

Etude expérimentale de la perte et la restauration du rémanent dans les génératrices asynchrones

Nicolas ONDO, Adolphe MOUKENGUE IMANO

Laboratoire EEAT, Université de Douala, B.P. 8698 Douala, Cameroun, moukengue@univ-douala.com

RESUME - Après un arrêt programmé ou non d'une génératrice asynchrone, le reste de magnétisation qui permet l'auto-amorçage à nouveau de cette dernière dépend en effet des dernières conditions de coupure. Cette dépendance est cependant mal connue, ce qui entraîne des lacunes dans les simulations numériques du processus réamorçage. L'objectif de ce travail est l'obtention d'une description empirique du comportement du rémanent dans le cas d'une génératrice asynchrone fonctionnant en mode isolé.

L'étude expérimentale menée a permis de préciser les conditions d'exploitation pouvant conduire à une perte totale du rémanent. De même, cette étude menée de façon successive sur deux bancs d'essai électromécaniques, a permis de constater une certaine cohérence entre le comportement du rémanent en fonction du point d'arrêt. Une expression analytique permettant de prédire le comportement du rémanent pour les génératrices asynchrones étudiées est proposée.

Mots-clés— *Génératrice asynchrone, rémanent, auto-excitation, auto-amorçage, désamorçage.*

1. INTRODUCTION

Dans les pays du Sud, le transport de l'énergie électrique sur de longues distances des grands centres de productions vers les consommateurs de faible puissance en zone rurale n'est pas avantageux. La décentralisation de la production de l'énergie électrique, par exemple à l'aide des microcentrales hydroélectriques ou éoliennes, est l'une des solutions adéquates [1, 2]. Par rapport aux groupes électrogènes, les microcentrales hydroélectriques ou éoliennes ne présentent que des avantages pour des zones rurales ayant un potentiel important en rivières ou en vent. Ces microcentrales utilisent généralement la machine asynchrone comme élément de conversion de l'énergie mécanique en électrique.

La génératrice asynchrone à cage est une machine simple, légère et robuste utilisée de manière classique dans la production de la petite électricité. De nos jours, elle fait plutôt concurrence à la génératrice synchrone en production décentralisée d'énergie électrique. Cependant, lorsque la génératrice asynchrone est utilisée en mode isolé, il se pose un certain nombre de problèmes : l'autoamorçage de la machine, le risque de désaimantation totale de la génératrice, le contrôle de la tension, le contrôle de la fréquence. Tous ces problèmes sont inexistantes lorsqu'elle fonctionne plutôt connectée à un réseau.

L'autoamorçage d'une génératrice asynchrone est tributaire de la présence dans la machine d'une aimantation rémanente. Celle-ci est cependant variable selon les conditions d'arrêt de la machine [3, 4]. En cas de désaimantation totale, la machine ne peut plus s'amorcer même si toutes les autres conditions sont remplies [5]. Il faut donc une intervention humaine extérieure ou une procédure automatisée spécifique pour redémarrer la microcentrale.

La modélisation de la machine à l'aide de la transformation de Park a permis d'avoir une meilleure maîtrise du contrôle et de la commande de la génératrice asynchrone en régime dynamique linéaire et saturé [6]. Dans de tels travaux, la problématique de l'amorçage et du désamorçage de la machine a été également abordée [5, 6, 7]. Des équations explicites d'autoamorçage ont été formulées, la saturation du circuit magnétique a également été prise en compte, les valeurs minimales des capacités requises pour l'autoamorçage ont été déterminées. Des résultats des simulations numériques ont été présentés [8, 9, 10] et validés par des résultats expérimentaux. Tous ces travaux font état du constat :

- qu'il faut du rémanent pour que la machine puisse s'amorcer et
- qu'au-delà d'une certaine limite d'exploitation, la génératrice asynchrone se désamorce. Cela peut conduire à une désaimantation complète de son circuit magnétique au point où un réamorçage devient impossible sans intervention extérieure.

