

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

①1 N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

3 006 125

②1 N° d'enregistrement national : 13 54519

⑤1 Int Cl⁸ : H 02 K 11/00 (2013.01)

⑫ DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 21.05.13.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 28.11.14 Bulletin 14/48.

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) : IFP ENERGIES NOUVELLES — FR.

⑦2 Inventeur(s) : DIB WISSAM et HENWOOD NICO-
LAS.

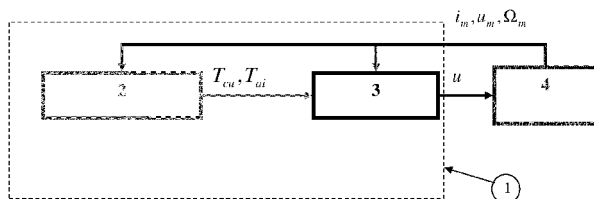
⑦3 Titulaire(s) : IFP ENERGIES NOUVELLES.

⑦4 Mandataire(s) : IFP ENERGIES NOUVELLES.

⑤4 PROCÉDE ET SYSTEME DE DETERMINATION DE TEMPERATURES INTERNES D'UNE MACHINE
ELECTRIQUE SYNCHROME AU MOYENS D'OBSERVATEURS D'ETAT.

⑤7 L'invention concerne un procédé de détermination des
températures (2) internes (températures des bobines et de
l'aimant) d'une machine électrique synchrone (4) au moyen
d'observateurs d'état de la résistance des bobines et du flux
magnétique de l'aimant.

L'invention concerne par ailleurs un procédé de dia-
gnostic, un procédé et un système de commande (3) d'une
machine électrique synchrone à partir des températures in-
ternes déterminées.



FR 3 006 125 - A1



La présente invention concerne le domaine du contrôle et du diagnostic des machines électriques synchrones, notamment pour véhicules automobiles.

Une machine synchrone se compose d'une partie tournante, le rotor, et d'une partie fixe, le stator. Le rotor peut se composer d'aimants permanents ou être constitué d'un bobinage alimenté en courant continu et d'un circuit magnétique, on parle alors d'électro-aimant. Le stator comprend trois phases, sur chacune desquelles est connectée au moins une bobine (appelés aussi enroulements), ces trois bobines sont alimentées en courant et tension. On utilise une force extérieure pour faire tourner le rotor : un champ magnétique induit par un courant électrique alternatif dans des bobines (enroulements) du stator engendre une rotation du rotor. La vitesse de ce champ tournant est appelée « vitesse de synchronisme ».

Pour commander et diagnostiquer de telles machines électriques, il peut être important de connaître les températures internes de la machine électrique. En effet, l'information de la température peut être utilisée par un moyen classique de contrôle vectoriel du couple de la machine. Ainsi, on peut prendre en compte les variations du comportement de la machine électrique lors de l'élévation de la température : par exemple, l'intensité du flux de l'aimant et la résistance des bobines ne sont pas constantes et varient en fonction de la température. On parle de contrôle vectoriel car pour que la machine produise le couple requis par l'application, il faut maintenir les courants électriques y circulant en phase et synchronisés avec la position du rotor. Pour y parvenir, les moyens contrôle de la machine électrique appliquent des tensions aux bornes du moteur, ces tensions étant fournies par un algorithme de contrôle en couple.

Les températures internes à la machine électrique correspondent à la température des bobines et celle de l'aimant (ou de l'électro-aimant) intégré dans le rotor. De plus, on peut également utiliser pour la commande et le diagnostic la température de la carcasse de la machine électrique. On appelle carcasse, les matériaux ferromagnétiques du stator servant de support et incluant les bobines.

Pour déterminer ces températures, on peut utiliser des capteurs de température au sein de la machine électrique. Toutefois, on ne peut pas placer de tels capteurs sur le rotor tournant, on ne peut donc pas connaître la température de l'aimant. De plus, les capteurs permettent uniquement une mesure de la température en surface des bobines ou de la carcasse mais pas la mesure de la température au sein des matériaux. Par ailleurs, une telle instrumentation présente d'autres inconvénients tels qu'une imprécision des mesures, la présence d'un bruit de mesure, un risque de défaillance des capteurs, un coût élevé...

Par ailleurs, des algorithmes ont été développés pour déterminer les températures internes à partir de mesures réalisées sur la machine électrique. Les algorithmes de l'état de l'art reconstruisent soit la température des aimants soit la température du bobinage

séparément en les estimant à partir des mesures électriques des grandeurs physiques qui varient avec ces températures. Quoiqu'il en soit, ils peuvent être classés en deux grandes catégories :

- 5 • ceux basés sur l'injection de signaux particuliers, qui nécessitent d'appliquer des tensions particulières aux bornes du moteur pour pouvoir extraire les paramètres physiques du moteur liés à sa température interne,
- ceux ne nécessitant aucun signal particulier en entrée du moteur, qui ne se basent que sur une description mathématique de son comportement (estimateur temps réel ou observateur).

10 De plus, ces solutions ne sont utilisées uniquement pour la surveillance de la machine électrique mais pas pour son contrôle.

Par conséquent, aucune solution matérielle ou algorithmique ne permet de déterminer simultanément et précisément les températures des bobines et de l'aimant.

15 Pour pallier ces problèmes, l'invention concerne un procédé de détermination des températures internes (températures des bobines et de l'aimant) au moyen d'observateurs d'état de la résistance des bobines et du flux magnétique de l'aimant. Ainsi, on peut déterminer de manière précise la température de tous les composants de la machine électrique. L'invention concerne par ailleurs un procédé de diagnostic, un procédé et un système de commande d'une machine électrique à partir des températures internes

20 déterminées.

