

OUTILS ANALYTIQUES ET PHYSIQUE DE LA
MÉCATRONIQUE
31 DÉCEMBRE 2022

MASTER 1 2EEEEA OPTION PHYSIQUE NUMÉRIQUE

Conception optimale d'un actionneur
pour tuyère de fusée

Élèves :

Mohamed Reda YACOUBI

Enseignants

CLÉMENT NADAL
DIARRA ZIE DRISSA

Table des matières

1	Introduction	2
2	Prédimensionnement de la MASAP à stator encoché	2
3	Simulation de la machine sous Maxwell	3
3.1	Calcul des différentes grandeurs physiques	3
3.1.1	Charge linéique du courant	3
3.1.2	Courant rentrant dans une encoche	4
3.1.3	Profondeur d'encoche	4
3.2	Simulation sur MAXWELL et validation des résultats	4
3.2.1	Étude de la machine à vide	5
3.2.2	Étude de la machine en charge	7
4	Conclusion	8

1 Introduction

Le bureau d'études proposé a pour objectif de modéliser et simuler une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) à stator encoché. La modélisation d'une telle structure s'appuiera sur le modèle analytique d'une MSAP sans encoches établi et mis en œuvre lors de la première séance intitulée Optimisation d'une machine à aimants permanents sans encoches avec MATLAB. La partie simulation utilisera le logiciel de calcul par éléments finis ANSYS Maxwell spécifiquement développé pour simuler des problèmes d'électromagnétisme basse fréquence (machines électriques, transformateurs, actionneurs électromécaniques, . . .).

2 Prédimensionnement de la MASAP à stator encoché

1. A partir de la conservation du flux entre la zone d'entrefer et la culasse statorique, on trouve l'expression de la largeur de dent l_d et la largeur d'encoche l_e

$$\begin{aligned}\Phi_e &= \Phi_d \implies B_e \times S_e = B_d \times l_d \\ \implies l_d &= \frac{B_e \times S_e}{B_d}\end{aligned}$$

Avec B_e est l'amplitude de l'induction magnétique dans l'entrefer au niveau de l'alésage et B_d est l'amplitude maximale admissible de l'induction magnétique dans une dent.

Ainsi on a :

$$S_e = \frac{2\pi \times (a - e)}{N_e} \simeq \frac{2\pi \times a}{N_e}$$

Avec D le diamètre d'alésage tel que $a = \frac{D}{2} \gg e$, et N_e est le nombre total d'encoches.

Or le pas dentaire s'exprime avec la relation suivant :

$$\Delta_d = l_d + l_e = \frac{2\pi \times a}{N_e}$$

Donc

$$l_d = \Delta_d \frac{B_e}{B_d}$$

et

$$l_e = \Delta_d - l_d$$

Alors

$$l_e = \Delta_d \left(1 - \frac{B_e}{B_d}\right)$$

2. Dans l'hypothèse d'encoches rectangulaires, en effectuant un raisonnement sur les surfaces occupées par les conducteurs pour chaque modèle de MSAP (avec et sans encoches). On trouve l'expression de la profondeur d'encoche h_e en fonction du diamètre d'alésage D , de l'épaisseur de bobinage E avec l'approximation $E \ll D$ et donc :

$$h_e = \frac{\Delta_d}{l_e} E$$

3. A partir de la conservation du flux, et on supposant que $C_S = C_R$ on a :

$$2.\Phi_R = \Phi(a - e) \implies 2.Bfe.c.h = Br(a - e).\theta_a(a - e).h$$

Ainsi on a :

$$Br(a - e).\theta_a(a - e) = B_a.\theta_p(a)$$

Donc

$$2.B_{FE}.C = B_a.\theta_a(a)$$

Et avec $\theta_p = \frac{\beta_a \times \pi}{p}$ et $\Delta P = \frac{\pi \times D}{2 \times p}$, on trouve l'expression de l'épaisseur de la culasse rotorique C_R :

$$C_R = \beta_a \frac{\Delta p}{2} \frac{B_a}{B_{FE}}$$

3 Simulation de la machine sous Maxwell

Cette partie a pour objectif de simuler les structures de machines répondant au cahier des charges et vérifiant les critères d'optimisation utilisés lors du premier BE.

