

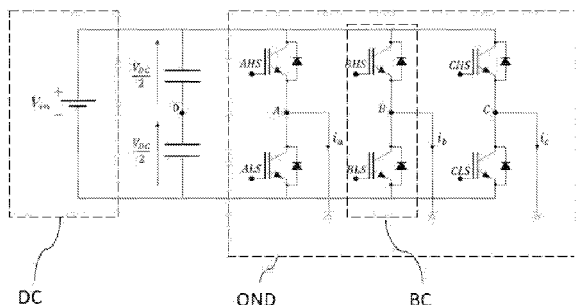
12 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

22 Date de dépôt : 08.11.23.	71 Demandeur(s) : IFP Energies nouvelles Etablissement public — FR.
30 Priorité :	
43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 09.05.25 Bulletin 25/19.	72 Inventeur(s) : BARBIERATO Gianluca et VIDAL-NAQUET Fabien.
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 :	73 Titulaire(s) : IFP Energies nouvelles Etablissement public.
○ Demande(s) d'extension :	54 Mandataire(s) commande d'une machine électrique avec correction de la consigne de tension. 57 La présente invention concerne un procédé de com-

mande d'une machine électrique au moyen d'une modulation de largeur d'impulsion à partir d'une consigne de tension. Pour ce procédé, on corrige la consigne de tension, lorsque la consigne de tension est partiellement saturée lors d'une

période de modulation. Puis, on détermine la consigne de commutation à la consigne de tension corrigée, cette consigne de commutation étant ensuite appliquée aux commutateurs des bras de l'onduleur.

Figure 1 à publier



Description

Titre de l'invention : Procédé de commande d'une machine électrique avec correction de la consigne de tension

Domaine technique

- [0001] La présente invention concerne le domaine de la commande d'une machine électrique tournante, de préférence une machine électrique synchrone, par exemple du type synchro-réductante ou synchrone à aimants permanents.
- [0002] Il est connu d'avoir recours à des machines électriques tournantes telles que des machines électriques synchrones à aimants permanents ou des machines synchro-réductantes, en particulier des machines synchro-réductantes assistées d'aimants permanents. De telles machines électriques sont, par exemple, utilisées dans le domaine de la propulsion, par exemple pour la génération de couples moteurs à bord d'un véhicule tel qu'un véhicule automobile. Elles peuvent être également utilisées dans les applications stationnaires.
- [0003] Le document FR 3 051 296 A1 décrit, par exemple, une machine synchro-réductante assistée d'aimants permanents.
- [0004] La puissance maximale des moteurs triphasés est limitée par la contrainte de courant et celle en tension. Pour les machines électriques pilotées par un onduleur source de tension, la contrainte de courant est donnée par le courant maximum pouvant circuler dans les phases de l'onduleur ou du moteur, alors que la contrainte de tension est donnée par la tension d'alimentation DC de l'onduleur. Pour maximiser la puissance atteignable, l'onduleur doit exploiter pleinement la tension DC disponible et ainsi permettre d'appliquer des commandes de tensions de phases maximales.
- [0005] La figure 1 illustre, schématiquement et de manière non limitative, un système d'alimentation d'une machine électrique (non représentée) comportant trois phases A, B et C. Le système d'alimentation comprend un onduleur OND comportant trois bras de commutation BC, chaque bras comprenant deux commutateurs (AHS, ALS, BHS, BLS, CHS, CLS) et une sortie (A, B et C), chaque sortie étant traversée par un courant i_a , i_b , i_c . L'onduleur OND est alimenté par une source de tension continue DC, de valeur notée V_{in} . Des condensateurs sont placés en parallèle des bras de commutation, chacun avec une tension continue de $\frac{V_{DC}}{2}$.
- [0006] Si on considère l'onduleur source de tension, la tension de phase appliquée a la forme d'ondes rectangulaires d'amplitude pic à pic égale à V_{DC} .
- [0007] Cependant, l'opération de l'onduleur à la tension de commande maximale, ou proche de cette dernière, présente un certain nombre d'inconvénients, comme l'augmentation du taux de distorsion harmonique (THD) des courants, ou celle du couple d'ondulation

(de l'anglais « ripple »), et impacte également la dynamique du système en transitoire de charge. De plus, à haute vitesse, les algorithmes de contrôle classiques ne parviennent en général pas à contrôler correctement la tension appliquée, en raison de l'apparition d'harmoniques de basse fréquence qui peuvent rendre le contrôle instable.

[0008] Idéalement, les tensions appliquées à une machine électrique triphasée seraient trois tensions sinusoïdales déphasées respectivement de 0° , 120° et 240° . Cependant, par sa nature discrète, l'onduleur de tension ne peut qu'appliquer des tensions en créneaux oscillants.

[0009] La Modulation de largeur d'impulsion (MLI de l'anglais « Pulse Width Modulation » PWM) repose sur l'idée qu'une sinusoïde (en l'occurrence de tension de commande d'une machine électrique) peut être « découpée » en une suite de valeurs constantes. En effet, la méthode MLI est la méthode classique pour obtenir une tension sinusoïdale en sortie de l'onduleur, pour une tension continue donnée en entrée de l'onduleur. L'idée est d'appliquer la consigne de tension souhaitée en moyenne sur une période temps prédéfinie appelée période de découpage, à partir de pulses d'amplitude de tension continue mais de largeur proportionnelle à la consigne de tension souhaitée.

[0010] Par ce procédé MLI, la tension de référence est mise à jour à chaque période de modulation et prend la valeur de la tension de commande souhaitée idéale au milieu de la période de modulation. Tant que les valeurs de consigne de tension sont comprises entre $\frac{-V_{dc}}{2}$ et $\frac{+V_{dc}}{2}$ (correspondant respectivement à la tension de saturation minimale et à la tension de saturation maximale), la consigne de tension peut être appliquée en moyenne en sortie de l'onduleur. Cette zone de fonctionnement est nommée zone de fonctionnement linéaire de l'onduleur.

[0011] La figure 2 illustre le rapport V_a/V_{dc} de la tension d'une phase a V_a par la tension de la source continue V_{dc} par rapport à l'angle électrique de la machine électrique θ_e en $^\circ$. En ordonnées, les valeurs (non indiquées) de -0,5 et +0,5 correspondent aux tensions de saturation (en effet, cela correspond alors respectivement à $\frac{-V_{dc}}{2}$ et $\frac{+V_{dc}}{2}$). Sur ce graphe, on représente la courbe de la consigne de tension V_{ref} et la tension discrétisée V_{dis} par le procédé MLI pour la phase a de la machine électrique. La période de modulation est notée T_{PWM} , le point milieu de cette période est indiqué par le point P. Pour l'exemple illustré, la courbe de la consigne de tension V_{ref} reste inférieure à 0,5 : il n'y a donc pas de saturation sur cette période de modulation. Sur une période de modulation T_{PWM} , la moyenne idéale de la consigne de tension correspond à la consigne de tension lorsque les aires hachurées '+' et '-' sont les mêmes. L'approximation est acceptable si la consigne de tension idéale est proche d'une ligne droite (ce qui est favorisé sur une période de modulation T_{PWM} courte).

[0012]

$-\frac{V_{DC}}{2} : +\frac{V_{DC}}{2}$, la tension de commande est saturée à $-\frac{V_{DC}}{2}$ ou $+\frac{V_{DC}}{2}$. Cette zone de fonctionnement est nommée zone de fonctionnement non linéaire, ou zone de surmodulation, et cause ainsi deux types d'erreurs sur la tension appliquée :

1. Une erreur due à la saturation : le fondamental de la tension de commande appliquée est diminué.
2. Une erreur due à la discrétisation temporelle liée à la modulation. Comme la saturation de la commande crée une discontinuité de la trajectoire quasi-linéaire normalement observée, on ne peut plus approximer correctement la consigne de tension par une ligne droite, et donc une erreur de tension est générée. De plus, cette erreur dépend de l'instant de début de la période de modulation T_{PWM} par rapport à la commande idéale. En conséquence, la forme générale de la consigne de tension V_{ref} est susceptible de changer d'une période électrique T_{elec} à l'autre, ce qui induit alors des harmoniques de basse fréquence sur la tension de commande.

[0013] La figure 3 est un graphe similaire à la figure 2 pour lequel la consigne de tension V_{ref} dépasse la valeur de saturation (0,5) à proximité du point milieu P. Sur cette figure, on illustre en outre la tension idéale V_{ide} pour obtenir la consigne de tension. Cette situation crée une saturation de la consigne de tension et une erreur de tension.

[0014] La figure 4 est un graphe similaire à la figure 2 pour lequel la consigne de tension V_{ref} dépasse la valeur de saturation (0,5) au début de la période de modulation. Sur cette figure, on illustre en outre la tension idéale V_{ide} pour obtenir la consigne de tension. Cette situation génère une saturation de la consigne de tension mais ne crée aucune erreur de tension due à la discrétisation. Toutefois, une erreur due à la saturation est générée.

[0015] Le problème est encore bien plus prégnant si la consigne de tension V_{ref} et la tension idéale (c'est-à-dire la tension s'il n'y avait pas de saturation) sont complètement saturées ; la tension appliquée est alors une onde carrée, connue sous le nom de « pleine onde ». Dans cette situation, une légère différence de phasage entre l'instant d'échantillonnage et l'instant de bascule d'une saturation à l'autre de V_{ref} crée une erreur de tension qui change de signe. Les figures 5 et 6 sont des graphes similaires à la figure illustrant cette situation dans deux cas de figures. Pour la [Fig.5], la bascule est réalisée avant le point milieu P, alors que pour la [Fig.6], la bascule est réalisée après le point milieu P. Ces situations créent alors des erreurs de tension illustrées par les zones hachurées « + » et « - ».

Technique antérieure

[0016] Pour résoudre ces différentes problématiques, plusieurs solutions techniques ont été

proposées.

