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: 75 (1984)

Heft: 12

Artikel: Simulation analogique de la ferrorésonance tri-monophasée

Autor: Abdennour, R. / Sbai, A. / Annabi, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904423

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.07.2025

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

Simulation analogique de la ferrorésonance tri-monophasée

R. Abdennour, A. Sbai et M. Annabi

Les différents phénomènes de ferrorésonance rencontrés en monophasé nous incitent à les étudier dans le cas tri-monophasé. Ceci se ramène à l'étude de trois éléments monophasés non couplés mutuellement et alimentés par une source triphasée équilibrée. Le présent article confirme l'existence de certains régimes ferrorésonants. L'outil de base utilisé est un simulateur analogique.

Die einphasigen Erscheinungen der Ferroresonanz sind bekannt. Im vorliegenden Aufsatz wird der drei-einphasige Fall untersucht. Er lässt sich auf den Fall von drei ungekoppelten einphasigen Elementen zurückführen, die von einer symmetrischen dreiphasigen Quelle gespeist werden. Gewisse Ferroresonanzerscheinungen werden bestätigt. Als Werkzeug dient ein Analogsimulator.

Adresse des auteurs

M. Annabi, directeur, *R. Abdennour* et *A. Sbai*, Ecole normale supérieure de l'enseignement technique, 5, avenue Taha Hussein, Tunis (TN).

1. Introduction

On désigne sous le nom de ferrorésonance l'ensemble des régimes périodiques oscillatoires harmoniques ainsi que les régimes irréguliers qui se manifestent dans un circuit électrique comportant un ou plusieurs condensateurs et une ou plusieurs inductances à noyau de fer (non linéaires), alimenté par une ou plusieurs tensions sinusoïdales. L'apparition des différents régimes dépend essentiellement des conditions initiales à l'enclenchement [1].

Ces différents régimes ont été observés depuis le début du siècle par *E. Rouelle* qui en donna une analyse expérimentale détaillée en 1935. Dans [2] l'auteur décrit en 1946 un dispositif électronique permettant la reproduction des sous-harmoniques. Parallèlement à ces procédés expérimentaux plusieurs autres méthodes d'étude sont utilisées. On rencontre essentiellement les simulations analogiques [3; 4], les simulations numériques [1; 3] et les simulations analytiques [1; 5; 6; 7].

Si les simulations numériques donnent de bons résultats, elles s'avèrent trop particulières et nécessitent des temps de calculs souvent excessifs. Les méthodes analytiques, bien qu'améliorées dans [1; 2] ne permettent pas la prise en compte des régimes quasi-périodiques. Les simulations analogiques donnent des résultats qualitatifs intéressants et offrent l'avantage d'être souples, pratiques et rapides. Utilisées en monophasé, elles permettent de retrouver pratiquement les résultats obtenus par les autres méthodes. Le but de cet article est d'appliquer cette dernière méthode en vue d'étudier les divers régimes de ferrorésonance dans un circuit tri-monophasé simple.

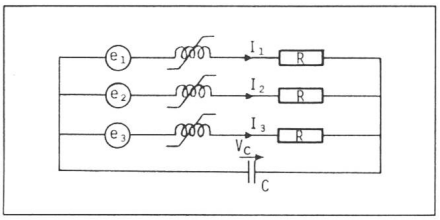

Fig. 1 Schéma du circuit tri-monophasé

2. Circuit de base et modélisation

La configuration qui représente le circuit étudié est donnée par la figure 1. Trois éléments non linéaires distincts couplés en étoile sont alimentés par une source triphasée équilibrée. La source et les trois éléments sont reliés à travers un condensateur C approximant la capacité équivalente du modèle. Dans ce modèle approché, R représente la résistance totale du circuit (ligne et transformateur).