Des dispositions préventives sont proposées (respect des conditions d'amorçage, exclusion de toute surcharge, connexions de capacités série-parallèle) pour éviter la perte du rémanent. On remarque cependant que ces différents travaux font pour la plupart carrément abstraction des conditions initiales du processus d'amorçage, que ce soit dans les formulations analytiques ou dans les simulations numériques. Cette démarche laisse des imprécisions et masque certaines réalités. Par exemple, il faudrait garder présent à l'esprit que

- malgré une batterie de condensateurs bien dimensionnée, la machine peut ne pas s'amorcer à cause d'un rémanent trop faible ou inexistant ;
- pour une valeur précise des capacités, la tension à vide atteinte après l'amorçage sera toujours la même, mais le délai d'amorçage dépend fortement de la valeur initiale du rémanent.

Lorsqu'il y a donc harmonie dans l'évolution des courants et tensions pendant l'amorçage entre la simulation et l'expérience dans des résultats présentés, cela est forcément obtenu par un « ajustement manuel » des valeurs initiales du coté de la simulation. Cette difficulté est d'ailleurs explicitement reconnue dans certains travaux [5, 10]. Il est donc évident qu'une meilleure compréhension de la variation du rémanent et de son influence sur l'amorçage de la machine aboutirait à une modélisation encore plus exacte de la machine.

Ce travail de recherche se propose pour cela d'aborder le problème plutôt de façon expérimentale. En étudiant les variations du rémanent en fonction des conditions de coupure, on pourrait trouver une « loi de comportement » qui rendrait la simulation plus précise et cela sans « artifice ». Les valeurs prises comme conditions initiales de la simulation découleraient des conditions d'arrêt de la simulation précédente. D'autre part, identifier plus précisément les conditions conduisant à une perte totale du rémanent permettra de mieux maîtriser ce risque. Il serait alors possible d'exploiter davantage la machine sans courir de risque de démagnétisation.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier expérimentalement, ce qui influence le rémanent, afin d'apporter plus d'éclairage sur l'amorçage, le réamorçage et le désamorçage d'une génératrice asynchrone en mode de fonctionnement isolé. A travers l'approche adoptée ici, on espère par différentes expérimentations confirmer ou infirmer certaines hypothèses et tirer une description empirique du phénomène. A cet effet, des bancs d'essais ont été montés, à l'aide desquels le comportement du rémanent dans diverses conditions de fonctionnement est observé. L'intérêt particulier est mis sur l'autoamorçage de la génératrice, les situations conduisant à son désamorçage ainsi que la restauration du rémanent pour permettre un réamorçage de la machine.

2. DISPOSITIF EXPERIMENTALE ET METHODOLOGIE

2.1. Description du dispositif expérimental

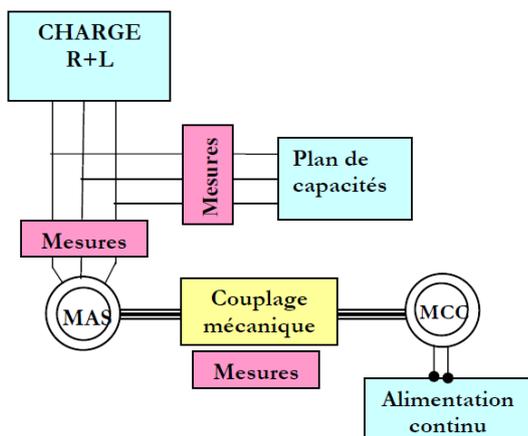


Fig.1 Schéma de principe du dispositif expérimental

Les essais ont été effectués en laboratoire sur deux bancs électromécaniques de caractéristiques différentes. Le principe du dispositif expérimental est présenté à la Figure 1. Chacun des deux bancs est constitué d'une machine à courant continu

(MCC) fonctionnant en moteur et servant de machine d'entraînement, et d'une machine asynchrone (MAS) fonctionnant en génératrice et qui est l'objet de l'étude. Le Tableau 1 donne les caractéristiques de chaque banc d'essai.

