

## NOTION DE CHAMP TOURNANT

**Thématique :** *Machines électriques*

↪ **Chapitre :** *Machines à champ tournant*

↪ **Section :**

**Type ressource :**     *Exposé*         *Laboratoire virtuel / Exercice*         *Qcm*

*Cet exposé montre comment il est possible, avec des bobinages assurant une répartition sinusoïdale du champ d'entrefer, de réaliser un champ tournant.*

- *pré requis :*
- *niveau : 2 - deuxième cycle*
- *durée estimée :*
- *auteur(s) : Damien Grenier(UCL)*
- *réalisation : Sophie Labrique*



## 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  $\theta$  (figure 1), un champ radial dont la valeur  $B_{e,a}$  est égale à :

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

où  $\theta_a$  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.

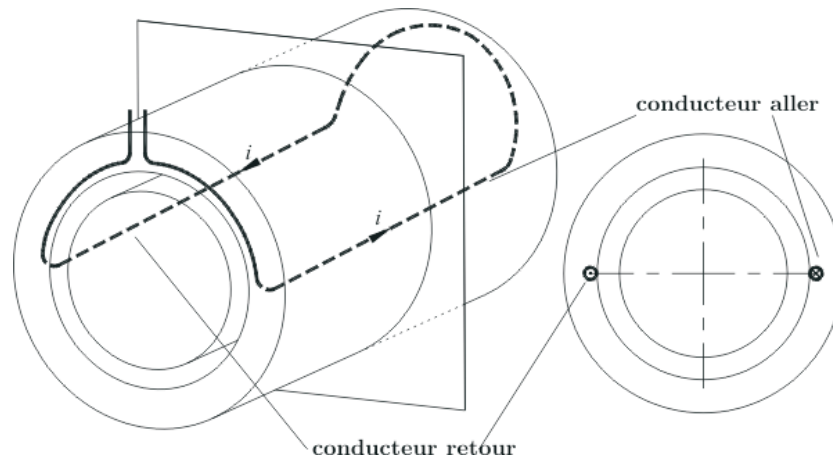


FIG. 1 – Représentation schématique d'un enroulement à une paire de pôles assurant une répartition sinusoïdale du champ dans l'entrefer.

### 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.

## 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  $\theta$  ?*
- *Comment cette courbe évolue-t-elle en fonction de la valeur du courant ?*

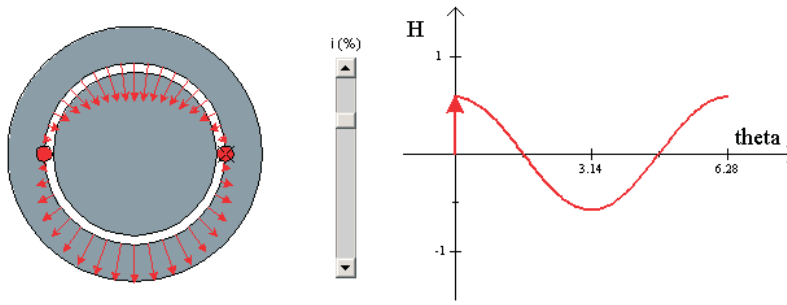


FIG. 2 – Animation

### 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  $\theta$  ?

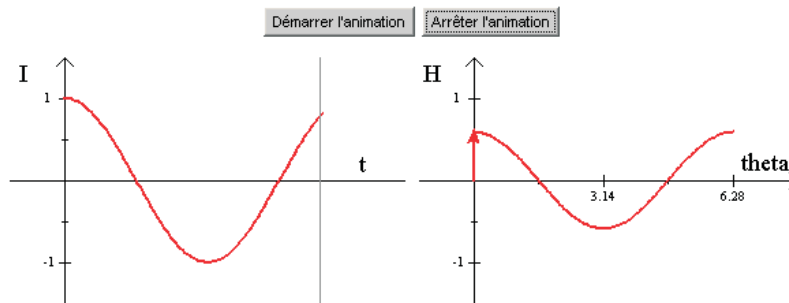


FIG. 3 – Animation.

