

12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 16.01.17.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 20.07.18 Bulletin 18/29.

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

60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : VALEO EQUIPEMENTS ELECTRIQUES MOTEUR Société par actions simplifiée — FR.

72 Inventeur(s) : BERNARD FRANCOIS-XAVIER et KOBYLANSKI LUC.

73 Titulaire(s) : VALEO EQUIPEMENTS ELECTRIQUES MOTEUR Société par actions simplifiée.

74 Mandataire(s) : VALEO EQUIPEMENTS ELECTRIQUES MOTEUR Société par actions simplifiée.

54 SYSTEME DE COMMANDE POUR UNE MACHINE ELECTRIQUE TOURNANTE.

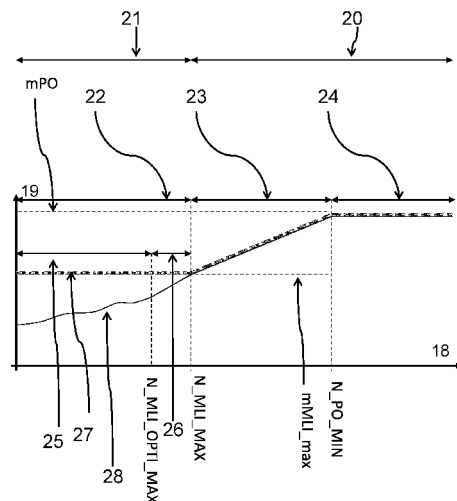
57 Système de commande pour une machine électrique tournante multiphasée et synchrone comprenant un stator (31) et un rotor (30), ledit système de commande comprenant:

-une carte électronique (16) pour générer des signaux de commutation stator en fonction d'un vecteur intensité (I) dans un repère de Fresnel;

-un onduleur (29) apte à commuter une source de tension (1) en fonction des signaux de commutation stator pour délivrer à chacun des enroulements du stator (8, 9 10) une tension et une intensité ayant une pulsation électrique (ω_e), de sorte que le stator génère un flux magnétique stator (PHI), le flux magnétique stator (PHI) ayant des composantes PHId et PHlq après une transformation de Park;

Il est prévu que lors du passage entre un mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude (22) et un mode de commande pleine onde (24), l'onduleur (29) et la carte électronique (16) sont configurés pour fonctionner selon un mode de commande à tension fixée (23), selon lequel l'onduleur (29) et la carte électronique (16) fonctionnent selon un mode de commande à modulation de largeur d'amplitude dans lequel une composante Iq du vecteur intensité (I) est régulée, le module d'un vecteur tension (V) correspondant ayant une valeur déterminée par la carte

électronique (16).



SYSTEME DE COMMANDE POUR UNE MACHINE ELECTRIQUE TOURNANTE

DOMAINE TECHNIQUE DE L'INVENTION

L'invention porte sur un système de commande pour une machine électrique tournante et sur son procédé de commande correspondant. Ce système comprend notamment un convertisseur de courant électrique alternatif-continu également appelé onduleur.

L'invention s'applique plus particulièrement à des machines électriques tournante du type réversibles polyphasées, dites alerno-démarrateurs, qui sont utilisées dans l'industrie automobile.

ARRIERE PLAN TECHNOLOGIQUE

Un onduleur permet de générer à partir d'une source de courant continu les courants polyphasés nécessaires au fonctionnement d'une machine électrique tournante polyphasée.

Généralement un onduleur comprend des éléments de commutation formant plusieurs bras de puissance, comportant chacun deux éléments de commutation dans une architecture classique de pont à deux niveaux.

Le point milieu d'un couple d'éléments de commutation d'un même bras de puissance est relié à un enroulement de phase du stator de la machine électrique tournante.

La demande de brevet français FR2745445 de la société VALEO ELECTRONIQUE décrit un pont redresseur en sortie de stator de l'alternateur qui sert également de pont de commande des phases du moteur électrique, des transistors de puissance des bras du pont étant commandés par des séquences de signaux carrés délivrés par une unité de commande. Une telle commande dite pleine onde est bien connue de l'homme de métier.

Les éléments de commutation peuvent également être pilotés par des procédés de modulation de largeur d'impulsion dits MLI (ou PWM en anglais, acronyme de "Pulse Width Modulation").

La figure 1 illustre de manière sommaire le principe d'une commande d'une commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude, la machine électrique 104 étant représentée dans le cas triphasé.

5 Pour cette commande, on régule deux valeurs I_d et I_q qui sont les composantes d'un vecteur intensité dans un repère de Fresnel à l'aide de deux valeurs de commande V_d et V_q qui sont les composantes d'un vecteur tension dans un repère de Fresnel.

On fait une transformation T^{-1} , par exemple de Park inverse sur les deux valeurs V_d et V_q et on en déduit des tensions 100 pour chacune des phases.

10 A partir des tensions 100, on détermine des signaux de commutation 102 pour chacun des éléments de commutation d'un onduleur 29 par un calcul 101. Les signaux de commutation 102 sont calculés afin que les tensions délivrées sur les phases électriques de la machine prennent les valeurs 100. Ces signaux de commutation 102 sont de type MLI.

15 Il sort de l'onduleur 29 des courants 103 destinés à chacune des phases de la machine 104.

On fait alors une transformation T , par exemple une transformation de Park pour déterminer à partir des courants 103, les deux valeurs I_d et I_q dans un repère de Fresnel.

20 Les deux valeurs I_d et I_q sont retranchées à des valeurs de référence, dépendantes par exemple d'un couple C de référence de la machine puis soumises à un correcteur de type Proportionnel Intégral Dérivé pour en déduire V_d et V_q , respectivement.

25 La demande de brevet français FR2895598 par la société VALEO EQUIPEMENTS ELECTRIQUES MOTEUR décrit un procédé spécifique de commande MLI d'un onduleur polyphasé qui permet à la fois une réduction des pertes par commutation et une diminution d'un courant efficace dans le condensateur de découplage de manière à diminuer les ondulations de la tension d'alimentation.

Il est connu de la demande de brevet français FR3004299 par la société VALEO EQUIPEMENTS ELECTRIQUES MOTEUR le fait de changer de stratégie de commande par exemple en fonction de la vitesse de rotation du rotor de la machine électrique tournante.

- 5 La demande de brevet canadienne CA2027983 décrit une stratégie de transition entre une commande MLI vers une commande pleine avec l'augmentation de la vitesse de rotation. Il est notamment prévu une commutation entre les deux commandes lorsque le nombre de hachures du courant dépasse un certain nombre. Il est décrit également une réalisation
10 analogique de la stratégie de transition.

La demande de brevet canadienne CA2631299 décrit la mise en place d'une phase de transition entre le passage d'une commande MLI vers pleine onde.

Toutefois, ces deux demandes de brevet ne précisent pas le contrôle des variables électriques de la machine lors de la transition.

- 15 De manière générale, lors du passage entre la commande MLI et la commande pleine onde, la valeur maximale du module du vecteur tension également appelé également tension ondulable maximale varie. Cet écart de module du vecteur tension entre les deux modes interdit une transition parfaite et va engendrer un courant transitoire gênant.

20 **OBJET DE L'INVENTION**

L'invention a pour objet de répondre à ce souhait tout en remédiant à au moins un de ces inconvénients précités.

- Suivant l'invention il est proposé un système de commande pour une machine électrique tournante multiphasée et synchrone comprenant un
25 stator et un rotor, ledit système de commande comprenant:

-une carte électronique pour générer des signaux de commutation stator en fonction d'un vecteur intensité dans un repère de Fresnel;

-un onduleur apte à commuter une source de tension en fonction des signaux de commutation stator pour délivrer à chacun des enroulements du

stator une tension et une intensité ayant une pulsation électrique, de sorte que le stator génère un flux magnétique stator, le flux magnétique stator ayant des composantes PH_{Id} et PH_{Iq} après une transformation de Park;

-un capteur des courants des enroulements de phase du stator; et

5 -un détecteur de la vitesse de rotation du rotor et de sa position;

dans lequel l'onduleur et la carte électronique sont configurés pour fonctionner selon un mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude avec une tension maximale ondulable et un indice de modulation ayant une valeur maximale et selon un mode de commande pleine onde
10 avec un indice de modulation ayant une valeur fixe,

Selon une caractéristique générale de l'invention, lors du passage entre le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude et le mode de commande pleine onde, l'onduleur et la carte électronique sont configurés pour fonctionner selon un mode de commande à tension fixée,
15 selon lequel l'onduleur et la carte électronique fonctionnent selon un mode de commande à modulation de largeur d'amplitude dans lequel une composante I_q du vecteur intensité est régulée, le module d'un vecteur tension correspondant ayant une valeur déterminée par la carte électronique.

Le mode de commande à tension fixée permet en choisissant judicieusement
20 la valeur du module de la tension et en régulant la valeur de l'intensité en fonction d'une part d'éviter un écart du module de tension lors du passage entre le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude et le mode de commande pleine onde et d'autre part une commande stable.

Par exemple, on choisit un mode de commande à tension fixée selon lequel
25 au moment de son activation à partir du mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude, le module de la tension délivrée au stator est égal au module de la tension délivrée au stator lors du mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude.

De même, on peut choisir un mode de commande à tension fixée selon
30 lequel au moment de l'activation du mode de commande pleine onde, le

module de la tension délivrée au stator est égal au module de la tension délivrée au stator lors du mode de commande pleine onde.

On permet ainsi une continuité de la valeur du module de tension et de l'indice de modulation.

- 5 Toutefois, en régulant la composante I_q , on peut avec cette commande réguler la valeur du couple exercé par la machine électrique.

Selon d'autres caractéristiques prises isolément ou en combinaison :

- 10 -la carte électronique est configurée de sorte que le mode de commande à tension fixée est activé lorsque la vitesse de rotation du rotor dépasse une vitesse de déclenchement, le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude étant alors désactivé.

- 15 Il est opportun de passer du mode de commande MLI à un autre mode de commande avec une augmentation de la vitesse de rotation de la machine électrique. En effet, dans les machines électriques synchrones, l'augmentation de la vitesse de rotation correspond à une augmentation de la pulsation électrique rendant la commande MLI moins efficace.

- 20 Ainsi, en prévoyant l'activation du mode de commande à tension fixée lorsqu'une vitesse de rotation de déclenchement est dépassée, on insère le mode de commande à tension fixée lorsque la commande MLI devient moins efficace.

