

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

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

2 878 662

21 N° d'enregistrement national : 04 12668

51 Int Cl⁸ : H 02 P 25/08 (2006.01), H 02 P 9/40

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 30.11.04.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 02.06.06 Bulletin 06/22.

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

60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

71 Demandeur(s) : *RENAULT SAS Société par actions simplifiée* — FR.

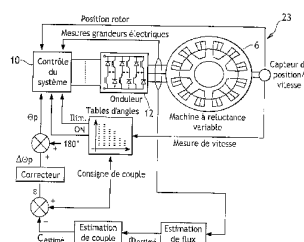
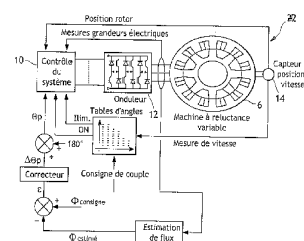
72 Inventeur(s) : LOUDOT SERGE.

73 Titulaire(s) :

74 Mandataire(s) : REGIMBEAU.

54 PROCÉDE DE COMMANDE POUR UN FONCTIONNEMENT EN MODE COURANT CONTINU D'UN ENSEMBLE D'ENTRAÎNEMENT DE VÉHICULE A MOTEUR THERMIQUE.

57 Dans le procédé de commande d'un ensemble d'entraînement (22) de véhicule, on applique à une machine (6) à réluctance variable une valeur de consigne d'angle de conduction supérieure à 180° pour un fonctionnement de la machine en mode courant continu qui est ajustée en fonction d'une mesure de contrôle de la stabilité du fonctionnement de la machine dans ce mode courant continu.



FR 2 878 662 - A1



L'invention concerne les ensembles d'entraînement de véhicule comprenant un moteur thermique, ainsi que les procédés de commande de tels ensembles.

On a représenté à la figure 1 un exemple de réalisation classique d'un tel ensemble. L'ensemble 2 constitue un ensemble d'entraînement de véhicule automobile. Cet ensemble comprend de façon connue en soi un moteur thermique 4, tel qu'un moteur à essence ou un moteur diesel. Il comprend un alerno-démarrreur formé par une machine 6 à réluctance variable d'un type connu en soi. Cette machine 6 peut être reliée mécaniquement au moteur 4 pour fournir un couple à ce dernier, notamment en vue de le faire démarrer lorsqu'il est à l'arrêt. Cette liaison mécanique d'un type connu en soi porte la référence 8 sur la figure 1. L'ensemble comporte une unité de commande 10 comportant des moyens informatiques classiques lui permettant de commander les différents organes de l'ensemble comme on le verra ci-après. L'ensemble 2 comporte également un onduleur 12 au moyen duquel l'unité de commande 10 pilote le fonctionnement de la machine électronique 6.

L'ensemble 2 comporte 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 de la vitesse de la machine 6.

On a représenté sur la figure 2 une topologie d'onduleur classique pour la commande d'une phase moteur. Sur cette figure 2, V_{DC} représente la tension continue d'alimentation de l'onduleur, I_1 et I_2 deux interrupteurs électriques commutables à l'ouverture et à la fermeture et D_1 et D_2 deux diodes.

Un procédé de commande d'un tel ensemble d'entraînement de véhicule (comportant comme on l'a vu une machine à réluctance associé à un onduleur) est généralement 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 réductance donné, de délivrer un couple le plus important possible (tant en mode moteur qu'en mode générateur) sur la plage de fonctionnement de la machine, et ce principalement dans les hautes vitesses.

5 Il s'agit effectivement de parvenir au meilleur compromis coût/poids/volume pour l'ensemble d'entraînement machine-onduleur.

On a illustré sur les figures 3 et 4 l'allure des courants et des tensions de phase tels que représentés sur la figure 2, respectivement à basse vitesse et à haute vitesse, en fonction de l'angle électrique du rotor (cet angle
10 étant nul lorsque la dent du rotor est en conjonction avec la dent du stator).

On sait qu'une machine à réductance variable telle que la machine 6 de la figure 1 se pilote essentiellement par trois variables :

- les angles de début de magnétisation ON et de fin de magnétisation OFF ;
- 15 - et, dans les basses vitesses, le courant de phase crête qui est régulé (I_{lim}) ;

La magnétisation de la phase de la machine se fait dans l'intervalle de temps constitué par l'angle de conduction $\Theta_p = \text{OFF-ON}$.

On notera que pour obtenir une démagnétisation complète, l'angle de
20 conduction Θ_p doit être inférieur à 180° .

Afin de piloter la machine à réductance variable, on utilise comme paramètres d'entrée de l'unité de commande 10 les paramètres de commande (ON, Θ_p , I_{lim}) à basse vitesse et (ON, Θ_p) à haute vitesse ; ces paramètres étant optimisés pour chaque point de fonctionnement couple-
25 vitesse.

Comme illustré à la figure 1, et de façon connue en soi, la machine 6 est pilotée par l'unité de commande 10 au moyens de loi de commande issues de tables qui donnent les angles d'amorçage (ON), de conduction (Θ_p) et le courant crête (I_{lim}) en fonction de la vitesse de la machine obtenue
30 à partir du capteur 14. Ces grandeurs sont également déterminées en fonction du couple à délivrer par la liaison 8. Eventuellement, on pourra

également prendre en compte la tension d'alimentation continue V_{DC} de l'onduleur si celle-ci est susceptible de varier, ainsi que d'autres paramètres tels que la température des bobinages par exemple.

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

10 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 des courbes représentées sur les figures 5 et 6 qui illustrent l'évolution du flux associé à une phase de la machine en fonction du courant de phase, pour une machine fonctionnant respectivement à haute vitesse et à basse vitesse.

15 L'énergie issue de la conversion électromécanique est ainsi caractérisée par la surface (ou cycle énergétique) délimitée par la trajectoire parcourue par le flux de phase et le courant de phase au cours d'une période électrique. Les figures 5 et 6 représentent ainsi l'énergie transmise lors d'une période électrique pour une machine fonctionnant respectivement à haute
20 vitesse et à basse vitesse.

On constate qu'à haute vitesse le cycle énergétique est très réduit 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 conjonction), et le courant phase maximum admissible
25 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.

30 Afin de pallier au rendement réduit à haute vitesse limitant de fait le couple disponible sur l'arbre moteur, il a été proposé un mode de fonctionnement dit mode de courant continu selon lequel un angle de

conduction Θ_p supérieur à 180° électrique (la durée de fluxage étant supérieure à la durée de défluxage) est appliqué.

Un tel angle de conduction Θ_p supérieur à 180° pour un fonctionnement en mode courant continu peut s'écrire $\Theta_p = \Delta\Theta_p + 180^\circ$, où $\Delta\Theta_p$ est
5 dénommé angle de conduction supplémentaire.

On a représenté sur les figures 7 et 8 l'intérêt du mode courant 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.

10 La figure 7 (respectivement 8) permet de comparer le couple maximum (resp. la puissance) en fonction de la vitesse pouvant être obtenu avec la loi de commande classique (traits pointillés) et avec la loi de commande du mode courant continu (traits pleins).

On constate l'obtention d'un net gain en couple (resp. en puissance)
15 lorsque le mode courant continu est utilisé.

On a représenté sur la figure 9 l'évolution, sous l'effet de l'application d'un angle de conduction Θ_p supérieur à 180° , de l'énergie transmise sur plusieurs périodes électriques à vitesse de rotation constante. La saturation progressive de période en période produit un accroissement du cycle
20 énergétique (ie. de la surface parcourue) et donc du couple disponible sur l'arbre moteur.

La figure 10 illustre l'augmentation progressive du couple moyen délivré par la machine sur chaque période électrique, par rapport à la première période, dans les mêmes conditions d'opération que celles de la figure 9. La
25 discontinuité de la croissance du couple représentée sur la figure 10 provient de l'action d'une loi de régulation qui agit sur les lois de commande (angles d'amorçage de blocage, et limitation du courant crête) de façon à maintenir constant le cycle énergétique et donc le couple.

On précise ici que le gain en couple dépend :

- 30
- de la vitesse de la machine,
 - de la conception même de la machine,

- de la commande appliquée (angles, limitation du courant, roue libre).

Comme cela a été vu ci-dessus, en particulier au regard des figures 7 et 8, le mode courant continu s'avère avantageux en ce qu'il permet un gain de couple important dans les hautes vitesses.

5 Le mode courant continu est cependant un mode intrinsèquement instable, dans lequel la stabilité du flux et la stabilité du courant sont difficilement maîtrisées.

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

15 Le document EP 0 534 761 envisage de stabiliser un fonctionnement en mode courant 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
20 donc indirectement le couple, en faisant varier l'angle de conduction Θ_p .

Mais ce document se contente d'utiliser des paramètres de contrôle préprogrammés et stockés dans une table de correspondance et ne précise
25 aucunement comment l'angle de conduction Θ_p est varié. 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 problématique de la faible réactivité du système en mode courant continu pour atteindre un couple de consigne.

L'invention a pour objectif de proposer un pilotage dynamique de la
30 machine à réluctance variable apte à permettre la commande d'un ensemble

d'entraînement de véhicule automobile dans le mode courant continu tout en assurant la stabilité du flux et du courant dans la machine.

Plus spécifiquement, l'invention vise à améliorer la réactivité d'un ensemble d'entraînement de véhicule en mode courant continu pour
5 atteindre un couple de consigne en un minimum de périodes électriques.

A cet effet, l'invention propose, selon un premier aspect, un procédé de commande d'un ensemble d'entraînement de véhicule, caractérisé en ce qu'on applique à une machine à réluctance variable une valeur de consigne d'angle de conduction supérieure à 180° pour un fonctionnement de la
10 machine en mode courant continu, qui est ajustée en fonction d'une mesure de contrôle de la stabilité du fonctionnement de la machine dans ce mode courant continu.

Certains aspects préférés, mais non limitatifs, de ce procédé sont les suivants :

- 15 - la mesure de contrôle de stabilité peut être réalisée à l'aide d'une estimation du flux de phase ;
- le flux peut être estimé par intégration de la tension appliquée à cette phase lors d'une période électrique selon
- $$\Phi_{estimé} = \int (U_{phase} - R_{phase} \cdot I_{phase}) dt, \text{ où } R_{phase} \text{ désigne la résistance du}$$
- 20 bobinage statorique, U_{phase} la tension de phase et I_{phase} le courant de phase ;
- on réalise une mesure directe de la tension de phase ;
- les ordres de commande de début et de fin de magnétisation et le courant de phase sont utilisés pour déterminer la tension de phase, celle-ci étant égale à la tension d'alimentation V_{DC} pendant la durée de la
25 magnétisation, à $-V_{DC}$ pendant la durée de la démagnétisation, et à zéro durant les phases de roue libre ou lorsque le courant de phase est nul ;
- l'estimation du flux peut être périodiquement mise à jour à l'aide d'une valeur du flux mesurée ;
- 30 - l'estimation du flux est recalée à chaque période électrique, lors du passage en opposition, à la valeur $L_0 \cdot I_{phase}$ où L_0 est l'inductance en

opposition et I_{phase} le courant mesuré à l'instant du passage en opposition ;

- la mesure de stabilité peut être une mesure de contrôle du flux selon laquelle on mesure l'écart entre la valeur du flux de consigne et la valeur du flux estimé ;
- la mesure de stabilité peut être une mesure de contrôle du couple selon laquelle on calcule l'écart entre la valeur du couple de consigne et une valeur de couple estimé obtenue à partir de ladite estimation du flux ;
- le couple peut être estimé, à l'aide de l'estimation du flux, en calculant la différence entre l'énergie transmise lors de la phase de magnétisation et l'énergie renvoyée lors de la phase de démagnétisation ;
- l'écart peut être traité par un correcteur pourvu d'une loi de correction adaptée pour modifier l'angle de conduction appliqué à la machine de manière à rendre ledit écart nul ;
- la loi de correction peut être de type proportionnel-intégral ;
- on peut appliquer à la machine sur un période électrique, un angle de conduction Θ_p calculé à partir de l'estimation du flux calculée à la période électrique précédente ;
- la valeur de l'estimation du flux lors de la première période peut être imposée à une valeur prédéterminée, telle que celle du flux obtenu pour un angle de conduction de 180° .