Les autres éléments utilisés dans cette étude expérimentale et représentés dans la Figure 1 sont :

- deux batteries de condensateurs de 2 kVAr chacune ;
- un plan de charge résistif allant jusqu'à 3,9 kW ;
- un plan de charge inductif allant jusqu'à 2 kVAr ;
- un analyseur d'énergie, Qualistar C.A. 8334, Chauvin Arnoux ;
- un tachymètre digital Langlois DT-2236 et autres accessoires de mesure.

Tableau 1. Caractéristiques des bancs d'essai

		Machine à courant continu				
		Puissance [kW]	U_N/I_N [V]/[A]	U_{ex}/I_{exN} [V]/[A]	n_N [tr/min]	
Banc 1	ENCO	3	220/13,65	220/0,9	1500	
Banc 2	ECODIME	3	220/17	220/0,95	1500	
		Machine asynchrone (MAS)				
		Puissance [kW]	U_{AN}/U_{YN} [V]	I_{AN}/I_{YN} [A]	$\cos\phi_N$	n_N [tr/min]
Banc 1	ENCO	3	220/380	12/7	0,85	1440
Banc 2	ECODIME	3	230/400	11,4/6,5	0,81	1414

2.2. Méthodologie

La réalité a montré que la valeur du rémanent dépendait des conditions de coupure, du point d'arrêt. La première démarche consiste à catégoriser les conditions de coupure d'abord grossièrement, puis de façon plus précise. On distinguera ainsi les arrêts normaux et les arrêts anormaux. Les arrêts anormaux regroupent tous les cas où la machine aura « décroché », c'est-à-dire, se sera désamorcée d'elle-même suite à des conditions de charge défavorables. Les autres cas seront considérés comme des arrêts normaux.

Il sera ensuite distingué selon les types de charge, notamment charge résistive et charge inductive. Pour réduire le nombre de paramètres et concentrer l'étude à l'essentiel, la capacité des condensateurs aux bornes de la machine sera maintenue constante. Seule la charge sera variée. Après chaque point de fonctionnement, la machine sera arrêtée et la valeur du rémanent mesurée. Ensuite, la machine sera réamorcée (si possible) pour le relevé du point suivant et ainsi de suite. Les mêmes expériences seront reprises plusieurs fois sur le même banc d'essai.

A côté de ces essais, on relèvera aussi la courbe de magnétisation de la génératrice, qui décrit assez précisément une machine particulière. Pour le relevé cette courbe, on entraîne la génératrice à la vitesse de synchronisme, et ensuite il est alimenté avec une tension variable et on relève pour divers points le courant et la tension. La courbe de magnétisation sera certainement d'intérêt dans notre étude. Une première lecture des résultats sera effectuée, permettant notamment de confirmer ou infirmer le caractère aléatoire de la tension rémanente et d'émettre certaines hypothèses. Enfin, la

même démarche sera reprise pour un second banc d'essai, ce qui permettra de rechercher des similitudes de comportement. Le cas échéant, on se propose d'ébaucher une formulation empirique du comportement du rémanent dans les génératrices asynchrones étudiées. D'autres essais permettront de mieux préciser en cas de désamorçage total de la machine, les mesures à prendre pour restaurer le rémanent.

3. RESULTATS DE L'ETUDE EXPERIMENTALE

L'étude expérimentale a effectivement été effectuée pour les deux bancs d'essai : ENCO et ECODIME. Pour chaque banc, la courbe de magnétisation et le comportement du rémanent en fonction du point d'arrêt ont été relevés, de même que la restauration du rémanent.

3.1. Allures comparées des courbes de magnétisation

La courbe de magnétisation est liée au matériau de fabrication. Elle est une caractéristique intrinsèque de la machine. Les résultats de mesure présentés à travers la Figure 2, nous permettent d'avoir une idée des caractéristiques des matériaux magnétiques des deux machines asynchrones triphasées ENCO et ECODIME utilisées. En effet, les deux courbes diffèrent, puisque les génératrices étudiées ne sont pas construites avec le même matériau. Chacune des courbes présente toutefois les trois parties caractéristiques d'une courbe de magnétisation: la zone linéaire, le coude et la zone de saturation. L'allure des deux caractéristiques montre cependant que pour la même chute de tension, la machine ENCO se démagnétise plus vite que la machine ECODIME. Ce résultat est déterminant pour l'interprétation et la compréhension du comportement de la tension rémanente des deux machines en fonction des différents points d'arrêt.

