(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle
Bureau international

(43) Date de la publication internationale
11 mai 2018 (11.05.2018)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2018/083405 A1

(51) Classification internationale des brevets :
H02P 9/48 (2006.01) *H02P 23/14* (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2017/052978

(22) Date de dépôt international :
27 octobre 2017 (27.10.2017)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1660659 04 novembre 2016 (04.11.2016) FR

(71) Déposant : **VALEO EQUIPEMENTS ELECTRIQUES MOTEUR** [FR/FR] ; 2 rue André Boulle, 94046 CRETEIL CEDEX (FR).

(72) Inventeurs : **TISSERAND, Pierre** ; VALEO EQUIPEMENTS ELECTRIQUES MOTEUR - 2 Rue André Boulle, 94046 CRETEIL (FR). **CHASSARD, Pierre** ; VALEO EQUIPEMENTS ELECTRIQUES MOTEUR - 2 Rue André Boulle, 94046 CRETEIL (FR). **DE LAMARRE, Laurent** ; VALEO EQUIPEMENTS ELECTRIQUES MOTEUR -, 2, rue Andre Boulle, 94046 CRETEIL (FR).

(74) Mandataire : **RICARD, Amandine** ; VALEO EQUIPEMENTS ELECTRIQUES MOTEUR, 2, rue André-Boulle, 94046 CRETEIL CEDEX (FR).

(81) États désignés *(sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible)* : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR,

(54) Title: METHOD FOR CONTROLLING AN ALTERNATOR OF A ROTATING ELECTRICAL MACHINE

(54) Titre : PROCEDE DE CONTROLE D'UN ALTERNATEUR DE MACHINE ELECTRIQUE ROTATIVE

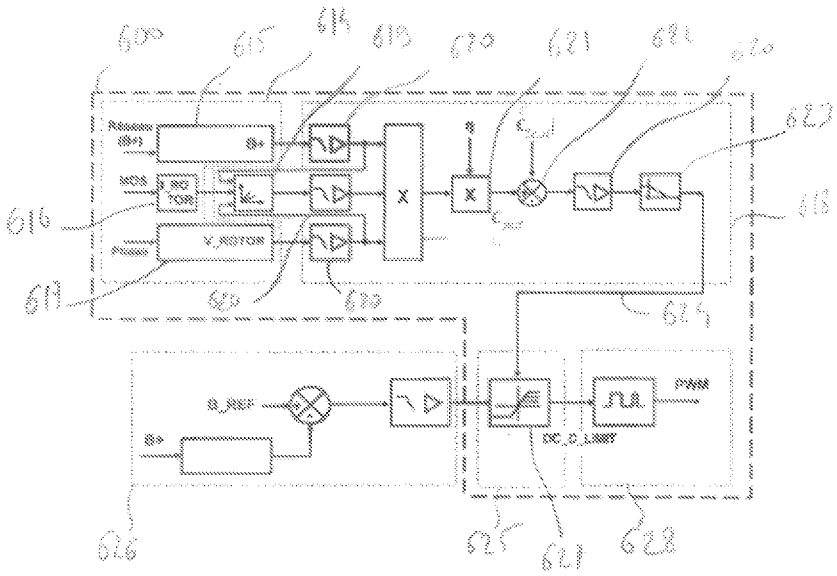

FIGURE 6

(57) Abstract: The invention relates to a method for determining a saturation current of a rotating electrical machine functioning in both an alternator mode, as well as in a magnetic saturation regime, in order to transform, as efficiently as possible, kinetic energy of a motor vehicle during braking into electrical energy intended to be stored in batteries. To this effect, the method for determining the saturation current aims to model the behaviour of the rotating electrical machine in order to limit the number of sensors to be used on the motor vehicle.

(57) Abrégé : L'invention concerne un procédé de détermination d'un courant de saturation d'une machine électrique rotative fonctionnant dans un mode alternateur d'une part, et selon un régime de saturation magnétique d'autre part, afin de transformer le plus efficace-

WO 2018/083405 A1

[Suite sur la page suivante]

KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés *(sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible)* : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée:

— *avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))*

ment possible une énergie cinétique d'un véhicule automobile en situation de freinage en une énergie électrique destinée à être stockée dans des batteries. À cet effet, le procédé de détermination du courant de saturation vise à modéliser le comportement de la machine électrique rotative afin de limiter le nombre de capteurs à implémenter sur le véhicule automobile.

« Procédé de contrôle d'un alternateur de machine électrique rotative »

Domaine technique

La présente invention se situe dans le domaine des alternateurs destinés à être couplés à un moteur thermique de véhicule automobile. Plus particulièrement, l'objet de la présente invention concerne un procédé d'estimation d'un courant de saturation d'une machine électrique rotative et un procédé de contrôle du couple résistant saturé de la machine électrique rotative. Un autre objet de l'invention concerne aussi un module électronique pour limiter le couple résistant saturé de la machine électrique rotative, ainsi qu'une machine électrique rotative configurée pour mettre en œuvre le procédé de contrôle du couple résistant saturé.

État de la technique antérieure

Dans le domaine de l'automobile, on connait des alternateurs dont la tension fournie au réseau électrique de bord est maintenue constante par une électronique appelée régulateur. De manière schématique, le régulateur récupère des données transmises par une unité de contrôle moteur afin de configurer l'alternateur pour optimiser la charge de la batterie et la production d'électricité nécessaire aux équipements électroniques du véhicule automobile.

De manière connue, le régulateur prend en compte le régime de fonctionnement du véhicule automobile ainsi que le couple de sortie généré ou disponible au niveau du rotor du moteur tel que décrit dans le FR2976422 B1. Ainsi, on conçoit que, pour certaines configurations de véhicules, l'alternateur ne devrait pas prélever de couple de sortie du moteur thermique au démarrage dudit moteur thermique, voire au cours d'une accélération afin d'améliorer les performances des véhicules par exemple de petite cylindrée, ou que le couple résistant de l'alternateur puisse être diminué lorsque la batterie est déjà chargée.

De manière plus particulière, certaines applications automobiles utilisent l'alternateur dans un mode de fonctionnement en régime saturé dont le débit de courant est au-delà de la classe nominal de débit de l'alternateur pendant une période pour laquelle la température de ladite machine ne dépasse pas une température maximale prédéterminée autorisée. Au-delà de la classe nominal de débit, la température de l'alternateur monte en fonction du courant débité et du temps d'utilisation jusqu'à une température pouvant détériorer au moins un de ses composants. Ainsi le régime saturé est un régime transitoire entre le régime de la classe nominal et la température pouvant détériorer au moins un de ses composants. Par exemple durant les périodes de freinage régénératif d'un véhicule automobile durant lesquelles l'énergie cinétique dudit véhicule automobile est convertie en énergie électrique par l'alternateur. Pour ce faire, l'alternateur doit fournir un courant de sortie le plus fort

possible afin de stocker l'énergie électrique correspondante dans des batteries pour une future restitution. Durant ces phases, le couple résistant de l'alternateur est alors optimisé, par exemple maximal afin transformer le plus efficacement possible le couple mécanique transmis par la rotation des roues durant le freinage du véhicule automobile en courant de saturation. Le couple résistant de l'alternateur forme alors un couple résistant en régime saturé dit couple résistant saturé.

Dans le cadre de cette application particulière, il existe un besoin de déterminer le courant d'une façon générale et en particulier le courant dit de saturation débité par l'alternateur fonctionnant en mode saturé. L'estimation du courant de sortie donc du couple résistant saturé donnée par le document FR2976422 B1 s'éloigne du courant de sortie réel car le courant de sortie durant le régime de saturation ne correspond pas à la fonction de l'estimation du courant en régime nominal. Il existe alors un besoin d'un estimateur pour cette plage de fonctionnement.

La présente invention a pour objet de répondre au problème précédemment décrit et de conduire en outre à d'autres avantages.