[0017] Par exemple, la demande de brevet US2012/0169263 décrit une méthode pour ajuster le rapport cyclique d'une méthode de modulation de largeur d'impulsion d'une méthode à vecteur spatial SVM (de l'anglais « Space Vector Modulation »), dans le but de réduire les erreurs dans les signaux de commande de tension, diminuant ainsi les oscillations de couple et de courant. Toutefois, la mise en œuvre de cette méthode est limitée à la méthode SVM, ce qui implique notamment une compensation commune pour toutes les phases de la machine électrique. En outre, l'ajustement du rapport cyclique dépend de constantes non connues, ce qui rend cette méthode difficile à mettre en œuvre.

[0018] De plus, la demande de brevet US2019/0097562 décrit une méthode de contrôle par modulation de largeur d'impulsion, dont le but est de lisser les transitions entre le mode de surmodulation et le mode MLI, en particulier pendant les opérations à haute vitesse de la machine électrique. Toutefois, la méthode décrite dans cette demande nécessite de nombreuses commutations. Ces nombreuses commutations génèrent des pertes importantes.

Résumé de l'invention

[0019] L'invention a pour but de commander une machine électrique, de manière simple, en limitant les erreurs de tension, les harmoniques, les ondulations de courant et de couple, ainsi que les pertes par commutation. Dans ce but, la présente invention concerne un procédé de commande d'une machine électrique au moyen d'une modulation de largeur d'impulsion à partir d'une consigne de tension. Pour ce procédé, on corrige la consigne de tension, lorsque la consigne de tension est partiellement saturée lors d'une période de modulation. Puis, on détermine la consigne de commutation à la consigne de tension corrigée, cette consigne de commutation étant ensuite appliquée aux commutateurs des bras de l'onduleur. La correction de la consigne de tension permet de réduire les erreurs de tension en zone de surmodulation et en zone de pleine onde de fonctionnement de la machine électrique.

[0020] En outre, l'invention concerne un système de commande mettant en œuvre un tel procédé de commande.

[0021] L'invention concerne un procédé de commande d'une machine électrique au moyen d'une modulation de largeur d'impulsion à partir d'une consigne de tension des phases de ladite machine électrique, ladite machine électrique étant pilotée par un onduleur pourvu d'une pluralité de bras de commutation et alimenté par une source de tension continue. Pour ce procédé, on met en œuvre les étapes suivantes :

- a. On détecte au moins une période de modulation pour laquelle ladite consigne de tension est non entièrement saturée à une unique tension par la tension de

- la source de tension continue sur ladite période de modulation, et on détecte l'instant de variation de la saturation de ladite consigne de tension ;
- b. On applique, pour chaque période de modulation détectée, une correction de ladite consigne de tension, de telle sorte que la consigne de tension corrigée soit la moyenne pondérée de la consigne de tension de deux intervalles de temps séparée par ledit instant de variation de la saturation sur la période de modulation ;
 - c. On détermine un signal de commutation pour chaque bras de commutation dudit onduleur en fonction de ladite consigne de tension corrigée ; et
 - d. On commande chaque bras de commutation dudit onduleur par application de ladite consigne de commutation déterminée.
- [0022] Selon un mode de réalisation, pour chaque période de modulation détectée, et lorsque ladite consigne de tension passe d'un premier état saturé à un deuxième état saturé ou lorsque que la consigne de tension est en surmodulation, on détermine une consigne de commutation, en réalisant l'intervalle de commutation à une extrémité de la période de modulation.
- [0023] Avantagement, on débute l'intervalle de commutation au début de la période de modulation lorsque la consigne de tension varie entre la saturation maximale et la saturation minimale.
- [0024] De manière avantageuse, on termine l'intervalle de commutation à la fin de la période de modulation lorsque la consigne de tension varie entre la saturation minimale et la saturation maximale.
- [0025] Conformément à une mise en œuvre, lorsque la consigne de tension varie d'une tension non saturée à une tension saturée, on détermine ladite consigne de tension corrigée au moyen de la formule suivante :
- $$V_{refCor} = \frac{V_{refT_{sat}} T_{sat} + V_{refT_{noSat}} T_{noSat}}{T_{PWM}} \text{ avec } V_{refCor} \text{ la consigne de tension corrigée,}$$
- T_{PWM} la période de modulation, $V_{refT_{sat}}$ la consigne de tension saturée pendant l'intervalle de temps saturé T_{sat} de la période de modulation, $V_{refT_{noSat}}$ la consigne de tension non saturée pendant l'intervalle de temps non saturé T_{noSat} de la période de modulation, l'intervalle de temps saturé étant séparé de l'intervalle de temps non saturé audit instant de variation de commutation.
- [0026] Selon un aspect, la consigne de tension non saturée est la moyenne de la consigne de tension pendant l'intervalle de temps non saturé de la période de modulation.
- [0027] En variante, lorsque la consigne de tension varie d'une première tension saturée à une deuxième tension saturée, on détermine ladite consigne de tension corrigée au moyen de la formule suivante :
- $$V_{refCor} = \frac{V_{refT_{sat1}} T_{sat1} + V_{refT_{sat2}} T_{sat2}}{T_{PWM}} \text{ avec } V_{refCor} \text{ la}$$

consigne de tension corrigée, T_{PWM} la période de modulation, $V_{refT_{sat1}}$ la consigne de tension saturée pendant le premier intervalle de temps de saturation T_{sat1} de la période de modulation, $V_{refT_{sat2}}$ la consigne de tension saturée pendant le deuxième intervalle de temps de saturation T_{sat2} de la période de modulation, le premier intervalle de temps de saturation étant séparé du deuxième intervalle de temps de saturation audit instant de variation de commutation.

[0028] De plus, l'invention concerne un système de commande d'une machine électrique comprenant un onduleur pourvu de bras de commutation, un calculateur et une mémoire configurés pour mettre en œuvre les étapes du procédé de commande selon l'une des caractéristiques précédentes.

[0029] Conformément à un mode de réalisation, ladite machine électrique est une machine synchro-réductante assistée par des aimants permanents ou une machine synchrone à aimants permanents.

[0030] D'autres caractéristiques et avantages du procédé et du système selon l'invention, apparaîtront à la lecture de la description ci-après d'exemples non limitatifs de réalisations, en se référant aux figures annexées et décrites ci-après.

Liste des figures

[0031] [Fig.1]

[0032] La [Fig.1], déjà décrite, illustre un onduleur selon une variante de réalisation.

[0033] [Fig.2]

[0034] La [Fig.2], déjà décrite, est un graphique illustrant la méthode MLI dans une zone linéaire.

[0035] [Fig.3]

[0036] La [Fig.3], déjà décrite, est un graphique illustrant la méthode MLI selon l'art antérieur dans une zone de surmodulation.

[0037] [Fig.4]

[0038] La [Fig.4], déjà décrite, est un graphique illustrant la méthode MLI selon l'art antérieur dans une zone de surmodulation.

[0039] [Fig.5]

[0040] La [Fig.5], déjà décrite, est un graphique illustrant la méthode MLI selon l'art antérieur dans une zone de « pleine onde ».

[0041] [Fig.6]

[0042] La [Fig.6], déjà décrite, est un graphique illustrant la méthode MLI selon l'art antérieur dans une zone de « pleine onde ».

[0043] [Fig.7]

[0044] La [Fig.7] est un graphique illustrant l'application du procédé selon un mode de réalisation de l'invention pour la situation de la [Fig.3].

- [0045] [Fig.8]
- [0046] La [Fig.8] est un graphique illustrant l'application du procédé selon un mode de réalisation de l'invention pour la situation de la [Fig.3].
- [0047] [Fig.9]
- [0048] La [Fig.9] est un graphique illustrant l'application du procédé selon un mode de réalisation de l'invention pour la situation de la [Fig.5].
- [0049] [Fig.10]
- [0050] La [Fig.10] est un graphique illustrant l'application du procédé selon un mode de réalisation de l'invention pour la situation de la [Fig.5].
- [0051] [Fig.11]
- [0052] La [Fig.11] est un graphique illustrant le signal de commutation pour l'exemple de la [Fig.10].
- [0053] [Fig.12]
- [0054] La [Fig.12] est un agrandissement de la [Fig.11].
- [0055] [Fig.13]
- [0056] La [Fig.13] est un graphique illustrant le signal de commutation corrigé selon un mode de réalisation de l'invention.
- [0057] [Fig.14]
- [0058] La [Fig.14] illustre la commande d'une machine électrique selon un mode de réalisation de l'invention.

Description des modes de réalisation

- [0059] Sur la [Fig.14] est représentée, schématiquement et de manière non limitative, une installation comprenant une machine électrique tournante MEL associée, pour sa commande, à un système de commande COM selon l'invention (le système de commande COM mettant en œuvre le procédé de commande selon l'invention). L'installation comporte également une source DC d'énergie électrique, telle qu'un bus de tension continue.
- [0060] La machine électrique tournante MEL est une machine tournante avec plusieurs phases, de préférence trois phases (alternativement la machine électrique peut comporter un nombre de phases multiple de trois, par exemple six, neuf ou douze, ou encore quatre ou cinq phases). Avantagusement, la machine électrique tournante MEL peut être une machine électrique synchrone. De préférence, la machine électrique synchrone MEL peut être une machine électrique synchrone à aimants permanents ou synchro-réductante, en particulier une machine tournante triphasée synchro-réductante assistée d'aimants permanents.
- [0061] Pour l'exemple illustré (non limitatif), la machine électrique synchrone MEL comporte trois entrées. Chaque entrée correspond à une phase d'un stator (non re-

présenté) de la machine électrique tournante MEL.

