

# Optimisation de la structure électromagnétique d'une machine spéciale fort couple

Luc MOREAU, Mohamed El Hadi ZAIM

IREENA, boulevard de l'université, 44600 Saint-Nazaire, luc.moreau@univ-nantes.fr.

**RESUME** - Ce papier décrit la conception d'une machine spéciale de type DSPM (Doubly Saillant Permanent Magnet Machine) pour les applications fort couple. La structure électromagnétique est optimisée pour deux stratégies de commande ; avec des références de courant rectangulaire symétrique ou positif. La forme des petites dents ainsi que la structure globale de la machine sont optimisés via un algorithme génétique couplé à la méthode des éléments finis afin de maximiser le couple massique d'une part et le couple rapporté au coût des matières actives d'autre part. Ces optimisations sont lancées vingt fois afin de pouvoir réaliser une étude statistique des résultats.

**Mots-clés**— DSPM, Algorithme génétique, Stratégie de commande en courant..

## 1. INTRODUCTION

Les applications à basse vitesse de rotation (éoliennes, hydroliennes, ...) mettent en générale en œuvre une boîte de vitesse accouplée à une machine électrique classique. Or, ces dispositifs peuvent être améliorés en s'affranchissant de la boîte de vitesse (réduction de la maintenance, amélioration du rendement...) grâce à l'utilisation d'une machine fort couple [1]-[2].

Parmi les technologies de machines fort couple on peut nommer la machine synchrone à aimants permanents ou à rotor bobiné, la machine à flux axiale, la machine à flux transverse, la machine à réductance variable [1-4] et la DSPM [5-8]. La DSPM représente une solution intéressante [5-8]. Ce type de générateur (figure 1) présente de nombreux avantages tels que sa simplicité de construction, son bas coût, sa fiabilité et son couple massique. De plus, le rotor passif permet de réduire les pertes qui sont principalement localisées au stator, lequel est plus aisé à refroidir.

On se propose d'optimiser les dimensions géométriques de la DSPM afin de maximiser le couple massique d'une part et le couple au coût d'autre part. Ces optimisations sont lancées pour deux stratégies de commande. Dans la littérature ces deux stratégies de commande ont été étudiées séparément mais n'ont jamais été comparées.

La machine triphasée proposée comprend 64 dents au rotor, 48 dents au stator réparties sur 12 plots et 4 aimants dans la culasse statorique (figure 1). Il s'agit d'une machine de 2kW et 380 Nm, caractéristiques typiques des applications fort couple. Un prototype est en cours de fabrication.

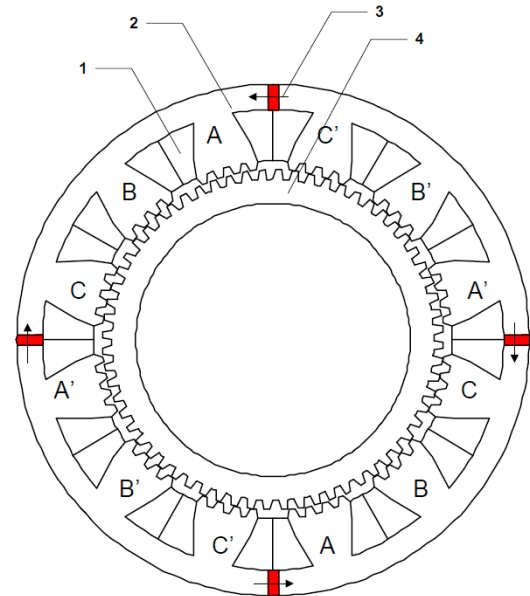


Fig.1 Structure électromagnétique de la DSPM avec les bobinages (1), le stator (2), les aimants (3) et le rotor (4) [8].

