

Étude du temps d'amorçage d'une génératrice asynchrone auto-excitée par la méthode de plan d'expériences

Jean Paul Yembi * et Adolphe Moukengué Imano

Laboratoire d'Electronique-Electrotechnique-Automatique & Télécommunications
B.P. 24157, Université de Douala, Cameroun

(reçu le 9 Mai 2016 - accepté le 29 Juin 2016)

Résumé - Ce papier présente une étude expérimentale portant sur une génératrice asynchrone triphasée de 0.37 kW destinée à la production d'électricité en zones rurales. Le but du travail est d'étudier les effets des facteurs: capacité, vitesse et rémanent, permettant un temps d'amorçage minimal (< 700 ms), tout en maintenant la tension et la fréquence dans les limites admissibles. La méthode adoptée est celle de plan d'expériences factoriel 2^n qui permet de mettre en évidence et à quantifier l'influence de ces facteurs. Le logiciel Minitab aide à l'analyse des données obtenues. De cette analyse, il ressort que le temps d'amorçage subit l'influence simultanée des facteurs suscités. Les résultats de cette étude montrent que la valeur du rémanent, non spécifiée dans les travaux antérieurs influe significativement sur le temps d'amorçage de la génératrice asynchrone.

Abstract - This paper presents an experimental study of a three-phase asynchronous generator of 0.37 kilowatts for electricity generation in rural areas. The aim of the study was to investigate the effects of factors: capacity, speed and retentive, allowing a minimal boot time (< 700 ms), while maintaining the voltage and frequency within the permissible limits. The method adopted is that of 2^n factorial experiments plan that can highlight and quantify the influence of these factors. Minitab helps in the analysis of data obtained. From this analysis, it appears that the strike time undergoes the simultaneous influence of the aforementioned factors. The results of this study show that the value of the residual, not specified in the earlier work significantly affects the boot time of the asynchronous generator.

Keywords: Asynchronous generator - Boot time - Design of experiments - Residual.

1. INTRODUCTION

L'Afrique subsaharienne dispose d'un fort potentiel en énergie renouvelable. Cependant, certaines localités urbaines et rurales éprouvent encore des difficultés d'accéder à l'énergie électrique. La consommation d'électricité en zones rurales concerne l'éclairage, le chauffage et l'alimentation des équipements électriques. Etant donc éloignée du réseau public, les populations font recours aux moyens tels que le feu de bois, la résine d'okoumé, la lampe à pétrole et le groupe électrogène diesel (GED). De telles sources d'énergie demeurent rudimentaires, parfois onéreuses et concourent à la dégradation des conditions environnementales dues à la déforestation, aux émissions de CO₂ et autres particules toxiques [1-4].

L'accès à l'énergie électrique devient un facteur de croissance durable, on est donc amené à penser que les petites unités autonomes de production d'électricité sont des solutions alternatives, moins coûteuses et surtout respectueuses de l'environnement car basées sur les énergies renouvelables [2]. La production d'électricité en zones rurales connaît un grand essor dû aux nombreuses recherches axées sur la mise sur pieds des solutions et des technologies de production adaptées [2, 3]. La génératrice asynchrone triphasée à cage est utilisée comme convertisseur électromécanique dans ces systèmes

* j_yembi@yahoo.fr

d'énergie électrique à cause de son faible prix d'achat, de sa facilité de maintenance et surtout de sa robustesse [4, 5].

Malgré les atouts précités, la génératrice asynchrone présente des limites indéniables notamment, la tension qui fluctue avec la charge, l'énergie réactive requise pour sa magnétisation et la perte de rémanent [6-11]. L'auto-amorçage et la tension en régime stable d'une telle génératrice est obtenu par l'action conjuguée de trois paramètres: la capacité d'excitation de valeur adéquate, la vitesse d'entraînement et un reste de magnétisation (rémanent) suffisant dans le fer du rotor [12-15].