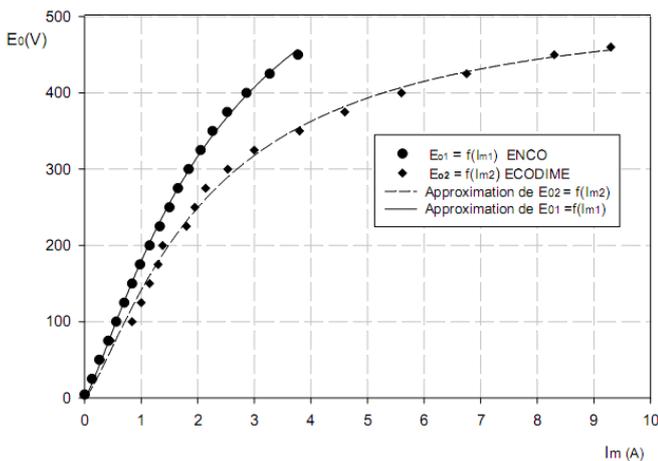


Fig.2 Courbes de magnétisation des deux génératrices étudiées

La prédiction du comportement du rémanent nécessite la connaissance de la courbe de magnétisation de la machine concerné. La courbe de magnétisation est une caractéristique intrinsèque de la machine. Pour les deux machines étudiées, elle peut être décrite par une expression analytique donnée par l'équation 1.

$$E_0 = \frac{U_0}{1 + \left(\frac{I_m}{I_0}\right)^{-a}} \quad (1)$$

Où E_0 est la tension à vide (en Volts), I_m le courant de magnétisation (en Ampères), I_0 intensité du courant à partir de laquelle le phénomène de saturation se fait sentir (en Ampères), U_0 tension dite de saturation maximale de la machine (en volts) et a un coefficient dépendant des caractéristiques électromagnétiques de chaque machine

3.2. Comportement de la tension rémanente en fonction des différents points d'arrêt

On a appelé « tension rémanente nominale » la tension rémanente U_r mesurée entre deux bornes de la machine à la vitesse de rotation nominale de la génératrice, soit 1560 tr/mn. Au préalable, la machine doit avoir été utilisée en moteur à la tension nominale avant d'être coupée directement du réseau. On a ainsi obtenu : $U_r = U_{rN} = 4,55 \pm 0,05$ V

Un arrêt par réduction progressive de la tension d'alimentation réduit considérablement et très souvent annule le rémanent. Pour les résultats présentés dans cette section, nous avons seulement considéré les arrêts normaux. En effet, les arrêts normaux sont tous les points de fonctionnement pour lesquels la machine ne décroche pas. Après auto-amorçage de la génératrice, celle-ci était amenée à débiter sur une charge résistive variable. Pour chaque point de fonctionnement, on mesure la tension aux bornes de la génératrice. Ensuite la batterie des condensateurs est débranchée, puis la charge. La f.é.m. induite s'annule alors instantanément et la machine passe en survitesse. Après retour à la vitesse de rotation nominale, on mesure la nouvelle valeur de la tension rémanente.

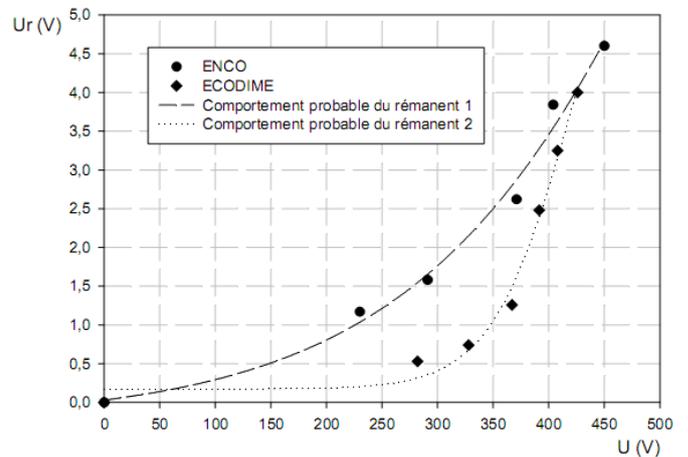


Fig.3 Comportement du rémanent et allure présumée de U_r pendant le désamorçage

Le comportement du rémanent et l'allure présumée de la tension rémanente U_r pendant le désamorçage des deux machines étudiées est donné à la Figure 3.