3. Simulation globale

En simulation, le calculateur analogique joue le rôle d'un système physique dans lequel chaque organe apparaît comme un bloc de transmittance 'donnée. Les techniques de programmation diffèrent suivant le problème à résoudre. Les éléments utilisés sont constitués de circuits analogiques (amplificateur opérationnel, potentiomètre, relais analogique, éléments non linéaires). De ce fait le calcul analogique permet de simuler rapidement et à peu de frais le comportement de systèmes très variés. En effet, avec la possibilité de réduire le facteur temps, les équations régissant le phénomène à étudier se transforment en équations machines et permettent de gagner sur le temps de calcul. D'autre part, la souplesse d'accès aux diverses variables permet une exploitation immédiate des paramètres à étudier.

Si Φ_1, Φ_2, Φ_3 désignent les flux à travers les inductances, les équations régissant le circuit de la figure 1 sont

$$d\Phi_1/dt = e_1 - R I_1 - V_c$$

$$d\Phi_2/dt = e_2 - R I_2 - V_c$$

$$d\Phi_3/dt = e_3 - R I_3 - V_c$$

avec

$$e_1 = U_M \sin(\omega t + \alpha) = U_M V_1$$

$$e_2 = U_M \sin(\omega t + \alpha + 2\pi/3) = U_M V_2$$

$$e_3 = U_M \sin(\omega t + \alpha + 4\pi/3) = U_M V_3$$

$$V_c = \frac{1}{C} \int (I_1 + I_2 + I_3)\, dt$$

On pose $\Phi_i = x_i$ et $I_i = Y_i$. Si X_{im}, Y_{im} et V_{im} représentent les variables machines relatives à x_i, Y_i et V_i, on obtient l'équation machine suivante:

$$X_{1m} = -\frac{R\, Y_{max}}{x_{max}}\, Y_{1m} + \frac{U_M}{x_{max}}\, V_{1m} - \frac{Y_{max}}{C\, x_{max}} \int (Y_{1m} + Y_{2m} + Y_{3m})\, dt$$

et pour X_{2m} et X_{3m} des équations analogues par permutation.

Le schéma de la simulation globale est donné par la figure 2. Sur cette figure, on remarque l'existence de trois blocs identiques; chacun d'eux est composé d'un intégrateur (I), de deux potentiomètres (P) et une non-linéarité simulée à part. Le sommateur (So) permet la sommation des trois courants qui seront intégrés par l'intégrateur (I_3) pour avoir la tension ($-V_c$). Le potentiomètre (P_8) permet le réglage de la condition initiale sur la capacité.

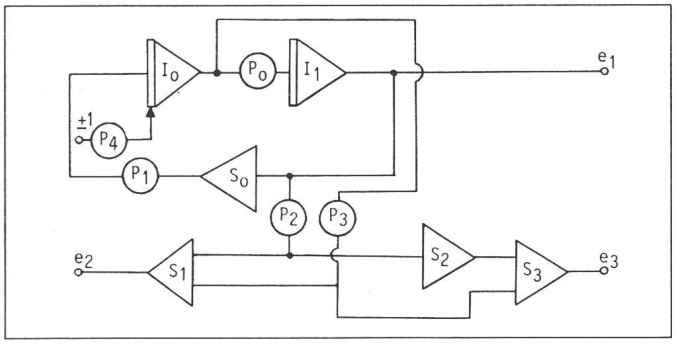

Fig. 3
Schéma de la simulation analogique de la source triphasée équilibrée

4. Simulation de la source

Pour simuler une source triphasée, on pense à priori à trois oscillateurs délivrant des signaux ayant même amplitude, même fréquence et de déphasage $2\pi/3$ l'un par rapport à l'autre. Or il est pratiquement impossible d'avoir trois oscillateurs indépendants oscillant à la même fréquence. Ceci provoquerait donc un déphasage variable en fonction du temps. Pour contourner cette difficulté, on adopte une méthode utilisant un seul oscillateur permettant grâce aux relations trigonométriques d'obtenir les signaux désirés.

