

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 84 (1993)

**Heft:** 11

**Artikel:** Micro-génératrice asynchrone triphasée en charge sur un îlot monophasé

**Autor:** Simond, Jean-Jacques / Kawkabani, Basile

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-902698>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 30.01.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

Cet article présente une méthode de prédétermination des caractéristiques en régimes stationnaires et transitoires d'une micro-génératrice asynchrone triphasée, excitée par des condensateurs et alimentant une charge monophasée îlotée, d'une puissance inférieure à environ 50 kW. Les conditions de charge à satisfaire en vue d'obtenir un régime stationnaire et électriquement équilibré sont explicitées. Le comportement de la génératrice est également analysé lorsque la charge varie en l'absence de toute forme de régulation. Pour tous les régimes de fonctionnement étudiés, les résultats issus de la simulation numérique sont très proches de ceux obtenus par des essais pratiques.

# Micro-génératrice asynchrone triphasée en charge sur un îlot monophasé

■ Ratovoharisoa, Jean-Jacques Simond et Basile Kawkabani

L'exploitation des sources d'énergies renouvelables présente un besoin et un intérêt de plus en plus croissants, non seulement dans les pays du Tiers-Monde, mais aussi dans les pays industrialisés. Particulièrement pour les pays en voie de développement – et pour tout autre site isolé en général – l'utilisation de la machine asynchrone triphasée à cage en génératrice autonome excitée par des condensateurs et alimentant un réseau monophasé îloté – soit sans con-

nexion avec un réseau de distribution – fait l'objet d'études et de recherches dans la gamme de puissances inférieures à environ 50 kW. Ceci est essentiellement dû à sa robustesse, à la simplicité d'excitation par simple branchement de condensateurs aux bornes statoriques, au peu de maintenance que la machine nécessite, et bien sûr, à son coût relativement modeste [1].

Pour des puissances installées inférieures à 50 kW, l'utilisateur est de préférence de type monophasé. Dans ce cas, il existe des valeurs de capacités d'excitation où, pour une charge donnée, la génératrice asynchrone triphasée travaille en un point de fonctionnement nominal, stationnaire et électriquement

Cet article résume l'étude réalisée par M. Ratovoharisoa lors de son stage à l'EPFL pour l'obtention du grade de Dr.-Ing. ESP-A dans le cadre du projet de coopération Ecole Supérieure Polytechnique d'Antsiranana – Madagascar / EPFL financé par la Direction de la coopération au développement et de l'aide humanitaire (DDA).

#### Adresses des auteurs:

Ratovoharisoa, Jean-Jacques Simond et Basile Kawkabani, Laboratoire d'électromécanique et de machines électriques, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 1015 Lausanne.