Le procédé selon l'invention

L'invention concerne un procédé de détermination de températures internes d'une machine électrique synchrone, ladite machine électrique synchrone comprenant un stator

25 constitué de trois phases sur chacune desquelles est connectée au moins une bobine, et un rotor comprenant au moins un aimant, le champ électromagnétique desdites bobines engendrant la rotation dudit rotor, procédé dans lequel on mesure la vitesse Ω_m dudit rotor ainsi que les tensions et les courants u_m et i_m desdites phases. Pour ce procédé, on réalise les étapes suivantes :

- 30 a) on estime une résistance \hat{R} desdites bobines à l'aide d'un observateur d'état \hat{R} de la résistance des bobines à partir desdites mesures, ladite résistance étant dépendante de la température desdites bobines T_{cu} ;

- b) on estime une intensité du flux magnétique $\hat{\phi}$ dudit aimant à l'aide d'un observateur d'état $\hat{\phi}$ de l'intensité du flux magnétique de l'aimant à partir desdites mesures, ladite intensité du flux magnétique étant dépendante de la température de l'aimant T_{ai} ;
- c) on détermine une température T_{cu} desdites bobines au moyen de ladite estimation de la résistance \hat{R} des bobines ; et
- d) on détermine une température T_{ai} dudit aimant au moyen de ladite estimation de l'intensité du flux magnétique $\hat{\phi}$ de l'aimant.

Selon l'invention, on estime ladite résistance \hat{R} des bobines en mettant en œuvre les étapes suivantes :

- 10 i) on détermine les tensions $u_{d,q}$ et les courants $i_{d,q}$ dans le repère de Park par une transformation des tensions u_m et des courants i_m mesurés ;

- ii) on estime le courant \hat{i}_d et le courant \hat{i}_q au moyen des équations du type :

$$L_d \dot{\hat{i}}_d = -\hat{R}(T_{cu}) \hat{i}_d + p \Omega_m L_q \hat{i}_q + u_d - k_d (i_d - \hat{i}_d)$$

$$L_q \dot{\hat{i}}_q = -\hat{R}(T_{cu}) \hat{i}_q - p \Omega_m (L_d \hat{i}_d + \hat{\phi}(T_{ai})) + u_q - k_p (i_q - \hat{i}_q) ; \text{ et}$$

- 15 iii) on estime ladite résistance R des bobines au moyen desdites mesures et desdits courants \hat{i}_d et \hat{i}_q estimés par un observateur d'état de la forme :

$$\dot{\hat{R}}(T_{cu}) = k_r \left(i_d \frac{(i_d - \hat{i}_d)}{L_d} + i_q \frac{(i_q - \hat{i}_q)}{L_q} \right)$$

avec : L_d : inductance directe de ladite machine électrique,

L_q : inductance en quadrature de ladite machine électrique,

20 k_d, k_r, k_p, k_ϕ : variables de calibration,

p : nombre de paires de pôles de la machine électrique.

Selon l'invention, on estime ladite intensité du flux magnétique $\hat{\phi}$ de l'aimant en mettant en œuvre les étapes suivantes :

- i) on détermine les tensions $u_{d,q}$ et les courants $i_{d,q}$ dans le repère de Park par une transformation des tensions u_m et des courants i_m mesurés ;
- 25

ii) on estime le courant \hat{i}_d et le courant \hat{i}_q au moyen des équations du type :

$$L_d \dot{\hat{i}}_d = -\hat{R}(T_{cu})\hat{i}_d + p\Omega_m L_q \hat{i}_q + u_d - k_d (i_d - \hat{i}_d)$$

$$L_q \dot{\hat{i}}_q = -\hat{R}(T_{cu})\hat{i}_q - p\Omega_m (L_d \hat{i}_d + \hat{\phi}(T_{ai})) + u_q - k_p (i_q - \hat{i}_q) ; \text{ et}$$

iii) on estime ladite intensité du flux magnétique $\hat{\phi}$ de l'aimant au moyen desdites
5 mesures et desdits courants \hat{i}_d et \hat{i}_q estimés par un observateur d'état de la

$$\text{forme : } \dot{\hat{\phi}}(T_{ai}) = k_\phi \left(p\Omega_m \frac{(i_q - \hat{i}_q)}{L_q} \right)$$

avec : L_d : inductance directe de ladite machine électrique,

L_q : inductance en quadrature de ladite machine électrique,

k_d, k_r, k_p, k_ϕ : variables de calibration,

10 p : nombre de paires de pôles de la machine électrique.

Avantageusement, on détermine ladite température T_{cu} desdites bobines au moyen d'une équation de la forme : $\hat{R} = R_0 (1 + \alpha(T_{cu} - T_{ref}))$ avec R_0 la résistance de référence desdites bobines pour la température de référence T_{ref} , α un paramètre constant de résistance de température desdites bobines.

15 De manière avantageuse, on détermine ladite température T_{ai} dudit aimant au moyen d'une équation de la forme : $\hat{\phi} = \phi_0 (1 + \beta(T_{ai} - T_{ref}))$ avec ϕ_0 l'intensité du flux magnétique de référence dudit aimant pour la température de référence T_{ref} , β un paramètre constant de résistance de température dudit aimant.

20 En outre, le procédé peut comprendre une étape de prétraitement des grandeurs électriques en amont des étapes d'estimation de la résistance des bobines et de l'intensité du flux magnétique de l'aimant.