[0062] Le système de commande COM est destiné à piloter, au cours du temps, l'alimentation de la machine tournante MEL en fonction de valeurs cibles et/ou de valeurs mesurées de grandeurs prédéterminées. Ces valeurs cibles et/ou valeurs mesurées sont appelées dans la suite de la description variables de fonctionnement de la machine électrique. Pour le mode de réalisation illustré, le système de commande COM peut prendre en compte une consigne de couple C_{em}^* (qui peut provenir classiquement d'une demande de l'utilisateur de la machine électrique, alternativement cette consigne de couple peut être calculée par une régulation de vitesse), et/ou au moins une autre variable de fonctionnement VAF qui peut être une mesure ou une consigne. On appelle variable de fonctionnement de la machine électrique, une grandeur qui caractérise le fonctionnement de la machine électrique, il peut s'agir notamment d'une variable électrique, comme la tension, le courant, ou la puissance de la machine électrique, une variable mécanique comme la position, la vitesse ou l'accélération du rotor de la machine électrique, etc. Les variables de fonctionnement peuvent par exemple être la vitesse de rotation électrique ω_e du rotor (non représenté) de la machine électrique (alternativement cette variable peut aussi être la norme du flux magnétique dans les phases), l'amplitude de tension de la machine électrique, l'amplitude du courant de la machine électrique, une température de la machine électrique, etc. On rappelle que la vitesse de rotation électrique ω_e du rotor correspond à la multiplication de la vitesse de rotation mécanique ω_m du rotor par le nombre de paires de pôles de la machine électrique synchrone MEL. En d'autres termes, on peut écrire : $\omega_e = p \cdot \omega_m$ avec p le nombre de paires de pôles de la machine électrique synchrone MEL. Cette vitesse de rotation électrique permet de déterminer la fréquence électrique de la machine électrique.

[0063] Le système de commande COM comporte un onduleur OND et un calculateur CAL. Le système de commande COM peut utiliser si besoin un capteur CAP de position angulaire et/ou de vitesse de rotation angulaire du rotor de la machine électrique MEL. Un tel capteur permet de déterminer la vitesse de rotation angulaire ω_m de la machine électrique soit directement (cas d'un capteur de vitesse), soit par dérivation (cas du capteur de position). En outre, le système de commande COM peut comporter des moyens de mesure des courants (non représentés) dans les phases de la machine électrique, par exemple des capteurs de courant.

[0064] L'onduleur OND est configuré pour acheminer de l'énergie électrique entre la source DC et la machine électrique synchrone MEL. Plus précisément, l'onduleur OND est configuré pour acheminer de l'énergie électrique entre la source DC et chaque phase du stator de la machine électrique synchrone MEL. La source DC (par exemple une batterie) fournit une tension de bus continu, notée V_{DC} .

- [0065] L'onduleur OND comporte une première entrée reliée à la source DC, et trois sorties, chacune reliée à une phase correspondante du stator de la machine électrique synchrone MEL. L'onduleur OND comporte, en outre, une deuxième entrée électriquement reliée à une sortie du calculateur CAL, de sorte que l'onduleur OND est configuré pour acheminer de l'énergie électrique entre la source DC et la machine électrique synchrone MEL en fonction d'un signal de commande de commutation appliqué par le calculateur CAL à la deuxième entrée de l'onduleur OND.
- [0066] De préférence, le signal de commande de commutation peut être tel que l'onduleur OND achemine de l'énergie électrique depuis la source DC vers la machine électrique synchrone MEL de sorte que la machine électrique synchrone MEL présente un fonctionnement communément appelé « moteur » et/ou un fonctionnement communément appelé « générateur ». Classiquement, l'onduleur OND comporte plusieurs bras de commutation (non représentés), de préférence au moins un bras de commutation pour chaque phase de la machine électrique, pour transformer le signal continu depuis la source DC en un signal alternatif pour les phases de la machine électrique MEL. Chaque bras de commutation comporte au moins un commutateur commandé. De manière classique, on peut commander chaque commutateur des bras de commutation au moyen d'une modulation de largeur d'impulsion connu sous l'acronyme MLI (ou PWM de l'anglais Pulse Width Modulation). L'onduleur peut être similaire à celui présenté en [Fig.1].
- [0067] Le capteur optionnel de position angulaire ou de vitesse de rotation angulaire CAP peut être configuré pour mesurer la position mécanique angulaire d'un rotor (non représenté) de la machine électrique synchrone par rapport au stator (non représenté), et pour délivrer un signal de position angulaire (respectivement de vitesse de rotation angulaire) représentatif de la valeur mesurée de la position angulaire (respectivement de la vitesse de rotation angulaire) du rotor de la machine électrique synchrone.
- [0068] En outre, le capteur optionnel CAP de position angulaire ou de vitesse de rotation angulaire peut être configuré pour appliquer le signal de position angulaire (respectivement de vitesse de rotation angulaire) à une entrée correspondante du calculateur CAL.
- [0069] Le procédé selon l'invention est mis en œuvre à partir d'une consigne de tension (appelée également tension de référence) des phases de la machine électrique. Cette consigne de tension peut être issue du calculateur CAL du mode de réalisation de la [Fig.14]. Il s'agit de la tension attendue dans chaque phase de la machine électrique, généralement sous une forme sinusoïdale.
- [0070] Le procédé selon l'invention met en œuvre les étapes suivantes :
- Détection d'une variation de saturation pendant une période de modulation
 - Correction de la consigne de tension

- Détermination de la consigne de commutation
- Commande de la machine électrique

[0071] La correction de la consigne de tension n'est appliquée que dans le cas d'une variation de saturation pendant une période de modulation. En d'autres termes, cette correction est appliquée dans une zone de fonctionnement de la machine électrique en surmodulation et particulièrement dans des zones de pleine onde, mais n'est pas appliquée dans les autres zones de fonctionnement, notamment la zone de fonctionnement linéaire. La correction de la consigne de tension permet de réduire les erreurs de tension en zone de surmodulation et en zone de pleine onde.

[0072] Ces étapes peuvent être mises en œuvre notamment par un calculateur et une mémoire informatique dédiés pour les temps réels. Ces étapes sont détaillées dans la suite de la description.

[0073] Dans la présente demande, l'expression « période de modulation » correspond à période de la méthode de modulation de largeur d'impulsion MLI. Sur les figures, elle est indiquée T_{PWM} .

1) Détection d'une variation de saturation

[0074] Lors de cette étape, on détecte, pour chaque phase de la machine électrique, au moins une période de modulation pour laquelle la consigne de tension est non entièrement saturée à une unique tension par la tension de la source de tension sur ladite période de modulation, et on détecte l'instant de variation de la saturation de la consigne de tension. « non entièrement saturée à une unique tension » implique que dans la période de modulation, il y a au moins un moment pendant lequel la consigne de tension est saturée, et en outre, la consigne de tension n'est pas restreinte à une unique tension de saturation. Au contraire, une période de modulation saturée à $\frac{+V_{DC}}{2}$ (respectivement $\frac{-V_{DC}}{2}$) sur toute la durée de la période de modulation n'est pas détectée. En d'autres

termes, on détecte au moins une période de modulation à venir pendant laquelle :

- La consigne de tension passe d'un état non saturé à un état saturé,
- La consigne de tension passe d'un état saturé à un état non saturé, ou
- La consigne de tension passe d'un premier état saturé à un deuxième état saturé.

[0075] Dans les deux premières situations, l'instant de variation de la saturation correspond à l'instant de saturation.

[0076] Les figures 3, 5 et 6 sont des exemples de telles périodes de modulation.

[0077] Lors de cette étape, on ne détecte pas les périodes de modulation entièrement saturées à une unique tension de saturation (par exemple si la consigne de référence est saturée uniquement à la tension $+\frac{V_{DC}}{2}$).

- [0078] L'instant de variation de la saturation de la consigne de tension correspond à l'instant au sein de la période de modulation, pour lequel la consigne de tension change d'état, par exemple d'un état saturé à un état non saturé, ou d'un premier état saturé à un deuxième état saturé. Cet instant de variation de la saturation de la consigne de tension est indiqué par la référence I_{VS} sur les figures 3, 5 et 6.
- [0079] Conformément à une mise en œuvre de l'invention, la détection mise en œuvre lors de cette étape peut être réalisée par comparaison, pour chaque période de modulation à venir, de la consigne de tension aux valeurs de saturation provenant de la source de tension continue.

2) Correction de la consigne de tension

- [0080] Lors de cette étape, pour chaque période de modulation détectée à l'étape 1 (et pour chaque phase de la machine électrique), on applique une correction de la consigne de tension, de telle sorte que la consigne de tension corrigée soit la moyenne pondérée de la consigne de tension entre deux intervalles de temps séparés par ledit instant de variation de la saturation. En d'autres termes, pour chaque période de modulation détectée à l'étape 1, on corrige la consigne de tension, en appliquant une nouvelle valeur de consigne de tension qui représente le signal sur l'ensemble de la période de modulation découpé en deux intervalles de temps. On appelle intervalle de temps la portion de la période de modulation entre l'instant de variation de la saturation et le début ou la fin de la période de modulation : chaque période de modulation est constitué de deux intervalles de temps. La moyenne pondérée permet de prendre en compte la contribution de chaque intervalle de temps (en discrétisant séparément chaque intervalle de temps), et par conséquent d'apporter une correction de consigne de tension adaptée à la contribution de chaque intervalle de temps, ce qui permet de minimiser l'erreur de tension. La pondération de chaque contribution correspond à la durée de chaque intervalle de temps. L'idée est de modifier la consigne de tension V_{ref} en prenant en compte l'erreur de tension résultant de la conjonction de la discrétisation et de la saturation :

$$[0081] \quad V_{refCor} = V_{ref} - \varepsilon V_{ref}$$

- [0082] Où : V_{refCor} est la consigne de tension corrigée, V_{ref} la consigne de tension (non corrigée), et εV_{ref} est l'erreur résultant de la conjonction de la discrétisation et de la saturation.

