

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
**INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**
—
COURBEVOIE
—

①① **N° de publication :** **3 075 512**
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)
②① **N° d'enregistrement national :** **17 62421**
⑤① Int Cl⁸ : **H 02 P 1/02 (2018.01)**

⑫

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ **PROCÉDE DE COMMANDE D'UN MOTEUR ELECTRIQUE INCLUANT UNE SEQUENCE D'IDENTIFICATION D'UN TRANSFORMATEUR.**

②② **Date de dépôt :** 19.12.17.

③③ **Priorité :**

④③ **Date de mise à la disposition du public de la demande :** 21.06.19 Bulletin 19/25.

④⑤ **Date de la mise à disposition du public du brevet d'invention :** 08.11.19 Bulletin 19/45.

⑤⑥ **Liste des documents cités dans le rapport de recherche :**

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥⑥ **Références à d'autres documents nationaux apparentés :**

○ **Demande(s) d'extension :**

⑦① **Demandeur(s) :** SCHNEIDER TOSHIBA INVERTER EUROPE SAS Société par actions simplifiée — FR.

⑦② **Inventeur(s) :** DEVOS THOMAS, JEBAI AL KASSEM et MALRAIT FRANCOIS.

⑦③ **Titulaire(s) :** SCHNEIDER TOSHIBA INVERTER EUROPE SAS Société par actions simplifiée.

⑦④ **Mandataire(s) :** SCHNEIDER ELECTRIC INDUSTRIES SAS.

FR 3 075 512 - B1



Domaine technique de l'invention

La présente invention se rapporte à un procédé de commande d'un moteur électrique mis en œuvre dans un variateur de vitesse. L'invention concerne également un système de commande d'un moteur électrique.

5

Etat de la technique

Dans certaines applications, un transformateur est présent entre la sortie d'un variateur de vitesse et le moteur électrique commandé par le variateur. Il s'agit en particulier des applications pour la commande des pompes de type ESP (pompe submersible) pour lesquelles un moteur moyenne tension est souvent utilisé. Dans ce cas, si le variateur de vitesse utilisé est en basse tension, un transformateur rehausseur est nécessaire en sortie du variateur.

Actuellement, dans une configuration de ce type où le moteur électrique est à induction ou de type synchrone à aimant permanent, une procédure de démarrage spécifique telle que celle décrite dans la demande de brevet **EP2963802A1**, consiste à appliquer en entrée une trajectoire de courant prédéfinie et une trajectoire de fréquence prédéfinie en vue de permettre l'accrochage du rotor. Cette séquence de démarrage fonctionne très bien lorsque l'inertie de l'application commandée par le moteur électrique n'est pas très élevée.

Dans le cas d'une inertie importante, le couple accélérateur doit être pris en compte dans le calcul de la référence de courant ou du temps de la rampe d'accélération. Néanmoins, cela n'est pas suffisant pour garantir un démarrage propre. A basse fréquence statorique, le gain du transformateur est très faible et le courant au secondaire ne permet donc pas de générer suffisamment de couple pour accrocher le moteur. A partir d'une certaine fréquence statorique, le courant peut devenir suffisant pour démarrer le moteur, mais ne permet pas de stabiliser la vitesse réelle du moteur. Des oscillations de vitesse et de couple sont alors présentes.

Une solution consiste à augmenter le seuil de courant de référence appliqué en entrée afin que le rotor soit accroché à une vitesse plus faible et que le niveau de courant stabilise le moteur. Cependant, dans ce cas, le courant appliqué en fin de trajectoire de démarrage devient très important ce qui peut entraîner une détérioration du moteur électrique connecté au secondaire du transformateur ou du transformateur lui-même.

De manière générale, garantir le démarrage dans toutes les conditions (faible ou forte inertie) nécessite d'ajouter des capteurs de courant côté moteur pour réguler le courant au secondaire du transformateur et de prévoir une solution de régulation

35

spécifique dans le variateur de vitesse pour tenir compte des données en provenance de ces capteurs.

5 Le but de l'invention est donc de proposer un procédé de commande d'un moteur électrique connecté à un variateur de vitesse via un transformateur, ledit procédé permettant le démarrage du moteur électrique en créant un minimum d'oscillations de vitesse et de couple, en limitant le niveau de courant appliqué pour ne pas détériorer le moteur électrique et en évitant l'ajout de capteurs côté moteur.

10

Exposé de l'invention

Ce but est atteint par un procédé de commande d'un moteur électrique, mis en œuvre dans un variateur de vitesse, ledit variateur de vitesse étant connecté au moteur électrique à travers un transformateur qui comporte un primaire et un secondaire, ledit
15 primaire du transformateur étant connecté à des phases de sortie du variateur de vitesse et ledit secondaire du transformateur étant connecté audit moteur électrique, ledit procédé consistant à :

- Exécuter une séquence d'identification du transformateur pour déterminer des données de gain représentatives d'un transfert réalisé par le transformateur ;
20
- Générer un module de transfert à partir desdites données de gain déterminées ;
- Déterminer une séquence de démarrage du moteur électrique à mettre en œuvre par le variateur de vitesse en exécutant ledit module de transfert sur
25 une trajectoire de courant de référence.

Selon une particularité, ladite séquence d'identification comporte :

- Une génération d'un profil de tension comprenant une fréquence variable de manière à définir plusieurs points de fonctionnement en fréquence successifs ;
30
- Pour chaque point de fonctionnement en fréquence, une première acquisition du courant et/ou de la tension au primaire du transformateur et une deuxième acquisition respectivement du courant et/ou de la tension au secondaire du transformateur ;
- Une détermination du gain entre le primaire et le secondaire du transformateur pour chaque point de fonctionnement en fréquence.
35

Selon une autre particularité, le profil de tension comporte une amplitude fixe ou une amplitude variable, obtenue par une boucle de régulation de courant.

5 Selon une autre particularité, les points de fonctionnement en fréquence peuvent être définis chacun par un palier en fréquence distinct d'un profil de fréquence présentant plusieurs paliers successifs ou peuvent être définis chacun sur une rampe de variation linéaire en fréquence.

Selon une autre particularité, ladite première acquisition est réalisée par mesure du courant et/ou de la tension au primaire du transformateur.

10 Selon une autre particularité, ladite deuxième acquisition est réalisée par mesure du courant et/ou de la tension au secondaire du transformateur.

Selon une autre particularité, la génération du module de transfert consiste à déterminer ladite fonction inverse de la fonction de transfert du transformateur ou à créer une table de correspondance.

15 Selon une particularité, ladite séquence d'identification est exécutée pour déterminer également des données de déphasage représentatives du transfert réalisé par le transformateur.

L'invention concerne également un système de commande d'un moteur électrique, ledit moteur électrique étant commandé par un variateur de vitesse, ledit variateur de vitesse étant connecté au moteur électrique à travers un transformateur qui comporte un primaire et un secondaire, ledit primaire du transformateur étant connecté à des phases de sortie du variateur de vitesse et ledit secondaire du transformateur étant connecté audit moteur électrique, ledit système de commande comportant une unité de traitement et de commande ainsi que :

- 25
- Un module d'identification du transformateur configuré pour être exécuté par l'unité de traitement et de commande pour déterminer des données de gain représentatives d'un transfert réalisé par le transformateur ;
 - Un module d'analyse configuré pour générer un module de transfert à partir desdites données de gain et de déphasage déterminées ;
- 30
- Ledit module de transfert étant configuré pour être exécuté sur une trajectoire de courant de référence pour déterminer une séquence de démarrage du moteur électrique à mettre en œuvre par le variateur de vitesse.