Une expression générale a été établie donnée par l'équation 2, qui permet de prédire avec 95 % de confiance le comportement du rémanent dans les génératrices étudiées. Pour cela, il a été tenu compte des points réels mesurés, ensuite nous avons supposé une décroissance linéaire de la tension rémanente pendant la phase de décrochage.

$$U_r = \frac{E_{r1}}{1 + e^{\left(\frac{b-U}{E_{r2}}\right)}} \quad (2)$$

Dans l'équation 2, U_r et U sont exprimés en volts, et E_{r1} , E_{r2} (en volts) et b paramètres dépendent des caractéristiques électromagnétiques de chaque machine.

3.3. Restauration du rémanent

La restauration du rémanent peut s'effectuer par une alimentation en courant continu ou en courant alternatif. Pour le premier cas, une source de tension continue variable a été branchée entre deux bornes du stator. Après avoir fait passer un certain courant dans le bobinage statorique, la tension rémanente était ensuite mesurée.

Une tension continue même faible est suffisante pour restaurer le rémanent. Pour la machine ENCO par exemple une alimentation avec 1,5 V DC (et env. 0,3 A de courant) permettait déjà d'obtenir une tension rémanente au dessus de la tension seuil garantissant l'auto-amorçage, comme illustré à la Figure 4.

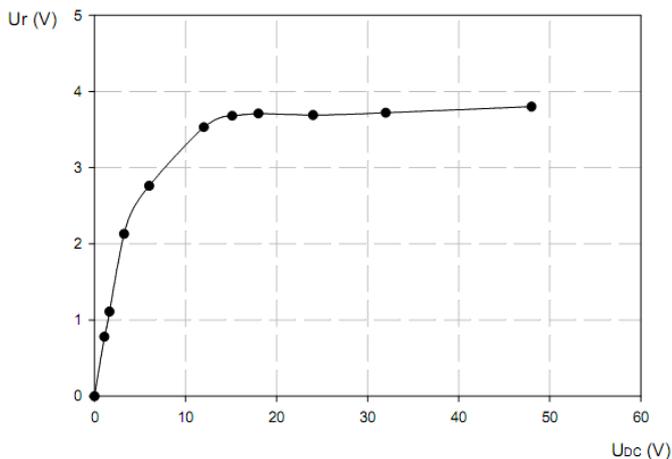


Fig.4 Restauration du rémanent par du courant continu de la machine ENCO (utilisation d'une batterie)

Pour le second cas, on fait fonctionner la machine en moteur avec une tension d'alimentation variable. Après coupure de l'alimentation, on entraîne la génératrice à sa vitesse de rotation nominale, et l'on mesure la tension rémanente. Le résultat est donné à travers la Figure 5. Une tension alternative de 50 V permettait d'obtenir une valeur du rémanent au-dessus de la valeur seuil permettant l'auto-amorçage. Un fonctionnement en moteur à la tension nominale restaure le rémanent pratiquement à sa valeur maximale.

Il est intéressant de constater que la valeur maximale du rémanent atteinte en courant alternatif est plus élevée que celle atteinte en continu. Ceci est en parfait accord avec les résultats de [11] qui montrent qu'une élévation de la fréquence produit un gonflement du cycle d'hystérésis et par conséquent une augmentation de la valeur de l'induction rémanente du matériau.

Pour la configuration étudiée ici, la valeur minimale du rémanent pouvant permettre un auto-amorçage de la

génératrice est de $0,75 \pm 0,05$ V. Cette valeur seuil ne peut cependant pas être définie de façon absolue. Il est évident qu'une plus petite batterie de condensateurs nécessiterait une valeur plus grande de la tension rémanente seuil, tandis qu'une plus grande valeur des condensateurs rend possible un auto-amorçage à partir d'une plus petite tension rémanente.

