

(12)

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

(22) Date de dépôt : 10.11.14.

(30) Priorité :

(43) Date de mise à la disposition du public de la demande : 13.05.16 Bulletin 16/19.

(56) Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : Se reporter à la fin du présent fascicule

(60) Références à d'autres documents nationaux apparentés :

Demande(s) d'extension :

(71) Demandeur(s) : RENAULT S.A.S Société par actions simplifiée — FR.

(72) Inventeur(s) : KOTEICH MOHAMAD, MALOUM ABDELMALEK, DUC GILLES et SANDOU GUIL-LAUME.

(73) Titulaire(s) : RENAULT S.A.S Société par actions simplifiée.

(74) Mandataire(s) : CASALONGA & ASSOCIES.

(54) PROCEDE ET SYSTEME DE COMMANDE D'UNE MACHINE ELECTRIQUE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS.

(57) Procédé de commande d'une machine électrique synchrone à aimants permanents à pôles lisses pour véhicule automobile électrique ou hybride, comprenant des étapes au cours desquelles :

on mesure les courants et tensions au niveau des phases du rotor et du stator dans le repère triphasé,

on détermine les courants et tensions au niveau des phases du rotor et du stator dans le repère diphasé en fonction des mesures de courant et de tension dans le repère triphasé,

on détermine les courants et tensions au niveau des phases du rotor et du stator dans le repère de Park en fonction des mesures de courant et de tension dans le repère diphasé.

Le procédé comprend également des étapes au cours desquelles on détermine la position et la vitesse du rotor par rapport au stator par un observateur fonction des courants statoriques exprimés dans le repère diphasé et des tensions statoriques exprimés dans le repère de Park, et on règle l'observateur par un algorithme de Kalman en version étenue discrète.



**Procédé et système de commande d'une machine électrique
synchrone à aimants permanents.**

5 L'invention a pour domaine technique la commande de machines électriques et plus particulièrement la commande de machines électriques synchrones à aimants permanents.

10 La commande avancée des machines électriques triphasées nécessite une bonne connaissance de la position du rotor de la machine. Pour réaliser cela, un capteur de position, appelé résolveur, est branché sur l'arbre du moteur. La valeur de l'angle rotorique mesurée est envoyée au contrôleur qui pilote le moteur. Pour plusieurs raisons (coût, fiabilité, encombrement...), on cherche à éliminer les capteurs mécaniques, et à les remplacer par des capteurs logiciels (observateurs/estimateurs) qui estiment la position et la vitesse du moteur à partir des mesures électriques (courants et tensions). En effet, les capteurs électriques sont beaucoup moins chers et moins encombrants que les capteurs mécaniques. Comme ils sont indispensables pour plusieurs raisons (sûreté de fonctionnement, asservissement de la boucle de courant, etc.) au fonctionnement du moteur, on cherche à en utiliser la présence, pour remplacer les capteurs mécaniques par des capteurs logiciels (algorithmes) qui, à partir de mesure des courants, estiment avec haute précision la position et la vitesse du rotor.

15 Dans le présent document, on s'intéresse tout particulièrement au cas des machines synchrones triphasées à aimants permanents.

20 Un moteur synchrone à aimants permanents comprend un stator triphasé et un rotor à aimants permanents. Le stator triphasé (phases a, b et c) est construit de façon à générer un champ magnétique tournant.

25 Le rotor à aimants permanents cherche à s'aligner avec le champ magnétique tournant produit par le stator. Le rotor tourne à la même fréquence que les courants statoriques, c'est pourquoi on l'appelle machine « synchrone ».

5 Les inductances statoriques propres et mutuelles dépendent de la position θ du rotor non cylindrique (dit à « pôles saillants »). La commande de la machine se fait dans le repère de Park, qui est la transformée du repère statorique fixe par une transformation de rotation. Une telle transformation nécessite la connaissance de la valeur de l'angle rotorique θ . La matrice de transformation de Park qui transforme les grandeurs triphasées (tensions v_a , v_b , v_c et courants associés i_a , i_b , i_c) en grandeurs continues (tensions v_d , v_q , v_0 et courants i_d , i_q , i_0 sur le repère (d,q,0)) est :

$$10 \quad P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 1})$$

Le schéma équivalent du moteur dans le repère de Park est illustré par la figure 1.

15 Les techniques d'estimation utilisées, pour ce moteur, sont des techniques électroniques, basées sur l'injection des courants/tensions haute-fréquence dans les phases statoriques ou rotorique, ce qui nécessite des opérations supplémentaires (filtrage, démodulation, etc.).