-la carte électronique est configurée de sorte que le mode de commande pleine onde est activé lorsque la vitesse de rotation du rotor dépasse une vitesse d'arrêt, le mode de commande à tension fixée étant alors désactivé.

- 25 De même lorsque selon la commande à tension fixée la valeur de l'indice de modulation ou du module du vecteur tension atteignent leur valeur qu'ils auraient selon le mode de commande pleine onde, on peut passer en mode de commande pleine onde.

-selon le mode de commande à tension fixée, la carte électronique et l'onduleur sont configurés pour fonctionner selon un mode de commande à

modulation de largeur d'amplitude dans lequel une composante V_d du vecteur tension est commandée pour réguler la composante I_q , et on détermine une composante V_q du vecteur tension à l'aide de l'équation:

$$V_q = \sqrt{(\text{mod}(V)^2 - V_d^2)},$$

5 dans laquelle $\text{mod}(V) = \left(\frac{V_{dc}}{2}\right) \times m$, dans laquelle

$$m = m_{MLI_max} + \frac{(m_{PO} - m_{MLI_max})}{(N_{PO_MIN} - N_{MLI_MAX})} \times (N - N_{MLI_MAX}),$$

N étant la vitesse de rotation du rotor de la machine.

10 On permet ainsi d'avoir un indice de modulation qui varie entre la vitesse de rotation N_{MLI_MAX} et N_{PO_MIN} et qui prend au niveau de ces deux vitesses respectivement la valeur m_{MLI_max} et m_{PO} . On assure ainsi une continuité dans la valeur de l'indice de modulation.

-la carte électronique est configurée de sorte que le mode de commande pleine onde est activé après une durée d'activation du mode de commande à tension fixée, le mode de commande à tension fixée étant alors désactivé.

15 On utilise un mode de commande qui est actif une certaine durée DT .

20 -selon le mode de commande à tension fixée, la carte électronique et l'onduleur sont configurés pour fonctionner selon un mode de commande à modulation de largeur d'amplitude dans lequel une composante V_d du vecteur tension est commandée pour réguler la composante I_q du vecteur intensité, et on détermine une composante V_q du vecteur tension à l'aide de l'équation: $V_q = \sqrt{(\text{mod}(V)^2 - V_d^2)},$

dans laquelle $\text{mod}(V) = \frac{V_{dc}}{2} \times m$, dans laquelle

$$m = m_{MLI_max} + \frac{(m_{PO} - m_{MLI_max})}{DT} \times t, t \in [0, DT].$$

25 On permet ainsi d'avoir un indice de modulation qui varie entre le temps $t=0$ et le temps $t=DT$ et qui prend au niveau de ces deux instants respectivement la valeur m_{MLI_max} et m_{PO} . On assure ainsi une continuité dans la valeur de l'indice de modulation.

-la carte électronique est configurée de sorte que le mode de commande à tension fixée est activé lorsque la vitesse de rotation du rotor N dépasse une vitesse d'arrêt, le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude étant alors désactivé et en ce que le mode de commande à
5 tension fixée est alors désactivé après un certain délai, le mode de commande pleine onde étant alors activé.

On utilise un mode de commande qui est actif une certaine durée DT et ce alors que la vitesse de rotation est N_PO_MIN, c'est à dire en principe une vitesse supérieure à N_MLI_MAX.

10 -selon le mode de commande à tension fixée, le module du vecteur tension augmente linéairement en fonction de la vitesse de rotation du rotor.

On a ainsi une augmentation linéaire de la valeur du module de la tension délivré, c'est avantageux car cela permet d'éviter tout effet transitoire.

-selon le mode de commande pleine onde, la carte électronique et l'onduleur
15 sont configurés pour qu'une composante Vd du vecteur tension est commandée pour réguler la composante Iq du vecteur intensité, et on détermine une composante Vq du vecteur tension à l'aide de l'équation:
$$Vq = \sqrt{(\text{mod}(V)^2 - Vd^2)},$$

dans laquelle $\text{mod}(V) = \frac{V_{dc}}{2} \times mPO.$

20 -le rotor comprenant une bobine, selon le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude, l'onduleur et la carte électronique sont configurés pour fonctionner selon un mode de commande transitoire, selon lequel l'onduleur et la carte électronique fonctionnent selon un mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude qui régule la
25 composante Iq du vecteur intensité et dans lequel une composante Id du vecteur intensité ou un courant de bobine est régulé de sorte que le module du vecteur tension prend une valeur déterminée par la carte électronique.

Le mode de commande transitoire permet de faire tendre la valeur du module du vecteur tension vers une valeur supérieure à ce qu'il aurait été si
30 on conservait le point de fonctionnement du mode de commande MLI

vectorielle classique. Cela permet une transition moins marquée vers le mode de commande pleine onde étant donné que l'écart du module de tension est moins important. Toutefois, la valeur du module du vecteur tension est inférieure à la tension maximale ondulable de sorte que la commande selon un mode MLI vectorielle est possible.

-la carte électronique est configurée de sorte que le mode de commande transitoire est activé lorsque la vitesse de rotation du rotor dépasse une vitesse d'activation.

-la carte électronique est configurée de sorte que le mode de commande transitoire est désactivé après un certain délai, le mode de commande à tension fixée étant alors activé.

-la carte électronique est configurée de sorte que le mode de commande transitoire est désactivé lorsque la vitesse de rotation du rotor dépasse une vitesse de déclenchement, le mode de commande à tension fixée étant alors activé.

-selon le mode de commande transitoire, le module du vecteur tension augmente linéairement en fonction de la vitesse de rotation du rotor.

On a ainsi une augmentation linéaire de la valeur du module de la tension délivré, c'est avantageux car cela permet d'éviter tout effet transitoire.

-selon le mode de commande transitoire la composante I_d ou le courant de bobine est régulé de sorte que le module du vecteur tension prend la valeur de la tension maximale ondulable.

Le mode de commande transitoire permet alors de faire tendre la valeur du module du vecteur tension vers la valeur maximale qu'il peut attendre selon un mode de commande MLI vectorielle. On rapproche d'autant l'indice de modulation de la valeur d'indice de modulation d'une commande pleine onde.

-la carte électronique détermine la valeur de la composante I_d du vecteur intensité à l'aide d'une fonction appliquée sur la composante PHI_d , la composante PHI_d étant déterminée à partir d'un flux magnétique stator maximal et de la composante PHI_q .

Ainsi en prenant comme hypothèse que le flux magnétique du stator prend une valeur maximale et en contrôlant la composante PH_{Id} en fonction, on continue de réguler PH_{Iq} qui est directement relié au couple de la machine tout en permettant que le module du vecteur tension augmente. On permet
5 ainsi une commande selon laquelle le couple développé par la machine reste autour de la valeur requise par un contrôle moteur.

-la carte électronique lors du mode de commande transitoire détermine la valeur du courant de bobine à l'aide d'une fonction appliquée sur la composante PH_{Id} , la composante PH_{Id} étant déterminée à partir d'un flux
10 magnétique stator maximal et de la composante PH_{Iq} .

De même, on continue de réguler PH_{Iq} qui est directement relié au couple de la machine tout en permettant que le module du vecteur tension augmente puisque l'on suppose que le flux du stator prend sa valeur maximale. On permet ainsi une commande selon laquelle le couple développé par la
15 machine reste autour de la valeur requise par un contrôle moteur.

-la composante PH_{Iq} est déterminée à l'aide des courants dans les enroulements de phase.

Pour cela, on peut par exemple utiliser une cartographie de la machine électrique tournante.

20 -le flux du stator maximal est déterminé par la carte électronique à l'aide de la tension maximale ondulable et de la pulsation électrique.

Selon un autre aspect, l'invention a également pour objet un procédé de commande pour une machine électrique tournante multiphasée et synchrone comprenant un stator et un rotor, ledit procédé de commande comprenant:

25 -une génération de signaux de commutation stator en fonction d'un vecteur intensité I dans un repère de Fresnel;

-une commutation par un onduleur d'une source de tension en fonction des signaux de commutation stator pour délivrer à chacun des enroulements du stator une tension et une intensité de pulsation électrique w_e , de sorte que le

stator génère un flux magnétique stator Φ , le flux magnétique stator Φ ayant des composantes Φ_{Id} et Φ_{Iq} après une transformation de Park;

-une mesure des courants des enroulements de phase du stator;

-une détection de la vitesse de rotation du rotor et de sa position;

- 5 -une commande de l'onduleur du type commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude avec une tension maximale ondulable et un indice de modulation ayant une valeur maximale; et

-une commande de l'onduleur du type commande pleine onde avec un indice de modulation ayant une valeur fixe,

- 10 Selon une caractéristique générale, le procédé de commande comprend lors du passage entre la commande du type commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude et la commande du type commande pleine onde, une commande à tension fixée de l'onduleur du type commande à modulation de largeur d'amplitude dans lequel une composante I_q du vecteur intensité est
15 régulée, le module d'un vecteur tension correspondant ayant une valeur déterminée.

Selon d'autres caractéristiques prises isolément ou en combinaison :

- la commande à tension fixée est activée lorsque la vitesse de rotation du rotor N dépasse une vitesse de déclenchement, la commande de type à
20 commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude étant alors désactivée.

-la commande du type commande pleine onde est activée lorsque la vitesse de rotation du rotor N dépasse une vitesse d'arrêt, la commande à tension fixée étant alors désactivée.

- 25 -selon la commande à tension fixée une composante V_d du vecteur tension est commandée pour réguler la composante I_q , et on détermine une composante V_q du vecteur tension à l'aide de l'équation: $V_q = \sqrt{(\text{mod}(V))^2 - V_d^2}$,

dans laquelle $\text{mod}(V) = \left(\frac{V_{dc}}{2}\right) \times m$, dans laquelle

$m = m_{MLI_max} + \frac{(m_{PO} - m_{MLI_max})}{(N_{PO_MIN} - N_{MLI_MAX})} \times (N - N_{MLI_MAX})$, N étant la vitesse de rotation du rotor de la machine.

5 -la commande du type commande pleine onde est activée après une durée d'activation du mode de commande à tension fixée, la commande à tension fixée étant alors désactivée.

-la commande à tension fixée une composante V_d du vecteur tension est commandée pour réguler la composante I_q du vecteur intensité, et on détermine une composante V_q du vecteur tension à l'aide de l'équation:
10 $V_q = \sqrt{(\text{mod}(V)^2 - V_d^2)}$,

dans laquelle $\text{mod}(V) = \frac{V_{dc}}{2} \times m$, dans laquelle

$m = m_{MLI_max} + \frac{(m_{PO} - m_{MLI_max})}{DT} \times t$, $t \in [0, DT]$.