En mode autonome, l'énergie réactive nécessaire au bon fonctionnement de la machine est fournie par une batterie de condensateurs dont la valeur minimale est déterminée par des méthodes appropriées [7-10]. De même, la vitesse d'entraînement de la génératrice constitue un paramètre indispensable à la bonne marche du système, une valeur limite doit être déterminée [11]. Par ailleurs, des études montrent que le magnétisme résiduel (ou rémanent) présente un comportement variable (insuffisance ou perte) suivant certaines conditions de marche.

Toutefois en cas de perte totale du rémanent, celui-ci est restauré par des techniques classiques [12-14]. Tous ces travaux font un constat clair : la tension et le temps d'amorçage sont tributaires des valeurs de la capacité et de la vitesse, sans toutefois, préciser ce qu'il en est de la valeur du rémanent, ce qui laisse penser que l'influence conjointe du rémanent, de la vitesse et de la capacité sur le temps d'amorçage reste à investiguer.

L'objectif de ce papier est d'étudier, de manière conjointe, l'influence de la vitesse, de la capacité d'excitation et du rémanent sur le temps d'amorçage d'une génératrice asynchrone. En adoptant la méthode de plans d'expériences, nous espérons élucider les effets de ces facteurs sur le temps d'amorçage d'une génératrice asynchrone triphasée de faible puissance.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 Description du banc expérimental

La figure 1 présente le banc d'essais électromécaniques qui a permis de conduire les différents essais en laboratoire. Ce banc est constitué, essentiellement, d'une Génératrice Asynchrone triphasée à cage (GAS) couplée à une Machine à Courant Continu (MCC) munie d'une dynamo tachymétrique. Un banc de capacité triphasé (source d'énergie réactive) est connecté au stator de la génératrice. De plus, un système d'acquisition constitué d'un oscilloscope numérique (DSO 2020 USB) et d'un ordinateur portable (PC) interconnectés par sonde différentielle de rapport 1/200 permet de visualiser et d'enregistrer la tension et le courant de la génératrice.

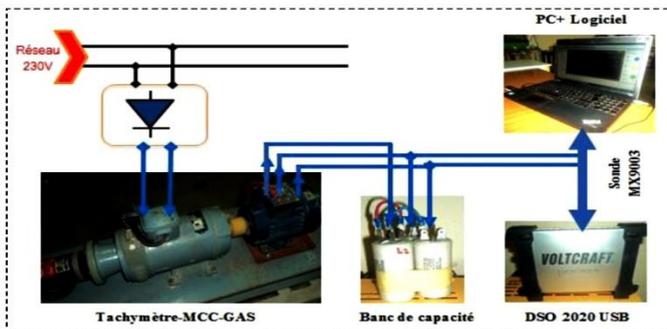


Fig. 1: Banc d'essais expérimental

Le **Tableau 2** présente les caractéristiques électriques et mécaniques des deux principales machines utilisées.

Tableau 1: Caractéristiques électriques et mécaniques des machines utilisées

Machine asynchrone (MAS)			
Puissance (kW)	Nn (tr/min)	U_{Δ}/U_Y (V)	I_{Δ}/I_Y (A)
0,37	2860	220/380	1,56/0,90
Machine à courant continu (MCC)			
Puissance (kW)	Nn (tr/min)	(Induit) U/I (V)/(A)	(Excitation) U/I (V)/(A)
0,55	3000	150/4,7	180/0,14

2.2 Méthode de plan d'expériences complet

La méthode des plans d'expériences est une suite d'essais entièrement organisée à l'avance de manière à déterminer, en un minimum d'essais et un maximum de précision, l'influence des différents facteurs possibles, pour optimiser les performances du système étudié. Plusieurs types de plans d'expériences existent, dans cette étude nous adoptons le plan d'expérience factoriel complet. Le plan d'expériences vise à déterminer quel facteur influe la réponse ou quelle est l'évolution de la réponse en fonction des facteurs.

2.2.1 Réponses et objectifs de l'étude

Dans ce travail, la réponse est quantifiée par la durée du régime transitoire d'auto-amorçage d'une génératrice asynchrone de 0.37 kW/220-380 V. Ce régime transitoire est défini ici comme le temps mis par la tension pour atteindre sa valeur nominale (220 V) en régime stable (figure 2), en d'autres termes, c'est le temps d'amorçage de la génératrice asynchrone. L'objectif de l'étude est connaître l'influence de trois facteurs sur le régime transitoire de la tension pour tenter d'optimiser le temps d'amorçage de la génératrice.

