

(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
16 août 2012 (16.08.2012)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2012/107665 A2

(51) Classification internationale des brevets :
H02P 6/08 (2006.01) *H02P 25/08* (2006.01)
H02P 21/00 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2012/050187

(22) Date de dépôt international :
30 janvier 2012 (30.01.2012)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1151040 9 février 2011 (09.02.2011) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : **RENAULT S.A.S.** [FR/FR]; 13-15 quai Le Gallo, F-92100 Boulogne-Billancourt (FR).

(72) Inventeur; et

(75) Inventeur/Déposant (pour US seulement) : **DESHARNAIS, Sébastien** [FR/FR]; 3, quai Fernand Pouillon, F-78180 Montigny Le Bretonneux (FR).

(74) Représentant commun : **RENAULT S.A.S.**; 1, avenue du Golf, Service 00267 - TCR GRA 2 36, F-78288 Guyancourt (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, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, 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.

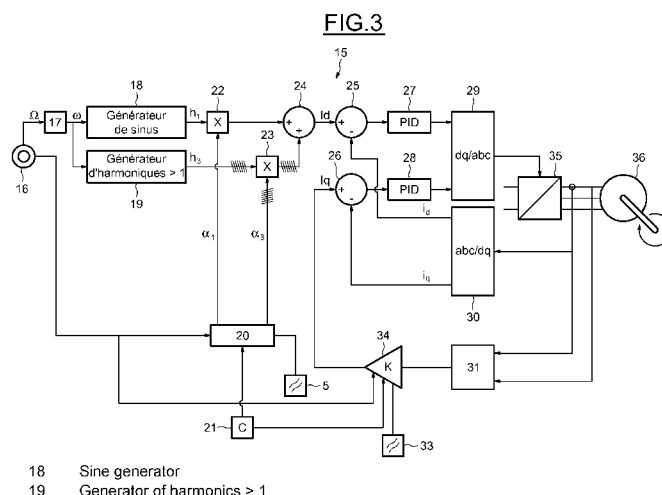
(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, 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, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport (règle 48.2.g))

(54) Title : METHOD AND DEVICE FOR CONTROLLING A RELUCTANCE ELECTRIC MACHINE

(54) Titre : PROCEDE ET DISPOSITIF DE PILOTAGE D'UNE MACHINE ELECTRIQUE A RELUCTANCE



(57) Abstract : In a method of controlling a reluctance polyphase electric machine (36), in particular an automobile motor, the currents injected into each coil of the stator of the machine (36) are deduced by a transformation of a pair (I_d , I_q) of excitation currents (I_d) and of armature current (I_q) defined in a reference frame (d, q) rotating with the rotor of the machine, such that: - the excitation current (I_d) is composed of a fundamental sinusoidal signal, to which are added successively other odd harmonics of increasing order when the torque setpoint of the machine increases, - the armature current (I_q) is a signal proportional to the estimated or measured electromotive force of the machine.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]

WO 2012/107665 A2



Dans un procédé de pilotage d'une machine électrique(36) polyphasée à réluctance, notamment d'un moteur pour véhicule auto-moblie, les courants injectés dans chaque bobine du stator de la machine(36) se déduisent par une transformation d'un couple (I_d, I_q) de courants d'excitation(I_d)et de courant d'armature (I_q) définis un repère (d, q) tournant avec le rotor de la machine, tels que: -le courant d'excitation(I_d)est composé d'un signal sinusoïdal fondamental, auquel s'ajoutent successivement d'autres harmoniques impairs d'ordre croissant quand la consigne de couple de la machine augmente, -le courant d'armature (I_q) est un signal proportionnel à la force électromotrice estimée ou mesurée de la machine.

Procédé et dispositif de pilotage d'une machine électrique à réluctance

5

L'invention a pour objet une méthode de pilotage de machine électrique, dite à réluctance synchrone, ainsi qu'une machine électrique équipée pour pouvoir être pilotée suivant cette méthode.

10

Une machine électrique à réluctance synchrone comporte une série de bobinages statoriques définissant des pôles de la machine, et un rotor en matériau ferromagnétique qui a été structuré par exemple par une série d'encoches, afin de faciliter l'établissement d'un champ magnétique à l'intérieur du rotor suivant certaines directions particulières.

15

Le rotor peut par ailleurs être constitué d'une structure feuilletée afin de limiter la circulation de courants électriques à l'intérieur du rotor.

20

De telles machines sont souvent moins coûteuses à réaliser que des machines dont le rotor comporte des bobinages ou des aimants permanents. Du mode de pilotage dépend en particulier le couple maximal que l'on peut obtenir pour une intensité de courant donnée.

25

En effet, la puissance mécanique développée par un moteur électrique est proportionnelle au produit du courant injecté dans les bobinages statoriques du moteur, par la force électromotrice induite dans ces bobinages par la rotation du rotor.

30

Or, la force électromotrice d'une machine électrique n'est pas toujours sinusoïdale. La force électromotrice d'une machine alimentée par un courant sinusoïdal est souvent carrée.

Afin d'optimiser la puissance ou le couple délivré par la machine, il faudrait pouvoir alimenter la machine par un courant de même profil que la force électromotrice. En injectant un courant sinusoïdal, on n'utilise que le fondamental de la force électromotrice, les autres harmoniques de la force électromotrice n'étant pas utilisés, et dégradant le facteur de puissance de la machine.

Dans le cas d'une machine à réluctance, la force électromotrice dépend non seulement de la vitesse de rotation du rotor, mais dépend également de la forme des courants injectés dans les bobinages.

5 Pour augmenter le couple délivré par la machine, on peut donc être tenté d'alimenter la machine avec des signaux de courant de forme rectangulaire. Un tel mode de pilotage pose cependant plusieurs problèmes :

- 10 - les pertes dites « pertes fer », correspondant à l'apparition de courant ne contribuant pas à la génération du couple, sont élevées dans le cas d'une alimentation par signaux de courant de forme rectangulaire,
- 15 - l'optimalité d'un signal de courant rectangulaire est relative car le champ magnétique le long de l'entrefer entre le rotor et le stator ne peut pas être exactement rectangulaire,
- 20 - un signal rectangulaire se décomposant en nombreux harmoniques, les interactions de ces différents harmoniques peuvent générer des vibrations et du bruit lors du fonctionnement du moteur.

A défaut d'exciter le moteur par un courant rectangulaire, certains documents comme la demande de brevet JP 61 00 1294 proposent d'injecter des signaux de courant harmoniques, en plus d'un signal de courant fondamental sinusoïdal, afin de générer plus de
25 puissance pour une tension donnée. Le brevet US 51 89 357 propose ainsi d'exciter une machine synchrone par un signal sinusoïdal auquel se superpose un harmonique de rang 3 du premier signal.

Le brevet US 66 74 262 propose d'injecter un signal complexe composé d'un fondamental et d'une série d'harmoniques dont
30 l'amplitude est déterminée par mise au point lors de la conception de la machine.

Les solutions proposées plus haut proposent un profil de courant injecté a priori, mais ne proposent pas de prendre en compte le profil réel du signal de force électromotrice. En outre, la forme du

signal de courant injecté est similaire pour les faibles couples comme pour les couples élevés, ce qui est susceptible de générer des pertes fer inutiles aux faibles couples, et, pour les amplitudes de courant plus importantes, de limiter le couple que peut fournir la machine.

5 L'invention a pour but d'améliorer le pilotage d'une machine électrique, notamment d'une machine électrique à réluctance, de façon à permettre à la fois de limiter les pertes fer aux faibles couples, et, pour une même amplitude maximale de courant autorisée par les circuits électriques d'alimentation, d'obtenir un couple ou une
10 puissance mécanique plus importante de la machine.