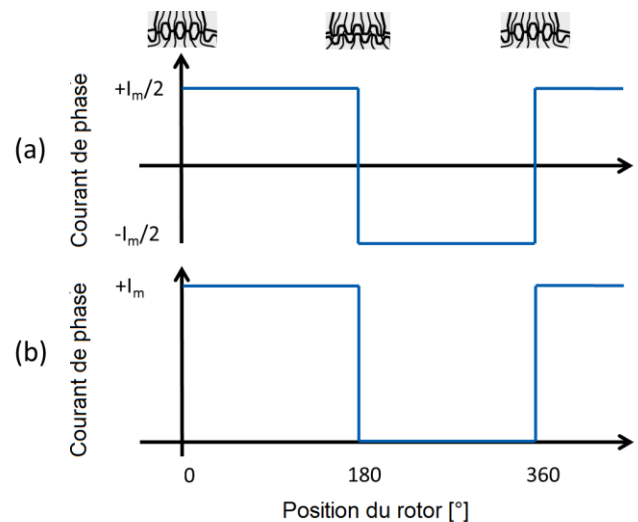


Fig.2 Stratégies de commande avec des courants rectangulaires symétriques (a) ou positifs (b).

## 2. MODELISATION DE LA DSPM

La structure étudiée est présentée sur la figure 1.

La vitesse de rotation est liée à la fréquence des courants par la formule suivante :

$$\Omega = \frac{\omega}{Z_R} = \frac{2\pi f}{64} \quad (1)$$

Le nombre de dents au rotor ( $Z_r=64$ ) est fixé afin d'obtenir une fréquence électrique typique de l'ordre de 50 Hz pour la vitesse de rotation nominal de  $50 \text{ tr. min}^{-1}$ . Le grand nombre de petites dents rotoriques réalise un « multiplicateur électromagnétique ». Dès lors, ce type de machine est naturellement bien adapté aux applications fort couple.

La DSPM étudiée comporte une géométrie complexe et est fortement saturée sous le régime de fonctionnement nominal. Comparée aux méthodes analytiques, la méthode des éléments finis permet une bonne prise en compte de ces deux aspects.

Un programme a été développé au laboratoire IREENA afin de résoudre les équations électromagnétiques en mode saturé. La coénergie s'exprime de la façon suivante :

$$W'(i, \theta) = \iiint_{\Omega_D} \left( \int_0^B B(H) \cdot dH \right) dV \quad (2)$$

On en déduit le couple développé :

$$T = \frac{dW'}{d\theta} \quad (3)$$

## 3. STRATEGIES DE COMMANDE

On trouve dans la littérature deux types de commande en courant de la DSPM (figure 2). Le premier met en œuvre les courants de référence de forme rectangulaire symétrique [5]-[7]. Un deuxième type de commande consiste à utiliser des consignes de courant rectangulaire positif [8].

Les figures 3 et 4 montrent les caractéristiques flux courant pour les deux stratégies de commande. La surface en bleu est à l'image du couple développé.

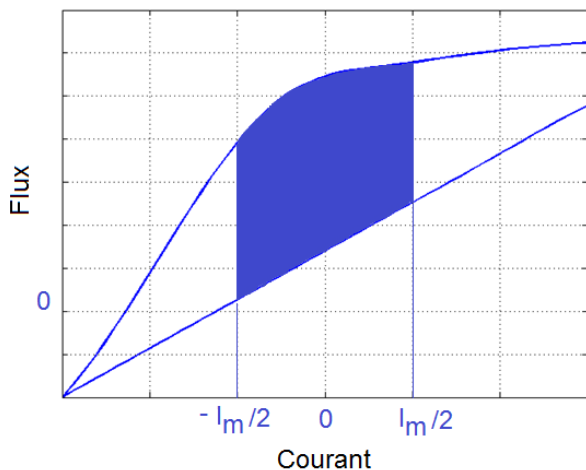


Fig.3 Caractéristique flux courant pour la forme de courant de référence (a).

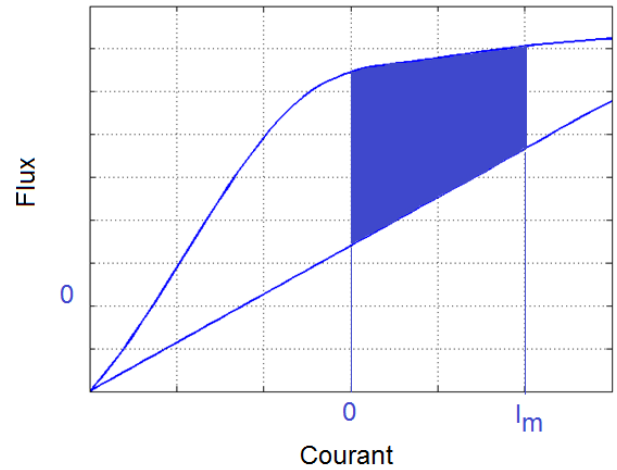


Fig.4 Caractéristique flux courant pour la forme de courant de référence (b).