Et pour cela on utilise les paramètres optimaux suivant :

```
Le diametre est D = 0.1273 m
La valeur de lambda est = 2.1088
L'épaisseur d'aimant l_a est = 0.0074 m
L'épaisseur de bobinage E = 0.0045 m
Le facteur d'arc polaire beta = 0.8000
Le champ magnétique dans l'entrefer Be = 0.5002 T
La densité de courant dans le cuivre Jcu = 5651062.7693 (A/m^2)
Le coefficient de fuite interpolaire Kf = 0.2063
L'entrefer e = 0.0010 m
```

3.1 Calcul des différentes grandeurs physiques

3.1.1 Charge linéique du courant

On a la charge linéique s'exprime par la relation suivante :

$$E_{ch} = A \times J_{cu}$$

Il vien donc : Le calcul de la charge linéique sera basé sur les relation suivante :

$$A = \frac{E_{ch}}{J_{cu}}$$

Et puisque le facteur d'échauffement $E_{ch} = 10^{11} A/m$, et $J_{cu} = 5.65 \cdot 10^6 A/m^2$ on obtient donc :

$$A = 17.7 \text{ kA/m}$$

3.1.2 Courant rentrant dans une encoche

On a le courant total qui circule dans la machine s'exprime par la relation suivante :

$$I_{total} = \pi D A$$

Et donc le courant rentrant dans une encoche est :

$$I_e = \frac{I_{total}}{N_e}$$

Or $D = 0.1273m$ et $N_e = 24$, donc :

$$I_e = 294.94 A$$

3.1.3 Profondeur d'encoche

On a la profondeur d'encoche s'exprime avec la relation suivante :

$$h_e = \frac{\Delta_d}{l_e} E$$

Et donc, on doit déterminer d'abord le pas dentaire Δ_p et la largeur d'encoche l_e .

Or on a :

$$\Delta_d = \frac{\pi D}{N_e} = 16.66mm$$

Et :

$$l_e = \Delta_d \left(1 - \frac{B_e}{B_d}\right) = 11.07mm$$

Donc la valeur de la profondeur d'encoche est :

$$h_e = 6.7 mm$$

3.2 Simulation sur MAXWELL et validation des résultats

On utilise le modèle déjà fournit, et on modifie les paramètres dimensionnant notre machine (paramètres optimaux trouvés lors de la partie 1 sur MATLAB) et respectant le cahier de charge où la contrainte principale est telle que $C_{em} = 10N.m$.

On initialise d'abord N_e et N_{vp} à 1, et on vérifie les résultats en faisant une étude à vide et une autre en charge.

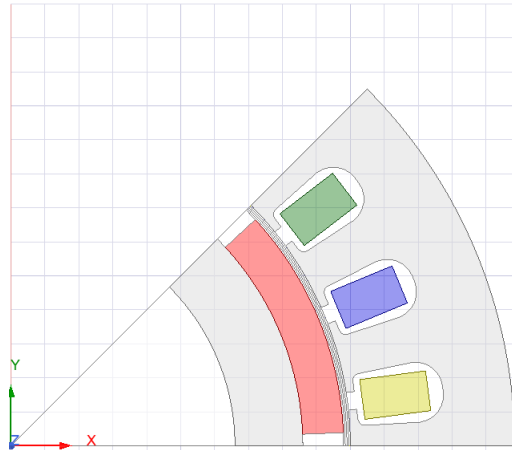


FIGURE 1 – Un huitième d'une section longitudinale de la machine

3.2.1 Étude de la machine à vide

Afin de faire une étude de la machine à vide, on impose une intensité nulle dans les conducteurs statoriques ($I_S = 0$).

Puis on effectue une simulation sur une période afin d'afficher les forces électromotrices associées (fonction InducedVoltage), le couple électromagnétique instantané pour cette configuration et la composante radiale de l'induction dans l'entrefer.