35 Selon une particularité, le module d'identification comporte un module de génération d'un profil de tension comprenant une fréquence variable de manière à définir plusieurs points de fonctionnement en fréquence successifs.

Selon une autre particularité, le système comporte un premier module d'acquisition, pour chaque point de fonctionnement en fréquence, du courant et/ou de la tension au primaire du transformateur et un deuxième module d'acquisition respectivement du courant et/ou de la tension au secondaire du transformateur.

5 Selon une autre particularité, le module d'analyse est configuré pour déterminer un gain et un déphasage entre le primaire et le secondaire du transformateur pour chaque point de fonctionnement en fréquence.

Selon une autre particularité, le module de transfert comporte une fonction inverse de ladite fonction de transfert du transformateur ou une table de correspondance.

10 Selon une autre particularité, le module d'identification est configuré pour déterminer également des données de déphasage représentatives du transfert réalisé par le transformateur.

15 **Brève description des figures**

D'autres caractéristiques et avantages vont apparaître dans la description détaillée qui suit faite en regard des dessins annexés dans lesquels :

- La figure 1 représente de manière schématique une installation de commande d'un moteur électrique, incluant le système de commande de l'invention ;
- 20 - La figure 2 illustre de manière schématique le principe de fonctionnement du système de commande de l'invention ;
- Les figures 3A et 3B illustrent, selon deux variantes de réalisation, le principe de la séquence d'identification mise en œuvre dans l'invention ;
- 25 - La figure 4 illustre de manière schématique le principe de génération du module de transfert employé dans le système de commande de l'invention ;
- La figure 5 illustre de manière schématique le principe de fonctionnement de la séquence de démarrage mise en œuvre par le système de commande de l'invention ;
- 30 - Les figures 6A et 6B représentent deux exemples de profils suivis par la fréquence pour la mise en œuvre du procédé d'identification de l'invention ;
- Les figures 7A et 7B illustrent le principe d'une séquence de démarrage classique ;
- Les figures 8A et 8B illustrent le principe d'une séquence de démarrage modifiée par la solution de l'invention.
- 35

Description détaillée d'au moins un mode de réalisation

L'invention s'applique pour une installation de commande d'un moteur électrique, qui comporte :

- 5 - Un variateur de vitesse SD destiné à commander le moteur électrique M et comprenant notamment un étage onduleur INV destiné à convertir une tension continue en une tension variable à appliquer au moteur électrique M ; Le variateur de vitesse 1 est ici représenté triphasé ;
- 10 - Un transformateur TR connecté sur les phases de sortie (trois phases, référencées 1, 2, 3) du variateur SD. Le transformateur TR comporte un primaire (indice p) auquel sont connectées les phases de sortie du variateur de vitesse SD et un secondaire (indice s) ;
- 15 - Un moteur électrique M connecté au secondaire du transformateur TR ; Le moteur électrique M peut être de tout type, synchrone ou asynchrone, le procédé de l'invention étant indépendant du type de moteur connecté.

Le variateur de vitesse SD comporte une unité de traitement et de commande UC destinée à mettre en œuvre une loi de commande LC permettant de déterminer, en tenant compte par exemple d'une consigne de vitesse en entrée, les tensions à appliquer au moteur électrique M lors du fonctionnement normal du moteur et les ordres de commande CTL à appliquer à l'étage onduleur INV pour obtenir ces tensions de sortie.

Le variateur de vitesse peut comporter un étage redresseur REC en entrée, destiné à convertir une tension alternative fournie par le réseau électrique N en une tension continue. Il peut également comporter un bus continu d'alimentation connecté d'une part à l'étage redresseur REC et d'autre part à l'étage onduleur INV. Le bus continu d'alimentation peut comporter deux lignes d'alimentation reliées entre elles par au moins un condensateur de bus Cbus configuré pour stabiliser la tension du bus.

L'invention vise à proposer un procédé de commande permettant de déterminer au final la séquence de démarrage adaptée à l'installation. Pour cela, le procédé de commande vise notamment à mettre en œuvre une séquence d'identification du transformateur TR qui est intercalé entre le variateur de vitesse SD et le moteur électrique M lorsque ce transformateur TR a été considéré comme nécessaire pour la mise en œuvre de l'application.

Par identification du transformateur TR, on entend la détermination du gain et/ou du déphasage généré par le transformateur TR entre le primaire et le secondaire du transformateur, en fonction de la fréquence statorique d'excitation ω_{st} générée par le variateur de vitesse à destination du moteur électrique M placé en aval du transformateur TR. A partir des données recueillies, il sera possible de déterminer une fonction de transfert pour relier la fréquence statorique d'excitation ω_{st} appliquée en entrée aux courants et tension présents au primaire et au secondaire du transformateur. La fonction de transfert obtenue devra ensuite être inversée pour être employée dans la séquence de démarrage. De manière générale, on pourra parler du transfert réalisé par le transformateur entre le primaire et le secondaire, ce transfert étant réalisé par l'application d'un gain et/ou d'un déphasage.

Autrement dit, il s'agit de déterminer un diagramme de Bode du transformateur. De manière connue, un diagramme de Bode est un moyen de représenter le comportement fréquentiel d'un système (ici le transformateur). Il peut être utilisé pour visualiser rapidement la marge de gain et la marge de phase d'un système.

Le procédé de commande est mis en œuvre par un système de commande adapté.

Le système de commande comporte une unité de traitement et de commande qui comporte au moins un microcontrôleur. Cette unité de de traitement et de commande UC peut être celle du variateur de vitesse. Le système de commande peut inclure le variateur de vitesse.

La séquence d'identification du transformateur est avantageusement mise en œuvre en dehors du fonctionnement normal de l'installation. Elle peut être mise en œuvre lors d'une première mise sous tension ou lors d'une étape de paramétrage particulière.

De manière connue, le variateur de vitesse SD, plus particulièrement son étage onduleur, est commandé pour appliquer une tension triphasée sur les trois phases de sortie, dont la fréquence et l'amplitude peuvent varier. Classiquement, la loi de commande LC se base sur un courant de référence I_{ref} . A partir du courant de référence et des mesures ou estimations du courant, la loi de commande LC détermine la tension de référence V_{ref} à partir de laquelle sont déterminées des tensions simples $V1_{ref}$, $V2_{ref}$, $V3_{ref}$ à obtenir sur chaque phase de sortie. L'unité de traitement et de commande UC détermine ensuite les ordres de commande à appliquer aux transistors de l'étage onduleur pour obtenir les tensions souhaitées.

Les tensions $V1_{ref}$, $V2_{ref}$, $V3_{ref}$ sont de la forme :

$$V1_{ref} = V \sin(2 \pi f t)$$

$$V2_{ref} = V \sin\left(2 \pi f t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$V3_{ref} = V \sin\left(2 \pi f t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

5

Dans la suite de la description, nous expliquerons le principe de l'invention en se basant sur les modules de courant et les modules de tension, résultant respectivement des courants et des tensions sur les trois phases de l'installation. Mais il faut comprendre que le principe peut être appliqué de manière identique en se basant sur les courants et les tensions pris sur chaque phase.

10

Le système de commande comporte un module d'identification M1 du transformateur, configuré pour être exécuté par l'unité de traitement et de commande UC en vue de mettre en œuvre la séquence d'identification.

15 Le module d'identification M1 comporte un module M10 d'application d'un profil en fréquence, configuré pour être exécuté par l'unité de traitement et de commande UC.

