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: 68 (1977)

Heft: 20

Artikel: Etude Expérimentale d'une Machine à Courant Continu soumise à un Réglage Digital par Microprocesseur

Autor: Nguyen, H. / Schwarz, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915077

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: 05.12.2025

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

Etude Expérimentale d'une Machine à Courant Continu soumise à un Réglage Digital par Microprocesseur [1])

Par H. Nguyen et R. Schwarz

621.313.2:681.513.2:681.325-181.48

Une étude expérimentale d'un réglage digital par microprocesseur d'une machine à courant continu est présentée. D'abord le phénomène de l'apparition de cycles limites dus à la quantification des grandeurs digitales est décrit, et l'on démontre qu'une application des circuits de réglage en cascade n'est pas possible. On présente ensuite le principe de réglage en parallèle où l'on commute du circuit de réglage de vitesse sur un circuit de réglage de courant dès que le courant d'induit atteint une valeur maximale admissible. Finalement des résultats obtenus expérimentalement à l'aide d'un simulateur pour la machine à courant continu sont donnés.

Es wird eine experimentelle Untersuchung einer digitalen Regelung einer Gleichstrommaschine mittels Mikroprozessor beschrieben. Zuerst wird auf das Problem der Grenzzyklen hingewiesen, die infolge der Quantifizierung der digitalen Grössen auftreten können, und es wird gezeigt, dass aus diesem Grund die übliche Kaskadenregelung nicht verwendet werden kann. Alsdann wird das Prinzip einer parallelen Regelung dargestellt, bei der vom Drehzahlregelkreis auf einen Stromregelkreis umgeschaltet wird, sobald der Ankerstrom einen maximal zulässigen Wert erreicht. Schliesslich werden die Resultate gezeigt, die mittels eines Simulators für die Gleichstrommaschine erhalten wurden.

1. Introduction

Quand on propose la solution analogique pour des entraînements réglés avec machine à courant continu, c'est, dans la majorité des cas, à la version en cascade que vont les préférences: bon comportement dynamique, simplicité des organes de réglage.

Il en est tout à fait autrement pour la solution digitale. En effet, l'étude effectuée dans [1][2]) prévoit une composante proportionnelle de valeur élevée pour le régulateur de vitesse. Une légère erreur de la vitesse vis-à-vis de la consigne suffit à produire une grande variation du courant de consigne qui intervient à son tour sur la vitesse. Les corrections se faisant d'une manière «échantillonnée» et à cause de la quantification, le phénomène d'oscillation sous forme de cycles limites devient inévitable. Le relevé expérimental effectué à la fig. 1 démontre l'existence de ces cycles limites dont la période est un multiple entier de la période d'échantillonnage. On remarque deux types de non-linéarité: la quantification des différentes grandeurs et la limitation du courant de consigne. La quantification provoque des cycles limites avec des amplitudes relativement faibles (à gauche de la fig. 1), tandis que la limitation du courant de consigne a pour conséquence des cycles limites avec des amplitudes beaucoup plus importantes (partie droite de la fig. 1).

Ainsi, le réglage direct de la vitesse avec une surveillance du courant d'induit en parallèle devient plus attrayant. La réalisation pratique des régulateurs ne présente pas de difficultés spéciales et rend cette solution abordable.

2. Réglage parallèle

2.1 Principe

Les deux régulateurs de la fig. 2 sont presque totalement indépendants. On commute sur l'un ou l'autre régulateur suivant les besoins du fonctionnement.

Le régulateur de courant Ri n'intervient que lorsque la valeur du courant d'induit i_a dépasse une limite maximale (positive ou négative), donc uniquement en régimes transitoires (démarrage ou freinage) ou encore lors de fortes surcharges.

Le régulateur de vitesse Rn intervient dans tous les autres cas. Une surveillance continuelle du courant d'induit i_a est donc nécessaire afin d'assurer les commutations entre régulateurs. De plus, il faut faire particulièrement attention aux conditions de sortie des régulateurs (u_c' et u_c'') lors des commutations pour ne pas avoir d'à-coups sur le système à régler (machine à courant continu avec convertisseur de courant). La fig. 3 illustre ce problème à l'exemple d'un démarrage:

Initialement, le système à régler est branché sur le régulateur de vitesse. La vitesse de consigne n_c étant nulle, le régulateur n'intervient pas (on suppose que la charge est nulle à vitesse nulle). Lors de l'apparition d'une vitesse de consigne différente de zéro, le régulateur de vitesse intervient pour atteindre cette vitesse. Le courant augmentera et atteindra la limite admissible i_{alim}. On doit alors commuter sur le régulateur de courant.