Un autre but de l'invention est de proposer un nouvel estimateur du courant de sortie d'une machine électrique rotative fonctionnant dans un mode alternateur saturé pour résoudre au moins un de ces problèmes

Exposé de l'invention

Selon un premier aspect de l'invention, on atteint au moins l'un des objectifs précités avec un procédé d'estimation d'un courant de saturation i_{sat} d'une machine électrique rotative ayant au moins un mode alternateur et pour fonctionner dans un régime de saturation, à partir d'un courant d'excitation i_{exc} et d'une vitesse de rotation ω de ladite machine électrique rotative, le procédé d'estimation du courant de saturation comprenant les étapes suivantes :

- détermination d'un nombre représentatif du courant d'excitation i_{exc} de la machine électrique rotative à chaque instant t;
- détermination d'un nombre représentatif de la vitesse de rotation ω de la machine électrique rotative à chaque instant t;
- détermination d'un gain $K(\omega)$ en fonction de la vitesse de rotation ω de la machine électrique rotative détermination d'un mode de saturation $S(\omega)$ en fonction de la vitesse de rotation (ω) de la machine électrique rotative et du courant d'excitation iex_c ;
- estimation du courant de saturation isa_t par le produit du gain $K(\omega)$ par une fonction de f de la sat_{ura}tion S(w) : $i_{sat} = K(\omega) \times \left(i_{exc} - f\left(S(\omega)\right)\right)$.

Chaque instant t correspond un échantillonnage ou analogique.

Ainsi le courant de saturation i_{sat} estimé permet de s'affranchir de l'utilisation de capteurs et de déterminer avec précision le courant débité par la machine électrique rotative fonctionnant dans un régime de saturation. Tel que décrit précédemment, le courant d'excitation i_{exc} dépend principalement :

- du courant d'excitation i_{exc} de la machine électrique rotative. Le nombre représentatif du courant d'excitation i_{exc} peut être déterminé par exemple en réalisant une mesure électrique sur un signal électrique de commande de puissance de la machine électrique rotative ;
- de la vitesse de rotation ω de la machine électrique rotative. Le nombre représentatif de la vitesse de rotation ω peut être déterminé par exemple en réalisant une mesure d'une période d'un signal électrique de commande de puissance de la machine électrique rotative ;

La prise en compte de ces deux variables pour déterminer le courant d'excitation i_{exc} de la machine électrique rotative permet de calculer deux termes complexes – le gain K et la saturation S – qui dépendent notamment de la vitesse de rotation ω de la machine électrique rotative. Consécutivement, le procédé d'estimation du courant de saturation i_{sat} d'une machine électrique rotative fonctionnant dans un régime de saturation permet d'obtenir un estimateur plus précis dudit courant de saturation i_{sat} que ceux connus dans l'art antérieur.

La présente invention adresse dans son premier aspect plusieurs méthodes pour déterminer le courant de saturation i_{sat} et/ou le gain K et la saturation S qui seront décrites ci-après. Ainsi le procédé d'estimation du courant de saturation i_{sat} conforme au premier aspect de l'invention peut comprendre avantageusement au moins un des perfectionnements ci-dessous, les caractéristiques techniques formant ces perfectionnements pouvant être prises seules ou en combinaison :

- $K(\omega)$ *peut être le gain correspondant* $K\ (\omega\max) = \frac{I_{Smax}}{I_{exmax}}$

- le courant de saturation i_{sat} et/ou le gain K et/ou la saturation S sont choisis parmi des valeurs préenregistrées durant un étalonnage de la machine électrique rotative. En effet, l'étalonnage de la machine électrique rotative peut permettre de déterminer les différentes valeurs du courant de saturation i_{sat} et/ou du gain K et/ou de la saturation S en fonction de certains paramètres de fonctionnement de ladite machine électrique rotative, tels que notamment le courant d'excitation i_{exc} et/ou la vitesse de rotation ω. Cet étalonnage peut être réalisé à partir de plusieurs mesures physiques du courant de saturation i_{sat} et/ou du gain K

et/ou de la saturation S d'une machine électrique rotative fonctionnant dans son régime de saturation et montée sur un banc de mesure, chacune des valeurs mesurées étant enregistrées dans une mémoire préalablement à l'installation de la machine électrique rotative sur un véhicule automobile. Plus particulièrement, le courant d'excitation i_{exc} et/ou la vitesse de rotation ω sont successivement incrémentés d'une valeur incrémentale afin de mesurer le plus grand nombre possible de courants de saturation i_{sat} et/ou de gain K et/ou de saturation S correspondants et à l'intérieur d'une plage d'utilisation donnée. Ainsi, plus tard, lorsque la machine électrique rotative est installée sur le véhicule automobile et utilisée dans le mode de freinage régénératif par exemple, il est possible de déterminer très rapidement la valeur estimée du courant de saturation i_{sat} en fonction des paramètres de fonctionnement actuels de la machine électrique rotative, en sélectionnant dans une base de données les valeurs préenregistrées du courant de saturation i_{sat} et/ou du gain K et/ou de la saturation S et correspondant aux valeurs actuelles du courant d'excitation i_{exc} et/ou de la vitesse de rotation ω. Éventuellement, pour des valeurs intermédiaires du courant d'excitation i_{exc} et/ou de la vitesse de rotation ω par rapport aux valeurs pré-enregistrées dans la base de données, une régression, par exemple linéaire, est réalisée pour déterminer le courant de saturation i_{sat} et/ou le gain K et/ou la saturation S les plus proches. Alternativement, le courant de saturation i_{sat} et/ou le gain K et/ou la saturation S sont définis par approximation. Alternativement encore, le courant de saturation i_{sat} et/ou le gain K et/ou la saturation S peuvent être déterminés par troncature ;

- le gain K est calculé par une régression linéaire de la vitesse de rotation ω de la machine électrique rotative du type $K(\omega) = a \times \omega + b$ où a est un coefficient directeur de gain et b est une ordonnée à l'origine de gain ;

- de manière avantageuse, il apparait qu'on obtient une meilleure approximation du gain K – et donc du courant de saturation i_{sat} – en considérant une première famille de valeurs du gain K pour une première plage de valeur de la vitesse de rotation ω de la machine électrique rotative et une deuxième famille de valeurs du gain K pour une deuxième plage de valeur de la vitesse de rotation ω de la machine électrique rotative. Aussi, dans un procédé d'estimation du courant de saturation i_{sat} conforme au premier aspect de l'invention :

    - si la vitesse de rotation ω de la machine électrique rotative est inférieure à une valeur seuil w_{seuil}, alors le coefficient directeur de gain a et l'ordonnée à l'origine de gain b prennent respectivement une première valeur a1, b1, et le gain $K(\omega)$ est alors défini par $K(\omega) = a_1 \times \omega + b_1$;

- si la vitesse de rotation ω de la machine électrique rotative est supérieure à la valeur seuil w_{seuil}, alors le coefficient directeur de gain a et l'ordonnée à l'origine de gain b prennent respectivement une deuxième valeur a2, b2, et le gain $K(\omega)$ est alors défini par $K(\omega) = a_2 \times \omega + b_2$;

- la saturation S(w) est calculée par une régression linéaire de la vitesse de rotation ω de la machine électrique rotative du type $S(\omega) = c \times \omega + d$ où c est un coefficient directeur de saturation et d est une ordonnée à l'origine de saturation ;

- de manière comparable au gain K, il apparait qu'on obtient une meilleure approximation de la saturation S – et donc du courant de saturation i_{sat} – en considérant une première famille de valeurs de saturation S pour une première plage de valeur de la vitesse de rotation ω de la machine électrique rotative et une deuxième famille de valeurs de saturation S pour une deuxième plage de valeur de la vitesse de rotation ω de la machine électrique rotative. Ainsi :

  - si la vitesse de rotation ω de la machine électrique rotative est inférieure à la valeur seuil w_{seuil}, alors le coefficient directeur de saturation c et l'ordonnée à l'origine de saturation d prennent respectivement une première valeur c1, d1, et la saturation S(w) est alors défini par $S(\omega) = c_1 \times \omega + d_1$;

  - si la vitesse de rotation w de la machine électrique rotative est supérieure à la valeur seuil w_{seuil}, alors le coefficient directeur de saturation c et l'ordonnée à l'origine de saturation d prennent respectivement une deuxième valeur c2, d2, et la saturation S(w) est alors défini par $S(\omega) = c_2 \times \omega + d_2$;

- pour des applications automobiles, la valeur seuil w_{seuil} est comprise entre 2000 et 3000 tours par minutes ; et préférentiellement la valeur seuil w_{seuil} est égale à 2500 tours par minutes ;

- la fonction de régression f de la saturation S(w) est avantageusement un polynôme de degré 3 afin de proposer une bonne approximation du fonctionnement de la machine électrique rotative sans nécessiter une électronique trop complexe et trop chère pour mettre en œuvre ladite approximation ;

- la fonction de régression f de la saturation S(w) est dépendant du terme tangente afin de simplifier l'expression mathématique de l'approximation du courant de saturation i_{sat}, notamment par rapport à une approximation polynômiale telle que décrite précédemment, et tout en conservant une bonne précision pour une complexité et un coût de mise en œuvre réduit ;

- la fonction de régression f de la saturation S(w) est du type d'une tangente hyperbolique, le courant de saturation i_{sat} étant défini par $i_{sat} = K(\omega) \times \tanh \frac{i_{exc}}{S(\omega)}$;

- la fonction de régression f de la saturation S(w) est du type d'une arctangente, le courant de saturation i_{sat} étant défini par $i_{sat} = K(\omega) \times \tan^{-1} \frac{i_{exc}}{S(\omega)}$.