Le profil de fréquence statorique comporte plusieurs points de fonctionnement en fréquence ω_{st_i} distincts successifs appliqués en fonction du temps. Chaque point de fonctionnement en fréquence est défini par un indice i , avec i allant de 1 à n .

20 Lors de la séquence d'identification, l'amplitude de la tension déterminée par la loi de commande LC est pour sa part choisie de manière adaptée pour ne pas saturer le transformateur, ni détériorer le moteur électrique. Les points de fonctionnement en fréquence ω_{st_i} sont avantageusement distincts, mais il n'est nullement nécessaire qu'ils suivent un profil particulier. Il faut comprendre donc que tout profil de variation de la

25 fréquence, permettant de définir plusieurs points de fonctionnement en fréquence distincts pourrait être envisagé. A titre d'exemple, deux configurations sont présentées ci-dessous sur les figures 6A et 6B.

Une première configuration représentée sur la figure 6A comporte plusieurs paliers successifs, chaque palier formant un point de fonctionnement en fréquence ω_{st_i}

30 distinct. Le profil peut être croissant comme sur la figure 6A, ou décroissant.

Une deuxième configuration représentée sur la figure 6B, comporte une rampe linéaire. Les points de fonctionnement en fréquence successifs appartiennent donc à cette rampe. La rampe peut être croissante comme sur la figure 6B, ou décroissante.

5 En ce qui concerne le contrôle de la tension de sortie (résultant des trois tensions triphasées) en amplitude V , plusieurs variantes peuvent être envisagées.

Dans une première variante représentée sur la figure 3A, l'amplitude V_i de la tension restera identique pour chaque point de fonctionnement en fréquence i . Le schéma consiste donc simplement à injecter le profil de fréquence dans la loi de commande LC.
10

Dans une deuxième variante de réalisation illustrée sur la figure 3B, en considérant simplement le module de la tension, celui-ci peut être déterminé par une régulation de courant. Le module d'identification M1 comporte alors un module d'application M11 d'une référence de courant I_{ref} dans la loi de commande LC, ce module M11 étant exécuté en parallèle du module M10. Le module de la tension V_i est déterminé par un régulateur à action proportionnel-intégral recevant en entrée la différence entre le courant de référence I_{ref} et le courant I_{p_m} mesuré au primaire du transformateur. Dans ce cadre et de manière plus concrète, la régulation peut suivre le schéma tel que représenté sur la figure 3C. Dans ce schéma, les courants mesurés sur les trois phases de sortie (I_{p_m}), connectées au primaire du transformateur sont transformés, grâce à une transformation de Park en deux courants I_d et I_q dans le repère d,q . Un contrôleur à action proportionnelle-intégrale reçoit en entrée les deux courants mesurés I_d , I_q ainsi qu'une référence I_{dref} et une référence I_{qref} . En sortie, on obtient les deux tensions de référence V_{dref} et V_{qref} . Un module appliquant une transformée de Park permet de convertir ces deux tensions de référence en trois tensions d'amplitude V_i à appliquer aux trois phases de sortie. Ce module reçoit également en entrée un angle de déphasage issu de la fréquence statorique appliquée selon un profil défini, tel que par exemple l'un de ceux décrits ci-dessous. Dans cette régulation, on peut choisir la référence I_{dref} égale au module du courant et la référence I_{qref} à une valeur nulle.
15
20
25

30

La séquence d'identification consiste ensuite à acquérir, pour chaque point de fonctionnement ω_{st_i} en fréquence, le courant I_{p_i} et/ou la tension V_{p_i} au primaire du transformateur et respectivement le courant I_{s_i} et/ou la tension V_{s_i} au secondaire du transformateur. Autrement dit, lorsque le courant I_{p_i} est acquis au primaire, le courant

is_i au secondaire doit être acquis. De même, lorsque la tension Vp_i est acquise au primaire, la tension Vs_i au secondaire doit être acquise. Le système peut aussi se baser à la fois sur les courants au primaire et au secondaire et sur les tensions au primaire et au secondaire pour définir la fonction de transfert du transformateur TR mais il faut
 5 comprendre qu'une seule des grandeurs (courant ou tension) suffit. Dans la suite de la description, on parlera d'acquisition en courant et/ou tension et il faut comprendre que l'acquisition du courant et/ou de la tension au primaire du transformateur implique forcément de manière respective l'acquisition du courant et/ou de la tension au secondaire.

10 Le système de commande comporte des premiers moyens d'acquisition du courant et/ou de la tension au primaire du transformateur et des seconds moyens d'acquisition du courant et/ou de la tension au secondaire du transformateur.

Les premiers moyens d'acquisition peuvent comporter des capteurs Sp de mesure de courant et/ou de tension placés au primaire du transformateur TR.

15 Les seconds moyens d'acquisition peuvent comporter des capteurs Ss de mesure de courant et/ou de tension placés au secondaire du transformateur TR.

Les premiers moyens d'acquisition peuvent comporter un premier module d'acquisition M20 exécuté par l'unité de traitement et de commande UC pour acquérir les données de courant Ip_i et/ou les données de tension Vp_i mesurées au primaire du transformateur pour chaque point de fonctionnement en fréquence ω_{st_i} .
 20

Les seconds moyens d'acquisition peuvent comporter un deuxième module d'acquisition M21 exécuté par l'unité de traitement et de commande UC pour acquérir de manière respective les données de courant Is_i et/ou les données de tension Vs_i mesurées au secondaire du transformateur TR pour chaque point de fonctionnement en fréquence ω_{st_i} .
 25

Le premier module d'acquisition M20 et le deuxième module d'acquisition M21 sont connectés à chaque capteur de mesure en vue de récupérer les données de mesure de courant et/ou les données de mesure de tension.

Le premier module d'acquisition et le deuxième module d'acquisition sont
 30 synchronisés de manière à faire coïncider à chaque instant d'acquisition, les données de courant acquises au primaire avec les données de courant acquises au secondaire du transformateur pour chaque point de fonctionnement en fréquence.

Le premier module d'acquisition et le deuxième module d'acquisition sont synchronisés de manière à faire coïncider en temps, les données de tension acquises au primaire avec les données de tension acquises au secondaire du transformateur pour chaque point de fonctionnement en fréquence.

5 Les premiers moyens d'acquisition peuvent être ceux déjà employés par le variateur de vitesse SD pour mettre en œuvre sa loi de commande LC du moteur électrique.

Les seconds moyens d'acquisition peuvent comporter une carte électronique externe connectée à l'unité de traitement et de commande UC.

10 Les capteurs de courant et/ou de tension placés au secondaire du transformateur ainsi que la carte électronique externe peuvent être employés uniquement pour la mise en œuvre de la séquence d'identification et retirés par la suite lors du démarrage du moteur électrique et lors du fonctionnement normal de l'installation.

Pour chaque point de fonctionnement en fréquence, le module d'identification
15 M1 lance une étape d'acquisition des données de courant et/ou de tension par l'exécution du premier module d'acquisition M20 et du deuxième module d'acquisition M21 définis ci-dessus.

A l'issue de l'étape d'acquisition, l'unité de traitement et de commande UC dispose ainsi d'une table de données mettant en correspondance chaque valeur de
20 fréquence statorique de référence et une valeur de courant I_{p_i} et/ou de tension V_{p_i} au primaire et une valeur de courant I_{s_i} et/ou de tension V_{s_i} au secondaire.

