \frac{3K \cdot I_{max}}{2} \cos(\theta - \omega t)$$

8. Représentation du champ total d'entrefer résultant

Questions

- *Comment évolue, au cours du temps, la courbe représentant B_e en fonction de θ ?*
- *Comment évolue, au cours du temps, le vecteur représentatif de son amplitude maximale ?*

FIG. 7 – Animation

On note que $\forall t$, la valeur maximum de B_e est constante et égale à $\frac{3K.I_{max}}{2}$ mais que la position pour laquelle B_e atteint son amplitude maximale est variable et égale à $\theta = \omega t$. Ce champ correspond à une onde **progressive** tournant dans l'entrefer à la vitesse ω . C'est un champ **tournant**.

Le vecteur représentatif du champ total d'entrefer est donc de norme constante mais d'orientation variable². Il se construit en faisant la somme des vecteurs représentatifs des champs créés par chacun des trois enroulements.

9. Champ tournant

Le champ total d'entrefer est créé par trois enroulements décalés spatialement de 120° l'un par rapport à l'autre et alimentés par des courants sinusoïdaux de même pulsation, de même amplitude et déphasés temporellement de 120° les uns par rapport aux autres est donc un **champ tournant**, équivalent à une onde progressive. Il est assimilable au champ que produirait un enroulement assurant une répartition sinusoïdale du champ d'entrefer, alimenté par un courant continu égal à $\frac{3.I_{max}}{2}$ et tournant à la vitesse ω

FIG. 8 – Animation

²alors que les vecteurs représentatifs des champs créés par chacun des trois enroulements qui constitue ce bobinage étaient d'orientation constante et de norme variable