Selon un deuxième aspect, l'invention propose un ensemble d'entraînement pour véhicule comprenant :

- un moteur thermique ;
- une machine à réluctance variable ; et
- une unité de commande

caractérisé en ce que l'unité de commande est adaptée pour appliquer à la machine une valeur de consigne d'angle de conduction supérieur à 180° pour un fonctionnement de la machine en mode courant continu qui est ajustée en fonction d'une mesure de contrôle de la stabilité du fonctionnement de la machine dans ce mode courant continu.

Certains aspects préférés, mais non limitatifs, de cet ensemble d'entraînement sont les suivants :

- 5 - l'unité de commande comporte des moyens pour calculer une estimation du flux et pour ajuster l'angle de conduction en fonction de cette estimation ;
- l'unité de commande comporte des moyens pour réaliser une mesure de contrôle du flux en calculant l'écart entre la valeur du flux de consigne et la valeur du flux estimé, et pour ajuster l'angle de conduction en fonction de cette mesure de contrôle du flux ;
- 10 - l'unité de commande comporte des moyens pour réaliser une mesure de contrôle du couple en calculant l'écart entre la valeur du couple de consigne et une valeur du couple estimé à partir de l'estimation du flux, et pour ajuster l'angle de conduction en fonction de cette mesure de contrôle du couple.

15 On prévoit enfin selon l'invention un véhicule comprenant un ensemble selon le deuxième aspect de l'invention.

D'autres aspects, buts et avantages de l'invention apparaîtront mieux à la lecture de la description détaillée suivante de formes de réalisation préférées de celle-ci, donnée à titre d'exemple non limitatif et faite en
20 référence aux dessins annexés.

Sur les dessins, outre les figures 1 à 10 déjà présentées plus haut :

- la figure 11 représente une réalisation possible de la régulation du flux par pilotage de l'angle de conduction appliqué à la machine en fonction d'une mesure de contrôle du flux ;
- 25 - la figure 12 représente une réalisation possible d'un estimateur de flux de phase ;
- la figure 13 illustre le recalage du flux estimé ;
- la figure 14 représente un mode de réalisation possible de la régulation du couple par pilotage de l'angle de conduction appliqué à la machine en
30 fonction d'une mesure de contrôle du couple ;

- la figure 15 représente le séquençage du calcul d'une régulation de couple ;
- la figure 16 représente le cycle énergétique sur une période électrique en mode courant continu ;
- 5 - la figure 17 représente l'énergie transmise en phase de magnétisation pour le cycle de la figure 16 ;
- la figure 18 représente l'énergie rendue en phase de démagnétisation pour le cycle de la figure 16 ;
- la figure 19 montre l'évolution du cycle énergétique avec un contrôle du couple ;
- 10 - la figure 20 représente l'évolution temporelle du flux et du courant avec un contrôle du couple ;
- la figure 21 représente l'évolution de l'angle de conduction et du gain en couple à chaque période avec un contrôle du couple.

15 L'invention propose un procédé de commande d'un ensemble d'entraînement de véhicule, caractérisé en ce qu'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 courant continu.

20 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.

25 Dans le cadre de l'invention, la mesure de contrôle de stabilité est réalisée à l'aide d'une estimation du flux de phase.

Contrôle du flux

Selon un premier mode de réalisation possible, la mesure de stabilité est une mesure de contrôle du flux.

30 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 courant continu.

Cette mesure de contrôle du flux est alors utilisé pour piloter l'angle de conduction Θ_p (supérieur à 180° pour un fonctionnement en mode courant continu). Et grâce à un tel pilotage, le flux peut être régulé.

La figure 11 représente un mode de mise en œuvre possible de la régulation du flux par pilotage de la valeur de consigne de l'angle de conduction appliqué à la machine en fonction d'une mesure de contrôle du flux.

Un comparateur 15 permet de calculer une erreur ϵ sur le flux, égale à la différence entre le flux de consigne Φ_{consigne} et le flux estimé $\Phi_{\text{estimé}}$ à l'aide de moyens d'estimation du flux (portant la référence 17 sur la figure 11, et dont un mode de réalisation possible sera discuté ci-après en référence à la figure 12).

Cette erreur ϵ sur le flux peut être calculée pour la valeur maximale du flux ou tout autre grandeur relative (telle que par exemple la valeur moyenne).

Cette erreur ϵ est traitée par un correcteur 16 adapté pour intégrer diverses lois de corrections (proportionnel - intégral ou autres). L'angle de conduction Θ_p est alors modifié 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 conduction Θ_p supérieur à 180° assurant un fonctionnement en mode courant continu.

On détaille ci-après, en référence à la figure 12, un mode de réalisation possible de l'estimateur 17 du flux de phase.

On notera que cet estimateur peut être réalisé aussi bien par un contrôleur numérique que par un circuit analogique.

L'estimation du flux d'une phase se fait par intégration de la tension appliquée à cette phase : $\Phi_{\text{estimé}} = \int (U_{\text{phase}} - R_{\text{phase}} \cdot I_{\text{phase}}) dt$, où R_{phase}

désigne la résistance du bobinage statorique, U_{phase} et I_{phase} désignent respectivement la tension et le courant de phase (comme cela est indiqué sur les figures 3 et 4).

La tension de phase U_{phase} correspond à la tension de l'alimentation V_{DC} pendant la durée de magnétisation, à la tension $-V_{\text{DC}}$ durant la phase de démagnétisation, et à 0 durant les phases de roue libres ou lorsque le courant est nul.

L'estimateur 17 comporte ainsi des moyens 18 adaptés pour calculer la tension de phase U_{phase} . Ces moyens 18 prennent comme paramètres d'entrée soit une mesure directe la tension de chaque bobinage statorique, soit encore le courant de phase I_{phase} , la tension d'alimentation V_{DC} ainsi que les signaux de commande ON et OFF. En effet, les ordres de commande de début et de fin de magnétisation et la mesure du courant de phase permettent de connaître le signe de la tension appliquée sur le bobinage (positif, négatif ou nul) remplaçant ainsi une mesure directe de la tension de chaque bobinage statorique.

La valeur du courant de phase I_{phase} est obtenue, de manière connue en soi, comme cela est représentée sur la figure 1, par mesure électrique en sortie de l'onduleur 12.

Un intégrateur 19 permet de calculer l'estimation du flux selon l'équation $\Phi_{\text{estimé}} = \int (U_{\text{phase}} - R_{\text{phase}} \cdot I_{\text{phase}}) dt$ présentée ci-dessus.

En pratique cependant, les mesures présentent toujours des erreurs et surtout, la résistance du bobinage d'une phase R_{phase} est fortement variable (notamment avec la température). Selon un mode de réalisation avantageux de l'estimateur 17, on recale à chaque période électrique le flux estimé en sortie de l'intégrateur 19.

Selon un mode de réalisation possible de l'invention, ce recalage est réalisé lors du passage en opposition car à ce moment l'inductance de la phase est la plus constante (donc indépendante du courant de phase) ce qui minimise les erreurs et simplifie l'estimation du flux.

Le flux estimé lors du passage en opposition $\Phi_{\text{estimé}}|_{\text{opposition}}$ est donc tel que $\Phi_{\text{estimé}}|_{\text{opposition}} = L_o \cdot I_{\text{phase}}$, où L_o est l'inductance en opposition (qui peut être mesurée rotor bloqué en opposition par exemple) et I_{phase} le courant de phase mesuré à cet instant. La figure 13 fournit un schéma illustrant un tel recalage du flux estimé.

La sortie de l'intégrateur est ainsi forcée à chaque période électrique, lors du passage en opposition, par la mise à jour de la valeur du flux ($L_o \cdot I_{\text{phase}}$).

Revenant à la description de la figure 11, la mesure du contrôle du flux (c'est-à-dire ici le calcul de l'erreur ϵ entre le flux de consigne Φ_{consigne} et le flux estimé $\Phi_{\text{estimé}}$) est par exemple réalisée sur la valeur maximale du flux obtenue en fin de période de magnétisation.

En appliquant à la machine une valeur de consigne d'angle de conduction Θ_p fonction de cette mesure de contrôle du flux, on évite ainsi toute divergence du flux et du courant de phase avec un gain sensible sur le couple.

Le paramètre de contrôle du flux est ainsi l'angle de conduction Θ_p calculé à chaque période électrique par la loi de pilotage décrite ci-dessus prenant en considération une estimation du flux.

Il faut noter que les autres paramètres de commande de la machine (angle de début de magnétisation ON , limitation du courant de phase I_{lim}) restent inchangés. En particulier, ces paramètres (ON , I_{lim}) peuvent être dérivés, de manière connue en soi et comme déjà mentionné précédemment, de tables d'angles.

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, d'imposer le flux estimé à la première période à une valeur prédéterminée (telle que la valeur du flux obtenu à $\Theta_p = 180^\circ$ 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 courant continu. Toutefois, le contrôle du couple supplémentaire apporté par le mode courant continu peut ne pas s'avérer suffisamment précis.

5 Contrôle du couple

Selon un autre mode de réalisation possible de l'invention, on utilise pour piloter l'angle de conduction Θ_p , non pas une mesure du contrôle du flux, mais une mesure du contrôle du couple.

10 Cette mesure du contrôle du couple mesure l'erreur ϵ entre le couple de consigne C_{consigne} et une estimation du couple $C_{\text{estimé}}$, laquelle est obtenue à partir de l'estimation du flux $\Phi_{\text{estimé}}$.

A vitesse fixe, on détermine une estimation du couple à l'aide de l'estimation du flux puis en déterminant une estimation de l'énergie transmise.

15 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.

L'énergie transmise lors de la magnétisation vaut : $E_{\text{mag}} = \int_{\text{ON}}^{\text{OFF}} I_{\text{phase}} d\phi$,

où ϕ est le flux de phase estimé.

20 Il faut noter que le flux est strictement croissant durant cette phase ; il atteint son maximum à la fin de la magnétisation (OFF).

Lors de la démagnétisation, l'énergie renvoyée vaut

$E_{\text{demag}} = \int_{\text{OFF}}^{\text{ON}} I_{\text{phase}} d\phi$. Dans cette phase, le flux est strictement décroissant.

25 Algébriquement, E_{mag} et E_{demag} sont de signes opposés. La somme de ces deux grandeurs (ou la différence de leurs valeurs absolues) représente l'énergie convertie et est donc une image du couple électromagnétique de la machine.

Sur une période électrique, le couple électromagnétique moyen délivré est proportionnel à la surface du cycle énergétique représenté par la figure

30 16.

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 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.