A cet effet, dans un procédé de pilotage d'une machine électrique polyphasée à réluctance, notamment d'un moteur pour véhicule automobile, les courants injectés dans chaque bobine du stator de la machine se déduisent par une transformation similaire
15 dans son principe à une transformation de type Concordia-Park d'un couple (I_d , I_q) de courants d'excitation I_d et de courant d'armature I_q définis un repère (d, q) tournant avec le rotor de la machine, tels que :

- le courant d'excitation (I_d) est composé d'un signal sinusoïdal fondamental, auquel s'ajoutent successivement d'autres harmoniques impairs d'ordre croissant quand la consigne de couple de
20 la machine augmente,

- le courant d'armature (I_q) est un signal proportionnel à la force électromotrice estimée ou mesurée de la machine.

Selon un mode de mise en œuvre préféré, quand la consigne de couple de la machine augmente, on augmente l'amplitude de
25 l'harmonique d'ordre le plus élevé parmi les harmoniques effectivement présents du courant d'excitation, jusqu'à ce que cette amplitude atteigne une amplitude seuil associée à l'ordre de l'harmonique, tout en gardant constante l'amplitude des harmoniques
30 d'ordre inférieur du courant d'excitation.

Quand la consigne de couple augmente encore et l'amplitude de l'harmonique d'ordre le plus élevé atteint l'amplitude seuil associée à l'ordre de l'harmonique, on ajoute au courant d'excitation un signal harmonique d'ordre supérieur.

Avantageusement, la composition du signal de courant d'excitation (I_d) est déterminée à partir d'une première cartographie reliant des couples de vitesse de rotation et de couple de consigne (N , C) de la machine, et des listes d'amplitudes à appliquer au
5 fondamental et aux différents harmoniques impairs composant le courant d'excitation (I_d).

De manière préférentielle, les amplitudes des harmoniques impairs sont choisies de manière à ce que le courant d'excitation I_d soit de plus en plus proche d'un signal rectangulaire au fur et à mesure
10 que la consigne de couple (C) augmente.

Selon un mode de mise en œuvre préférentiel, la pulsation (ω) du fondamental du signal d'excitation est égale à la pulsation (Ω) de la machine multipliée par le nombre de paires de pôles de la machine, et la vitesse de rotation du repère (d,q) dans lequel sont calculés le
15 courant d'excitation (I_d) et le courant d'armature (I_q) est égale à la vitesse de rotation du rotor de la machine.

La phase du signal d'excitation (I_d) est de préférence choisie de manière à ce que le signal (I_d) soit maximal quand un axe de réluctance minimale (d) du rotor de la machine est aligné avec l'axe
20 de l'une des bobines du stator de la machine. Par axe de réluctance minimale, on entend une des directions radiales du rotor suivant lesquelles le champ magnétique d'induction est localement maximal par rapport aux directions voisines pour un champ d'excitation donné.

Selon un mode de mise en œuvre possible, l'amplitude du
25 courant d'armature (I_q) est choisie de manière à ce qu'une valeur efficace du courant d'armature (I_q) soit égale à une valeur efficace (I_d) du courant d'excitation.

Selon un autre mode de mise en œuvre, l'amplitude du courant d'armature (I_q) est déterminée au moyen d'une deuxième cartographie
30 fonction du couple (C) de consigne de la machine et de la vitesse de rotation (N) de la machine.

Le procédé peut être appliqué au pilotage d'une machine électrique à réluctance à bobinage diamétral. La force électromotrice estimée de la machine est alors de préférence filtrée de manière à ne

comptabiliser que la force électromotrice auto-induite par chaque bobinage du stator, en excluant les termes d'inductions mutuelles entre les différents bobinages.

5 Le procédé peut également être appliqué au pilotage d'une machine électrique à réluctance à bobinage sur dents. Dans cette application, on exclut alors du signal (I_q) de courant d'armature, les harmoniques d'une fréquence de denture, la fréquence de denture étant égale au nombre de dents de bobinage multipliée par la fréquence de rotation du rotor de la machine.

10 Selon un autre aspect, l'invention a pour objet une machine électrique à réluctance équipée d'un moyen d'estimation de la position angulaire du rotor de la machine, d'un moyen de détermination de la force électromotrice de la machine, et d'une unité de commande. L'unité de commande est configurée pour calculer les courants à
15 injecter dans les différentes bobines du stator de la machine, par un changement de repère tournant à partir d'un premier signal de courant d'excitation, cartographié en fonction d'une consigne de couple de la machine et de la vitesse estimée de rotation du rotor, et à partir d'un second signal de courant d'armature proportionnel à la force
20 électromotrice estimée ou mesurée par le moyen de détermination.

Avantageusement, le moyen de détermination de la force électromotrice comprend un enroulement d'une ou de plusieurs spires conductrices non alimentées en courant électrique, bobinées de manière à être traversées par le même flux magnétique qu'une des
25 bobines du stator de la machine, l'enroulement étant équipé d'un capteur de la tension générée entre ses deux extrémités.

Une machine électrique selon l'invention peut ainsi être équipée d'un enroulement d'une ou de plusieurs spires conductrices non alimentées en courant électrique, bobinées de manière à être traversées par le même flux magnétique qu'une des bobines du stator
30 de la machine. Elle peut être alors équipée d'un capteur apte à mesurer la tension générée entre les deux extrémités de l'enroulement, et équipée d'une unité de commande configurée pour calculer les courants à injecter dans les différentes bobines du stator de la

5 machine, par un changement de repère tournant à partir d'un premier signal de courant d'excitation, cartographié en fonction d'une consigne de couple de la machine et de la vitesse estimée de rotation du rotor, et à partir d'un second signal de courant d'armature, proportionnel à une valeur filtrée de la tension entre les extrémités de l'enroulement.

De manière préférentielle, le capteur de tension aux bornes de l'enroulement est déporté ou est isolé électriquement par rapport à la partie de l'unité de commande calculant les courants à injecter.

10 La machine électrique ainsi équipée peut être une machine électrique à réluctance dont le bobinage du stator est un bobinage sur dents.

Suivant une autre variante de réalisation, la machine électrique ainsi équipée peut être une machine électrique à réluctance dont le bobinage du stator est un bobinage de type diamétral.

15 Une machine électrique à réluctance à bobinage sur dents, peut être équipée d'un moyen d'estimation de la position angulaire du rotor de la machine, équipée d'un enroulement d'une ou de plusieurs spires conductrices non alimentées en courant et bobinées de manière à être traversées par le même flux magnétique qu'une des bobines du stator de la machine, équipée d'un capteur apte à mesurer la tension générée entre les deux extrémités de l'enroulement, et équipé d'une unité de commande. L'unité de commande peut être configurée pour calculer les courants à injecter dans les différentes bobines du stator de la machine, par un changement de repère tournant à partir d'un premier signal de courant d'excitation, cartographié en fonction d'une consigne de couple de la machine et d'une vitesse estimée de rotation du rotor, et d'un second signal de courant d'armature proportionnel à une valeur filtrée de la tension entre les extrémités de l'enroulement.

20

25

30 L'unité de commande peut alors être configurée pour exclure du courant d'armature les fréquences multiples de la fréquence de denture, la fréquence de denture étant égale au nombre de dents de bobinage multipliée par la fréquence de rotation du rotor de la machine.

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

- 5 - la figure 1 illustre schématiquement la géométrie d'un rotor de machine à réluctance synchrone sinus,
- la figure 2 est un exemple de cartographie utilisée pour la méthode de pilotage selon l'invention,
- la figure 3 illustre schématiquement un dispositif
10 selon l'invention destiné à piloter un moteur à réluctance,
- la figure 4 illustre schématiquement un dispositif selon l'invention destiné à piloter un moteur à réluctance à bobinage sur dents,
- 15 - la figure 5 illustre un capteur utilisé dans le cadre d'une méthode de pilotage selon l'invention.

La figure 1 illustre une géométrie typique d'un rotor d'une machine à réluctance dite « machine à réluctance synchrone sinus ».