- [0083] De manière générale, la consigne de tension corrigée peut s'écrire :

$$[0084] \quad V_{refCor} = \frac{V_{refP1} T_{P1} + V_{refP2} T_{P2}}{T_{PWM}} \text{ avec } V_{refCor} \text{ la consigne de tension corrigée, } T_{PWM}$$

la période de modulation, V_{refP1} la consigne de tension (saturée ou non) pendant le premier intervalle de temps de durée T_{P1} , V_{refP2} la consigne de tension (saturée ou

non) pendant le deuxième intervalle de temps de durée T_{P2} (avec $T_{PWM} = T_{P1} + T_{P2}$).

- [0085] Pour le mode de réalisation pour lequel la consigne de tension varie d'une tension non saturée à une tension saturée (zone de surmodulation), on peut déterminer la consigne de tension corrigée au moyen de la formule suivante :

$$V_{refCor} = \frac{V_{refT_{sat}} T_{sat} + V_{refT_{noSat}} T_{noSat}}{T_{PWM}}$$
 avec V_{refCor} la consigne de tension corrigée, T_{PWM} la période de modulation, $V_{refT_{sat}}$ la consigne de tension saturée discrétisée pendant l'intervalle de temps saturé T_{sat} de la période de modulation, $V_{refT_{noSat}}$ la consigne de tension discrétisée non saturée pendant l'intervalle de temps non saturé T_{noSat} de la période de modulation (avec $T_{PWM} = T_{sat} + T_{noSat}$).

- [0086] Avantagusement, la consigne de tension non saturée peut être la moyenne de la consigne de tension pendant l'intervalle de temps non saturé de la période de modulation.

- [0087] Les figures 7 et 8 illustrent, schématiquement et de manière non limitative, cette correction pour ce mode de réalisation. Les figures 7 et 8 sont similaires aux figures 2 à 6, et correspondent à la configuration de la figure 3. Pour la période de modulation T_{PWM} , on détecte une variation de la saturation, à l'instant I_{VS} . On découpe alors la période de modulation en deux intervalles de temps : un intervalle de temps non saturé de durée T_{noSat} et un intervalle de temps saturé T_{sat} . On discrétise l'intervalle de temps non saturé pour en déduire une consigne de tension discrétisée $V_{refT_{noSat}}$, et on discrétise l'intervalle de temps saturé pour en déduire une consigne de tension discrétisée $V_{refT_{sat}}$ qui correspond à la tension de saturation $\frac{+V_{dc}}{2}$. Ensuite, on détermine la consigne corrigée par une moyenne pondérée de ces consignes de tension discrétisées V_{refCor} . Grâce à cette moyenne pondérée, l'erreur de tension devient nulle car les surfaces $\varepsilon_{V_{ref}}$ au-dessus et en-dessous de la courbe sont identiques.

- [0088] Pour le mode de réalisation pour lequel la consigne de tension varie d'une première tension saturée à une deuxième tension saturée (zone de pleine onde), on peut déterminer la consigne de tension corrigée au moyen de la formule suivante :

$$V_{refCor} = \frac{V_{refT_{sat1}} T_{sat1} + V_{refT_{sat2}} T_{sat2}}{T_{PWM}}$$

avec V_{refCor} la consigne de tension corrigée, T_{PWM} la période de modulation, $V_{refT_{sat1}}$ la consigne de tension saturée pendant le premier intervalle de temps de saturation T_{sat1} de la période de modulation, $V_{refT_{sat2}}$ la consigne de tension saturée pendant le deuxième intervalle de temps de saturation T_{sat2} de la période de modulation (avec $T_{PWM} = T_{sat1} + T_{sat2}$), le premier intervalle de temps de saturation étant séparé du deuxième intervalle de temps de saturation à l'instant de variation de commutation.

[0089] Les figures 9 et 10 illustrent, schématiquement et de manière non limitative, cette correction pour ce mode de réalisation. Les figures 9 et 10 sont similaires aux figures 2 à 6, et correspondent à la configuration de la figure 5. Pour la période de modulation T_{PWM} , on détecte une variation de la saturation, à l'instant I_{VS} . On découpe alors la période de modulation en deux intervalles de temps : un premier intervalle de temps saturé de durée T_{Sat1} et un deuxième intervalle de temps saturé T_{Sat2} . On discrétise le premier intervalle de temps saturé pour en déduire une consigne de tension discrétisée $V_{refT_{Sat1}}$ qui correspond à la tension de saturation $-\frac{V_{dc}}{2}$, et on discrétise le deuxième intervalle de temps saturé pour en déduire une consigne de tension discrétisée $V_{refT_{Sat2}}$ qui correspond à la tension de saturation $+\frac{V_{dc}}{2}$. Ensuite, on détermine la consigne corrigée par une moyenne pondérée de ces consignes de tension discrétisées V_{refCor} . Grâce à cette moyenne pondérée, l'erreur de tension devient nulle car les surfaces $\mathcal{E}_{V_{ref}}$ au-dessus et en-dessous de la courbe sont identiques.

3) Détermination de la consigne de commutation

[0090] Lors de cette étape, on détermine, pour chaque phase de la machine électrique, un signal de commutation pour chaque bras de commutation de l'onduleur en fonction de la consigne de tension corrigée déterminée à l'étape 2. En d'autres termes, on détermine la durée de commutation des bras de commutation de l'onduleur de manière (également appelée rapport cyclique) à obtenir la consigne de tension corrigée.

[0091] Avantagusement, on peut déterminer le signal de commutation de manière classique, au moyen de la méthode MLI.

[0092] Dans le cas pleine onde, la consigne de tension de commande idéale, on le rappelle, est une onde carrée de valeur $-\frac{V_{DC}}{2}$ pendant un intervalle de temps de la période électrique et de valeur $+\frac{V_{DC}}{2}$ pendant l'autre intervalle de temps. Cependant, en appliquant la consigne de tension corrigée, une impulsion (pulse) supplémentaire non souhaitée est introduite. Cette impulsion est la conséquence directe de la correction : on passe de commandes appliquées qui ne valent que le minimum ou le maximum (donc des commandes qui imposent soit $-\frac{V_{DC}}{2}$, soit $+\frac{V_{DC}}{2}$ durant toute la période PWM) à une commande appliquée calculée par une moyenne : c'est donc une valeur intermédiaire. Cette commande corrigée évite de générer des erreurs de tension de commande mais introduit deux commutations (passages du min au max ou inversement) supplémentaires. Toutefois, ces commutations génèrent des pertes supplémentaires dans l'onduleur.

[0093] Les figures 11 et 12 illustrent, schématiquement et de manière non limitative, la consigne de commutation V_{com} de la phase a de la machine électrique en fonction de

l'angle électrique θ_e en $^\circ$, dans le cas pleine onde, avec une correction de la consigne de tension dans la période de modulation allant de 34° à 51° de l'angle électrique. La [Fig.12] est un agrandissement de la [Fig.11]. On observe sur ces figures les impulsions supplémentaires induites.

- [0094] Selon un mode de réalisation de l'invention, permettant de limiter le nombre d'impulsions et donc les pertes dans l'onduleur, on peut déterminer une consigne de commutation, en réalisant l'intervalle de commutation à une extrémité de la période de modulation. L'intervalle de commutation est la durée pendant laquelle la commutation est mise en œuvre. Cet intervalle est noté T_{com} sur la [Fig.12]. Classiquement et comme illustré sur les figures 11 et 12, l'intervalle de commutation est mis en œuvre au centre de la période de modulation. Ce mode de réalisation propose de décaler l'intervalle de commutation au début ou à la fin de la période de modulation. Ainsi, une continuité de l'état du commutateur est permise, ce qui limite le nombre de commutation et les pertes dans l'onduleur.
- [0095] Selon un premier exemple, on peut débiter l'intervalle de commutation au début de la période de modulation lorsque la consigne de tension varie entre la saturation maximale et la saturation minimale. Ainsi, la consigne de commutation reste au niveau de la saturation maximale au début de la période de modulation.
- [0096] Selon un deuxième exemple, on peut terminer l'intervalle de commutation à la fin de la période de modulation lorsque la consigne de tension varie entre la saturation minimale et la saturation maximale. Ainsi la consigne de commutation est toujours au niveau de la saturation maximale à la fin de la période de modulation.
- [0097] La [Fig.13] illustre, schématiquement et de manière non limitative, la correction de la consigne de commutation pour l'exemple de la [Fig.12]. Dans ce cas, l'intervalle de commutation T_{com} est décalée à la fin de la période de modulation. La consigne de commutation corrigée obtenue est notée $V_{com,cor}$, et permet de limiter le nombre de commutations.

4) Commande de l'onduleur

- [0098] Lors de cette étape, on commande chaque bras de commutation de l'onduleur, en appliquant pour chaque phase de la machine électrique la consigne de commutation déterminée à l'étape 3. En d'autres termes, on applique à chaque commutateur des bras de commutation de l'onduleur une consigne d'ouverture et/ou de fermeture de manière à correspondre à la consigne de commutation. De cette manière, l'onduleur génère un signal de courant de commande de la machine proche d'un signal sinusoïdal.
- [0099] En outre, l'invention concerne un système de commande d'une machine électrique synchrone comprenant un onduleur pourvu de bras de commutation, un calculateur et une mémoire configurés pour mettre en œuvre les étapes du procédé de commande selon l'une quelconque des variantes précédentes ou selon l'une quelconque des com-

binaisons de variantes précédentes, pour appliquer la consigne de commutation aux commutateurs de l'onduleur.

- [0100] De préférence, la machine électrique peut être une machine synchro-réductante assistée par des aimants permanents ou une machine synchrone à aimants permanents.
- [0101] De manière avantageuse, les bras de commutation de l'onduleur peuvent comprendre des semi-conducteurs à large bande des modules de puissance de type WBG (« wide band gap »), qui génèrent nettement moins de pertes à chaque période de découpage. En effet, la présente invention permet une fréquence de découpage adaptée pour ces commutateurs. En variante, les modules de puissance peuvent être du type IGBT ou MOSFET.
- [0102] Comme il va de soi, l'invention ne se limite pas aux seules formes de réalisation, décrits ci-dessus à titre d'exemple, elle embrasse au contraire toutes les variantes de réalisation.