-la commande à tension fixée est activée lorsque la vitesse de rotation du rotor N dépasse une vitesse d'arrêt, la commande du type commande
15 vectorielle à modulation de largeur d'amplitude étant alors désactivée et en ce que la commande à tension fixée est alors désactivée après un certain délai, la commande du type commande pleine onde étant alors activée.

-selon la commande à tension fixée, le module du vecteur tension V augmente linéairement en fonction de la vitesse de rotation du rotor N.

20 -selon la commande pleine onde, une composante V_d est commandée pour réguler la composante I_q , et on détermine une composante V_q à l'aide de l'équation: $V_q = \sqrt{(\text{mod}(V)^2 - V_d^2)}$,

dans laquelle $\text{mod}(V) = \frac{V_{dc}}{2} \times m_{PO}$.

-le rotor comprenant une bobine, la commande du type commande
25 vectorielle à modulation de largeur d'amplitude comprend une commande transitoire du type commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude qui régule la composante I_q du vecteur intensité et dans laquelle une

composante I_d du vecteur intensité ou un courant de bobine est régulé de sorte que le module du vecteur tension prend une valeur déterminée.

-la commande transitoire est activée lorsque la vitesse de rotation du rotor N dépasse une vitesse d'activation.

- 5 -la commande transitoire est désactivée après un certain délai, la commande à tension fixée étant alors activée.

-la commande transitoire est désactivée lorsque la vitesse de rotation du rotor N dépasse une vitesse de déclenchement, la commande à tension fixée étant alors activée.

- 10 -selon la commande transitoire, le module du vecteur tension augmente linéairement en fonction de la vitesse de rotation du rotor N.

-selon la commande transitoire la composante I_d ou le courant de bobine est régulé de sorte que le module du vecteur tension prend la valeur de la tension maximale ondulable.

- 15 -dans la commande transitoire, la valeur de la composante I_d du vecteur intensité est déterminée à l'aide d'une fonction appliquée sur la composante PH_d , la composante PH_d étant déterminée à partir d'un flux magnétique stator maximal PH_m et de la composante PH_q .

- 20 -lors de la commande transitoire la valeur du courant de bobine est déterminée à l'aide d'une fonction appliquée sur la composante PH_d , la composante PH_d étant déterminée à partir d'un flux magnétique stator maximal PH_m et de la composante PH_q .

-la composante PH_q est déterminée à l'aide des courants dans les enroulements de phase.

- 25 -le flux du stator maximal PH_m est déterminé à l'aide de la tension maximale ondulable et de la pulsation électrique.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à l'examen de la description détaillée de modes de mise en œuvre et de réalisation, nullement limitatifs, et des dessins annexés sur lesquels :

- 5 -la figure 1 représente de manière sommaire, le principe d'une commande à modulation de largeur d'impulsion vectorielle selon l'état de la technique;
- la figure 2 représente un système de commande pour une machine électrique tournante selon l'invention;
- la figure 3 représente une évolution de l'indice de modulation selon un mode de réalisation de l'invention ;
- 10 -la figure 4 représente un procédé de commande pour une machine électrique selon un mode de réalisation de l'invention;
- la figure 5 représente un procédé de commande pour une machine électrique selon un autre mode de réalisation de l'invention;
- la figure 6 représente un procédé de commande pour une machine
15 électrique selon un mode de réalisation de l'invention; et
- la figure 7 représente un procédé de commande pour une machine électrique selon un mode de réalisation de l'invention.

Les éléments identiques, similaires, ou analogues conservent la même référence d'une figure à l'autre.

20 **DESCRIPTION D'EXEMPLES DE REALISATION DE L'INVENTION**

Dans la suite de la description l'acronyme MLI bien connu de l'homme du métier, est utilisé pour désigner modulation à largeur d'impulsion.

- 25 La figure 2 illustre un système de commande pour une machine électrique tournante multiphasée et synchrone comprenant un stator 31 muni de trois enroulements de phase 8, 9, et 10 par exemple reliés à un point neutre et un rotor 30. Dans la suite de la description, on définit un vecteur tension V , un vecteur intensité I dans un repère de Fresnel. Le vecteur tension V a des composantes V_d et V_q et peut être relié à l'aide d'une transformée inverse de

Park aux tensions de chacun des enroulements de phase 8, 9 et 10 et du point neutre le cas échéant. De même, le vecteur intensité I a des composantes I_d et I_q et est obtenu à l'aide d'une transformée de Park sur les intensités de chacun des enroulements de phase.

5 Le système de commande comprend:

-un capteur 15 des courants des enroulements de phase du stator.

-une carte électronique 16 pour générer des signaux de commutation stator. Ces signaux de commutation stator sont générés en fonction du vecteur intensité I dans un repère de Fresnel. Par exemple, on calcule d'abord le vecteur tension V de commande à partir du vecteur intensité I et la
10 génération de signaux de commutation stator est faite à partir de ce vecteur tension V de commande. La carte électronique est par exemple équipée d'un microprocesseur 17.

-un onduleur 29 apte à commuter une source de tension 1 délivrant une
15 tension continue V_{dc} en fonction des signaux de commutation stator pour délivrer à chacun des enroulements de phase du stator 8, 9, et 10 une tension et une intensité de pulsation électrique w_e , de sorte que le stator génère un flux magnétique stator Φ_I , le flux magnétique stator Φ_I ayant des composantes Φ_{Id} et Φ_{Iq} après une transformation de Park. Selon cet
20 exemple de réalisation, l'onduleur 29 comprend trois bras qui sont reliés aux trois enroulements de phase respectivement. Chaque bras comprend deux transistors 2A, 2B, 4A, 4B, 6A, 6B et deux diodes 3A, 3B, 5A, 5B, 7A, 7B. Les diodes 3A, 3B, 5A, 5B, 7A, 7B sont branchées en parallèle des transistors 2A, 2B, 4A, 4B, 6A, 6B, respectivement. La carte électronique 16
25 est configurée pour émettre un signal de commutation stator vers chacun de ces transistors.

-un détecteur 14 de la position et de la vitesse de rotation du rotor également appelée vitesse de rotation de la machine, par exemple le détecteur 14 comprend un module avec des capteurs à effet Hall.

30 Le rotor 30 comprend par exemple une bobine 13 pour générer un flux magnétique rotor Φ_{Ir} destiné à interagir avec le flux magnétique stator Φ_I ,

ladite bobine 13 étant alimentée par un courant de bobine I_r , le courant de bobine étant généré par un système de commutation rotor 12 qui module la tension de la source de tension 1. Le système de commutation rotor 12 est réalisé par exemple par un transistor. La carte électronique 16 est configurée pour émettre un signal de commutation rotor au système de commutation rotor 12 afin de réguler le courant de bobine, une diode 11 pouvant être branchée en parallèle de la bobine.

La carte électronique et l'onduleur sont configurés pour fonctionner selon un mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude 22 avec une tension maximale ondulable V_{maxMLI} et un indice de modulation m avec une valeur maximale $m_{\text{MLI_max}}$ et selon un mode de commande pleine onde 24 avec un indice de modulation m ayant une valeur fixe m_{PO} .

Selon le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude 22, on peut prévoir par exemple que les deux valeurs régulées sont les composantes I_d et I_q d'un vecteur intensité et que les deux valeurs de commande sont les deux composantes V_d et V_q d'un vecteur tension, le vecteur tension et le vecteur intensité étant exprimés dans un repère de Fresnel.

Dans ce cas, de manière similaire au principe illustré en figure 1, la carte électronique va calculer à partir des courants des enroulements de phase du stator à l'aide d'une transformée de Park, les composantes I_d et I_q . Puis, en fonction de ces valeurs I_d , I_q et de fonctions relatives au fonctionnement de la machine électrique comme notamment un couple à exercer par la machine et la vitesse de rotation indiquée par le détecteur 14, la carte électronique va déduire les deux valeurs de commandes V_d et V_q . La carte électronique applique alors une transformée de Park inverse pour déterminer les tensions polyphasées correspondantes et le potentiel du point neutre le cas échéant et en déduire les signaux de commutation stator qui sont des signaux MLI.

L'indice de modulation m respecte alors l'équation ci dessous:

$$m = \frac{\sqrt{(V_q^2 + V_d^2)}}{V_{dc}/2} \leq m_{\text{MLI_max}}.$$

Le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude a une tension maximale ondulable V_{maxMLI} correspondant au module maximal acceptable du vecteur tension. V_{maxMLI} a une valeur de $\frac{V_{\text{dc}}}{\sqrt{3}}$ dans le cas triphasé.

- 5 Selon le mode de commande pleine onde 24, il est prévu que les signaux de commutation stator ont une forme carrée et sont de largeur fixe. Ces signaux correspondent à un vecteur tension dans un repère de Fresnel dont seule la phase est réglable et dont l'amplitude est fixe.

10 Par exemple, en mode de commande pleine onde, la carte et l'onduleur sont configurés de sorte que la composante V_d du vecteur tension est commandée pour réguler la composante I_q du vecteur intensité, et on détermine la composante V_q du vecteur tension à l'aide de l'équation:

$$V_q = \sqrt{(\text{mod}(V))^2 - V_d^2},$$

15 dans laquelle $\text{mod}(V) = \frac{V_{\text{dc}}}{2} \times m_{\text{PO}}$, $\text{mod}(V)$ correspondant au module du vecteur V .

Ainsi, sachant la forme du signal de phase pleine onde et en considérant le fondamental de ce signal, le module du vecteur tension dans un repère de Fresnel est fixe et est égal à $\frac{2 \times V_{\text{dc}}}{\pi}$.

20 La différence entre $\frac{V_{\text{dc}}}{\sqrt{3}}$ et $\frac{2 \times V_{\text{dc}}}{\pi}$ correspond à l'écart du module du vecteur tension V entre les deux modes MLI et pleine onde déjà mentionné en introduction de l'objet de l'invention.

On peut directement relier le module du vecteur tension à l'indice de modulation m selon la formule:

25
$$m = \frac{\text{mod}(V)}{V_{\text{dc}}/2}$$
 dans laquelle $\text{mod}(V)$ représente le module du vecteur tension V .
 On obtient ainsi $m_{\text{MLI_max}}$ et m_{PO} égales respectivement à $\frac{2}{\sqrt{3}}$ et $\frac{4}{\pi}$ selon cet exemple de réalisation.