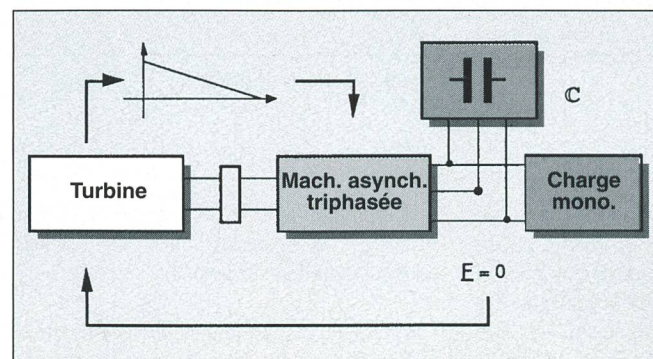


Figure 1 Schéma synoptique de l'installation

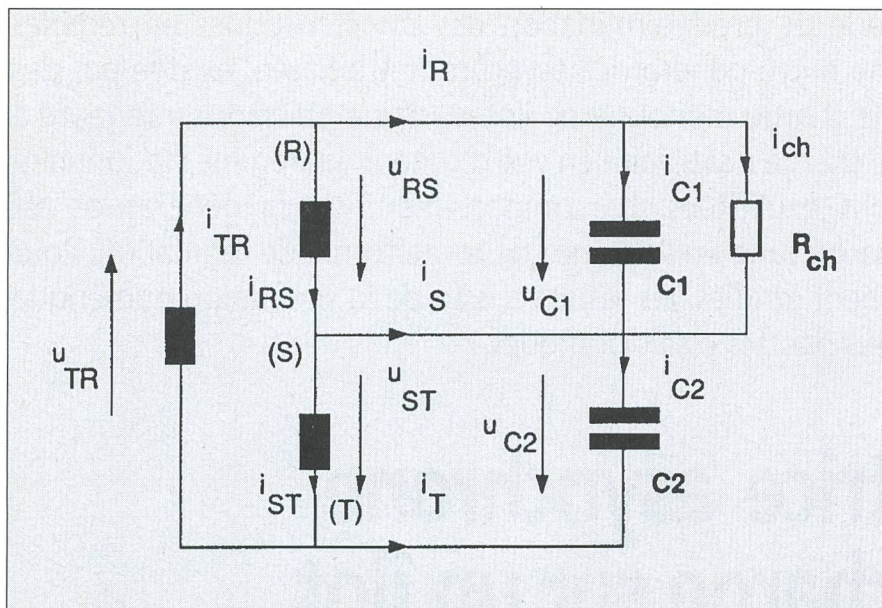


Figure 2 Point de fonctionnement équilibré

Grandeurs	Unités	Calculs	Mesures
Résistance de charge	Ohm	52,38	52
Capacités C <sub>1</sub> /C <sub>2</sub>	μF	35,08 / 70,16	36 / 72
Tensions des phases	V	220 / 220 / 220	220.6 / 220.6 / 217.1
Courants des phases	A	2,8 / 2,8 / 2,8	2,8 / 2,77 / 2,78
Vitesse de rotation	tr/min	1585	1575
Fréquence électrique	Hz	50	50,1
Courant de charge	A	4,2	4,24
Puissance él. de charge	W	924	936

Tableau I Point de fonctionnement nominal

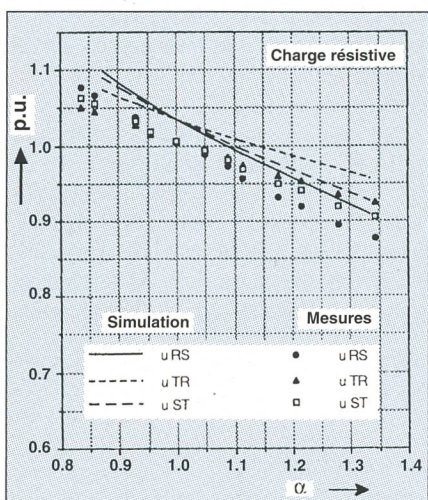


Figure 3 Tensions de phases

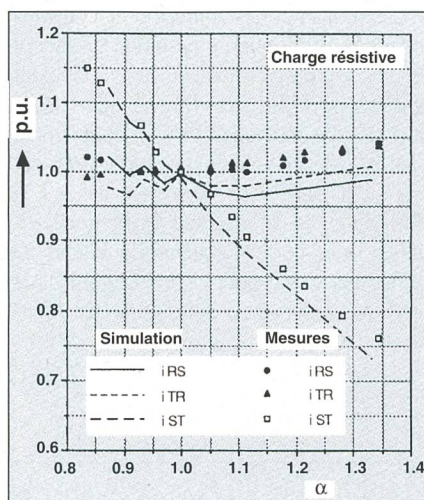


Figure 4 Courants de phases

équilibré, soit sans composante inverse de courant. Une variation de la charge ou du couple mécanique de la turbine entraîne un déséquilibre des courants de la machine. Ce déséquilibre peut être éliminé en agissant, soit sur les condensateurs, soit sur la turbine

par l'intermédiaire d'un régulateur. Cette stratégie n'est pas appliquée ici, l'article poursuit deux buts principaux, à savoir:

- l'étude du comportement de la génératrice lorsque, en absence de toute forme de

régulation, pour une caractéristique couple-vitesse donnée de la turbine et pour des valeurs des capacités d'excitation maintenues constantes, la charge varie. Ceci, dans le but de définir les limites d'exploitation de la génératrice;

- l'étude de la réaction de l'installation lors-que des perturbations - tel un court-circuit monophasé - surviennent.