A partir de ces données, l'unité de traitement et de commande UC exécute un module d'analyse M3 des données en courant et/ou en tension acquises au primaire et
25 au secondaire pour chaque point de fonctionnement en fréquence ω_{st_i} afin de déterminer pour chaque point de fonctionnement en fréquence un gain k_i et/ou un déphasage φ_i , représentatifs d'un transfert en courant et/ou tension réalisé par le transformateur. Ces données représentent plus précisément l'inverse de la fonction de transfert (gain et/ou déphasage) du transformateur. Ces données sont enregistrées par l'unité de traitement et de commande UC dans ses moyens de mémorisation. Le principe
30 est illustré par la figure 4 annexée.

Le module d'analyse M3 est ensuite configuré pour générer un module de transfert M4 destiné à être exécuté par l'unité de traitement et de commande UC et configuré pour assurer le transfert d'un courant et/ou d'une tension à appliquer au primaire du transformateur en un courant et/ou une tension présente au secondaire, en

tenant compte de la fréquence statorique et des valeurs de gain et/ou de déphasage mémorisés à l'issue de la séquence d'identification.

5 Ce module de transfert M4 est employé pour créer une séquence de démarrage spécifique du moteur électrique. Le module de transfert peut se présenter sous différentes formes :

- Il peut s'agir d'une table de correspondance entre les différentes données, à laquelle l'unité de traitement et de commande peut se référer lors de la génération d'une séquence de démarrage d'un moteur électrique ;
- Il peut s'agir de la fonction inverse du transfert du transformateur pour l'appliquer lors de la séquence de démarrage.

10 Si on ne considère que le gain du transformateur, la fonction de transfert prend la forme d'une fonction $G(\omega_{st}) = \text{Gain transformateur}$. La fonction inverse correspondra ainsi à $k = 1/G(\omega_{st})$.

15 Le module de transfert M4 peut être exécuté :

- En ligne pendant le déroulement d'une séquence de démarrage du moteur électrique, chaque courant de référence de la trajectoire étant corrigé par le module de transfert, ou
- Hors ligne, c'est-à-dire préalablement à une séquence de démarrage du moteur électrique, pour calculer dans sa totalité une nouvelle séquence de démarrage qui sera mémorisée et employée à chaque nouveau démarrage du moteur électrique.

20 Ce module de transfert M4 permet de générer la trajectoire de courant de référence qui est adaptée pour démarrer le moteur électrique, tout en protégeant le moteur électrique et le transformateur.

En référence aux figures 7A et 7B, une séquence de démarrage classique et connue d'un moteur électrique, telle que décrite dans la demande de brevet **EP2963802A1**, incorporée ici par référence, comporte les étapes principales suivantes :

30 Dans une première étape, la séquence de démarrage consiste à déterminer et appliquer un courant de référence I_{ref} (module M6). Ce courant de référence I_{ref} est choisi à une valeur supérieure à une première valeur seuil, correspondant au minimum

de courant à appliquer pour faire tourner le moteur électrique synchrone, c'est-à-dire correspondant au minimum du courant de charge. La figure 7A représente la trajectoire du courant de référence I_{ref} appliqué en entrée. Sur cette figure 7A, on peut voir une rampe de montée en courant jusqu'à une valeur $V1$ qui est choisie supérieure à ladite première valeur seuil ($S1$). Le courant de référence I_{ref} est ensuite maintenue à la valeur $V1$ ($S2$). Préférentiellement, comme représenté sur la figure 7A, la valeur $V1$ atteinte est choisie constante et le courant est maintenu à cette valeur pendant toute la séquence de démarrage.

Dans une deuxième étape, l'unité de commande UC applique une trajectoire de fréquence statorique ω_{st_ref} (module M7). La fréquence statorique ω_{st_ref} est choisie à une valeur la plus basse possible mais supérieure à une deuxième valeur seuil, synonyme de saturation du transformateur, comme expliqué par la démonstration ci-dessus. La figure 7B représente la trajectoire de la fréquence statorique ω_{st_ref} appliquée en entrée. Sur la figure 7B, la courbe grise représente la fréquence du rotor et donc la vitesse réelle du moteur électrique. Sur cette figure 7B, on peut voir que la fréquence statorique ω_{st_ref} est d'abord choisie nulle lors de la rampe de montée du courant puis elle suit une rampe de montée une fois que le courant de référence I_{ref} a atteint sa valeur constante. Ensuite la fréquence statorique ω_{st_ref} est préférentiellement stabilisée à sa valeur constante $V2$ choisie. Elle est stabilisée à cette valeur $V2$ jusqu'à la fin de la séquence de démarrage.

Comme lors du démarrage du moteur le rotor n'est pas aligné, la fréquence réelle du rotor ne suit pas la fréquence statorique ω_{st_ref} (figure 7B). L'unité de commande maintient alors la commande en courant et en fréquence pendant un temps défini (temps au moins supérieur à l'inverse de la fréquence statorique) afin de garantir la rotation du moteur (donc que la vitesse moteur soit égale à la vitesse de référence).

Une fois le rotor accroché, l'unité de commande connaît la fréquence du moteur, celle-ci étant égale à la fréquence de la tension délivrée par le variateur de vitesse, ainsi qu'une estimation de l'angle θ du rotor.

L'unité de commande commute alors la commande du moteur électrique synchrone vers la loi de commande principale LC.

Cette séquence de démarrage classique est mise en œuvre en tenant compte d'un gain fixe pour le transformateur. Le module de transfert déterminé par le procédé de commande décrit ci-dessus permet de corriger cette séquence de démarrage afin de

l'adapter à l'installation et notamment aux caractéristiques réelles de gain et/ou de déphasage engendrées par la présence du transformateur.

Comme déjà décrit ci-dessus, cette séquence de démarrage classique peut s'avérer inefficace en cas d'inertie importante au niveau du moteur électrique.

5 Le module de transfert M4 déterminé ci-dessus permet donc de corriger la séquence.

Les figures 8A et 8B illustrent ainsi la nouvelle séquence de démarrage d'un moteur électrique obtenue après application du module de transfert M4 déterminé préalablement. On peut voir sur ces figures que le courant de référence I_{ref} suit une trajectoire différente de la trajectoire classique, celle-ci ayant été modifiée par le module de transfert M4 pour tenir compte des caractéristiques du transformateur connecté sur la sortie et déjà identifié. Pour déterminer cette nouvelle trajectoire, le module de transfert M4 est configuré pour :

- 15 - Recevoir en entrée chaque valeur de courant I_{ref} de la trajectoire de courant classique ;
- Appliquer à chaque valeur de courant I_{ref} reçue un transfert en tenant compte d'un gain k_i et/ou d'un déphasage ϕ_i ;
- Générer (en ligne ou hors-ligne) la nouvelle trajectoire de courant de référence.

20 Pendant l'application de la nouvelle trajectoire de courant, la trajectoire de fréquence reste identique à celle de la séquence classique.

Sur la figure 8A, on peut voir que le courant suit une trajectoire qui comporte une première rampe allant jusqu'à une valeur V_3 correspondant à la valeur maximale du courant au primaire afin de protéger le variateur et le transformateur. Cette valeur est supérieure à la valeur V_1 définie précédemment. Le courant reste donc égal à la valeur V_3 tant que le module de transfert M4 génère une référence de courant supérieure à la valeur V_3 . Le courant suit ensuite une courbe descendante pour atteindre la valeur V_1 . Elle comporte alors un palier à la valeur V_1 .

30 Sur la figure 8B, la courbe grise représente la fréquence du rotor et donc la vitesse réelle du moteur électrique. On peut voir que la nouvelle trajectoire de courant appliquée permet de faire en sorte de faire converger la vitesse réelle vers la vitesse de référence.