Au cours d'une première phase, on calcule l'énergie échangée lors de la phase de magnétisation $E_{mag} = \int_{ON}^{OFF} I_{phase} d\phi$, telle que représenté par la surface de la figure 17.

Au cours d'une deuxième phase, on calcule l'énergie échangée lors de la phase de démagnétisation $E_{demag} = \int_{OFF}^{ON} I_{phase} d\phi$, telle que représentée par la surface de la figure 18.

L'énergie convertie correspond à la différence des deux surfaces représentées aux figures 17 et 18, ou encore à la somme algébrique des valeurs E_{mag} et E_{demag} (celles-ci étant de signes opposés).

La figure 14 représente un mode de mise en œuvre possible de la régulation du flux par pilotage de la valeur de consigne de l'angle de conduction Θ_p appliqué à la machine en fonction d'une mesure de contrôle du couple.

On rapprochera cette figure 14 de la figure 11 déjà discutée précédemment.

L'erreur ϵ entre le couple moyen de consigne et le couple moyen estimé est contrôlée par un correcteur 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° et donc un fonctionnement en mode courant continu.

Dans un tel cas de figure, suivant le schéma de la figure 14, la loi de pilotage de l'angle de conduction permet de contrôler directement le couple de la machine.

L'estimation du couple moyen d'une période n'est toutefois connue qu'à la fin de cette période. La période suivante doit intégrer le calcul de la commande θ_p à appliquer pour la période en cours (fonction du calcul du couple moyen estimé lors de la période précédente). Le résultat de ce calcul devant être prêt avant la fin de la magnétisation tout en effectuant l'estimation du couple de la présente période, deux options parmi d'autres se présentent.

Selon une première option, le calcul de la commande θ_p peut être réalisé en parallèle à l'estimation du couple (et donc du flux) durant le début de magnétisation. Le chronogramme inférieur de la figure 15 illustre cette première option.

Selon une deuxième option, le début de la période de magnétisation peut être consacré au calcul de la commande θ_p , l'estimation de couple commençant ensuite. Une extrapolation linéaire est alors réalisée sur cette période de manière à estimer le couple et de flux. Le chronogramme supérieur de la figure 15 illustre cette option.

Dans le cadre d'un contrôle du couple réalisé conformément au mode de réalisation possible de l'invention discuté ci-dessus, on a représenté :

- sur la figure 19, l'évolution du cycle énergétique ;
- sur la figure 20, l'évolution temporelle du flux et du courant ;
- sur la figure 21, l'évolution de l'angle de conduction et du gain relatif en couple au cours de plusieurs périodes électriques.

La figure 19 illustre l'accroissement progressif du cycle énergétique (i.e. de la surface parcourue) et donc du couple disponible sur l'arbre moteur.

La figure 20 illustre la stabilité du flux et du courant de phase procurée par l'invention en mode courant continu.

La figure 21 illustre le gain en dynamique procurée par l'invention, le couple fourni atteignant en un nombre réduit de périodes la valeur de consigne.

On a représenté sur les figures 22 et 23, un ensemble 22, 23 selon les deux modes de réalisation possible de l'invention exposés précédemment, et dans lesquels la valeur de l'angle de conduction appliqué à la machine est ajusté respectivement à partir d'une mesure de contrôle du flux et à partir d'une mesure de contrôle du couple.

Contrôle du courant de phase

Le contrôle du courant de phase peut quant à lui être réalisé par limitation du courant en venant agir sur les angles de commande. Cette limitation peut également être réalisée à l'aide d'un contrôle actif du courant crête par commutation des interrupteurs qui limite le courant en cas de divergence.

L'invention permet finalement d'utiliser le mode courant 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.

Ainsi en mode moteur, l'invention permet d'améliorer les prestations requises par de nombreuses applications, notamment dans le domaine automobile.

En mode générateur, l'invention permet, pour un même échelon de charge, de réduire la durée et la profondeur de la chute de tension de la capacité de filtrage, ou encore de réduire la capacité elle-même à perturbation égale sur la tension. En d'autres termes, en mode générateur, le gain en dynamique de réponse du couple électromagnétique permet de réduire la capacité de filtrage à gabarit de tension égal, ou encore permet de réduire le gabarit de tension à capacité de filtrage égale.

Bien entendu, les contrôles discutés précédemment peuvent être utilisés indépendamment sur chacune des phases de la machine. Il est

également possible d'appliquer les mêmes commandes (ON , I_{lim} , Θ_p) sur les trois phases durant une même période électrique.

- On mentionne qu'il est en outre possible d'utiliser une loi de régulation (pour la correction de l'erreur ϵ) quelconque, adaptée en fonction de l'application choisie de manière à obtenir le meilleur compromis dynamique/stabilité du mode courant continu.
- 5

REVENDECATIONS

- 5 1. Procédé de commande d'un ensemble d'entraînement (22, 23) de véhicule, caractérisé en ce qu'on applique à une machine (6) à réluctance variable une valeur de consigne d'angle de conduction (Θ_p) supérieure à 180° pour un fonctionnement de la machine (6) en mode courant continu, qui est ajustée en fonction d'une mesure de contrôle de la stabilité du fonctionnement de la machine dans ce mode courant continu.
- 10 2. Procédé selon la revendication précédente, caractérisé en ce que la mesure de contrôle de stabilité est réalisée à l'aide d'une estimation du flux de phase.
- 15 3. Procédé selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le flux est estimé par intégration de la tension appliquée à cette phase lors d'une période électrique selon $\Phi_{estimé} = \int (U_{phase} - R_{phase} \cdot I_{phase}) dt$, où R_{phase} désigne la résistance du bobinage statorique, U_{phase} la tension de phase et I_{phase} le courant de phase.
- 20 4. Procédé selon la revendication précédente, caractérisé en ce que l'on réalise une mesure directe de la tension de phase.
- 25 5. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce que les ordres de commande de début et de fin de magnétisation et le courant de phase sont utilisés pour déterminer la tension de phase, celle-ci étant égale à la tension d'alimentation V_{DC} pendant la durée de la magnétisation, à $-V_{DC}$ pendant la durée de la démagnétisation, et à zéro durant les phases de roue libre ou lorsque le courant de phase est nul.

6. Procédé selon l'une des revendications 2 à 5, caractérisé en ce que l'estimation du flux est périodiquement mise à jour à l'aide d'une valeur du flux mesurée.
- 5 7. Procédé selon la revendication précédente, caractérisé en ce que l'estimation du flux est recalée à chaque période électrique, lors du passage en opposition, à la valeur $L_0 \cdot I_{\text{phase}}$ où L_0 est l'inductance en opposition et I_{phase} le courant mesuré à l'instant du passage en opposition.
- 10 8. Procédé selon l'une des revendications 2 à 7, caractérisé en ce que ladite mesure de stabilité est une mesure de contrôle du flux selon laquelle on mesure l'écart entre la valeur du flux de consigne et la valeur du flux estimé.
- 15 9. Procédé selon l'une des revendications 2 à 7, caractérisé en ce que ladite mesure de stabilité est une mesure de contrôle du couple selon laquelle on calcule l'écart entre la valeur du couple de consigne et une valeur de couple estimé obtenue à partir de ladite estimation du flux.
- 20 10. Procédé selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le couple peut être estimé, à l'aide de l'estimation du flux, en calculant la différence entre l'énergie transmise lors de la phase de magnétisation et l'énergie renvoyée lors de la phase de démagnétisation.
- 25 11. Procédé selon l'une des revendications 8 à 10, caractérisé en ce que ledit écart est traité par un correcteur pourvu d'une loi de correction adaptée pour modifier l'angle de conduction (Θ_p) appliqué à la machine de manière à rendre ledit écart nul.
- 30 12. Procédé selon la revendication précédente, caractérisé en ce que la loi de correction peut être de type proportionnel-intégral.

13. Procédé selon l'une des deux revendications précédentes, caractérisé en ce qu'on peut appliquer à la machine sur une période électrique, un angle de conduction (Θ_p) calculé à partir de l'estimation du flux calculée à la période électrique précédente.

14. Procédé selon la revendication précédente, caractérisé en ce que la valeur de l'estimation du flux lors de la première période peut être imposée à une valeur prédéterminée, telle que celle du flux obtenu pour un angle de conduction de 180° .

15. Ensemble d'entraînement (22, 23) pour véhicule comprenant :

- un moteur thermique (4) ;
- une machine (6) à réluctance variable ;
- et une unité de commande (10),

caractérisé en ce que l'unité de commande est adaptée pour appliquer à la machine (6) une valeur de consigne d'angle de conduction (Θ_p) supérieure à 180° pour un fonctionnement de la machine en mode courant continu qui est ajustée en fonction d'une mesure de contrôle de la stabilité du fonctionnement de la machine dans ce mode courant continu.

16. Ensemble selon la revendication précédente, caractérisé en ce que l'unité de commande comporte des moyens (17, 15, 16, 18) pour calculer une estimation du flux et pour ajuster l'angle de conduction en fonction de cette estimation.

17. Ensemble selon la revendication précédente, caractérisé en ce que l'unité de commande comporte des moyens (15, 16) pour réaliser une mesure de contrôle du flux en calculant l'écart entre la valeur du flux de consigne et la valeur du flux estimé, et pour ajuster l'angle de conduction en fonction de cette mesure de contrôle du flux.

5 18. Ensemble selon la revendication 16, caractérisé en ce que l'unité de commande comporte des moyens (15, 18) pour réaliser une mesure de contrôle du couple en calculant l'écart entre la valeur du couple de consigne et une valeur du couple estimé à partir de l'estimation du flux, et pour ajuster l'angle de conduction en fonction de cette mesure de contrôle du couple.

10 19. Véhicule caractérisé en ce qu'il comporte un ensemble (22, 23) selon l'une quelconque des revendications 15 à 18.