Revendications

[Revendication 1]

Procédé de commande d'une machine électrique (MEL) au moyen d'une modulation de largeur d'impulsion à partir d'une consigne de tension des phases de ladite machine électrique, ladite machine électrique étant pilotée par un onduleur (OND) pourvu d'une pluralité de bras de commutation (BC) et alimenté par une source de tension continue (DC), caractérisé en ce qu'on met en œuvre les étapes suivantes :

- a. On détecte au moins une période de modulation (T_{PWM}) pour laquelle ladite consigne de tension est non entièrement saturée à une unique tension par la tension de la source de tension continue (DC) sur ladite période de modulation (T_{PWM}), et on détecte l'instant de variation de la saturation (I_{vs}) de ladite consigne de tension ;
- b. On applique, pour chaque période de modulation détectée (T_{PWM}), une correction de ladite consigne de tension, de telle sorte que la consigne de tension corrigée soit la moyenne pondérée de la consigne de tension de deux intervalles de temps séparée par ledit instant de variation de la saturation (I_{vs}) sur la période de modulation ;
- c. On détermine un signal de commutation pour chaque bras de commutation (BC) dudit onduleur (OND) en fonction de ladite consigne de tension corrigée ; et
- d. On commande chaque bras de commutation (BC) dudit onduleur (OND) par application de ladite consigne de commutation déterminée.

[Revendication 2]

Procédé de commande selon la revendication 1, dans lequel, pour chaque période de modulation (T_{PWM}) détectée, et lorsque ladite consigne de tension passe d'un premier état saturé à un deuxième état saturé ou lorsque que la consigne de tension est en surmodulation, on détermine une consigne de commutation, en réalisant l'intervalle de commutation à une extrémité de la période de modulation.

[Revendication 3]

Procédé de commande selon la revendication 2, dans lequel on débute l'intervalle de commutation au début de la période de modulation lorsque la consigne de tension varie entre la saturation maximale et la

saturation minimale.

[Revendication 4]

Procédé de commande selon la revendication 2, dans lequel on termine l'intervalle de commutation à la fin de la période de modulation lorsque la consigne de tension varie entre la saturation minimale et la saturation maximale.

[Revendication 5]

Procédé de commande selon l'une des revendications précédentes, dans lequel lorsque la consigne de tension varie d'une tension non saturée à une tension saturée, on détermine ladite consigne de tension corrigée au moyen de la formule suivante :

$$V_{refCor} = \frac{V_{refT_{sat}} T_{sat} + V_{refT_{noSat}} T_{noSat}}{T_{PWM}}$$

avec V_{refCor} la consigne de tension corrigée, T_{PWM} la période de modulation, $V_{refT_{sat}}$ la consigne de tension saturée pendant l'intervalle de temps saturé T_{sat} de la période de modulation, $V_{refT_{noSat}}$ la consigne de tension non saturée pendant l'intervalle de temps non saturé T_{noSat} de la période de modulation, l'intervalle de temps saturé étant séparé de l'intervalle de temps non saturé audit instant de variation de commutation.

[Revendication 6]

Procédé de commande selon la revendication 5, dans lequel la consigne de tension non saturée est la moyenne de la consigne de tension pendant l'intervalle de temps non saturé de la période de modulation.

[Revendication 7]

Procédé de commande selon l'une des revendications 1 à 4, dans lequel lorsque la consigne de tension varie d'une première tension saturée à une deuxième tension saturée, on détermine ladite consigne de tension corrigée au moyen de la formule suivante :

$$V_{refCor} = \frac{V_{refT_{sat1}} T_{sat1} + V_{refT_{sat2}} T_{sat2}}{T_{PWM}}$$

avec V_{refCor} la consigne de tension corrigée, T_{PWM} la période de modulation, $V_{refT_{sat1}}$ la consigne de tension saturée pendant le premier intervalle de temps de saturation T_{sat1} de la période de modulation, $V_{refT_{sat2}}$ la consigne de tension saturée pendant le deuxième intervalle de temps de saturation T_{sat2} de la période de modulation, le premier intervalle de temps de saturation étant séparé du deuxième intervalle de temps de saturation audit instant de variation de commutation.

[Revendication 8]

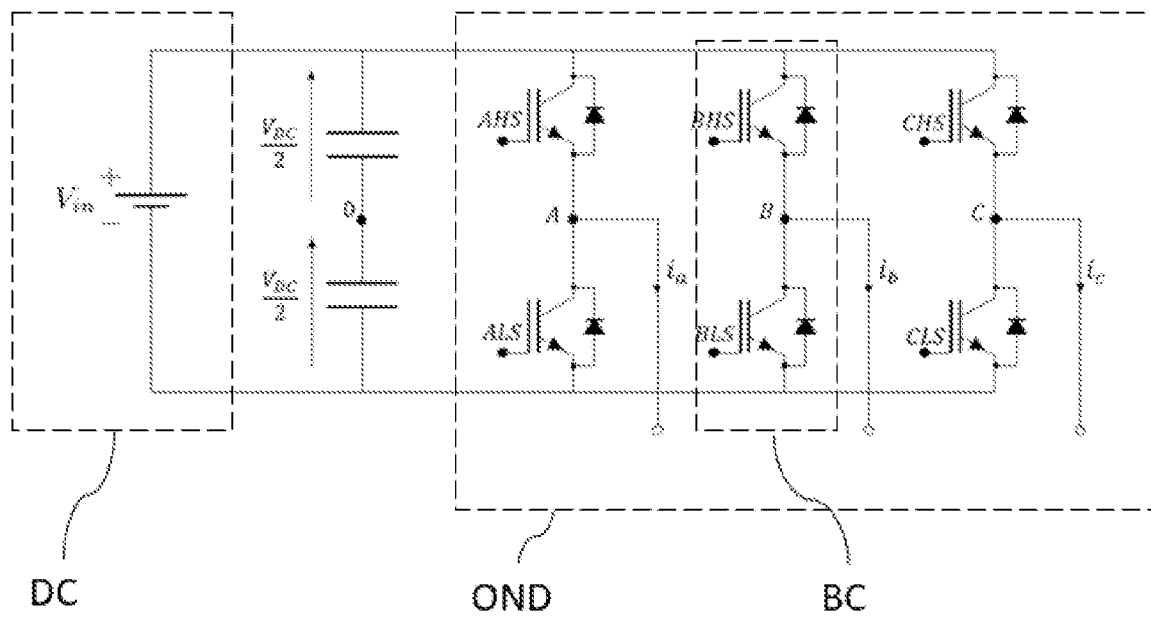
Système de commande d'une machine électrique (MEL) comprenant un onduleur (OND) pourvu de bras de commutation, un calculateur (CAL) et une mémoire configurés pour mettre en œuvre les étapes du procédé de commande selon l'une des revendications précédentes.

[Revendication 9]

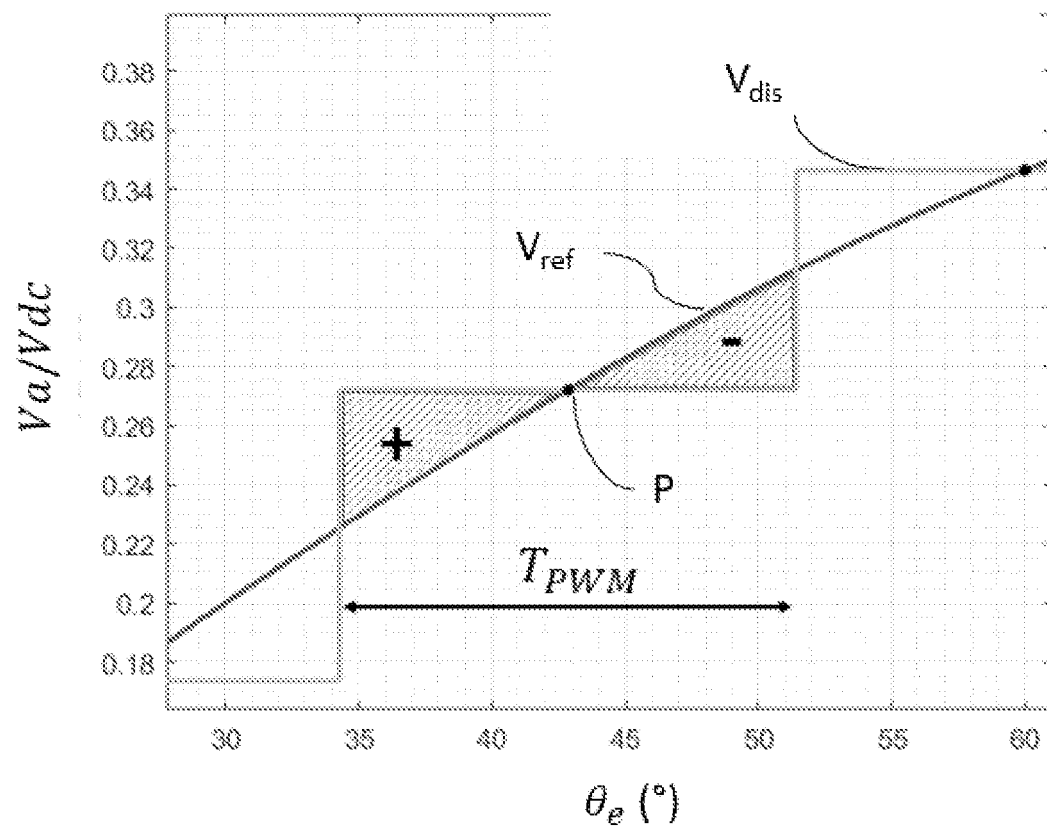
Système de commande selon la revendication 8, dans lequel ladite

machine électrique (MEL) est une machine synchro-réductante assistée par des aimants permanents ou une machine synchrone à aimants permanents.