20 Les techniques d'observation passive (basées sur la théorie d'observateur en automatique), moins complexes à implémenter du point de vue électronique, souffrent de la perte d'observabilité du moteur à basse vitesse et à vitesse nulle. Pour cette raison, il n'a pas été trouvé d'observateurs pour cette machine dans l'état de la technique antérieur.

25 Un problème à résoudre est de remplacer le capteur mécanique de position et de vitesse par un capteur logiciel.

Un autre problème à résoudre est de maintenir une observabilité à basse vitesse ou à vitesse nulle.

De l'état de la technique, on connaît les documents suivants.

5 Les documents US 2010/0237817 et US 2005/0151502 utilisent des observateurs réduits qui ne font pas intervenir la position ni la vitesse dans le vecteur d'état, la position est estimée en boucle ouverte par une fonction arctangente. Ces méthodes sont particulièrement sensibles au bruit de mesure de par l'utilisation de la fonction arctangente.

10 Le brevet US 2005/0007044 utilise un filtre de Kalman étendu dans le repère statorique pour l'estimation de la vitesse et la position (en boucle fermée avec correction), mais il souffre du problème de perte d'observabilité à vitesse nulle.

15 L'invention a pour objet un procédé de commande d'une machine électrique synchrone à aimants permanents à pôles lisses pour véhicule automobile électrique ou hybride commandé par une unité de commande électronique apte à émettre des consignes de tension, comprenant des étapes au cours desquelles :

on mesure les courants au niveau des phases du stator de la machine dans un repère triphasé fixe lié au stator, et on reçoit les consignes de tension dans un repère tournant lié au rotor,

20 on détermine les courants au niveau des phases du stator dans un repère diphasé fixe lié au stator en fonction des mesures de courant dans le repère triphasé,

25 Le procédé comprend également des étapes au cours desquelles on détermine la position et la vitesse du rotor par rapport au stator par un observateur fonction des courants statoriques exprimés dans le repère diphasé lié au stator et des tensions statoriques exprimées dans le repère de Park, et

on règle l'observateur par un algorithme de Kalman en version étendue discrète.

30 Le réglage de l'observateur par un algorithme de Kalman en version étendue discrète peut comprendre les étapes suivantes :

au cours d'une phase de prédiction, on détermine l'état du système et la matrice de covariance de l'erreur associée à l'itération suivante estimés à l'itération en cours, en fonction de la matrice de covariance de l'incertitude du système à l'itération en cours, de la

matrice de covariance de l'erreur sur l'état à l'itération en cours, de l'état estimé à l'itération en cours et du système linéarisé à l'itération en cours,

5 on détermine le gain de l'observateur à l'itération en cours en fonction de la matrice de covariance de l'erreur sur l'état à l'itération suivante estimée à l'itération en cours, de la matrice de covariance de bruit de mesures à l'itération en cours et du système linéarisé à l'itération en cours, et

10 On met à jour l'état du système à l'itération suivante en fonction des dernières mesures déterminées, des estimations grandeurs estimées correspondantes, du gain de l'observateur à l'itération en cours, et de l'état à l'itération suivante estimé à l'itération en cours.

15 On peut augmenter la dynamique de l'observateur en augmentant les valeurs de la matrice de covariance de bruit du système.

On peut augmenter la précision de l'observateur en dépit de la rapidité, en augmentant les valeurs de la matrice de covariance de bruit de mesures.

20 L'invention a également pour objet un système de commande d'une machine électrique synchrone à aimants permanents à pôles lisses pour véhicule automobile électrique ou hybride, comprenant un moyen d'estimation de la position du rotor de la machine électrique, apte à appliquer les étapes de procédé décrites ci-dessus.

25 Le procédé de commande présente l'avantage d'un coût réduit du fait de l'absence de capteurs mécaniques, ou de pouvoir fonctionner en parallèle avec un capteur mécanique moins cher et moins précis que ceux généralement utilisés. Ceci augmente la fiabilité de la commande et en réduit également le coût.

30 Le procédé de commande présente également l'avantage d'une estimation de la position à vitesse nulle sans besoin d'injection de courants haute-fréquence.

Le procédé de commande repose sur des équations plus faciles à implémenter par rapport à des équations exprimées dans un repère lié au stator.

D'autres buts, caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description suivante, donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif et faite en référence aux dessins annexés sur lesquels :

5 - la figure 1 illustre les principaux éléments d'une machine électrique synchrone à rotor à aimants permanents dans le repère de Park, et

- la figure 2 illustre les principales étapes du procédé de commande selon l'invention, et

10 -la figure 3 illustre les principaux éléments d'un système de commande selon l'invention.

Pour résoudre les problèmes techniques posés en introduction, on se base sur le modèle de la machine, et sur la théorie d'observateur.