[1]) Ce travail a pu être réalisé grâce à un subside de la Commission pour l'encouragement des recherches scientifiques accordé à la Chaire d'électronique industrielle de l'EPFL.

[2]) Voir la bibliographie à la fin de l'article.

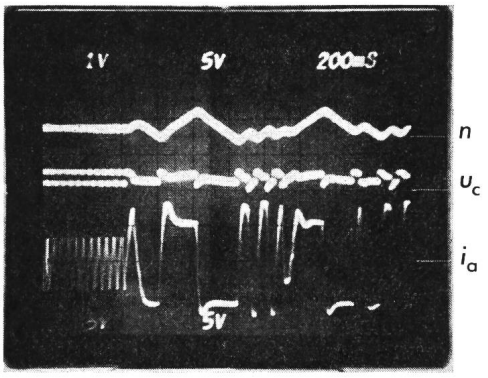

Fig. 1 Existence des cycles limites dans la version du réglage en cascade (T_E = 20 ms)
n vitesse du moteur
u_c tension de contrôle
i_a courant d'induit

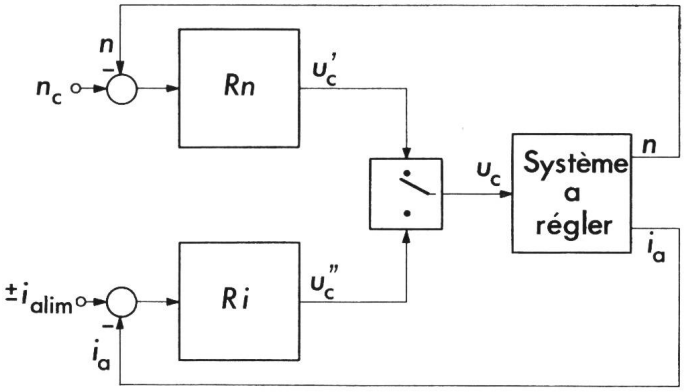

Fig. 2 Principe du réglage en parallèle
R_n régulateur pour la vitesse
R_i régulateur pour le courant

Afin d'éviter un dépassement de la vitesse au delà de la valeur de consigne lorsque l'on se rapproche de cette dernière (à courant constant), la consigne du courant est diminuée linéairement selon la théorie des réglages optimaux. Ceci a pour conséquence une augmentation parabolique de la vitesse en fonction du temps. La pente de diminution du courant est choisie de façon que le sommet de la parabole de vitesse atteigne la vitesse de consigne. A cet instant, la commutation est effectuée sur le régulateur de vitesse, sans dépassement.

La séquence illustrée est la même lors de n'importe quel changement de régime, sauf si le courant maximum n'est pas atteint, auquel cas le régulateur de vitesse intervient seul.

Le schéma bloc de l'installation complète est représenté à la fig. 4. La partie encadrée en traitillé représente le «software», lequel est décrit par l'organigramme de la fig. 5 qui est programmé sur le microsystème 8 CEI [2].

Les essais qui sont décrits par la suite ont été effectués au moyen d'un simulateur simplifié de convertisseur de courant (courant lisse) et d'un simulateur de moteur à courant continu à flux constant $\varphi = 1$. Les données sont les suivantes:

Convertisseur de courant:
$u_{dio} = 1{,}2$ p.u. tension continue idéale maximale
$r_i = 0{,}04$ p.u. résistance interne

Machine à courant continu:
$r_a = 0{,}03$ p.u. résistance du circuit d'induit
$i_{alim} = \pm 1{,}5$ p.u. courant maximum de limitation
$T_a = 0{,}038$ s constante de temps du circuit d'induit
$T_m = J\,\Omega_n/M_{em} = 1$ s constante de temps mécanique

2.2 *Réglage du courant*

Le régulateur de courant est un régulateur PI double [1]. L'algorithme d'un régulateur PI est de la forme suivante:

$$x_s^*[n] = k_i \sum_{k=0}^{n} x_e^*[k] + k_p\, x_e^*[n] \qquad (1)$$

L'algorithme du second régulateur est absolument identique, la sortie du premier étant simplement l'entrée du second.