On comprend que la solution de l'invention présente de nombreux avantages, parmi lesquels :

- 5 - L'identification des caractéristiques du transformateur permet de corriger la séquence de démarrage, assurant ainsi le démarrage du moteur électrique quel que soit le niveau d'inertie ;
- La séquence d'identification est simple à mettre en œuvre et automatique ;
- Le procédé de commande peut s'adapter à l'application connectée sur la sortie du variateur de vitesse ;
- 10 - La solution proposée évite l'ajout de capteurs supplémentaires côté moteur lors de la commande du moteur électrique ; L'ajout de capteurs supplémentaires est nécessaire uniquement lors de la séquence d'identification du transformateur.

REVENDEICATIONS

1. Procédé de commande d'un moteur électrique (M), mis en œuvre dans un variateur de vitesse (SD), ledit variateur de vitesse (SD) étant connecté au moteur électrique à travers un transformateur (TR) qui comporte un primaire et un secondaire, ledit primaire du transformateur étant connecté à des phases de sortie du variateur de vitesse et ledit secondaire du transformateur étant connecté audit moteur électrique, caractérisé en ce qu'il consiste à :
- Exécuter une séquence d'identification du transformateur (TR) pour déterminer au moins des données de gain (k_i) représentatives d'un transfert réalisé par le transformateur (TR) ;
 - Générer un module de transfert (M4) à partir desdites données de gain déterminées ;
 - Déterminer une séquence de démarrage du moteur électrique (M) à mettre en œuvre par le variateur de vitesse (SD) en exécutant ledit module de transfert (M4) sur une trajectoire de courant de référence.
2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que ladite séquence d'identification comporte :
- Une génération d'un profil de tension comprenant une fréquence variable de manière à définir plusieurs points de fonctionnement en fréquence (ω_{st_i}) successifs ;
 - Pour chaque point de fonctionnement en fréquence (ω_{st_i}), une première acquisition du courant (I_{p_i}) et/ou de la tension (V_{p_i}) au primaire du transformateur et une deuxième acquisition respectivement du courant (I_{s_i}) et/ou de la tension (V_{s_i}) au secondaire du transformateur ;
 - Une détermination du gain entre le primaire et le secondaire du transformateur pour chaque point de fonctionnement en fréquence.
3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que le profil de tension comporte une amplitude fixe.
4. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que le profil de tension comporte une amplitude variable, obtenue par une boucle de régulation de courant.
5. Procédé selon l'une des revendications 2 à 4, caractérisé en ce que les points de fonctionnement en fréquence (ω_{st_i}) sont définis chacun par un palier en fréquence distinct d'un profil de fréquence présentant plusieurs paliers successifs.

6. Procédé selon l'une des revendications 2 à 4, caractérisé en ce que les points de fonctionnement en fréquence (ω_{st_i}) sont définis chacun sur une rampe de variation linéaire en fréquence.

5 7. Procédé selon l'une des revendications 2 à 6, caractérisé en ce que ladite première acquisition est réalisée par mesure du courant et/ou de la tension au primaire du transformateur.

8. Procédé selon l'une des revendications 2 à 6, caractérisé en ce que ladite deuxième acquisition est réalisée par mesure du courant et/ou de la tension au secondaire du transformateur.

10 9. Procédé selon l'une des revendications 1 à 8, caractérisé en ce que la génération du module de transfert (M4) consiste à déterminer une fonction inverse d'une fonction de transfert du transformateur ou à créer une table de correspondance.

15 10. Procédé selon l'une des revendications 1 à 9, caractérisé en ce que ladite séquence d'identification est exécutée pour déterminer également des données de déphasage (ϕ) représentatives du transfert réalisé par le transformateur.

20 11. Système de commande d'un moteur électrique, ledit moteur électrique étant commandé par un variateur de vitesse, ledit variateur de vitesse étant connecté au moteur électrique à travers un transformateur qui comporte un primaire et un secondaire, ledit primaire du transformateur étant connecté à des phases de sortie du variateur de vitesse et ledit secondaire du transformateur étant connecté audit moteur électrique, ledit système de commande comportant une unité de traitement et de commande (UC) et étant caractérisé en ce qu'il comporte :

- 25
- Un module d'identification (M1) du transformateur configuré pour être exécuté par l'unité de traitement et de commande (UC) pour déterminer des données de gain (k_i) représentatives d'un transfert réalisé par le transformateur ;
 - Un module d'analyse (M3) configuré pour générer un module de transfert (M4) à partir desdites données de gain (k_i) déterminées ;
 - 30 - Ledit module de transfert (M4) étant configuré pour être exécuté sur une trajectoire de courant de référence pour déterminer une séquence de démarrage du moteur électrique à mettre en œuvre par le variateur de vitesse.

35 12. Système selon la revendication 11, caractérisé en ce que le module d'identification (M1) comporte un module de génération d'un profil de tension

comprenant une fréquence variable de manière à définir plusieurs points de fonctionnement en fréquence (ω_{st_i}) successifs.

5 13. Système selon la revendication 12, caractérisé en ce qu'il comporte un premier module d'acquisition (M20), pour chaque point de fonctionnement en fréquence, du courant et/ou de la tension au primaire du transformateur et un deuxième module d'acquisition (M21) respectivement du courant et/ou de la tension au secondaire du transformateur.

10 14. Système selon la revendication 12 ou 13, caractérisé en ce que le module d'analyse (M3) est configuré pour déterminer un gain (k_i) entre le primaire et le secondaire du transformateur pour chaque point de fonctionnement en fréquence.

15 15. Système selon la revendication 12, caractérisé en ce que le profil de tension comporte une amplitude fixe.

16 16. Système selon la revendication 12, caractérisé en ce que le profil de tension comporte une amplitude variable, obtenue par une boucle de régulation de courant.

17 17. Système selon l'une des revendications 12 à 16, caractérisé en ce que les points de fonctionnement en fréquence (ω_{st_i}) sont définis chacun par un palier en fréquence distinct d'un profil de fréquence présentant plusieurs paliers successifs.

20 18. Système selon l'une des revendications 12 à 16, caractérisé en ce que les points de fonctionnement en fréquence (ω_{st_i}) sont définis chacun sur une rampe de variation linéaire en fréquence.

25 19. Système selon l'une des revendications 11 à 18, caractérisé en ce que le module de transfert comporte une fonction de transfert ou une table de correspondance.

30 20. Système selon l'une des revendications 11 à 19, caractérisé en ce que le module d'identification est configuré pour déterminer également des données de déphasage (φ_i) représentatives du transfert réalisé par le transformateur.