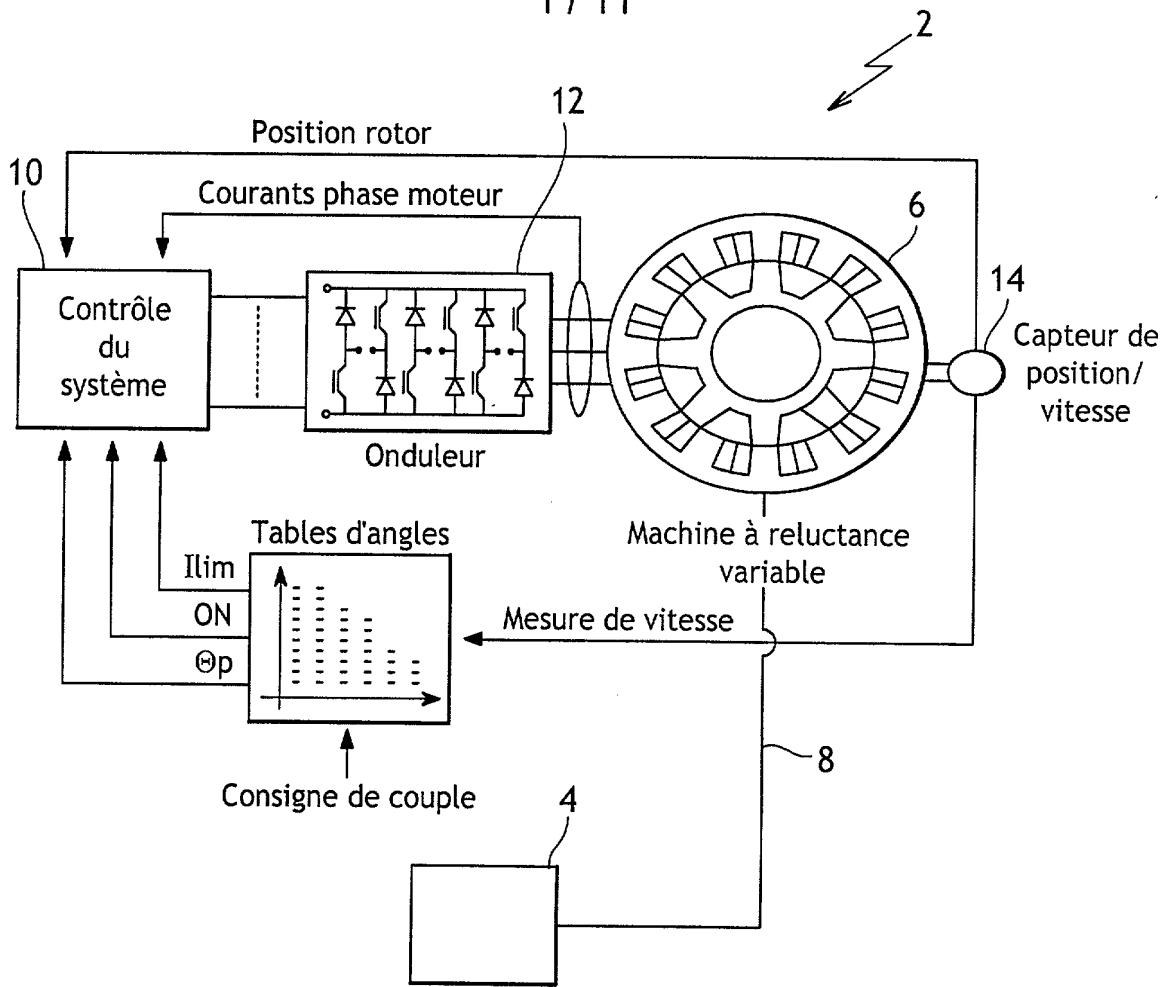


FIG.1

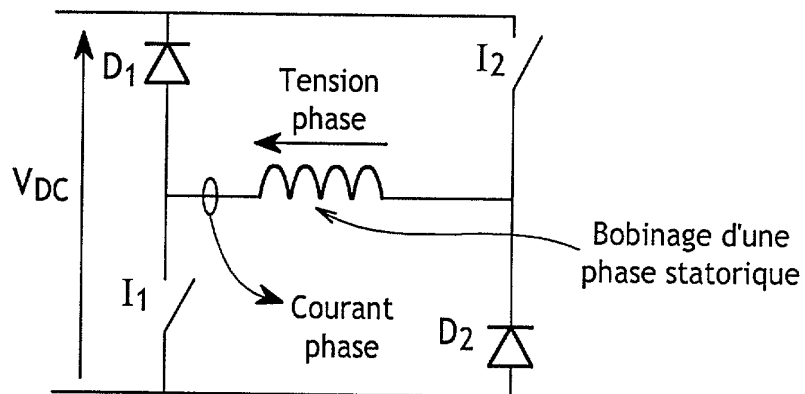


FIG.2

2/11

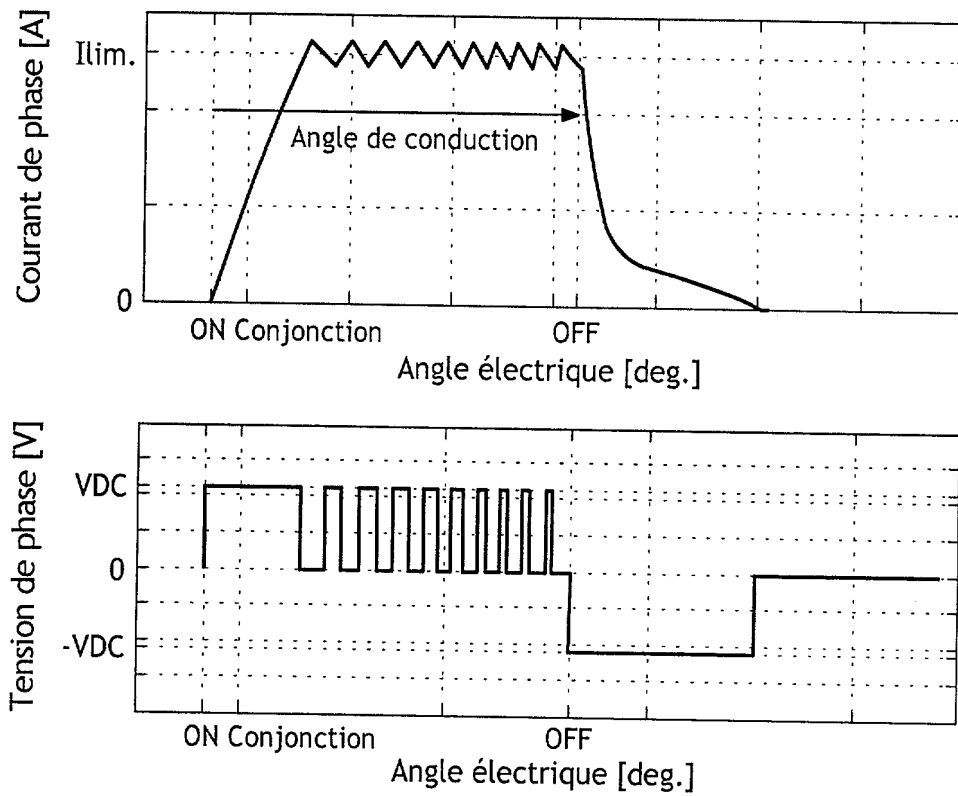


FIG.3 Courant dans une phase moteur et tension appliquée sur celle-ci en fonction de l'angle électrique à basse vitesse.

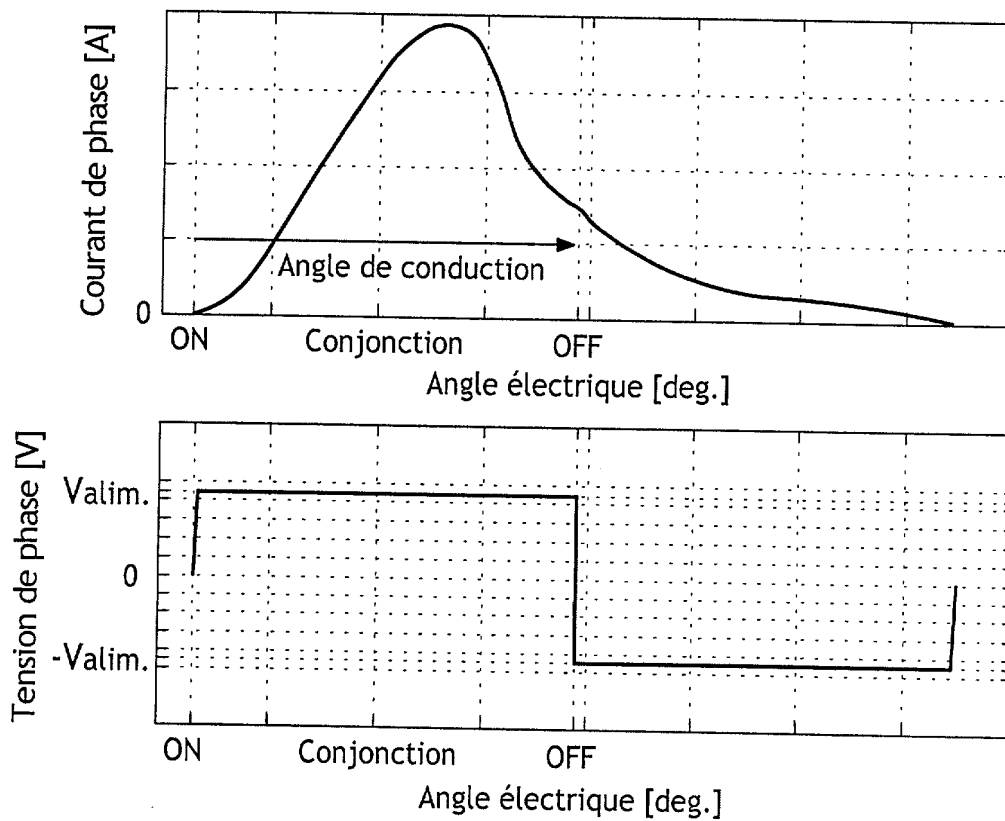


FIG.4 Courant dans une phase moteur et tension appliquée sur celle-ci en fonction de l'angle électrique à haute vitesse.