La figure 3 illustre l'évolution de l'indice de modulation m en fonction de la vitesse de rotation du rotor et en fonction du mode de modulation. Plus précisément, la figure 3 représente deux courbes 27 et 28 dans un repère

comprenant un axe 19 correspondant à la valeur de l'indice de modulation et un axe 18 correspondant à la valeur de la vitesse de rotation de la machine.

La courbe 27 correspond à la valeur maximale que peut prendre l'indice de modulation, cette valeur dépend notamment du mode de commande de la machine électrique tournante.

La courbe 28 correspond à la valeur de l'indice de modulation, l'indice de modulation étant directement relié au module du vecteur tension, par la formule précitée: $m = \frac{\text{mod}(V)}{V_{dc}/2}$

Lors du passage entre le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude 22 et le mode de commande pleine onde 24, l'onduleur et la carte électronique sont configurés pour fonctionner selon un mode de commande à tension fixée 23. Ce mode de commande à tension fixée 23 joue le rôle de transition entre les deux modes de commande qui ont mutuellement un écart de module du vecteur ou un écart d'indice de modulation.

Comme on peut le voir sur la figure 3, lors du mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude 22, l'indice de modulation m est variable et peut prendre comme valeur maximale: m_{MLI_max} . Ainsi, la courbe 27 est superposée avec la valeur m_{MLI_max} .

Tandis que lors du mode de commande pleine onde 24 délimité par l'intervalle 24 sur la figure 3, l'indice de modulation m a une valeur fixe m_{PO} qui est superposée avec la courbe 27 et aussi la courbe 28.

Lors du mode de commande à tension fixée 23 délimité par l'intervalle 23 sur la figure 3, l'indice de modulation m a une valeur variable comprise entre m_{MLI_max} et m_{PO} .

Selon le mode à tension fixée, on détermine par transformée de Park, les composantes I_d et I_q du vecteur intensité en fonction des intensités dans chacun des enroulements de phase du stator, puis on détermine la valeur les composantes de commande V_d et V_q . On réalise alors une transformée de Park inverse pour déterminer les valeurs de tension aux bornes de chacun

des enroulements et le point neutre le cas échéant desquelles on déduit les signaux de commutation stator pour chacun des bras de l'onduleur.

Plus précisément, la composante I_q du vecteur intensité I est régulée à l'aide d'une modulation par largeur d'impulsion utilisant le vecteur tension V comme commande, le module du vecteur tension V ayant une valeur déterminée par la carte électronique.

Selon un premier exemple, la composante V_d du vecteur tension est commandée pour réguler la composante I_q selon une commande à modulation par largeur d'impulsion, et on détermine la composante V_q du vecteur tension à l'aide de l'équation: $V_q = \sqrt{(\text{mod}(V)^2 - V_d^2)}$,

dans laquelle $\text{mod}(V) = \left(\frac{V_{dc}}{2}\right) \times m$, dans laquelle

$$m = m_{MLI_max} + \frac{(m_{PO} - m_{MLI_max})}{(N_{PO_MIN} - N_{MLI_MAX})} \times (N - N_{MLI_MAX}), \text{ (EQUATION 1)}$$

N étant la vitesse de rotation du rotor de la machine.

Ainsi, on fixe la valeur du module du vecteur tension à l'aide de l'indice de modulation. L'indice de modulation étant déterminé à l'aide des vitesses de N_{PO_MIN} , N_{MLI_MAX} , m_{PO} et m_{MLI_max} et à une valeur proportionnelle à la vitesse de rotation.

Selon un deuxième exemple, la composante V_d du vecteur tension est commandée pour réguler la composante I_q du vecteur intensité, et on détermine la composante V_q du vecteur tension à l'aide de l'équation: $V_q = \sqrt{(\text{mod}(V)^2 - V_d^2)}$,

dans laquelle $\text{mod}(V) = \frac{V_{dc}}{2} \times m$, dans laquelle

$$m = m_i + \frac{(m_f - m_i)}{DT} \times t, t \in [0, DT]. \text{ (EQUATION 2)}$$

avec

$-m_i$ représentant la valeur initiale de l'indice modulation pendant la commande à tension fixée et prenant de manière à assurer la continuité de l'indice de modulation, la valeur de l'indice de modulation m au moment du

passage du mode de commande de type MLI vectorielle 22 au mode de commande à tension fixée 23, par exemple $m = m_{MLI_max}$

- m_f représentant la valeur finale de l'indice modulation pendant la commande à tension fixée et prenant la valeur $m_f = m_{PO}$ pour assurer une
5 continuité de l'indice de modulation lors du passage au mode pleine onde.

-DT correspond à une durée de temps. Par exemple DT correspond à la durée d'activation du mode de commande à tension fixée.

Ainsi, on fixe la valeur du module du vecteur tension à l'aide de l'indice de modulation. L'indice de modulation étant déterminé à l'aide m_{PO} et
10 m_{MLI_max} et DT qui est égal à la durée que l'on donne au mode de commande à tension fixée 23 pour faire évoluer l'indice de modulation d'une valeur égale par exemple à l'indice de modulation maximale de la modulation à largeur d'impulsion à la valeur de l'indice de modulation pleine onde, m_{PO} .

Selon les premier et deuxième exemples, on dispose ainsi des deux valeurs
15 de grandeurs de commande V_d et V_q de la modulation par largeur d'impulsion pour assurer la régulation du vecteur courant I de composantes I_d et I_q .

Selon les premier et deuxième exemples, pour réguler I_q à l'aide de la commande V_d on peut par exemple relier V_d à I_q , à l'aide des formules
20 reliant les flux aux intensités dans une machine électrique tournante en considérant le mode permanent uniquement, c'est à dire en annulant $\frac{dI_d}{dt}$ dans une formule du type $V_d = R \times I_d + L \times \frac{dI_d}{dt} - \omega_e \times \Phi_u$, dans laquelle R représente la résistance des enroulements du stator, ω_e la pulsation électrique, Φ_u le flux magnétique du stator et L l'inductance des
25 enroulements du stator.

Par ailleurs, la valeur du module du vecteur tension étant directement reliée à l'indice de modulation m , on obtient dans le cas du premier exemple, que la valeur du module vecteur tension augmente linéairement en fonction de la vitesse de rotation du rotor N .

De même, pour le deuxième exemple, dans le cas où la vitesse de rotation du rotor augmente linéairement en fonction du temps, c'est à dire selon une rampe alors la valeur du module vecteur tension augmente linéairement en fonction de la vitesse de rotation du rotor N.

- 5 En fonction de la vitesse de la machine électrique, le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude 22 est actif sur l'intervalle représenté 22 sur la figure 3 jusqu'à une vitesse de déclenchement N_MLI_MAX et le mode de commande pleine onde 24 est actif sur l'intervalle 24 à partir d'une vitesse d'arrêt N_PO_MIN sur la figure 3.
- 10 Par exemple, N_MLI_MAX est une valeur fixée par un nombre de période du signal MLI dans une période électrique. On peut par exemple choisir, $N_MLI_MAX = 4500$ rpm.

Par exemple, N_PO_MIN est une valeur fixée en fonction de la F.E.M de la machine électrique pour que le courant dans la machine électrique ne soit pas trop grand. On peut par exemple choisir, $N_PO_MIN = 5000$ rpm.

15

Entre le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude 22 et le mode de commande pleine onde, il est prévu le mode de commande à tension fixée 23 qui est actif sur l'intervalle 23 sur la figure 3.

En d'autres termes, la carte électronique est configurée d'une part de sorte que le mode de commande à tension fixée 23 est activé lorsque la vitesse de rotation du rotor N dépasse la vitesse de déclenchement N_MLI_MAX , le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude 22 étant alors désactivé et d'autre part de sorte que le mode de commande pleine onde 24 est activé lorsque la vitesse de rotation du rotor N dépasse la vitesse d'arrêt N_PO_MIN , le mode de commande à tension fixée 23 étant alors désactivé.

20

25

Selon un autre mode de réalisation, on peut prévoir que la carte électronique est configurée de sorte que le mode de commande à tension fixée est activé lorsque la vitesse de rotation du rotor N dépasse une vitesse d'arrêt N_PO_MIN ou la vitesse de déclenchement N_MLI_MAX , le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude étant alors

30

désactivé et le mode de commande à tension fixée est alors désactivé après un certain délai par exemple DT, le mode de commande pleine onde étant alors activé.

5 Il peut également être prévu comme illustrée sur la figure 3, que le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude 22 comporte deux mode de fonctionnement délimités respectivement par les intervalles 25 et 26 sur la figure 3.

10 L'intervalle 25 délimite le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude classique 25 selon lequel il est prévu de calculer en fonction des courants I_d et I_q , un vecteur V afin d'optimiser le rendement de la machine par exemple.

15 L'intervalle 26 délimite un mode de commande transitoire 26 selon lequel les composantes I_d et I_q du vecteur intensité I ou la composante I_q et le courant de bobine I_r sont régulés, le module du vecteur tension ayant une valeur déterminée par la carte électronique. En d'autres termes selon le mode de commande transitoire, la composante I_q étant régulée, la composante I_d du vecteur intensité I ou un courant de bobine I_r est régulé de sorte que le module d'un vecteur tension V correspondant prend une valeur déterminée.

20 Plus précisément, le mode de commande transitoire 26 est un mode de commande MLI vectorielle selon lequel le vecteur de tension V est utilisé comme commande pour la régulation des composantes I_d et I_q ou la composante I_q et le courant de bobine I_r .

25 On peut par exemple prévoir que le module du vecteur tension est déterminée par une autre relation explicitée ci-après. En tout état cause, la valeur du module du vecteur tension est inférieure ou égale à la tension maximale ondulable. C'est à dire que le module du vecteur tension est inférieur ou égal à $\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}}$ dans le cas d'une machine électrique triphasée.

30 Selon un premier exemple, on peut prévoir que selon ladite autre relation le module de tension prend la valeur de la tension maximale ondulable. C'est à dire que le module du vecteur tension est égal à $\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}}$ dans le cas d'une machine électrique triphasée.

Selon le premier exemple, on peut dans un premier cas, déterminer la valeur de la composante I_d du vecteur intensité à l'aide d'une fonction appliquée sur la composante $PHId$. Pour cela, on détermine la fonction reliant $PHId$ et I_d à l'aide une cartographie réalisée préalablement sur la machine électrique tournante et qui est stockée dans la carte de contrôle 16.