De préférence, ledit prétraitement d'une grandeur électrique y est réalisé par décomposition d'un signal électrique mesurée y_m en somme de fonctions cosinus et sinus

dépendantes de la position mesurée θ_m du rotor $y_m = \sum_{i=1}^N (a_i \cos(i\theta_m) + b_i \sin(i\theta_m))$, les

25 coefficients a_i, b_i étant déterminés par identification, puis par conservation du terme prépondérant : $y_f = a_1 \cos(\theta_m) + b_1 \sin(\theta_m)$.

Selon un mode de réalisation de l'invention, on détermine une température T_{fer} de la carcasse de ladite machine électrique au moyen desdites températures T_{cu} des bobines et T_{ai} de l'aimant et de pertes énergétiques de ladite machine électrique.

De préférence, on détermine ladite température T_{fer} de ladite carcasse au moyen
 5 d'une formule du type : $\hat{T} = AT + KC(\hat{T} - T) + BP$ avec $T = (T_{fer}, T_{cu}, T_{ai})$,
 $P = (P_{fer}, P_{joules}, P_m)$, P_{fer} correspondant aux pertes fer de ladite machine électrique, P_{joules}
 aux pertes joules de ladite machine électrique, P_m les pertes mécaniques de ladite machine
 électrique, K étant un gain, A une matrice constante du modèle thermique, $B = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ et
 $C = [0 \ 1 \ 1]$.

10

L'invention concerne également un procédé de diagnostic d'une machine électrique synchrone, pour lequel on réalise les étapes suivantes :

- on détermine lesdites températures internes de ladite machine électrique selon le procédé décrit ci-dessus ; et
- 15 - on diagnostique une surchauffe de ladite machine synchrone en fonction desdites températures déterminées.

En outre, l'invention concerne un procédé de commande d'une machine électrique synchrone, pour lequel on réalise les étapes suivantes :

- 20 - on détermine lesdites températures internes de ladite machine électrique le procédé décrit ci-dessus ; et
- on commande le couple de ladite machine synchrone en fonction desdites températures déterminées.

25 L'invention concerne aussi un système de commande d'une machine électrique synchrone, apte à appliquer le procédé de commande tel que décrit précédemment.

L'invention porte également sur un véhicule automobile comprenant au moins une machine électrique synchrone, le véhicule comprend en outre un système de commande tel
 30 que décrit précédemment.

Présentation succincte des figures

D'autres caractéristiques et avantages du procédé selon l'invention, apparaîtront à la lecture de la description ci-après d'exemples non limitatifs de réalisations, en se référant aux figures annexées et décrites ci-après.

La figure 1 illustre le contrôle d'une machine électrique synchrone selon l'invention.

La figure 2 est un logigramme du procédé selon l'invention.

La figure 3 illustre un mode de réalisation de l'étape de détermination des températures au moyen d'observateurs d'état.

10

Description détaillée de l'invention

On rappelle que le procédé selon l'invention est adapté à une machine électrique synchrone. Une telle machine est composée d'une partie tournante le rotor, et d'une partie fixe le stator. La partie tournante comprend au moins un aimant (ou un électroaimant). Le stator comprend au moins trois bobines réparties sur trois phases, ces bobines (généralement en cuivre) sont alimentés alternativement de manière à générer un champ magnétique apte à faire tourner le rotor. Les bobines sont supportées par une carcasse, généralement en fer, et également appelé carter.

La figure 1 illustre le contrôle d'une machine électrique synchrone, constituée classiquement de trois phases. Cette machine peut être du type à aimants permanents, à excitation commandée ou à double excitation. La machine électrique (4) est pourvue d'au moins un moyen de mesure de la position et/ou de vitesse du rotor et de moyens de mesure des courants et des tensions des phases, ces moyens de mesure ne sont pas représentés. Les moyens de contrôle (1) de la machine électrique sont constitués de moyens de détermination (2) des températures internes (températures des bobines, de l'aimant, et éventuellement de la carcasse) de la machine électrique (4) et de moyens de contrôle du couple (3) de la machine électrique (4). Les moyens de détermination (2) des températures internes déterminent les températures à partir des mesures de la vitesse Ω_m du rotor, et à partir des mesures de courants i_m et de tensions u_m . Il s'agit des courants et des tensions de chacune des trois phases de la machine électrique (4). Les moyens de contrôle du couple (3) appliquent des tensions aux bornes du moteur en fonction des températures internes, de la vitesse Ω_{rot} et de courants i_m et de tensions u_m afin d'assurer une consigne de couple pour la machine électrique (4).

35

Notations :

Au cours de la description, les notations suivantes seront utilisées :

- u : tensions aux bornes des phases de la machine électrique.
- i : courants circulant dans les phases de la machine électrique.
- 5 θ : position du rotor, correspondant à l'angle de rotation du rotor de la machine électrique par rapport au stator.
- Ω : vitesse du rotor, correspondant à la vitesse de rotation du rotor de la machine électrique par rapport au stator.
- T_{cu} : température des bobines de la machine électrique.
- 10 T_{ai} : température de l'aimant du rotor de la machine électrique.
- T_{fer} : température de la carcasse de la machine électrique.
- T : vecteur des températures de dimension trois, tel que $T = (T_{fer}, T_{cu}, T_{ai})$
- T_{ref} : température de référence, en général 20 °C.
- ϕ : intensité du flux magnétique de l'aimant du rotor, variable en fonction de la
- 15 température des bobines T_{cu} .
- ϕ_0 : intensité du flux de référence à la température de référence T_{ref} , il s'agit d'une donnée constructeur.
- R : résistance des bobines de la machine électrique, variable en fonction de la température de l'aimant T_{ai} .
- 20 R_0 : résistance des bobines de référence à la température de référence T_{ref} , il s'agit d'une donnée constructeur.
- L_d : inductance directe de ladite machine électrique, il s'agit d'un paramètre de la machine électrique qui est connu (donnée constructeur ou obtenu expérimentalement).
- L_q : inductance en quadrature de ladite machine électrique, il s'agit d'un paramètre
- 25 de la machine électrique qui est connu (donnée constructeur ou obtenu expérimentalement).
- P_{joules} : pertes énergétiques dans la machine électrique dues à l'effet Joule, il s'agit d'une donnée constructeur pouvant être donnée sous forme d'une cartographie fonction du couple et du régime de la machine électrique.
- 30 P_{fer} : pertes énergétiques dans la carcasse de la machine électrique, il s'agit d'une donnée constructeur pouvant être donnée sous forme d'une cartographie fonction du couple et du régime de la machine électrique.