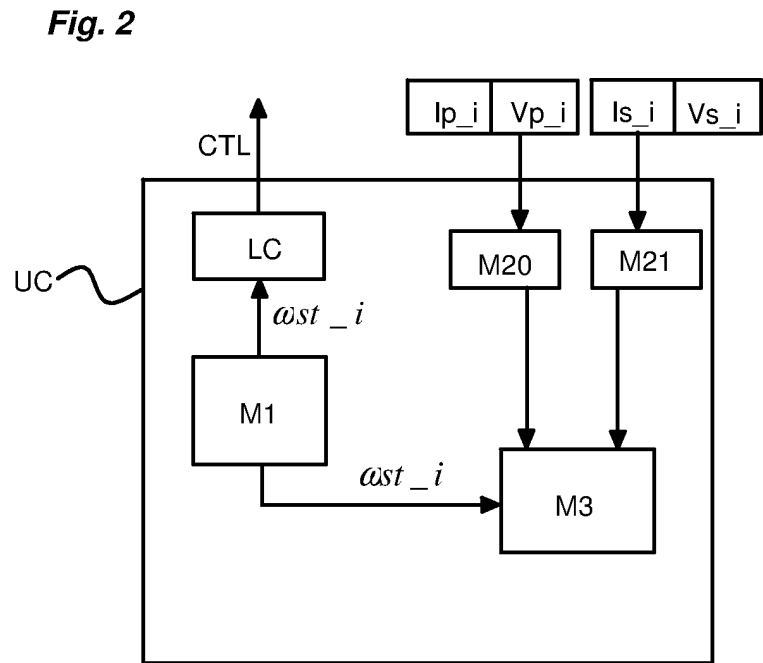
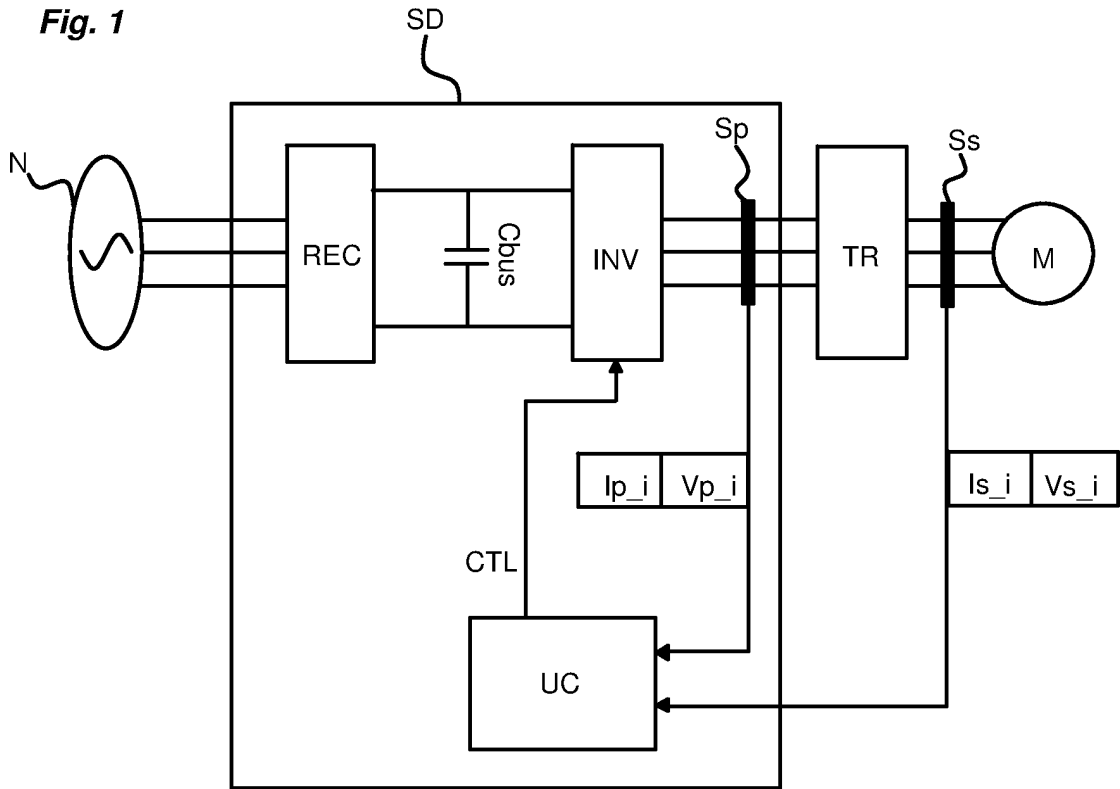