### Analyse des régimes permanents

#### Point de fonctionnement nominal équilibré

Une installation autonome typique est représentée par la figure 1 ci-dessus [2]. Le branchement d'une charge monophasée aux bornes d'une génératrice entraîne généralement l'apparition d'une composante inverse de courant. Toutefois, pour la génératrice asynchrone triphasée autonome, un choix judicieux des capacités d'excitation en fonction de la charge monophasée (figure 2) permet d'obtenir un point de fonctionnement nominal équilibré, soit sans composante inverse de courant.

Parmi les choix possibles des capacités, la combinaison «C-2C» définie par:

$$C_1 = 1 / (\sqrt{3} R_{ch} \omega_s)$$

$$C_2 = 2 C_1$$

a été étudiée et retenue en raison de sa simplicité. Le facteur de puissance correspondant de la génératrice est égal à 0,5 [2]. On peut cependant démontrer que, quel que soit le couplage des phases statoriques, pour une puissance donnée dissipée dans la charge, il n'existe pas de combinaisons de capacités suffisamment simples conduisant à un facteur de puissance plus élevé.

Les caractéristiques de la machine d'essai sont présentées en annexe 1. Le tableau I, résumant les prévisions théoriques et les résultats pratiques, confirme le choix judicieux des capacités au sens de la combinaison «C-2C». Ce point de fonctionnement a été obtenu par application de la méthode générale qui sera présentée au paragraphe suivant.

#### Point de fonctionnement stationnaire, mais électriquement déséquilibré

Un des problèmes engendré par l'autonomie d'une installation non réglée réside dans le fait que les grandeurs électriques (tensions, courants, fréquence, etc.) et mécaniques (couple, etc.) sont toutes susceptibles de varier, dès qu'intervient une modification de charge ou de couple. Dans un tel cas, une

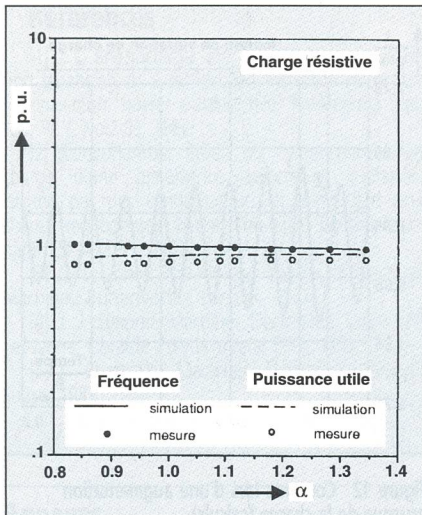


Figure 5 Fréquence et puissance utile

force magnétomotrice inverse prend naissance dans la machine, générant un couple pulsant ainsi que des pertes supplémentaires affectant le rendement de l'installation. Le fonctionnement de la génératrice reste stationnaire, mais il est électriquement déséquilibré.

Il est dès lors impératif de prévoir la réaction de la machine face à une variation de la charge. Ceci, afin de pouvoir définir les limites de fonctionnement pour lesquelles les sollicitations mécaniques, électriques et thermiques sur la génératrice, ainsi que le rendement global de l'installation, restent acceptables. Un développement mathématique effectué dans ce sens (voir extrait en annexe 2) a abouti à l'établissement d'une fonction complexe  $F$  [2], s'exprimant par:

$$F = 1/Z_d + Y_{RS0} - Y_{RSd} Y_{RSi} / (1/Z_i + Y_{RS0})$$

Les grandeurs intervenant dans l'expression de  $F$  sont définies à l'annexe 2; elles dépendent en particulier de la vitesse  $N$  et de

la fréquence  $f$  de la génératrice. L'annulation de la fonction  $F$  pour un couple de valeurs  $N$  et  $f$  que l'on détermine par itération, traduit l'équilibre des puissances – active et réactive –, échangées entre la génératrice et l'ensemble «charge – capacités d'excitation» en régime stationnaire. D'autre part, combinée avec un bilan de puissance active échangée entre la turbine et la génératrice, la fonction  $F$  permet:

- de retrouver le point de fonctionnement nominal équilibré (voir tableau I), en imposant  $Y_{RSd}$  nul [1, 2],
- de prévoir le comportement de l'installation face à des variations de charge.