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  $\theta$  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 :

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

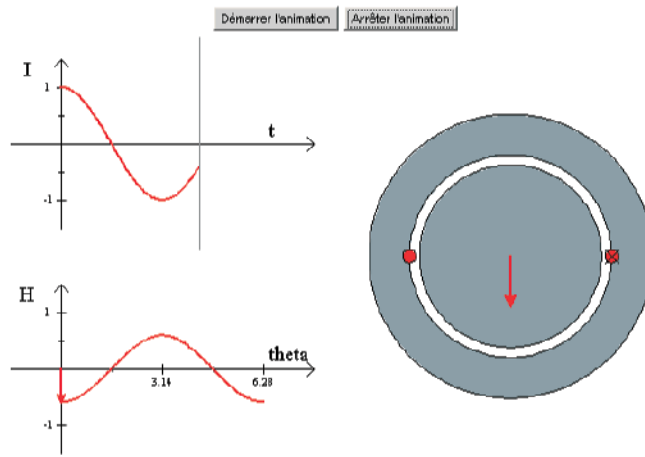


FIG. 4 – Animation.

### 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 :

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

#### Questions

- Quelles seront les allures des courbes représentant  $B_{e,a}$ ,  $B_{e,b}$  et  $B_{e,c}$  en fonction de  $\theta$  ?
- 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 ?

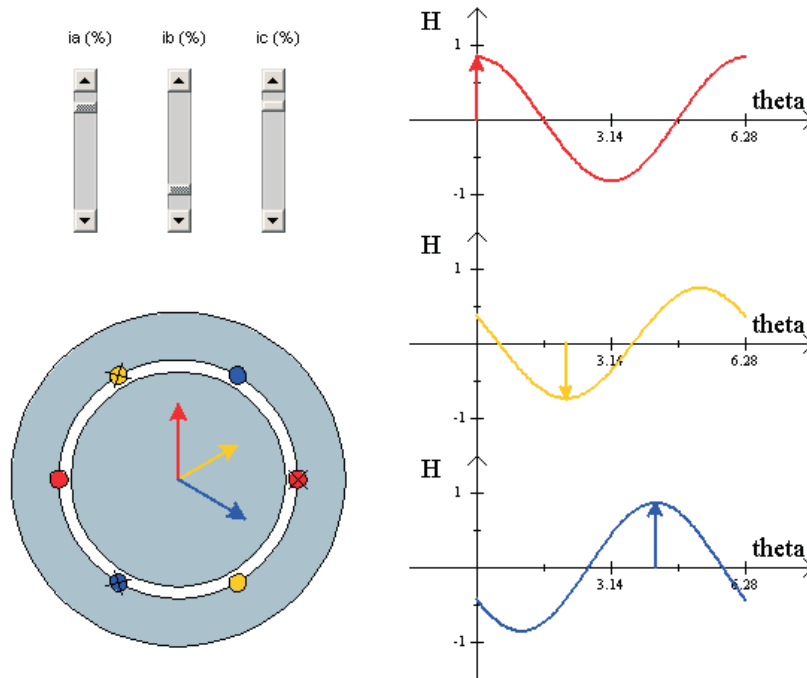


FIG. 5 – Animation.

## 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  $\omega$  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  $\theta$  ?