Selon un deuxième aspect de l'invention, il est proposé un procédé d'estimation d'un couple résistant saturé C_{sat} d'une machine électrique rotative fonctionnant dans un régime de saturation, le procédé d'estimation du couple résistant saturé comprenant les étapes suivantes :

- estimation du courant de saturation i_{sat} à l'aide du procédé d'estimation du courant de saturation i_{sat} conforme au premier aspect de l'invention ou à l'un quelconque de ses perfectionnements ;
- détermination de la tension de sortie U_{ALT} de la machine électrique rotative ;
- estimation d'un nombre représentatif du couple résistant saturé C_{sat} de la machine électrique rotative par le produit du courant de saturation i_{sat} par la tension de sortie U_{alt} : $C_{sat} = \frac{U_{ALT} \times i_{sat}}{\omega}$.

Le procédé d'estimation du couple résistant saturé C_{sat} d'une machine électrique rotative fonctionnant en saturation s'appuie sur l'estimateur de courant de saturation i_{sat} précédemment calculé dans le premier aspect de l'invention ou à l'un quelconque de ses perfectionnements. Dans son deuxième aspect, le procédé d'estimation du couple résistant saturé C_{sat} bénéficie de la meilleure précision de l'estimateur du courant de saturation i_{Sat} via le procédé d'estimation du courant de saturation conforme au premier aspect de l'invention ou selon l'un quelconque de ses perfectionnements. Le couple résistant saturé C_{sat} déterminé par le procédé conforme au deuxième aspect est donc lui aussi plus précis que ceux de l'art antérieur. Ainsi, le contrôle moteur avec l'alternateur peut utiliser le frein résistant de l'alternateur de manière progressive ou étagée afin que l'utilisateur du véhicule automobile ne ressente pas d'à-coup.

Avantageusement, dans le procédé d'estimation du couple résistant saturé C_{sat} conforme au deuxième aspect de l'invention, le couple résistant saturé C_{sat} de la machine électrique rotative est défini par $C_{sat} = \frac{U_{alt} \times i_{sat}}{\eta \times \omega}$, où η est le rendement de la machine électrique rotative.

Selon un troisième aspect de l'invention, il est proposé un procédé de régulation du couple résistant saturé C_{sat} de la machine électrique rotative fonctionnant en saturation et comprenant les étapes suivantes :

- commande de la machine électrique rotative à l'aide d'un courant d'excitation i_{exc} ;
- détermination de la vitesse de rotation w de la machine électrique rotative ;
- estimation du couple résistant saturé C_{sat} de la machine électrique rotative à l'aide du procédé d'estimation du couple résistant saturé conforme au deuxième aspect de l'invention ou selon l'un quelconque de ses perfectionnements ;
- si le couple résistant saturé C_{sat} estimé de la machine électrique rotative est supérieur à une valeur seuil prédéfinie de couple résistant saturé C_{seuil}, réduction du courant d'excitation i_{exc}.

Conformément à son troisième aspect, le procédé de régulation du couple résistant saturé C_{sat} de la machine électrique rotative permet de contrôler ladite machine électrique rotative et de contrôler son impact sur le système électrique dans lequel elle est intégrée, notamment dans le domaine automobile. Plus particulièrement, dans le domaine automobile et dans une situation de freinage récupératif telle que décrite précédemment, le procédé de régulation du couple résistant saturé C_{ALT} conforme au troisième aspect de l'invention permet de contrôler l'impact de la machine électrique rotative sur un moteur thermique auquel elle est couplée. Plus particulièrement, le procédé de régulation du couple résistant saturé C_{sat} permet par exemple de garantir que le couple résistant saturé ne dépasse pas une valeur seuil C_{seuil} au-delà de laquelle la machine électrique rotative et/ou le système électrique pourraient être endommagés. Le procédé de régulation du couple résistant saturé C_{ALT} de la machine électrique rotative permet de réaliser une régulation plus fine de ladite machine électrique rotative à partir d'un estimateur plus précis et déterminé par plusieurs grandeurs électriques et/ou plusieurs variables de fonctionnement de ladite machine électrique rotative.

Selon un quatrième aspect de l'invention, il est proposé un module électronique pour limiter un couple résistant saturé d'une machine électrique rotative fonctionnant en saturation, le module électronique étant agencé pour mettre en œuvre les étapes du procédé de régulation du couple résistant saturé C_{sat} conforme au troisième aspect de l'invention.

Avantageusement, le module électronique conforme au quatrième aspect de l'invention est agencé pour limiter le couple résistant saturé d'une machine électrique rotative fonctionnant en régime de saturation, le module électronique comprenant :

- un dispositif pour déterminer un courant d'excitation i_{exc} de la machine électrique rotative. À titre d'exemples non limitatifs, il peut s'agir par exemple d'un capteur à effet Hall ou d'un composant électrique ou électronique permettant de mesurer le courant d'excitation i_{exc} de la machine électrique rotative, tel qu'un transistor ou une résistance de mesure de très faible impédance, dite résistance de shunt ;
- un dispositif pour déterminer une tension de sortie d'alternateur U_{alt} de la machine électrique rotative. À titre d'exemple non limitatif, il peut s'agir par exemple d'un convertisseur

analogique-numérique mesurant la tension de sortie d'alternateur U_{ALT} au niveau des conducteurs électriques de la machine électrique rotative sur lesquels le courant induit est créé durant la rotation de ladite machine électrique rotative ;

- un circuit électronique configuré pour mettre en œuvre les étapes du procédé de régulation du couple résistant saturé C_{sat} conforme au troisième aspect de l'invention ou à l'un quelconque de ses perfectionnements.

Selon un cinquième aspect de l'invention, il est proposé une machine électrique rotative comprenant :

- au moins un mode alternateur saturé ;
- un dispositif pour déterminer un courant d'excitation i_{exc} d'un stator de l'alternateur ;
- un dispositif pour déterminer une tension de sortie U_{ALT} de l'alternateur ;
- un dispositif pour déterminer une vitesse de rotation ω d'un rotor de l'alternateur ;
- un circuit électronique configuré pour mettre en œuvre les étapes du procédé de régulation du courant de saturation i_{sat} conforme au deuxième aspect de l'invention.

Des modes de réalisation variés de l'invention sont prévus, intégrant selon l'ensemble de leurs combinaisons possibles les différentes caractéristiques optionnelles exposées ici.

Description des figures

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront encore au travers de la description qui suit d'une part, et de plusieurs exemples de réalisation donnés à titre indicatif et non limitatif en référence aux dessins schématiques annexés d'autre part, sur lesquels :

- la FIGURE 1 est un graphique illustrant le phénomène de saturation d'une machine électrique rotative fonctionnant en mode alternateur ;
- la FIGURE 2 illustre un procédé d'estimation du courant de saturation conforme au premier aspect de l'invention ;
- la FIGURE 3 illustre un procédé d'estimation d'un courant de sortie d'une machine électrique rotative fonctionnant en mode saturé ou non saturé ;
- la FIGURE 4 est un graphique illustrant une l'évolution de la vitesse d'amorçage d'une machine électrique rotative fonctionnant en mode alternateur, en fonction du courant d'excitation et de la tension de sortie ;

- la FIGURE 5 est un graphique illustrant une caractérisation d'un courant de sortie de la machine électrique rotative fonctionnant en mode alternateur, en fonction de la vitesse de rotation de la machine électrique rotative, du courant d'excitation et de la tension de sortie ;

- la FIGURE 6 au travers d'un schéma de principe un exemple de réalisation d'un module électronique mettant en œuvre le procédé d'estimation du courant de sortie illustré sur la FIGURE 5.

