

MODELISATION REGIMES DYNAMIQUES DES ENTRAÎNEMENTS ELECTRIQUES TYPE « SOURCE DE COURANT MOTEUR »

A. Traiaia*
A. Chaker**

Abstract

Electric dc drives fed by a parametric current source are characterised by a good performance at an effective cost. In fact it opens a wide range of industrial perspectives. In this kind of drive which used standard motors, the control of parameters is based exclusively on the flux. This study based on experience planification technique, yield to a universal model, which allows a better analysis of transient processes in this drive.

Résumé

Les entraînements électriques à courant continu, alimentés par des sources de courant paramétriques, sont caractérisés par de bonnes performances technico-économiques. De ce fait, ils ouvrent de grandes perspectives industrielles. Dans ce type d'entraînement qui utilisent des moteurs standards, le réglage de tous les paramètres est assuré exclusivement par le flux. D'autre part cette étude se basant sur la technique de planification de l'expérience débouche sur un modèle universel permettant une meilleure analyse des processus dynamiques dans ce type d'entraînement.

I. Introduction

Aujourd'hui, un grand nombre d'installations exigent un réglage économique, souple dans une large gamme de paramètres technologiques. Ces installations ne nécessitent pas la rapidité des entraînements électriques à base de thyristors, par contre, la fiabilité et la simplicité de l'exploitation deviennent des facteurs déterminants. Dans ces conditions l'utilisation des entraînements électriques type "source de courant-redresseur- moteurs" [1, 2] s'impose comme solution technique efficace. Ces entraînements utilisent souvent comme source d'alimentation une source de courant paramétrique en pont triphasé de type inductif-capacif, dont le principe de fonctionnement est basé sur la résonance de tension, laquelle est caractérisée par de bons indices énergétiques et d'exploitation [3]. Sa construction est simple : elle est constituée en effet de trois condensateurs et de trois selfs identiques de type usuel (figure 1)

Dans le présent article, nous proposons une méthode de modélisation des régimes dynamiques d'un entraînement alimenté par ce type de source.

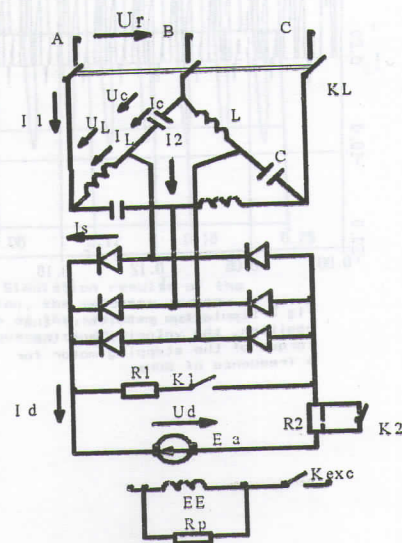


Fig.1 : Schéma de principe de l'installation d'expérimentation pour l'étude des régimes dynamiques du système "SC-R-M"

II. Paramètres principaux du système étudié

Le modèle physique étudié se compose de :
Source de courant paramétrique en pont triphasé type inductif-capacitif (S.C) :

$$x_L = 30 \pm 0.5 \, \Omega ; x_C = 30 \pm 1 \, \Omega ; U_C = 220 \, V.$$

- Redresseur à diodes
- Résistance pour le freinage du système (R_1) ;
- Résistance d'extinction du champ (R_p) ;
- Moteur à courant continu à usage normal à excitation séparée.

$$P_n = 7.4 \, \text{kW} ; U_n = 220 \, V ; I_n = 39.8 \, A ;$$

$$N_n = 3000 \, \text{tr/mn}.$$

- Appareils de mesure, de commutation et de contrôle.

III. Méthode de modélisation

L'étude des régimes dynamiques est effectuée sur le modèle physique réel décrit. Du point de vue pratique, l'analyse de ces régimes dans le système source de courant-redresseur-moteur (SC- R- M) a pour objectif la détermination des estimations fiables de la durée des processus transitoires types pour l'exploitation et l'évaluation des valeurs maximales des grandeurs principales du système par rapport à leurs valeurs établies et cela pour des paramètres connus de l'entraînement et une force électromotrice donnée du moteur.