## 4. OPTIMISATION DE LA STRUCTURE ELECTROMAGNETIQUE.

Il s'agit d'optimiser la structure globale d'une DSPM via un algorithme génétique (AG). On se propose d'optimiser le couple massique puis le couple au coût. En effet ces aspects sont essentiels dans la conception d'une machine électrique. Le diamètre extérieur est fixé à 400mm et l'entrefer à 0.5mm.

La structure étudiée est présentée figures 5 et 6. Elle est définie par 13 critères géométriques :

- L'épaisseur d'aimant  $E_m$ .
- L'épaisseur de culasse rotorique et statorique  $E_r$  et  $E_s$ .
- La hauteur de bobine  $h_b$ .
- L'angle d'ouverture du plot  $\beta$ .
- La position du point A ( $R_a, \beta_a$ ),  $R_a$  est la distance entre le point A et le centre de la machine  $O'$ .
- Le rayon du rotor  $R_r$ .
- Les paramètres des dents trapézoïdales à savoir la profondeur de dents au rotor et au stator  $h_s$  et  $h_r$ , le rapport cyclique des dents  $\alpha_{s1}$  et  $\alpha_{r1}$ , le rapport cyclique des plots  $\alpha_{s2}$  et  $\alpha_{r2}$ .

Un dimensionnement analytique classique permet de limiter les variables géométriques (tableau 1).

Tableau 1. Contraintes géométriques.

$5 \text{ mm} \leq (E_r, E_s) \leq 50 \text{ mm}$
$5 \text{ mm} \leq h_b \leq 100 \text{ mm}$
$1^\circ \leq (\beta, \beta_a) \leq 15^\circ$
$R_c/3 \leq (R_r, R_a) \leq 0.9.R_c$
$R_r - h_r - E_r > R_c/3$
$0.2 \leq (\alpha_{s1}, \alpha_{r1}) \leq 0.7$
$0.2 \leq (\alpha_{s2}, \alpha_{r2}) \leq 0.7$
$R.p_d/5 \leq (h_s, h_r) \leq R.p_d$
$(\alpha_{j1} + \alpha_{j2}) \leq 1$ avec $j=r,s$

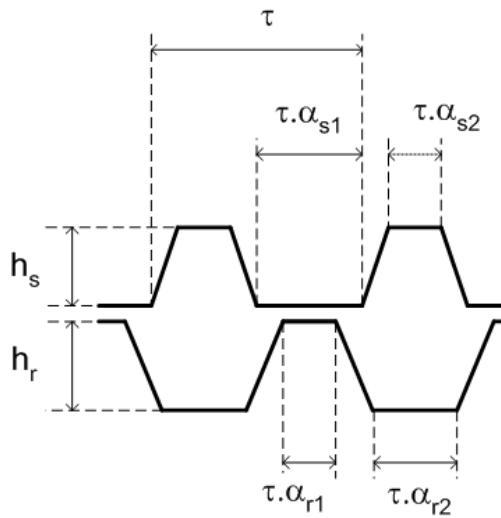


Fig.5 Petites dents.

