

(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
23 avril 2009 (23.04.2009)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2009/050400 A2

(51) Classification internationale des brevets :
H02P 25/08 (2006.01) *B60L 11/02* (2006.01)
H02P 27/02 (2006.01)

(74) Mandataire : **RENAULT TECHNOCENTRE**; TCR
GRA 2 36, 1 avenue du Golf, F-78288 Guyancourt Cedex
(FR).

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2008/051745

(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, 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, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(22) Date de dépôt international :
30 septembre 2008 (30.09.2008)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
0706866 1 octobre 2007 (01.10.2007) FR

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

(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) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (*pour US seulement*) : **LOUDOT, Serge** [FR/FR]; 17 rue de Bartillat, F-91190 Villiers-le-Bac (FR). **REKIK, Montacer** [FR/FR]; Résidence CESAL, Casier 2/4/3, Plateau du Moulon, F-91192 Gif-Sur-Yvette (FR).

Publiée :

— *sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport*

(54) Title: METHOD FOR CONTROLLING THE POWER SUPPLY OF AN ELECTRIC MACHINE WITH VARIABLE RELUCTANCE

(54) Titre : PROCEDE DE COMMANDE DE L'ALIMENTATION ELECTRIQUE D'UNE MACHINE ELECTRIQUE A RELUCTURE VARIABLE

(57) Abstract: The invention relates to a method for controlling the power supply for a variable-reluctance electric machine (6) that can be powered according to a discontinuous supply control mode or a continuous supply control mode, characterised in that the machine is driven in priority according to the continuous supply control mode.

(57) Abrégé : Procédé de commande de l'alimentation électrique d'une machine électrique (6) à réluctance variable pouvant être alimentée selon un mode de commande d'alimentation discontinu ou selon un mode de commande d'alimentation continu, caractérisé en ce qu'on pilote prioritairement la machine selon le mode de commande d'alimentation continu.



WO 2009/050400 A2

PROCEDE DE COMMANDE DE L'ALIMENTATION ELECTRIQUE D'UNE MACHINE ELECTRIQUE A RELUCTANCE VARIABLE

La présente invention se rapporte à un procédé de commande de l'alimentation
5 d'une machine électrique à réluctance variable, notamment pour l'entraînement
d'un véhicule automobile.

Dans les véhicules équipés d'ensembles d'entraînement électriques,
typiquement les véhicules électriques ou hybrides, l'efficacité énergétique est
10 un critère primordial. Par voie de conséquence, on cherche en permanence à
améliorer le rendement instantané de même que le rendement moyen sur cycle
de chaque ensemble d'entraînement électrique.

On a représenté, à la figure 1, un exemple de réalisation classique d'un
15 ensemble 2 d'entraînement de véhicule automobile. Cet ensemble comprend
une machine électrique 6 à réluctance variable à double saillance 12/8, soit à
12 dents statoriques et 8 dents rotoriques. Alternativement, l'ensemble peut
comprendre une machine électrique triphasée à réluctance variable à double
saillance dont les nombres de dents statoriques et rotoriques sont multiples de
20 6/4 (par exemple 12/8, 24/16, etc...).

La machine électrique 6 est pilotée par un dispositif 1 de commande
d'alimentation comprenant notamment une unité de commande 10 et un
onduleur 12. L'unité de commande comprend notamment des moyens logiciels
25 tels que des programmes informatiques pour régir le fonctionnement du
dispositif 1 de commande d'alimentation.

L'ensemble 2 comprend par ailleurs un capteur de position et/ou un capteur de
vitesse 14 permettant à l'unité 10 de connaître, à chaque instant, une mesure
30 de la vitesse de la machine 6.

Un procédé de commande d'un tel ensemble d'entraînement de véhicule est utilisé pour contrôler le couple délivré par cet ensemble d'entraînement.

Plus précisément encore, un tel procédé de commande d'un ensemble d'entraînement de véhicule a pour objectif, pour une tension d'alimentation donnée, et pour un ensemble onduleur/machine à réluctance donné, de faire fonctionner aux mieux l'ensemble d'entraînement selon certains critères tels que notamment le rendement énergétique et le confort du véhicule (tant en mode moteur qu'en mode générateur).

Il existe principalement trois modes de commande d'une machine à réluctance variables à double saillance :

- Dans le domaine des basses vitesses : on commande l'alimentation en utilisant trois paramètres. Un premier paramètre noté « I_{lim} » est une valeur limite que l'intensité du courant de phase ne doit pas dépasser. Cette limitation est assurée par un hachage réalisé grâce aux interrupteurs commandés de l'onduleur. Un deuxième paramètre noté « θ_N » est l'angle électrique d'amorçage, c'est-à-dire l'angle électrique repérant la position du rotor lors du début d'alimentation d'une phase de la machine électrique. Les angles électriques repérant les positions du rotor évoluent de 360° entre deux positions successives de conjonction d'une dent rotorique avec deux dents statoriques consécutives. Par convention, l'angle électrique est nul lorsque la dent rotorique considéré est en conjonction avec une dent statorique . Un troisième paramètre noté « θ_p » est l'angle électrique d'alimentation aussi appelé « angle électrique de conduction », c'est-à-dire l'angle électrique définissant la durée des périodes d'alimentation d'une phase de la machine électrique. Cette alimentation est caractérisée par des angles de conduction inférieurs à 180° et par une limitation du courant d'alimentation à sa valeur limite I_{lim} . Ainsi, le rapport cyclique des durées des périodes d'alimentation d'une phase est inférieur à 50%. C'est-à-dire qu'une phase est alimentée moins de la moitié du temps lorsque la machine

- fonctionne selon un mode de commande d'alimentation discontinu. Ces périodes d'alimentation sont définies par des fermetures et ouvertures d'interrupteurs commandés de l'onduleur. Des graphiques temporels des variations des valeurs de tension et de courant d'alimentation de phase sont représentés à la figure 4. La notation « OFF » représente l'angle de fin d'alimentation repérant la position du rotor lorsqu'on coupe l'alimentation de la phase ($\text{OFF} = \text{ON} + \Theta_p$). Les valeurs des paramètres ON et Θ_p sont optimisées pour chaque point de fonctionnement couple-vitesse.
- 10 – Dans le domaine des vitesses intermédiaires, la force contre électromotrice générée par la machine est suffisamment importante pour que la valeur limite I_{lim} du courant ne soit pas atteinte. On n'utilise donc plus que deux paramètres de commande : l'angle électrique d'amorçage et l'angle de conduction. Cette alimentation est caractérisée par des angles de conduction inférieurs à 180° . Des graphiques temporels des variations des valeurs de tension et de courant d'alimentation de phase sont représentés à la figure 5. Les valeurs des paramètres ON et Θ_p sont optimisées pour chaque point de fonctionnement couple-vitesse.
- 20 Ces deux alimentations relèvent d'un même mode de commande d'alimentation dit « discontinu » caractérisé par des périodes d'alimentation ou de conduction des interrupteurs commandés de l'onduleur inférieures à 180° . Ceci permet aux dents statoriques de se démagnétiser complètement lors de chaque cycle d'alimentation après la période d'alimentation.
- 25 – Dans le domaine des hautes vitesses, pour atteindre des couples importants, supérieurs à ce que peut fournir une machine électrique à réluctance variable lorsqu'elle est alimentée selon un mode de commande d'alimentation discontinu, on utilise un mode de commande d'alimentation continu caractérisé par des périodes d'alimentation ou de conduction des interrupteurs commandés de l'onduleur supérieures à 180° . Ainsi, le rapport cyclique des durées des périodes d'alimentation
- 30

d'une phase est supérieur à 50%. C'est-à-dire qu'une phase est alimentée plus de la moitié du temps lorsque la machine fonctionne selon un mode de commande d'alimentation continu. Ce mode de commande d'alimentation intrinsèquement instable est notamment pour
5 cette raison évité et n'est utilisé que pour atteindre des points de fonctionnement couple-vitesse à couple élevé qui ne pourrait pas être atteint par un mode de commande d'alimentation discontinu.