Les processus transitoires dans le système sont obtenus grâce aux commutateurs K_L , K_{exc} , K_1 , K_2 . Quant au choix de la méthode de modélisation nous avons effectué des essais préalable pour relever les oscillogrammes (figure 2) traduisant la variation des grandeurs électriques principales du système pendant les régimes transitoires types obtenus par les commutateurs K_L , K_{exc} .

L'analyse du processus de la mise en service du système (intervalle t_1 - t_2) montre que le caractère de variation de toutes les grandeurs électriques est considérablement compliqué. Par conséquent la recherche des solutions analytiques utilisables en pratique pour tous les cas est sans perspectives et cela même dans le cas où l'on admet le maximum de suppositions. En effet la présence dans le système d'un grand nombre d'accumulateurs d'énergie liés entre eux, entraîne une augmentation de l'ordre d'équations décrivant les processus, de même que la présence des diodes rend ces équations non linéaires. C'est ainsi que la méthode expérimentale d'analyse des régimes dynamiques demeure la plus fiable.

Pour les besoins de cette étude nous avons utilisé la méthode de l'expérience planifiée [4] et les résultats ainsi obtenus, ont été transformés en modèle universel reflétant

les caractéristiques principales du processus. Compte tenu du caractère aléatoire des processus transitoires dus à la phase initiale aléatoire des grandeurs électriques, il est plus commode d'utiliser pour l'analyse et la synthèse du modèle universel les équations de régression. Ces équations permettent de trouver la relation de l'estimation des indices dynamiques Y_i et les facteurs contrôlés X_i influant sur ces indices. Pour les facteurs contrôlés variant dans l'intervalle ($X_{i.min}$ - $X_{i.max}$), il est plus commode d'utiliser leurs valeurs codées x_i [5]. La relation entre les valeurs codées et les valeurs réelles est donnée par l'expression suivante :

$$x_i = (X_i - X_{i.moy}) / (X_{i.moy} - X_{i.min}) \quad (1)$$

avec

$$X_{i.moy} = (X_{i.min} + X_{i.max}) / 2$$

-Les équations de régression dans ces conditions peuvent être écrites comme suit [5]:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ij} x_i x_j + \dots + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 \dots \quad (2)$$

avec :

Y - fonction objective, x_i , x_j - facteurs contrôlés en valeurs codées;

n - nombre de ces facteurs et b_0 , b_i , b_{ij} , b_{ii} - estimations des coefficients de régression.

Pour déterminer les estimations des coefficients de régression, nous avons effectué une série d'essais sur le modèle physique réel suivant un plan d'expérience donné et pour une combinaison bien déterminée des facteurs contrôlés dans chaque essai. Les résultats obtenus ont été traités en se basant sur la technique de la théorie de planification des expériences [4, 5]. Cette méthode de traitement des résultats nous a permis de trouver l'estimation de coefficients de régression et leurs significations et aussi de vérifier l'adéquation du modèle avec le processus étudié.

Il est évident que le modèle obtenu de cette façon ne reflète pas entièrement le caractère du modèle réel mais il peut être utilisé comme instrument efficace pour la solution des problèmes pratiques.

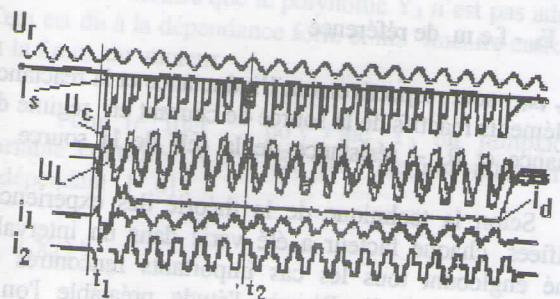


Fig.2 : Oscillogrammes des grandeurs électriques du système "SC-R-M" enregistrées lors de démarrage