P_m : pertes énergétiques mécaniques dans la machine électrique, il s'agit d'une donnée constructeur pouvant être donnée sous forme d'une cartographie fonction du couple et du régime de la machine électrique.

P : vecteur des pertes de dimension trois, tel que $P = (P_{fer}, P_{joules}, P_m)$

5 p : nombre de paires de pôles de la machine électrique.

α : paramètre constant de résistance de température desdites bobines, dépendant de la résistivité du matériau des bobines.

β : paramètre constant de résistance de température dudit aimant, dépendant de l'aimant.

10 k_d, k_q, k_r, k_ϕ : variables de calibration permettant de gérer la convergence des observateurs d'état.

K : gain de calibration pour le modèle thermique.

A : matrice constante du modèle thermique.

B : vecteur colonne constant, $B = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$.

15 C : vecteur ligne constant, $C = [0 \ 1 \ 1]$.

Ces notations, indexées par la mention $_{-m}$, représentent les valeurs mesurées. Les valeurs estimées sont indiquées par un accent circonflexe. Les dérivées par rapport au temps sont indiquées par un point. Les notations indexées par la mention $_{-d}$ ou $_{-q}$ signifient que les grandeurs sont exprimées dans le repère de Park.

20

L'invention permet de terminer les températures internes d'une machine électrique. La figure 2 décrit les différentes étapes du procédé selon l'invention :

1) prétraitement des grandeurs électriques (PRE)

2) estimation des températures des bobines et de l'aimant (OBS)

25 3) estimation de la température de la carcasse (MTH)

Les étapes de prétraitement des grandeurs électriques (PRE) et d'estimation de la température de la carcasse (MTH) sont des étapes facultatives.

30 Préalablement à ces étapes, on mesure les courants i et tensions u dans les phases de la machine électrique ainsi que la position θ et la vitesse du rotor Ω .

Selon l'invention, la détermination de la position θ et de la vitesse Ω du rotor utilise des valeurs mesurées. Pour effectuer ces mesures, on peut utiliser tout type de capteur,

notamment un capteur de position à bas coût, afin de limiter les coûts de l'installation. Il peut s'agir notamment d'un capteur à effet Hall ou d'un capteur inductif. Un seul capteur de position peut être utilisé, la vitesse de rotation pouvant se déduire de la position. Alternativement, on peut utiliser des algorithmes d'estimation pour déterminer ces grandeurs.

5 Un exemple d'un tel algorithme est décrit notamment dans la demande de brevet FR dont le numéro de dépôt est 11/03994.

La machine électrique synchrone est commandée en couple par un contrôle des tensions et des courants d'alimentation des phases de la machine électrique synchrone. Afin de piloter de manière optimale ce moteur il est nécessaire de mesurer les tensions u_m aux bornes des phases et les courants i_m y circulant au moyen de capteurs de tension et de courant.

1) prétraitement des grandeurs électriques (PRE)

Les mesures des grandeurs électriques comportent généralement du bruit de mesure, ce qui engendre des imprécisions pour l'estimation des différentes températures internes. Pour palier ce problème, une étape de prétraitement (PRE) des grandeurs électriques (illustré en pointillés en figure 2) peut être réalisée en amont de l'étape d'estimation des températures (OBS). Ce prétraitement permet de filtrer les grandeurs mesurées et par conséquent d'améliorer la qualité de l'estimation des températures internes.

20 Selon un mode de réalisation de l'invention, le prétraitement d'une grandeur électrique y (tension ou courant) est réalisé par décomposition du signal électrique mesurée y_m en somme de fonctions cosinus et sinus dépendantes de la position mesurée :

$$y_m = \sum_{i=1}^N (a_i \cos(i\theta_m) + b_i \sin(i\theta_m)), \text{ les coefficients } a_i, b_i \text{ étant déterminés par identification.}$$

On constate en pratique que $N = 3$ ou $N = 4$ permet de réaliser un traitement correct des données mesurées. Ensuite, on conserve uniquement le terme prépondérant ($N=1$) :

25 $y_f = a_1 \cos(\theta_m) + b_1 \sin(\theta_m)$. La grandeur prétraitée est alors utilisée pour les observateurs d'état définis par la suite.

2) estimation des températures des bobines et de l'aimant (OBS)

30 L'estimation (OBS) de la température des enroulements et des aimants est mise en œuvre à partir des mesures (prétraitées le cas échéant) au moyen de deux observateurs d'état : la résistance R des bobines et le flux magnétique ϕ de l'aimant.

Selon un mode de réalisation de l'invention, cette étape peut comporter deux parties indissociables, illustrées sur la figure 3, qui sont les suivantes :

- estimation de l'intensité du flux magnétique des aimants de la machine et de la résistance des bobines (OBS (R, ϕ)) et
- reconstruction des températures (DET(T)) à partir du flux magnétique et de la résistance estimés.