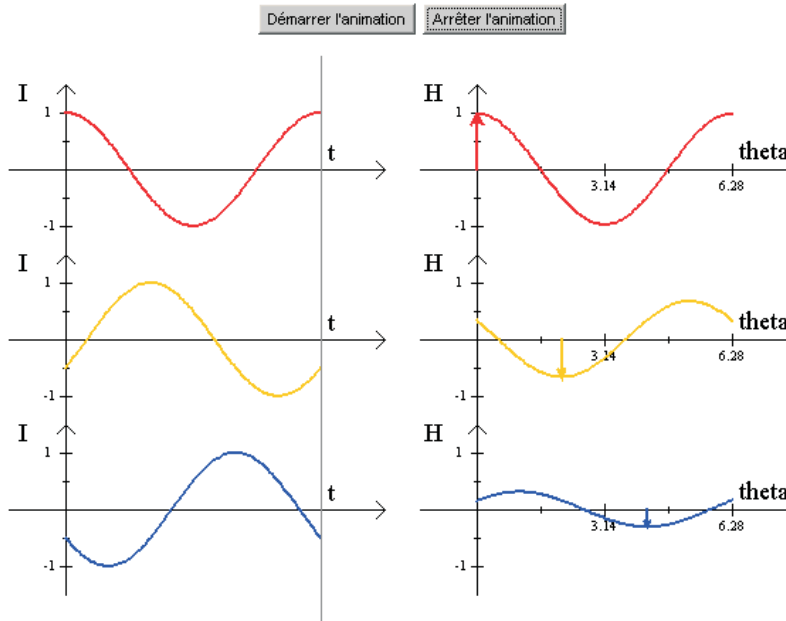


FIG. 6 – Animation.

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  $\theta$  ?
- Comment évolue, au cours du temps, le vecteur représentatif de son amplitude maximale ?

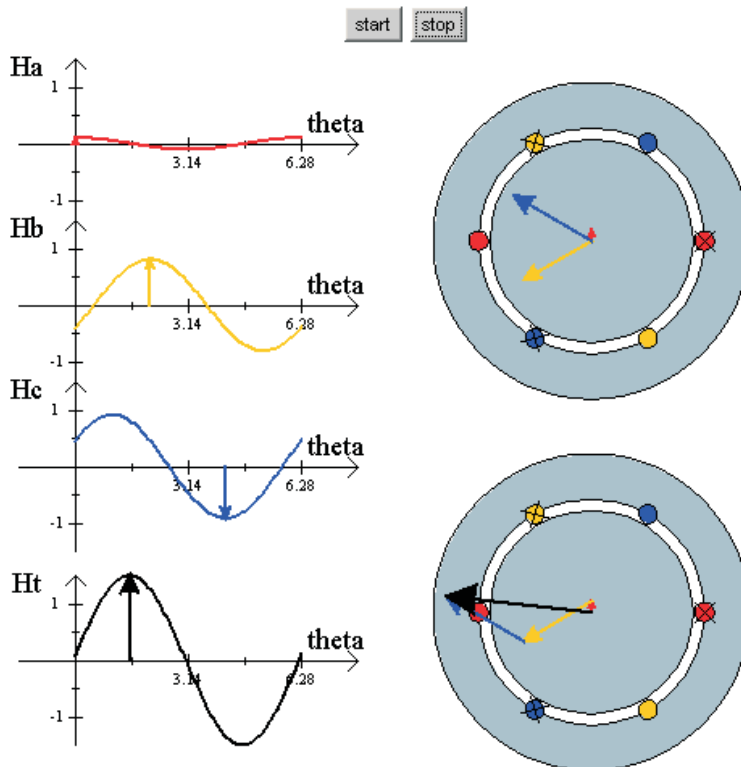


FIG. 7 – Animation.

On note que  $\forall t$ , la valeur maximum de  $B_e$  est constante et égale à  $\frac{3K \cdot I_{max}}{2}$  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  $\omega$ . C'est un champ **tournant**.

Le vecteur représentatif du champ total d'entrefer est donc de norme constante mais d'orientation variable<sup>1</sup>. 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  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre et alimentés par des courants sinusoïdaux de même pulsation, de même amplitude et déphasés temporellement de  $120^\circ$  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  $\frac{3 \cdot I_{max}}{2}$  et tournant à la vitesse  $\omega$

<sup>1</sup>alors que les vecteurs représentatifs des champs créés par chacun des trois enroulements qui constitue ce bobinage étaient d'orientation constante et de norme variable

start stop

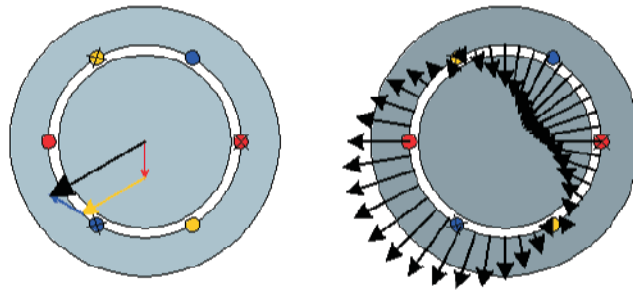


FIG. 8 – Animation.