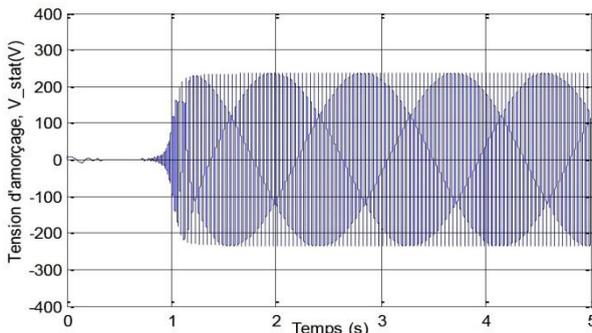


Fig. 2: Tension d'auto-amorçage et régime transitoire

2.2.2 Facteurs retenus et leurs différents domaines d'étude

Les facteurs identifiés dans les travaux antérieurs [11, 12] et susceptibles d'influencer le temps d'amorçage d'une génératrice asynchrone sont présentés. Le domaine d'étude de chaque facteur est également défini (**Tableaux 2 et 3**).

Tableau 2: Facteurs retenus et domaines d'étude en unités naturelles

Facteurs	Niveau bas	Niveau haut
Rémanent (x_1)	0.3V	3.5V
Vitesse (x_2)	3000 tr.min ⁻¹	3140 tr.min ⁻¹
Capacité (x_3)	10 μ F	18 μ F

Tableau 3: Facteurs et niveaux codés

Facteurs	Niveau bas	Niveau haut
Rémanent (x_1)	-1	+1
Vitesse (x_2)	-1	+1
Capacité (x_3)	-1	+1

2.2.3 Matrice d'expériences et réalisation des essais

Les trois facteurs qui influent la réponse sont définis ainsi que leurs domaines d'étude (**Tableau 3**). La définition des facteurs permet de connaître le nombre d'essais maximum à réaliser dans un plan factoriel complet. Dans ce travail, chaque essai est répliqué six fois afin de garantir la reproductibilité de la réponse choisie.

Le **Tableau 4** présente la matrice d'expériences qui est la feuille de travail comprenant les niveaux codés des facteurs ainsi que les données expérimentales prélevées. Le temps d'amorçage est mesuré en suivant l'ordre des essais. Les huit premiers essais ont permis de mesurer les données de la colonne Tr1. Les colonnes Tr2 à Tr6 sont ensuite complétées. Un oscilloscope numérique à mémoire (DSO 2020 USB) permet d'effectuer les mesures à partir de l'enveloppe supérieure de la tension d'amorçage à vide (figure 2).

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Effets et interactions des facteurs sur le temps d'amorçage

La figure 3 présente le graphique des effets principaux des trois facteurs sur le temps d'amorçage. Des segments de droites obliques montrent l'effet significatif des facteurs sur tout le domaine [-1, +1] et un temps d'amorçage global moyen (732 ms) est indiqué par un trait discontinu horizontal. Par ailleurs, la disposition et la longueur des segments révèlent que les effets du rémanent et de la capacité sont plus significatifs que celui de la vitesse. Le temps d'amorçage le plus élevé est observé au niveau bas (-1) des facteurs.

Tableau 4: Matrice d'expériences avec réponse répliquée

N° essai	Rémanent (x_1)	Vitesse (x_2)	Capacité (x_3)	Temps d'amorçage (s)					
				Tr ₁	Tr ₂	Tr ₃	Tr ₄	Tr ₅	Tr ₆
1	-1	-1	-1	1,710	1,690	1,620	1,740	1,780	1,720
2	-1	-1	+1	0,525	0,581	0,531	0,492	0,509	0,570
3	-1	+1	-1	1,210	1,230	1,370	1,290	1,290	1,340
4	-1	+1	+1	0,459	0,431	0,431	0,459	0,437	0,409
5	+1	-1	-1	0,686	0,686	0,702	0,697	0,702	0,702
6	+1	-1	+1	0,310	0,370	0,332	0,332	0,310	0,315
7	+1	+1	-1	0,586	0,586	0,592	0,564	0,559	0,564
8	+1	+1	+1	0,282	0,282	0,277	0,282	0,282	0,288