Il faut noter que dans les expressions de  $Z_d$  et  $Z_i$ , impédances respectivement directe et inverse d'une phase de la génératrice, les paramètres de la branche magnétisante sont réactualisés à chaque itération, afin de tenir compte de l'effet de saturation et de celui de la variation des pertes fer avec la fréquence. Les résultats théoriques et pratiques sont résumés par les figures 3-5 dans lesquelles le coefficient de surcharge  $\alpha$  est défini par:

$$\alpha = R_{ch,nom}/R_{ch}$$

Tous les résultats indiqués aux figures 3 et suivantes sont exprimés en p.u. (per unit), soit en valeurs rapportées aux grandeurs nominales définies dans le tableau I. La bonne concordance entre les calculs et les mesures atteste de la validité de la méthode proposée. Il ressort de ces résultats que:

- le déséquilibre des courants est toujours plus important que celui des tensions, que ce soit en surcharge ou en délestage;
- la surintensité apparaissant dans la phase où est branchée la capacité d'excitation  $C_2$ , est la plus importante en régime de sous-charge.

On vérifie en outre que le taux de déséquilibre est plus prononcé en régime de sous-

charge ( $\alpha < 1$ ), d'où l'enseignement suivant: mieux vaut situer le point de fonctionnement équilibré du côté de la limite inférieure de charge prévue. Les limites d'exploitation sont dictées par l'intensité maximale admissible dans la phase mise en parallèle avec  $C_2$ , et bien sûr, par le taux maximum tolérable de la composante inverse de la force magnétomotrice.

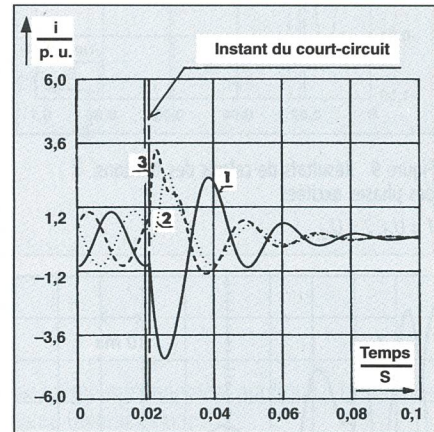


Figure 7 Courants des phases statoriques calculés  
1 =  $i_{RS}$ , 2 =  $i_{ST}$ , 3 =  $i_{TR}$

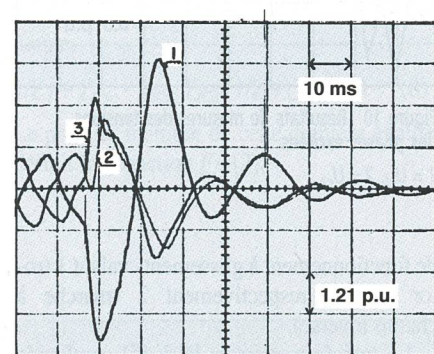


Figure 8 Courants des phases statoriques mesurés  
1 =  $i_{RS}$ , 2 =  $i_{ST}$ , 3 =  $i_{TR}$

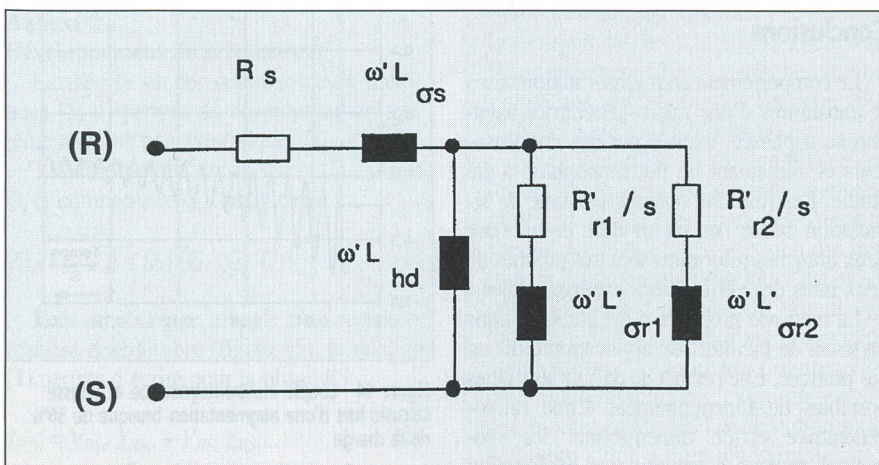


Figure 6 Modélisation d'une phase en régimes dynamiques

### Analyse des régimes transitoires

La génératrice asynchrone autonome peut être soumise à des perturbations intervenant au cours de son exploitation. Dans le cadre de ce travail, deux cas de transitoires ont été étudiés. Il s'agit:

- d'un court-circuit brusque sur la phase chargée;
- d'une soudaine variation de la charge.