Comme illustré à la figure 1, il est connu de commander le pilotage de la
10 machine 6 par l'unité de commande 10 au moyen de lois de commande issues de tables qui donnent les angles d'amorçage ON, de conduction Θ_p et le courant limite I_{lim} en fonction de la vitesse de la machine obtenue à partir du capteur 14. Ces grandeurs sont également déterminées en fonction du couple à délivrer. Eventuellement, on pourra également prendre en compte la tension
15 d'alimentation continue VDC de l'onduleur si celle-ci est susceptible de varier, ainsi que d'autres paramètres tels que la température des bobinages par exemple.

A chaque période électrique, un pointeur est défini en fonction de ces
20 paramètres externes (vitesse, tension d'alimentation, température des bobinages, etc.) et de la consigne du couple. Ce pointeur adresse alors les tables de paramètres qui fournissent les paramètres de commande (ON, Θ_p , I_{lim}) à basse vitesse et (ON, Θ_p) à vitesse intermédiaire.

25 Le couple délivré par la machine 6 à vitesse constante est proportionnel à l'énergie transmise par une phase du moteur. Il est donc proportionnel à la surface délimitée par une courbe dans un diagramme flux magnétique de phase-courant de phase. L'énergie issue de la conversion électromécanique est ainsi caractérisée par la surface (ou cycle énergétique) délimitée par la
30 trajectoire parcourue par le flux de phase et le courant de phase au cours d'une période électrique.

On constate qu'à haute vitesse, en mode de commande d'alimentation discontinu, la surface du cycle énergétique est très réduite par rapport à la quantité d'énergie potentiellement utilisable, c'est-à-dire telle que délimitée par les inductances de phases minimum (dents en opposition), maximum (dents en
5 conjonction), et le courant de phase maximum admissible I_{lim} . A basse vitesse en revanche, on constate que le cycle énergétique est mieux utilisé, la trajectoire parcourue délimitant la quasi-totalité de la surface maximale.

Afin d'augmenter le couple disponible sur l'arbre moteur à haute vitesse, il est
10 proposé le mode de commande d'alimentation continu évoqué précédemment. Dans ce mode, l'angle de conduction Θ_p est supérieur à 180° et peut s'écrire $\Theta_p = \Delta\Theta_p + 180$, où $\Delta\Theta_p$ est dénommé angle de conduction supplémentaire.

On a représenté sur la figure 10 l'intérêt du mode de commande d'alimentation
15 continu : pour un même ensemble onduleur-machine et une même tension d'alimentation, un gain de couple important peut être obtenu dans les hautes vitesses. En effet, avec le mode de commande d'alimentation discontinu, on ne peut atteindre que les points de fonctionnement situés sous la courbe intitulée « courbe enveloppe en mode discontinu ». Cependant, avec le mode de
20 commande d'alimentation continu, on peut atteindre tous les points de fonctionnement situés sous la courbe intitulée « courbe enveloppe en mode continu » et donc a fortiori des points de fonctionnement situés entre les deux courbes enveloppes. Il est donc possible d'obtenir un net gain en couple (respectivement en puissance) lorsque le mode de commande d'alimentation
25 continu est utilisé.

On a représenté, sur la figure 7, l'évolution, sous l'effet de l'application d'un mode de commande d'alimentation continu, de l'énergie transmise sur plusieurs périodes électriques à vitesse de rotation constante. La saturation progressive
30 de période en période produit un accroissement du cycle énergétique (c'est-à-dire de la surface délimitée) et donc du couple disponible sur l'arbre moteur.

La figure 6 illustre, pour le même point de fonctionnement, les variations de flux magnétique et du courant de phase lors d'une phase transitoire de mise en place d'un mode de commande d'alimentation continu (sur une trentaine de cycles).

5

De même, la figure 8 illustre les variations de l'angle de conduction et l'augmentation progressive du couple moyen délivré par la machine sur chaque période électrique, par rapport à la première période, dans les mêmes conditions de fonctionnement que celles des figures 6 et 7. Le gain en couple

10 dépend :

- de la vitesse de la machine,
- de la conception même de la machine,
- de la commande appliquée (angles, limitation du courant, roue libre).

15 Comme cela a été vu ci-dessus, en particulier au regard des figures 8 et 10, le mode de commande d'alimentation continu s'avère avantageux en ce qu'il permet un gain de couple important dans les hautes vitesses.

Par ailleurs, comme on l'a vu ci-dessus, lorsque l'on utilise le mode de
20 commande d'alimentation continu, le couple moyen croît sur plusieurs périodes électriques avant d'atteindre son niveau de consigne (à la différence d'un fonctionnement classique, en mode de commande d'alimentation discontinu, pour lequel le couple moyen désiré est obtenu dès la première période électrique). En mode de commande d'alimentation continu, la réponse du
25 système à un couple de consigne souhaité est donc peu réactive.

Il a récemment été imaginé des solutions permettant de rendre plus stable la machine électrique fonctionnant selon un mode de commande d'alimentation continu.

30

Le document EP 0 534 761 envisage de stabiliser un fonctionnement en mode de commande d'alimentation continu, obtenu au moyen d'une augmentation de

la durée de conduction de la machine au-delà de la moitié d'une période électrique, afin de profiter du gain de couple à hautes vitesses offert par ce mode de fonctionnement. Ce document montre qu'il est possible de réguler le flux, et donc indirectement le couple, en faisant varier l'angle de conduction Θ_p .

- 5 Mais ce document se contente d'utiliser des paramètres de contrôle préprogrammés et stockés dans une table de correspondance et ne précise aucunement comment l'angle de conduction Θ_p est modifié. A fortiori, ce document n'envisage aucune loi de pilotage dynamique de l'angle de conduction Θ_p . Par ailleurs, ce document n'aborde aucunement la
- 10 problématique de la faible réactivité du système en mode courant continu pour atteindre un couple de consigne.

- On connaît aussi de la demande FR 2 878 662 un procédé de commande de l'alimentation d'une machine électrique permettant de stabiliser son
- 15 fonctionnement dans un mode de commande d'alimentation continu. Ce procédé repose sur une méthode d'ajustement dynamique de l'angle de conduction.

- D'autres documents décrivent également qu'il est avantageux d'augmenter, à
- 20 haute vitesse, le flux magnétique dans une machine électrique à réluctance variable pour obtenir des couples qui ne peuvent pas être obtenu dans un mode de commande d'alimentation discontinu.

- Dans le document WO 01/43273, il est, pour ce faire, prévu un bobinage
- 25 statorique supplémentaire qui empiète sur le bobinage principal et décline donc la performance de la machine en plus d'exiger un second convertisseur (en plus de l'onduleur) pour alimenter ce bobinage supplémentaire.

- Dans le document US 5,850,133, on applique transitoirement une conduction
- 30 continue non contrôlée pour palier à une surcharge ponctuelle en mode générateur.

Comme indiqué précédemment, la génération des paramètres de commande est assurée par pointage, et éventuellement par interpolation de valeurs de tables. Or, il s'avère que l'angle optimum d'amorçage ON subit une discontinuité lorsqu'on utilise le mode de commande d'alimentation discontinu jusqu'à sa
5 limite avant de passer à un mode de commande d'alimentation continu pour davantage de couple. Cette discontinuité est illustrée sur les diagrammes de la figure 11 relatifs aux angles optimaux de commande pour deux vitesses différentes. Cette discontinuité de la commande lors du changement de mode de commande d'alimentation impacte fortement la robustesse du procédé de
10 commande : il se produit un risque de pompage et d'oscillations au niveau de l'ensemble d'entraînement ayant des conséquences néfastes au confort du véhicule.