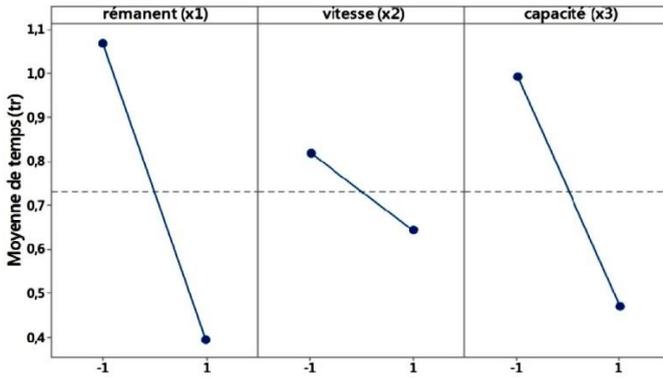


Fig. 3: Effets principaux des facteurs sur le temps de réamorçage

Les interactions à deux facteurs sont représentées sur la figure 4. Les graphiques montrent que l'interaction rémanent-capacité est la plus significative. Par ailleurs, l'interaction vitesse-capacité est moins significative au regard des segments qui sont pratiquement parallèles.

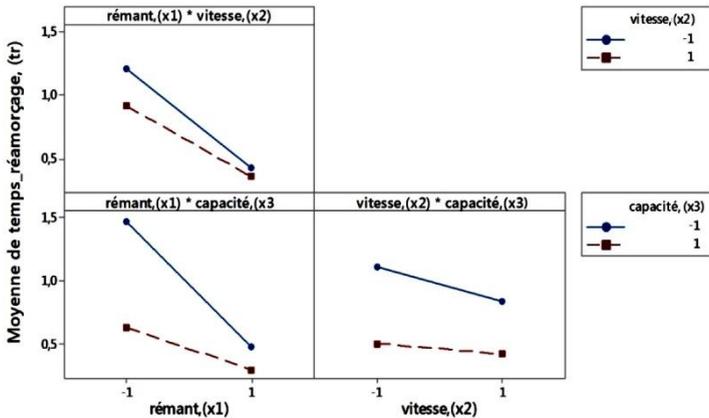


Fig. 4: Diagramme des interactions des facteurs sur le temps de réamorçage

La figure 5a présente le diagramme de Pareto des effets principaux et d'interaction des trois facteurs sur le temps d'amorçage. Lesdits effets sont présentés sous forme de barres horizontales disposées par ordre décroissant de leur valeur absolue. On observe qu'ils sont tous significatifs ; les barres sont supérieures à la ligne de référence (2.03). Par ailleurs, le rémanent (A) dispose d'un effet maximal et l'interaction rémanent (A) - vitesse (B) - capacité (C) dispose de l'effet minimal.

La figure 5b présente le diagramme des effets normalisés. Il confirme bien que les effets (principaux et d'interaction) sont tous significatifs. En outre, il permet d'indiquer la direction des effets. Ici, le rémanent, la vitesse, la capacité et l'interaction(ABC) ont des effets négatifs, leur augmentation entraîne la diminution de la réponse. Par contre, les trois interactions (AB), (BC) et (AC) présentent des effets positifs qui accroissent la réponse en cas d'augmentation. La droite d'ajustement représentée sur le graphique sert à distinguer la direction des effets et l'influence des facteurs sur la réponse. Plus l'effet est éloigné de la droite d'ajustement, plus grande est son influence sur le temps d'amorçage.

