Détermination expérimentale des caractéristiques des machines sans fer et comparaison avec une modélisation pseudo-tridimensionnelle

C.A. Bleijs, J.L. Letellier, C. Rioux, F. Rioux-Damidaou

► To cite this version:

C.A. Bleijs, J.L. Letellier, C. Rioux, F. Rioux-Damidaou. Détermination expérimentale des caractéristiques des machines sans fer et comparaison avec une modélisation pseudo-tridimensionnelle. *Revue de Physique Appliquée*, 1985, 20 (8), pp.583-587. 10.1051/rphysap:01985002008058300 . jpa-00245373

HAL Id: jpa-00245373

<https://hal.science/jpa-00245373>

Submitted on 1 Jan 1985

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification
Physics Abstracts
76.90

Détermination expérimentale des caractéristiques des machines sans fer et comparaison avec une modélisation pseudo-tridimensionnelle

C. A. Bleijs, J. L. Letellier, C. Rioux et F. Rioux-Damidaud

Laboratoire d'Electrotechnique des Universités Paris VI et XI, Bâtiment 214, 91405 Orsay, France

(Reçu le 27 avril 1984, révisé le 13 décembre, accepté le 19 avril 1985)

Résumé. — Les machines asynchrones à rotor massif, sans fer, sont parfaitement adaptées aux entraînements industriels de grande vitesse à des puissances élevées. Nous avons mis en place précédemment une méthode de calcul pseudo-tridimensionnelle, donnant des résultats extrêmement précis avec des temps de calcul réduits. Nous décrivons ici un montage expérimental construit spécifiquement pour tester la validité de la modélisation. Nous rapportons les résultats expérimentaux qui concordent tout à fait avec la théorie et nous déterminons les caractéristiques de bobinages non calculables actuellement.

Abstract. — The iron free rotor asynchronous motor is ideally suited as a high speed, high power industrial drive. We have previously described a pseudo-three dimensional theoretical model which is capable of accurately predicting all of the electrical characteristics of these machines whilst requiring only very short computing times. In this article we describe an experimental set up that was specifically built to fully test the validity of the theoretical model. We detail the experimental results obtained which have proved to agree very closely with the theory. We also determine the performance of windings that we are at present unable to calculate.

1. Introduction.

Dans un article précédent [1], nous avons décrit une méthode d'analyse pseudo-tridimensionnelle par séries de Fourier spatio-temporelles appliquée aux machines asynchrones sans fer. Rappelons que celles-ci sont composées (cf. Fig. 1) d'un rotor cylindrique lisse forgé dans un bloc de métal non magnétique (alliage d'aluminium par exemple). Ce rotor est entouré par un bobinage polyphasé tenu par des fixations non magnétiques. L'ensemble est enfermé dans une culasse ferromagnétique dont la surface intérieure est lisse. Il n'y a donc pas de dents ni de pertes de denture. Notons aussi que leur structure simple et leur rotor extrêmement robuste les rend tout particulièrement adaptées aux régimes de vitesse et puissance élevées.

La méthode d'analyse développée permet de déterminer les champs électromagnétiques en tout point de la machine alimentée par un courant périodique de forme quelconque. Nous pouvons ainsi prédire ses performances avec précision. Nous décrivons ici un montage expérimental que nous avons spécifiquement réalisé pour tester le calcul théorique et nous donnons les résultats de la comparaison entre les calculs et l'expérimentation.

Fig. 1. — Vue schématique de la machine.

[Schematic view of the machine.]

2. Le montage.

2.1 DESCRIPTION GÉNÉRALE. — Nous avons mis en place une maquette statique à axe vertical (voir Fig. 2). Ce montage a les dimensions suivantes :

- longueur rotor : 1 500 mm ;
- $\varnothing$ rotor : 249 mm ;
- $\varnothing$ intérieur des bobines : 260 mm ;
- $\varnothing$ extérieur des bobines : 303 mm ;
- $\varnothing$ intérieur de la carcasse : 307 mm ;
- longueur de la carcasse : 1 500 mm.

Fig. 2. — La maquette de mesure.

[The experimental set-up.]

Le rotor est suspendu par un fil de torsion (acier stub $\varnothing = 3$ mm, $l = 500$ mm), ce qui permet de mesurer le couple directement par l'angle de rotation. A l'extrémité inférieure de l'axe de rotation nous avons placé un amortisseur à liquide visqueux (huile) qui limite les oscillations du rotor. Avec ce montage, la force radiale sur les mouvements est minime et en conséquence les frottements secs sont négligeables par rapport au couple mesuré (inférieur à 0,1 % du couple maximal). Nous atteignons des précisions de mesure sur le couple de l'ordre de 2 %.