En admettant qu'avant toute perturbation, la génératrice travaille en son point de fonctionnement nominal équilibré, et en supposant que durant la phase transitoire, les paramètres de la branche magnétisante restent constants, le modèle représenté à la figure 6 a été adopté. Le circuit rotorique est modélisé par deux branches en parallèle dont les éléments se calculent ou se mesurent aux points

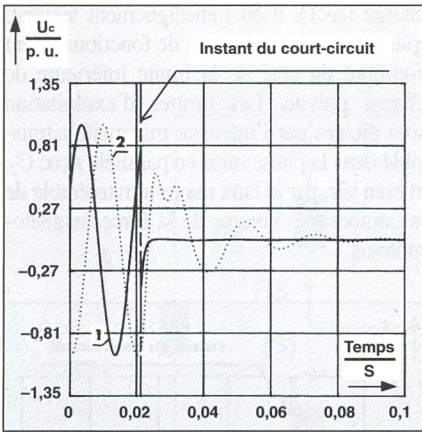


Figure 9 Résultats de calculs des tensions des phases excitées  
 $1 = U_{c1}, 2 = U_{c2}$

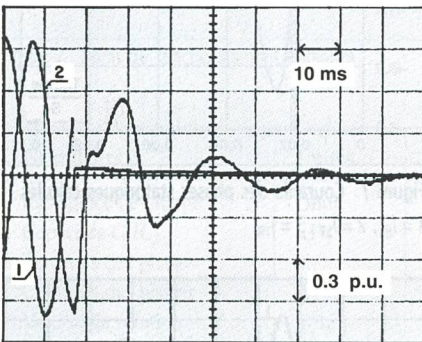


Figure 10 Résultats de mesures des tensions des phases excitées  
 $1 = U_{c1}, 2 = U_{c2}$

de fonctionnement à glissements valant 1 (rotor bloqué) respectivement 2 (marche à champ inverse).

La transformation de Park [5], appliquée à la génératrice asynchrone triphasée autonome et soumise à un régime de fonctionnement monophasé, conduit à l'établissement

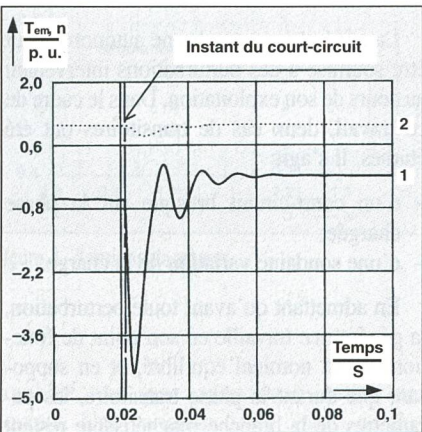


Figure 11 Couple électromagnétique et vitesse calculés  
 1 Couple électromagnétique  $T_{em}$   
 2 Vitesse  $n$

d'un système d'équations différentielles de la forme:

$$[A] (d/dt)[X] = [B].$$

L'intégration numérique de ce système livre les résultats illustrés par les figures 7-14.

## Résultats

### Court-circuit monophasé sur la phase chargée

On constate une bonne concordance des premières pointes des courants de phase mesurés et calculés, lors du court-circuit monophasé sur la phase chargée, ce qui permet d'ajuster d'une façon précise le réglage des protections (figures 7 et 8).

### Variation soudaine de la charge

Une variation soudaine de l'état de charge n'implique pas, comme on pouvait s'y attendre, des sollicitations brusques et sévères. En revanche, une charge déséquilibrée permanente entraîne:

- le déséquilibre des courants et des tensions de phases, et par conséquent un risque accru d'échauffement de la génératrice;
- l'apparition d'une composante de couple électromagnétique pulsant lié à la présence d'une force magnétomotrice inverse (figure 14).