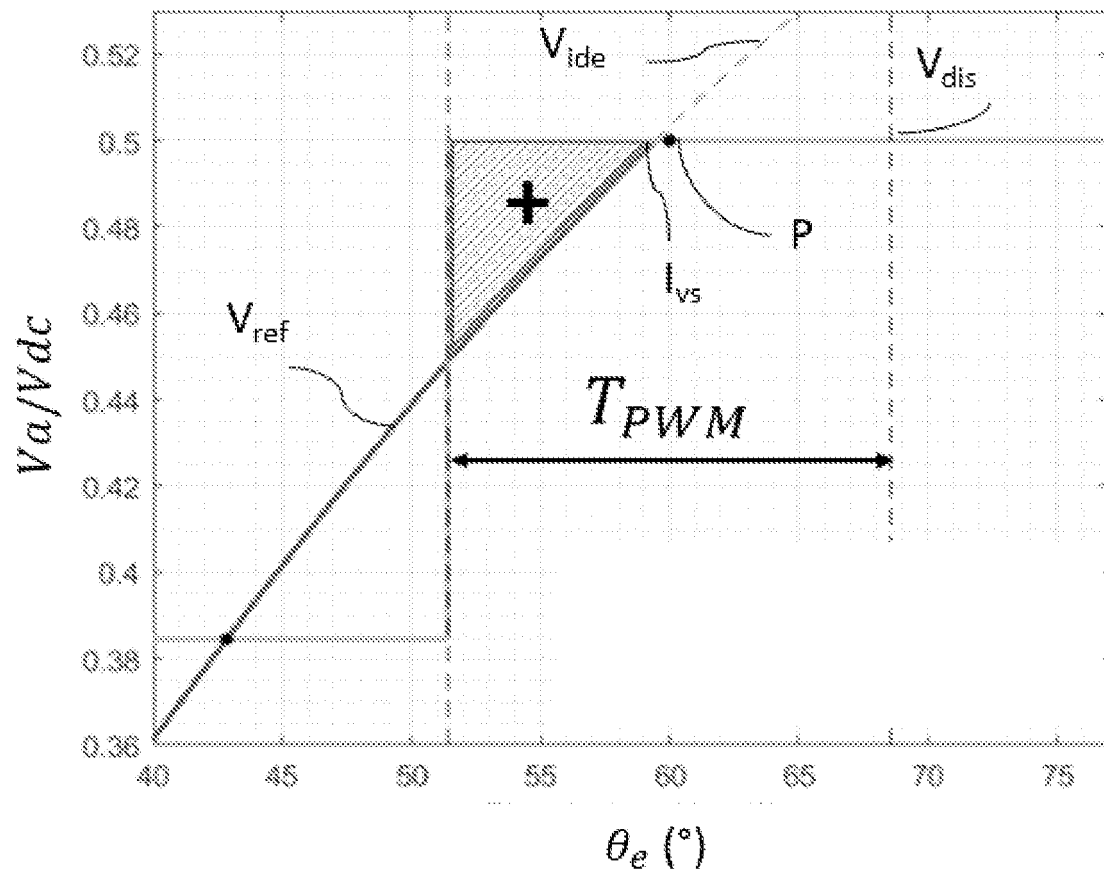
[Fig. 1]



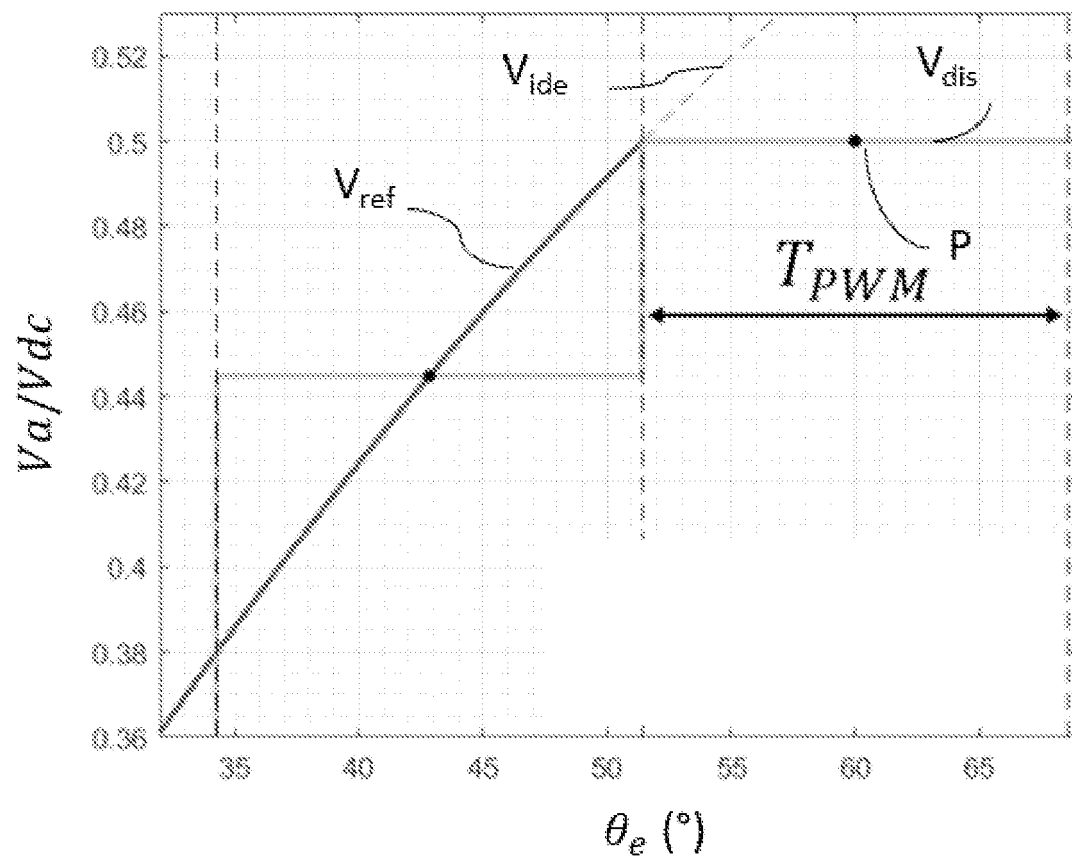
[Fig. 2]



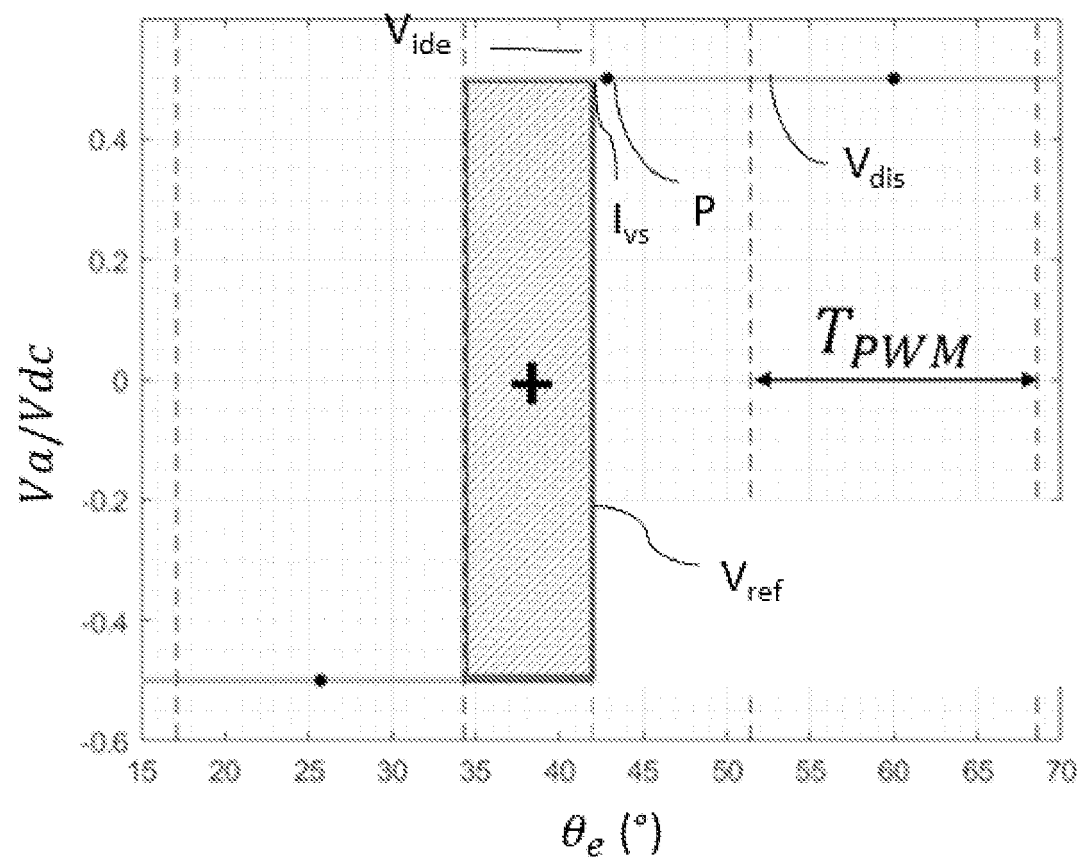
[Fig. 3]