Bien entendu, les caractéristiques, les variantes et les différentes formes de réalisation de l'invention peuvent être associées les unes avec les autres, selon diverses combinaisons, dans la mesure où elles ne sont pas incompatibles ou exclusives les unes des autres. On pourra notamment imaginer des variantes de l'invention ne comprenant qu'une sélection de caractéristiques décrites par la suite de manière isolées des autres caractéristiques décrites, si cette sélection de caractéristiques est suffisante pour conférer un avantage technique ou pour différencier l'invention par rapport à l'état de la technique antérieur.

En particulier toutes les variantes et tous les modes de réalisation décrits sont combinables entre eux si rien ne s'oppose à cette combinaison sur le plan technique.

Sur les figures, les éléments communs à plusieurs figures conservent la même référence.

Description détaillée de l'invention

La FIGURE 1 illustre une courbe caractéristique d'une machine électrique rotative fonctionnant en mode alternateur, et dans laquelle la densité de flux magnétique B est représentée en fonction du champ magnétique H mesuré dans ladite machine électrique rotative.

Pour des champs magnétiques H faibles, c'est-à-dire pour de faibles courants d'excitation de la machine électrique rotative, la densité de flux magnétique B croit linéairement 305 dans le rotor de la machine électrique rotative. En revanche, lorsque le courant du rotor de la machine électrique rotative augmente de manière importante, il apparait un phénomène de saturation magnétique 310 dudit rotor, et la densité de flux magnétique B reste constante ou sensiblement constante malgré l'augmentation du champ magnétique H dans le rotor.

En d'autres termes, et comme visible sur la FIGURE 1, la densité de flux magnétique B comprend une zone de croissance linéaire 305 pour des valeurs faibles de champ magnétique H, et une zone de croissance asymptotique 300 dans laquelle apparait le phénomène de saturation magnétique 310, pour des valeurs fortes de champs magnétique H. Ainsi, dans la zone de croissance linéaire 305, la densité de flux magnétique B en fonction du champ magnétique H prend la forme d'une droite 303

de pente non nulle ; et dans la zone de saturation magnétique 310, la densité de flux magnétique B en fonction du champ magnétique H prend la forme d'une asymptote horizontale 300 correspondant à une valeur maximale 302 de la densité de flux magnétique B.

On peut ainsi considérer que, en deçà d'un champ magnétique seuil 301, la densité de flux magnétique B croit linéairement, et au-delà du champ magnétique seuil 301, la densité de flux magnétique B est constante à une valeur maximale 302.

La FIGURE 2 illustre un procédé 510 d'estimation du courant de saturation 515 d'une machine électrique rotative fonctionnant dans un régule de saturation à partir de la vitesse de rotation 512 de ladite machine électrique rotative et du courant d'excitation 511. Le procédé 510 d'estimation du courant de saturation 515 est conforme au premier aspect de l'invention et il est destiné à permettre la régulation d'une machine électrique rotative, via une unité de contrôle moteur 700 par exemple. Tel que décrit précédemment, un tel courant de saturation apparait par exemple durant des phases de freinage régénératif pendant lesquelles la machine électrique rotative est utilisée en mode alternateur afin de convertir le plus efficacement possible l'énergie cinétique du véhicule automobile en énergie électrique.

Conformément au premier aspect de l'invention, le procédé d'estimation du courant de saturation 515 comprend les étapes suivantes :

- détermination d'un nombre représentatif du courant d'excitation i_{exc} de la machine électrique rotative par le biais d'une commande de puissance ;
- détermination d'un nombre représentatif de la vitesse de rotation ω de la machine électrique rotative par le biais d'une mesure de période de la commande de puissance de ladite machine électrique ;
- détermination d'un gain $K(\omega)$ en fonction de la vitesse de rotation ω de la machine électrique rotative : $K(\omega) = \frac{I_{Smax}}{I_{exmax}}$;
- détermination d'un mode de saturation $S(\omega)$ en fonction de la vitesse de rotation ω de la machine électrique rotative et du courant d'excitation i_{exc} ;
- estimation du courant de saturation i_{sat} par le produit du gain $K(\omega)$ par une fonction de régression f de la saturation $S(\omega)$: $i_{sat} = K(\omega) \times \left(i_{exc} - f\left(S(\omega)\right)\right)$.

De manière avantageuse, le gain K et la saturation S sont estimés par une régression linéaire prenant la forme suivante :

- si la vitesse de rotation ω de la machine électrique rotative est inférieure à une valeur seuil, par exemple égale à environ 2500 tours par minutes, alors le gain K est défini par : $K(\omega) = a_1 \times \omega + b_1$, où a_1 et b_1 sont respectivement des premières valeurs de gain et d'ordonnée à l'origine pour le gain K ; et la saturation S est définie par $S(\omega) = c_1 \times \omega + d_1$, où c_1 et d_1 sont respectivement des premières valeurs de gain et d'ordonnée à l'origine pour la saturation S ;
- si la vitesse de rotation ω de la machine électrique rotative est supérieure à la valeur seuil, alors le gain K est défini par : $K(\omega) = a_2 \times \omega + b_2$, où a_2 et b_2 sont respectivement des deuxièmes valeurs de gain et d'ordonnée à l'origine pour le gain K ; et la saturation S est définie par $S(\omega) = c_2 \times \omega + d_2$, où c_2 et d_2 sont respectivement des deuxièmes valeurs de gain et d'ordonnée à l'origine pour la saturation S.

Et de manière avantageuse, la fonction f de la saturation S est préférentiellement du type d'une fonction tangente, telle que par exemple une fonction arctangente ou tangente hyperbolique.

Dans ce régime de fonctionnement, le courant de sortie de la machine électrique correspond au courant de saturation ainsi déterminé. Il est ainsi possible de déterminer le courant de sortie de la machine électrique rotative sans ajout de capteurs supplémentaires, mais par une analyse et une méthode d'estimation qui prend en compte certaines variables de fonctionnement de la machine électrique rotative.

Cependant, d'une manière plus générale, il est possible d'inclure l'estimateur de courant de saturation dans un estimateur de courant de sortie de la machine électrique rotative et valable pour n'importe quel mode de fonctionnement de ladite machine électrique rotative, afin d'améliorer la précision dudit estimateur et de permettre un fonctionnement selon plusieurs régimes de fonctionnement. Ce cas de figure est particulièrement adapté dans le domaine de l'automobile où une machine électrique rotative fonctionnant en mode alternateur peut, la plupart du temps, fonctionner dans son régime de fonctionnement non saturé, mais aussi, lors des phases de freinage par exemple, fonctionner dans le régime de saturation magnétique afin de convertir l'énergie cinétique du véhicule automobile en énergie électrique, tel que décrit précédemment. Ainsi, à l'aide d'un seul estimateur, les deux régimes de fonctionnement peuvent être observés à l'aide d'estimateurs, voire même régulés à l'aide d'un procédé d'estimation et de régulation du couple de sortie de la machine électrique rotative.

À cet effet, la FIGURE 3 illustre un procédé 500 d'estimation d'un courant de sortie 525 d'une machine électrique rotative pouvant fonctionner en mode saturé ou non saturé, ledit procédé comprenant :

- une première étape de détermination d'un courant de saturation 515 selon le procédé décrit précédemment et à partir d'une vitesse de rotation 512 et d'un courant d'excitation 511 de la machine électrique rotative ;

- une deuxième étape 530 de détermination de la vitesse d'amorçage 535 de la machine électrique rotative selon le procédé décrit en référence à la FIGURE 4, à partir d'une tension de sortie de la machine électrique rotative 531 et de son courant d'excitation 532 ;

- une troisième étape 520 de détermination du courant de sortie 525 de la machine électrique rotative et décrit plus en détail en référence à la FIGURE 5.

Ainsi, le courant de sortie 525 de la machine électrique rotative est déterminé à l'aide d'un procédé qui permet de prendre en compte à la fois le mode de fonctionnement non saturé de la machine électrique rotative, c'est-à-dire dans le régime de variation linéaire de la densité de flux magnétique par rapport à une variation du champ magnétique tel qu'illustré dans la FIGURE 1, et le mode de saturation magnétique, tel que décrit précédemment en référence à la FIGURE 2. Ce procédé d'estimation du courant de sortie est ainsi plus complet et plus versatile quant aux modes de fonctionnements de la machine électrique rotative, tel que décrit précédemment.