5 Pour cette étape, on se place dans le repère de Park, pour cela, on transforme les grandeurs électriques triphasées en grandeurs en deux dimensions, notées d et q, pour respectivement direct et en quadrature. En effet, la transformée de Park est un outil mathématique utilisé en électrotechnique afin de réaliser un changement de repère dans un système d'axe diphasé ou triphasé. Elle est généralement utilisée pour passer d'un repère « fixe » lié au stator d'une machine électrique à un repère tournant lié à son rotor ou au champ magnétique.

Pour construire les observateurs d'état selon l'invention, on se base sur une représentation d'état des moteurs synchrones du type :

$$L_d \dot{i}_d = -R(T_{cu}) i_d + p \Omega_m L_q i_q + u_d$$

$$15 \quad L_q \dot{i}_q = -R(T_{cu}) i_q - p \Omega_m (L_d i_d + \phi(T_{ai})) + u_q$$

Le flux ϕ et la résistance R ne sont pas mesurables et sont variables en fonction de la température de fonctionnement de la machine électrique.

On peut alors concevoir un observateur qui calcule en temps réel une estimation (\hat{i}_d, \hat{i}_q) des courants (i_d, i_q) du type :

$$20 \quad L_d \dot{\hat{i}}_d = -\hat{R}(T_{cu}) \hat{i}_d + p \Omega_m L_q \hat{i}_q + u_d - k_d (i_d - \hat{i}_d)$$

$$L_q \dot{\hat{i}}_q = -\hat{R}(T_{cu}) \hat{i}_q - p \Omega_m (L_d \hat{i}_d + \hat{\phi}(T_{ai})) + u_q - k_p (i_d - \hat{i}_d)$$

où \hat{R} et $\hat{\phi}$ sont des estimations de la résistance des enroulements et du flux de l'aimant. Ces grandeurs peuvent être calculées en temps réel par des observateurs d'état du type :

$$25 \quad \dot{\hat{R}}(T_{cu}) = k_r \left(i_d \frac{(i_d - \hat{i}_d)}{L_d} + i_q \frac{(i_q - \hat{i}_q)}{L_q} \right)$$

$$\dot{\hat{\phi}}(T_{ai}) = k_\phi \left(p \Omega_m \frac{(i_q - \hat{i}_q)}{L_q} \right)$$

Pour ces formules, k_d , k_r , k_p , k_ϕ sont des variables de calibration qui permettent de gérer la vitesse de convergence des observateurs d'état.

A partir des équations précédentes, on peut estimer la résistance \hat{R} et le flux magnétique $\hat{\phi}$ qui converge vers les vraies valeurs de $R(T_{cu})$ et $\phi(T_{ai})$. On peut alors ensuite reconstruire les différentes températures en inversant les équations suivantes à partir des valeurs estimées par les observateurs d'état :

$$5 \quad \hat{R} = R_0 \left(1 + \alpha (T_{cu} - T_{ref}) \right)$$

$$\hat{\phi} = \phi_0 \left(1 + \beta (T_{ai} - T_{ref}) \right)$$

Dans ces équations, ϕ_0 correspond à l'intensité du flux de référence à la température de référence T_{ref} (choisie en général à 20 °C), il s'agit d'une donnée constructeur, R_0 correspond à la résistance des bobines de référence à la température de référence T_{ref} , il s'agit également d'une donnée constructeur, α et β sont les coefficients de résistance de température du cuivre (bobines) et de l'aimant, ces coefficients sont constants et dépendent de la résistivité des matériaux.

Ainsi, aux moyens de deux observateurs d'état (de la résistance des bobines et du flux magnétique de l'aimant) on peut déterminer deux températures internes de la machine électrique que sont les températures des bobines T_{cu} et de l'aimant T_{ai} .

3) estimation de la température de la carcasse (MTH)

Selon l'invention, on peut également estimer la température de la carcasse de la machine électrique. Cette estimation peut être mise en œuvre à partir des températures des bobines T_{cu} et de l'aimant T_{ai} en prenant compte des différentes pertes énergétiques dans la machine électrique.

Selon un mode de réalisation de l'invention, la température de la carcasse peut être déterminée au moyen d'un deuxième observateur, basé sur un modèle thermique (MTH) de la machine électrique et sur les observations des températures réalisées lors de l'étape précédente.

La représentation thermique des machines synchrones peut s'écrire de la façon suivante :

$$30 \quad \dot{T} = AT + BP$$

$$y = CT = (T_{cu}, T_{ai})$$

Avec A une matrice constante du modèle thermique, $B = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ et $C = [0 \quad 1 \quad 1]$.

La matrice A peut être obtenue par identification à partir d'un modèle thermique complexe. Ce dernier étant complexe ne peut pas être utilisé en ligne dans le système de contrôle. L'idée est de construire un modèle réduit ($T = A T + BP$) exploitable en ligne à partir d'un modèle complexe, en identifiant A. Ce modèle réduit ($T = A T + BP$) est par la suite
5 utilisé pour estimer la température du fer.

On conçoit un observateur qui calcule en temps réel une estimation de la température de la carcasse T_{fer} (fer existant dans le stator, servant de support et incluant le bobinage), avec une équation du type :

$$\dot{\hat{T}} = AT + KC(\hat{T} - T) + BP$$

10 Le gain K permet de gérer la vitesse de convergence de la température estimée \hat{T} à la valeur réelle T.

Toutes les étapes du procédé peuvent être exécutées par des moyens informatiques, notamment par un contrôleur de la machine électrique. Ainsi, on peut déterminer en temps
15 réel les différentes températures internes de la machine électrique.