Selon le premier exemple, on peut dans un deuxième cas, déterminer la valeur du courant de bobine du rotor I_r à l'aide d'une fonction appliquée sur la composante $PHId$. Pour cela, on détermine la fonction reliant $PHId$ et I_r à l'aide une cartographie réalisée préalablement sur la machine électrique tournante et qui est stockée dans la carte de contrôle 16.

Selon les premier et deuxième cas, la composante $PHId$ peut être déterminée à partir d'un flux magnétique stator maximal $PHIm$ et de la composante $PHIq$. Pour cela, on peut utiliser la formule:

$$PHId = \sqrt{(PHIm^2 - PHIq^2)}.$$

Selon les premier et deuxième cas, la composante $PHIq$ est déterminée à l'aide des courants dans les enroulements de phase. Par exemple, la composante $PHIq$ est déterminée comme une fonction de I_q , $PHIq=G(I_q)$. Pour déterminer la fonction G , on peut par exemple utiliser une cartographie préalable de la machine électrique tournante qui est stockée dans la carte de contrôle 16.

De plus, selon les premier et deuxième cas, le flux du stator maximal $PHIm$ est déterminé par la carte électronique à l'aide de la tension maximale ondulable V_{maxMLI} et de la pulsation électrique ω_e . Plus précisément on peut pour cela utiliser la formule $PHIm = \frac{V_{maxMLI}}{\omega_e}$.

Pour les premier et deuxième cas, selon une façon de calcul, on peut déterminer une fonction F par cartographie, selon laquelle, $PHId=F(I_d+k.I_r)$, avec k une constante. Ainsi en fixant la valeur relative de la composant I_d par rapport à I_r , on peut selon cette façon de calcul, déterminer la composante I_d et la valeur du courant I_r en fonction de $PHId$.

En d'autres termes, selon un mode de réalisation du premier exemple, on peut déterminer PH_{Im} avec la formule $PH_{Im} = \frac{V_{maxMLI}}{w_e}$, déterminer PH_{Iq} à l'aide de la formule $PH_{Iq} = G(I_q)$, desquels on peut déduire PH_{Id} et en inversant la fonction F , c'est à dire en appliquant la fonction F^{-1} , on en déduit

5 I_d et I_r avec une fixation de la valeur relative de la composante I_d par rapport au courant I_r .

A l'aide des composante I_d et I_q on déduit alors la valeur des deux grandeurs de commande de V_d et V_q de la commande à modulation de largeur d'impulsion vectorielle permettant que le module du vecteur tension soit

10 V_{maxMLI} .

Selon un deuxième exemple, comme illustré sur la figure 3, selon ladite autre relation le module du vecteur tension $mod(V)$ augmente linéairement en fonction de la vitesse de rotation du rotor N , sans toutefois être supérieur à la tension maximale ondulable. C'est à dire que le module du vecteur tension

15 est inférieur à $\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}}$ dans le cas d'une machine électrique triphasée.

On peut par exemple appliquer les calculs utilisés pour le premier exemple pour un grand nombre de vitesses de rotation de la machine électrique avec la formule $PH_{Im} = \frac{mod(V)}{w_e}$.

Selon ce deuxième exemple, on peut prévoir à l'activation du mode de commande transitoire de choisir un module du vecteur de tension égal à celui à celui obtenu par la MLI vectorielle classique 25 de manière à assurer une continuité de l'indice de modulation.

L'activation du mode de commande transitoire 26 est par exemple déclenchée par la vitesse de rotation du rotor N qui dépasse une vitesse

25 d'activation $N_{MLI_OPTI_MAX}$.

On peut par exemple prévoir que $N_{MLI_OPTI_MAX}$ est une valeur fixée pas trop éloignée par rapport à N_{MLI_MAX} quand un mode de commande à tension fixée 23 est prévu en plus du mode transitoire afin de ne pas trop dégrader le rendement. Quand un mode de commande à tension fixée 23

30 n'est pas prévu en plus du mode transitoire, on peut par exemple choisir N_{MLI_MAX} par rapport à N_{PO_MIN} . Toutefois, on peut choisir par

exemple $N_MLI_OPTI_MAX = 4300$ rpm. Pour ce qui est de la désactivation du mode de commande transitoire, on peut par exemple, configurer la carte électronique pour que le mode de commande transitoire soit désactivé après un certain délai, le mode de commande à tension fixée étant alors activé.

- 5 On peut également prévoir que la carte électronique est configurée de sorte que le mode de commande transitoire est désactivé lorsque la vitesse de rotation du rotor N dépasse une vitesse de déclenchement N_MLI_MAX , le mode de commande à tension fixée étant alors activé.

10 Toutefois, on peut selon un autre mode de réalisation comme dans le procédé correspondant illustré sur la figure 6, prévoir que le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude 22 comporte le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude classique 25 et le mode de commande transitoire 26 sans pour autant qu'il y ait un mode de contrôle à tension fixée 23.

- 15 En d'autres termes, dans ce mode de réalisation, on passe directement du mode de commande transitoire 26 appartenant au mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude 22 au mode de commande pleine onde 24. Dans ce mode de réalisation, on peut par exemple prévoir un mode de transitoire selon le premier ou le deuxième cas du premier exemple, c'est à dire notamment avec le module du vecteur tension égal à $\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}}$ dans le cas d'une machine électrique triphasée.

Sur la figure 3, on peut aussi voir des intervalles 21 et 20 qui correspondent respectivement à une commande de type vectorielle 21 et à une commande de type scalaire.

- 25 L'intervalle 21 correspond à l'intervalle 22 du mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude. En effet, dans le mode de commande vectorielle à largeur d'amplitude, il est prévu de réguler deux grandeurs à savoir I_d et I_q à l'aide de deux grandeurs V_d et V_q par exemple.

30 L'intervalle 22 comprend notamment l'intervalle 26 qui est un mode de commande vectorielle MLI. En effet, selon le mode de commande transitoire les valeurs I_d et I_q ou I_r et I_q sont régulées en utilisant la MLI de sorte que le

module du vecteur tension V prend une valeur déterminée. Toutefois, selon le mode de commande transitoire, la valeur du module du vecteur tension est inférieure à la valeur maximale que l'on peut obtenir avec une modulation à largeur d'impulsion vectorielle. Cette valeur, appelée également tension maximale ondulable V_{maxMLI} est égale à $\frac{V_{\text{dc}}}{\sqrt{3}}$ dans le cas d'une machine électrique triphasée.

L'intervalle 20 correspond à l'intervalle 23 et aussi à l'intervalle 24.

En effet, le mode de commande pleine onde 24 est un mode commande scalaire au cours duquel seul un paramètre est régulé puisqu'on utilise comme commande, un vecteur tension dont seulement la phase est variable.

De même, le mode de commande à tension fixée 23 est un mode commande scalaire au cours duquel seule une des deux composantes de l'intensité est régulée par modulation MLI l'autre composante prenant une valeur incidente du fait de la fixation de la valeur du module du vecteur tension. Selon le mode de commande à tension fixée, la valeur du module du vecteur tension est supérieur à celle que l'on peut obtenir avec une modulation à largeur d'impulsion vectorielle également appelée tension maximale ondulable V_{maxMLI} . La tension maximale ondulable est égale à $\frac{V_{\text{dc}}}{\sqrt{3}}$ dans le cas d'une machine électrique triphasée.

La figure 4 illustre un procédé de commande pour une machine électrique selon un mode de réalisation de l'invention. Celui-ci comprend les étapes suivantes:

22: le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude 22 qui comprend les deux sous étapes 25 et 26.

sous étape 25: le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude classique 25 précité selon lequel il est prévu de calculer en fonction des courants I_d et I_q , un vecteur V afin d'optimiser le rendement de la machine par exemple.

sous étape 26: le mode de commande transitoire 26 précité. Selon lequel, selon le premier exemple comprenant le premier et le deuxième cas

explicités ci-avant, on peut prévoir que le module prend le module du vecteur tension est égal à $\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}}$ dans le cas d'une machine électrique triphasée. Selon le deuxième exemple explicité ci-avant le module du vecteur tension $\text{mod}(V)$ augmente linéairement en fonction de la vitesse de rotation du rotor N .

- 5 23: le mode de commande à tension fixée 23 précité. Selon lequel, selon le premier et le deuxième exemple précités, la composante V_d du vecteur tension est commandée pour réguler la composante I_q selon une commande à modulation par largeur d'impulsion, on fixe le module du vecteur tension $\text{mod}(V)$ et on détermine la composante V_q du vecteur tension à l'aide de l'équation: $V_q = \sqrt{(\text{mod}(V))^2 - V_d^2}$,

10 dans laquelle $\text{mod}(V) = \left(\frac{V_{dc}}{2}\right) \times m$. L'indice de modulation pouvant être déterminé à l'aide de l'équation 1 ou de l'équation 2.

- 24: le mode de de commande pleine onde 24 précité. Selon lequel comme cela a déjà été mentionné, la composante V_d du vecteur tension est commandée pour réguler la composante I_q du vecteur intensité, et on détermine la composante V_q du vecteur tension à l'aide de l'équation: $V_q = \sqrt{(\text{mod}(V))^2 - V_d^2}$,

15 dans laquelle $\text{mod}(V) = \frac{V_{dc}}{2} \times mPO$.

- Par exemple, la commande transitoire 26 est activée lorsque la vitesse de rotation du rotor N dépasse une vitesse d'activation $N_MLI_OPTI_MAX$.

20 On peut prévoir que la commande transitoire 26 est désactivée après un certain délai, la commande à tension fixée 23 étant alors activée.

- On peut également prévoir que la commande transitoire 26 est désactivée lorsque la vitesse de rotation du rotor N dépasse une vitesse de déclenchement N_MLI_MAX , la commande à tension fixée 23 étant alors activée.

25 Par exemple, la commande à tension fixée 23 est activée lorsque la vitesse de rotation du rotor N dépasse une vitesse de déclenchement N_MLI_MAX ,

la commande de type à commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude 22 étant alors désactivée.

On peut également prévoir que la commande du type commande pleine onde 24 est activée lorsque la vitesse de rotation du rotor N dépasse une vitesse d'arrêt N_{PO_MIN} , la commande à tension fixée 23 étant alors
5 désactivée.