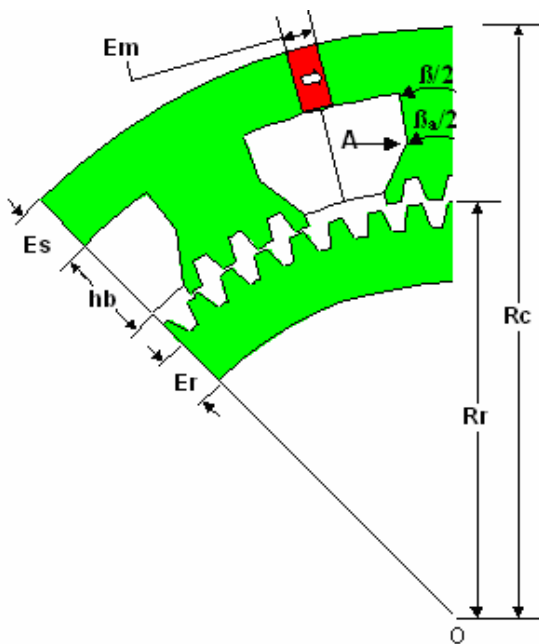


Fig.6 Structure globale [8].

Il est possible de simplifier la définition de la géométrie de 13 à 8 paramètres en considérant  $\alpha = \alpha_{s1} = \alpha_{r1} = \alpha_{s2} = \alpha_{r2}$ ,  $h = h_s = h_r$  et  $E = E_s = E_r$ .

Le matériau ferromagnétique utilisé est de type M400-50A et l'aimant NFeBr a les caractéristiques typiques  $B_r = 1.2T$  et  $\mu_r = 1.04$ .

Des essais d'optimisation avec un algorithme déterministe (méthode du simplex) ont permis de constater qu'il converge vers un minimum local proche du point initial, ce qui nous a conduits à utiliser une méthode non déterministe. L'algorithme génétique a été choisi pour sa simplicité de programmation et de plus il ne nécessite pas de calcul de dérivée. En effet, nos simulations sont effectuées par la méthode des éléments finis,

un calcul de gradient pourrait entraîner des instabilités numériques qui feraient diverger le processus d'optimisation. D'autre part, des études ont montré que l'optimisation à l'aide d'un algorithme génétique est mieux adaptée qu'un algorithme déterministe notamment dans le cas d'une machine en régime saturé [11]. L'algorithme génétique est directement inspiré du processus de l'évolution naturelle développé par Darwin. Nous l'avons retrouvé cité plusieurs fois dans la littérature de la communauté du génie électrique et notamment pour l'optimisation de la structure électromagnétique des moteurs électriques [9-11]. Il est basé sur la théorie de l'évolution des espèces dans un milieu naturel, soit une transposition artificielle des concepts basiques de la génétique et des lois de survie. Comme dans la nature, les individus (DSPM dans notre cas) les mieux adaptés (les DSPM qui développent le plus grand couple par exemple) ont le plus de chance de se reproduire. Les gènes (paramètres à optimiser) des meilleurs individus sont donc transmis à leur descendance selon les opérateurs génétiques (crossover et mutation).

L'algorithme génétique n'a besoin d'aucune connaissance du système à optimiser et il peut progresser à partir d'individus initiaux moyens. De plus il est robuste et présente un bon compromis entre l'exploration de l'espace de recherche et l'exploitation des meilleures solutions [12]. Il est donc basé sur une méthode de recherche qui favorise les solutions minimisant la fonction d'évaluation. La recherche de la solution optimale se fait en parallèle sur l'ensemble de la population. Cette particularité permet à l'algorithme de scruter un large éventail de solutions dans l'espace de recherche, ce qui n'est pas le cas des méthodes déterministes. Les chances de converger vers un minimum local sont donc réduites alors que les perspectives de trouver le minimum global sont accrues.

Le code simplifié de l'algorithme génétique que nous avons développé est présenté figure 7.

L'AG est couplé à la méthode des éléments fins afin de minimiser les fonction suivantes :

$$F_1 = \frac{M}{T} \quad (4)$$

$$F_2 = \frac{Cout}{T} \quad (5)$$

Avec « M » et « Cout » la masse et le coût des parties actives.

Le coût des matériaux est fortement volatile, cependant nous choisissons les valeurs typiques suivantes :

- Tôle magnétique: 1€/kg;
- Cuivre: 10€/kg;
- Aimants (NFeBr): 50€/kg.

Un faible nombre d'individus réduit le temps de simulation mais l'AG risque de converger vers un minimum local. Un compromis est fait avec une population de 50 individus, un nombre de génération de 50 et des probabilités de croisement et de mutation à 0.8 et 0.01 respectivement.