En outre, l'invention concerne un procédé de diagnostic d'une machine électrique synchrone, pour lequel on réalise les étapes suivantes :

- on détermine lesdites températures internes (températures des bobines, de l'aimant
20 et éventuellement de la carcasse) de ladite machine électrique à l'aide du procédé décrit ci-dessus ; et
- on diagnostique une surchauffe de la machine électrique ou de l'un de ces composants (bobines, aimant, carcasse) en fonction des températures déterminées, par exemple lorsque les températures déterminées sont supérieures à des seuils
25 définis par le constructeur et/ou l'utilisateur.

L'invention concerne également un procédé de commande d'une machine électrique synchrone, pour lequel on réalise les étapes suivantes :

- on détermine lesdites températures internes (températures des bobines, de l'aimant
30 et éventuellement de la carcasse) de ladite machine électrique à l'aide du procédé décrit ci-dessus ; et
- on contrôle le couple de ladite machine synchrone en fonction desdites températures déterminées. Pour cette étape, on peut utiliser tout moyen classique de contrôle vectoriel du couple de la machine électrique, qui prend en compte en plus des
35 températures, les tensions et courants mesurés ainsi que les mesures de position et vitesse du rotor. La prise en compte de la température pour la commande de la

machine électrique permet de déterminer précisément le comportement de la machine électrique, ce qui permet de réaliser une commande adaptée à son fonctionnement.

5 En outre, l'invention concerne un système de commande d'une machine électrique synchrone adapté à appliquer le procédé tel que décrit ci-dessus. Un tel système de commande (1) de machine électrique (4) est illustré en figure 1. Les moyens de contrôle (1) de la machine électrique sont constitués de moyens de détermination (2) des températures internes (températures des bobines, de l'aimant, et éventuellement de la carcasse) de la machine électrique (4) et de moyens de contrôle du couple (3) de la machine électrique (4).
10 Les moyens de détermination (2) des températures internes déterminent les températures à partir des mesures de la vitesse Ω_m du rotor, et à partir des mesures de courants i_m et de tensions u_m . Il s'agit des courants et des tensions de chacune des trois phases de la machine électrique (4). Les moyens de contrôle du couple (3) appliquent des tensions aux bornes du moteur en fonction des températures internes, de la vitesse Ω_{rot} et de courants
15 i_m et de tensions u_m afin d'assurer une consigne de couple pour la machine électrique (4).

Ce système de commande, peut être utilisé pour une machine électrique synchrone embarquée à bord d'un véhicule, notamment à bord d'un véhicule automobile électrique ou hybride. Toutefois, le système de commande décrit n'est pas limité à cette application et
20 convient pour toutes les applications des machines électriques synchrones.

Revendications

- 1) Procédé de détermination de températures internes d'une machine électrique synchrone (4), ladite machine électrique synchrone (4) comprenant un stator constitué de trois phases sur chacune desquelles est connectée au moins une bobine, et un rotor comprenant au moins un aimant, le champ électromagnétique desdites bobines engendrant la rotation dudit rotor, procédé dans lequel on mesure la vitesse Ω_m dudit rotor ainsi que les tensions et les courants u_m et i_m desdites phases, caractérisé en ce qu'on réalise les étapes suivantes :
- 5 a) on estime une résistance \hat{R} desdites bobines à l'aide d'un observateur d'état \hat{R} de la résistance des bobines à partir desdites mesures, ladite résistance étant dépendante de la température desdites bobines T_{cu} ;
- 10 b) on estime une intensité du flux magnétique $\hat{\phi}$ dudit aimant à l'aide d'un observateur d'état $\hat{\phi}$ de l'intensité du flux magnétique de l'aimant à partir desdites mesures, ladite intensité du flux magnétique étant dépendante de la température de l'aimant T_{ai} ;
- 15 c) on détermine une température T_{cu} desdites bobines au moyen de ladite estimation de la résistance \hat{R} des bobines ; et
- d) on détermine une température T_{ai} dudit aimant au moyen de ladite estimation de l'intensité du flux magnétique $\hat{\phi}$ de l'aimant.
- 20 2) Procédé selon la revendication 1, dans lequel on estime ladite résistance \hat{R} des bobines en mettant en œuvre les étapes suivantes :
- i) on détermine les tensions $u_{d,q}$ et les courants $i_{d,q}$ dans le repère de Park par une transformation des tensions u_m et des courants i_m mesurés ;
- ii) on estime le courant \hat{i}_d et le courant \hat{i}_q au moyen des équations du type :
- 25
$$L_d \dot{\hat{i}}_d = -\hat{R}(T_{cu}) \hat{i}_d + p \Omega_m L_q \hat{i}_q + u_d - k_d (i_d - \hat{i}_d)$$

$$L_q \dot{\hat{i}}_q = -\hat{R}(T_{cu}) \hat{i}_q - p \Omega_m (L_d \hat{i}_d + \hat{\phi}(T_{ai})) + u_q - k_p (i_q - \hat{i}_q) ;$$
 et
- iii) on estime ladite résistance R des bobines au moyen desdites mesures et desdits courants \hat{i}_d et \hat{i}_q estimés par un observateur d'état de la forme :

$$\hat{R}(T_{cu}) = k_r \left(i_d \frac{(i_d - \hat{i}_d)}{L_d} + i_q \frac{(i_q - \hat{i}_q)}{L_q} \right)$$

avec : L_d : inductance directe de ladite machine électrique,
 L_q : inductance en quadrature de ladite machine électrique,
 k_d, k_r, k_p, k_ϕ : variables de calibration,

5 p : nombre de paires de pôles de la machine électrique.