20 Le rotor est ici représenté dans un plan perpendiculaire à un axe z de symétrie axiale du rotor.

La masse du rotor 1, réalisée en matériau ferromagnétique, est entaillée par des entailles 2 définies par des portions de surfaces courbes de génératrices parallèles à l'axe z. Dans l'exemple illustré, les contours des entailles 2 sont définis par des portions de cylindre
25 centrées sur des axes extérieurs à la circonférence extérieure du rotor 1.

L'extrémité des entailles 2 approche, sans la rejoindre la circonférence extérieure du rotor 1. Les entailles 2 délimitent des directions de moindre réluctance suivant lesquelles un champ
30 magnétique induit à l'intérieur du rotor 1 tend à s'orienter. Un tel axe de réluctance minimal est par exemple repéré par l'axe 3, ou axe d, de la figure 1. Un axe q, référencé 4, perpendiculaire à la fois à l'axe d et à l'axe de révolution z, est également représenté sur la figure 1, de

manière à obtenir un repère orthonormé d, q, z . Le repère d, q , est centré sur l'axe de rotation du rotor.

5 L'interaction des champs magnétiques induits à l'intérieur du matériau ferromagnétique constituant le rotor 1, et du champ magnétique induit dans l'entrefer entre le rotor 1 et les bobines statoriques (non représentées) de la machine électrique (non représentée) permettent de créer le couple de rotation de la machine.

10 Dans le procédé de pilotage suivant l'invention, on définit les courants statoriques (I_d, I_q) à injecter dans les bobines d'une machine équivalente diphasée, représentant la machine réelle à nombre de phases quelconque supérieur à deux, moyennant un changement de repère. En outre, pour calculer les courants de la machine équivalente, on se place dans un repère tournant à la même vitesse que le rotor de la machine réelle (Changement de repère couramment désigné par
15 "transformée de Park"). Par abus de langage, le repère tournant, dans l'espace des courants, est assimilé au repère géométrique (d, q) lié au rotor, car les deux repères tournent à la même vitesse.

Les intensités de courant injectées dans chacune des bobines statoriques de la machine réelle sont donc déduites par un changement
20 de repère permettant de passer d'un système de courant à n phases, par exemple à trois phases, vers un système de courant diphasé (I_d, I_q), et inversement. Les valeurs de courant à injecter dans chacun des bobinages du stator sont ainsi définies dès que l'on a déterminé les deux signaux I_d et I_q du système bipolaire équivalent.

25 Les valeurs de courant I_d et I_q sont définies de la manière suivante. Le courant I_d , ou courant d'excitation, est défini a priori en fonction du domaine de fonctionnement (couple, vitesse de rotation) de la machine électrique, de manière à créer un champ magnétique initial dans le rotor 1. Pour les consignes de couple peu élevées, ce
30 courant d'excitation est un simple signal sinusoïdal dont la pulsation est égale à la pulsation de rotation du rotor, multipliée par le nombre de pôles de la machine électrique. L'avantage d'un tel signal sinusoïdal, par rapport à un signal rectangulaire, est de limiter les

pertes dites « pertes fer » liées au courant dissipatif engendré dans le rotor.

5 Au fur et à mesure que la consigne de couple augmente, on superpose des harmoniques impairs au premier signal fondamental, de manière à ce que le signal I_d se rapproche d'un signal rectangulaire. On peut ainsi obtenir un couple plus important fourni par la machine, par rapport au seul signal sinusoïdal, pour une même valeur maximale d'intensité transitant par les fils électriques.

10 En effet, les harmoniques de rang élevé génèrent davantage de pertes par courant de Foucault que les harmoniques de rang moins élevé, mais contribuent davantage à la conversion d'énergie électrique en couple, proportionnellement à leur amplitude, que les harmoniques de rang moins élevé.

15 La composition du signal d'excitation I_d peut être définie à partir des cartographies, tel qu'illustré sur la figure 2. La figure 2 illustre de manière simplifiée une cartographie 5 reliant un domaine bidimensionnel (d'axes la vitesse de rotation et le couple de la machine) à plusieurs familles de signaux d'excitation. Sur la cartographie 5 est représenté un axe des abscisses représentant la
20 vitesse de rotation de la machine électrique, c'est-à-dire la vitesse de rotation de son rotor par rapport au stator, et un axe des ordonnées représentant une consigne de couple de la machine.

25 Entre l'axe des abscisses, l'axe des ordonnées et une frontière 6 représentant les limites de fonctionnement de la machine, sont définis des domaines de fonctionnement 7, 8, 9, 10, 11, 12 correspondant chacun à une composition différente du signal d'excitation I_d .

30 Les domaines de fonctionnement 7, 8, 9, 10, 11, 12 sont définis à l'intérieur du domaine de fonctionnement limité par la frontière 6, le passage d'un domaine au domaine d'indice plus élevé se faisant soit en augmentant le couple de consigne, soit en augmentant la vitesse de rotation de la machine. Chacun de ces domaines est limité en partie supérieure par un plateau, respectivement 7a, 8a, 9a, 10a, 11a et 12a,

parallèle au plateau limitant 12a en partie supérieure le domaine de fonctionnement délimité par la frontière 6.

A l'intérieur du domaine 7, le signal d'excitation, noté h_1 de manière simplifiée, est sinusoïdal.

5 Par exemple, $I_d = h_1 = \alpha_1 \sin \omega t$

où ω est la pulsation de rotation du rotor multipliée par le nombre de pôles de la machine.

10 L'amplitude α_1 du signal h_1 croît en fonction du couple, entre le domaine des faibles couples voisins de l'axe des abscisses et la frontière supérieure du domaine 7. En partie supérieure, le domaine 7 est limité, aux valeurs modérées de vitesse, par un plateau 7a pour lequel l'amplitude α_1 atteint une valeur maximale α_{1m} .

Sur la partie droite de la frontière du domaine 7, l'amplitude α_1 peut éventuellement atteindre une valeur inférieure à α_{1m} .

15 La cartographie 5 représentée, ici de manière simplifiée attribue à chaque point défini par ses coordonnées (vitesse, couple) du domaine 7, une valeur α_1 .

20 Le domaine 8 représente un domaine de fonctionnement de la machine dans lequel le signal I_d injecté est composé d'un signal h_1 sinusoïdal, par exemple du signal h_1 correspondant aux points de même vitesse situés sur la frontière supérieure du domaine 7, et d'un signal h_3 qui est un signal harmonique d'ordre 3 du signal h_1 , d'amplitude α_3 , soit $h_3 = \alpha_3 \sin 3\omega t$.

25 La cartographie 5 attribue à chaque point (vitesse, couple) du domaine 8 un couple de valeur (α_1, α_3) représentant les amplitudes du signal fondamental et du signal harmonique d'ordre 3, composant le signal I_d .

30 Selon un mode de réalisation préféré, l'amplitude α_1 est constante sur chaque ligne verticale à l'intérieur du domaine 8, et l'amplitude α_3 est croissante avec le couple de consigne. L'amplitude α_1 peut avoir une valeur constante α_{1m} le long du plateau 7a définissant la frontière supérieure entre les domaines 7 et 8.

De manière similaire, la cartographie 5 définit pour chaque point (vitesse, couple) du domaine 9, un triplet de valeurs

d'amplitudes ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) permettant de définir un signal

$$Id = h_1 + h_3 + h_5 = \alpha_1 \sin \omega t + \alpha_3 \sin 3\omega t + \alpha_5 \sin 5\omega t.$$

5 A l'intérieur du domaine 10, un harmonique h_7 d'ordre 7, d'amplitude α_7 , vient s'ajouter aux harmoniques précédents. Un domaine 11, où le signal Id inclut un harmonique h_9 d'ordre 9, et un domaine 12 où le signal Id inclut un harmonique h_{11} d'ordre 11, peuvent être définis. Selon les modes de réalisation, il est bien sûr possible de limiter la composition de Id aux harmoniques d'ordre inférieur ou égal à 3, à 5, à 7 ou à 9.