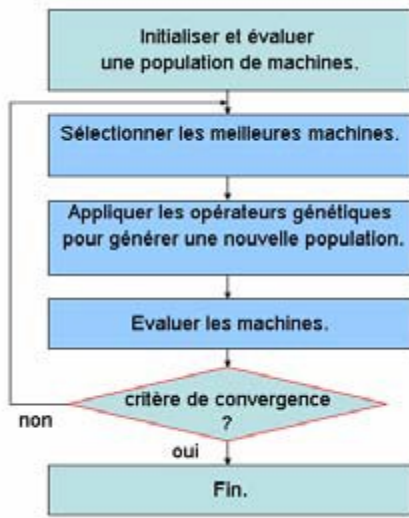


Fig.7 Organigramme de l'algorithme génétique.

L'optimisation est effectuée via un AG afin de maximiser le couple massique et le couple au coût avec les deux stratégies de commande soit quatre optimisations différentes. Pour chaque optimisation, l'AG est lancé 20 fois afin de pouvoir réaliser une étude statistique des résultats.

## 5. RESULTATS

Le tableau 2 montre les résultats d'optimisation. Lorsque le couple massique est optimisé, les deux formes de courant donnent des résultats proche avec en moyenne environ 5.7 Nm/kg. Cependant, lorsque le couple au coût est optimisé, la forme de courant positive est nettement meilleure que la forme symétrique avec 2.52 Nm/€ contre 1.84 Nm/€.

La figure 8 présente les histogrammes des fonctions objectives. On remarque des répartitions étroites ce qui dénote une bonne répétitivité de l'AG développé.

Intéressons-nous aux paramètres géométriques optimisés. Le tableau 3 concerne l'optimisation du couple massique pour les formes de courant symétrique (a) et positif (b) tandis que le tableau 4 se focalise sur l'optimisation du couple au coût. On rappelle que chaque optimisation est lancée 20 fois. Pour chaque paramètre on donne les valeurs moyennes (Moy.), maximales (Max), minimales (Min) ainsi que l'écart type ( $\sigma$ ).

Tableau 2. Résultats d'optimisation.

Consigne de courant		Couple massique [Nm/kg]	Couple au coût [Nm/€]
Symétrique	Moyenne	5.68	1.84
	Max	5.79	1.87
	Min	5.48	1.82
	$\sigma$	0.08	0.02
Positive	Moyenne	5.73	2.52
	Max	6.01	2.61
	Min	5.38	2.44
	$\sigma$	0.22	0.05

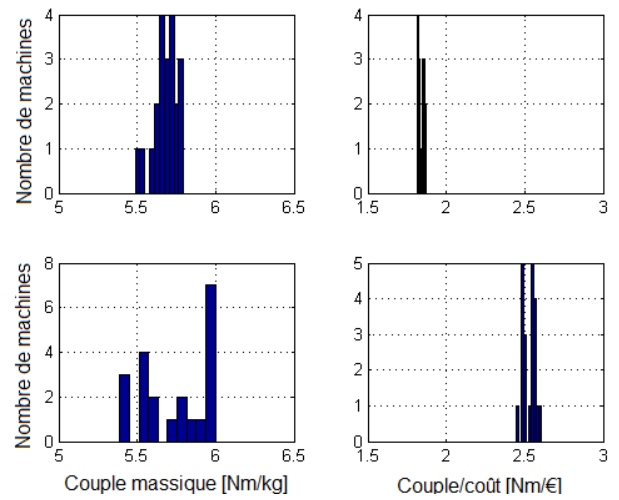


Fig.8 Résultats d'optimisation - histogrammes.