5

3) Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel on estime ladite intensité du flux magnétique $\hat{\phi}$ de l'aimant en mettant en œuvre les étapes suivantes :

i) on détermine les tensions $u_{d,q}$ et les courants $i_{d,q}$ dans le repère de Park par une transformation des tensions u_m et des courants i_m mesurés ;

10

ii) on estime le courant \hat{i}_d et le courant \hat{i}_q au moyen des équations du type :

$$L_d \dot{\hat{i}}_d = -\hat{R}(T_{cu}) \hat{i}_d + p \Omega_m L_q \hat{i}_q + u_d - k_d (i_d - \hat{i}_d)$$

$$L_q \dot{\hat{i}}_q = -\hat{R}(T_{cu}) \hat{i}_q - p \Omega_m (L_d \hat{i}_d + \hat{\phi}(T_{ai})) + u_q - k_p (i_q - \hat{i}_q) ; \text{ et}$$

iii) on estime ladite intensité du flux magnétique ϕ de l'aimant au moyen desdites mesures et desdits courants \hat{i}_d et \hat{i}_q estimés par un observateur d'état de la

15

$$\text{forme : } \dot{\hat{\phi}}(T_{ai}) = k_\phi \left(p \Omega_m \frac{(i_q - \hat{i}_q)}{L_q} \right)$$

avec : L_d : inductance directe de ladite machine électrique,
 L_q : inductance en quadrature de ladite machine électrique,
 k_d, k_r, k_p, k_ϕ : variables de calibration,

20 p : nombre de paires de pôles de la machine électrique.

20

4) Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel on détermine ladite température T_{cu} desdites bobines au moyen d'une équation de la forme :

$$\hat{R} = R_0 (1 + \alpha (T_{cu} - T_{ref})) \text{ avec } R_0 \text{ la résistance de référence desdites bobines pour la}$$

25

température de référence T_{ref} , α un paramètre constant de résistance de température desdites bobines.

5) Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel on détermine ladite température T_{ai} dudit aimant au moyen d'une équation de la forme :

$\hat{\phi} = \phi_0 (1 + \beta(T_{ai} - T_{ref}))$ avec ϕ_0 l'intensité du flux magnétique de référence dudit aimant pour la température de référence T_{ref} , β un paramètre constant de résistance de température dudit aimant.

5 6) Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le procédé comprend une étape de prétraitement des grandeurs électriques en amont des étapes d'estimation de la résistance des bobines et de l'intensité du flux magnétique de l'aimant.

7) Procédé selon la revendication 6, dans lequel ledit prétraitement d'une grandeur électrique y est réalisé par décomposition d'un signal électrique mesurée y_m en somme de fonctions cosinus et sinus dépendantes de la position mesurée θ_m du rotor

$$y_m = \sum_{i=1}^N (a_i \cos(i\theta_m) + b_i \sin(i\theta_m)), \text{ les coefficients } a_i, b_i, \text{ étant déterminés par}$$

identification, puis par conservation du terme prépondérant : $y_f = a_1 \cos(\theta_m) + b_1 \sin(\theta_m)$.

15 8) Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel on détermine une température T_{fer} de la carcasse de ladite machine électrique au moyen desdites températures T_{cu} des bobines et T_{ai} de l'aimant et de pertes énergétiques de ladite machine électrique.

20 9) Procédé selon la revendication 8, dans lequel on détermine ladite température T_{fer} de ladite carcasse au moyen d'une formule du type : $\hat{T} = AT + KC(\hat{T} - T) + BP$ avec $T = (T_{fer}, T_{cu}, T_{ai})$, $P = (P_{fer}, P_{joules}, P_m)$, P_{fer} correspondant aux pertes fer de ladite machine électrique, P_{joules} aux pertes joules de ladite machine électrique, P_m les pertes mécaniques de ladite machine électrique, K étant un gain, A une matrice constante du

25 modèle thermique, $B = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ et $C = [0 \ 1 \ 1]$.

10) Procédé de diagnostic d'une machine électrique synchrone, caractérisé en ce qu'on réalise les étapes suivantes :

- on détermine lesdites températures internes de ladite machine électrique au moyen du procédé selon l'une des revendications précédentes ; et
- on diagnostique une surchauffe de ladite machine synchrone en fonction desdites températures déterminées.

5

11) Procédé de commande d'une machine électrique synchrone, caractérisé en ce qu'on réalise les étapes suivantes :

- on détermine lesdites températures internes de ladite machine électrique au moyen du procédé selon l'une des revendications 1 à 9 ; et

10

- on commande le couple de ladite machine synchrone en fonction desdites températures déterminées.

12) Système de commande (1) d'une machine électrique synchrone, caractérisé en ce qu'il est apte à appliquer le procédé de commande selon la revendication 11.

15

13) Véhicule automobile comprenant au moins une machine électrique synchrone (4), caractérisé en ce qu'il comprend en outre un système de commande (1) selon la revendication 12.