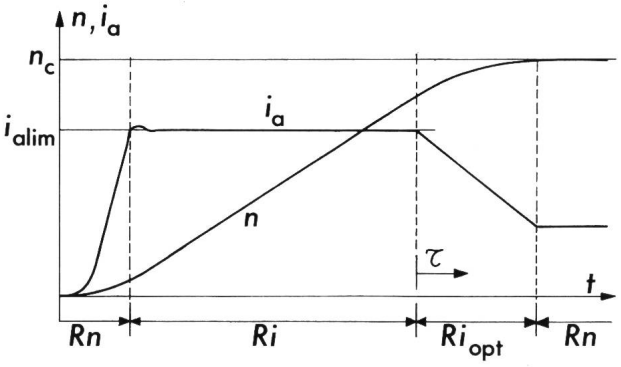

Fig. 3 Séquence de démarrage théorique

Les valeurs des coefficients k_p et k_i ont été déterminées dans [1]; pour $T_E = 5$ ms on obtient

$k_{p1} = 0{,}218 \qquad k_{i1} = 0{,}038$
$k_{p2} = 1 \qquad k_{i2} = 0{,}106$

Ces valeurs donnent les réponses indicielles d'un régulateur PI et d'un régulateur PI double représentés aux fig. 6 et 7.

En boucle fermée du circuit de réglage de courant, on obtient pour un saut de valeur de consigne le résultat montré à la fig. 8. Par la réduction de la consigne de courant dans la dernière phase, on atteint la vitesse nominale sans dépassement.

Pour éviter des oscillations du type des cycles limites, on doit respecter une certaine relation entre les quantifications de i_a et de u_c. En effet, on a pour le régime stationnaire exprimé en valeurs relatives

$$i_a = \frac{u_{dio} \cdot u_c - \varphi \cdot n}{r} \qquad (2)$$

où $r = r_a + r_i$. En transformant cette formule, on obtient

$$\left(\frac{r}{\varphi}\right) \cdot i_a = \left(\frac{u_{dio}}{\varphi}\right) \cdot u_c - n \qquad (3)$$

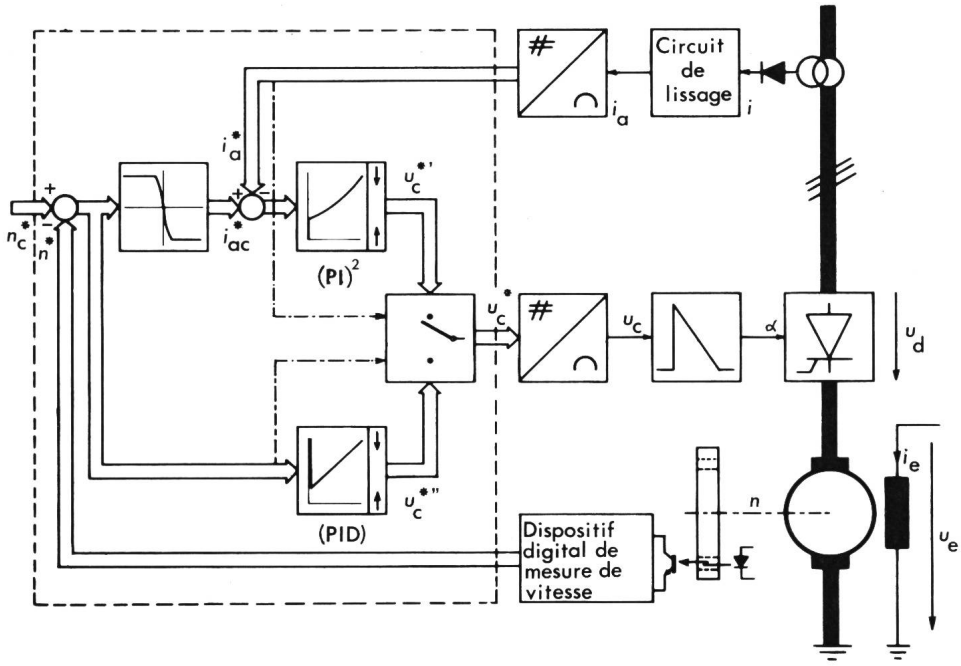

Fig. 4
Schéma-bloc du réglage parallèle

Pour que i_a puisse rester à sa valeur de consigne en régime permanent, il faut que la quantification de u_c satisfasse la relation suivante:

$$\Delta u_c \leq \frac{r}{u_{di0}} \cdot \Delta i_a \tag{4}$$

2.3 Réglage de la vitesse

Pour la surveillance de la vitesse, un simple régulateur du type PID suffit [1]. L'algorithme de ce dernier se traduit sous la forme

$$x_s^*[n] = k_p x_e^*[n] + k_i \sum_{k=0}^{n} x_e^*[k] + k_d (x_e^*[n] - x_e^*[n-1]) \tag{5}$$

dont la réponse indicielle est représentée à la fig. 9.

Le dimensionnement suivant [1] (compensation des pôles, marge de phase égale à 60°) mène à des résultats dont les relevés expérimentaux (fig. 10 et 11) ont été faits sans surveillance du courant, mais en gardant ce dernier dans les limites acceptables. Pour un saut en consigne, on obtient un temps de réponse égal à environ 0,1 s et un dépassement de l'ordre de 11%. Pour une variation de charge, on arrive à 0,2 s et 4%.

Il est nécessaire de prendre certaines précautions quant au choix des pas de quantification de la mesure de la vitesse Δn et de la tension de contrôle Δu_c (qui sort du régulateur). En effet, on a en régime stationnaire:

$$n = \frac{1}{\varphi}(u_{di} - r i_a) \approx \frac{u_{di}}{\varphi} = \frac{u_{di0}}{\varphi} \cdot u_c \tag{6}$$

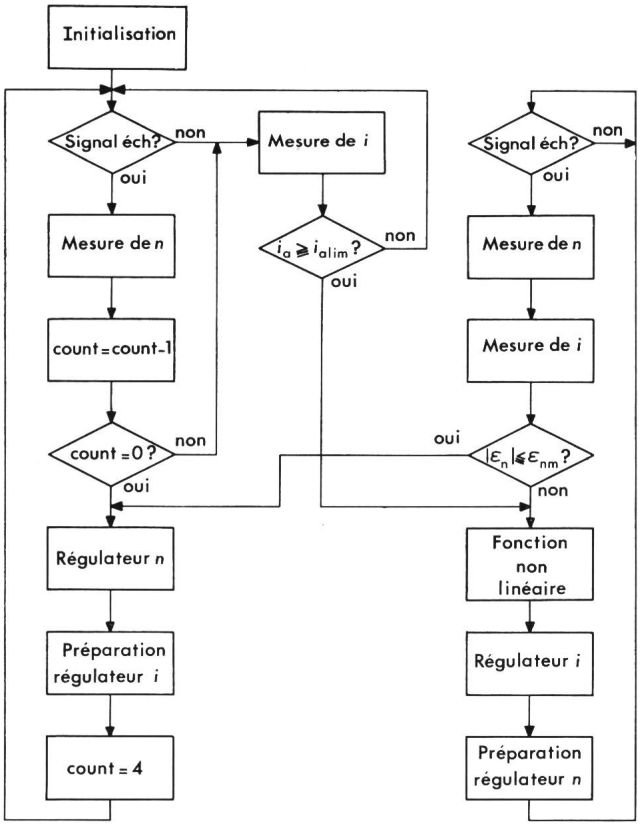

Fig. 5 Organigramme du réglage parallèle

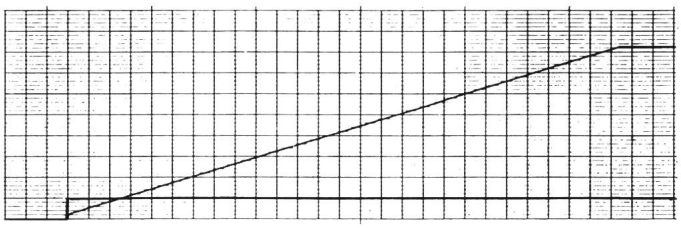

Fig. 6 Réponse indicielle du premier régulateur PI
0,125 p.u./div. et 0,04 s/div.