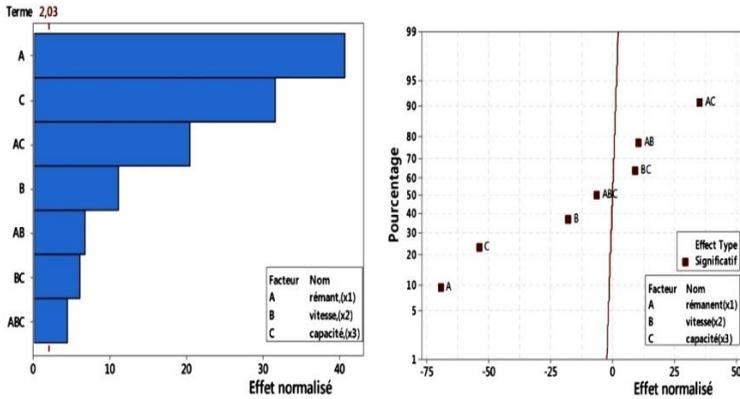


Fig. 5: Diagrammes de Pareto des effets et droite de Henry des effets normalisés

3.2 Détermination du temps d’amorçage de la génératrice

3.2.1 Expression de la réponse

En l’absence de toute information sur la fonction qui lie la réponse aux facteurs, on se donne à priori une loi d’évolution dont la formulation générale est:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \tag{1}$$

Le modèle à priori ou modèle postulé est obtenu par un développement limité de Taylor- Mac Laurin afin d’approximer la réponse par un modèle polynomial

$$y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum_{i \neq j}^n \alpha_{ij} x_{ij} + \sum_{i \neq j \neq k}^n \alpha_{ijk} \tag{2}$$

Où,

- y est la réponse ou les valeurs obtenues expérimentalement;
- x_i représente un niveau du facteur i ;
- x_j représente un niveau du facteur j ;
- α₀, α_i, α_{ij}, α_{ijk} sont les coefficients du polynôme.

Dans ce travail expérimental, huit essais (avec six répliques chacun) ont été effectués pour déterminer l’influence de trois facteurs à deux niveaux sur le temps d’amorçage. Le graphique en cube (figure 6) indique sur chaque sommet les valeurs moyennes du temps d’amorçage pour chaque essai et ce pour des facteurs maintenus aux niveaux extrêmes (-1 et +1).

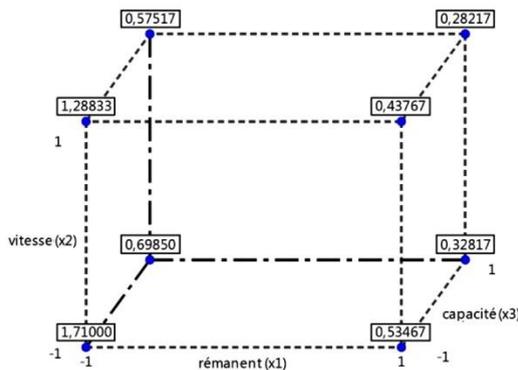


Fig. 6: Graphique en cube avec moyennes de temps d’amorçage

La figure 7 représente le graphique de contour au centre du domaine d'étude, c'est-à-dire lorsque tous les facteurs sont au niveau zéro, c'est-à-dire à 1.9 V, 3070 tr/min et 14 μ F, pour le rémanent, la vitesse et la capacité, respectivement. Le graphique montre que le temps d'amorçage est compris entre 0.8 et 1.0 s. La valeur de la capacité (14 μ F) influe fortement la valeur nominale de la tension d'amorçage. Ici, on observe qu'elle est à 239 V en phase et neutre, ce qui est très au-dessus de la valeur nominale (**Tableau 1**).

La tension aux bornes de la génératrice étant au-dessus de la valeur nominale à cause d'une capacitance élevée au centre du domaine (14 μ F), il est donc impératif de régler ce facteur au niveau bas (-1), c'est-à-dire à 10 μ F.

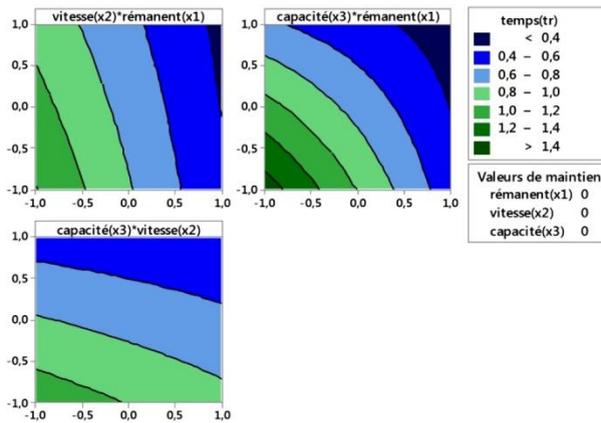


Fig. 7: Temps d'amorçage au centre du domaine d'étude

La figure 8 représente le graphique obtenu avec le réglage de la capacité souhaitée. On observe que le temps d'amorçage est compris dans les lignes de contour 0.75-1.0 s. Ce résultat reste conforme au précédent à quelque à 5 % près.