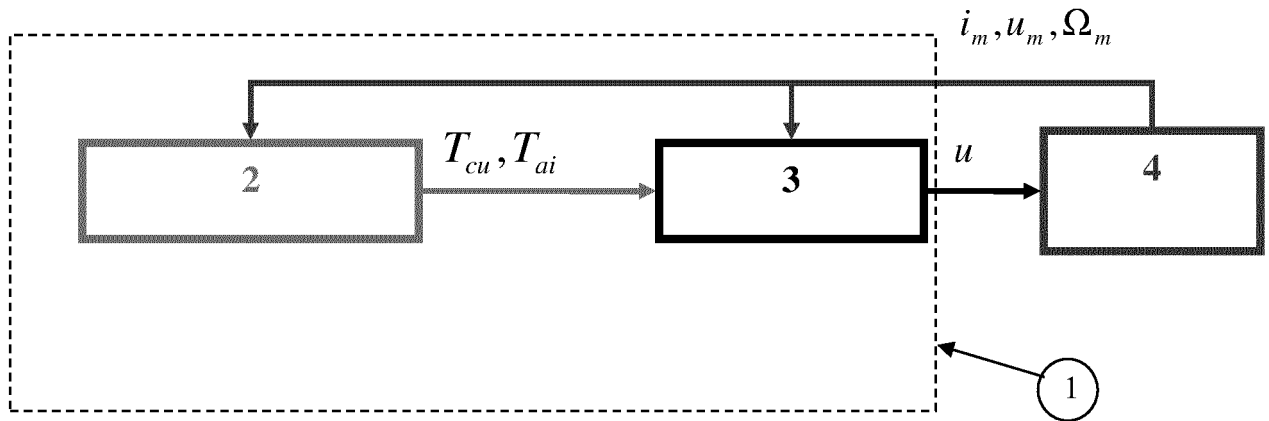


Figure 1

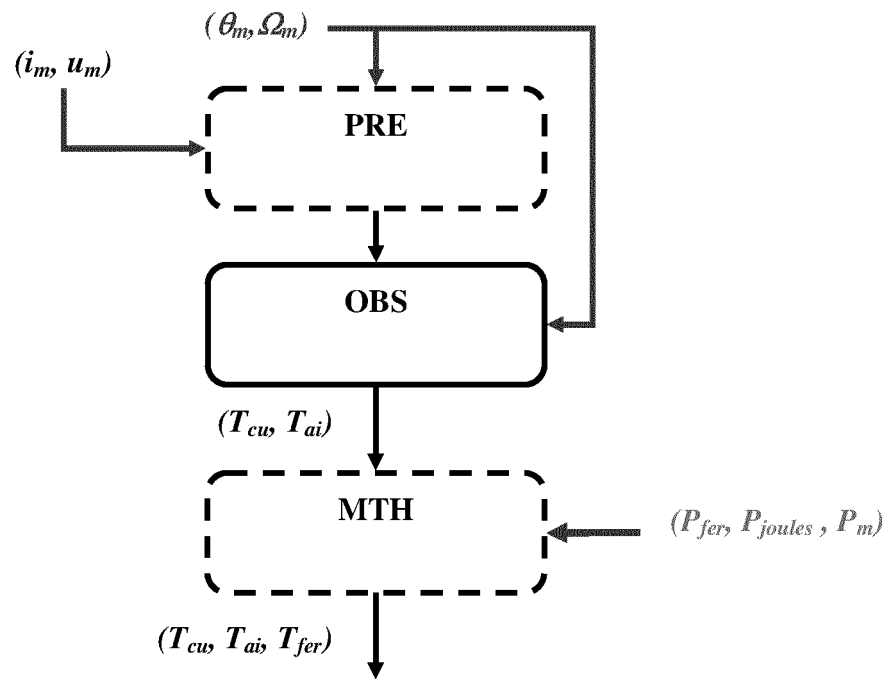


Figure 2

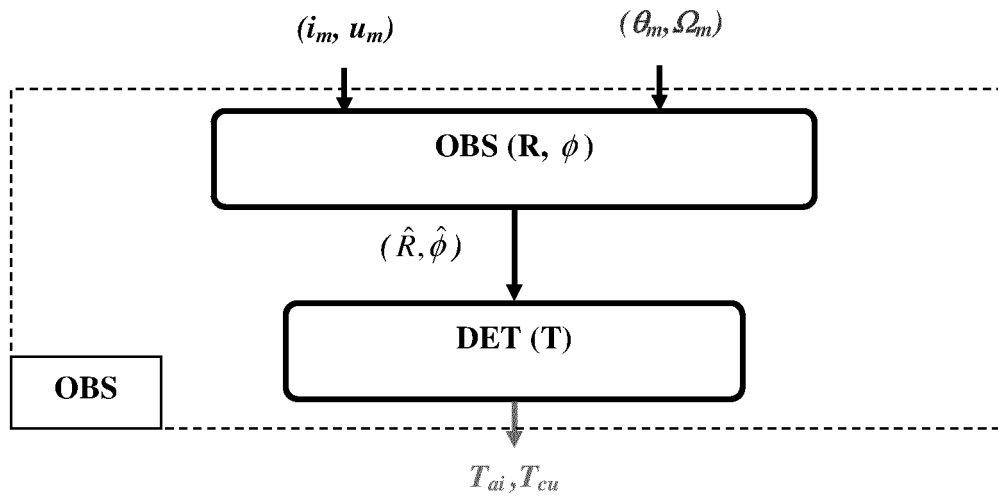


Figure 3

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1354519 FA 781943**

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 **21-02-2014**

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
WO 2009009232 A2	15-01-2009	AU 2008275530 A1	15-01-2009
		CA 2689531 A1	15-01-2009
		CN 101682158 A	24-03-2010
		EP 2162981 A2	17-03-2010
		WO 2009009232 A2	15-01-2009
		ZA 200908877 A	29-09-2010

US 2010276929 A1	04-11-2010	CN 102072778 A	25-05-2011
		EP 2317291 A2	04-05-2011
		US 2010276929 A1	04-11-2010

US 2011144843 A1	16-06-2011	AUCUN	

DE 102007062712 A1	02-07-2009	DE 102007062712 A1	02-07-2009
		WO 2009083324 A1	09-07-2009

US 2013028292 A1	31-01-2013	CN 102901584 A	30-01-2013
		DE 102012014320 A1	31-01-2013
		JP 5149431 B2	20-02-2013
		JP 2013029483 A	07-02-2013
		US 2013028292 A1	31-01-2013