Fig. 3A

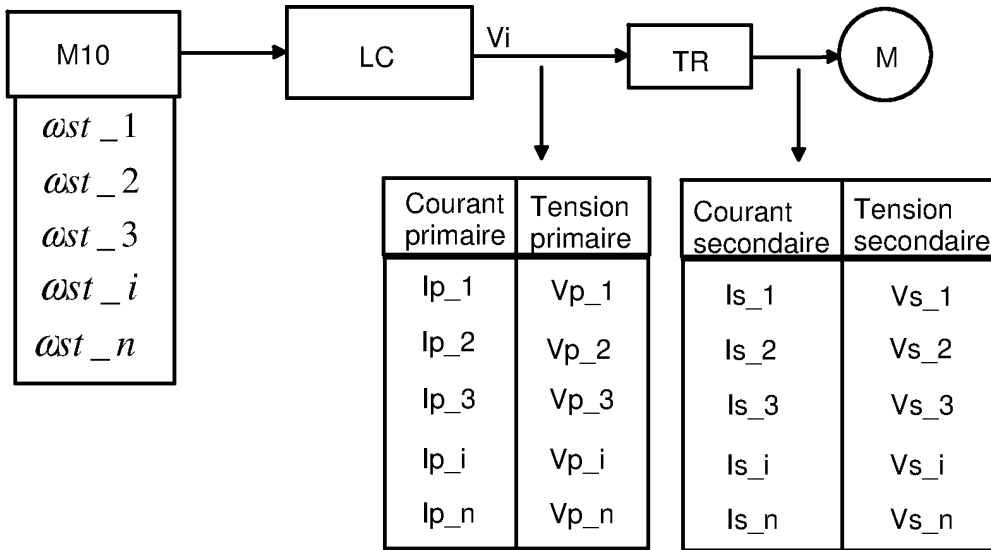


Fig. 3B

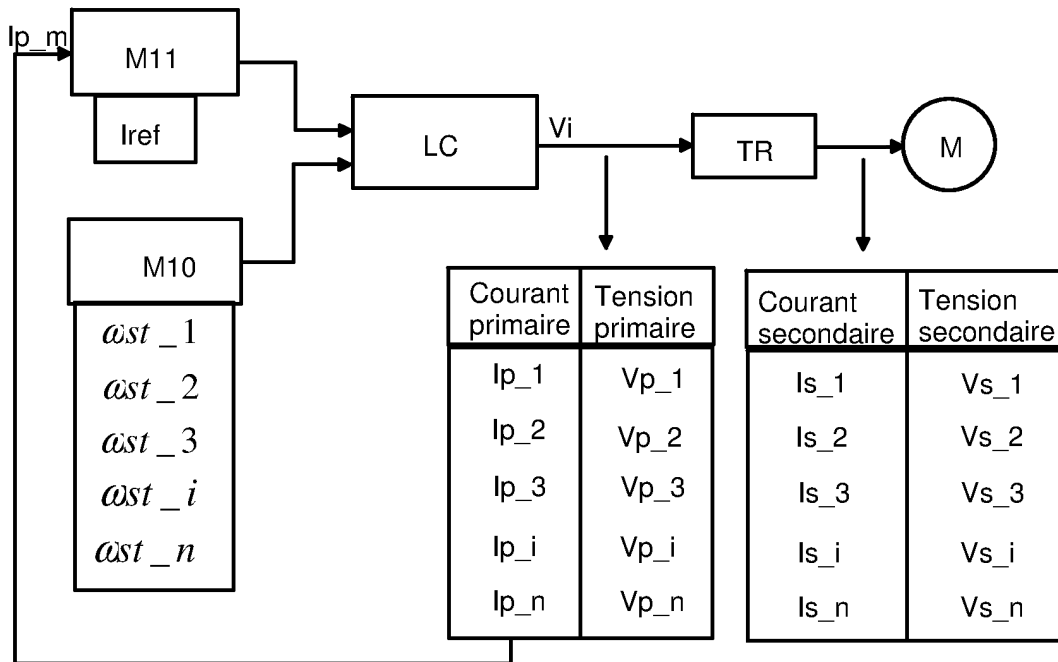


Fig. 3C

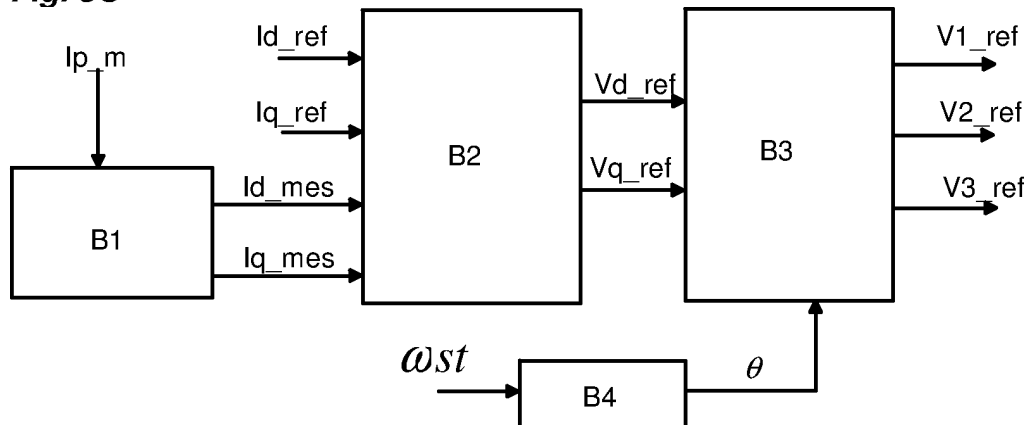


Fig. 4

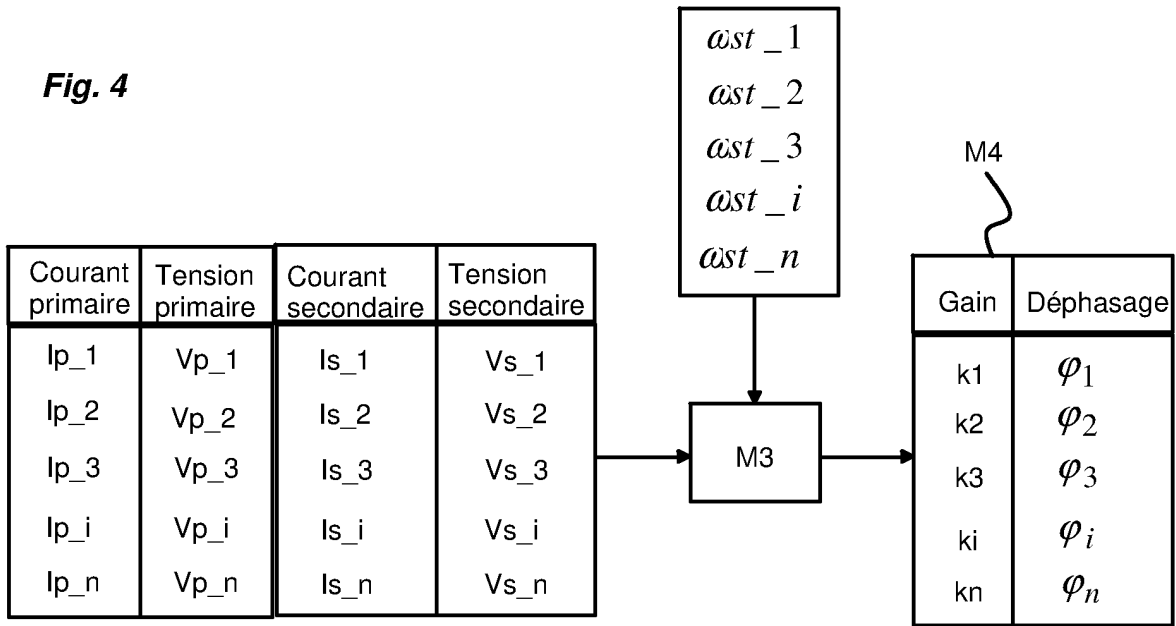


Fig. 5

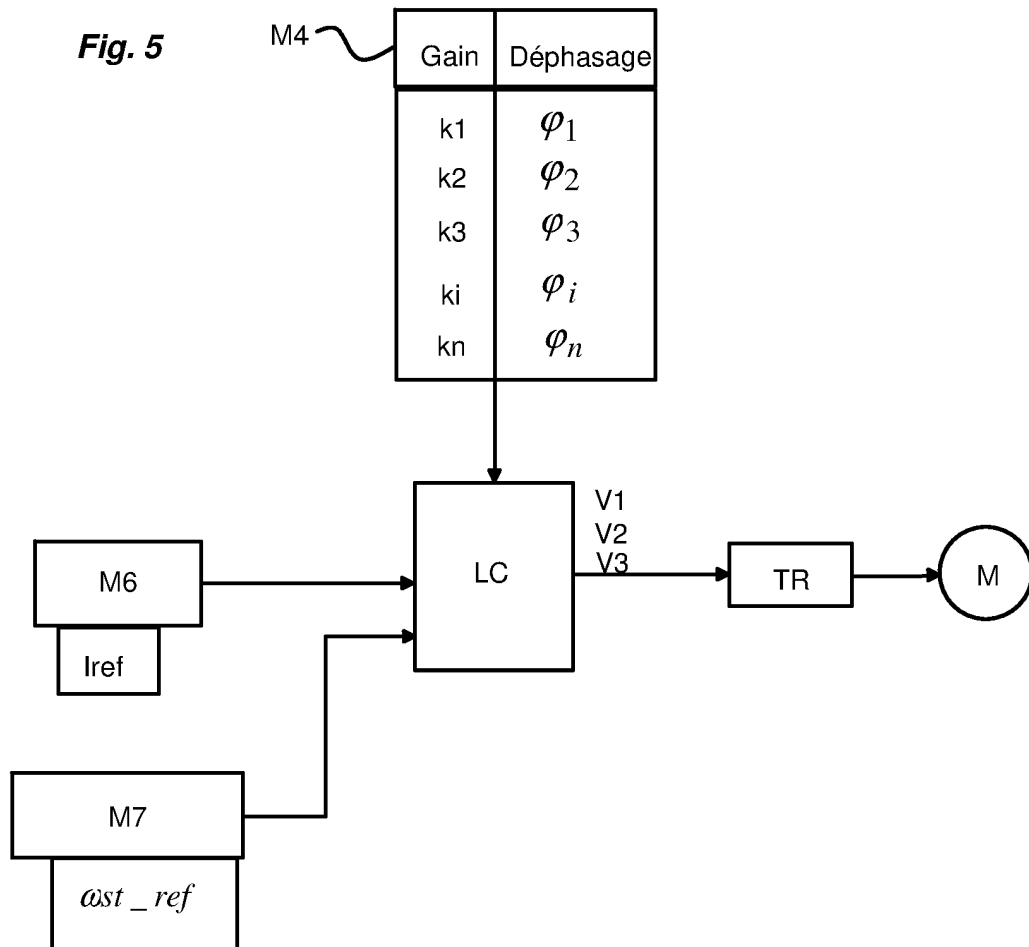


Fig. 6A

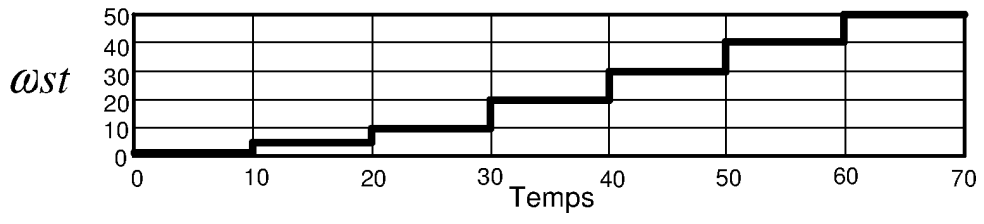


Fig. 6B

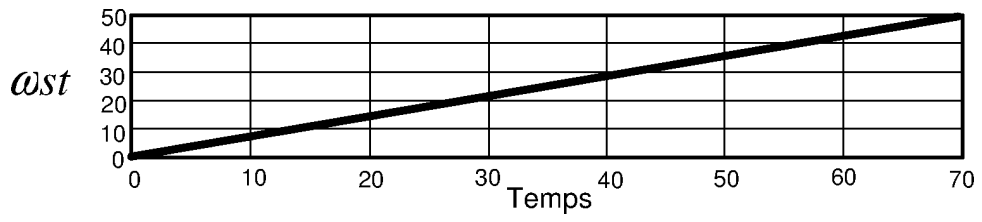


Fig. 7A

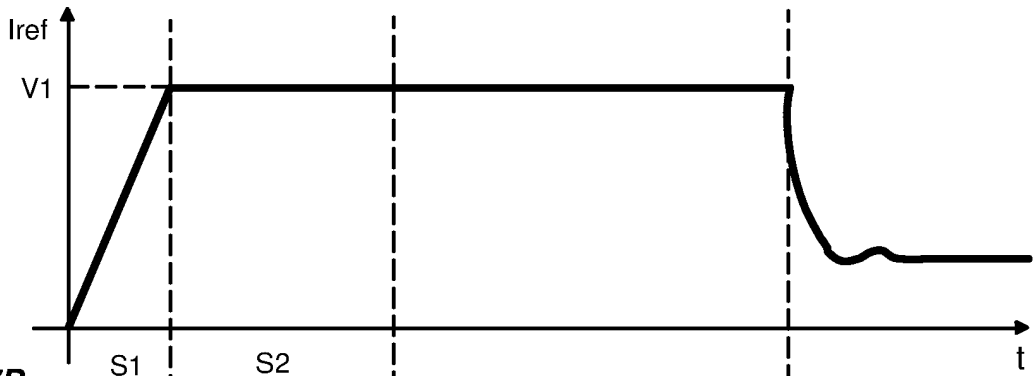


Fig. 7B

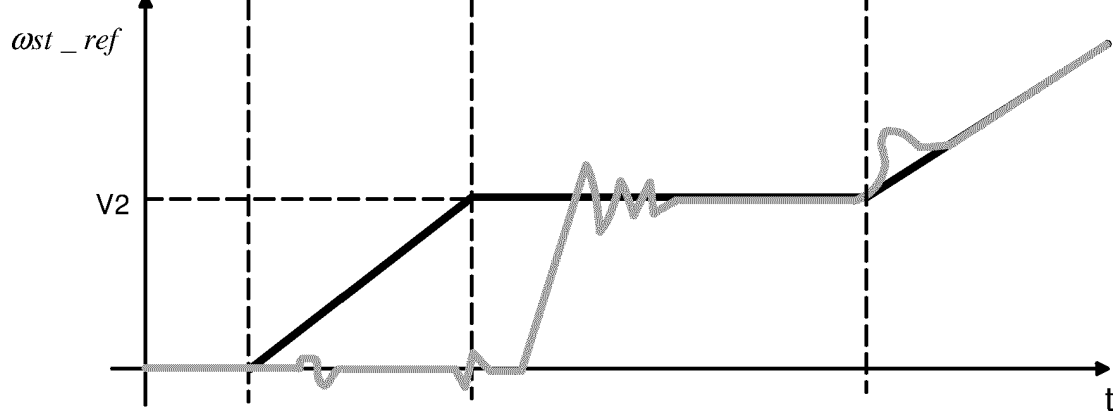