La FIGURE 4 illustre l'évolution de la vitesse d'amorçage ω_0 d'une machine électrique rotative fonctionnant en mode alternateur en fonction du courant d'excitation i_{exc} et de la tension de sortie U_{ALT} de ladite machine électrique rotative, tel que mis en œuvre dans la deuxième étape 530 du procédé de détermination du courant de sortie illustré sur la FIGURE 3.

La FIGURE 4 illustre ainsi deux courbes 100a, 100b caractérisant la vitesse d'amorçage ω_0 d'une machine électrique rotative fonctionnant en mode alternateur en fonction du courant d'excitation i_{exc} :

- la première courbe caractéristique 100a illustre la réponse de la machine électrique rotative lorsque la tension de sortie U_{ALT} produite par la machine électrique rotative fonctionnant en mode alternateur est égale à 13V ;

- la deuxième courbe caractéristique 100b illustre la réponse de la machine électrique rotative lorsque la tension de sortie U_{ALT} produite par la machine électrique rotative fonctionnant en mode alternateur est égale à 14V.

On constate que la vitesse d'amorçage ω_0 diminue lorsque le courant d'excitation i_{exc} croit et lorsque la tension de sortie U_{ALT} décroit. Plus particulièrement, chaque courbe caractéristique 100a, 100b décroit de manière monotone jusqu'à attendre une valeur asymptotique 102a, 102b inférieure à la valeur de la vitesse d'amorçage initiale 101a, 101b obtenue pour un courant d'excitation i_{exc} nul.

Il est ainsi possible de déterminer la vitesse d'amorçage ω_0 de la machine électrique rotative fonctionnant en mode alternateur en :

- déterminant un nombre représentatif du courant d'excitation i_{exc} de la machine électrique rotative ;
- déterminant un nombre représentatif de la tension de sortie d'alternateur U_{ALT} ;
- déterminant un nombre représentatif de la vitesse d'amorçage ω_0 en fonction des nombres représentatifs du courant d'excitation i_{exc} et de la tension de sortie d'alternateur U_{ALT}.

Plus particulièrement, la vitesse d'amorçage ω_0 de la machine électrique rotative peut être calculée à partir de la formule suivante :

$$\omega_0 = \omega_{init} - \left[y \times \mathrm{f}\left(\frac{i_{exc}}{z}\right)\right] \quad ; \quad y = (a \times U_{ALT} + b)$$

où ω_{init} est une constante représentant une vitesse d'amorçage initiale pour une valeur sensiblement nulle du courant de sortie de l'induit i_s, y est une fonction de régression linéaire d'une modulation de l'amplitude de la vitesse d'amorçage ω_0 en fonction de la tension de sortie de l'alternateur (U_{ALT}), a est un coefficient directeur de y, b est une ordonnée à l'origine de y, Z est un facteur d'échelle et f une fonction.

De manière avantageuse, le calcul de la vitesse d'amorçage ω_0 est amélioré si la fonction f est prise comme étant dépendant du terme tangente. Plus particulièrement, la fonction f peut être du type d'une tangente hyperbolique ou d'une arctangente, et la vitesse d'amorçage ω_0 de la machine électrique rotative prend alors la forme suivante :

$$\omega_0 = \omega_{init} - \left[y \times \tanh\frac{i_{exc}}{z}\right] \quad \text{ou} \quad \omega_0 = \omega_{init} - \left[y \times \tan^{-1}\frac{i_{exc}}{z}\right]$$

La FIGURE 5 illustre une caractérisation d'un courant de sortie i_S par une machine électrique rotative fonctionnant en mode alternateur, en fonction de la vitesse de rotation ω de la machine électrique rotative, du courant d'excitation i_{exc} et de la tension de sortie $U_{ALT,}$ tel que mis en œuvre dans la troisième étape 520 du procédé de détermination du courant de sortie illustré sur la FIGURE 3.

La FIGURE 5 illustre deux courbes caractéristiques 200a, 200b d'une machine électrique rotative, obtenues en pilotant ladite machine électrique rotative selon une pluralité de points de fonctionnements différents. En d'autres termes, pour différents couples de valeurs de $\{i_{exc}$; $U_{ALT}\}$, le courant de sortie i_S de la machine électrique rotative est mesuré pour une pluralité de vitesses de rotation ω.

La première courbe caractéristique 200a illustre la réponse de la machine électrique rotative lorsque le courant d'excitation est fourni par une alimentation externe, séparée, via une excitation séparée. Dans ce cas, i_{exc} = 5A et U_{ALT} = 14V.

La deuxième courbe caractéristique 200b illustre la réponse de la machine électrique rotative montée sur un véhicule automobile. Dans ce cas, i_{exc} = 5A et U_{ALT} = 14V.

On constate ainsi que pour de faibles valeurs de vitesses de rotation ω, la machine électrique rotative ne débité aucun courant. En revanche, à partir d'une valeur seuil 201a, 201b, dite vitesse d'amorçage ω_0, la machine électrique rotative débite un courant de sortie i_S non nul.

Au-delà de la vitesse d'amorçage ω_0, le courant de sortie i_S croit de manière monotone, avec une accélération décroissante, jusqu'à atteindre une valeur asymptotique 202a, 202b pour une vitesse de rotation maximal 203 de la machine électrique rotative.

Il est possible de déterminer le courant de sortie i_S d'une telle machine électrique rotative fonctionnant en mode alternateur en :

- déterminant un nombre représentatif d'une vitesse de rotation ω de la machine électrique rotative ;
- déterminant le courant de sortie i_S en fonction du nombre représentatif de la vitesse de rotation ω, du courant de saturation i_{SAT} déterminé à l'aide du procédé illustré en référence à la FIGURE 3 et du nombre de la vitesse d'amorçage ω_0 à l'aide des formules caractéristiques illustrées à la FIGURE 4.

Le courant de sortie i_S peut être avantageusement calculé à partir des étapes suivantes :

- récupération du nombre représentatif du courant d'excitation i_{exc} de la machine électrique rotative déterminé lors du procédé d'estimation de la vitesse d'amorçage ω_0 tel que décrit précédemment ;
- détermination d'un nombre représentatif de la vitesse de rotation ω de la machine électrique rotative ;
- récupération du courant de saturation i_{SAT} déterminé à l'aide du procédé illustré en référence à la FIGURE 2 ;
- détermination d'un gain K représentant le rapport entre i_S_max et i_{exc}_max : $K = \frac{i_S max}{i_{exc} max}$ à une vitesse de rotation maximum ω_{max} de la machine électrique rotative ;
- estimation d'un nombre représentatif du courant de sortie i_S :

- si $\omega < \omega_0$ alors $i_S = 0$;
- sinon $i_S = K \times i_{exc} \times g\left(\frac{\omega-\omega_0}{X}\right)$;

où ω_0 est la vitesse d'amorçage obtenue par le procédé d'estimation de la vitesse d'amorçage ω_0 tel que décrit précédemment, X est un facteur d'échelle et g une fonction.

De manière avantageuse, la précision du calcul du courant de sortie i_S est améliorée si la fonction g est prise comme étant dépendant du terme tangente. Plus particulièrement, la fonction g peut être du type d'une tangente hyperbolique ou d'une arctangente, et la vitesse d'amorçage ω_0 de la machine électrique rotative prend alors la forme suivante :

$$\begin{cases} si\ \omega < \omega_0 \text{ alors } i_S = 0 \\ \text{sinon } i_S = K \times i_{exc} \times \tanh\dfrac{\omega-\omega_0}{X} \quad ou \quad i_S = K \times i_{exc} \times \tan^{-1}\dfrac{\omega-\omega_0}{X} \end{cases}$$

La détermination du courant de sortie à l'aide de l'estimateur permet consécutivement de réaliser une limitation du courant de sortie i_S d'une machine électrique rotative en :

- estimant du courant de sortie i_S de la machine électrique rotative à l'aide du procédé d'estimation du courant de sortie i_S tel que décrit précédemment, ledit procédé prenant en compte l'estimation du courant de saturation de la machine électrique rotative ;
- si le courant de sortie i_S estimé de la machine électrique rotative est supérieur à une valeur seuil de courant de sortie prédéfinie i_{seuil}, réduction du courant d'excitation i_{exc}.