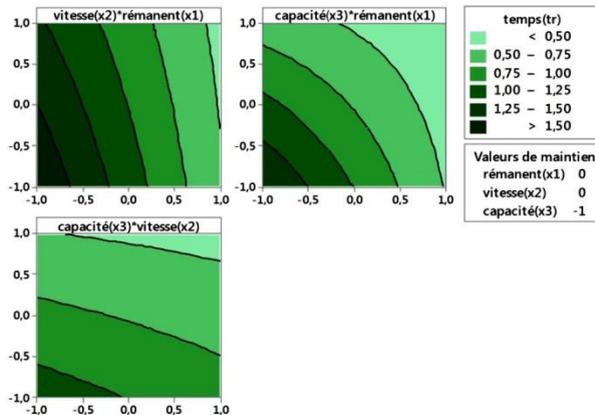


Fig. 8: Temps d'amorçage avec facteur capacité réglé au niveau bas (-1)

La figure 9 présente de graphique de contour du temps d'amorçage en fonction des trois facteurs. Pour atteindre ce résultat, les choix des réglages suivants ont été effectués: rémanent au niveau haut (3.5 V), vitesse au niveau zéro (3070 tr/min) et la capacité au niveau bas (10 μ F). Le graphique montre qu'il une réduction significative du temps d'amorçage autour de 0.5 s. Le réglage du rémanent seul au niveau haut à permis d'avoir ce résultat qui vient confirmer que l'effet du rémanent est très significatif dans le processus d'auto-amorçage d'une génératrice asynchrone.

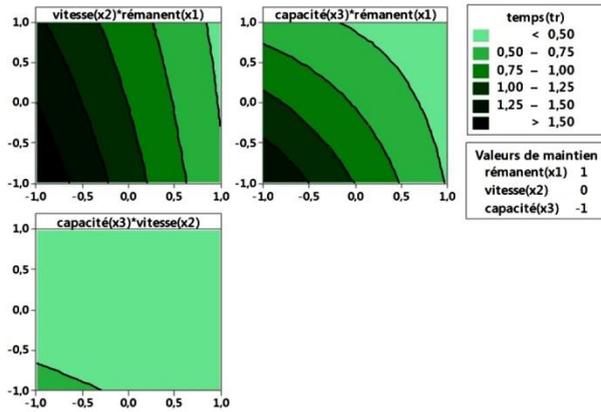


Fig. 9: Temps d’amorçage avec facteur rémanent réglé au niveau haut (+1)

La figure 10 présente le graphique de contour du temps d’amorçage lorsque la capacité est maintenue au niveau bas (10 µF), la vitesse étant au niveau zéro (3070 tr/min) et le rémanent variant entre +0.5 et +1 (1.9 à 3.5V), on constate que le temps d’amorçage varie entre 0.5 et 0.7 s. On vérifie expérimentalement que tout augmentation du rémanent contribue à la réduction du temps d’amorçage. L’expression analytique (3) est vérifiée pour divers niveaux de facteurs.