Fig. 8A

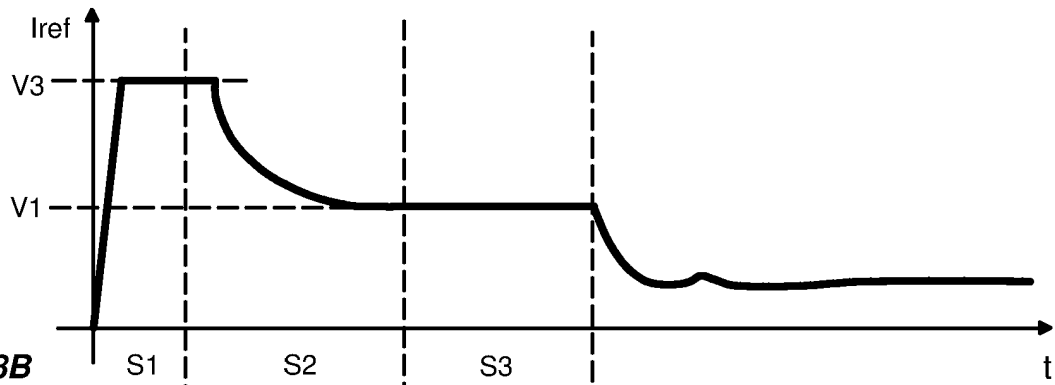
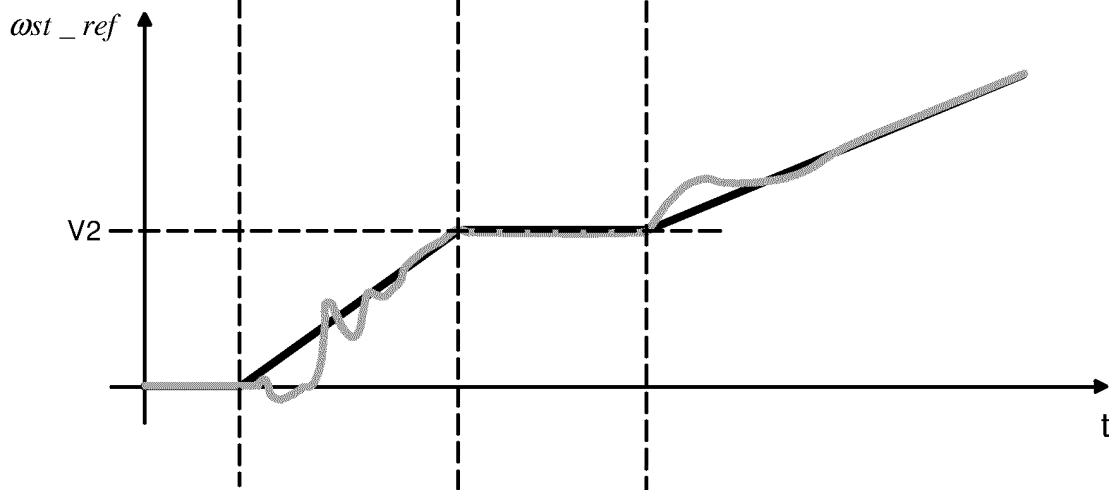


Fig. 8B



RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

US 2015/002059 A1 (LIU JINGBO [US] ET AL) 1 janvier 2015 (2015-01-01)

EP 2 963 802 A1 (SCHNEIDER TOSHIBA INVERTER [FR]) 6 janvier 2016 (2016-01-06)

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

NEANT

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES

NEANT