Ce procédé de limitation du courant de sortie i_S se base ainsi sur l'estimateur du courant de sortie i_S ainsi que sur l'estimateur de la vitesse d'amorçage ω_0 et l'estimateur de courant de saturation i_{sat} tels que définis précédemment pour réguler de manière plus précise la machine électrique rotative, et ce quel que soit son régime de fonctionnement – saturé ou non-saturé. En particulier, et sans ajout supplémentaire de capteurs difficiles à intégrer dans le domaine automobile par exemple, il est possible à l'aide du procédé de limitation de contrôler la charge électrique de la machine électrique rotative sur le réseau électrique sur lequel elle est embarquée.

Consécutivement, il est ainsi possible d'estimer de manière plus précise le couple de sortie C_{ALT} de la machine électrique rotative à l'aide de la formule suivante :

$$C_{alt} = (U_{ALT} \times is)\ /\omega$$

Alternativement, il est possible de prendre en compte le rendement η de la machine électrique rotative pour déterminer le couple de sortie :

$$C_{alt} = \frac{U_{alt} \times i_S}{\eta \times \omega}$$

La FIGURE 6 illustre un schéma de principe d'un module électronique 600 permettant de contrôler le couple de sortie C_{ALT} d'une machine électrique rotative.

Le module électronique comprend des moyens de mesure et/ou de détermination 614 de trois variables de fonctionnement de la machine électrique rotative :

- des moyens de mesure et/ou d'estimation de la tension d'alimentation 615 agencés pour mesurer et/ou estimé la tension d'alimentation B+ du système électrique dans lequel la machine électrique rotative est embarquée. Dans le cas d'une utilisation dans le domaine automobile, il peut s'agir par exemple du réseau de bord ;
- des moyens de mesure et/ou d'estimation du courant d'excitation 616 ;
- des moyens de mesure et/ou d'estimation de la vitesse de rotation 617 de la machine électrique rotative. En particulier, il est avantageux de déterminer la vitesse de rotation du rotor de la machine électrique rotative à partir d'au moins une mesure sur un signal électrique de commande de ladite machine électrique, c'se-à-dire d'au moins une phase électrique.

Les trois variables d'entrée sont ensuite utilisées pour estimer la valeur d'un courant de sortie 619 de la machine électrique selon le procédé décrit précédemment.

Le courant de sortie 619 estimé, la tension d'alimentation 615 de la machine électrique rotative et sa vitesse de rotation 617 sont ensuite traités par un estimateur de couple de sortie 618 agencé pour déterminer le couple de sortie 621 de la machine électrique rotative tel que décrit précédemment.

En particulier, l'estimateur de couple de sortie 618 comprend :

- des étages d'amplification et de filtrage 620 pour chacune des variables d'entrées mesurées et/ou déterminées par les moyens de mesure et/ou de détermination 614 ;
- un multiplicateur 621 configuré pour combiner les résultats de mesure et/ou de d'estimation amplifiés et filtrés par les étages d'amplification et de filtrage 620 pour, en prenant en compte le rendement η de la machine électrique rotative, déterminer le couple de sortie estimé de ladite machine électrique rotative et tel que décrit précédemment ;
- un soustracteur 622 permettant de déterminer l'écart entre le couple de sortie de la machine électrique rotative et tel qu'estimé à l'étape précédente et une consigne de couple C_{seuil}

représentant une valeur seuil de couple de sortie telle que décrite précédemment permettant de déclencher une régulation du courant d'excitation si le coupe de sortie estimé dépasse cette valeur seuil, tel que décrit précédemment ;

- un moyen de mise en forme et/ou de conditionnement du signal 623.

La sortie 624 de l'estimateur de couple de sortie 618 de la machine électrique rotative est appliquée à un dispositif 625 configuré pour limiter le courant d'excitation de ladite machine électrique rotative et tel que décrit précédemment.

En particulier, le dispositif 625 est configuré pour limiter le rapport cyclique variable élaboré par le régulateur de tension 626 de la machine électrique rotative à un rapport cyclique maximum DC_C_LIMIT au moyen par exemple d'un gabarit de limitation du rapport cyclique 627 lorsque l'estimation du couple de sortie C_{ALT} est supérieure à la valeur seuil de couple de sortie C_{seuil}.

Ainsi le générateur de signaux 628 pilotant le courant d'excitation de la machine électrique rotative fournit :

- des signaux PWM dont le rapport cyclique variable est déterminé par le régulateur de tension 626 de manière à maintenir la tension d'alimentation B+ à la tension de consigne B_REF quand l'estimation du couple de sortie C_{ALT} de la machine électrique rotative est inférieure à la valeur seuil de couple de sortie C_{seuil} ; et
- des signaux PWM présentant un rapport cyclique maximum DC_C_LIMIT quand un fort appel de charge sur le réseau électrique de bord entraînerait, s'il n'était contrôlé, un couple de sortie C_{ALT} de la machine électrique rotative supérieur à la valeur seuil de couple de sortie C_{seuil}.

Les traitements analogiques et/ou numériques des variables d'entrées délivrées par les moyens de mesure et/ou d'estimation 614, l'estimateur de couple de sortie 618 et le dispositif 625 peuvent être mis en œuvre par programme au moyen de routines supplémentaires implémentés avantageusement dans des mémoires de microprocesseurs ou de microcontrôleurs que comprennent les dispositifs de régulation des alternateurs modernes standard. Ces traitements peuvent aussi être implémentés en logique numérique (de type ASIC) ou programmable (FPGA, CPLD).

En synthèse, l'invention concerne un procédé de détermination d'un courant de saturation d'une machine électrique rotative fonctionnant dans un mode alternateur d'une part, et selon un régime de saturation magnétique d'autre part, afin de transformer le plus efficacement possible une énergie cinétique d'un véhicule automobile en situation de freinage en une énergie électrique destinée à être stockée dans des batteries. À cet effet, le procédé de détermination du courant de saturation vise à

modéliser le comportement de la machine électrique rotative afin de limiter le nombre de capteurs à implémenter sur le véhicule automobile.

Bien sûr, l'invention n'est pas limitée aux exemples qui viennent d'être décrits et de nombreux aménagements peuvent être apportés à ces exemples sans sortir du cadre de l'invention. Notamment, les différentes caractéristiques, formes, variantes et modes de réalisation de l'invention peuvent être associées les unes avec les autres selon diverses combinaisons dans la mesure où elles ne sont pas incompatibles ou exclusives les unes des autres. En particulier toutes les variantes et modes de réalisation décrits précédemment sont combinables entre eux.

Revendications

1. Procédé d'estimation d'un courant de saturation (i_{sat}) d'une machine électrique rotative ayant au moins un mode alternateur et pour fonctionner dans un régime de saturation, à partir d'un courant d'excitation (i_{exc}) et d'une vitesse de rotation (ω) de ladite machine électrique rotative, le procédé d'estimation du courant de saturation comprenant les étapes suivantes :

- détermination d'un nombre représentatif du courant d'excitation (i_{exc}) de la machine électrique rotative à chaque instant t;
- détermination d'un nombre représentatif de la vitesse de rotation (ω) de la machine électrique rotative à chaque instant t détermination d'un gain ($K(\omega)$) en fonction de la vitesse de rotation (ω) de la machine électrique rotative : $K(\omega)$;
- détermination d'un mode de saturation (S(w)) en fonction de la vitesse de rotation (ω) de la machine électrique rotative et du courant d'excitation (i_{exc}) ;
- estimation du courant de saturation (i_{sat}) par le produit du gain ($K(\omega)$) par une fonction de régression (f) de la saturation (S(w)) : $i_{sat} = K(\omega) \times \left(i_{exc} - f\left(S(\omega)\right)\right)$.

2. Procédé d'estimation du courant de saturation (i_{sat}) selon la revendication 1, caractérisé en ce que le courant de saturation (i_{sat}) est choisi parmi des valeurs préenregistrées durant un étalonnage de la machine électrique rotative.

3. Procédé d'estimation du courant de saturation (i_{sat}) selon la revendication 1, caractérisé en ce que le gain ($K(\omega)$) est calculé par une régression linéaire de la vitesse de rotation (ω) de la machine électrique rotative du type $K(\omega) = a \times \omega + b$ où a est un coefficient directeur de gain et b est une ordonnée à l'origine de gain.