2.2 LE STATOR. — Deux bobinages différents peuvent être montés et leur position verticale par rapport aux bouts du rotor peut être modifiée. Le premier, de type hexagonal (cf. Fig. 3) a comme particularité de ne pas avoir de « têtes » de bobines et, de ce fait, il présente une puissance réactive inférieure à celle obtenue avec les bobines classiques à tête. Cette bobine est parfaitement modélisée par la méthode pseudo-tridimensionnelle. La deuxième bobine comporte une partie type « hexagone » à son extrémité inférieure mais les interconnexions entre conducteurs au bout supérieur sont réalisées par une tête de forme classique

Fig. 3. — Bobinage de type hexagonal.

[View of the hexagonal winding.]

(cf. Fig. 4). Dans l'état actuel de notre méthode de modélisation, nous pouvons évaluer tout l'ensemble du bobinage statorique à l'exception de la « tête ». Une estimation de l'influence de la tête est obtenue en comparant les mesures effectuées sur la bobine réelle avec les calculs qui ne tiennent compte que des parties modélisables.

Fig. 4. — Bobinage composite avec une tête classique.

[View of the composite winding with one winding end.]

2.3 L'ALIMENTATION. — Il est à noter que le couple et les inductances statoriques ne dépendent pratiquement que de la pulsation rotorique ω_R . En conséquence, la fréquence d'alimentation de la maquette statique est égale à la fréquence rotorique du point de fonctionnement que nous désirons étudier. Ceci

nous permet de simuler les conditions existant dans une machine réelle malgré l'immobilité du rotor.

Nous avons choisi d'alimenter les machines à rotor massif par des alimentations dodécaphasées (deux alimentations triphasées décalées de 30 degrés) afin de limiter les pertes rotoriques [5]. Pour l'expérimentation nous avons réalisé un onduleur à transistors qui permet d'imposer un courant de forme quelconque aux bornes des six phases du rotor. Avec ce montage la précision sur la forme d'onde de courant est en pratique limitée par la rapidité de commutation des transistors de puissance. Compte tenu des transistors utilisés, nous avons pu obtenir une modulation qui n'excédait jamais 1 % de la valeur crête du courant. Il est à noter que le signal d'erreur a une fréquence dominante de 100 kHz et en conséquence n'affecte pas les caractéristiques électromagnétiques.

Le courant est mesuré à l'aide de shunts résistifs ou de sondes à effet Hall. Après étalonnage, nous estimons que l'erreur de mesure sur le courant est de l'ordre de 1 à 2 %.

2.4 MESURE TENSION. — Pour la mesure de la tension, nous avons introduit des sondes qui sont isolées des bobinages des phases mais qui sont soumises au même flux magnétique. Pour ce faire nous avons fabriqué le stator à partir de torsades composées de 7 fils isolés. Les six fils extérieurs sont connectés en parallèle et servent pour le courant d'alimentation de chaque phase. Le fil intérieur reste isolé et est utilisé pour la mesure directe de la force électromotrice induite par le champ magnétique. La tension recueillie est modulée à la fréquence de découpage de l'onduleur. Elle est filtrée par un filtre coupe haut de sixième ordre (fréquence de coupure de 3 kHz). Dans toutes les mesures comparatives, nous avons utilisé deux filtres identiques pour les signaux de courant et de tension afin d'éliminer les erreurs de mesure de déphasage entre les deux voies.

3. Comparaison des résultats obtenus avec un bobinage « hexagone pur ».

3.1 MESURE DU COUPLE ET DE LA PUISSANCE RÉACTIVE. — Sur la figure 5 est indiqué le couple mesuré sur la maquette comparé avec les résultats obtenus par simulation numérique. Deux formes d'ondes de courant d'alimentation, sinusoïdale et trapézoïdale ont été testées. On note que l'écart entre la théorie et les mesures est de l'ordre de 2 % au couple maximum. Ceci est tout à fait compatible avec l'imprécision des mesures d'autant plus que la définition géométrique du bobinage n'est pas rigoureusement parfaite.

Sur la figure 6 est indiquée la variation de la puissance réactive en fonction de la fréquence d'alimen-

Fig. 5. — Couple en fonction de la fréquence pour le bobinage hexagonal.

[Torque as a function of the frequency for the hexagonal winding.]

Fig. 6. — Energie réactive en fonction de la fréquence pour le bobinage hexagonal.

[Reactive energy as a function of the frequency for the hexagonal winding.]

tation. Ici, on note également le bon accord entre les valeurs théoriques et les mesures.

Ces deux comparaisons, du couple et de la puis-

sance réactive, sont un très bon test pour la méthode de calcul car la maquette est très courte. L'angle de l'hélice est de l'ordre de 48 degrés (par rapport à l'axe de rotation). Une méthode d'analyse purement bidimensionnelle [5] donne des résultats inacceptables.