IV. Choix des fonctions objectives

L'analyse des oscillogrammes, montre que la variation du courant de charge i_d pendant le processus transitoire a un caractère particulier et facile pour l'enregistrement. Par conséquent nous avons choisi la valeur maximale de ce courant en unités relatives $I_{d,max}^* = I_{d,max} / I_d$ comme l'une des fonctions objectives et nous estimons que ce choix est rationnel, car le courant I_d traverse l'induit du moteur et son caractère de variation pendant le processus transitoire détermine la fiabilité de fonctionnement du collecteur. Comme autre fonction objective nous avons choisi également les durées d'enclenchement (t_{enc}) et de déclenchement (t_{dec}) du système car ces deux paramètres représentent des indices importants pour l'estimation qualitative des processus transitoires dans les entraînements électriques. Les fonctions objectives choisies sont donc :

$$Y_1 = t_{enc}^* ; Y_2 = I_{d,max}^* / I_d ; Y_3 = t_{dec}^* \quad (3)$$

où : $t^* = t / T = t \cdot f$, ($T = 0.02$ sec - période de tension d'alimentation pour une fréquence $f = 50$ Hz).

V. Choix des facteurs contrôlés

Plusieurs facteurs influent généralement sur les fonctions objectives indiquées, dépendant des paramètres du schéma de la source de courant et de la charge. L'étude des processus transitoires est effectuée pour le régime symétrique de la source représentant un intérêt pratique particulier. En qualité de facteurs contrôlés dont l'influence a été étudiée expérimentalement, nous avons choisi les paramètres suivants exprimés en unités relatives la f.e.m. de la machine :

$$X_1 = E_a / E_b = \gamma_a^* \quad (4)$$

l'inductance de l'induit :

$$X_2 = L_a / L_r = \omega \cdot L_a / x_r = L_a^* \quad (5)$$

la résistance de l'induit:

$$X_3 = R_a / x_r = R_a^* \quad (6)$$

le facteur de qualité des selfs de la source :

$$X_4 = x_L / R_L = x_r / R_L = Q^* \quad (7)$$

Où : E_b - f.e.m. de référence ;

L_r, x_r - sont respectivement l'inductance et la réactance des éléments réactifs de la source de courant en régime de résonance et R_L - résistance de la self de la source.

Selon la technique de la théorie des expériences planifiées, chaque facteur a été varié dans un intervalle donné englobant tous les cas importants rencontrés en pratique (tableau 1). D'après l'étude préalable l'on a constaté que le caractère de la f.e.m. de l'induit pour $X_1 > 0.4$, a une grande influence sur les processus transitoires dans le système étudié. Par conséquent, le diapason de

variation du facteur X_1 a été subdivisé en deux parties la première a été utilisée dans l'expérience multifactorielle la deuxième dans l'expérience à un seul facteur.

VI. Réalisation de l'expérience

L'expérience ayant pour but la détermination d'un modèle sous forme d'équations de régression des indices dynamiques Y_1, Y_2 et Y_3 a été organisée suivant un plan d'expérience factorielle complète type 2^4 [4]. Chaque essai du plan a été triplé. Dans chaque essai on a enregistré pour la combinaison correspondante des facteurs contrôlés l'oscillogramme du courant $i_d(t)$. La figure 2 montre, titre d'exemple, les enregistrements des essais 1, 7 et 9. Les points a, b, c sur ces oscillogrammes représentent des points caractéristiques utilisés pour la détermination des fonctions objectives. Pour estimer la dispersion de l'expérience on a effectué une série d'essais au sein de chaque plan. Ces essais ont été répétés plusieurs fois dans des temps différents.

Comme il a été mentionné précédemment pour des charges élevées de la source de courant, l'influence des facteurs $X_2 \div X_4$ sur les indices dynamiques est faible contre l'effet de la f.e.m. est important. Pour analyser l'influence on a organisé une expérience à un seul facteur. Dans ce cas, les facteurs $X_2 \div X_4$ ont été fixés sur des niveaux de base et le facteur X_1 a été varié dans l'intervalle ($0.4 \div 1.4$). Tous les essais de cette expérience ont été doublés.