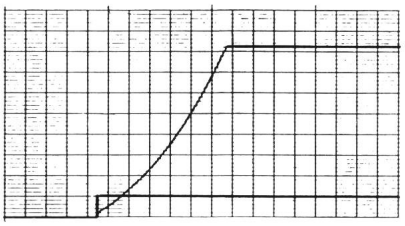

Fig. 7 Réponse indicielle du régulateur PI double
0,125 p.u./div. et 0,04 s/div.

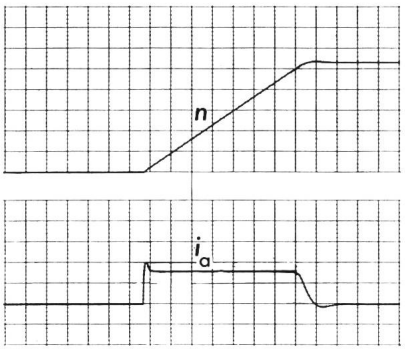

Fig. 8 Réglage du courant d'induit avec régulateur PI double
n: 0,5 p.u./div.
i_a: 0,625 p.u./div. et 0,2 s/div.

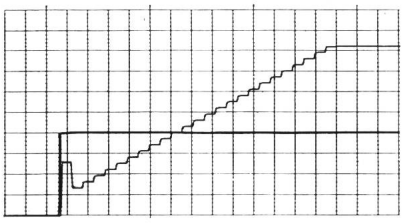

Fig. 9 Réponse indicielle d'un régulateur PID
0,125 p.u./div. et 0,04 s/div.

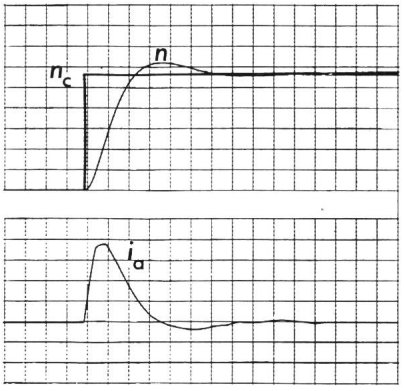

Fig. 10 Réglage de vitesse au cas d'une variation de consigne
Trace supérieure: 0,025 p.u./div. et 0,04 s/div.
Trace inférieure: 0,625 p.u./div. et 0,04 s/div.

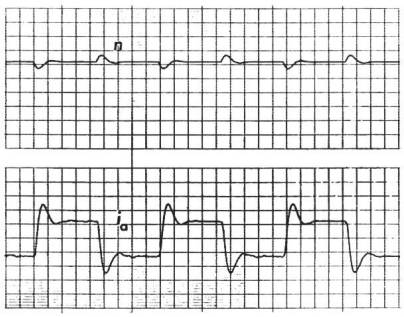

Fig. 11 Réglage de vitesse au cas d'une variation de charge
Trace supérieure: 0,125 p.u./div. et 0,2 s/div.
Trace inférieure: 0,625 p.u./div. et 0,2 s/div.

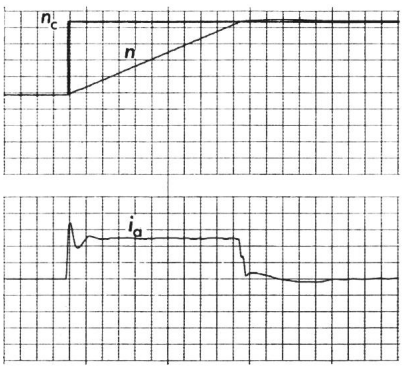

Fig. 12 Caractéristique $i_{ac} = f(n - n_c)$

Pour éviter des oscillations permanentes, on doit veiller à ce que

$$\Delta n \geqq N\,(u_{dio}/\varphi) \cdot \Delta u_c \tag{7}$$

où $N\,(u_{dio}/\varphi)$ est le nombre entier plus grand (ou égal) et le plus proche à u_{dio}/φ. Sinon, la vitesse ne pouvant jamais atteindre la valeur de consigne (à $\pm\,\Delta n$ près) à cause du pas de quantification de u_c relativement trop élevé, le régulateur voit toujours une erreur et essaie de la compenser, générant ainsi une oscillation autour de la valeur de consigne sous forme de cycles limites.