Les angles optimaux ON sont déduits de la figure 9. Ils correspondent aux
15 points à maximum de couple et minimum de courant de filtre pour un courant machine donné.

Le but de l'invention est de fournir un procédé de commande de l'alimentation d'une machine électrique obviant aux inconvénients précités et améliorant les
20 procédés de commande connus de l'art antérieur. En particulier, le procédé de commande selon l'invention est simple à mettre en œuvre et permet d'améliorer le rendement d'un ensemble d'entraînement, de limiter l'usure et/ou le dimensionnement de composants de l'ensemble d'entraînement et d'améliorer le confort et l'agrément de conduite d'un véhicule automobile équipé d'un
25 ensemble d'entraînement alimenté selon le procédé de l'invention. L'invention concerne aussi un dispositif de commande pour mettre en œuvre un tel procédé.

Selon l'invention, le procédé de commande de l'alimentation électrique d'une
30 machine électrique à réluctance variable pouvant être alimentée selon un mode de commande d'alimentation discontinu ou selon un mode de commande

d'alimentation continu est caractérisé en ce qu'on pilote prioritairement la machine selon le mode de commande d'alimentation continu.

Le mode de commande d'alimentation continu peut comprendre des périodes
5 successives d'alimentation de la phase ou des phases du moteur.

Les périodes successives d'alimentation de la phase ou des phases du moteur peuvent présenter un rapport cyclique temporel supérieur à 50%.

10 Dans le mode de commande d'alimentation continu, les périodes d'alimentation peuvent débuter, à vitesse de rotation donnée, à angle d'amorçage constant.

De préférence, on alimente la machine selon le mode de commande d'alimentation continu dès que les conditions de vitesse et de couple de la
15 machine permettent ce mode de commande d'alimentation.

On peut alimenter la machine selon le mode de commande d'alimentation discontinu si les conditions de vitesse et de couple de la machine ne permettent pas le mode de commande d'alimentation continu.

20 Selon l'invention, un dispositif de commande de l'alimentation électrique d'une machine électrique à réluctance variable est caractérisé en ce qu'il comprend des moyens matériels et des moyens logiciels pour mettre en œuvre le procédé défini précédemment.

25 Selon l'invention, un ensemble d'entraînement comprend un dispositif de commande défini précédemment et une machine électrique à réluctance variable.

30 Selon l'invention, un véhicule automobile comprend un ensemble d'entraînement défini précédemment.

Le dessin annexé représente, à titre d'exemples, le principe du procédé de commande d'alimentation selon l'invention et plusieurs modes de réalisation
35 d'un dispositif de commande permettant de mettre en œuvre un tel procédé.

La figure 1 est un schéma d'un ensemble d'entraînement d'un véhicule automobile connu de l'art antérieur.

- 5 La figure 2 est un schéma d'un premier mode de réalisation d'un ensemble d'entraînement d'un véhicule automobile permettant de mettre en œuvre le procédé selon l'invention.

- 10 La figure 3 est un schéma d'un deuxième mode de réalisation d'un ensemble d'entraînement d'un véhicule automobile permettant de mettre en œuvre le procédé selon l'invention.

- 15 La figure 4 est un ensemble de graphiques temporels représentant les variations des valeurs de tension et de courant d'alimentation de phase d'une machine électrique à réluctance variable à faible vitesse, cette machine étant alimentée selon un mode de commande d'alimentation discontinu.

- 20 La figure 5 est un ensemble de graphiques temporels représentant les variations des valeurs de tension et de courant d'alimentation de phase d'une machine électrique à réluctance variable à haute vitesse, cette machine étant alimentée selon un mode de commande d'alimentation discontinu.

- 25 La figure 6 est un ensemble de graphiques temporels représentant les variations des valeurs de flux magnétique et de courant d'alimentation de phase d'une machine électrique à réluctance variable, cette machine étant alimentée transitoirement selon un mode de commande d'alimentation continu.

- 30 La figure 7 est un graphique représentant la caractéristique courant de phase-flux magnétique de phase d'une machine électrique à réluctance variable, cette machine étant alimentée transitoirement selon un mode de commande d'alimentation continu.

La figure 8 est un ensemble de graphiques temporels représentant les variations de l'angle de conduction et du couple délivré d'une machine électrique à réluctance variable, cette machine étant alimentée transitoirement selon un mode de commande d'alimentation continu.

5

La figure 9 est un ensemble de graphiques représentant, pour différents courants de phase et pour deux vitesses données, le couple et le courant traversant une capacité de filtrage d'un ensemble d'entraînement en fonction de l'angle d'amorçage, en mode de commande d'alimentation continu.

10

La figure 10 est un graphique représentatif des courbes enveloppes des couples en mode de commande d'alimentation discontinu et en mode de commande d'alimentation continu en fonction de la vitesse. Ce graphique illustre le principe sur lequel repose l'invention.

15

La figure 11 est un ensemble de graphiques représentant, pour deux vitesses données, les angles d'amorçage optimaux en fonction du couple.

20

Le principe de l'invention est d'alimenter une machine électrique à réluctance variable dans un mode de commande d'alimentation continu dès que cela est possible c'est-à-dire dès que le point de fonctionnement de la machine peut être atteint par le mode de commande d'alimentation continu. Si cela n'est pas possible, on alimente la machine selon un mode de commande d'alimentation discontinu.

25

Le pilotage de la machine électrique dans un mode de commande d'alimentation continu peut être mis en œuvre dans toute la zone hachurée de la figure 7. Avantagement, on pilotera la machine selon le mode de commande d'alimentation continu pour tous les points de fonctionnement se trouvant dans cette zone hachurée. Pour tous les autres points de fonctionnement se trouvant hors de cette zone hachurée, la machine sera pilotée selon le mode de commande d'alimentation discontinu.

30

La zone hachurée est définie dans sa partie haute par la courbe enveloppe des couples atteignables en mode de commande d'alimentation continu et dans sa partie basse par une courbe pointillée située sous la courbe enveloppe des couples atteignables en mode de commande d'alimentation discontinu.

Cette courbe pointillée correspond au couple minimum atteignable en mode de commande d'alimentation continu. Pour des couples inférieurs, le mode de commande d'alimentation discontinu est obligatoire. Cela correspond sur la figure 11 aux couples d'intersection des deux courbes (pointillée et continue).

Dans la plupart des cas, le point de fonctionnement de la machine évolue statistiquement le plus souvent dans les zones de couple intermédiaire. C'est donc dans ces zones qu'il convient d'améliorer en priorité le rendement de façon à obtenir la meilleure efficacité énergétique sur cycle de roulage. Or, la zone hachurée précédemment évoquée recouvre justement pour un large domaine de vitesse les zones de couple intermédiaire et on remarque que le mode de commande d'alimentation continu permet d'améliorer sensiblement le rendement des ensembles d'entraînement. Il s'ensuit que le fait d'alimenter prioritairement une machine électrique à réluctance variable permet d'améliorer son rendement énergétique. Une telle alimentation prioritaire de la machine dans le mode de commande d'alimentation continu n'est décrite dans aucun des documents de l'art antérieur évoqués précédemment.

Parallèlement à ce gain en rendement, il est intéressant, pour des raisons de fiabilité, de coût et d'encombrement, de diminuer le courant de charge efficace de la capacité de filtrage de l'onduleur.

L'utilisation du mode de commande d'alimentation continu permet, outre l'amélioration du rendement, de diminuer le courant efficace qui charge la capacité de filtrage de l'onduleur par rapport au courant efficace qui serait observé si on utilisait pour le même point de fonctionnement le mode de

commande d'alimentation discontinu. Ceci permet soit d'augmenter la durée de vie de la capacité de filtrage, soit de réduire sa taille et donc son coût.