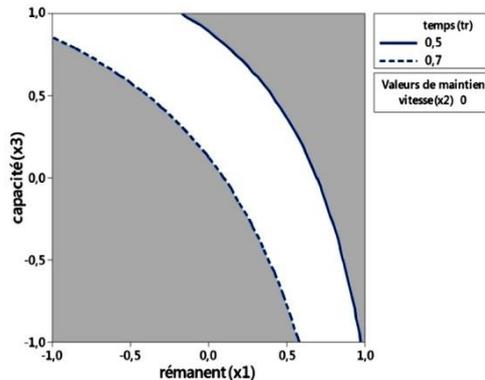


Fig. 10: Contour du temps d’amorçage avec niveaux optimaux

3.2.2 Expression du temps d’amorçage

A partir du plan d’expériences et des essais effectués en laboratoire, la détermination des coefficients du modèle à priori de l’équation (2) est réalisé dans le logiciel Minitab. L’expression (3) donnée sous forme polynomiale, présente les coefficients optimaux du temps d’amorçage de notre génératrice.

$$\text{temps} = 0.732 - 0.336X_1 - 0.086X_2 - 0.261X_3 + 0.050X_1 X_2 + 0.170X_1 X_3 + 0.0436X_2 X_3 + 0.0309X_1 X_2 X_3$$

3.2.3 Analyse de la normalité des résultats

Droite de Henry des valeurs résiduelles

Figure 11 présente des données qui ne semblent pas suivre une ligne droite, ce qui présage la non-normalité des données mesurées. Cependant, on observe que les données sont proches de la droite, ce qui exclut la présence des valeurs aberrantes dans les données. On peut dire qu’il n’y a aucune évidence de non-normalité, car les courbures

des extrémités sont dues simplement au nombre d'observations inférieures à 50 (Tableau 4).

Histogramme des valeurs résiduelles

Figure 11 étudie la distribution des valeurs résiduelles pour toutes les données prélevées. C'est un outil exploratoire pour l'analyse la dispersion (variation) et des valeurs aberrantes dans les données. On peut observer ici que cet histogramme ne suit pas une courbe en cloche, ce qui présage une asymétrie et la présence des valeurs aberrantes.

Valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées

Figure 11- Le diagramme présente des valeurs résiduelles dispersées aléatoirement autour de zéro. Ceci signifie qu'il n'existe aucune évidence de variance non constante et de valeur aberrante.

Valeurs résiduelles en fonction de l'ordre

Figure 11- Ce graphique permet de déterminer s'il existe une corrélation entre les termes d'erreur proches les uns des autres. les valeurs résiduelles sont présentées dans l'ordre des observations correspondantes. On observe que les valeurs résiduelles fluctuent de manière aléatoire autour de zéro.

Pour le temps d'amorçage, les valeurs résiduelles semblent être dispersées aléatoirement autour de zéro. Il n'existe aucune évidence de corrélation entre les termes d'erreur.

Au terme des analyses présentées, nous pouvons dire que le modèle satisfait aux hypothèses de l'analyse.

4. CONCLUSION

Dans ce papier, une génératrice asynchrone triphasée de 0.37 kW est utilisée afin d'étudier expérimentalement son temps (délai) d'amorçage ou de réamorçage à vide. La capacité, la vitesse et le rémanent ont été identifiés comme facteurs qui influent ce temps d'amorçage.

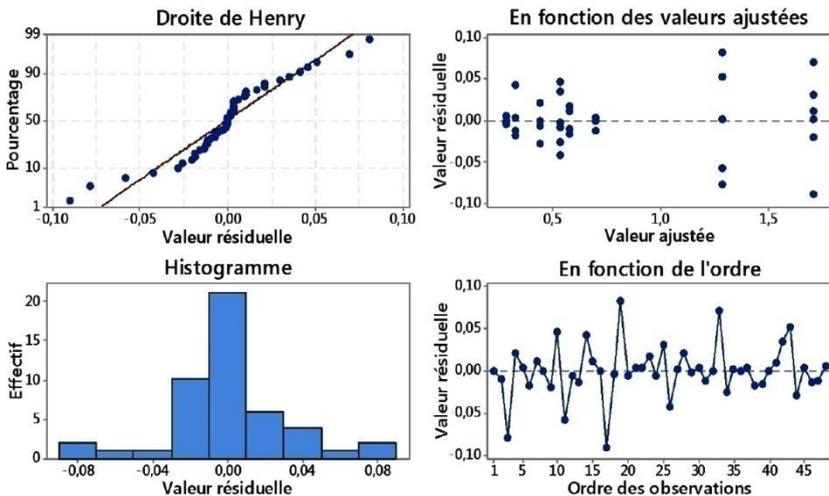


Fig. 11: Graphiques des valeurs résiduelles

La méthode de plan d'expériences factoriel 2^n a permis d'analyser l'influence de ces facteurs sur le délai d'amorçage. De cette analyse, il ressort que tous ces facteurs influencent de manière significative le dit temps. Toutefois, le rémanent, la capacité et la vitesse contribuent à minimiser ce délai, alors que les interactions rémanent-capacité, rémanent-vitesse et vitesse-capacité participent à son augmentation.