15 On rappelle que la théorie d'observateur comprend les notions d'observabilité et d'observateur d'état.

20 Avant d'entamer une procédure de conception d'observateur pour un système dynamique, il est important et nécessaire de s'assurer que l'état de ce dernier peut être estimé à partir des informations sur l'entrée et la sortie. L'observabilité d'un système est la propriété qui permet de dire si l'état peut être déterminé uniquement à partir de la connaissance des signaux d'entrée et de sortie.

25 A la différence des systèmes linéaires, l'observabilité des systèmes non linéaires (comme la machine synchrone à aimants permanents) est intrinsèquement liée aux entrées et aux conditions initiales. Lorsqu'un système non linéaire est observable, il se peut qu'il possède des entrées qui le rendent inobservable (entrées singulières) et annihilent toute stratégie d'observation.

30 En automatique et en théorie de l'information, un observateur d'état est une extension d'un modèle représenté sous forme de représentation d'état. Lorsque l'état d'un système n'est pas mesurable, on conçoit un observateur qui permet de reconstruire l'état à partir d'un modèle du système dynamique et des mesures d'autres grandeurs.

Plusieurs observateurs d'état peuvent être utilisés pour la commande des moteurs électriques sans capteur mécanique, parmi

lesquels on cite le filtre de Kalman qui est utilisé dans une large gamme de domaines technologiques.

Le modèle de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère de Park (d,q) lié au rotor est moins complexe que celui dans un repère diphasé (α, β) fixe lié au stator. Il est donc plus facile à interpréter.

La machine électrique peut être modélisée dans le repère diphasé ($\alpha, \beta, 0$) en réalisant les projections des grandeurs du repère triphasé (a,b,c) sur un repère diphasé lié au stator. La matrice de transformation correspondant à une telle projection est la suivante. On note que les composantes homopolaires ne sont pas prises en compte.

$$C_{32} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 2})$$

La machine électrique peut être modélisée dans un repère de Park (d,q,0) en réalisant les projections des grandeurs du repère diphasé ($\alpha, \beta, 0$) sur un repère diphasé tournant avec le rotor. La matrice de rotation correspondant à une telle projection est la suivante.

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3})$$

Les équations électromagnétiques du système dans ce repère peuvent être écrites de la façon suivante :

$$\begin{aligned} v_d &= R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q \\ v_q &= R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d \end{aligned} \quad (\text{Eq. 4})$$

Avec :

v_d : la tension appliquée à la phase statorique sur l'axe d (correspondant à la tension aux bornes d'un enroulement diphasé équivalent aux enroulements triphasés, sur l'axe d)

v_q : la tension appliquée à la phase statorique sur l'axe q

i_d : le courant circulant dans la phase statorique d

i_q : le courant circulant dans la phase statorique q

ψ_d : le flux électromagnétique dans la phase statorique d

ψ_q : le flux électromagnétique dans la phase statorique q

R_s : la résistance d'une phase statorique

5

$\omega = p^* \Omega$

p : le nombre de pôles de la machine

Ω : la vitesse de rotation du rotor

Les flux sont déterminés par les équations suivantes :

10

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_f \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\psi_q = L_q i_q$$

Avec :

L_d et L_q : les inductances des phases d et q.

15

ψ_f : le flux rotorique.

Les équations mécaniques de la machine sont les suivantes :

$$J \frac{d\omega}{dt} = pC_m - pC_r - f_v \omega \quad (\text{Eq. 6})$$

20

Avec

J : l'inertie du rotor avec la charge

p : le nombre de paires de pôles rotoriques

C_m et C_r : les couples moteur et résistant

f_v : le coefficient de frottement visqueux

25

Le couple moteur est exprimé par l'équation suivante :

$$C_m = \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (\text{Eq. 7})$$

30

L'observateur décrit ci-dessous se base sur les équations de la machine dans le repère tournant de Park (d,q). Il est connu que pour disposer des mesures de courants dans ce repère, on doit réaliser une

transformation de rotation des mesures de courants dans le repère triphasé ou diphasé. La matrice de rotation Eq. 3 montre une telle transformation entre le repère diphasé et le repère de Park. On peut noter que cette transformation est dépendante de la position du rotor θ .

5 Il est alors nécessaire de connaître la position du rotor θ pour réaliser cette transformation. Toutefois, la position du rotor θ n'est pas connue et est l'objet de l'estimation par observateur. Pour cette raison, la dépendance de la position va intervenir dans les équations de la sortie dans notre modèle. L'étude l'observabilité montre que la machine est

10 observable même à vitesse nulle, ce qui n'est pas toujours le cas dans l'approche classique, où l'observateur se base sur les équations de la machine dans le repère diphasé lié au stator (α, β).

15 Les entrées du système sont les tensions dans le repère de Park (d, q), notées (v_d et v_q). Ces tensions sont connues puisqu'elles sont calculées au niveau de la commande et envoyées au moteur.