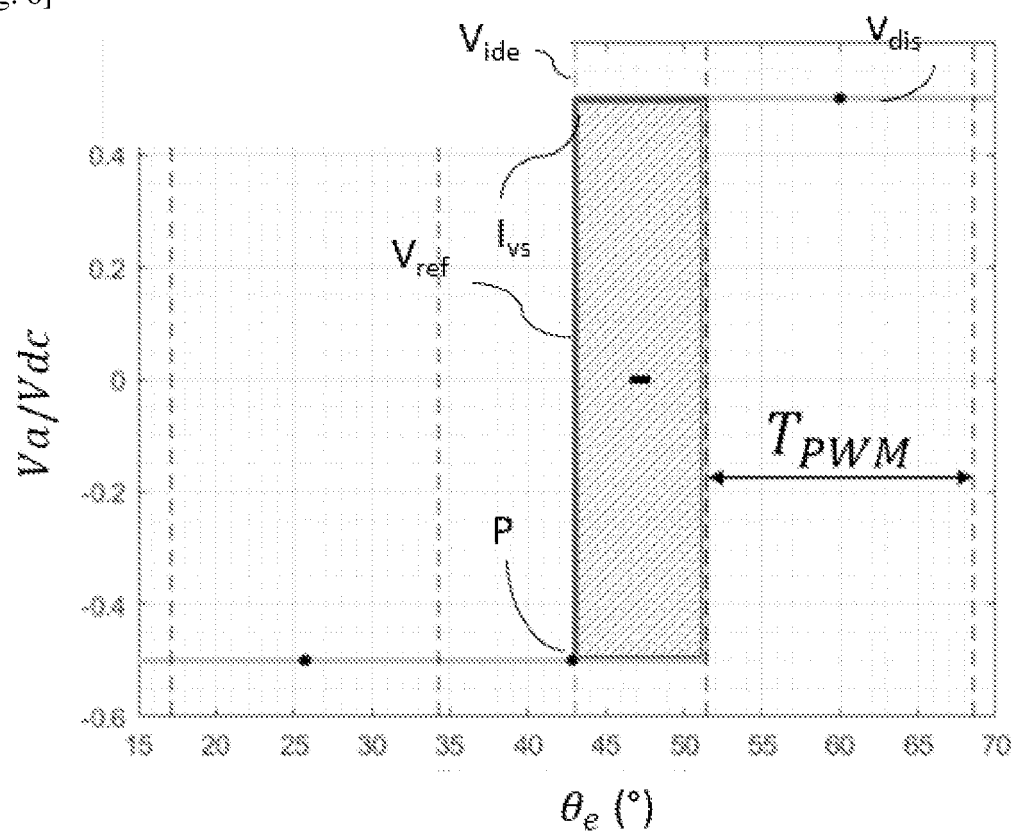
[Fig. 4]



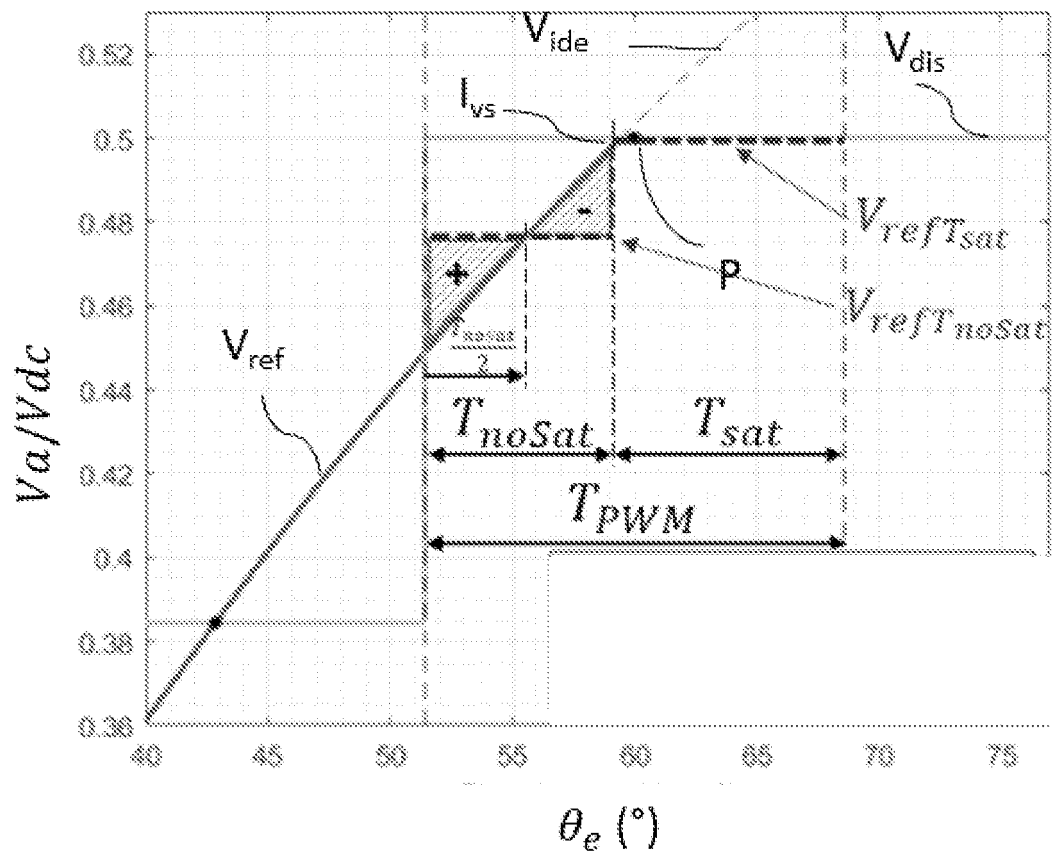
[Fig. 5]



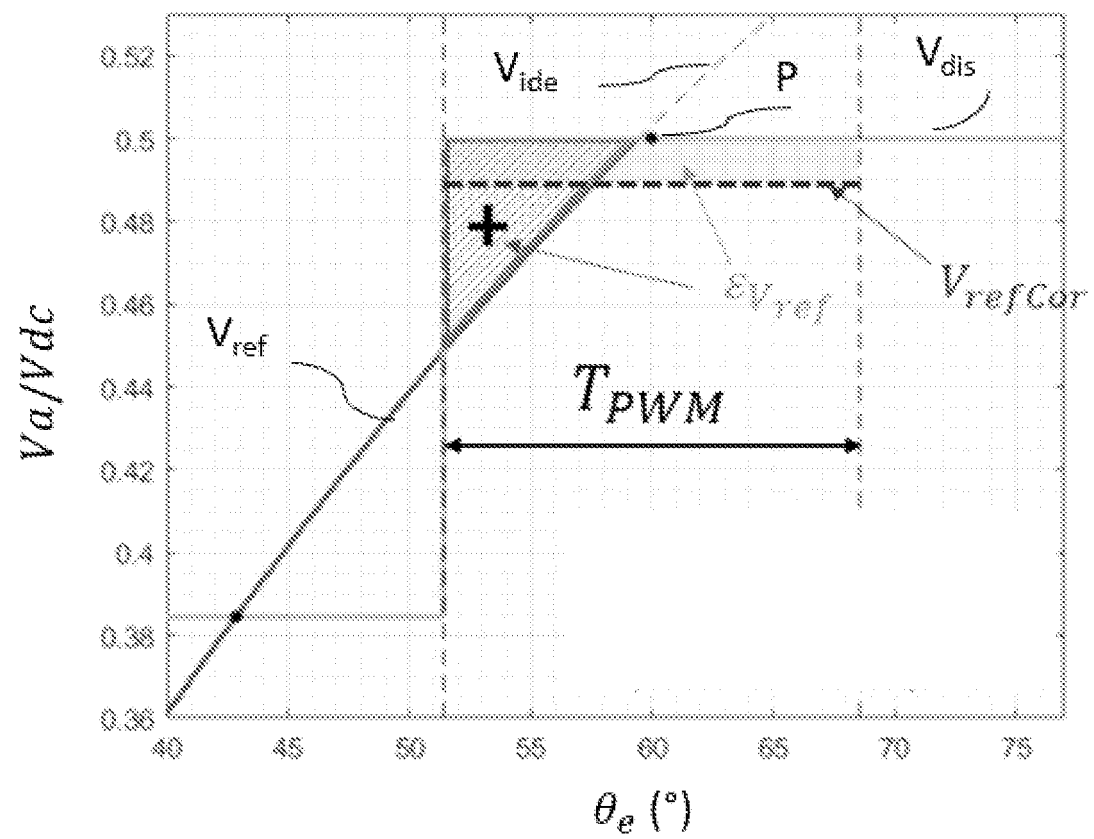
[Fig. 6]



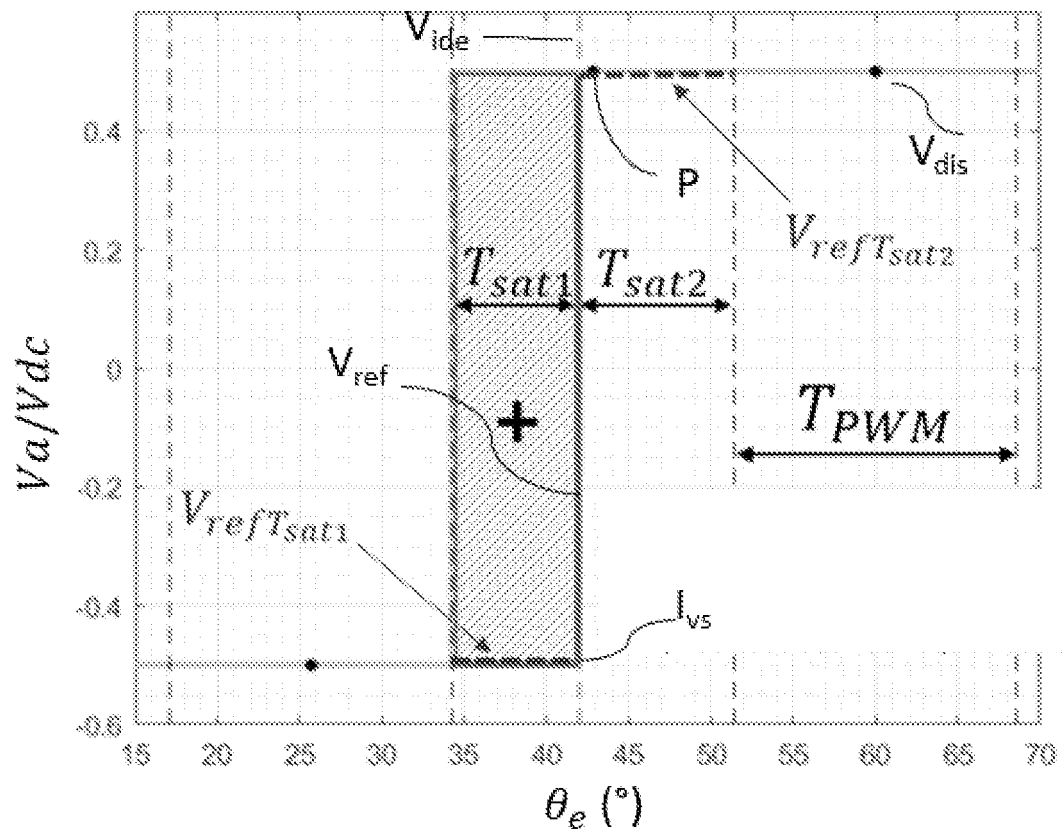
[Fig. 7]