10 Suivant une variante de réalisation, on peut définir une cartographie 5 simplifiée de la manière suivante :

Les domaines 7, 8, 9, 10, éventuellement 11 et 12, peuvent être limités uniquement par un plateau supérieur, respectivement 7a, 8a, 9a, 10a, 11a, 12a, à l'intérieur du domaine de fonctionnement délimité par la frontière 6. La hauteur du plateau 7a est donnée par l'amplitude maximale permise pour le courant injecté. Cette amplitude maximale définit une valeur α_{1m} du signal fondamental. A cette amplitude α_{1m} on associe des amplitudes $\alpha_{3m}, \alpha_{5m}, \dots$ de manière à ce que le signal $\alpha_{1m} \sin \omega t + \alpha_{3m} \sin 3\omega t + \alpha_{5m} \sin 5\omega t + \dots$ converge progressivement vers un signal rectangulaire au fur et à mesure que l'on ajoute les harmoniques d'ordre supérieur. Une fois que l'on a atteint la frontière supérieure du domaine 7a, on commence à ajouter l'harmonique de rang 3 avec une amplitude qui croît entre 0 au niveau de la frontière 7a et sa valeur maximale α_{3m} au niveau de la frontière 8a.

25 La hauteur du plateau 8a est définie par le couple que l'on peut obtenir à l'aide du signal $Id = \alpha_{1m} \sin \omega t + \alpha_{3m} \sin 3\omega t$.

Si la consigne de couple augmente à partir de la valeur du plateau 8a, on ajoute au signal Id une composante harmonique de rang 5 dont on fait croître l'amplitude jusqu'à la valeur du couple de consigne atteigne le plateau 9a. La hauteur du plateau 8a est définie par le couple que l'on peut obtenir à l'aide du signal $Id = \alpha_{1m} \sin \omega t + \alpha_{3m} \sin 3\omega t + \alpha_{5m} \sin 5\omega t$.

Une fois définie la forme du signal Id à l'aide de la cartographie 5, l'injection du courant d'excitation Id , retraduit par la

transformée en courant de phase pour chaque bobine de la machine électrique, engendre une force électromotrice (FEM). Cette force électromotrice est estimée afin d'injecter une seconde composante de courant I_q , ou courant d'armature, qui est en première approximation proportionnelle à cette forme électromotrice. Le courant d'armature I_q est le courant injecté sur la deuxième phase de la machine équivalente diphasée. I_q est le courant de cette machine équivalente suivant le deuxième axe du repère tournant de la transformation.

Ce courant d'armature I_q est construit de manière à avoir un profil similaire ou proportionnel à la force électromotrice de la machine, en éliminant au besoin les fréquences qui pourraient causer des instabilités du système de régulation.

La figure 3 illustre de manière schématique un dispositif 15 de pilotage d'une machine électrique à réluctance 36 selon l'invention. Une machine à réluctance 36 est munie d'un capteur 16 de position de son rotor. Le capteur de position 16 peut être un capteur de type inductif ou optique, et peut, suivant les variantes de réalisation, être remplacé par un estimateur de position apte à recalculer la position du rotor en fonction des courants et des tensions aux bornes des différentes bobines. Le capteur de position 16 permet de définir une pulsation Ω qui est égale à $2\pi \times N$, où N est le nombre de tours/seconde qu'effectue le rotor.

La pulsation Ω est convertie au niveau d'un estimateur 17 de pulsations électriques, en pulsations électriques ω , où ω est égal à Ω multiplié par le nombre de paires de pôles de la machine électrique 36. La pulsation électrique ω est ensuite envoyée sur un générateur de sinus 18 et sur un ou plusieurs générateurs d'harmoniques 19. Le générateur de sinus 18 génère un signal de type $\sin(\omega t)$ et le- ou les- générateurs d'harmoniques 19 génèrent chacun un harmonique du signal généré par le générateur de sinus 18. Un premier générateur d'harmoniques 19 peut ainsi délivrer un signal $\sin(3\omega t)$, un second générateur d'harmoniques 19 peut délivrer un signal $\sin(5\omega t)$, un troisième générateur d'harmoniques peut délivrer un signal $\sin(5\omega t)$.

Pour simplifier la figure, un seul générateur d'harmoniques a été représenté.

Des signaux du générateur de sinus 18 et du/des générateurs d'harmoniques 19 sont envoyés respectivement sur des multiplicateurs 22 et 23. Un sélectionneur de spectre d'excitation 20 reçoit en entrée une valeur représentative de la vitesse de rotation de la machine qui lui est transmise par le capteur de position de rotor 16, et reçoit également une valeur de consigne de couple C qui lui est transmise par un générateur de consigne de couple 21, qui prend en compte les commandes du conducteur ainsi que différentes stratégies d'optimisation de conduite du véhicule dont les roues motrices sont entraînées par la machine 36.

Le sélectionneur de spectre d'excitation 20 est relié à la cartographie 5 décrite en figure 2, et en fonction du couple de valeurs de vitesse de rotation et de consigne de couple (N,C) de la machine 36, délivre des valeurs α_1 , α_3 , α_5 , ... d'amplitudes qu'il envoie respectivement sur le multiplicateur 22 et sur le ou les multiplicateurs 23. Les sorties du multiplicateur 22 et du ou des multiplicateurs 23 sont envoyées sur un sommateur 24 dont la sortie est le courant d'excitation Id. Le courant d'excitation Id est envoyé sur l'entrée positive d'un soustracteur 25 dont la sortie est envoyée sur un régulateur PID 27. La sortie du régulateur PID 27 ainsi que la sortie d'un second régulateur PID 28 sont envoyées sur un traducteur 29. Le traducteur 29 convertit les deux valeurs issues des régulateurs 27 et 28, considérées comme des coordonnées de courant, dans le repère (d,q) tournant, de la machine diphasée équivalente, en trois valeurs représentant les courants alimentant chaque bobine de la machine 36 réelle, dans un repère abc associé aux trois phases des bobines réelles. Le traducteur 29 délivre ainsi une valeur de consigne par bobinage a, b, ou c de la machine 36, consigne qui est transformée en signal de courant d'alimentation par un onduleur 35. Un second traducteur 30 reçoit en entrée la valeur de courant entrant dans l'une des phases de la machine 36, en déduit, par transformation, les coordonnées de courant des trois phases dans le repère de courant triphasé fixe de la machine

réelle, et convertit ces valeurs en un couple de valeurs de courant (i_d , i_q) correspondant aux courants injectés dans la machine équivalente diphasée, respectivement suivant l'axe d et suivant l'axe q. Ces valeurs "mesurées" de courants de phase de la machine
5 équivalente, sont soustraites au niveau des soustracteurs 25 et 26, respectivement de deux valeurs de consignes I_d et I_q arrivant sur les entrées positives de ces deux soustracteurs, avant d'être renvoyées sur les régulateurs PID 27 et 28. L'élaboration du signal de consigne de courant d'excitation I_d a été décrite plus haut. L'élaboration du signal
10 de consigne de courant d'armature I_q se fait comme suit.

Un estimateur de force électromotrice 31 est branché aux bornes d'une des bobines de la machine 36. A partir de mesure de tension et/ou de courant aux bornes de cette bobine, l'estimateur de force électromotrice 31 estime la force électromotrice développée par
15 la machine 36. Suivant les variantes de réalisation, l'estimateur de force électromotrice peut être remplacé par un capteur de force électromotrice disposé en parallèle à l'une des bobines, de manière à mesurer directement le flux traversant la bobine. Le signal de force électromotrice estimé par l'estimateur 31 est envoyé sur un
20 amplificateur 34, qui est relié au capteur de position 16 et au générateur de consigne de couple 21. L'amplificateur 34 est relié à une cartographie 33 permettant de définir, à partir de la vitesse de rotation de la machine transmise par la capteur de position 16 et de la consigne de couple C transmise par le générateur de consigne de couple 21, une
25 amplitude $A(N, C)$ souhaitée pour le courant d'armature I_q .