On modélise la machine électrique dans le repère de Park (d, q) sous la forme suivante :

$$20 \quad \dot{x} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{cases} \frac{1}{L_d} (v_d - R_s i_d + L_q i_q \omega) \\ \frac{1}{L_q} (v_q - R_s i_q - (L_d i_d + \psi_f) \omega) \\ \frac{1}{J} (-f_v \omega + \frac{3}{2} p^2 (L_\Delta i_d + \psi_f) i_q - p C_r) \end{cases} \quad (\text{Eq. 8})$$

avec

$$L_\Delta = L_d - L_q$$

25 Le système d'équations Eq. 8 modélisant la machine électrique peut être reformulé sous la forme générale des systèmes non linéaires :

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= f(x, u) \\ y &= h(x)\end{aligned}\quad (\text{Eq. 9})$$

Avec :

$$x = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix}, \text{ et} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$5 \quad u = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 11})$$

Les mesures employées par l'observateur sont les courants dans le repère statorique fixe (a,b,0), qui sont fonctions des courants dans le repère (d,q,0) et de la position θ :

$$y = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = h(x) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 12})$$

10 Pour le système modélisé par les équations Eq. 9 à Eq. 12, on peut formaliser un observateur par l'équation suivante :

$$\frac{d}{dt} \hat{x} = f(\hat{x}, u) + K(y - h(\hat{x})) \quad (\text{Eq. 13})$$

Avec

15 \hat{x} : le vecteur des valeurs observées correspondant au vecteur x défini par l'équation Eq. 10

K : Gain de l'observateur

20 Le gain K, qui multiplie le terme d'erreur, permet de régler l'observateur. Ce gain est calculé par l'algorithme de Kalman (version étendue discrète)

Afin de permettre la résolution numérique du système, il est

$$A_k = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{\hat{x}_{k-1}, u_k} \quad (\text{Eq. 14})$$

linéarisé de la façon suivante.

$$H_k = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{\hat{x}_{k-1}} = \begin{bmatrix} \cos\theta_k & -\sin\theta_k & 0 & -i_{dk} \sin\theta_k & -i_{qk} \cos\theta_k \\ \sin\theta_k & \cos\theta_k & 0 & i_{dk} \cos\theta_k & -i_{qk} \sin\theta_k \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 15})$$

On calcule ainsi la forme analytique des matrices A_k et H_k qui sont, respectivement, les jacobbiennes des fonctions f et h de l'équation Eq. 14 par rapport au vecteur x . Ces matrices sont très complexes de sorte qu'elles ne peuvent être écrites ici. Elles sont déterminées par calcul symbolique et transcris directement dans le procédé. Le procédé débute alors que les courants et tensions de la machine électrique ont été mesurés dans le repère triphasé et convertis dans le repère diphasé par application de la matrice Eq. 2, ainsi que dans le repère de Park par application de la matrice Eq. 3.

Au cours d'une première étape 1, on détermine les valeurs des matrices A_k et H_k en fonction des valeurs d'état (courants, vitesse, position) de l'itération précédente et des mesures des tensions par application des équations Eq. 14 et Eq. 15. Lors de la première itération, les valeurs d'état (courants, vitesse, position) de l'itération précédente sont remplacées par les valeurs d'initialisation correspondantes.

Au cours d'une deuxième étape 2, on réalise une phase de prédiction au cours de laquelle on détermine l'état du système à l'itération suivante en fonction des données disponibles à l'itération en cours. Les équations suivantes permettent de réaliser cette phase de prédiction :

$$\begin{aligned} x_{k+1/k} &= x_k + T_s f(x_k, u_k) \\ P_{k+1/k} &= P_k + T_s (A_k P_k + P_k A_k^T) + Q_k \end{aligned} \quad (\text{Eq. 16})$$

Avec

T_s : la période d'échantillonnage

k : le numéro d'itération

P_k : matrice de covariance de l'erreur sur l'état à l'itération k estimée à l'itération k

$P_{k+1/k}$: matrice de covariance de l'erreur sur l'état à l'itération $k+1$ estimée à l'itération k

Q_k : matrice de covariance d'incertitudes du système à l'itération k .

5 La matrice de covariance des incertitudes du système Q_k rend compte des incertitudes dans la définition du système, dues par exemple à la méconnaissance du système, à l'approximation de la modélisation du système, ou à l'incertitude sur les valeurs employées dans la modélisation.

En d'autres termes, au cours de cette étape, on détermine l'état x du système à l'itération $k+1$ estimé à l'itération k en fonction notamment de l'état du système à l'itération k estimé à l'itération k .