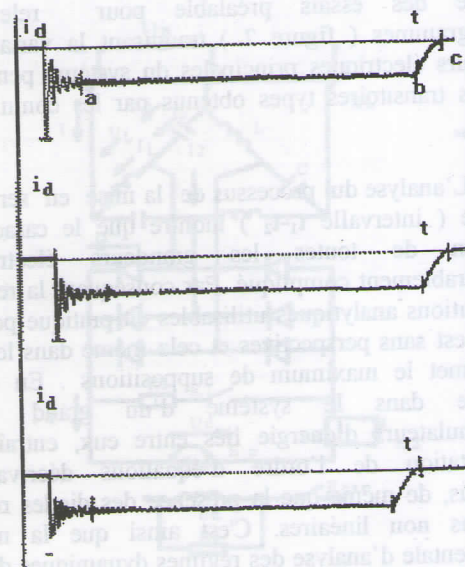


Fig 3 Enregistrement du courant de charge i_d pendant les essais 1, 7 et 9 du plan de l'expérience

VII. Traitement des résultats expérimentaux

Le traitement des résultats expérimentaux obtenus dans cette étude a été effectué sur ordinateur. L'algorithme utilisé est basé sur la technique de la théorie des expériences planifiées. Les étapes principales de cet algorithme sont les suivantes:

1-Détermination de la valeur moyenne de chaque fonction objective :

$$\bar{Y} = \sum_{k=1}^m Y_{ik} / m$$

où : $u = 1, N+1$ - numéro de l'essai et $N = 16$ (nombre d'essais du plan) avec $m = 3$ - nombre de répétitions de chaque essai.

2-Calcul des dispersions de Y pour chaque essai :

$$S_u^2 = \sum_{k=1}^m (Y_{uk} - \bar{Y}_u)^2 / (m - 1)$$

3-Vérification de l'homogénéité des dispersions

$$G = S_{u, \max}^2 / \sum_{u=1}^N S_u^2 < G_t$$

où : $S_{u, \max}^2$ - dispersion maximale; G_t - critère statistique. Pour $N=16$ et $m=3$; $G_t = 0.33$. Dans notre cas, le critère d'homogénéité est satisfait pour toutes les dispersions $S^2\{Y_i\}$.

4-Estimation de la dispersion moyenne de chaque Y :

$$S_Y^2 = \sum_{u=1}^N S_u^2 / N$$

Les valeurs de S_Y^2 pour f_y degrés de liberté : $f_y = N(m-1) = 32$ et une probabilité de confiance $P = 0.95$, d'où $S_{Y1}^2 = 0.62$, $S_{Y2}^2 = 0.025$, $S_{Y3}^2 = 0.035$

5-Estimation de la dispersion de chaque Y en utilisant les résultats des essais effectués au centre du plan:

$$S_0^2 = \sum_{k=1}^m (Y_{0k} - \bar{Y}_0)^2 / (m - 1)$$

où: Y_{0k} - la valeur de Y au centre du plan; $\bar{Y}_0$ - la valeur moyenne de Y au centre du plan et $m = 3$.

6-Calcul des coefficients des équations de régression :

$$b_i = \sum_{u=1}^N Y_u x_{iu} / N ; i = 0, 1, \dots, n;$$

$$b_{ij} = \sum_{u=1}^N Y_u x_{iu} x_{ju} / N ; i = 1, 2, \dots, n ; j > i, j \leq n$$

$$b_{ijl} = \sum_{u=1}^N Y_u x_{iu} x_{ju} x_{lu} / N ; i = 1, 2, \dots, n ; j > i, j \leq n ; l > j, l \leq n$$

7-Vérification de signification des coefficients des équations de régression par le critère de STUDENT [4,5]. Selon ce critère, le coefficient b est reconnu significatif s'il vérifie la relation:

$$|b| \geq \Delta b = t \sqrt{S^2 / N}$$

où Δb est l'intervalle de confiance du coefficient b et t est la valeur du critère de Student. En négligeant les coefficients non significatifs on a obtenu les équations de régression décrivant les processus dynamiques de l'entraînement étudié sous la forme :

$$Y_1 = t_{enc} = 7.89 - 0.85 x_1 - 0.92 x_3 + 0.73 x_4 + 1.58 x_1 x_2 + 0.82 x_2 x_3 - 0.46 x_3 x_4 - 0.61 x_1 x_2 x_3 + 0.38 x_1 x_2 x_4 \quad (8)$$

$$Y_2 = I_{d, \max} = 2.23 - 0.2 x_1 - 0.12 x_3 \quad (9)$$

$$Y_3 = t_{dec} = 3.26 - 0.00 x_1 + 0.72 x_2 - 0.38 x_3 - 0.41 x_1 x_2 + 0.33 x_1 x_3 \quad (10)$$

8.Vérification d'adéquation du modèle par le critère de Fischer [5]. Selon ce critère, le modèle est adéquat si la relation suivante est vérifiée :

$$F = S_{ad}^2 / S^2\{Y\} \leq F_T$$

où :

$$S_{ad}^2 = \sum_{u=1}^N (\bar{Y}_u - \hat{Y})^2 / (N - r)$$

$\hat{Y}$ - la valeur de la fonction objective calculée par les équations de régression;
 r - nombre de coefficients significatifs de la fonction de régression.
 F_T - valeur numérique du critère de Fischer.