Le schéma de la simulation analogique est donné par la figure 3. Sur cette figure, on remarque l'existence de deux intégrateurs I_0 et I_1, qui permettent d'obtenir le signal de référence (e_1). Les différents autres blocs (sommateurs et potentiomètres) permettent de réaliser les fonctions déphasées de $2\pi/3$ et de $4\pi/3$, soit e_2 et e_3. Outre le déphasage régulier et constant entre phases, cette méthode présente l'avantage de réduire le nombre de modules analogiques utilisés. Elle peut être généralisée au cas de sources présentant un déphasage quelconque. En effet:

$$\sin(\omega t + \psi) = \sin(\omega t)\cos(\psi) + \cos(\omega t)\sin(\psi)$$

$\sin\psi$ et $\cos\psi$ représentent respectivement les valeurs des potentiomètres P_3, P_2.

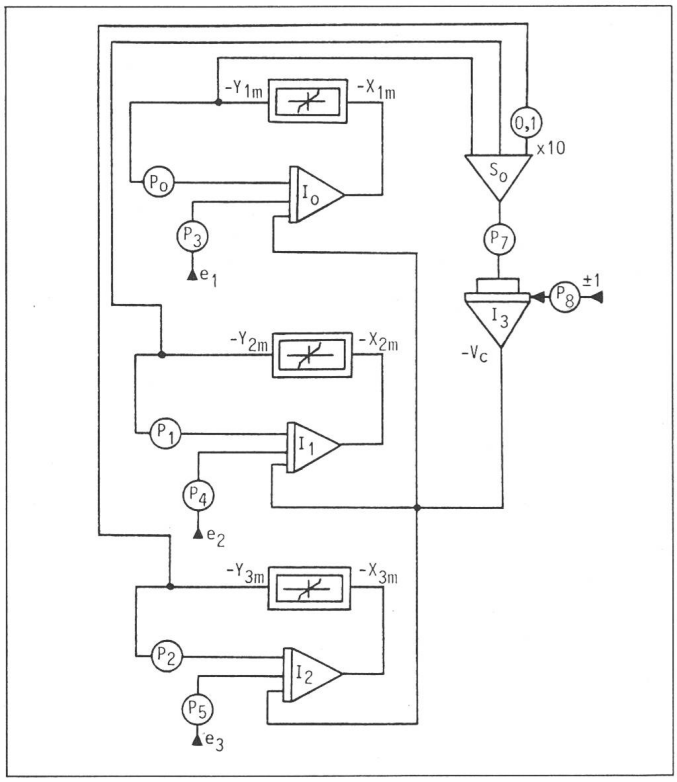

Fig. 2
Schéma de la simulation globale de la ferrorésonance tri-monophasée

5. Simulation de la non-linéarité

La non-linéarité peut être approximée dans le premier cadran par deux segments de droite (fig. 4). Le schéma de la figure 5 permet de simuler la non-linéarité désirée. Il utilise deux étages symétriques permettant chacun de simuler un demi-plan de la non-linéarité. Chaque étage est constitué essentiellement d'un comparateur (C) et d'un relais analogique (AS). Les potentiomètres (P_0, P_1) permettent le ré-