10 Au cours d'une troisième étape 3, on calcule le gain de l'observateur :

$$K_k = P_{k+1/k} H_k^T (H_k P_{k+1/k} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (\text{Eq. 17})$$

Avec

R_k : matrice de covariance de bruits de mesures à l'itération k .

15 Enfin, au cours d'une quatrième étape 4, on réalise une phase de mise à jour à posteriori au cours de laquelle on met à jour l'état du système à l'itération $k+1$ estimé à l'itération $k+1$ grâce à l'information des dernières mesures y et des grandeurs estimées correspondantes $h(x)$ en fonction de l'état du système à l'itération $k+1$ déterminé à l'itération k . La fonction $h(x)$ dépend directement de la modélisation du système (cf Eq. 9). Le système d'équations suivant rend compte de cette phase de mise à jour.

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k+1/k+1} &= \hat{x}_{k+1/k} + K_k (y - h(\hat{x}_{k+1/k})) \\ P_{k+1/k+1} &= P_{k+1/k} - K_k H_k P_{k+1/k} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 18})$$

25 Les valeurs de position et de vitesse ainsi déterminées sont transformées pour participer à la régulation en boucle fermée de la machine et sont réutilisées lors de l'itération suivante de l'observateur.

30 Les étapes du procédé décrites ci-dessus sont répétées afin de disposer de valeurs de position et de vitesse régulièrement mises à jour.

Le réglage du filtre se fait par le choix des matrices Q_k et R_k qui sont souvent prises constantes. Ce choix dépend du système à observer, des paramètres du moteur et de l'environnement dans lequel

fonctionne le moteur (bruits de mesure). Il n'existe pas une méthode systématique, mais les règles générales sont les suivantes.

5 Si on augmente les valeurs de la matrice Q_k , on donne moins de confiance aux mesures, et la dynamique de l'observateur devient plus rapide.

Si on augmente les valeurs de la matrice R_k , on donne plus de confiance aux mesures, ce qui augmente la précision en dépit de la rapidité.

10 En règle générale, les matrices Q_k et R_k sont susceptibles de voir leurs valeurs modifiées d'une itération k à la suivante. Toutefois, la présente application ne requiert pas une telle modification. Par conséquent, les matrices Q_k et R_k sont maintenues constantes.

Les matrices suivantes sont employées dans le cas présent :

$$Q_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 19})$$

15

$$R_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 20})$$

Comme cela a été expliqué en introduction, l'estimation de l'état du système par observateur ne peut généralement être employée à vitesse faible ou nulle.

20 L'étude d'observabilité de la machine à vitesse nulle fournit la condition d'observabilité suivante.

Le déterminant de la matrice d'observabilité doit être non nul. Le calcul du déterminant est une tâche difficile à cause de la complexité des équations. Le déterminant est :

25

$$\Delta|_{\omega=0} = -\frac{1}{L_q L_d} [L_\Delta i_q (R_s i_d + L_q \frac{di_d}{dt}) + (L_\Delta i_d + \Psi_f) (R_s i_q + L_d \frac{di_d}{dt})] \quad (\text{Eq. 21})$$

Avec :

$$L_\Delta = L_d - L_q \quad (\text{Eq. 22})$$

A vitesse nulle ($\theta = \text{constante}$), et à courants i_d , i_q et i_f constants, le déterminant de la matrice d'observabilité est non nul. L'observateur permet ainsi de déterminer la position du rotor même à vitesse faible ou nulle.

5 En conclusion, si on combine le modèle de la machine dans le repère tournant de Park (d,q), avec les mesures dans le repère lié au stator (α, β) converties ensuite dans le repère de Park, on obtient un système observable même à vitesse nulle. Les équations de l'observateur dans ce cas sont plus simples à écrire que celles dans le 10 repère statorique. De plus, il n'est pas nécessaire d'injecter un courant haute fréquence dans la machine.

15 L'application de cet observateur à une machine synchrone à aimants permanents à pôles lisses permet de disposer d'une observabilité de la machine à vitesse nulle. On rappelle que pour une machine synchrone à aimants permanents à pôles lisses, on a $L_d = L_q = L$.

Le déterminant de la matrice d'observabilité est alors :

$$\Delta|_{\omega=0} = -\frac{\Psi_f}{L^2} \left[(R_s i_q + L \frac{di_d}{dt}) \right] \quad (\text{Eq. 23})$$

20 Ce déterminant n'est pas dépendant de la position ou de la vitesse du rotor.

Par contre, dans le repère statorique ($\alpha, \beta, 0$), la machine synchrone à aimants permanents à pôles lisses n'est pas observable. En effet, le déterminant de la matrice d'observabilité est directement proportionnel à la vitesse :

$$25 \quad \Delta = \frac{\Psi_f^2}{L^2} \omega \quad (\text{Eq. 24})$$

Il apparaît ainsi que l'observateur proposé dans ce document permet de résoudre les problèmes d'observabilité à vitesse nulle qui apparaissent dans les observateurs liés au repère statorique divulgués dans l'état de l'art antérieur.