Enfin, comme le montre la figure 11, le fait de passer dès que possible du mode
5 de commande d'alimentation discontinu au mode de commande d'alimentation continu permet d'éviter une discontinuité de l'angle d'amorçage fourni à l'unité de commande. En effet, on remarque que pour différentes vitesses, l'extrémité de la courbe des angles d'amorçage optimaux en mode de commande d'alimentation continu se raccorde à la courbe des angles d'amorçage optimaux
10 en mode de commande d'alimentation discontinu. Ainsi, le passage au plus tôt au mode de commande d'alimentation continu permet de garder une continuité des angles d'amorçages optimaux. De ce fait le courant est minimisé, le rendement maximisé et la commande plus robuste. En particulier, des phénomènes oscillatoires gênants sont évités.

15 Ainsi, il peut être utilisé pour une vitesse donnée un passage d'un mode de commande d'alimentation discontinu à un mode de commande d'alimentation continu en utilisant un angle d'amorçage ON constant qui permet d'assurer une continuité dans l'évolution de l'angle d'amorçage et d'assurer une plus grande
20 robustesse de la commande. Cela permet d'avoir une table d'angles lisse et monotone et par conséquent une commande plus robuste.

La figure 9 montre que pour une machine donnée fonctionnant en générateur (ceci peut être généralisé à tout autre machine aussi bien motrice que
25 génératrice), pour différents courants efficaces de phase, le courant efficace traversant la capacité de filtrage de l'onduleur passe par un minimum alors que le ratio couple/courant phase passe par un maximum. Cela signifie que, pour une vitesse donnée, on obtient le maximum de couple avec le minimum de courant (et donc le minimum de pertes joules ou un meilleur rendement
30 énergétique). Il faut noter que les pertes étant proportionnelles au carré du courant, le gain en rendement est significatif. La juxtaposition de ces deux courbes met en évidence que les paramètres de commande optimaux pour

minimiser le courant efficace sont aussi les paramètres de commande optimaux pour maximiser le rendement énergétique de la machine électrique. D'autre part, on constate que pour les points de fonctionnement atteignables à la fois en mode de commande d'alimentation continu et en mode de commande d'alimentation discontinu, le fonctionnement optimal est toujours obtenu en mode de commande d'alimentation continu.

Un premier mode de réalisation d'un ensemble d'entraînement 22 permettant de mettre en œuvre le procédé selon l'invention est décrit ci-après en référence à la figure 2. Les éléments portant les mêmes références que les éléments de la figure 1 sont identiques. L'ensemble d'entraînement comprend un dispositif de commande 1' muni de moyens pour assurer la stabilité du flux et du courant dans la machine électrique alors qu'elle se trouve en mode de commande d'alimentation continu. Grâce à ces moyens, on applique à une machine à réluctance variable une valeur de consigne d'angle de conduction Θ_p ajustée en fonction d'une mesure de contrôle de la stabilité du fonctionnement de la machine en mode de commande d'alimentation continu.

En d'autres termes, la valeur de consigne d'angle de conduction Θ_p est constamment ajustée en fonction d'éventuelles perturbations. Un tel ajustement permet alors de réguler le flux de manière à assurer sa stabilité, et donc celle du cycle énergétique.

Dans le premier mode de réalisation possible, la mesure de stabilité est une mesure de contrôle du flux. Ainsi, une valeur du flux de consigne est comparée à l'estimation du flux pour obtenir une mesure de contrôle du flux. On dispose alors d'une mesure d'écart entre la valeur de consigne et la valeur estimée, représentative d'une éventuelle instabilité du flux, c'est-à-dire de l'instabilité du fonctionnement de la machine en mode de commande d'alimentation continu.

Cette mesure de contrôle du flux est alors utilisée pour piloter l'angle de conduction Θ_p . Et grâce à un tel pilotage, le flux peut être régulé.

L'ensemble d'entraînement 22 comprend un dispositif de commande 1' différent du dispositif de commande 1 en ce qu'il comprend un moyen 17 d'estimation du flux, un comparateur 15 pour calculer une erreur ε sur le flux, égale à la
5 différence entre le flux de consigne Φ_{consigne} et le flux estimé $\Phi_{\text{estimé}}$ à l'aide du moyen d'estimation du flux, et un correcteur 16.

Cette erreur ε est traitée par le correcteur 16 adapté pour intégrer diverses lois de corrections (proportionnel - intégral ou autres). L'angle de conduction Θ_p est
10 alors modifié de manière à rendre l'erreur ε nulle (le flux estimé étant alors égal au flux de consigne).

Plus précisément, le correcteur 16 peut fournir l'angle de conduction supplémentaire $\Delta\Theta_p$ qui, additionné à 180° , permet d'obtenir l'angle de
15 conduction Θ_p supérieur à 180 assurant un fonctionnement en mode de commande d'alimentation continu. Le paramètre d'angle de conduction Θ_p ainsi obtenu est fourni à l'unité de commande 10'.

Il faut noter que les autres paramètres de commande de la machine (angle
20 d'amorçage ON, limitation du courant de phase I_{lim}) restent inchangés.

L'estimation de flux n'étant effective qu'après la première période électrique (la consigne Θ_p étant en effet calculée à partir du flux estimé à la période électrique précédente), il est prévu, en présence d'un échelon de couple,
25 d'imposer le flux estimé à la première période à une valeur prédéterminée (telle que la valeur du flux obtenu à $\Theta_p=180$ par exemple, l'erreur ε étant ainsi initialisée à zéro). Le contrôle du flux tel que décrit précédemment permet de stabiliser le fonctionnement en mode de commande d'alimentation continu. Toutefois, le contrôle du couple supplémentaire apporté par le mode courant
30 continu peut ne pas s'avérer suffisamment précis.

Selon un deuxième mode de réalisation possible de l'invention, on utilise pour déterminer le paramètre d'angle de conduction Θ_p , non pas une mesure de contrôle du flux, mais une mesure de contrôle du couple.

- 5 Un deuxième mode de réalisation d'un ensemble d'entraînement 23 permettant de mettre en œuvre le procédé selon l'invention est décrit ci-après en référence à la figure 3. Les éléments portant les mêmes références que les éléments de la figure 2 sont identiques. L'ensemble d'entraînement comprend un dispositif de commande 1'' présentant des moyens pour assurer la stabilité du couple
- 10 dans la machine électrique alors qu'elle se trouve en mode de commande d'alimentation continu. Grâce à ces moyens, on applique à une machine à réluctance variable une valeur de consigne d'angle de conduction Θ_p ajustée en fonction d'une mesure de contrôle de la stabilité du fonctionnement de la machine en mode de commande d'alimentation continu.

15

- Cette mesure du contrôle du couple mesure l'erreur ε entre le couple de consigne $C_{consigne}$ et une estimation du couple $C_{estimé}$, laquelle est obtenue à partir de l'estimation du flux $\Phi_{estimé}$. A vitesse fixe, on détermine une estimation du couple à l'aide de l'estimation du flux puis en déterminant une
- 20 estimation de l'énergie transmise.

Connaissant le flux, le couple peut effectivement être estimé par la différence entre l'énergie transmise lors de la phase de magnétisation et l'énergie renvoyée lors de la phase de démagnétisation.

25

- Connaissant le flux à chaque instant grâce à l'estimateur 17 de flux précédemment décrit, et disposant d'une mesure du courant de phase ainsi qu'une image de la tension appliquée au bobinage (qui comme cela a déjà été mentionné peut être mesurée directement ou estimée via la commande et la
- 30 valeur du courant), il est possible d'avoir une image du couple électromagnétique par le calcul direct de l'énergie représentée par cette surface.