3/11

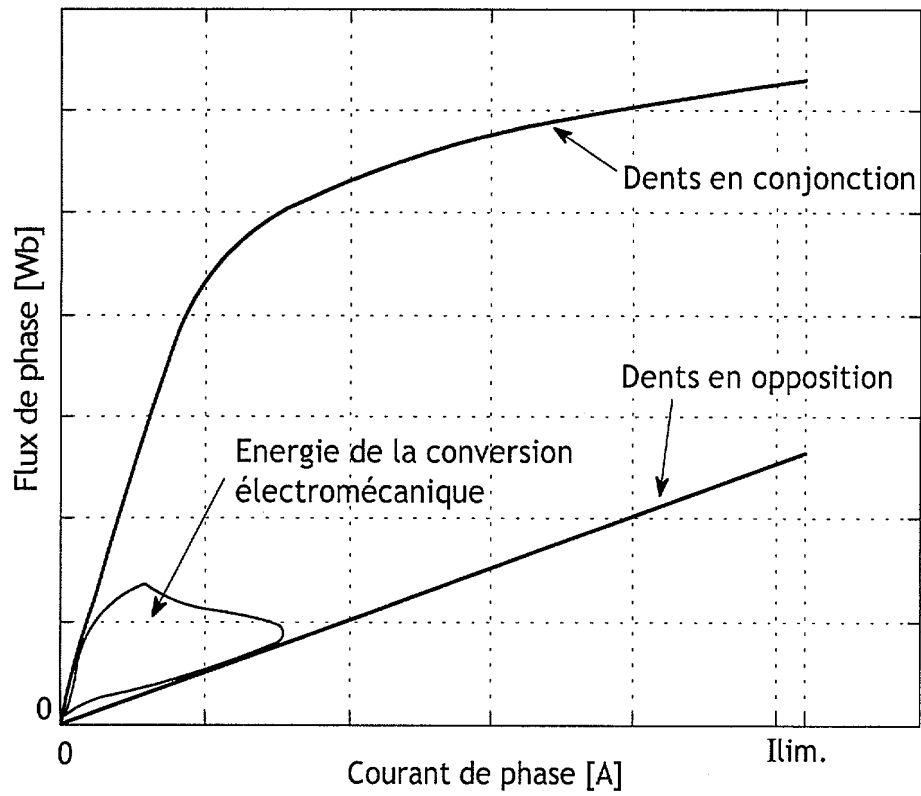


FIG.5 Energie transmise lors d'une période électrique à haute vitesse

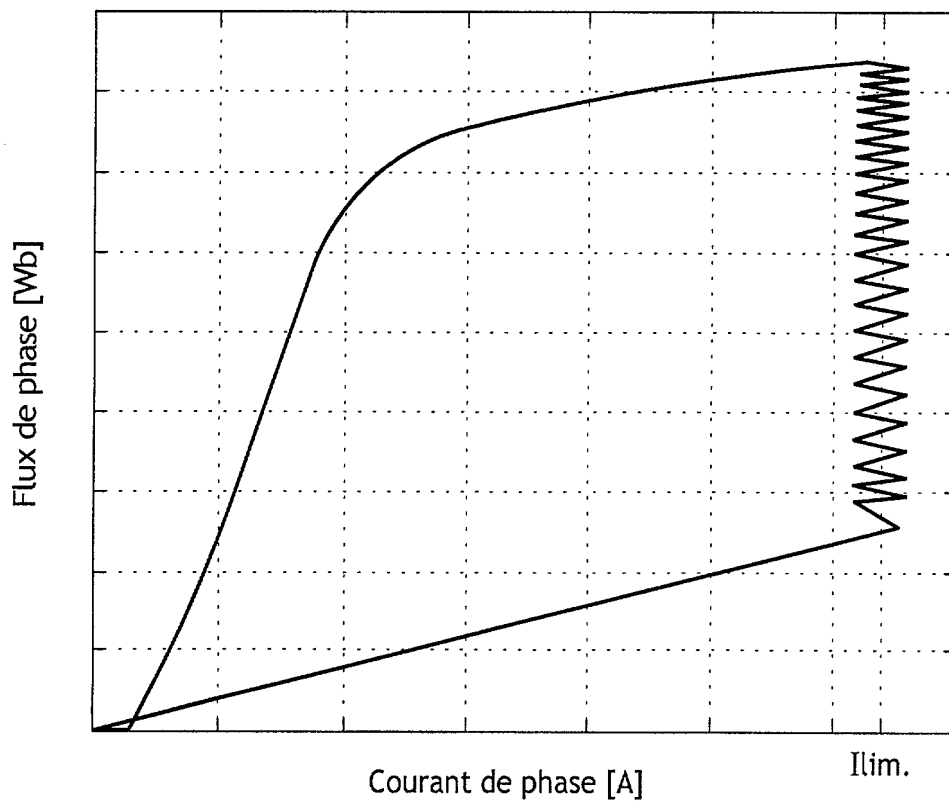


FIG.6 Energie transmise lors d'une période électrique à basse vitesse

4 / 11

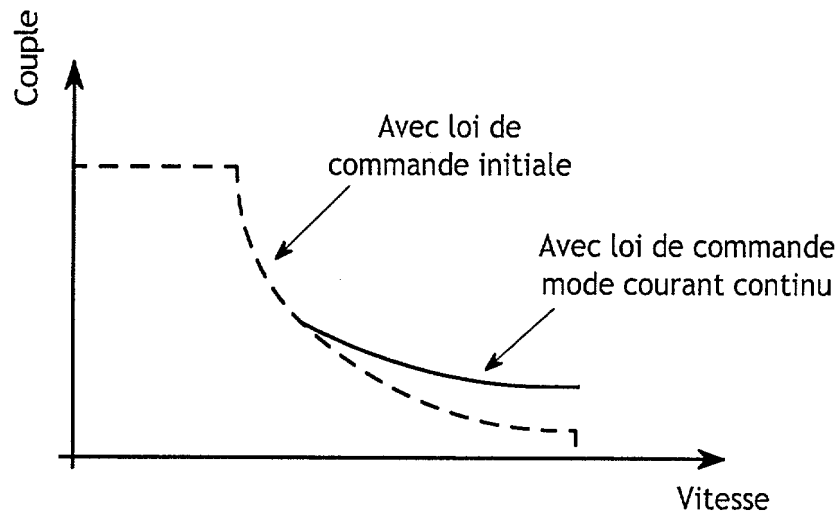


FIG.7 Amélioration de la courbe de couple maximum en fonction de la vitesse.

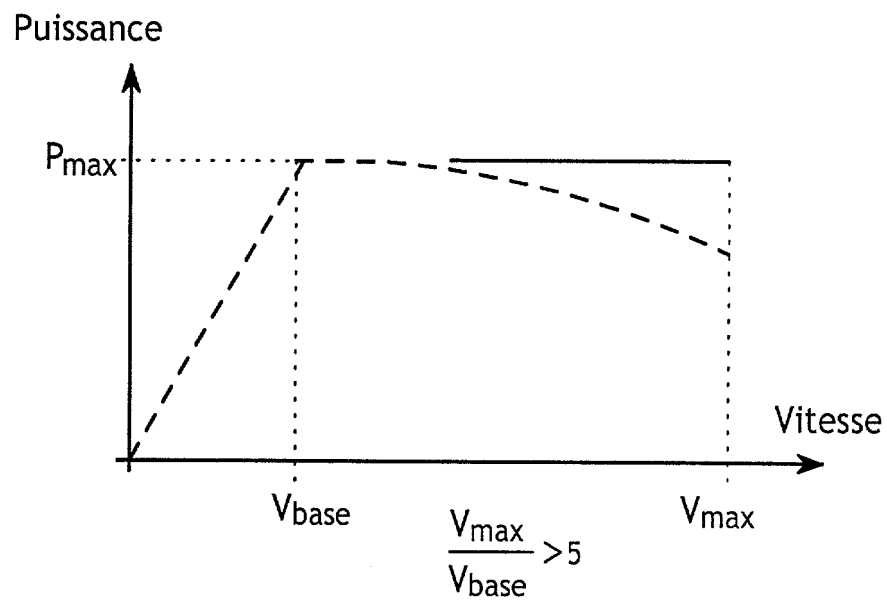


FIG.8 Gain en puissance apporté par le mode courant continu.

5/11

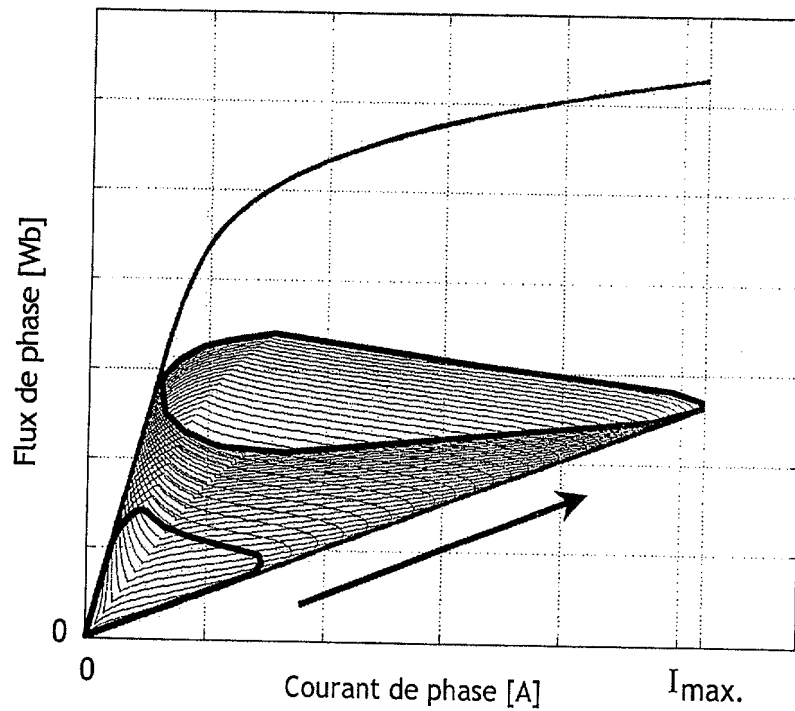


FIG.9 Evolution de l'énergie transmise sur plusieurs périodes électriques avec $\Theta_p > 180^\circ$.

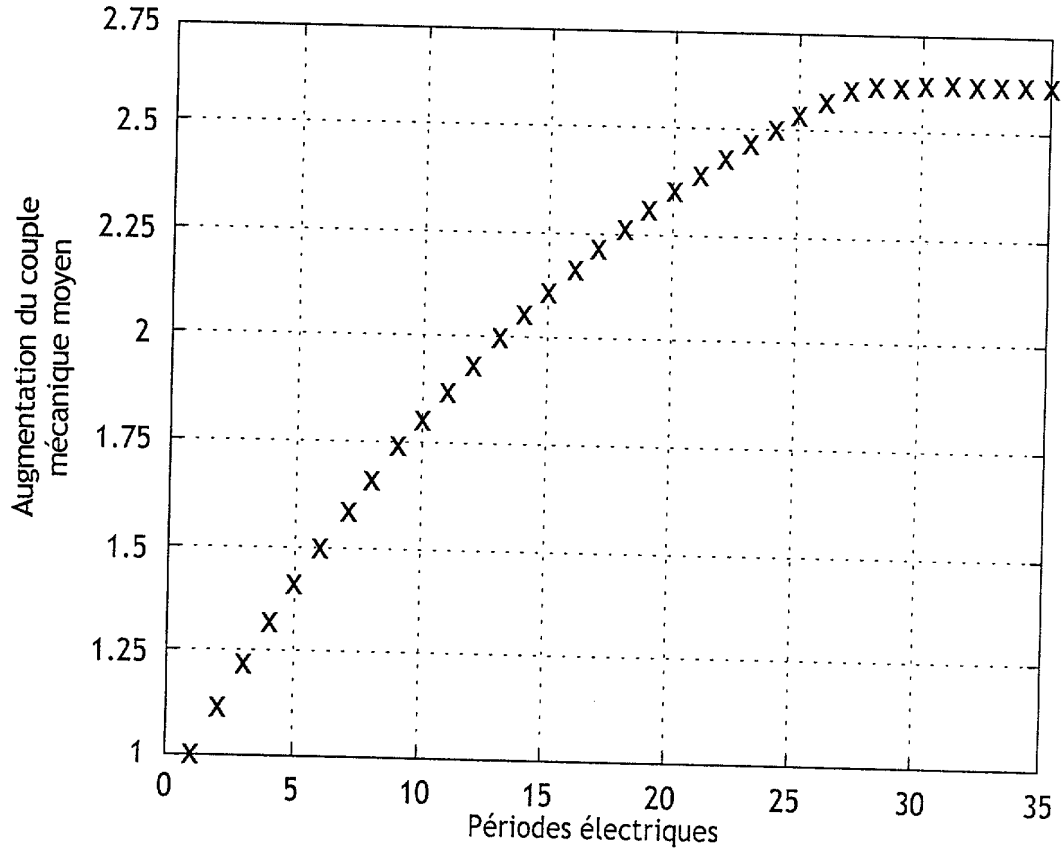


FIG.10 Augmentation relative du couple moyen sur chaque période électrique.