Selon un autre mode de réalisation, la commande à tension fixée 23 est activée lorsque la vitesse de rotation du rotor N dépasse une vitesse d'arrêt N_{PO_MIN} ou la vitesse de déclenchement N_{MLI_MAX} , la commande du
10 type commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude étant alors désactivée et la commande à tension fixée 23 est alors désactivée après un certain délai, la commande du type commande pleine onde étant alors activée.

La figure 5 illustre un procédé de commande pour une machine électrique
15 selon un autre mode de réalisation de l'invention. Celui ci se distingue en ce qu'il ne comprend pas le mode de commande à tension fixée 23, ainsi il comprend les étapes suivantes:

22: le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude 22 qui comprend les deux sous étapes 25 et 26 qui sont similaires à celles du
20 mode de réalisation illustrées sur la figure 4.

24: le mode de commande pleine onde mode de commande pleine onde 24 qui est similaire à celui du mode de réalisation illustré sur la figure 4.

Par exemple, la commande transitoire 26 est activée lorsque la vitesse de rotation du rotor N dépasse une vitesse d'activation $N_{MLI_OPTI_MAX}$.

25 On peut prévoir que la commande transitoire 26 est désactivée après un certain délai, le mode de commande pleine onde 24 étant alors activé.

On peut également prévoir que la commande transitoire est désactivée lorsque la vitesse de rotation du rotor N dépasse une vitesse de déclenchement N_{MLI_MAX} , le mode de commande pleine onde étant alors
30 activé.

Comme cela est illustré dans la figure 6, le procédé comprend en outre les étapes suivantes:

32: une génération de signaux de commutation stator en fonction d'un vecteur intensité I dans un repère de Fresnel;

5 33: une commutation par un onduleur d'une source de tension en fonction des signaux de commutation stator pour délivrer à chacun des enroulements du stator une tension et une intensité,

34: une mesure des courants des enroulements de phase du stator. Cette mesure est réalisée par exemple à l'aide du capteur de courant 15.

10 35: une détection de la vitesse de rotation du rotor N . Cette détection est réalisée par exemple à l'aide du détecteur 14 de la vitesse de rotation du rotor.

Par exemple, chacune des étapes ou sous étapes 25, 26, 23, et 24 du procédé illustré sur la figure 4 ou 25, 26, et 24 du procédé illustré sur la figure 5 comprend les étapes 32, 33, 34 et 35 mentionnées ci dessus.

Quelques soient les étapes ou sous étapes 25, 26, 23, et 24 du procédé illustré sur la figure 4 ou 25, 26, et 24 du procédé illustré sur la figure 5, lors de l'étape 32, on détermine par transformée de Park, les composantes I_d et I_q du vecteur intensité en fonction des intensités mesurées lors de l'étape 31 dans chacun des enroulements de phase du stator, puis on détermine la valeur les composantes de commande V_d et V_q . Pour déterminer ces composantes on peut utiliser un correcteur de type Proportionnel Intégral Dérivé comme illustré dans la figure 1 de principe d'une commande MLI. Dans ce cas, il faudra initialiser ces correcteurs lors du passage d'un mode de commande à un autre. On réalise alors une transformée de Park inverse pour déterminer les valeurs de tension aux bornes de chacun des enroulements et le point neutre le cas échéant desquelles on déduit les signaux de commutation stator pour chacun des bras de l'onduleur.

La figure 7 illustre selon un mode de réalisation, les passages entre les différents modes de commande: mode de commande de type MLI vectorielle 22, mode de commande à tension fixée 23 et le mode de commande pleine

onde 24. Les passages sont numérotés 2223, 2324, 2423 et 2322 en fonction du numéro du mode commande initial et du mode de commande vers lequel on passe.

5 Selon le mode de commande de MLI vectorielle 22, l'indice de modulation est relié au vecteur tension selon la formule suivante:

$$m = \frac{\sqrt{(V_q^2 + V_d^2)}}{V_{dc}/2} \leq m_{MLI_max}.$$

Selon le mode de commande pleine onde, l'indice de modulation qui prend une valeur fixe mPO, par exemple égal à $\frac{4}{\pi}$ et on peut relier Vq à Vd à l'aide de la formule

10 $V_q = \sqrt{(\text{mod}(V)^2 - V_d^2)},$

dans laquelle $\text{mod}(V) = \frac{V_{dc}}{2} \times m_{PO}.$

Selon le passage 2223, on passe du mode de commande de type MLI vectorielle 22 au mode de commande à tension fixée 23 lorsque la vitesse de rotation de la machine électrique tournante est supérieure à la vitesse d'arrêt
15 N_PO_MIN. En mode à commande à tension fixée, on applique alors pour déterminer l'indice de modulation:

$$m = m_i + \frac{(m_f - m_i)}{DT} \times t, t \in [0, DT].$$

avec

20 -m_i prenant la valeur de l'indice de modulation m au moment du passage du mode de commande de type MLI vectorielle 22 au mode de commande à tension fixée, par exemple $m = m_{MLI_max}$

-m_f=mPO

-t=0

25 -DT correspond à une durée de temps. Par exemple DT correspond à la durée d'activation du mode de commande à tension fixée.

Selon le passage 2324, on passe du mode de commande à tension fixée 23 au mode de commande pleine onde 24 lorsque la vitesse de rotation de la machine électrique tournante est supérieure à la vitesse d'arrêt N_PO_MIN et $t=DT$.

- 5 Selon le passage 2423, on passe du mode de commande pleine onde 24 au mode de commande à tension fixée 23 lorsque la vitesse de rotation de la machine électrique tournante est inférieure à la vitesse d'arrêt N_PO_MIN . On applique alors pour déterminer l'indice de modulation:

$$m = m_i + \frac{(m_f - m_i)}{DT} \times t, t \in [0, DT] .$$

- 10 avec

$$-m_i = mPO$$

$$-m_f = mMLI_max$$

$$-t=0$$

- 15 -DT correspond à une durée de temps. Par exemple DT correspond à la durée d'activation du mode de commande à tension fixée.

Selon le passage 2322, on passe du mode de commande à tension fixée 23 au mode de commande MLI vectorielle 22 lorsque la vitesse de rotation de la machine électrique tournante est inférieure à la vitesse d'arrêt N_PO_MIN et $t=DT$.

- 20

REVENDEICATIONS

1. Système de commande pour une machine électrique tournante multiphasée et synchrone comprenant un stator (31) et un rotor (30), ledit système de commande comprenant:

- 5 -une carte électronique (16) pour générer des signaux de commutation stator en fonction d'un vecteur intensité (I) dans un repère de Fresnel;
- un onduleur (29) apte à commuter une source de tension (1) en fonction des signaux de commutation stator pour délivrer à chacun des enroulements du stator (8, 9 10) une tension et une intensité ayant une pulsation électrique
- 10 (we), de sorte que le stator génère un flux magnétique stator (Φ), le flux magnétique stator (Φ) ayant des composantes Φ_{Id} et Φ_{Iq} après une transformation de Park;
- un capteur (15) des courants des enroulements de phase du stator (8, 9, 10); et
- 15 -un détecteur (14) de la vitesse de rotation du rotor (N) et de sa position;
- dans lequel l'onduleur (29) et la carte électronique (16) sont configurés pour fonctionner selon un mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude (22) avec une tension maximale ondulable (V_{maxMLI}) et un indice de modulation (m) ayant une valeur maximale (m_{MLI_max}) et selon un
- 20 mode de commande pleine onde (24) avec un indice de modulation (m) ayant une valeur fixe (m_{PO}),
- caractérisé en ce que lors du passage entre le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude (22) et le mode de commande pleine onde (24), l'onduleur (29) et la carte électronique (16) sont
- 25 configurés pour fonctionner selon un mode de commande à tension fixée (23), selon lequel l'onduleur (29) et la carte électronique (16) fonctionnent selon un mode de commande à modulation de largeur d'amplitude dans lequel une composante I_q du vecteur intensité (I) est régulée, le module d'un vecteur tension (V) correspondant ayant une valeur déterminée par la carte
- 30 électronique (16).

2. Système de commande selon la revendication précédente, caractérisé en ce que la carte électronique (16) est configurée de sorte que le mode de commande à tension fixée (23) est activé lorsque la vitesse de rotation du rotor (N) dépasse une vitesse de déclenchement (N_MLI_MAX), le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude (22) étant alors désactivé.

3. Système de commande selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que la carte électronique (16) est configurée de sorte que le mode de commande pleine onde (24) est activé lorsque la vitesse de rotation du rotor (N) dépasse une vitesse d'arrêt (N_PO_MIN), le mode de commande à tension fixée (23) étant alors désactivé.

4. Système de commande selon la revendication précédente quand dépendante de la revendication 2, caractérisé en ce que selon le mode de commande à tension fixée (23), la carte électronique (16) et l'onduleur (29) sont configurés pour fonctionner selon un mode de commande à modulation de largeur d'amplitude dans lequel une composante Vd du vecteur tension est commandée pour réguler la composante Iq, et on détermine une composante Vq du vecteur tension à l'aide de l'équation: $Vq = \sqrt{(\text{mod}(V)^2 - Vd^2)}$,

dans laquelle $\text{mod}(V) = \left(\frac{V_{dc}}{2}\right) \times m$, dans laquelle

$m = m_{MLI_max} + \frac{(m_{PO} - m_{MLI_max})}{(N_{PO_MIN} - N_{MLI_MAX})} \times (N - N_{MLI_MAX})$, N étant la vitesse de rotation du rotor de la machine.

5. Système de commande selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que la carte électronique (16) est configurée de sorte que le mode de commande pleine onde (24) est activé après une durée d'activation (DT) du mode de commande à tension fixée (23), le mode de commande à tension fixée (23) étant alors désactivé.

6. Système de commande selon la revendication précédente, caractérisé en ce que selon le mode de commande à tension fixée (23), la carte électronique (16) et l'onduleur (29) sont configurés pour fonctionner selon un mode de commande à modulation de largeur d'amplitude dans lequel une

composante V_d du vecteur tension est commandée pour réguler la composante I_q du vecteur intensité, et on détermine une composante V_q du vecteur tension à l'aide de l'équation: $V_q = \sqrt{(\text{mod}(V))^2 - V_d^2}$,

dans laquelle $\text{mod}(V) = \frac{V_{dc}}{2} \times m$, dans laquelle

$$5 \quad m = m_{MLI_max} + \frac{(m_{PO} - m_{MLI_max})}{DT} \times t, t \in [0, DT].$$

7. Système de commande selon la revendication 1, caractérisé en ce que la carte électronique (16) est configurée de sorte que le mode de commande à tension fixée est activé lorsque la vitesse de rotation du rotor (N) dépasse une vitesse d'arrêt (N_{PO_MIN}), le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude (22) étant alors désactivé et en ce que le mode de commande à tension fixée (23) est alors désactivé après un certain délai, le mode de commande pleine onde (24) étant alors activé.