Le calcul de cette énergie peut ainsi s'opérer en deux phases.

5 Au cours d'une première phase, on calcule l'énergie échangée lors de la phase de magnétisation.

Au cours d'une deuxième phase, on calcule l'énergie échangée lors de la phase de démagnétisation.

10 L'énergie convertie correspond à la différence des deux énergies.

L'erreur ε entre le couple moyen de consigne et le couple moyen estimé est contrôlée par un correcteur 18 qui grâce à une loi appropriée (proportionnel - intégral par exemple) fournit l'angle de conduction supplémentaire $\Delta\Theta_p$ permettant d'assurer un angle de conduction Θ_p au delà de 180. Cette valeur de paramètre d'angle de conduction est alors fournie à l'unité de commande 10' qui pilote l'onduleur en conséquence dans le mode de commande d'alimentation continu.

20 Ces deux modes de réalisation permettent finalement d'utiliser le mode de commande d'alimentation continu tout en assurant la stabilité du flux et du courant dans la machine. D'autre part, le contrôle de la dynamique permet une réponse rapide à un échelon de couple demandé ce qui présente de nombreux avantages pour le système.

25 Grâce à de tels moyens, le mode de commande d'alimentation continu peut être utilisé prioritairement au mode de commande d'alimentation discontinu pour alimenter la machine.

30 L'unité de commande 10' comprend évidemment des moyens logiciels pour interpréter les paramètres qui lui sont fournis et pour générer, en conséquence, des ordres de pilotage de l'onduleur, c'est-à-dire des signaux de commutation

des états des interrupteurs commandés de l'onduleur. L'unité de commande 10' comprend aussi, à la différence de l'unité de commande 10, des moyens pour déterminer s'il est possible d'utiliser le mode de commande d'alimentation continu et, si tel est le cas, pour faire appliquer à l'onduleur un tel mode de commande d'alimentation. L'unité de commande 10' comprend encore des moyens pour faire appliquer à l'onduleur un mode de commande d'alimentation discontinu si tel n'est pas le cas. Dans ce cas, l'unité de commande 10' a un fonctionnement similaire à l'unité de commande 10 précédemment décrite, le paramètre d'angle de conduction Θ_p étant déterminé par l'utilisation d'un pointeur dans une table d'angles ou par interpolation de valeurs d'une table d'angles.

Les moyens pour déterminer s'il est possible d'utiliser le mode de commande d'alimentation continu sont par exemple de type logiciel et reposent sur la détermination de la position du point de fonctionnement de la machine relativement à la courbe pointillée de la figure 10. Ainsi, l'unité de commande 10' comprend des données pour définir et/ou caractériser cette courbe pointillée. Ces données peuvent par exemple être préenregistrées dans l'unité de commande ou être déterminées lors d'une phase d'apprentissage.

Revendications :

1. Procédé de commande de l'alimentation électrique d'une machine électrique (6) à réluctance variable pouvant être alimentée selon un mode
5 de commande d'alimentation discontinu ou selon un mode de commande d'alimentation continu, caractérisé en ce qu'on pilote prioritairement la machine selon le mode de commande d'alimentation continu.
2. Procédé de commande selon la revendication 1, caractérisé en ce que le
10 mode de commande d'alimentation continu comprend des périodes successives d'alimentation de la phase ou des phases du moteur.
3. Procédé de commande selon la revendication 2, caractérisé en ce que les
15 périodes successives d'alimentation de la phase ou des phases du moteur présentent un rapport cyclique temporel supérieur à 50%.
4. Procédé de commande selon la revendication 2 ou 3, caractérisé en ce
20 que, dans le mode de commande d'alimentation continu, les périodes d'alimentation débutent, à vitesse de rotation donnée, à angle d'amorçage constant.
5. Procédé de commande selon l'une des revendications précédentes,
25 caractérisé en ce qu'on alimente la machine selon le mode de commande d'alimentation continu dès que les conditions de vitesse et de couple de la machine permettent ce mode de commande d'alimentation.
6. Procédé de commande selon la revendication 5, caractérisé en ce qu'on
30 alimente la machine selon le mode de commande d'alimentation discontinu si les conditions de vitesse et de couple de la machine ne permettent pas le mode de commande d'alimentation continu.
7. Dispositif (1' ; 1'') de commande de l'alimentation électrique d'une machine électrique à réluctance variable, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens matériels (10', 12, 15, 16, 17, 18) et des moyens logiciels

pour mettre en œuvre le procédé selon l'une des revendications précédentes.

8. Ensemble d'entraînement (22 ; 23) comprenant un dispositif de
5 commande (1' ; 1'') selon la revendication 7 et une machine électrique à
réductance variable.
9. Véhicule automobile comprenant un ensemble d'entraînement selon la
revendication 8.