6 / 11

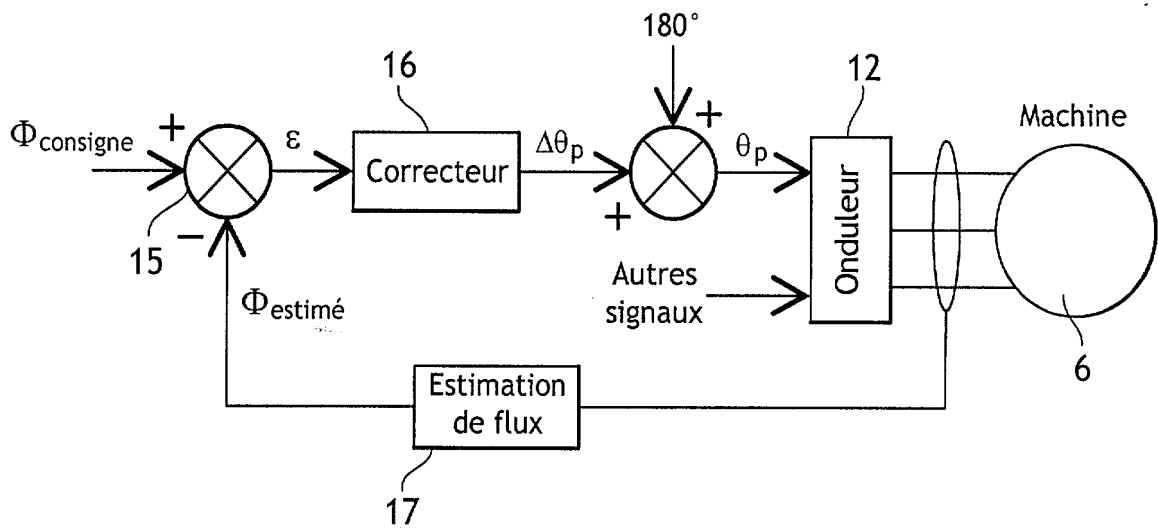


FIG.11 Régulation du flux.

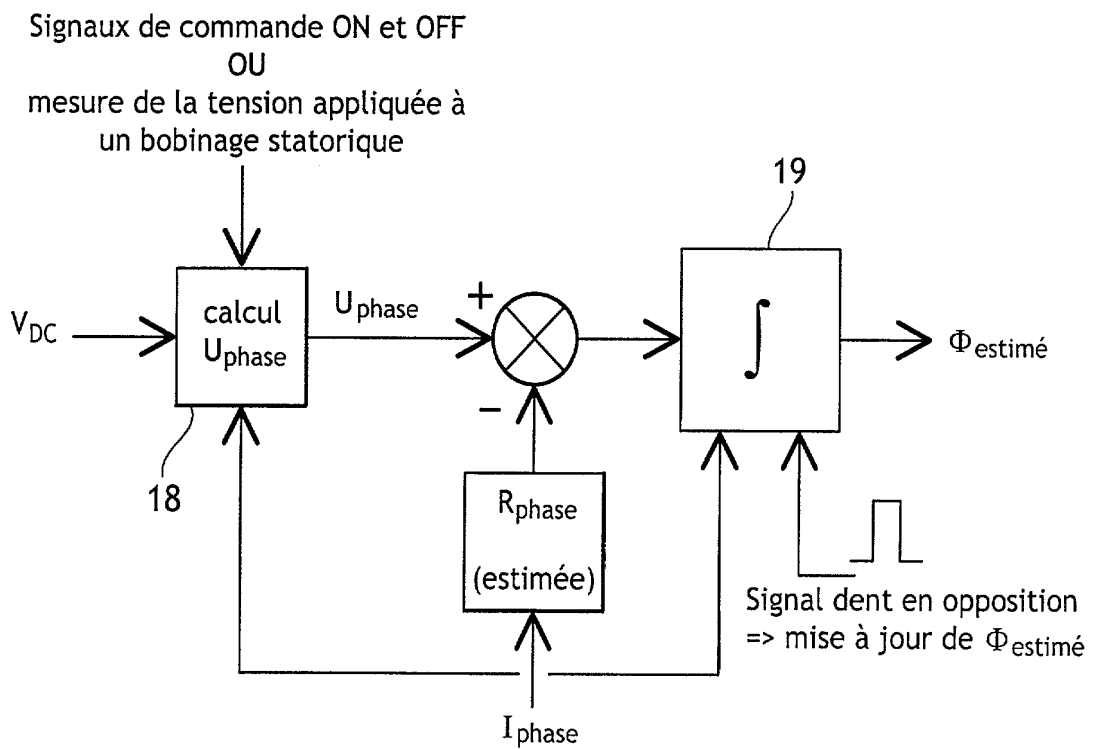


FIG.12 Estimation du flux de phase.

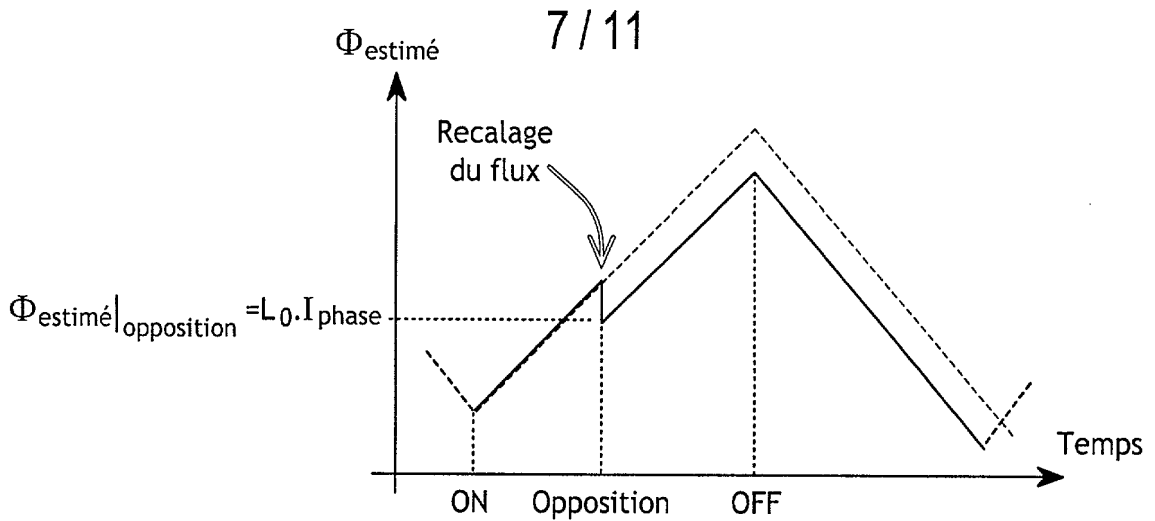


FIG.13 Procédure de recalage du flux estimé.

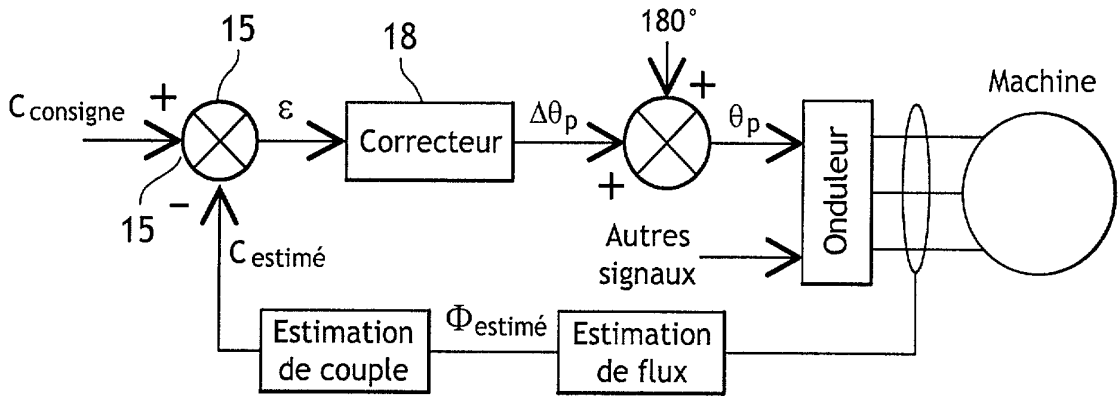


FIG.14 Régulation directe du couple.

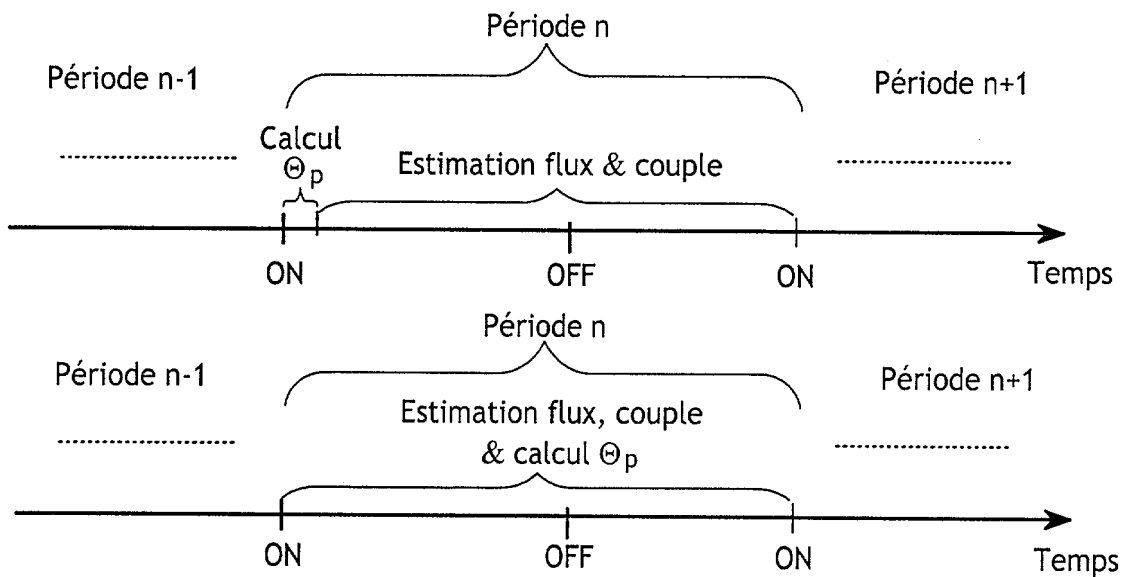


FIG.15 Séquencement du calcul d'une régulation de couple.

8 / 11

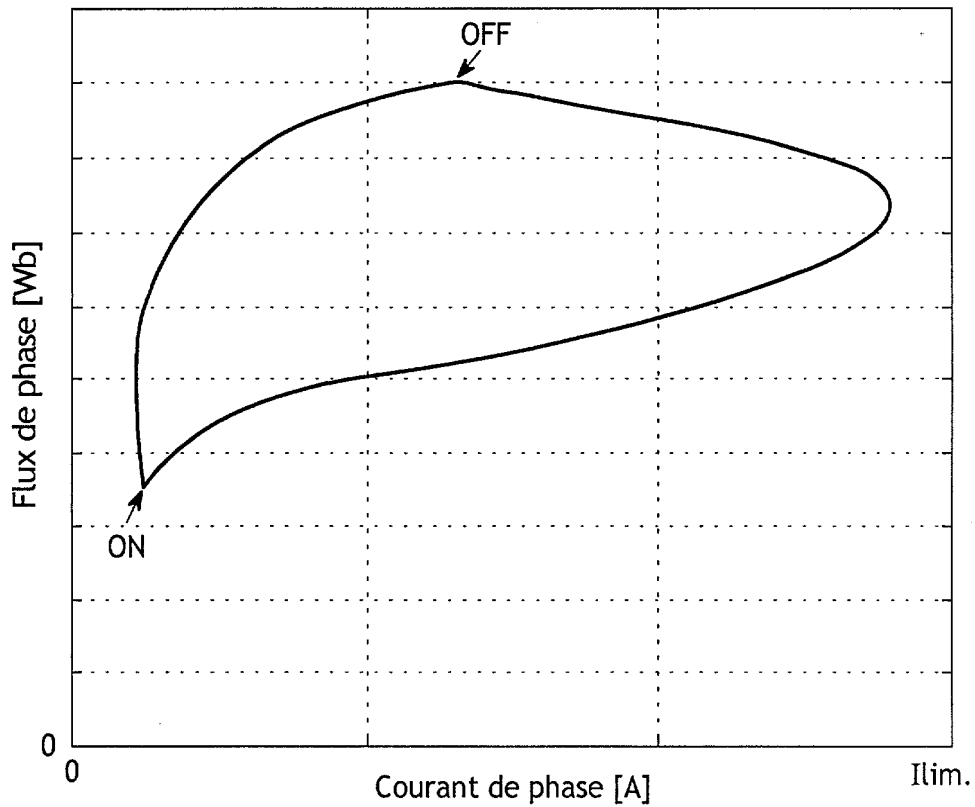


FIG.16 Cycle énergétique sur une période électrique en mode courant continu.