4. Procédé d'estimation du courant de saturation (i_{sat}) selon la revendication précédente, caractérisé en ce que :

- si la vitesse de rotation (ω) de la machine électrique rotative est inférieure à une valeur seuil (w_{seuil}), alors le coefficient directeur de gain (a) et l'ordonnée à l'origine de gain (b) prennent respectivement une première valeur (a1, b1), et le gain ($K(\omega)$) est alors défini par $K(\omega) = a_1 \times \omega + b_1$;
- si la vitesse de rotation (ω) de la machine électrique rotative est supérieure à la valeur seuil (w_{seuil}), alors le coefficient directeur de gain (a) et l'ordonnée à l'origine de gain (b) prennent

respectivement une deuxième valeur (a2, b2), et le gain ($K(\omega)$) est alors défini par $K(\omega) = a_2 \times \omega + b_2$.

5. Procédé d'estimation du courant de saturation (i_{sat}) selon l'une quelconque des revendications 3 ou 4, caractérisé en ce que la saturation (S(w)) est calculée par une régression linéaire de la vitesse de rotation (ω) de la machine électrique rotative du type $S(\omega) = c \times \omega + d$ où c est un coefficient directeur de saturation et d est une ordonnée à l'origine de saturation.

6. Procédé d'estimation du courant de saturation (i_{sat}) selon la revendication précédente, caractérisé en ce que :

- si la vitesse de rotation (ω) de la machine électrique rotative est inférieure à la valeur seuil (w_{seuil}), alors le coefficient directeur de saturation (c) et l'ordonnée à l'origine de saturation (d) prennent respectivement une première valeur (c1, d1), et la saturation (S(w)) est alors défini par $S(\omega) = c_1 \times \omega + d_1$;
- si la vitesse de rotation (w) de la machine électrique rotative est supérieure à la valeur seuil (w_{seuil}), alors le coefficient directeur de saturation (c) et l'ordonnée à l'origine de saturation (d) prennent respectivement une deuxième valeur (c2, d2), et la saturation (S(w)) est alors défini par $S(\omega) = c_2 \times \omega + d_2$.

7. Procédé d'estimation du courant de saturation (i_{sat}) selon l'une quelconque des revendications 4 à 6, caractérisé en ce que la valeur seuil (w_{seuil}) est comprise entre 2000 et 3000 tours par minutes.

8. Procédé d'estimation du courant de saturation (i_{sat}) selon la revendication précédente, caractérisé en ce que la valeur seuil (w_{seuil}) est égale à 2500 tours par minutes.

9. Procédé d'estimation du courant de saturation (i_{sat}) selon l'une quelconque des revendications précédente, caractérisé en ce que la fonction de régression (f) de la saturation (S(w)) est dépendant du terme tangente.

10. Procédé d'estimation du courant de saturation (i_{sat}) selon la revendication 9, caractérisé en ce que la fonction de régression (f) de la saturation (S(w)) est du type d'une tangente hyperbolique, le courant de saturation (i_{sat}) étant défini par $i_{sat} = K(\omega) \times \tanh \frac{i_{exc}}{S(\omega)}$.

11. Procédé d'estimation du courant de saturation (i_{sat}) selon la revendication 9, caractérisé en ce que la fonction de régression (f) de la saturation (S(w) est du type d'une arctangente, le courant de saturation (i_{sat}) étant défini par $i_{sat} = K(\omega) \times \tan^{-1} \frac{i_{exc}}{S(\omega)}$.

12. Procédé d'estimation d'un couple résistant saturé (C_{sat}) d'une machine électrique rotative fonctionnant dans un régime de saturation, le procédé d'estimation du couple résistant saturé comprenant les étapes suivantes :

- estimation du courant de saturation (i_{sat}) à l'aide du procédé d'estimation du courant de saturation selon l'une quelconque des revendications précédentes ;
- détermination de la tension de sortie (U_{ALT}) de la machine électrique rotative ;
- estimation d'un nombre représentatif du couple résistant saturé (C_{sat}) de la machine électrique rotative par le produit du courant de saturation (i_{sat}) par la tension de sortie (U_{alt}) : $C_{sat} = \frac{U_{ALT} \times i_{sat}}{\omega}$.

13. Procédé d'estimation du couple résistant saturé (C_{sat}) de la machine électrique rotative selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le couple résistant saturé (C_{sat}) de la machine électrique rotative est défini par $C_{sat} = \frac{U_{alt} \times i_{sat}}{\eta \times \omega}$, où (η) est le rendement de la machine électrique rotative.