L'amplificateur 34 multiplie le signal de force électromotrice de l'estimateur 31 par un coefficient adéquat de manière à obtenir un signal I_q dont l'amplitude est égale à la valeur $A(N, C)$ issue de la cartographie 33. Par amplitude du signal, on peut par exemple
30 entendre la valeur efficace du signal c'est-à-dire la moyenne sur une période du signal de la valeur absolue du signal. Suivant les modes de réalisations, d'autres manières de définir l'amplitude sont également possibles, par exemple une valeur moyenne du carré du signal sur une période.

Selon une variante de réalisation avantageuse, l'amplificateur 34 peut n'être relié ni au capteur de position 16 ni au générateur de consigne de couple 21, mais recevoir en entrée le signal I_d délivré à la sortie du sommateur 24. L'amplificateur 34 peut alors
5 être configuré pour calculer l'amplitude de ce signal I_d , l'amplitude de la force électromotrice issue de l'estimateur 31, et pour multiplier le signal de force électromotrice issue de l'estimateur 31 de manière à obtenir un signal I_q proportionnel à la force électromotrice, et d'amplitude égale à un multiple prédéfini du signal I_d de courant
10 d'excitation. Le multiple prédéfini peut par exemple prendre la valeur 1. Le signal I_q issu de l'amplificateur 34 est envoyé sur l'entrée positive du soustracteur 26.

On constate que le signal I_d de courant d'excitation est construit en boucle ouverte à partir de la cartographie 5, et le signal I_q
15 de courant d'armature est construit en boucle fermée à partir de l'estimation de force électromotrice mesurée sur la machine. Le couple de signaux (I_d , I_q) composent un signal résultant permettant de déterminer, moyennant la régulation par les régulateurs 27 et 28, les courants par lesquels l'onduleur 35 alimente chaque phase de la
20 machine 36.

Afin d'éviter des instabilités du système de régulation, l'estimateur 31 de force électromotrice peut être conçu de manière à éliminer du signal I_q d'éventuels termes d'inductance mutuelle entre les différentes bobines de la machine 36. Ces termes peuvent être
25 particulièrement importants dans le cas d'une machine à bobinage diamétral, où chaque bobine englobe un diamètre du stator, chaque bobine étant bobinée pour ainsi dire dans le prolongement d'une bobine voisine.

Dans le cas où la machine 36 est une machine à bobinage diamétral, l'estimateur de force électromotrice 31 sera de préférence
30 conçu de manière à transmettre à l'amplificateur 34, une valeur de force électromotrice dont auront été déduits les termes liés à l'inductance mutuelle entre les bobines. L'estimateur 31 peut par exemple mesurer le courant et la tension aux bornes d'une bobine a,

estimer la force électromotrice e_a liée à la bobine a, et en soustraire les termes d'inductance mutuelle $L_{ab} \frac{di_b}{dt}$ et $L_{ac} \frac{di_c}{dt}$,

où L_{ab} et L_{ac} sont les inductances mutuelles entre les bobines a et b et les bobines a et c,

5 i_b est le courant dans la bobine b et i_c est le courant dans la bobine c.

La figure 4 illustre de manière schématique un autre dispositif de pilotage suivant l'invention. On retrouve dans la figure 4 des éléments communs à la figure 3, les mêmes éléments portant alors les
10 mêmes références. La figure 4 illustre un dispositif spécialement adapté à une machine 37 à réluctance à bobinage sur dents. Dans le cas d'une machine à bobinage sur dents, les signaux de courant dont la fréquence est proportionnelle à une fréquence f_d dite « de denture » risquent de causer des instabilités du système de régulation. On
15 cherche donc à éliminer ces fréquences du signal I_q injecté comme courant d'armature.

La fréquence de denture est égale au nombre de dents de bobinage de la machine 37, multiplié par la vitesse N de rotation du rotor de la machine. Afin de ne rejeter que ces fréquences, le dispositif
20 de la figure 4 propose de procéder comme suit : le signal normalisé issu de l'amplificateur 34, proportionnel à la force électromotrice délivrée par l'estimateur 31, est envoyé sur un convertisseur FFT (Fast Fourier Transform) 38 qui extrait un spectre discret du signal issu de l'amplificateur 34.

25 Un générateur de fréquence de denture 40, qui reçoit en entrée la vitesse de rotation délivrée par le capteur de position 16, transmet la fréquence de denture, dont les harmoniques sont à éviter, à un filtre de fréquence 41. Le filtre de fréquence 41 reçoit en entrée le spectre délivré par le convertisseur FFT 38, en exclut la fréquence délivrée
30 par le générateur 40 ainsi que ses harmoniques, et envoie le spectre restant sur un générateur d'ondes 39, qui reconstruit ainsi un signal correspondant au signal délivré par l'amplificateur 34, débarrassé de la fréquence de denture ainsi que de ses harmoniques. Ce signal

reconstitué est envoyé sur l'entrée positive du sommateur 26, comme valeur de courant de consigne d'armature I_q .

5 L'utilisation du procédé de régulation selon l'invention afin de piloter une machine à réluctance à bobinage sur dents est particulièrement avantageuse. Le procédé permet d'obtenir des performances aux couples maximaux comparables à celles que l'on peut avoir pour une machine à bobinage diamétral, nettement plus coûteuse à réaliser. Aux faibles couples, le procédé permet de limiter les pertes de rendement par pertes fer.

10 La figure 5 illustre un capteur de force électromotrice spécialement adapté à l'invention et qui peut être utilisé en lieu et place de l'estimateur 31 des figures 3 et 4. Les estimateurs de force électromotrice couramment utilisés sont généralement basés sur des mesures de courant et de tension aux bornes d'une ou de plusieurs bobines de la machine. De tels estimateurs nécessitent de disposer d'un modèle fiable de la machine et nécessitent de dédier une certaine puissance de calcul à l'estimation de la force électromotrice.

15 Une solution alternative est d'estimer la force électromotrice associée à une bobine en mesurant directement le flux traversant la bobine. On peut envisager pour cela de placer un capteur de champ à l'intérieur de la bobine. Les capteurs locaux de champ, qui sont généralement des capteurs à effet Hall, sont coûteux et ne donnent qu'une image très locale du champ et/ou du flux magnétique à l'intérieur de la bobine.

25 Une variante préférée d'un dispositif selon l'invention propose de mettre en place comme illustré sur la figure 5 une ou plusieurs spires conductrices 51, qui sont bobinées lors de la fabrication du stator parallèlement à l'une des bobines du stator, mais ne sont pas par la suite alimentée en courant. Sur la figure 5, la spire 51 est ainsi bobinée autour d'une dent de bobinage appartenant à un segment de rotor d'une machine à réluctance à bobinage sur dents. Cette ou ces spires 51 sont ainsi traversées par l'intégralité du flux traversant la bobine, et les extrémités 52 de l'enroulement comprenant ces spires 51 sont connectées à un amplificateur 53, lui-même connecté à un capteur

de tension (non représenté) qui délivre une tension directement proportionnelle à la force électromotrice associée à la bobine.

Le facteur de proportionnalité entre la tension entre les extrémités 52 et la force électromotrice est égal au ratio du nombre de spires de l'enroulement 51, et du nombre de spires de la bobine. Un enroulement à une seule spire peut suffire, mais un enroulement à plusieurs spires, réalisé en fil fin, peut permettre d'affiner l'estimation de la force électromotrice pour les faibles couples. Le capteur de tension permettant de mesurer la tension aux bornes de l'enroulement est de préférence isolé de l'unité de calcul pilotant l'onduleur 35, afin de ne pas risquer de perturber l'électronique du calculateur.

L'amplificateur 53 doit présenter une impédance d'entrée très élevée afin de limiter au maximum le courant circulant dans l'enroulement, qui perturberait alors le champ qu'il est destiné à mesurer. En utilisant un tel capteur de force électromotrice, on limite la puissance de calcul nécessaire pour le système, et on augmente la précision de l'estimation de la force électromotrice.