Les figures 12 et 13 représentent les courants dans les 2 phases excitées lors d'une augmentation brusque de 50% de la charge, le coefficient de surcharge  $\alpha = R_{ch,nom}/R_{ch}$  passant de 1 à 2. La diminution du couple électromagnétique moyen (figure 14) obtenue après l'augmentation brusque de la charge, est due à une baisse sensible de la tension (passage de 1 à environ 0,4 p.u.) aux bornes de la charge  $R_{ch}$ .

## Conclusions

Le comportement en régimes stationnaires et transitoires d'une micro-génératrice asynchrone triphasée, excitée par des condensateurs et alimentant un îlot monophasé a été étudié. Les résultats obtenus par voie de simulation basée sur un modèle comportant deux branches rotoriques sont très proches de ceux issus des vérifications expérimentales.

La méthode proposée a été élaborée dans un souci de faciliter son application dans un cas pratique. Elle permet de définir les plages possibles de fonctionnement d'une micro-génératrice et de dimensionner les protections propres à garantir une exploitation fiable.

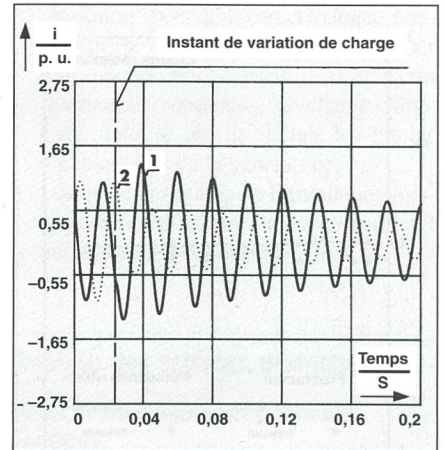


Figure 12 Courants lors d'une augmentation brusque de la charge (calculs)

Résultats de calculs pour les courants dans les phases excitées lors d'une augmentation brusque de 50% de la charge

$$\begin{matrix} 1 & I_{RS} \\ 2 & I_{ST} \end{matrix}$$

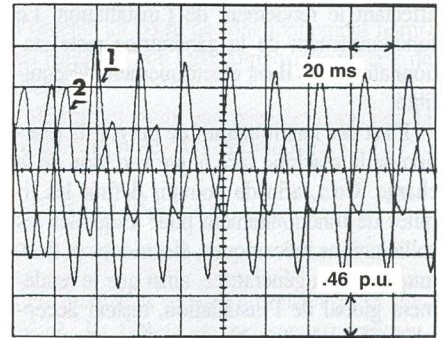


Figure 13 Courants lors d'une augmentation brusque de la charge (mesures)

Résultats de mesures pour les courants dans les phases excitées lors d'une augmentation brusque de 50% de la charge

$$\begin{matrix} 1 & I_{RS} \\ 2 & I_{ST} \end{matrix}$$

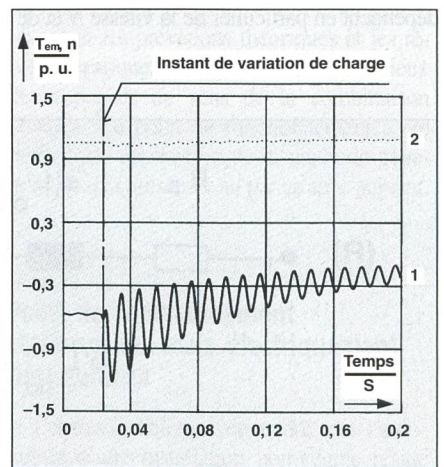


Figure 14 Couple électromagnétique et vitesse calculés lors d'une augmentation brusque de 50% de la charge

$$\begin{matrix} 1 & \text{Couple électromagnétique } T_{em} \\ 2 & \text{Vitesse } n \end{matrix}$$

Références

[1] J. L. Bhattacharya and J. L. Woodward: Excitation balancing of a self-excited induction generator for maximum power output. IEEE Proceedings Vol. 135, Pt. C No.2-03, 1987.  
 [2] Ratovoharisoa: Etude du comportement en charge d'une génératrice asynchrone triphasée, excitée par des condensateurs et alimentant une charge monophasée îlotée. Thèse de Docteur-Ingénieur ESP-A, EPFL, 1991.  
 [3] C. V. Jones: The Unified Theory of Electrical Machines. Butterworths, Londres, 1967.  
 [4] J. J. Simond: Machines Electriques. Cours EPF Lausanne, Librairie Polytechnique EPFL, 1991.  
 [5] J. Chatelain: Machines Electriques. Georgi, Suisse, 1983.