Fig.1

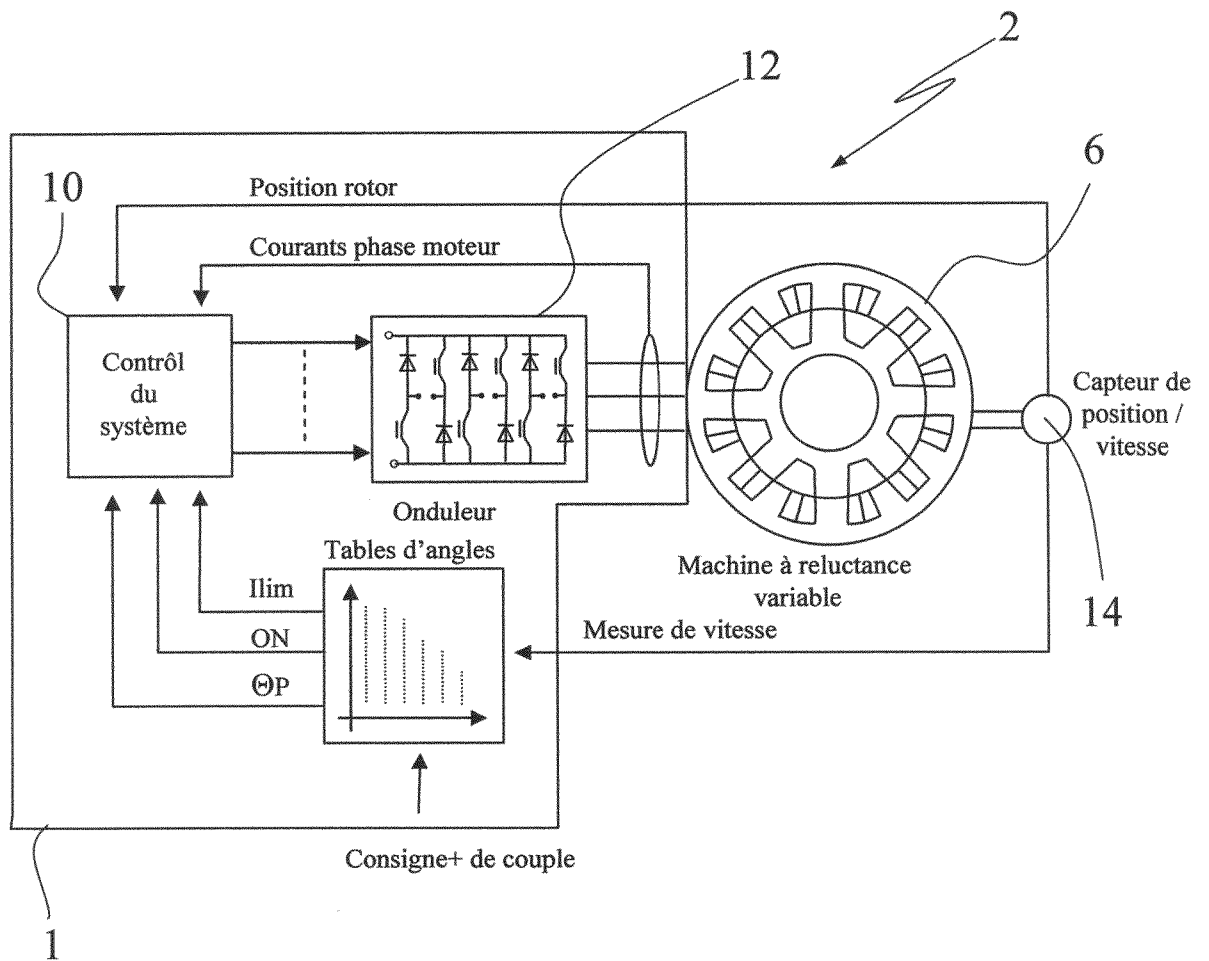


Fig.2

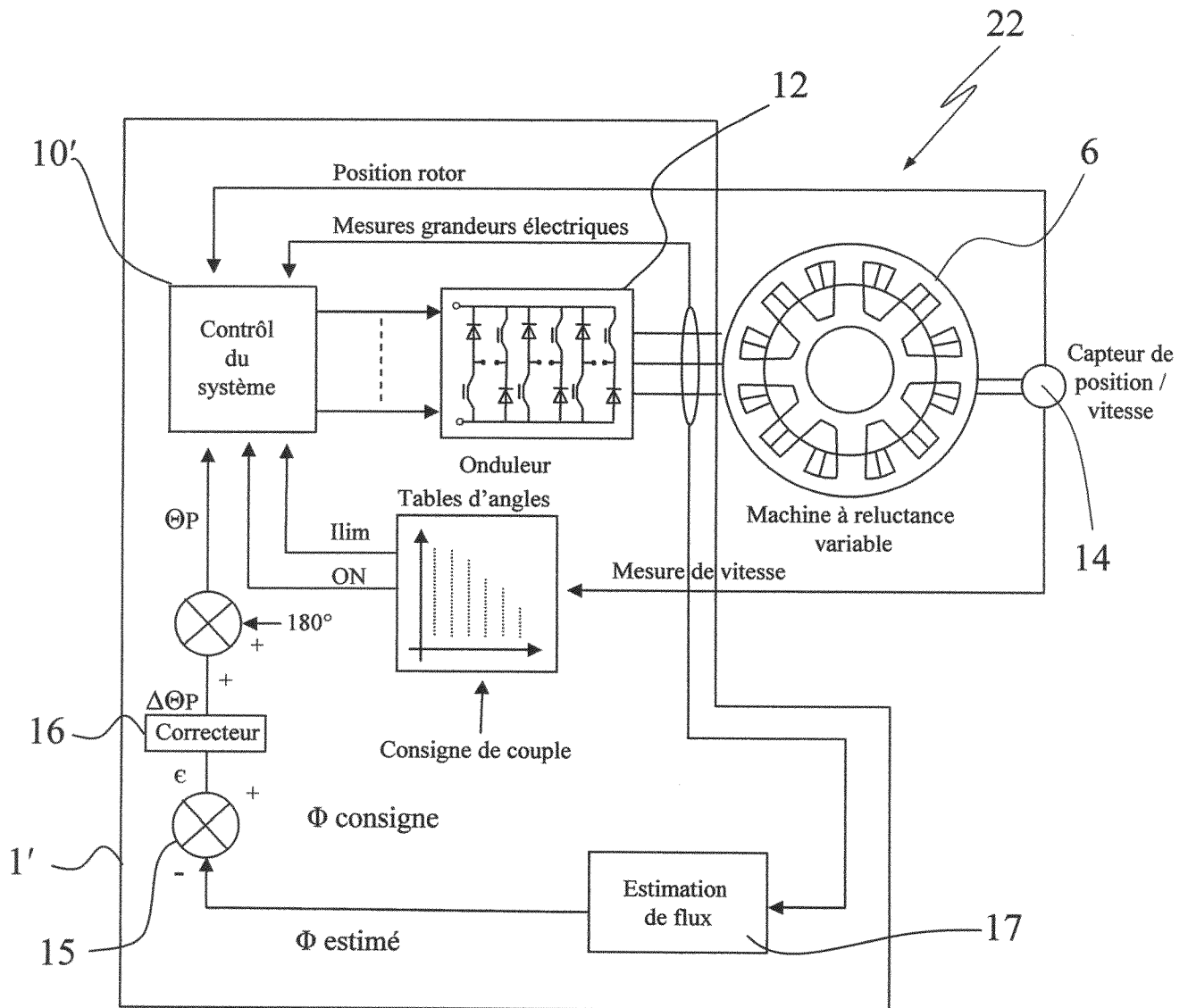


Fig.3

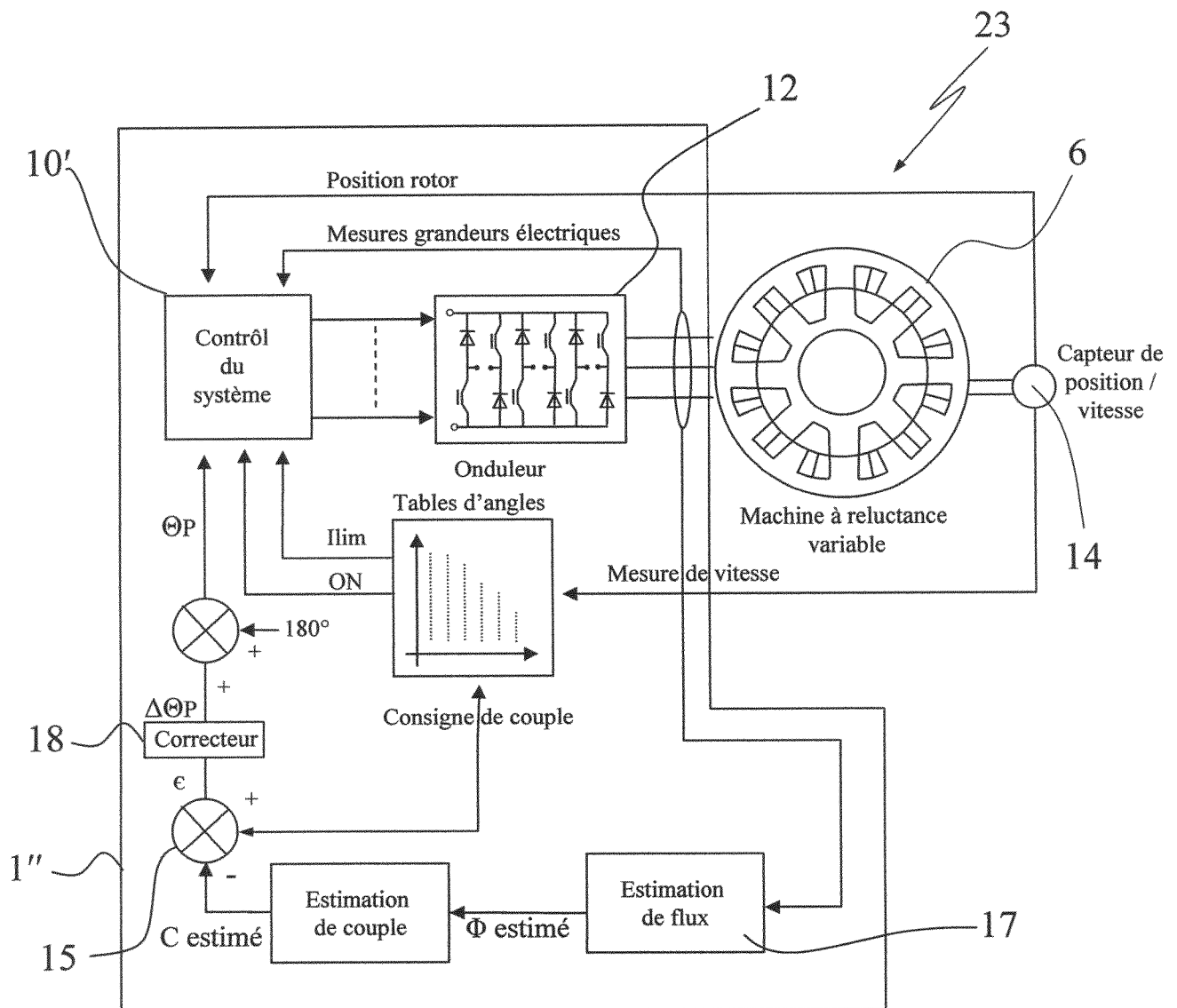


Fig.4

Courant dans une phase moteur et tension appliquée sur celle-ci en fonction de l'angle électrique à basse vitesse