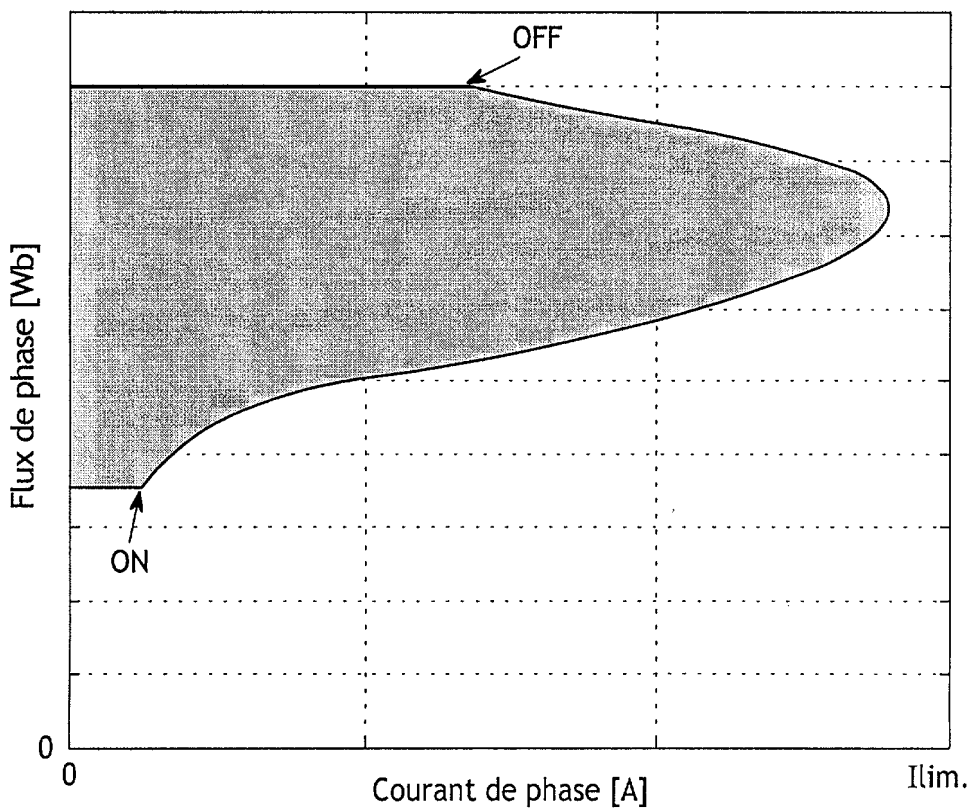


FIG.17 Energie transmise en phase de magnétisation (mode moteur) pour le cycle de la figure 16.

9 / 11

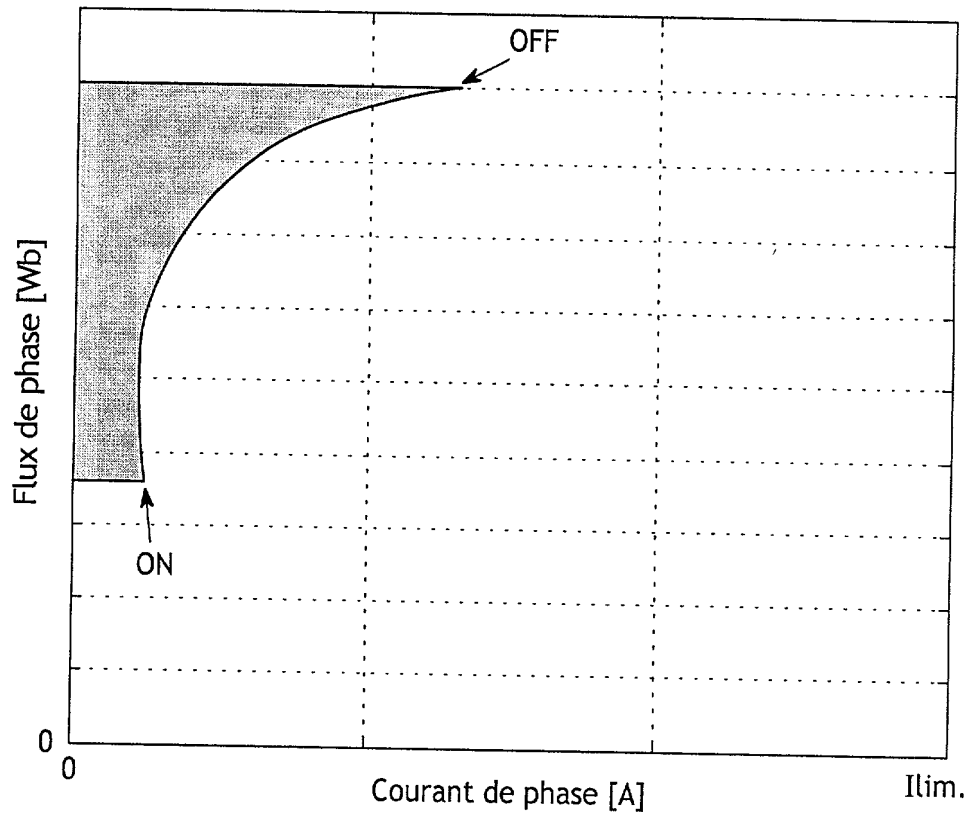


FIG.18 Energie rendue en phase de démagnétisation (mode moteur) pour le cycle énergétique

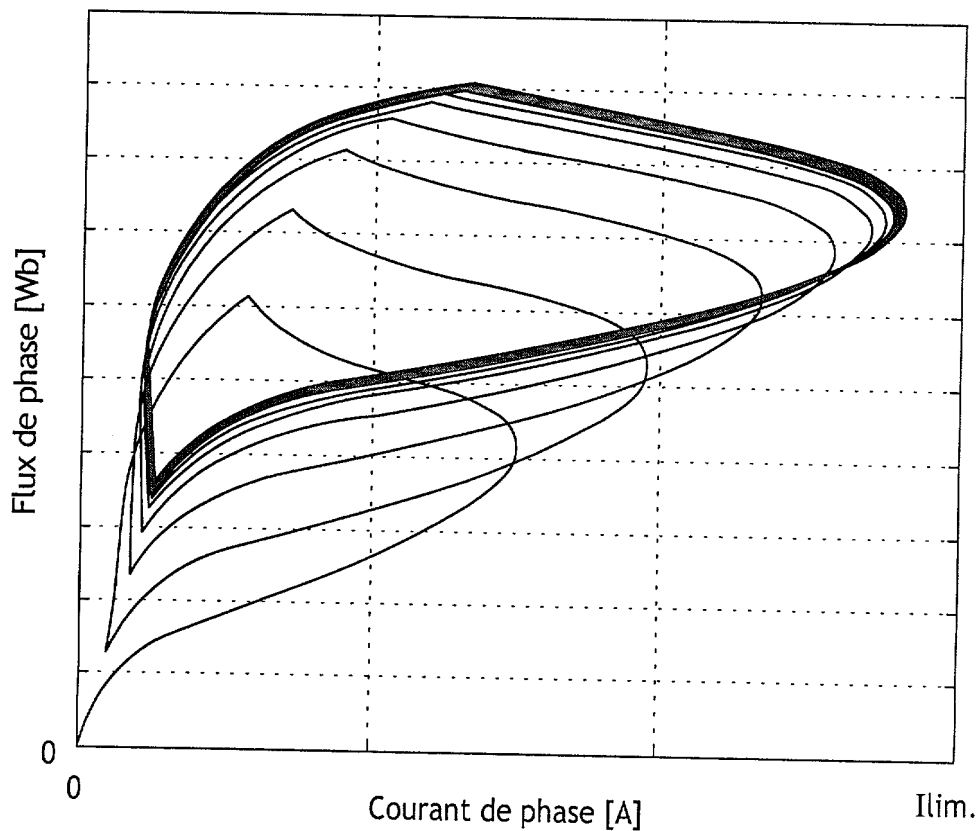


FIG.19 Evolution du cycle énergétique avec un contrôle du couple

10 / 11

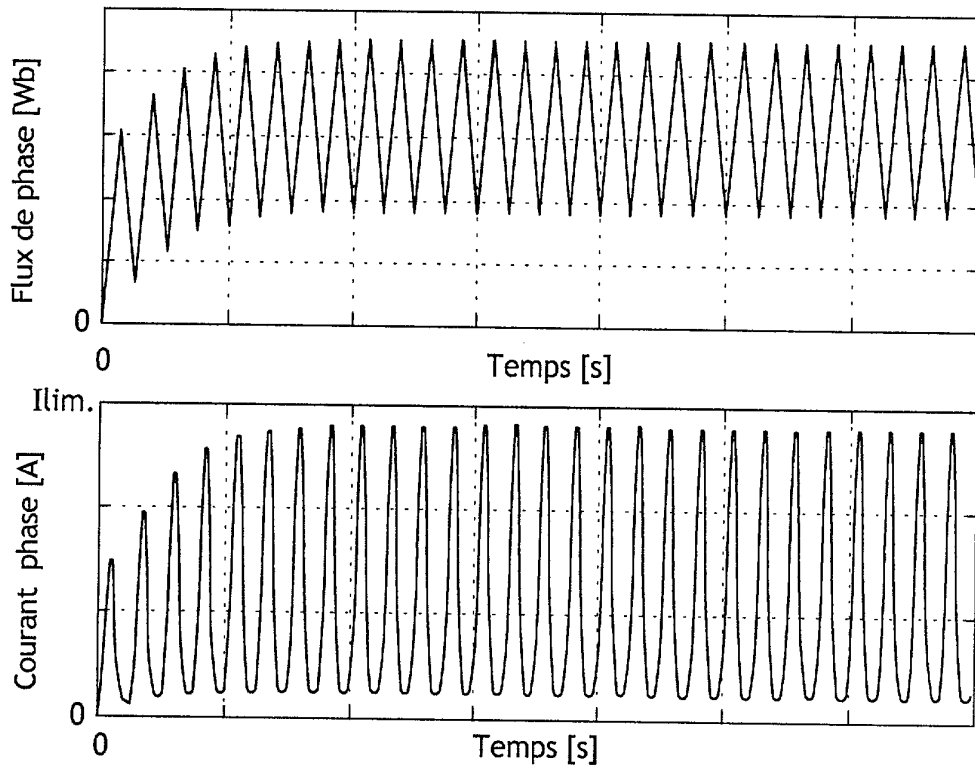


FIG.20 Evolution temporelle du flux et du courant avec un contrôle du couple.