L'objet de l'invention ne se limite pas aux exemples de réalisation décrits, et peut se décliner en de nombreuses variantes. Le mode de pilotage décrit peut s'appliquer à des machines électriques autres que des machines électriques à réluctance à bobinage diamétral ou à bobinage sur dents, par exemple à une machine synchrone à rotor bobiné ou une machine à réluctance commutée.

La manière de composer le signal d'excitation I_d peut être différente de celle décrite. La cartographie 5 peut figer les amplitudes des signaux harmoniques d'ordre inférieur quand on introduit un signal harmonique d'ordre supérieur. Elle peut également déroger à cette règle en modulant les amplitudes relatives des différents harmoniques en fonction du domaine de l'espace (vitesse, couple).

L'estimateur ou le capteur de force électromotrice 31 peut se baser sur une mesure réalisée aux bornes d'une seule bobine ou aux bornes d'un seul capteur associé à une bobine. L'estimateur ou le capteur 31 peut, suivant une autre variante, prendre en compte des mesures réalisées aux bornes de chacune des bobines de la machine.

Dans le cas d'une machine à bobinage diamétral, l'élimination des termes d'inductance mutuelle peut se faire en soustrayant, de manière linéaire, les termes d'inductances croisées proportionnels aux courants circulant dans les deux autres phases (dans le cas d'une machine triphasée) Selon une autre variante de réalisation, l'élimination des termes correspondant aux inductances mutuelles peut se faire par une méthode de corrélation des courants des différentes phases. En éliminant les termes corrélés entre deux phases, on peut ainsi éliminer les termes liés à l'inductance mutuelle, qui risquent de perturber la stabilité du système de régulation.

La méthode de pilotage suivant l'invention, grâce la prise en compte, en temps réel, de la forme du signal de force électromotrice, permet à la fois de limiter les pertes fer pour les faibles couples de la machine, et d'optimiser le couple maximal que l'on peut obtenir par rapport aux amplitudes maximales de courant autorisées pour la machine. Le gain en terme de couple maximal accessible est particulièrement important dans le cas d'une machine à bobinage sur dents. Dans le cas d'une machine à bobinage diamétral, le gain relatif en couple est moindre, mais reste intéressant. Au final, avec la méthode pilotage selon l'invention, les performances des machines à bobinage sur dents et à bobinage diamétral deviennent comparables, alors que la machine à bobinage sur dents s'avère en général moins performante dans le cas de méthodes de pilotage ne prenant pas en compte, en temps réel, la forme du signal de force électromotrice de la machine.

REVENDICATIONS

1. Procédé de pilotage d'une machine électrique (36, 37) polyphasée à réluctance, notamment d'un moteur pour véhicule automobile, dans lequel les courants injectés dans chaque bobine du stator de la machine (36, 37) se déduisent par une transformation d'un couple (I_d , I_q) de courants d'excitation (I_d) et de courant d'armature (I_q) définis dans un repère (d,q) tournant avec le rotor de la machine, tels que :
- le courant d'excitation (I_d) est composé d'un signal sinusoïdal fondamental, auquel s'ajoutent successivement d'autres harmoniques impairs d'ordre croissant quand la consigne de couple de la machine augmente,
 - le courant d'armature (I_q) est un signal proportionnel à la force électromotrice estimée ou mesurée de la machine.
2. Procédé de pilotage selon la revendication 1, dans lequel, quand la consigne de couple (C) de la machine augmente, on augmente l'amplitude de l'harmonique d'ordre le plus élevé parmi les harmoniques effectivement présents du courant d'excitation, jusqu'à ce que cette amplitude atteigne une amplitude seuil associée à l'ordre de l'harmonique, tout en gardant constante l'amplitude des harmoniques d'ordre inférieur du courant d'excitation.
3. Procédé de pilotage selon la revendication 2, dans lequel, quand la consigne de couple (C) augmente et l'amplitude de l'harmonique d'ordre le plus élevé atteint l'amplitude seuil associée à l'ordre de l'harmonique, on ajoute au courant d'excitation un signal harmonique d'ordre supérieur.
4. Procédé de pilotage selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la composition du signal de courant d'excitation (I_d) est déterminée à partir d'une première cartographie (5) reliant des couples de vitesse de rotation et de couple de consigne (N, C) de la machine, et des listes d'amplitudes (α_1 , α_3 , α_5) à appliquer au fondamental et aux différents harmoniques impairs (h_1 , h_3 , h_5) composant le courant d'excitation (I_d).

5. Procédé de pilotage selon l'une des revendications précédentes, dans lequel les amplitudes (α_1 , α_3 , α_5) des harmoniques impairs (h_1 , h_3 , h_5) sont choisies de manière à ce que le courant d'excitation (I_d) soit de plus en plus proche d'un signal rectangulaire au fur et à mesure que la consigne de couple (C) augmente.

6. Procédé de pilotage selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la pulsation (ω) du fondamental du signal d'excitation est égale à la pulsation (Ω) de la machine multipliée par le nombre de paires de pôles de la machine, et la vitesse de rotation du repère (d, q) dans lequel sont calculés le courant d'excitation (I_d) et le courant d'armature (I_q) est égale à la vitesse de rotation du rotor de la machine.

7. Procédé de pilotage selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la phase du signal d'excitation (I_d) est choisie de manière à ce que ce signal (I_d) soit maximal quand un axe de réluctance minimale (d) du rotor de la machine est aligné avec l'axe de l'une des bobines du stator de la machine (36, 37).

8. Procédé de pilotage selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'amplitude du courant d'armature (I_q) est choisie de manière à ce qu'une valeur efficace du courant d'armature (I_q) soit égale à une valeur efficace (I_d) du courant d'excitation.

9. Procédé de pilotage selon l'une des revendications 1 à 7, dans lequel l'amplitude du courant d'armature (I_q) est déterminée au moyen d'une deuxième cartographie (33) fonction du couple (C) de consigne de la machine et de la vitesse de rotation (N) de la machine (36, 37).

10. Procédé de pilotage selon l'une des revendications précédentes, appliqué au pilotage d'une machine électrique à réluctance à bobinage diamétral (36), dans lequel la force électromotrice estimée de la machine est filtrée de manière à ne comptabiliser que la force électromotrice auto-induite par chaque bobinage du stator, en excluant les termes d'inductions mutuelles entre les différents bobinages du stator.

11. Procédé selon l'une des revendications 1 à 9, appliqué au pilotage d'une machine électrique à réluctance à bobinage sur dents (37), dans lequel on exclut du signal (I_q) de courant d'armature, les harmoniques d'une fréquence de denture, la fréquence de denture étant égale au nombre de dents de bobinage multipliée par la fréquence de rotation du rotor de la machine (37).

12. Machine électrique à réluctance équipée d'un moyen d'estimation (16) de la position angulaire du rotor de la machine, d'un moyen de détermination (31, 50) de la force électromotrice de la machine, et d'une unité de commande configurée pour calculer les courants à injecter dans les différentes bobines du stator de la machine, par un changement de repère tournant à partir d'un premier signal (I_d) de courant d'excitation, cartographié en fonction d'une consigne de couple de la machine et de la vitesse estimée de rotation du rotor, et à partir d'un second signal de courant d'armature (I_q) proportionnel à la force électromotrice estimée ou mesurée par le moyen de détermination (31, 50).

13. Machine électrique selon la revendication 12, le moyen de détermination (50) de la force électromotrice comprenant un enroulement d'une ou de plusieurs spires conductrices non alimentées en courant électrique, bobinées de manière à être traversées par le même flux magnétique qu'une des bobines du stator de la machine, l'enroulement étant équipé d'un capteur de la tension générée entre ses deux extrémités (52).