Annexes

Annexe 1

La machine d'essai peut être caractérisée par les spécifications indiquées dans le tableau II.

Spécifications	
Tension nominale	220/380 V
Courant de ligne	4,9/2,8 A
Fréquence électrique	50 Hz
Vitesse de rotation	1400 tr/min
Puissance à l'arbre	1100 W
Nombre de pôles	4
Résistance statorique	0,076 p.u.
Résistance rotor. rapp.	0,094 p.u.
Résistance «fer»	1,430 p.u.
Réactance de fuite stat.	0,072 p.u.
Réactance de fuite rotor	0,071 p.u.
Réactance principale	1,36 p.u.

Tableau II Caractéristiques principales de la machine asynchrone

Annexe 2

Développement de la fonction F

La théorie sur les composantes symétriques [3, 4] permet de décomposer un système triphasé non symétriques ( $\underline{G}_1, \underline{G}_2, \underline{G}_3$ ) en 3 systèmes symétriques, direct  $\underline{G}_d$ , inverse  $\underline{G}_i$  et homopolaire  $\underline{G}_o$ , donnés par:

$$[\underline{G}_d, \underline{G}_i, \underline{G}_o] = [A] [\underline{G}_1, \underline{G}_2, \underline{G}_3] \quad (1)$$

Pour un couplage triangle d'un récepteur triphasé déséquilibré (figure 15), la relation (1) permet d'écrire pour la phase RS:

$$\underline{I}_{RSd} = \underline{V}_{RSd} \underline{Y}_{RSo} + \underline{V}_{RSi} \underline{Y}_{RSi} \quad (2)$$

$$\underline{I}_{RSi} = \underline{V}_{RSd} \underline{Y}_{RSd} + \underline{V}_{RSi} \underline{Y}_{RSo} \quad (3)$$

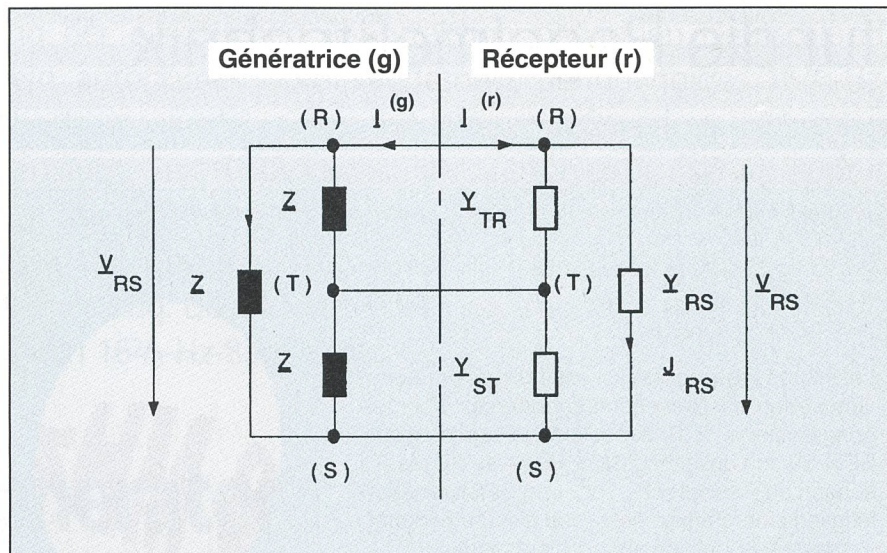


Figure 15 Schéma pour le développement de F

D'autre part, la composante directe des courants de ligne s'écrit, respectivement du côté générateur et du côté récepteur:

$$\underline{I}_{Rd}^{(g)} = (1-\underline{a}) \underline{V}_{RSd} / \underline{Z}_d \quad (4)$$

$$\underline{I}_{Rd}^{(r)} = (1-\underline{a}) (\underline{V}_{RSd} \underline{Y}_{RSo} + \underline{V}_{RSi} \underline{Y}_{RSi}) \quad (5)$$

avec  $\underline{a} = \exp(j2\pi/3)$ . Sachant en outre que  $\underline{I}_{Rd}^{(g)} = -\underline{I}_{Rd}^{(r)}$ , il vient:

$$\underline{V}_{RSd} / \underline{Z}_d + \underline{V}_{RSd} \underline{Y}_{RSo} + \underline{V}_{RSi} \underline{Y}_{RSi} = 0 \quad (6)$$