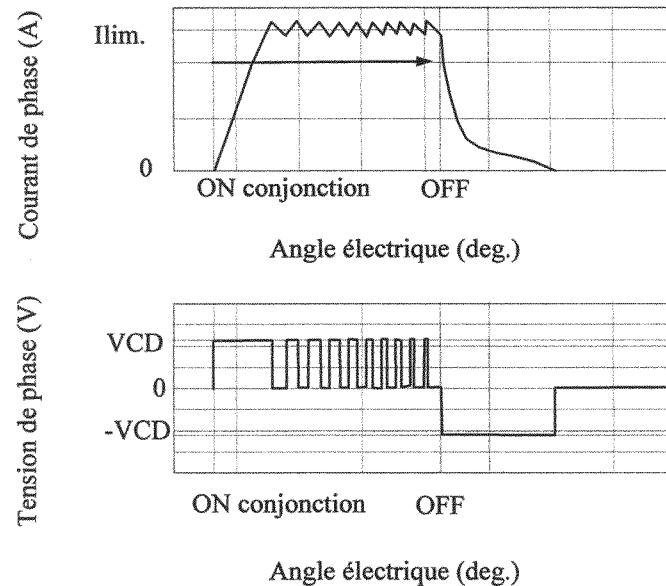


Fig.5

Courant dans une phase moteur et tension appliquée sur celle-ci en fonction de l'angle électrique à haute vitesse

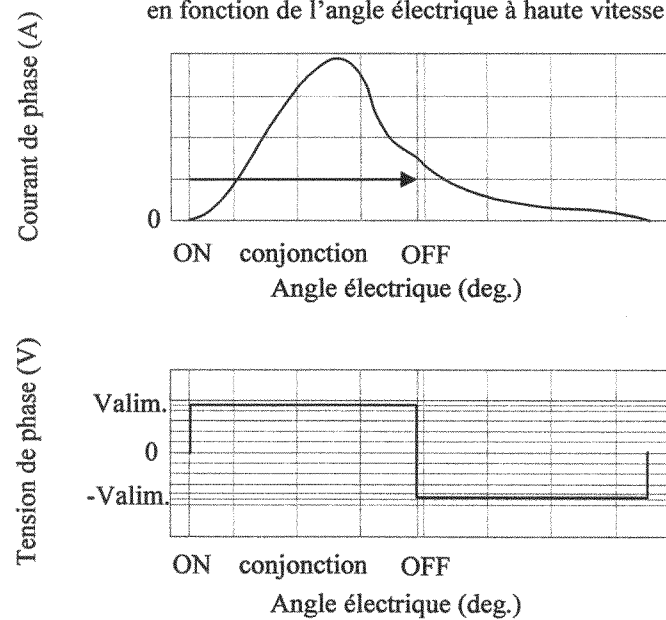


Fig.6

Evolution temporelle du flux et du courant avec un contrôle du couple.

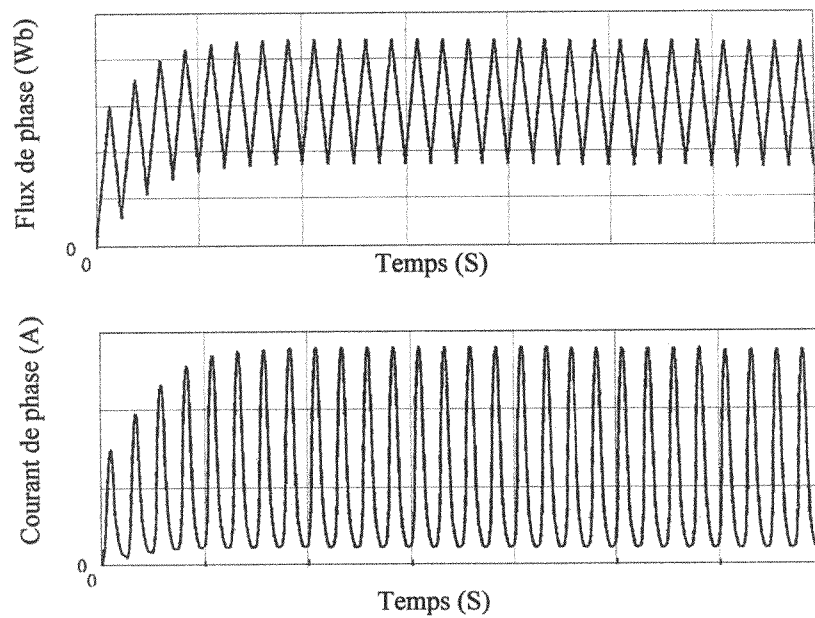
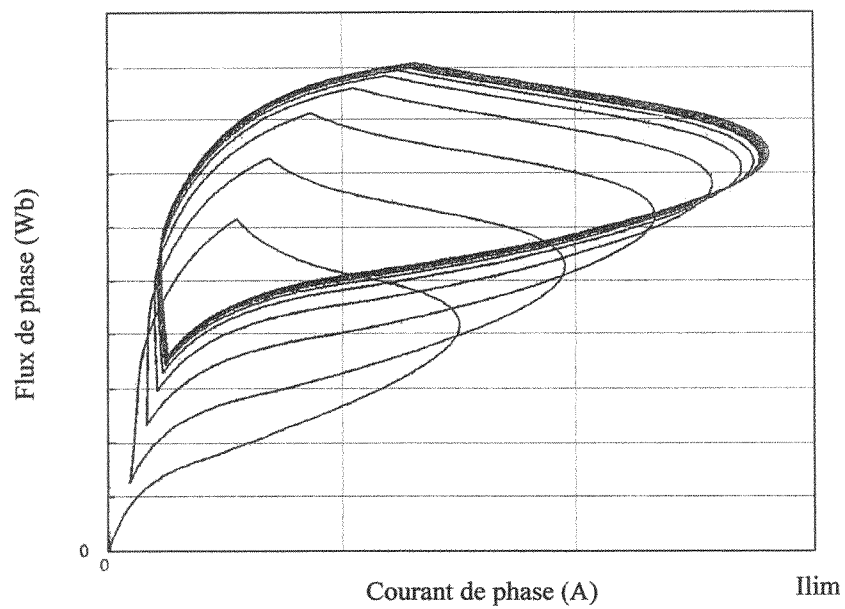


Fig.7

Evolution du cycle énergétique avec un contrôle du couple



Evolution de l'angle de conduction et du gain en couple à chaque période avec un contrôle du couple.