14. Machine électrique selon l'une des revendications 12 ou 13, équipée d'un enroulement d'une ou de plusieurs spires (51) conductrices non alimentées en courant électrique, bobinées de manière à être traversées par le même flux magnétique qu'une des bobines du stator de la machine, équipée d'un capteur apte à mesurer la tension générée entre les deux extrémités de l'enroulement, et équipée d'une unité de commande configurée pour calculer les courants à injecter dans les différentes bobines du stator de la machine, par un changement de repère tournant à partir d'un premier signal (I_d) de courant d'excitation, cartographié en fonction d'une

consigne de couple de la machine et de la vitesse estimée de rotation du rotor, et à partir d'un second signal (I_q) de courant d'armature, proportionnel à une valeur filtrée de la tension entre les extrémités (52) de l'enroulement.

5 15. Machine électrique à réluctance selon l'une des revendications 12 à 14, dans lequel le capteur de tension aux bornes de l'enroulement est déporté ou est isolé électriquement par rapport à la partie de l'unité de commande calculant les courants à injecter.

10 16. Machine électrique à réluctance selon l'une des revendications 12 à 15, le bobinage du stator de la machine étant un bobinage sur dents.

 17. Machine électrique à réluctance selon l'une des revendications 12 à 15, le bobinage du stator de la machine est un bobinage de type diamétral.

15 18. Machine électrique à réluctance à bobinage sur dents, équipée d'un moyen d'estimation (16) de la position angulaire du rotor de la machine, équipée d'un enroulement d'une ou de plusieurs spires conductrices non alimentées en courant et bobinées de manière à être traversées par le même flux magnétique qu'une des bobines du stator
20 de la machine, équipée d'un capteur apte à mesurer la tension générée entre les deux extrémités (52) de l'enroulement, et équipé d'une unité de commande configurée pour calculer les courants à injecter dans les différentes bobines du stator de la machine, par un changement de repère tournant à partir d'un premier signal (I_d) de courant
25 d'excitation, cartographié en fonction d'une consigne de couple de la machine et d'une vitesse estimée de rotation du rotor, et d'un second signal (I_q) de courant d'armature proportionnel à une valeur filtrée de la tension entre les extrémités de l'enroulement, l'unité de commande étant configurée pour exclure du courant d'armature (I_q) les
30 fréquences multiples de la fréquence de denture, la fréquence de denture étant égale au nombre de dents de bobinage multipliée par la fréquence de rotation du rotor de la machine.