Les résultats de vérification d'adéquation du modèle obtenu sont donnés dans le tableau 2. L'analyse des résultats montre que le polynôme Y_3 n'est pas adéquat. Ceci est dû à la dépendance forte et non linéaire entre t_{enc} et la f.e.m du moteur.

Pour vérifier le polynôme Y_3 on remplace la variable contrôlée $X_1 = E_a$ par une nouvelle variable indépendante $[1,6]$:

$$\lambda = (X_1)^\alpha$$

Effectuant un essai supplémentaire au centre du plan d'expérience on peut déterminer la valeur de l'exposant α et les nouvelles limites de variation de variable λ :

$$\lambda = (X_1)^{-0.2}$$

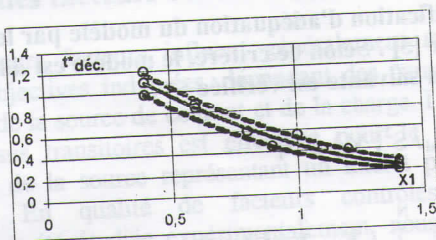
$$\lambda_{\min} = 1.9, \lambda_{\max} = 1.2, \lambda_{\text{moy}} = 1.55$$

Après cette transformation le polynôme $Y_3 = t_{\text{dec}}$ prendra la forme suivante :

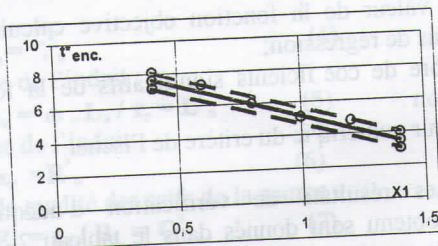
$$Y_3 = t_{\text{dec}} = 3.26 - 2.00 x_1 + 0.72 x_2 - 0.38 x_3 - 0.41 x_1 x_2 + 0.33 x_1 x_3 \quad (11)$$

$$\text{ou : } x_1 = (2X_1^{-0.2} - X_1^{-0.2}_{\max} - X_1^{-0.2}_{\min}) / (X_1^{-0.2}_{\max} - X_1^{-0.2}_{\min})$$

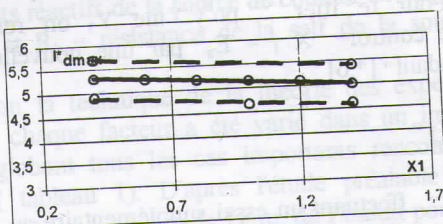
L'adéquation des polynômes a été confirmée par une série d'essais supplémentaires effectuée en dehors du plan de l'expérience. En utilisant le modèle obtenu et les résultats de l'expérience à un seul facteur on représente sur la fig. 4, les dépendances des indices dynamiques du système "SC-R- M" du facteur X_1 dans l'intervalle $0.4 < X_1 < 1.4$. Sur cette figure on montre également les limites de confiance des indices dynamiques.



a)



b)



c)

 Fig. 4 a, b, c: Dépendances $Y_i = f(X_i)$, $i = 1, 2, 3$

VIII. Conclusions

Pendant les régimes dynamiques les pics de courant dans la charge dépendent peu des paramètres du système. Ces pics varient dans les limites : $I^*_{d,\max} = 1.9 \div 2.3$. Ce résultat permet de déduire que le régime dynamique le plus difficile pour le système étudié représente aucun danger pour le moteur d'entraînement, car le courant admissible par la commutation de cette machine (I_{ad}) est supérieure au courant $I^*_{d,\max}$: $I^*_{ad} = (2 \div 2.5)$.