En outre, les résultats montrent que le temps d'amorçage optimal est obtenu pour un rémanent de 3.5 V (niveau +1), une vitesse de 3070 tr/min (niveau zéro) et une capacité de 10µF (niveau -1).

REFERENCES

- [1] IRENA, *'L'Afrique et les Energies Renouvelables: la Voie vers la Croissance Durable'*, International Renewable Energy Agency, 2013.
- [2] D. Banks and J. Schaffler, *'The Potential Contribution of Renewable Energy in South Africa'*, Earthlife Africa, Johannesburg, South Africa, 2006.
- [3] A.C.J. Lombard and M.J. Kamper, *'Environmental Legislation, Design and Economic Study of Grid-Connected Micro Hydro Power Systems'*, 2000.
- [4] M.E.A. Farrag and G.A. Putrus, 'Analysis of the Dynamic Performance of Self-Excited Induction Generators Employed in Renewable Energy Generation', *Energies*, Vol. 7, pp. 278 - 294, 2014.
- [5] L. Louze, *'Production Décentralisée de l'Energie Electrique: Modélisation et Contrôle d'une Génératrice Asynchrone Auto Excitée'*, Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Mentouri-Constantine, Algérie, 2013.
- [6] K. Kalyan Raj, E. Swati and Ch. Ravindra, 'Voltage Stability of Isolated Self- Excited Induction Generator (SEIG) for Variable Speed Applications using Matlab/Simulink', *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, Vol. 1, N°3, pp. 186 - 190, 2012.
- [7] A. Abbou, M. Barara, A. Uchatti, M. Akherraz and H. Mahmoudi, 'Capacitance Required Analysis for Self-excited Induction Générateur', *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, Vol. 55, N°3, pp. 383 - 389, 2013.
- [8] Y. Zidani and M. Naciri, 'Capacitance Requirement for Isolated Self-Excited Induction Generator', *IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference-Vancouver, BC, Canada (17-21 June 2001)*, pp. 216 - 220, 2001.
- [9] M. Senthil kumar, 'Optimal Capacitor For Maximum Output Power Tracking of Self Excited Induction Generator Using Fuzzy Logic Approach', *International Journal on Computer Science and Engineering (IJCSSE)*, Vol. 2, N°5, pp. 1758 - 1762, 2010.
- [10] M.I. Mosaad, 'Optimization of Self Excited Induction Generator Using Constrained Particle Swarm Optimization', *Int. J. Sc. Tech.*, Vol.16, N°3, pp.37-45, 2011.
- [11] M.H. Haque, Ali I. Maswood, 'Determination of Excitation Capacitance of a Three-Phase Self-Excited Induction Generator', *IEEE Power and Energy. Society General Meeting. New Energy Horizons-Opportunities and Challenges-San Diego*, 2012.
- [12] R.C. Bansal, 'Three-Phase Self-Excited Induction Generators: An Overview', *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol.20, N°2, pp. 292 - 299, 2005.
- [13] 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 Proc.-Gen. Trans. Distrib*, Vol. 149, N°1, pp. 50 - 57, 2002.
- [14] J.M. Elder, J.T. Boys, and J.L. Woodward, 'The Process of Self Excitation in Induction Generators', *Proceedings, Inst. Elect. Eng. B*, Vol. 130, N°2, pp. 103 - 108, 1983.
- [15] A.M. Bouzid, A. Cheriti, P. Sicard, M. Bouhamida, M. Benghanem, 'State Space Modeling and Performance Analysis of Self-Excited Induction Generator for Wind Simulation', *International Conference on Control, Engineering and Information Technology (CEIT)-Tlemcen, Algeria, (2015.5.25 - 2015.5.27)*.