30 La figure 3 illustre les principaux éléments d'un système de commande d'une machine électrique comprenant un modèle d'observateur tel que décrit ci-dessus.

Sur la figure 3, on peut voir un premier sommateur 4 recevant une consigne de courant statorique direct i_d^* et connecté en sortie à un premier moyen de calcul 5 proportionnel intégral apte à déterminer la tension statorique direct v_d correspondante.

5 De manière similaire, on peut voir un deuxième sommateur 6 recevant une consigne de courant statorique en quadrature i_q^* et connecté en sortie à un deuxième moyen de calcul 7 proportionnel intégral apte à déterminer la tension statorique en quadrature v_q correspondante.

10 La sortie du premier moyen de calcul 5 et la sortie du deuxième moyen de calcul 7 sont reliées à un troisième moyen de calcul 8 apte à déterminer les tensions statoriques dans le repère triphasé v_a , v_b , v_c . Les tensions statoriques déterminées sont envoyées sous forme de consignes à un inverseur 9 alimentant la machine électrique 10 à aimant permanents. L'inverseur 9 alimente le stator de la machine électrique 10 avec des courants triphasés i_a , i_b , i_c fonction des consignes de tension triphasées v_a , v_b , v_c .

20 En parallèle, un cinquième moyen de calcul 11 reçoit en entrée une mesure des courants i_a et i_b alimentant la machine électrique dans le repère triphasé et détermine des mesures de courant i_α , i_β correspondantes dans le repère de Clark diphasé. Il est à noter que la transformation de Clark implique la connaissance des trois courants triphasés, i_a , i_b et i_c . Toutefois, les courants alimentant la machine électrique étant équilibrés le courant i_c a une valeur connue fonction de i_a et de i_b . Il n'est donc pas nécessaire de le déterminer à nouveau.

25 Un sixième moyen de calcul 12 reçoit les valeurs des courants dans le repère diphasé ainsi que l'estimation de la position θ_e du rotor d'un moyen de détermination 13 de la position du rotor. Le sixième moyen de calcul 12 détermine et émet les valeurs des courants i_d et i_q dans le repère de Park à destination respectivement du premier sommateur 4 et du deuxième sommateur 6.

Le moyen de détermination 13 applique le modèle d'observateur décrit dans les équations Eq. 8, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19 et 20 aux valeurs des tensions v_d et v_q dans le repère de Park et aux

valeurs de courant i_α , i_β dans le repère de Clark diphasé afin de déterminer la valeur de la position θ_e du rotor à destination du troisième moyen de calcul 8 et du sixième moyen de calcul 12.

Il apparaît clairement que la première itération de commande 5 est réalisée en boucle ouverte, les valeurs des courants i_a et i_b ainsi que les valeurs des tensions i_d et i_q dans le repère de Park et la valeur estimée θ_e de la position du rotor n'étant pas disponibles. Après la première itération, ces valeurs sont disponibles de sorte qu'elles peuvent être prises en compte directement ou indirectement au niveau 10 des sommateurs 4 et 6 ainsi qu'au niveau des moyens de calcul 8, 11, 12 et 13.

REVENDICATIONS

1. Procédé de commande d'une machine électrique synchrone à aimants permanents à pôles lisses pour véhicule automobile électrique ou hybride commandé par une unité de commande électronique apte à émettre des consignes de tension, comprenant des étapes au cours desquelles :

on mesure les courants au niveau des phases du stator de la machine dans un repère triphasé fixe lié au stator, et on reçoit les consignes de tension dans un repère tournant lié au rotor,

10 on détermine les courants au niveau des phases du stator dans un repère diphasé fixe lié au stator en fonction des mesures de courant dans le repère triphasé,

15 caractérisé par le fait qu'il comprend des étapes au cours desquelles on détermine la position et la vitesse du rotor par rapport au stator par un observateur fonction des courants statoriques exprimés dans le repère diphasé lié au stator et des tensions statoriques exprimées dans le repère de Park, et

on règle l'observateur par un algorithme de Kalman en version étendue discrète.