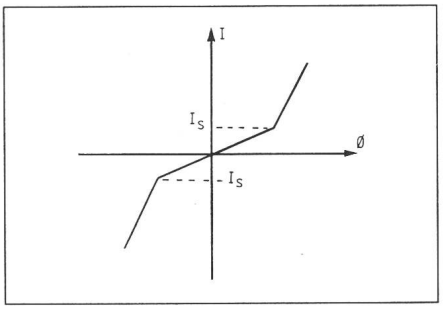

Fig. 4 Approximation de la non-linéarité

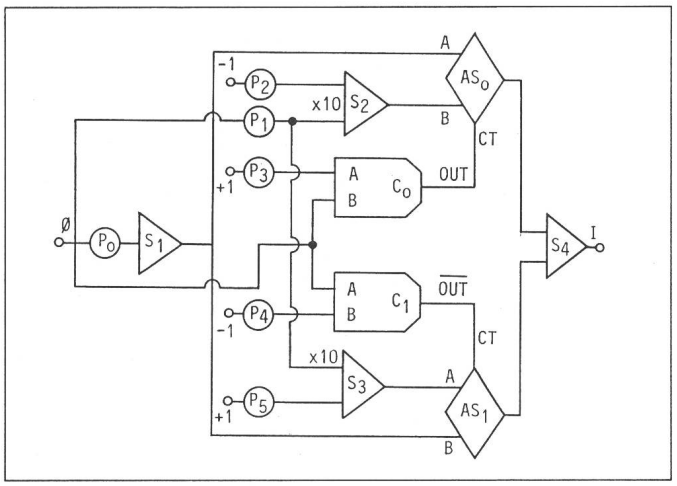

Fig. 5
Schéma de la simulation de la non-linéarité

glage de la pente à l'origine et de la pente de saturation. Les potentiomètres (P_2, P_3, P_4, P_5) agissent sur le seuil de saturation.

6. Mesures et résultats

L'étude a porté essentiellement sur la recherche de l'existence de la ferrorésonance en tri-monophasé. La non-linéarité de base est caractérisée par la self à l'origine (L_1 = 960 H) et la self de saturation (L_2 = 10,7 H). Le courant de saturation étant I_s = 0,4 mA. La capacité du condensateur C est gardée constamment égale à 3 µF.

En modifiant certains paramètres du circuit dont particulièrement la résistance totale du circuit (R), la tension initiale du condensateur (U_{co}) et la tension d'alimentation (U_M) plusieurs régimes ont été observés: ferrorésonance fondamentale, sous-harmoniques pairs, sous-harmoniques impairs et régimes irréguliers. Nous constatons que les courants dans les trois phases et le neutre ont toujours soit le même comportement fréquentiel, soit des formes d'onde simultanément irrégulières. Quant à leurs allures, elles sont différentes à cause du déphasage régulier entre tensions; par ailleurs elles dépendent des conditions initiales et des paramètres du circuit.

Contrairement au cas monophasé on a pu observer des oscillations en régime sous-harmonique pair.

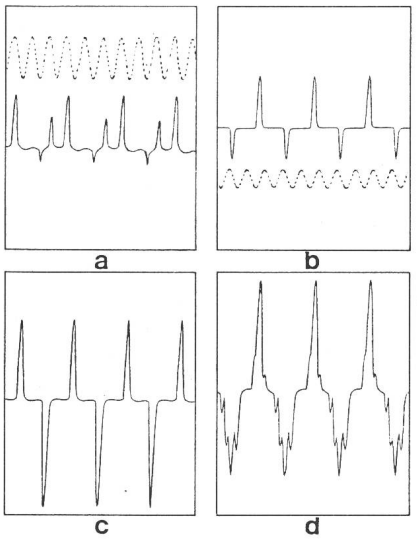

Fig. 6 Oscillations en régime sous-harmonique d'ordre 3

R = 1250 Ω L_1 = 960 H L_2 = 10,7 H
C = 3 µF U_M = 250 V ω = 314 rd/s
I_s = 0,0004 A U_{co} = −20 V α = 0

a phase 1 b phase 2
c phase 3 d neutre

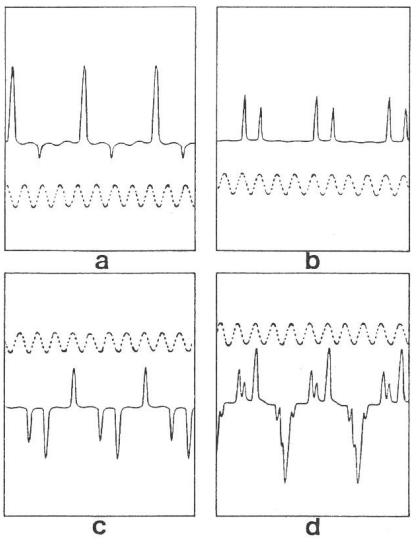

Fig. 7 Oscillations en régime sous-harmoniques d'ordre 4

R = 1250 Ω L_1 = 960 H L_2 = 10,7 H
C = 3 µF U_M = 200 V ω = 314 rd/s
I_s = 0,0004 A U_{co} = 20 V α = 0

a phase 1 b phase 2
c phase 3 d neutre

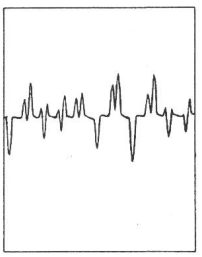

Fig. 8 Oscillations en régime irrégulier dans le neutre

R = 1000 Ω L_1 = 960 H L_2 = 10,7 H
C = 3 µF U_M = 250 V ω = 314 rd/s
I_s = 0,0004 A U_{co} = 200 V α = 0