8. Système de commande selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que selon le mode de commande à tension fixée (23), le module du vecteur tension (V) augmente linéairement en fonction de la vitesse de rotation du rotor (N).

9. Système de commande selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que selon le mode de commande pleine onde (24), la carte électronique (16) et l'onduleur (29) sont configurés pour qu'une composante V_d du vecteur tension (V) est commandée pour réguler la composante I_q du vecteur intensité (I), et on détermine une composante V_q du vecteur tension (V) à l'aide de l'équation: $V_q = \sqrt{(\text{mod}(V))^2 - V_d^2}$,

dans laquelle $\text{mod}(V) = \frac{V_{dc}}{2} \times m_{PO}$.

10. Système de commande selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le rotor comprenant une bobine (13), selon le mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude (22), l'onduleur et la carte électronique sont configurés pour fonctionner selon un mode de commande transitoire (26), selon lequel l'onduleur (29) et la carte électronique (16) fonctionnent selon un mode de commande vectorielle à modulation de largeur d'amplitude qui régule la composante I_q

du vecteur intensité (I) et dans lequel une composante I_d du vecteur intensité (I) ou un courant de bobine (I_r) est régulé de sorte que le module du vecteur tension (V) prend une valeur déterminée par la carte électronique.

5 11. Système de commande selon la revendication 10, caractérisé en ce que la carte électronique (16) est configurée de sorte que le mode de commande transitoire (26) est activé lorsque la vitesse de rotation du rotor (N) dépasse une vitesse d'activation ($N_MLI_OPTI_MAX$).

10 12. Système de commande selon la revendication 10 ou 11, caractérisé en ce que la carte électronique (16) est configurée de sorte que le mode de commande transitoire (26) est désactivé après un certain délai, le mode de commande à tension fixée étant alors activé.

15 13. Système de commande selon la revendication 10 ou 11, caractérisé en ce que la carte électronique (16) est configurée de sorte que le mode de commande transitoire (26) est désactivé lorsque la vitesse de rotation du rotor (N) dépasse une vitesse de déclenchement (N_MLI_MAX), le mode de commande à tension fixée (23) étant alors activé.

20 14. Système de commande selon l'une des revendications 10 à 13, caractérisé en ce que selon le mode de commande transitoire (26), le module du vecteur tension (V) augmente linéairement en fonction de la vitesse de rotation du rotor (N).

15. Système de commande l'une des revendications 10 à 13, caractérisé en ce que selon le mode de commande transitoire (26) la composante I_d ou le courant de bobine (I_r) est régulé de sorte que le module du vecteur tension (V) prend la valeur de la tension maximale ondulable (V_maxMLI).

25 16. Système de commande selon la revendication précédente, caractérisé en ce que la carte électronique (16) détermine la valeur de la composante I_d du vecteur intensité à l'aide d'une fonction (F^{-1}) appliquée sur la composante $PHId$, la composante $PHId$ étant déterminée à partir d'un flux magnétique stator maximal ($PHIm$) et de la composante $PHIq$.

30 17. Système de commande selon la revendication 15, caractérisé en ce que la carte électronique (16) lors du mode de commande transitoire (26)

détermine la valeur du courant de bobine (I_r) à l'aide d'une fonction (F^{-1}) appliquée sur la composante $PHId$, la composante $PHId$ étant déterminée à partir d'un flux magnétique stator maximal ($PHIm$) et de la composante $PHIq$.

5 18. Système de commande selon la revendication 16 ou 17, caractérisé en ce que la composante $PHIq$ est déterminée à l'aide des courants dans les enroulements de phase (8, 9, 10).

10 19. Système de commande selon l'une des revendications 16 à 18, caractérisé en ce que le flux du stator maximal ($PHIm$) est déterminé par la carte électronique (16) à l'aide de la tension maximale ondulable (V_{maxMLI}) et de la pulsation électrique (ω_e).