20 2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel le réglage de l'observateur par un algorithme de Kalman en version étendue discrète comprend les étapes suivantes :

25 au cours d'une phase de prédiction, on détermine l'état du système et la matrice de covariance de l'erreur associée à l'itération suivante estimés à l'itération en cours, en fonction de la matrice de covariance de l'incertitude du système à l'itération en cours, de la matrice de covariance de l'erreur sur l'état à l'itération en cours, de l'état estimé à l'itération en cours et du système linéarisé à l'itération en cours,

30 on détermine le gain de l'observateur à l'itération en cours en fonction de la matrice de covariance de l'erreur sur l'état à l'itération suivante estimée à l'itération en cours, de la matrice de covariance de

bruit de mesures à l'itération en cours et du système linéarisé à l'itération en cours, et

5 on met à jour l'état du système à l'itération suivante en fonction des dernières mesures déterminées, de grandeurs estimées correspondantes, du gain de l'observateur à l'itération en cours, et de l'état à l'itération suivante estimé à l'itération en cours.

3. Procédé selon la revendication 2, dans lequel on augmente la dynamique de l'observateur en augmentant les valeurs de la matrice de covariance de bruit du système.

10 4. Procédé selon la revendication 2, dans lequel on augmente la précision de l'observateur en dépit de la rapidité, en augmentant les valeurs de la matrice de covariance de bruit de mesures.

15 5. Système de commande d'une machine électrique synchrone à aimants permanents à pôles lisses pour véhicule automobile électrique ou hybride, caractérisé par le fait qu'il comprend un moyen d'estimation (13) de la position du rotor de la machine électrique, apte à appliquer les étapes de procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4.

1/2
FIG.1

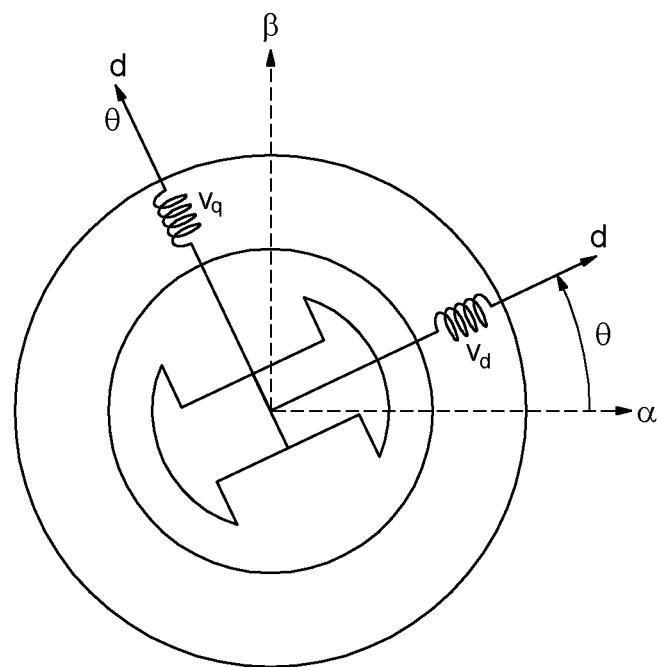
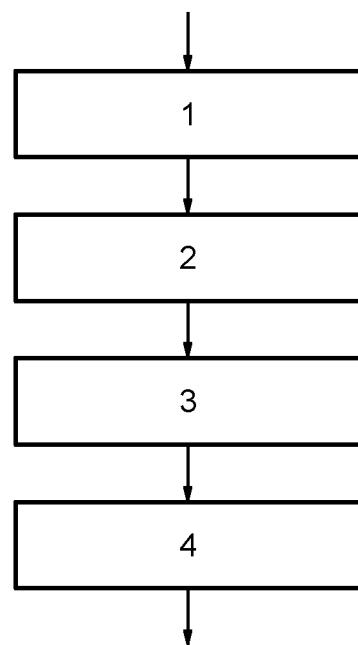
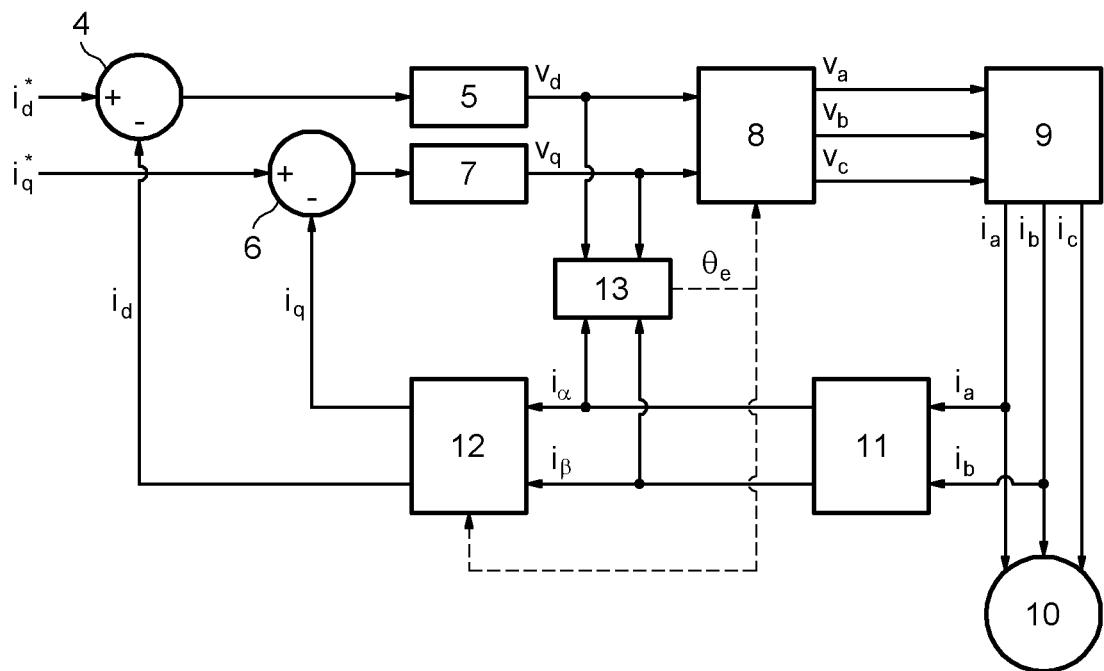