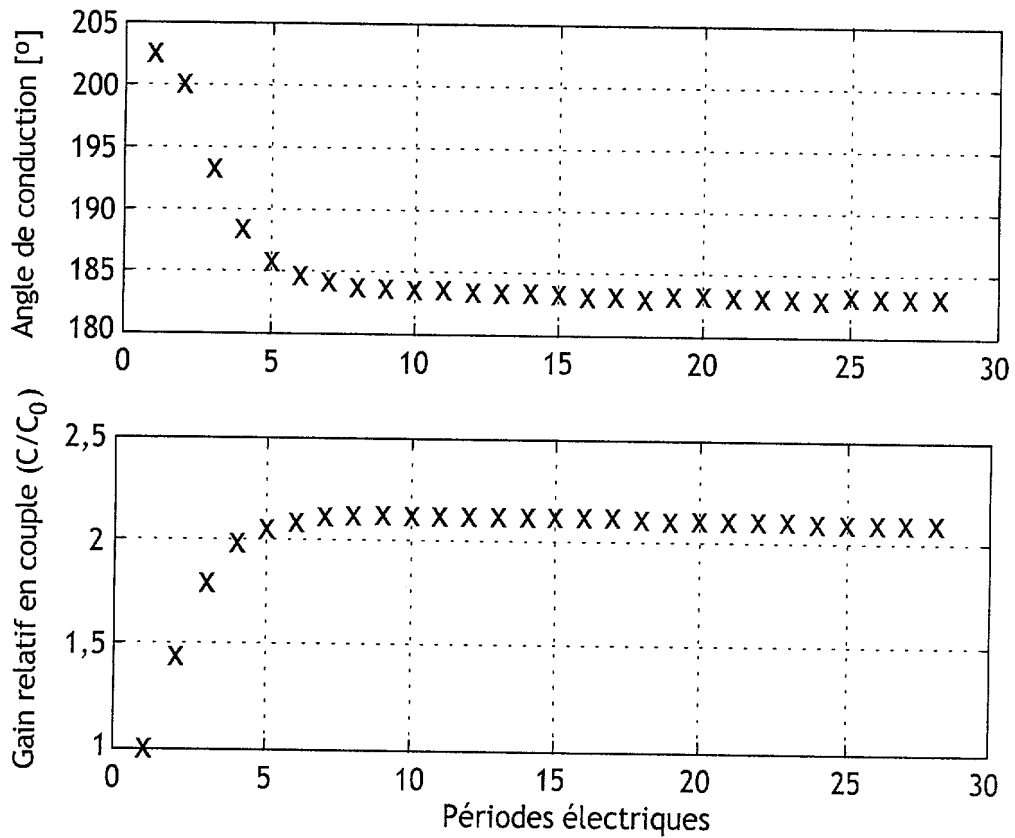
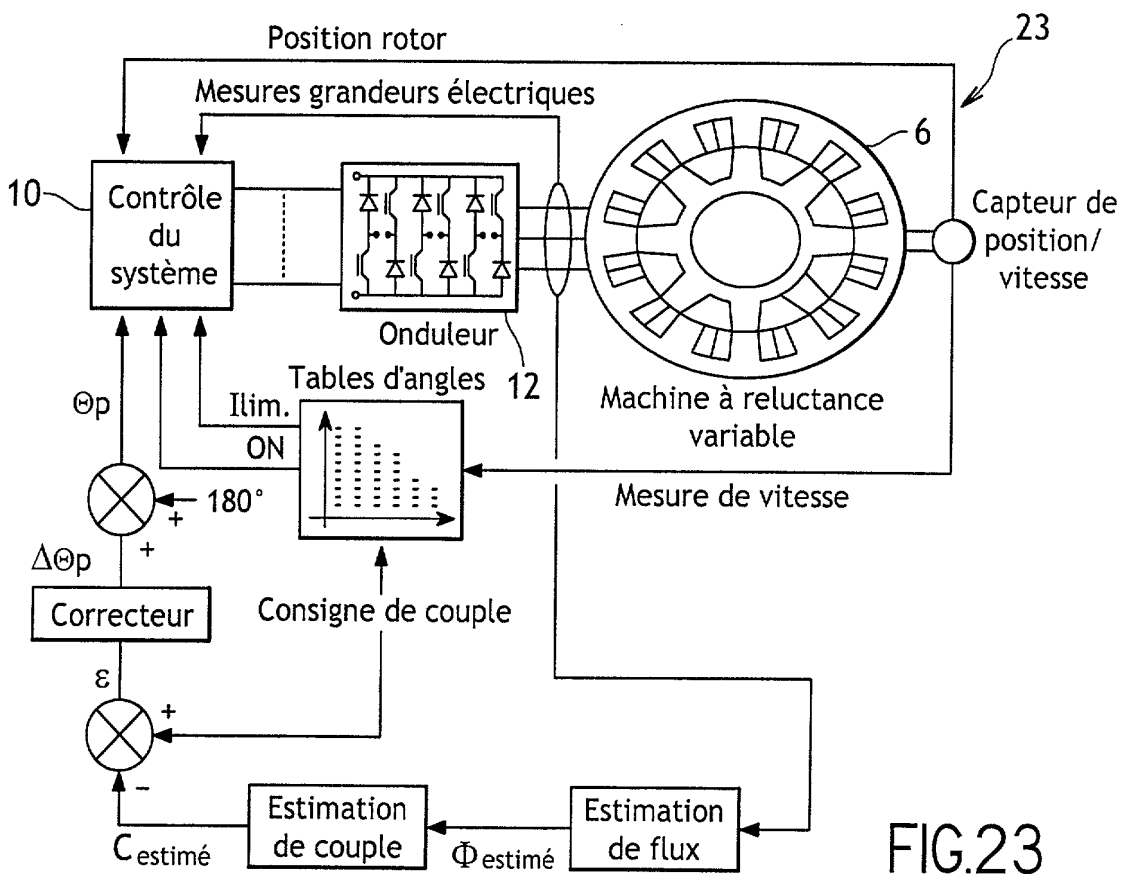
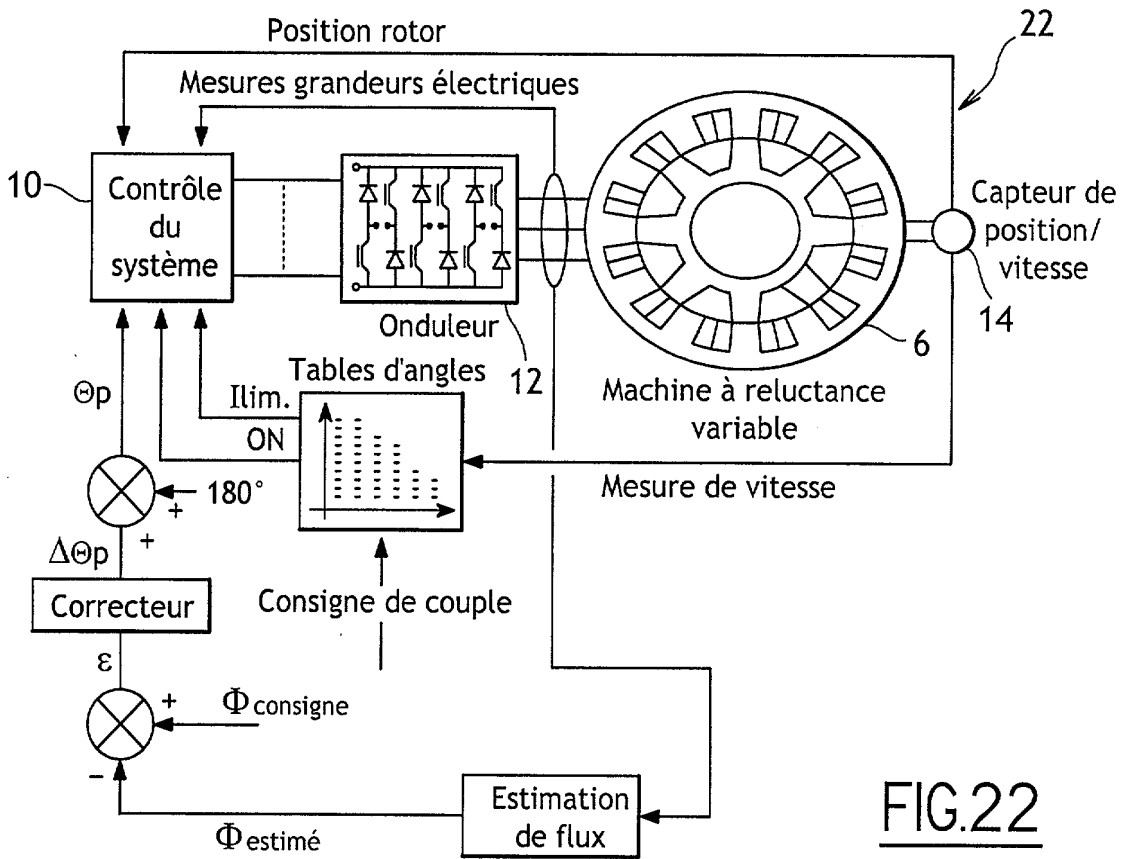


FIG.21 Evolution de l'angle de conduction et du gain en couple à chaque période avec un contrôle du couple.





**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 656966
FR 0412668

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
D,Y	EP 0 534 761 A (SWITCHED RELUCTANCE DRIVES LTD; SWITCHED RELUCTANCE DRIVES LIMITED) 31 mars 1993 (1993-03-31) * le document en entier * -----	1-19	H02P9/40 H02P7/05
Y	EP 1 109 308 A (SWITCHED RELUCTANCE DRIVES LIMITED) 20 juin 2001 (2001-06-20) * le document en entier * -----	1-19	
A	INDERKA R B ET AL: "DITC- direct instantaneous torque control of switched reluctance drives" CONFERENCE RECORD OF THE 2002 IEEE INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE. 37TH IAS ANNUAL MEETING . PITTSBURGH, PA, OCT. 13 - 18, 2002, CONFERENCE RECORD OF THE IEEE INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE. IAS ANNUAL MEETING, NEW YORK, NY : IEEE, US, vol. 1 OF 4. CONF. 37, 13 octobre 2002 (2002-10-13), pages 1605-1609, XP010610094 ISBN: 0-7803-7420-7 * figure 2 * -----	9,18	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7) H02P
A	US 2003/020436 A1 (COLES JEFFREY RONALD ET AL) 30 janvier 2003 (2003-01-30) * alinéa [0075]; revendication 1; figure 12 * -----	1,15	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
26 juillet 2005		Imbernon, L	
<p>CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire</p>		<p>T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant</p>	

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 0412668 FA 656966**

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

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du 26-07-2005

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 0534761 A	31-03-1993	US 5469039 A	21-11-1995
		AT 133302 T	15-02-1996
		DE 69207694 D1	29-02-1996
		DE 69207694 T2	26-09-1996
		DK 534761 T3	17-06-1996
		EP 0534761 A1	31-03-1993
		ES 2082385 T3	16-03-1996
		US 5545964 A	13-08-1996
		US 5563488 A	08-10-1996
EP 1109308 A	20-06-2001	EP 1109308 A2	20-06-2001
		JP 2001197777 A	19-07-2001
		US 2001010453 A1	02-08-2001
US 2003020436 A1	30-01-2003	AU 1720401 A	18-06-2001
		EP 1236269 A1	04-09-2002
		WO 0143273 A1	14-06-2001
		JP 2003516707 T	13-05-2003