Les processus transitoires d'enclenchement et de déclenchement de l'entraînement étudié ont un caractère oscillatoire. Les temps de ces processus dépendent considérablement des paramètres du système. La plus grande influence sur t_{enc} et t_{dec} est due à la f.e.m. de la machine. Pour $E_a > 0.4$, ce facteur devient déterminant, alors que l'influence des autres facteurs est insignifiante.

La durée de la mise en service du système, dans ces conditions représente trois à sept périodes de la tension du réseau alors que celui de la mise hors service du système ne représente que 0.3 à 1.1 périodes de cette tension.

Pour les faibles valeurs de la f.e.m. ($X_1 < 0.4$), tous les quatre facteurs influent considérablement sur les temps d'enclenchement et de déclenchement. Cette influence est estimée quantitativement par le modèle obtenu.

L'influence des variables aléatoires, dont les principales sont les phases initiales des courants et des tensions en régimes transitoires, est importante. Cette influence est traduite par des larges intervalles de confiance pour une probabilité de confiance $P = 0.95$ et par un nombre réduit de coefficients significatifs des équations de régression.

Le modèle obtenu permet de trouver l'estimation approximative des processus transitoires dans les régimes proches du régime de court-circuit :

$$t_{\text{enc}} = 0.16 \div 0.18 \text{ sec}, t_{\text{dec}} = 0.08 \div 0.12 \text{ sec}.$$

Ces estimations permettent de faire la conclusion importante suivante :

Pour les variations lentes des signaux de commande ou des perturbations du système de l'ordre $0.2 \div 0.5$ sec, et pour des faibles variations de ces facteurs, la source de courant paramétrique peut être considérée comme élément sans inertie. Ces conditions sont obtenues dans ce type d'entraînement lors de réglage des paramètres par le circuit d'excitation.

Ces résultats permettent de considérer que pour tout réglage des paramètres du système de l'entraînement électrique type "SC-R-M" effectué par l'excitation et pour toute perturbation provenant de ce circuit, le courant d'induit reste constant.

Variables contrôlées	X_1 (E_a)	X_2 (L_a)	X_3 (R_a)	X_4 (Q)
niveau haut « + »	0.40;2.34	0.90	0.07	140
niveau de base 0 »	0.22 ;1.35	0.50	0.045	90
niveau bas « - »	0.04;0.4	0.10	0.02	40

Tableau 1 : Niveaux de variation des facteurs contrôlés

Fonction objective	Y_1	Y_2	Y_3
La somme s	3.63	0.12	0.43
Nombre de coefficients du polynôme r	9	3	6
Dispersion d'adéquation S_{ad}^2 pour f degrés de liberté	0.52 7	0.027 13	0.129 10
Dispersion des essais S^2 pour f degrés de liberté	0.25 5	0.025 32	0.035 32
Rapport des dispersion s : $F = S_{ad}^2 / S^2$	2.1	1.1	3.7
Valeur numérique du critère de Fischer F_T	5	2.1	2.3
Résultats	adéquat	adéquat	non adéquat

Tableau 2 : Estimation d'adéquation des équations de régression par le critère de Fischer

Références bibliographiques

- [1] ILINSKI F.,
Application of current source in electrical drives, " Conf. I. NElectr. Var. speed drives, London 1972
p.142-146.
- [2] TRAIAIA. A , SARATCH. B. M.,
Les entraînements électriques avec source de courant. Expérience d'exploitation et particularités des régimes ". 12èmes Journées Tunisiennes d'Electrotechnique et d'Automatique (JTEA), vol. 2, pp 110-115, 1992.

[3] ZURON Y.,ERLICKI.M.S. ,
DC motors at stabilized current supply, IEEE Trans.Power Appar. And Syst. vol. 95, N°3, pp. 988-993. 1976.

[4].IBOTINKO.B.A., ILINSKI N.F.,
Planification des expériences en Electro-technique, " Ed. Energia, Moscou, 1978.

[5] ILINSKI N. F.
Elément de théorie des expériences planifiées. Institut Energé -tiques de Moscou, 1988.

[6] GOURDIN .A. ,BOUMAH RAT. M.
Méthodes numériques appliquées," Office des Publications Universitaires, Alger 1991

*Institut d'électrotechnique . Université de ANNABA.

**Département d'Electrotechnique ENSET Oran