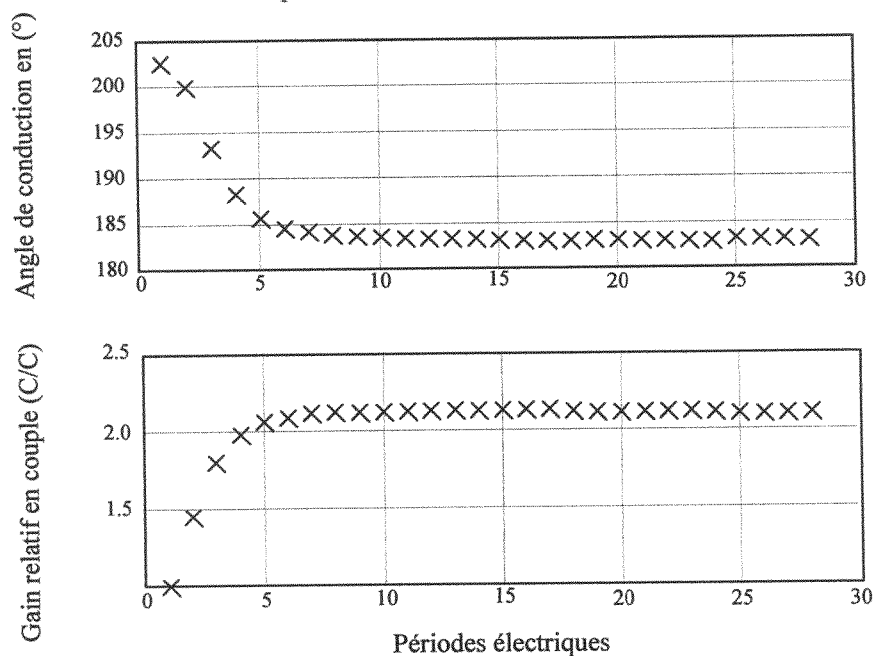


Fig.8

Fig.9

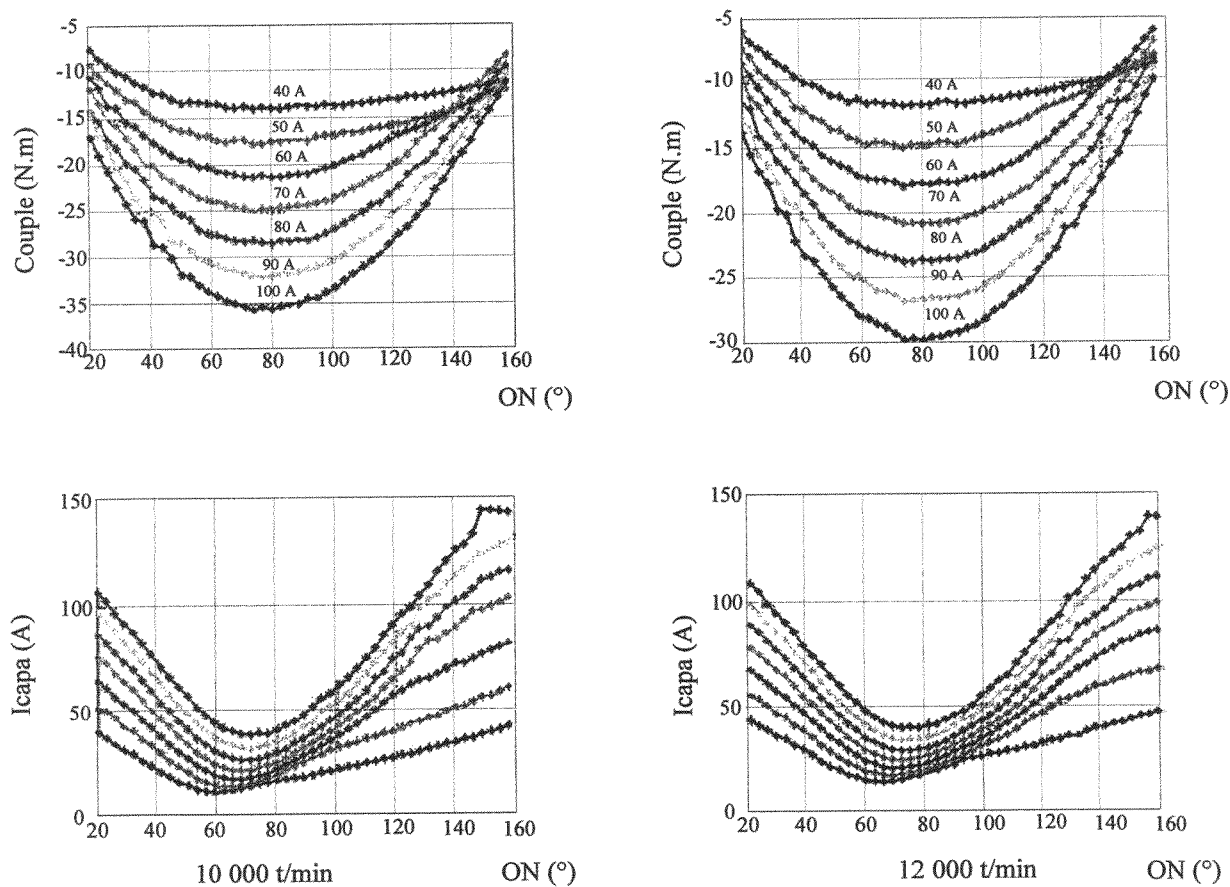


Fig.10

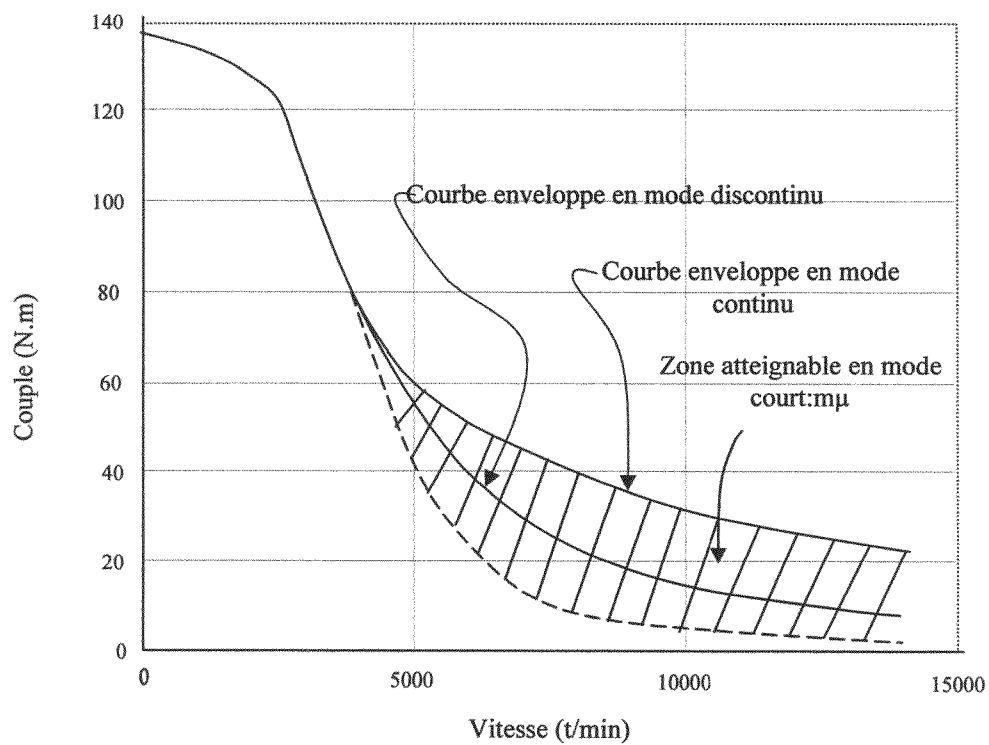


Fig.11

Angle optimaux d'amorçage