Pour ces calculs nous avons limité le nombre d'harmoniques en z à 13, en θ à 25 et en t à 50. Ceci nous permet d'effectuer les calculs très rapidement (12 points calculés en 10 secondes sur un ordinateur Univac 1110) sans compromettre la précision obtenue. Les résultats ne varient que de l'ordre de 1 % si l'on double le nombre d'harmoniques qui sont pris en compte.

3.2 MESURE DE TENSION. — Sur la figure 7 nous avons indiqué la force électromotrice obtenue par le calcul et celle que nous avons mesurée sur la maquette, alimentée par une onde de courant trapézoïdale. Il est à noter que les calculs doivent être effectués avec un grand nombre d'harmoniques temporels afin d'obtenir des formes d'ondes de tension adéquates. Pour les courbes de la figure 7 nous avons été jusqu'au 145^e harmonique temporel.

Fig. 7. — Tension phase-neutre.

[Phase to neutral voltage wave form.]

3.3 MESURE DE CHAMP MAGNÉTIQUE RADIAL. — Sur la figure 8 est indiqué le flux du champ radial à la surface du rotor mesuré à l'aide de petites bobines plates collées sur le rotor. On note encore une fois que la courbe théorique s'accorde bien avec les mesures.

Fig. 8. — Distribution du champ radial. Un schéma de la machine montre la position relative du champ.

[Distribution of the radial magnetic field along the rotor. A schematic diagram of the machine shows the relative position of the field.]

Fig. 9. — Courbe du couple pour le bobinage à tête.

[Torque curve for the composite winding with winding ends.]

4. Comparaison des résultats obtenus avec le bobinage à tête.

Nous avons indiqué précédemment que la modélisation tridimensionnelle n'a été utilisée que pour les parties droites et inclinées de cette bobine. Sur la figure 9 nous avons indiqué le couple calculé pour ces parties et celui mesuré avec l'ensemble. On remarque que le couple réel est très proche de celui calculé. Ceci implique que la tête n'apporte pas de

couple supplémentaire. Sur cette même figure nous avons tracé le résultat d'une mesure de puissance électrique obtenu en intégrant le produit de la force électromotrice et du courant instantané sur une période. Cette courbe est légèrement au-dessus des deux autres courbes. La différence entre ces trois courbes est comparable aux erreurs de mesure.

Fig. 10. — Energie réactive pour le bobinage à tête.

[Reactive energy curve for the composite winding.]

Sur la figure 10 est indiquée la puissance réactive mesurée sur la maquette et la puissance réactive calculée pour les parties droites et inclinées qui sont noyées dans l'entrefer. Il est important de remarquer que ces deux courbes sont pratiquement superposables en les translatant verticalement. Nous pouvons en déduire que les champs magnétiques dus à la tête ne couplent pas avec le rotor (la différence entre

ces courbes ne dépend pas de la pulsation électrique au rotor). Leur influence est ainsi assimilable à une inductance de fuite pure dont la valeur est loin d'être négligeable.

5. Mesures effectuées sur un rotor réalisé en acier inoxydable.

L'ensemble des mesures décrites ici a également été répété en utilisant un rotor en acier inoxydable. Ce matériau a une résistivité 6,3 fois supérieure à celle de l'alliage d'aluminium. L'utilisation de ce rotor nous permet d'obtenir un couple maximum à une fréquence d'alimentation 6,3 fois plus élevée que pour l'aluminium. Ceci a été parfaitement confirmé par les mesures. Nous avons ainsi pu tester le système à des fréquences statoriques plus proches de celles qui sont utilisées dans la réalité.

6. Conclusions.

L'accord entre les résultats de la modélisation tridimensionnelle et les mesures effectuées sur une maquette spécialement conçue pour permettre des mesures de précision, a été extrêmement bon. Ceci confirme la capacité de prédiction de cette méthode et nous permet de l'appliquer pour l'optimisation des dimensions d'une machine, d'autant plus facilement qu'elle requiert un temps de calcul très court.

Notre étude nous a permis de comparer deux technologies de bobinages différentes, l'une comportant des têtes classiques et l'autre des têtes en forme de losanges. Nous avons démontré que les têtes classiques sont sans influence sur le couple mais présentent une inductance de fuite importante. Le choix entre ces deux technologies ne pourra être fait qu'au moment de l'industrialisation en tenant compte des contraintes électromagnétiques et des facilités de refroidissement.

Bibliographie

- [1] RIOUX, C., SULTANEM, F., *J. Appl. Phys.* **50** (1979) 574.
- [2] SULTANEM, F., RIOUX, C., *J. Appl. Phys.* **50** (1979) 8232.
- [3] RIOUX-DAMIDAU, F., *Revue Phys. Appl.* **18** (1983) 113-127.
- [4] BLEUS, C. A., DEMONCHY, M., RIOUX, C., *Electr. Mach. Electromech.* **7** (1982) 357-367.
- [5] BLEUS, C. A., Thèse d'Etat, Université Pierre et Marie Curie, Paris (29 juin 1981).