2.4 Réglage optimal

En partant de l'équation de mouvement de la machine à courant continu et en effectuant une diminution linéaire du courant comme décrit plus haut

$$i_{ac} = i_{alim} - c\,\tau \tag{8}$$

où c est le di/dt envisagé, on peut déterminer une relation entre le courant à imposer i_{ac} et la différence de la vitesse n par rapport à sa valeur de consigne n_c:

$$i_{ac} = m \pm \sqrt{|\,2c\,(n - n_c)\,T_m\,|} \tag{9}$$

où m est le couple résistant.

L'approximation de la fonction racine carrée peut être faite de différentes manières. La solution retenue est l'approximation par des polynômes; dans le cas présent, cette approximation est faite par deux paraboles (fig. 12) en tenant compte d'un compromis entre le temps de calcul et la précision.

Il faut, de plus, déterminer le couple résistant m pendant le démarrage. En utilisant $(n_m - n_{m-1})$, la différence de vitesse entre deux instants d'échantillonnage consécutifs, on obtient:

$$m = i_a - (n_m - n_{m-1}) \cdot T_m/T_E \tag{10}$$

Cependant, la traînée du régulateur de courant n'étant pas négligeable, une réadaptation de la fonction non linéaire devient nécessaire afin de rattraper cet effet. Une séquence de démarrage complète est représentée à la fig. 13.

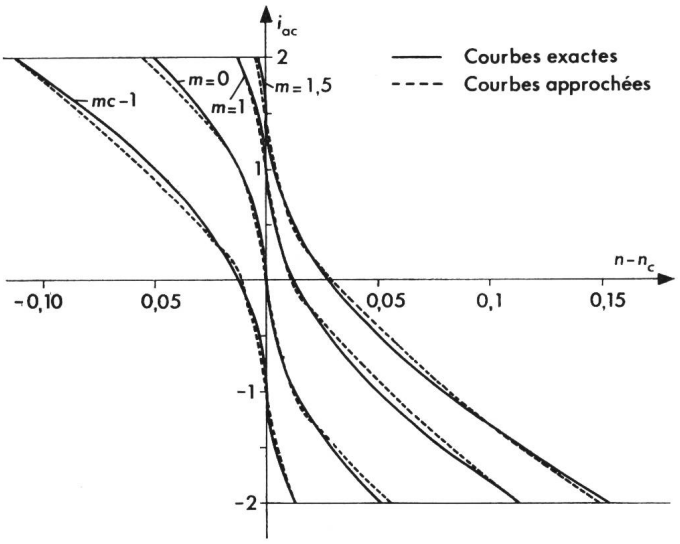

Fig. 13 Séquence de démarrage
n 0,125 p.u./div. et 0,04 s/div.
i_a 0,625 p.u./div. et 0,04 s/div.

3. Conclusion

La série d'essais expérimentaux précédente a donné une idée générale sur l'utilisation des microprocesseurs dans le réglage digital de machines à courant continu. Malgré le fait qu'il existe encore des problèmes à résoudre, un certain espoir devient possible. Une approche plus rigoureuse tenant compte des ondulations (provenant de l'alimentation par convertisseur de courant) constitue la prochaine étape d'étude, soit une réadaptation des régulateurs conçus avec l'hypothèse de courants parfaitement lisses.

Bibliographie

[1] *S. A. Hing:* Etude théorique de la stabilité d'une machine à courant continu soumise à un réglage digital. Bull. ASE/UCS 68(1977)22.
[2] *H. Nguyen:* Le microsystème 8 CEI. Bull. ASE/UCS 68(1977)17, p. 923...926.

Adresse des auteurs

Ha Nguyen et *Roland Schwarz*, Chaire d'électronique industrielle, EPFL, 16, chemin de Bellerive, 1007 Lausanne.