Nous commençons avec l'optimisation du couple massique (tableau 3). Pour les formes de courant symétrique et positif, l'ouverture des petites dents  $\alpha$  varie très peu avec des écarts type de 0.021 à 0.007 autour de valeurs égales à 0.308 et 0.348 respectivement. On observe la même chose pour la profondeur de dent  $h$  avec des valeurs de 7.04mm et 6.73mm. L'optimisation avec la forme de courant symétrique donne des valeurs de rayon rotorique  $R_r$  plus faibles (136mm vs 149mm), des épaisseurs de culasse  $E$  (20.6mm vs 16.7mm) et d'aimant  $E_m$  (37.3mm vs 22.6mm) plus grande. Cela conduit à une plus grande quantité d'aimant que pour les consignes de courant positif et par conséquent à une magnétisation plus élevée de la machine. Les figures 3 et 4 montrent que la forme de courant symétrique bénéficie d'avantage d'un niveau de magnétisation élevé, notamment pour exploiter au mieux les courants négatifs. Comme la quantité d'aimants (onéreux) est plus importante pour la stratégie « a », le coût en est impacté.

Passons à l'optimisation du couple au coût (tableau 4). On peut faire des commentaires très similaires sur  $a$  et  $h$  qui présentent de faibles variations convergentes vers des valeurs très proches. De plus, le rayon rotorique  $R_r$  est là aussi plus faible pour la stratégie « a » que pour la « b » avec 142mm et 153mm respectivement.

Des résultats intéressants apparaissent si on compare les tableaux 3 et 4. La différence la plus flagrante est l'épaisseur d'aimants  $E_m$  qui est réduite de 37.3 mm à 2.65 mm pour la forme de courant symétrique et de 22.6 à 2.21mm pour la positive. Ce résultat est logique car les aimants sont l'élément le plus onéreux de la machine. L'AG réduit alors au maximum la quantité d'aimants. Comme les machines résultantes ont un faible niveau de magnétisation, la forme de courant positif est favorisée avec 2.61 Nm/€ contre 1.87 Nm/€.

On notera que la machine qui optimise le couple au coût avec le courant positif n'a presque plus d'aimant et revient presque à une machine à réluctance variable (MRV) sans excitation (c.-à-d. sans aimant). Cependant la MRV en mode générateur ne produit pas de fem à vide et nécessite d'être magnétisée par un convertisseur statique. La DSPM a l'avantage d'être magnétisée par les aimants et de produire une fem à vide.

Tableau 3. Paramètres géométriques – couple massique  $F_1$ 

Paramètres		Sym.(a)	Pos. (b)
$\alpha$	Moy.	0.308	0.348
	Max	0.335	0.358
	Min	0.264	0.337
	$\sigma$	0.021	0.007
h [mm]	Moy.	7.04	6.73
	Max	9.00	8.17
	Min	5.00	5.00
	$\sigma$	1.06	0.89
E [mm]	Moy.	20.6	16.7
	Max	23.0	18.0
	Min	18.0	15.0
	$\sigma$	1.50	0.08
$E_m$ [mm]	Moy.	37.3	22.6
	Max	45.0	39.0
	Min	25.0	8.03
	$\sigma$	6.30	0.82
$h_b$ [mm]	Moy.	33.9	27.0
	Max	39.5	31.5
	Min	29.5	23.4
	$\sigma$	2.8	2.01
$\beta_a$ [°]	Moy.	5.81	6.48
	Max	6.81	10.0
	Min	4.27	5.07
	$\sigma$	0.66	1.58
$R_a$ [mm]	Moy.	155	170
	Max	174	181
	Min	146	156
	$\sigma$	5.8	7.30
$\beta$ [°]	Moy.	5.01	5.71
	Max	6.02	7.16
	Min	4.28	4.77
	$\sigma$	0.39	0.64
$R_r$ [mm]	Moy.	136	149
	Max	141	153
	Min	131	144
	$\sigma$	2.90	2.50