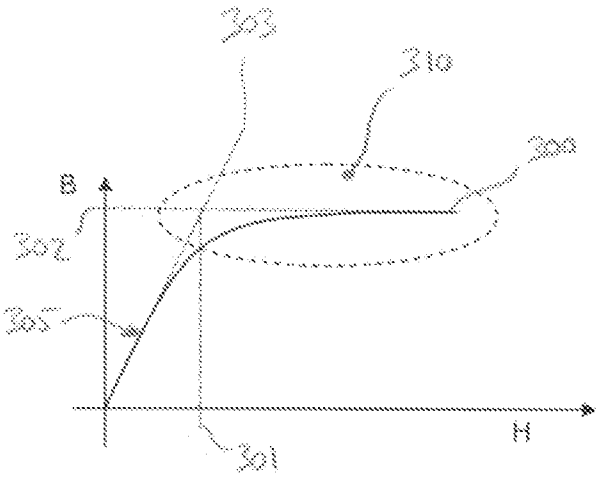

FIGURE 1

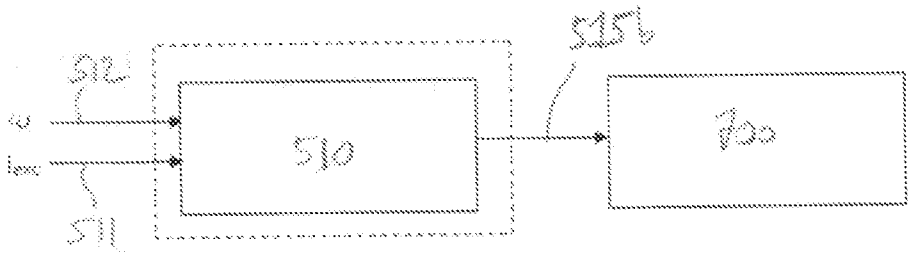

FIGURE 2

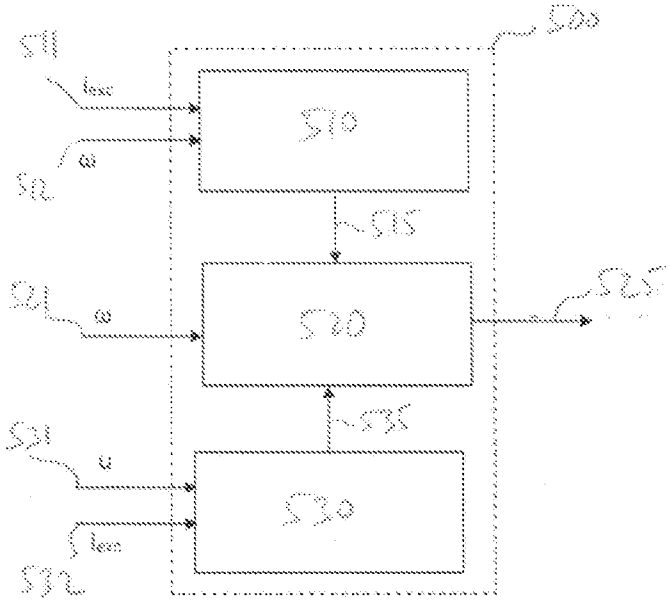

FIGURE 3

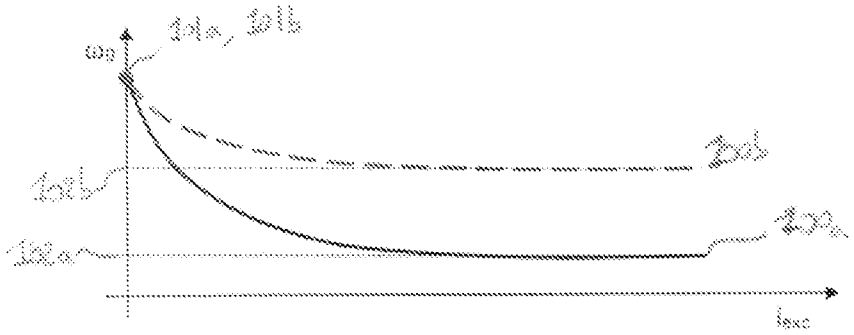

FIGURE 4

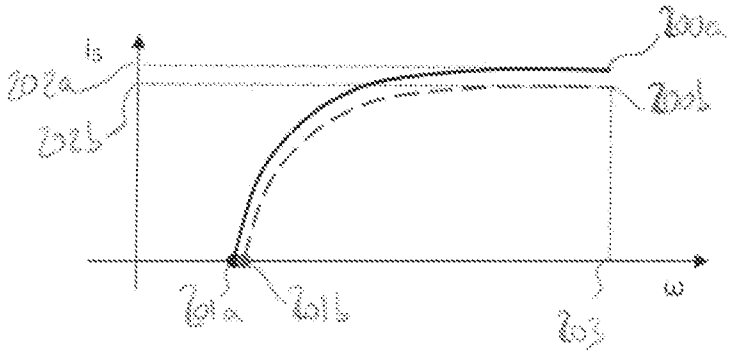

FIGURE 5

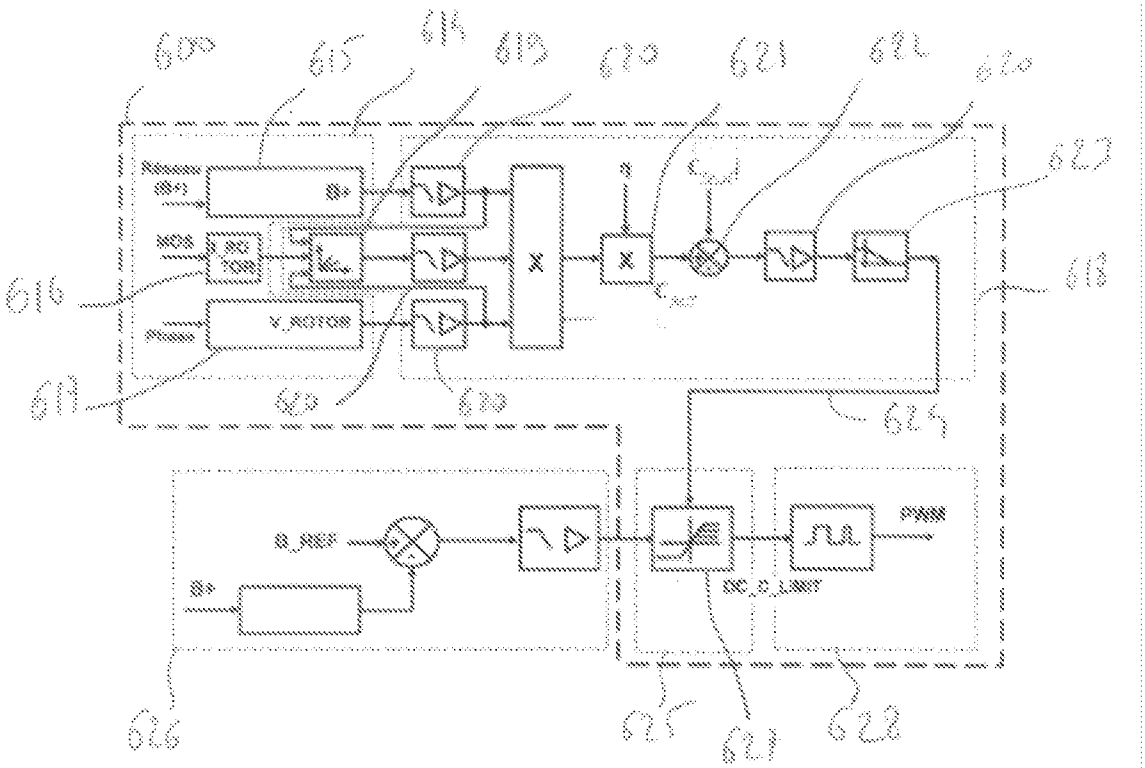

FIGURE 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2017/052978

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. H02P9/48 H02P23/14
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
H02P

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	FR 2 976 422 A1 (VALEO EQUIP ELECTR MOTEUR [FR]) 14 December 2012 (2012-12-14) cited in the application page 11, line 6 - page 12, line 10; figure 7	1-13
A	US 2006/267344 A1 (KURIBAYASHI MASARU [JP] ET AL) 30 November 2006 (2006-11-30) paragraph [0077] - paragraph [0078]; figure 11	1-13
A	FR 2 901 647 A1 (DENSO CORP [JP]; NIPPON SOKEN [JP]) 30 November 2007 (2007-11-30) page 17, line 3 - page 18, line 2; figure 2	1-13

-/--

[X] Further documents are listed in the continuation of Box C.

[X] See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
23 January 2018	06/02/2018

Name and mailing address of the ISA/	Authorized officer
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Hascher, Thierry

1

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (April 2005)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/FR2017/052978

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	FR 2 966 992 A1 (PEUGEOT CITROEN AUTOMOBILES SA [FR]) 4 May 2012 (2012-05-04) abstract; figure 3 -----	1-13

1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No
PCT/FR2017/052978

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
FR 2976422 A1	14-12-2012	CN 103703672 A	02-04-2014
		EP 2719070 A2	16-04-2014
		FR 2976422 A1	14-12-2012
		KR 20140037112 A	26-03-2014
		US 2014125296 A1	08-05-2014
		WO 2012168605 A2	13-12-2012
US 2006267344 A1	30-11-2006	CN 1842955 A	04-10-2006
		EP 1764899 A1	21-03-2007
		JP 2006025488 A	26-01-2006
		KR 20060061845 A	08-06-2006
		US 2006267344 A1	30-11-2006
		WO 2006003799 A1	12-01-2006
FR 2901647 A1	30-11-2007	DE 102007023650 A1	06-12-2007
		FR 2901647 A1	30-11-2007
		JP 4800839 B2	26-10-2011
		JP 2007318836 A	06-12-2007
		KR 20070113150 A	28-11-2007
		US 2008186000 A1	07-08-2008
FR 2966992 A1	04-05-2012	NONE	

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°
PCT/FR2017/052978

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
INV. H02P9/48 H02P23/14
ADD.

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)
H02P

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)
EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	FR 2 976 422 A1 (VALEO EQUIP ELECTR MOTEUR [FR]) 14 décembre 2012 (2012-12-14) cité dans la demande page 11, ligne 6 - page 12, ligne 10; figure 7	1-13
A	US 2006/267344 A1 (KURIBAYASHI MASARU [JP] ET AL) 30 novembre 2006 (2006-11-30) alinéa [0077] - alinéa [0078]; figure 11	1-13
A	FR 2 901 647 A1 (DENSO CORP [JP]; NIPPON SOKEN [JP]) 30 novembre 2007 (2007-11-30) page 17, ligne 3 - page 18, ligne 2; figure 2	1-13
A	FR 2 966 992 A1 (PEUGEOT CITROEN AUTOMOBILES SA [FR]) 4 mai 2012 (2012-05-04) abrégé; figure 3	1-13

☐ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent

"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date

"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)

"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens

"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

"X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

"Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

"&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale
23 janvier 2018	06/02/2018

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale	Fonctionnaire autorisé
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Hascher, Thierry

1

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°
PCT/FR2017/052978

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
FR 2976422 A1	14-12-2012	CN 103703672 A	02-04-2014
		EP 2719070 A2	16-04-2014
		FR 2976422 A1	14-12-2012
		KR 20140037112 A	26-03-2014
		US 2014125296 A1	08-05-2014
		WO 2012168605 A2	13-12-2012
US 2006267344 A1	30-11-2006	CN 1842955 A	04-10-2006
		EP 1764899 A1	21-03-2007
		JP 2006025488 A	26-01-2006
		KR 20060061845 A	08-06-2006
		US 2006267344 A1	30-11-2006
		WO 2006003799 A1	12-01-2006
FR 2901647 A1	30-11-2007	DE 102007023650 A1	06-12-2007
		FR 2901647 A1	30-11-2007
		JP 4800839 B2	26-10-2011
		JP 2007318836 A	06-12-2007
		KR 20070113150 A	28-11-2007
		US 2008186000 A1	07-08-2008
FR 2966992 A1	04-05-2012	AUCUN	