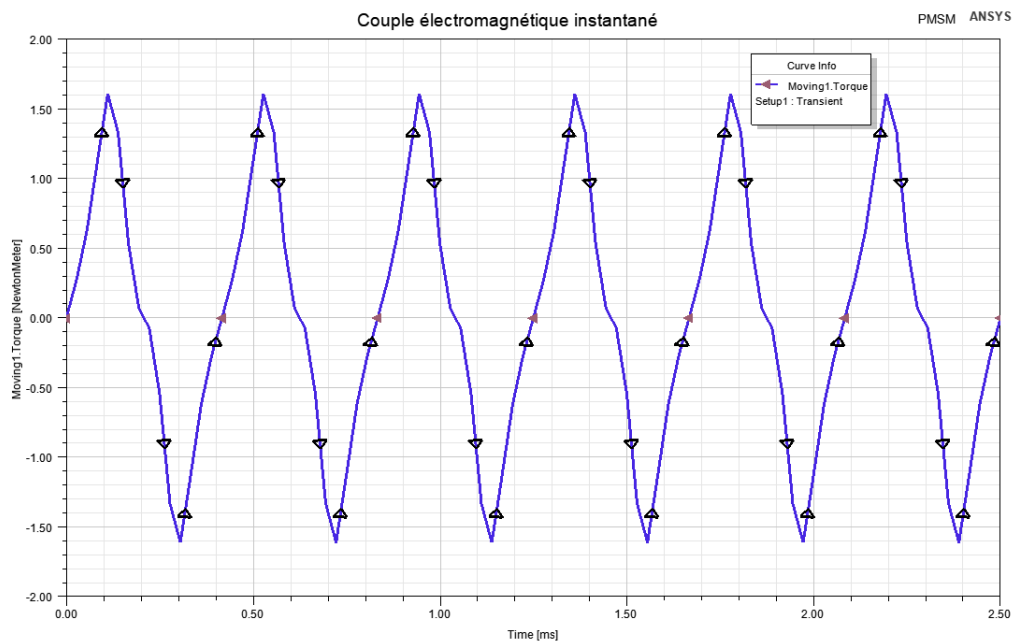


FIGURE 2 – Le couple C_{em} instantané

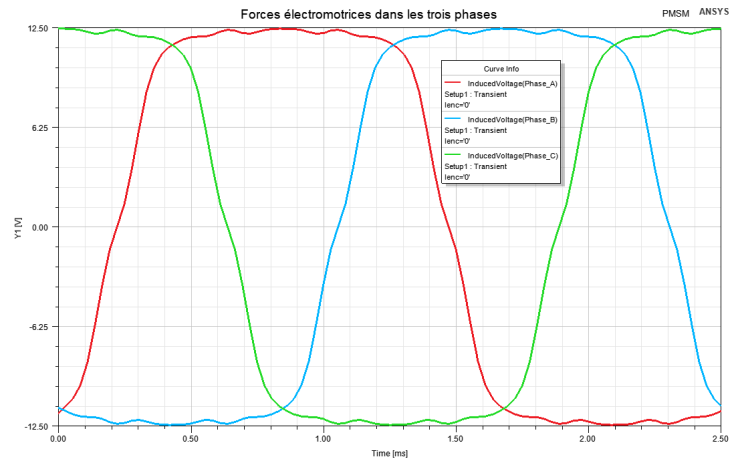


FIGURE 3 – Les formes d’ondes des forces électromotrices E

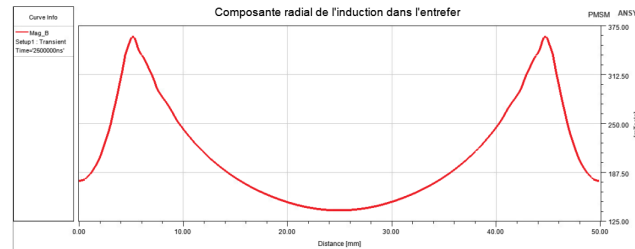


FIGURE 4 – La composante radiale de l’induction dans l’entrefer B_e

On remarque que le couple électromagnétique tracé à une valeur moyenne non nulle, ce couple correspond au « couple de détente » qui participe aux ondulations du couple résultant lorsque la machine est en charge.

Pour les forces électromotrices, on remarque qu’elles alternent et qu’elles ne sont pas sinusoïdales, tandis qu’ils alternent de manière complémentaire, cela implique que la somme des trois courbes donne une constante.

En ce qui concerne la composante radiale de l’induction dans l’entrefer, on voit bien qu’elle est symétrique (chose qui revient du fait que les aimants sont semblables) et qu’elle est plus importante lorsqu’on s’approche des aimants.

3.2.2 Étude de la machine en charge

Afin de faire une étude de la machine en charge, on impose maintenant une intensité nominale pour le courant de ligne dans les conducteurs statoriques ($I_S = 295$).