Tableau 4. Paramètres géométriques – Couple au coût  $F_2$ 

Paramètres		Sym. (a)	Pos. (b)
$\alpha$	Moy.	0.337	0.363
	Max	0.358	0.390
	Min	0.301	0.344
	$\sigma$	0.012	0.013
h [mm]	Moy.	7.04	6.41
	Max	8.15	9.00
	Min	5.68	4.00
	$\sigma$	0.83	0.90
E [mm]	Moy.	23.8	17.9
	Max	26.0	19.0
	Min	20.0	16.0
	$\sigma$	1.80	0.65
$E_m$ [mm]	Moy.	2.65	2.21
	Max	6.00	3.04
	Min	1.00	1.00
	$\sigma$	0.68	0.81
$h_b$ [mm]	Moy.	26.6	23.4
	Max	31.5	26.5
	Min	22.5	21.5
	$\sigma$	2.30	1.50
$\beta_a$ [°]	Moy.	6.72	8.58
	Max	9.35	9.96
	Min	4.88	5.39
	$\sigma$	1.44	1.29
$R_a$ [mm]	Moy.	161	168
	Max	174	182
	Min	151	157
	$\sigma$	5.60	8.40
$\beta$ [°]	Moy.	5.52	6.53
	Max	8.88	9.83
	Min	4.53	5.04
	$\sigma$	1.09	1.51
$R_r$ [mm]	Moy.	142	153
	Max	150	157
	Min	139	150
	$\sigma$	2.90	1.70

## 6. CONCLUSIONS

Une machine spéciale à fort couple est étudiée. La structure de la DSPM est optimisée pour deux stratégies de commande en courant (symétrique et positif) et deux fonctions objectives ; le couple massique et le couple au coût. Il s'agit, entre autres, d'étudier l'influence du mode de commande sur les paramètres géométriques de la DSPM optimisée. Les résultats montrent des résultats très proches entre les deux modes de commande vis-à-vis du couple massique. Pour le couple au coût, les courants positifs donnent de meilleurs résultats. La suite des travaux portera sur une optimisation multicritères par front de Pareto afin de dégager les compromis possible entre le couple massique et le couple au coût.

## 7. REFERENCES

- [1] M.R. Dubois, "Review of Electromechanical Conversion in Wind Turbine", Report EPP00.R03, April 2000, Faculty ITS Group Electrical Power Processing.
- [2] H. Li and Z. Chen, "Overview of different wind generator systems and their comparisons", IET Renewable Power Generation, vol. 2, no. 2, pp. 123-138, 2008.
- [3] D. Bang, H. Polinder, G. Shrestha, and J. Ferreira, "Review of Generator Systems for Direct-Drive Wind Turbines", European Wind Energy Conference & Exhibition, Belgium, pp. 1-11, 2008.
- [4] M. Machmoum, L. Moreau, M. Zaim, G. Barakat, N. Takorabet, C. Chillet, D. Matt, S. Taibi, A. Tounzi, C. Espanet, A. Miraoui, H. S. Zire, "Comparaison de structures électromagnétiques pour une application en générateur à faible vitesse et fort couple", Electrotechnique du Futur, décembre 2003.

- [5] K. T. Chau, M. Cheng, C. C. Chan "Performance Analysis of 8/ 6-Pole Doubly Salient Permanent Magnet Motor", Taylor & Francis, *Electric Machines and Power Systems*, 27:1055–1067, 1999.
- [6] K. Nakamura, J. Yoshida, and O. Ichinokura, "A novel high power permanent magnet reluctance generator using ferrite magnet," in 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09, 8-10 Sept. 2009, pp. 1-8.
- [7] Z. Q. Zhu and D. Howe, "Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles," *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 746-765, Apr. 2007.
- [8] R. Saou, M.E. Zaim, K. Alitouche, "Optimal Designs and Comparison of the Doubly Salient Permanent Magnet Machine and Flux-reverseal Machine in Low-speed Application", *Electric Power Components and System*, Vol. 36, n°9 pp. 914-931, October 2008.
- [9] N. Bianchi, S. Bolognani, "Optimisation of Electric Motors by Genetic Algorithms", *IEE Proc B*, September 1998, n°145, pp. 475-483.
- [10] D. Beasley, D. R. Bull, and R. R. Martin, "An overview of genetic algorithms: Part 2, Research topics," *University Computing*, vol. 15, 1993.
- [11] S. Dufour, G. Vinsard, B. Laporte, "Generating Rotor Geometries by using a Genetic Method", *IEEE Transaction on magnetics*, vol. 36, no. 4, pp. 1039-1042, July 2000.
- [12] K.S. Chai, C. Pollock, "Using Genetic Algorithm in Design Optimisation of the Flux Switching Motor", *IEEE Power Electronics, Machines and Drives*, Conference publication No.487,pp. 540-545, April 2002.