1/7

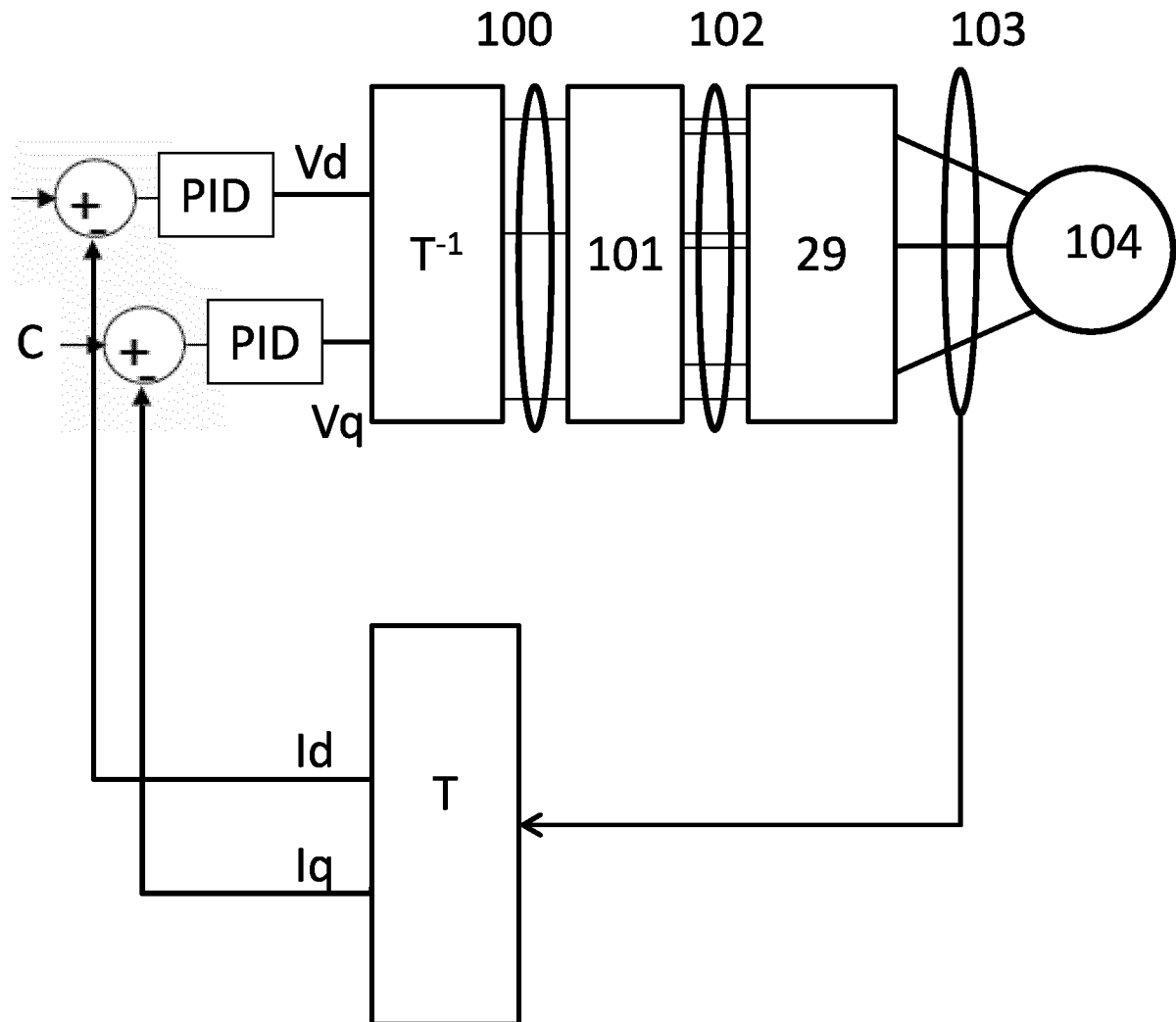


FIG. 1

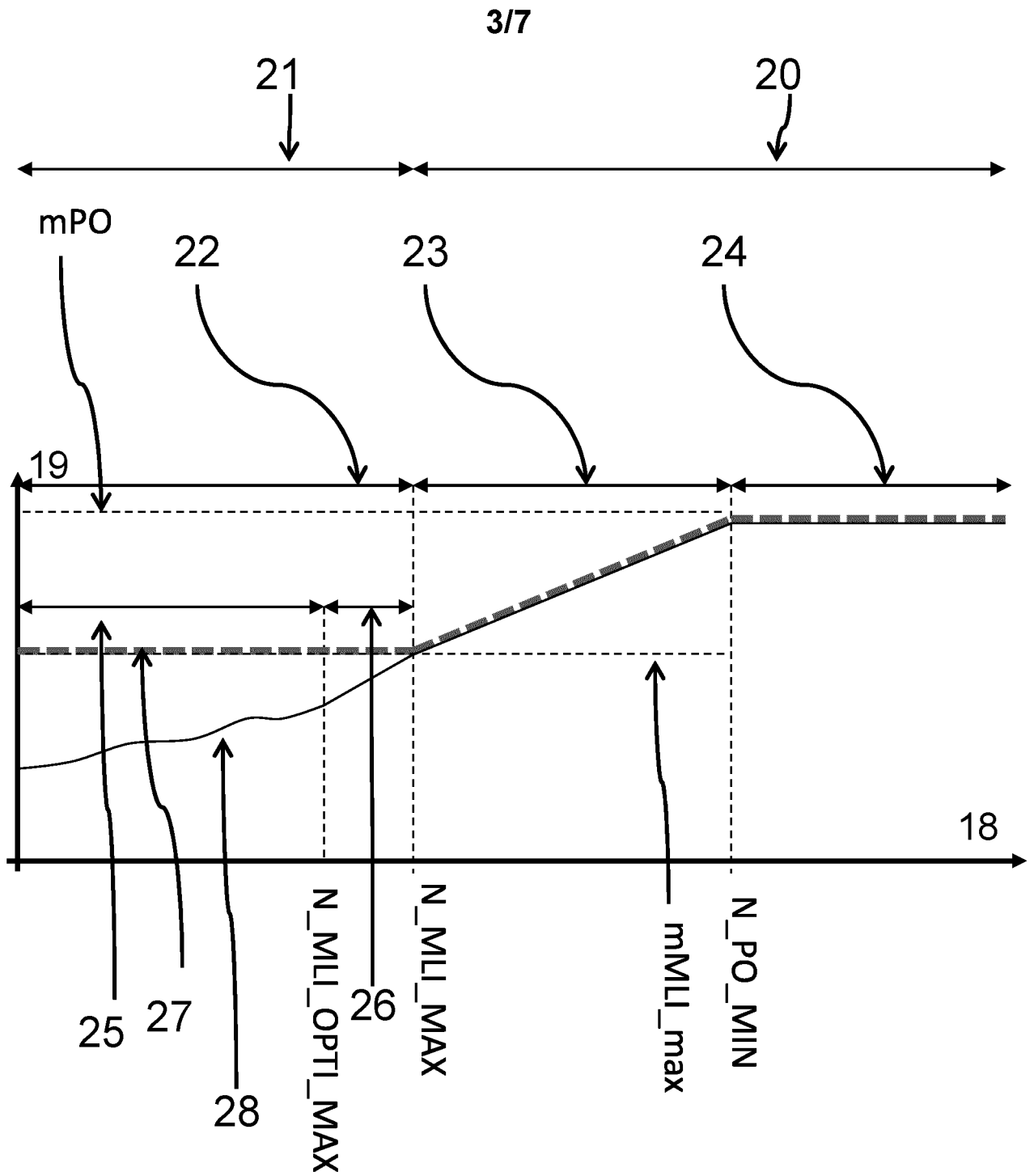


FIG. 3

4/7

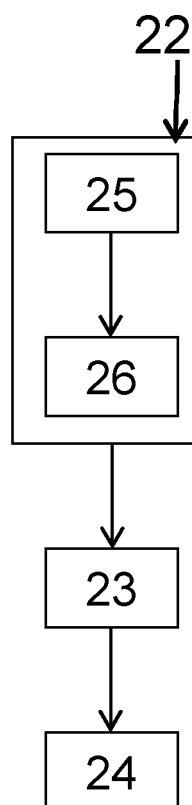


FIG. 4

5/7

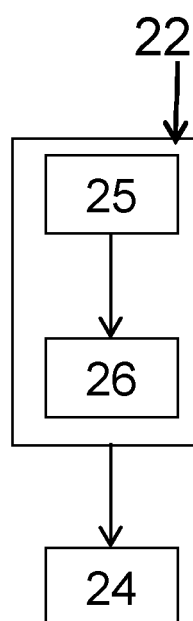


FIG. 5

6/7

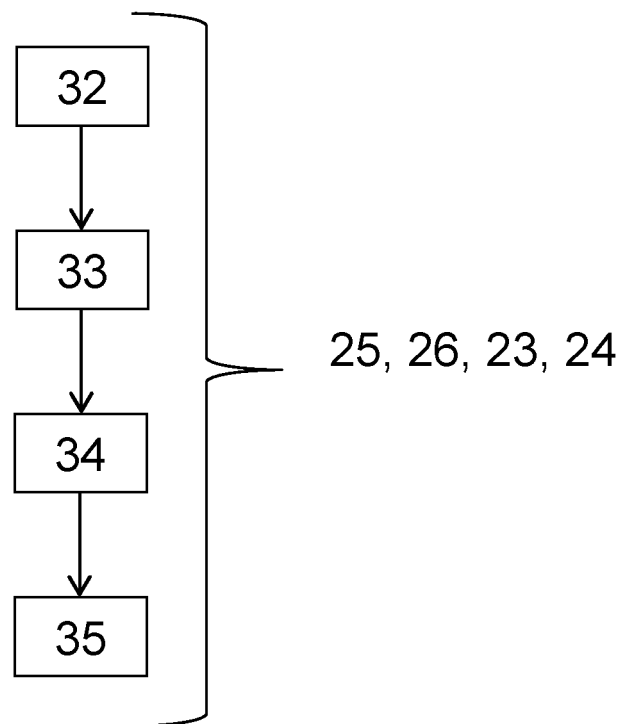


FIG. 6

7/7

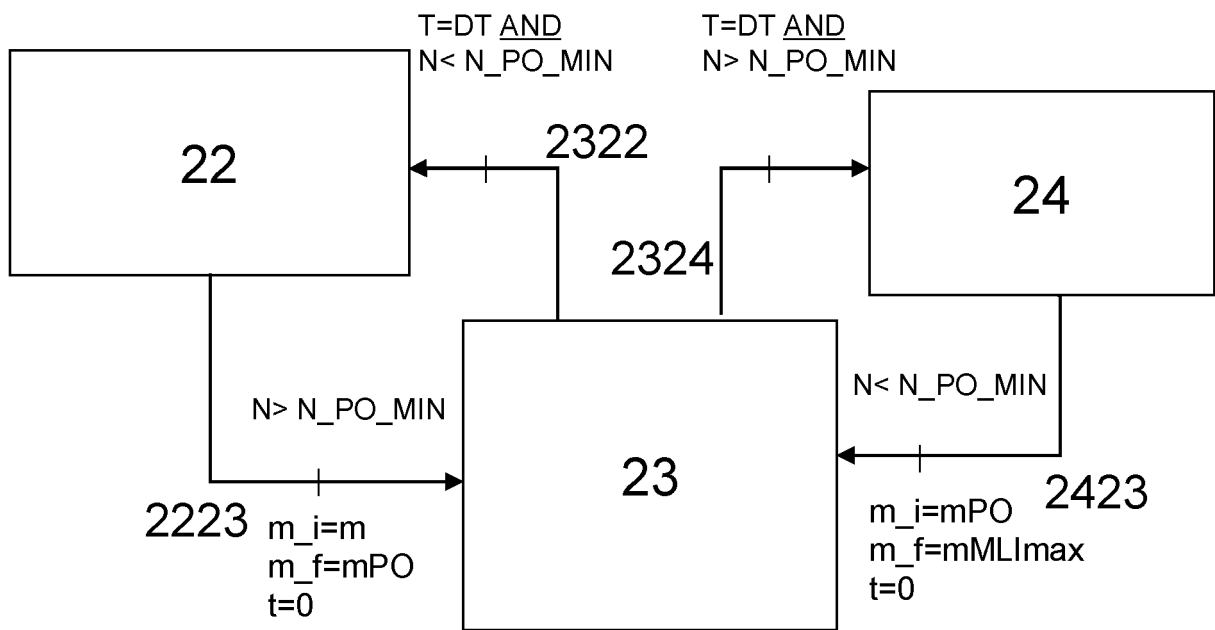


FIG. 7



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

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

N° d'enregistrement
national

FA 835662
FR 1750312

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		
X	DE 10 2011 081216 A1 (BOSCH GMBH ROBERT [DE]) 21 février 2013 (2013-02-21)	1-3,5, 7-9	H02P21/14 H02P6/08
Y	* alinéas [0001], [0004] - [0032],	10-15	
A	[0042] - [0045], [0050] - [0058]; figures 1-6 *	4,6, 16-19	
Y	----- WO 2015/015117 A1 (VALEO EQUIP ELECTR MOTEUR [FR]) 5 février 2015 (2015-02-05)	10-15	
A	* abrégé *	1-9, 16-19	
A	----- US 2010/259206 A1 (JOACHIMSMEYER DIRK [DE]) 14 octobre 2010 (2010-10-14)	1-19	
A,D	----- CA 2 631 299 A1 (BOSCH SECURITY SYSTEMS BV [NL]) 9 novembre 2009 (2009-11-09)	1-19	
A	----- US 4 926 104 A (KING R D; SZCZESNY P M) 15 mai 1990 (1990-05-15)	1-10	
A,D	----- FR 3 004 299 A1 (VALEO EQUIP ELECTR MOTEUR [FR]) 10 octobre 2014 (2014-10-10)	1-19	
A,D	----- FR 2 895 598 A1 (VALEO EQUIP ELECTR MOTEUR [FR]) 29 juin 2007 (2007-06-29)	1-19	
A,D	----- FR 2 745 445 A1 (VALEO ELECTRONIQUE [FR]) 29 août 1997 (1997-08-29)	1-19	
	-----		DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			H02P
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
14 septembre 2017		Fraïssé, Stéphane	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention	
X : particulièrement pertinent à lui seul		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.	
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie		D : cité dans la demande	
A : arrière-plan technologique		L : cité pour d'autres raisons	
O : divulgation non-écrite		
P : document intercalaire		& : membre de la même famille, document correspondant	

2

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1750312 FA 835662**

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 **14-09-2017**

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
DE 102011081216 A1	21-02-2013	DE 102011081216 A1 WO 2013023803 A1	21-02-2013 21-02-2013

WO 2015015117 A1	05-02-2015	CN 105408620 A EP 3027886 A1 FR 3009345 A1 JP 2016527436 A US 2016186711 A1 WO 2015015117 A1	16-03-2016 08-06-2016 06-02-2015 08-09-2016 30-06-2016 05-02-2015

US 2010259206 A1	14-10-2010	CN 101790838 A DE 102007040560 A1 KR 20100059910 A US 2010259206 A1 WO 2009027326 A1	28-07-2010 12-03-2009 04-06-2010 14-10-2010 05-03-2009

CA 2631299 A1	09-11-2009	AUCUN	

US 4926104 A	15-05-1990	CA 2027983 A1 US 4926104 A	19-04-1991 15-05-1990

FR 3004299 A1	10-10-2014	CN 105264763 A EP 2982036 A1 FR 3004299 A1 JP 2016514945 A KR 20150140741 A US 2016141997 A1 WO 2014162101 A1	20-01-2016 10-02-2016 10-10-2014 23-05-2016 16-12-2015 19-05-2016 09-10-2014

FR 2895598 A1	29-06-2007	AT 541355 T CN 101375492 A EP 1964257 A2 ES 2377990 T3 FR 2895598 A1 JP 5284793 B2 JP 2009521200 A US 2008266918 A1 WO 2007074267 A2	15-01-2012 25-02-2009 03-09-2008 04-04-2012 29-06-2007 11-09-2013 28-05-2009 30-10-2008 05-07-2007

FR 2745445 A1	29-08-1997	DE 69713641 D1 DE 69713641 T2 EP 0793013 A1 ES 2179283 T3 FR 2745445 A1 US 6002219 A	08-08-2002 20-02-2003 03-09-1997 16-01-2003 29-08-1997 14-12-1999