On remarque que les sous-harmoniques d'ordre 3 sont moins fréquents que les sous-harmoniques d'ordre supérieur, alors que dans le cas monophasé, les sous-harmoniques d'ordre 3 sont les plus dominants.

La figure 6 illustre les courants dans les trois phases et le neutre en régime sous-harmonique d'ordre 3 (50/3 Hz). La figure 7 montre les courants dans les trois phases et le neutre en régime sous-harmonique d'ordre 4 (12,5 Hz). La figure 8 montre le courant dans le neutre en régime irrégulier. La figure 9 donne le domaine d'amorçage des différents régimes compte tenu de l'influence de la tension maximale d'alimentation et de la charge initiale du condensateur.

On remarque ainsi que pour des tensions inférieures à 160 V, les oscillations en régime fondamental persistent quelle que soit la charge initiale du condensateur; par ailleurs le régime sous harmonique d'ordre 2 n'a pu être observé que pour des charges initiales du condensateur négatives.

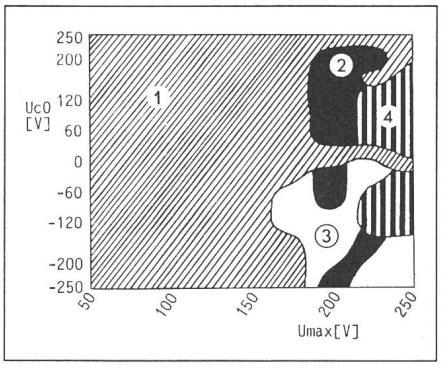

Fig. 9 Domaine d'amorçage des différents régimes

$U_{co} = f(U_M)$ R = 1250 Ω
L_1 = 960 H L_2 = 10,7 H
ω = 314 rd/s I_s = 0,0004 A
α = 0 C = 3 µF

① régime fondamental
② régime sous-harmonique d'ordre 4
③ régime sous-harmonique d'ordre 2
④ régime sous-harmonique d'ordre 3

7. Conclusion

La méthode de simulation analogique est utilisée dans l'étude de la ferrorésonance dans un circuit tri-monophasé. Bien que les résultats soient qualitatifs, cette méthode permet de confirmer l'existence de régimes ferrorésonants dans de tels circuits [1]. Une extension du simulateur permet d'envisager l'étude des circuits tri-monophasés plus proches de la réalité (introduction des pertes) et éventuellement triphasés.

Bibliographie

[1] *A. Germond:* Conditions de ferrorésonance dans des systèmes triphasés. Thèse N° 213 de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1975.

[2] *R. Dehors:* Contribution à l'étude de la démultiplication de fréquence ferromagnétique. Thèse N° 67 de la Faculté des Sciences de l'Université de Lille, 1946.

[3] *M. Lamotte:* Etude des oscillations sous-harmoniques dans un circuit R-L-C à inductance fortement non linéaire. Thèse de la Faculté des Sciences de l'Université de Nancy, 1967.

[4] *I.A. Wright* and *K. Morsztyn:* Subharmonic oscillations in power systems. Theory and practice. IEEE Trans. PAS 89(1970)8, p. 1805...1815.

[5] *C. Hayashi:* Nonlinear oscillations in physical systems. New York, McGraw-Hill, 1964.

[6] *W.J. Cunningham:* Analyse non linéaire. Résolution des équations différentielles. Paris. Dunod, 1963.

[7] *G. W. Swift:* An analytical approach to ferroresonance. IEEE Trans. PAS 88(1969)1, p. 42...46.