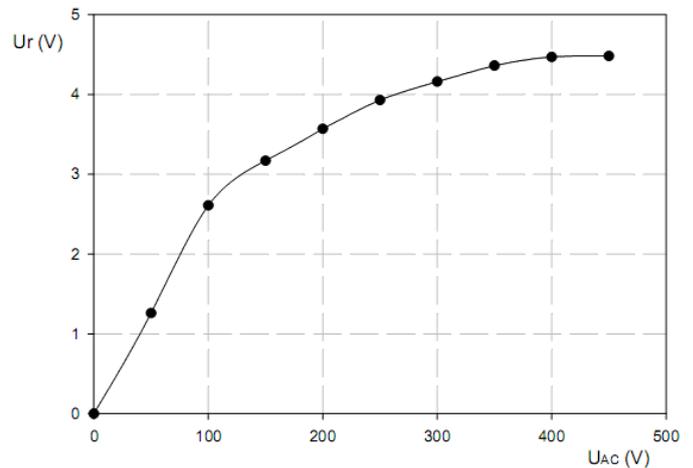


Fig.5 Restauration du rémanent par du courant alternatif de la machine ENCO (marche en moteur)

4. CONCLUSION

L'étude expérimentale a montré que lorsque la tension rémanente U_r est au-delà d'un certain seuil, l'amorçage ou le réamorçage de la génératrice asynchrone était garanti. Le comportement du rémanent en fonction des différents point d'arrêt a été étudié sur deux machines. La comparaison des résultats a montré certaines similitudes. Il y a tout lieu de penser que ce comportement n'est pas purement aléatoire. Lorsqu'elle subit une forte surcharge ou une faible surcharge prolongée, la génératrice se désamorce. Le rémanent est alors totalement perdu. Il peut cependant être restauré de préférence à l'aide d'une source continue, par exemple une batterie d'accumulateurs de 12 V.

5. REFERENCES

- [1] Bernard Laponche, « Production décentralisée d'Énergie : enjeux énergétiques et territoriaux », recueil des interventions des 4èmes Assises Nationales de l'Énergie, Grenoble (France), 2, 3 et 4.12.2002, pp. 7 – 33.
- [2] G. D. Kamalapur, R. Y. Udaykumar, « Rural Electrification in the Changing Paradigm of Power Sector Reforms in India », International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol 2, No. 2, April 2012, pp. 147 – 154.
- [3] Bansal, R.C. (2005). « Three-Phase Self_Excited Induction Generators: An Overview », IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no. 2, pp. 292-299.
- [4] S.K. Jain, J.D. Sharma, and S.P. Singh, « Transient Performance of Three-Phase Self-Excited Induction Generator During Balanced and Unbalanced Faults », IEE Proceedings on Electric Power Applications, vol. 149, no. 1, 2002, pp. 50-57
- [5] J.M. Elder, J.T. Boys, J.L. Woodward, « The Process of Self Excitation in Induction Generators », IEE Proceedings on Electric Power Application, vol. 130, no. 2, 1983, pp. 103-108.
- [6] Dandan Ma, « Self-excited induction generator : a study based on nonlinear dynamic methods », PhD thesis, School of Electrical and Electronic Engineering, 2012, Newcastle University (UK).

- [7] M. Bašić, D. Vukadinović and D. Lukač, « Novel dynamic model of self-excited induction generator with iron losses», *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, Issue 2, Volume 5, 2011, pp. 221-229.
- [8] A. Boyette, « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat, 2006, Université Henri Poincaré, Nancy I (France).
- [9] S. Mekhtoub et al., « Analyse dynamique des générateurs éoliens lors d'un creux de tension du réseau », *Revue des énergies renouvelables* Vol. 12, N°2, 2009, pp.225-235.
- [10] F. Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de doctorat, 2003, Université de Nantes (France).
- [11] L. Pinier, « Nouveaux grenats ferrimagnétiques à basse température de frittage pour applications micro-ondes », Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, 2006.