Et de même que pour l'essai à vide, on effectue une simulation sur une période puis on visualise le couple électromagnétique instantané pour cette configuration, la composante radiale de l'induction dans l'entrefer, la composante orthoradiale de l'induction dans l'entrefer, les pertes par effet Joule (fonction StrandedLoss), les pertes « fer » (fonction CoreLoss) ainsi que les inductances propres et les mutuelles inductances.

Ainsi, on lance la simulation et on trouve les résultats suivants :

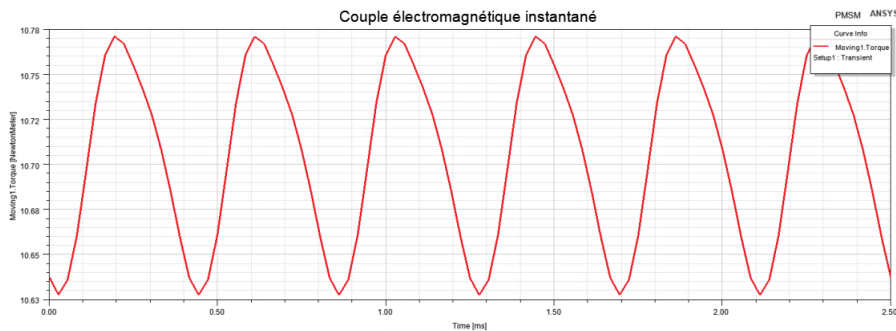


FIGURE 5 – Couple électromagnétique C_{em}

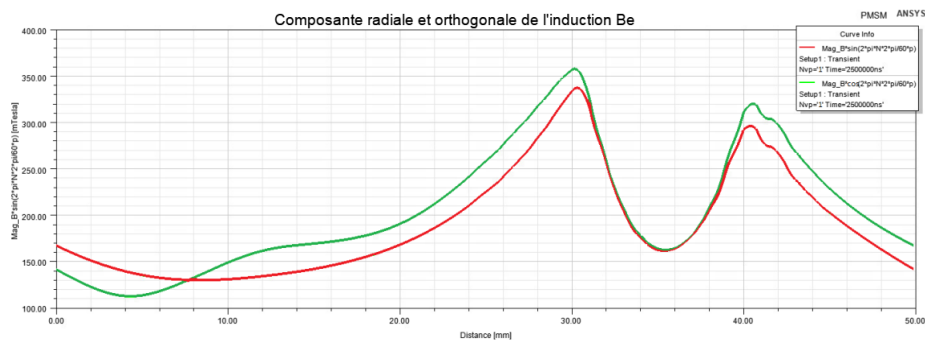


FIGURE 6 – la composante radiale et orthoradiale de B_e

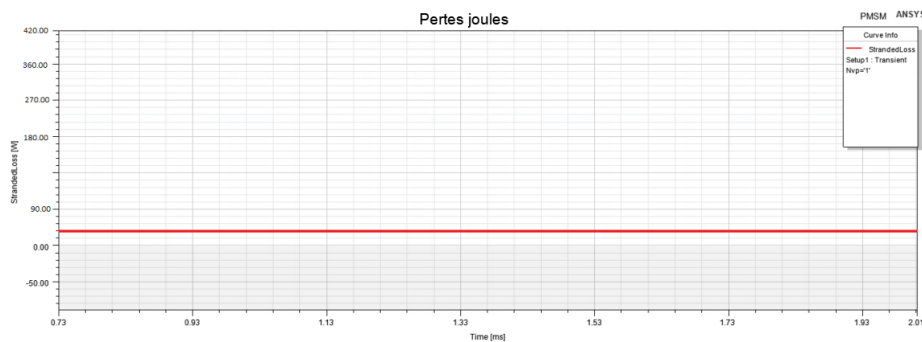


FIGURE 7 – Les pertes joules

On remarque que le couple électromagnétique tracé à une valeur moyenne proche de celle imposée par le cahier de charges.

Pour la composante radiale de l'induction dans l'entrefer, on voit bien qu'elle presque la même forme que celle obtenue en essai à vide.

En ce qui concerne les pertes joules, on trouve une valeur égale à $45W$ très proche de la valeur optimale trouvée par simulation sous Matlab.

4 Conclusion

Ce Bureau d'étude nous a permis de se familiariser avec le logiciel ANSYS MAXWELL. On a pu donc modéliser et simuler une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) à stator encoché afin de comparer les résultats trouvés avec ceux trouvés par simulation sous MATLAB lors du premier bureau d'étude.