Le même raisonnement appliqué à la composante inverse donne:

$$\underline{V}_{RSi} / \underline{Z}_i + \underline{V}_{RSd} \underline{Y}_{RSd} + \underline{V}_{RSi} \underline{Y}_{RSo} = 0 \quad (7)$$

Pour  $\underline{V}_{RSd}$  nécessairement non nulle, la combinaison de ces deux dernières relations donne:

$$1/\underline{Z}_d + \underline{Y}_{RSo} - \underline{Y}_{RSd} \underline{Y}_{RSi} / (1/\underline{Z}_i + \underline{Y}_{RSo}) = 0 \quad (8)$$

Le premier membre de cette dernière égalité définit la «fonction F» [2].

## Dreiphasige Kleinasynchron- generatoren mit einphasiger Last im Inselbetrieb

Dank ihrer Einfachheit und Robustheit erfreuen sich Kleinasynchrongeneratoren eines zunehmenden Interesses für die Stromerzeugung aus regenerierbaren Energien bei Leistungen bis etwa 50 kW. Dies war auch der Grund für die hier vorgestellten Untersuchungen: der Aufsatz beschreibt ein Modell zur numerischen Simulation der stationären und transienten Betriebe von dreiphasigen Asynchrongeneratoren mit einphasiger Last bei Inselbetrieb.

Im einfachsten Fall werden Kleinasynchrongeneratoren durch über die Statorwicklungen geschaltete Kondensatoren erregt und ohne jegliche Regelung betrieben (Figuren 1 und 2). Zur Abklärung der Grenzen eines möglichen Betriebes gehen die Autoren vorerst der Frage nach, wie sich die Betriebsgrößen Spannung, Strom und Frequenz ändern, wenn im unregelmäßigen Zustand die Last verändert wird; die Ergebnisse sind in den Figuren 3–5 dargestellt. Für die gleiche Konfiguration wird anschliessend das transiente Verhalten bei einem Kurzschluss im Lastkreis (Figuren 6–11) und bei einer sprunghaften Laständerung (Figuren 12–14) untersucht. Die Autoren finden eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gerechneten und gemessenen Resultaten. Mit dem beschriebenen Modell lassen sich somit die Betriebsgrenzen von kleinen Asynchrongeneratoren durch numerische Simulation zuverlässig abschätzen.

# Kompakte Lösungen für die Pegelmeßtechnik

Leicht und leistungsstark – Attribute einer neuen Generation von Betriebsmeßgeräten für Übertragungssysteme. Z. B. der selektive Pegelmesser SPM-39: ein unverzichtbarer Begleiter für Messungen an Fernsprech-, Ton- und Datenkanälen. Mitglied einer Familie netz- und akkubetriebener Pegelmesser mit und ohne Mitlaufsender.

- ★ 50 Hz bis 8 MHz, 18 MHz oder 32 MHz
- ★ Pegel- und Dämpfungsmessungen
- ★ Selektiv oder breitbandig

Werden neben Sprachkanälen auch Datenkanäle übertragen, so können zusätzlich weitere Messungen entsprechend CCITT durchgeführt werden:

- ★ Übersprechen (NEXT/FEXT)
- ★ Geräusch
- ★ Unterbrechungen
- ★ Impulsgeräusch
- ★ Phasenjitter

Je nach Anforderungen erscheinen die Meßergebnisse in numerischer oder grafischer Form. Marker, Pegelschwellen und Zeitstempel unterstützen komfortabel die Meßauswertungen. RAM-Cards speichern applikationsorientiert Setups und Meßwerte. Das erhöht die Betriebssicherheit und beschleunigt den Meßablauf.

Testen Sie selbst: von „dBm“ bis „ $\mu$ V“, von der „4-Pol-Messung“ bis zur „Störliensuche“ ist alles vorhanden.

Wandel & Goltermann  
(Schweiz) AG  
Elektronische Meßtechnik  
Morgenstr. 83, Postfach,  
3018 Bern  
Tel. 031-9 91 77 81  
Fax 031-9 91 47 07



**Wandel & Goltermann**  
Elektronische Meßtechnik