FIG.2



2/2
FIG.3

**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

 établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche
N° d'enregistrement
nationalFA 803673
FR 1460836

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI		
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes				
X	DE 41 15 338 A1 (BOSCH GMBH ROBERT [DE]) 12 novembre 1992 (1992-11-12) * page 7 - page 11; revendication 1; figure 1 * -----	1-5	H02P21/13 H02P21/14 H02P21/04 H02P6/18		
A	DE 10 2009 001331 A1 (BOSCH GMBH ROBERT [DE]) 9 septembre 2010 (2010-09-09) * le document en entier * -----	1-5			
A	EP 1 885 054 A1 (ST MICROELECTRONICS SRL [IT]) 6 février 2008 (2008-02-06) * page 1 - page 8 * -----	1-5			
A	BOLOGNANI S ET AL: "PARAMETER SENSITIVITY OF THE KALMAN FILTER APPLIED TO A SENSORLESS SYNCHRONOUS MOTOR DRIVE", EPE '95: 6TH. EUROPEAN CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND APPLICATIONS. SEVILLA, SEPT. 19 - 21, 1995; [EUROPEAN CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND APPLICATIONS], BRUSSELS, EPE ASSOCIATION, B, vol. 3, 19 septembre 1995 (1995-09-19), pages 3.375-3.380, XP000538340, * le document en entier * -----	1-5	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)		
A,D	US 2010/237817 A1 (LIU JINGBO [US] ET AL) 23 septembre 2010 (2010-09-23) * le document en entier * -----	1-5	H02P		
A,D	US 2005/151502 A1 (QUIRION JEAN [CA]) 14 juillet 2005 (2005-07-14) * le document en entier * -----	1-5			
A,D	US 2005/007044 A1 (QIU MING [CA] ET AL) 13 janvier 2005 (2005-01-13) * le document en entier * -----	1-5			
1					
Date d'achèvement de la recherche		Examinateur			
28 juillet 2015		Closa, Daniel			
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS					
X : particulièrement pertinent à lui seul					
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie					
A : arrière-plan technologique					
O : divulgation non-écrite					
P : document intercalaire					
T : théorie ou principe à la base de l'invention					
E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.					
D : cité dans la demande					
L : cité pour d'autres raisons					
& : membre de la même famille, document correspondant					

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1460836 FA 803673

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **28-07-2015**
 Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
DE 4115338	A1	12-11-1992	AUCUN	
DE 102009001331	A1	09-09-2010	CN 102342016 A DE 102009001331 A1 EP 2404376 A1 JP 5490151 B2 JP 2012519464 A US 2012059642 A1 WO 2010099989 A1	01-02-2012 09-09-2010 11-01-2012 14-05-2014 23-08-2012 08-03-2012 10-09-2010
EP 1885054	A1	06-02-2008	EP 1885054 A1 US 2009033259 A1	06-02-2008 05-02-2009
US 2010237817	A1	23-09-2010	US 2010237817 A1 US 2012268050 A1	23-09-2010 25-10-2012
US 2005151502	A1	14-07-2005	CN 1918780 A EP 1714378 A2 JP 2007518390 A US 2005151502 A1 WO 2005067552 A2	21-02-2007 25-10-2006 05-07-2007 14-07-2005 28-07-2005
US 2005007044	A1	13-01-2005	EP 1645032 A1 JP 2007531478 A US 2005007044 A1 WO 2005008890 A1	12-04-2006 01-11-2007 13-01-2005 27-01-2005