FIG.1

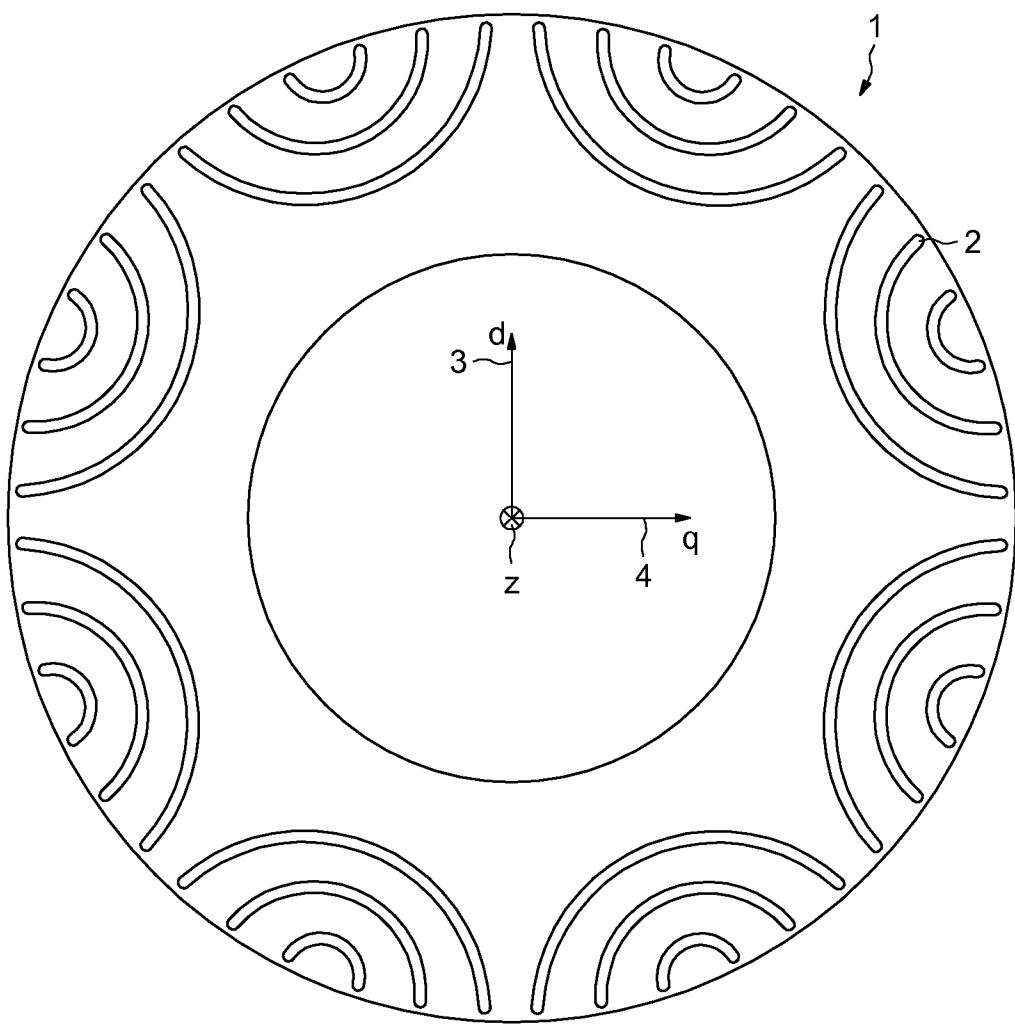


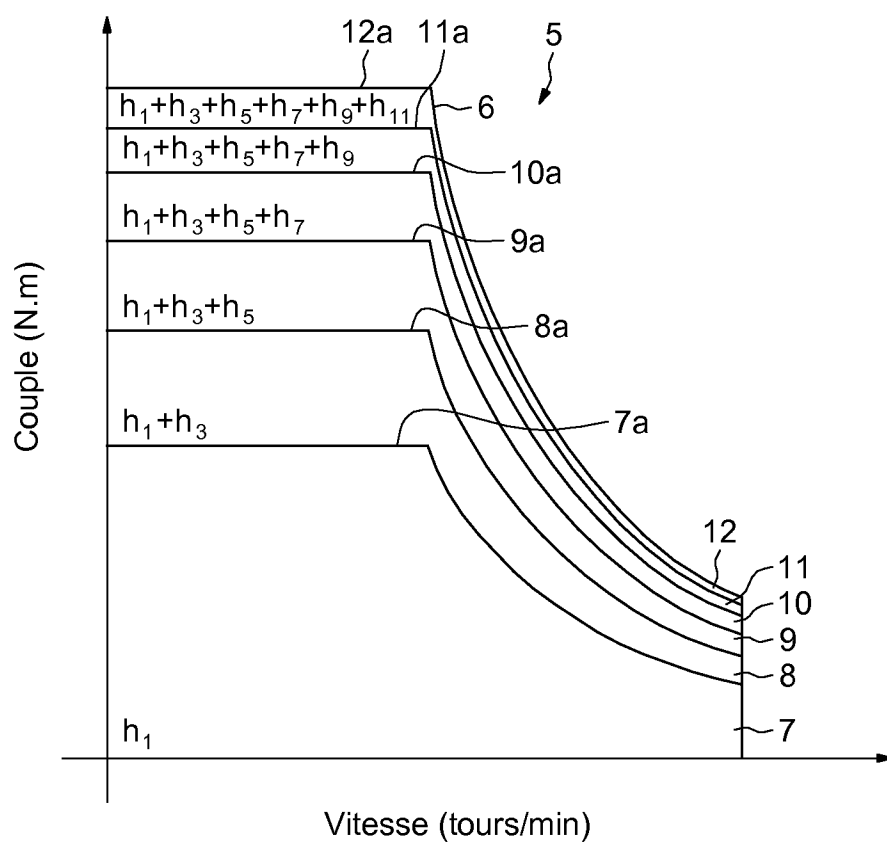
FIG.2

FIG. 3

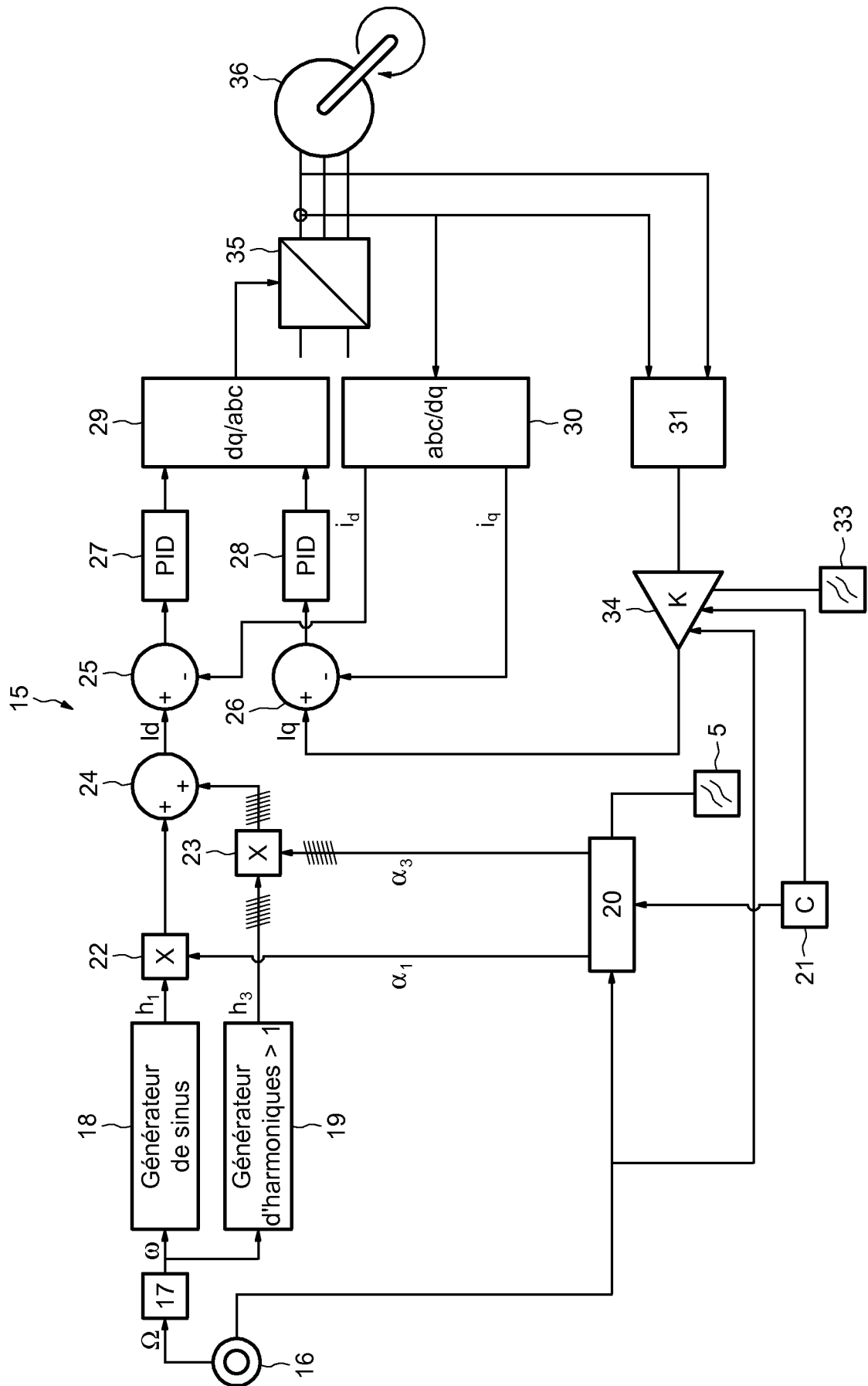


FIG. 4

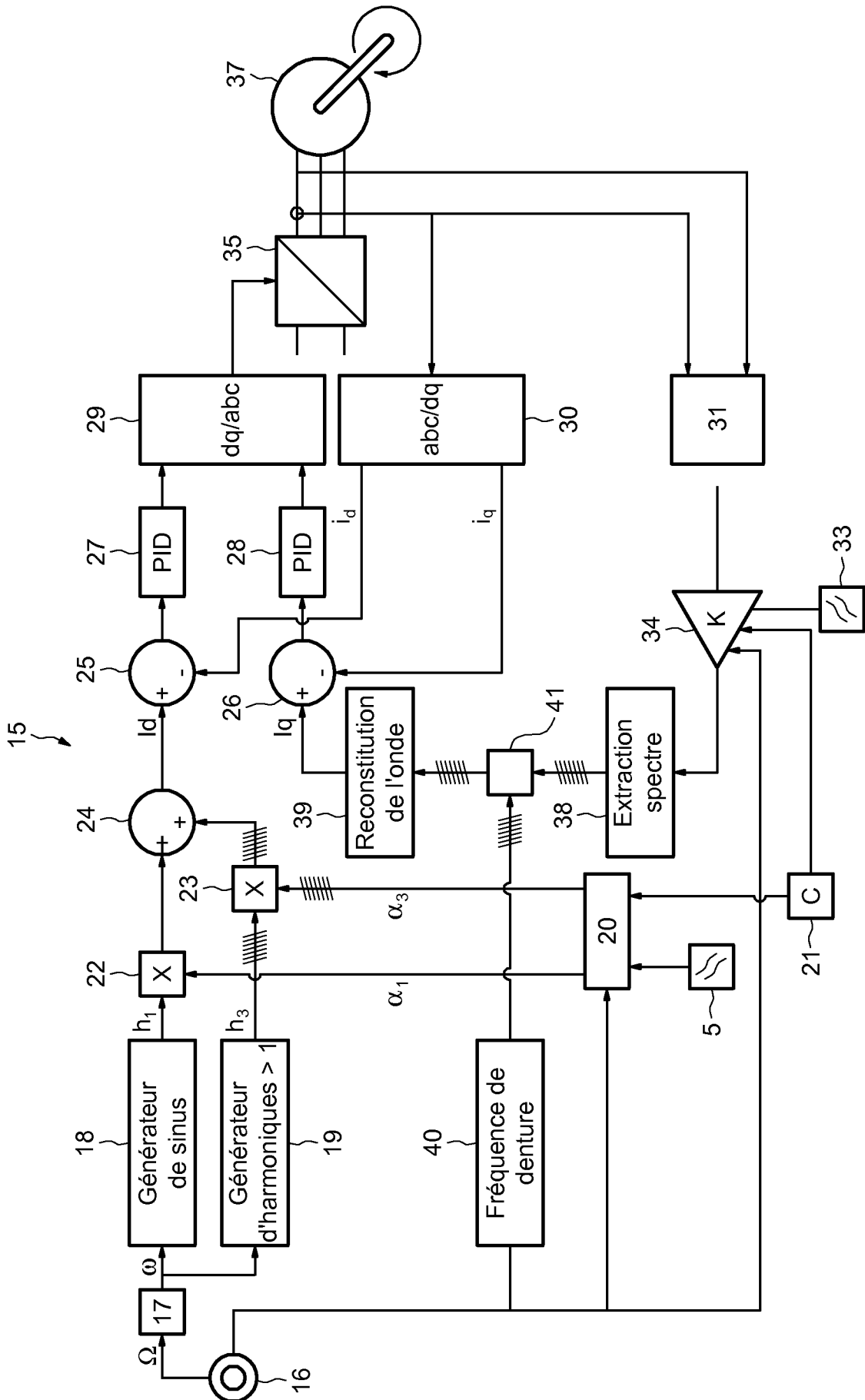


FIG.5