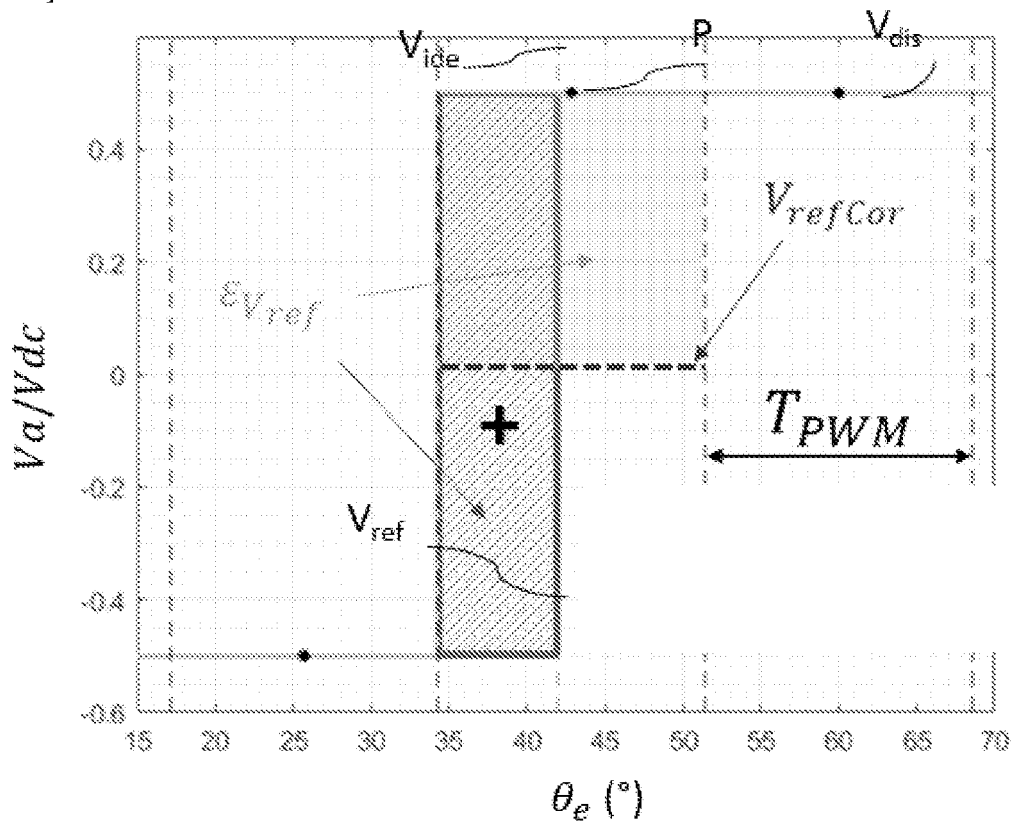
[Fig. 8]



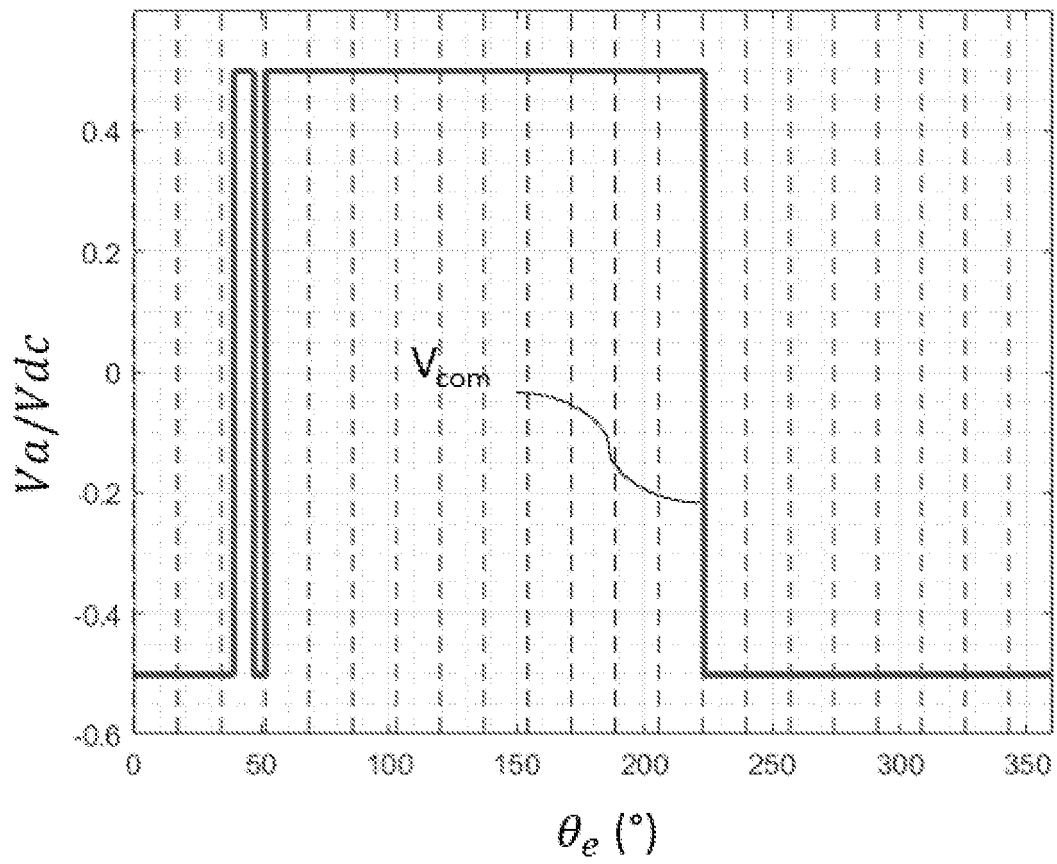
[Fig. 9]



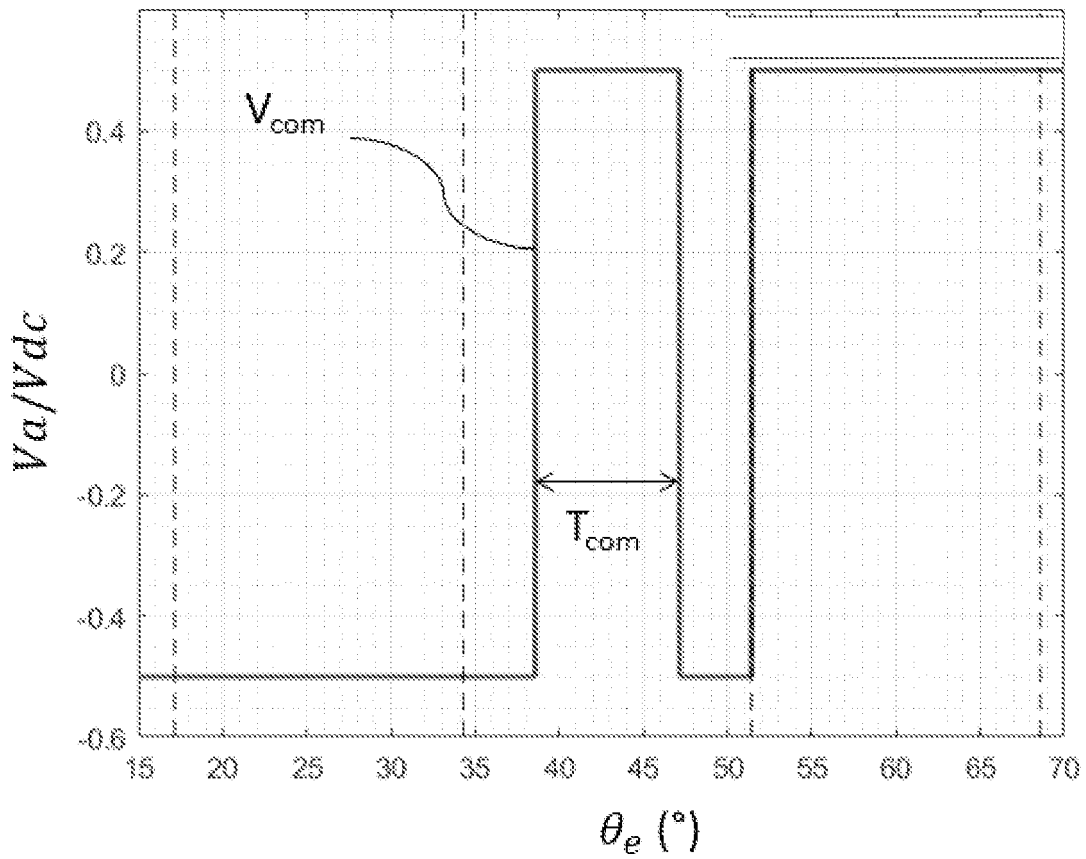
[Fig. 10]



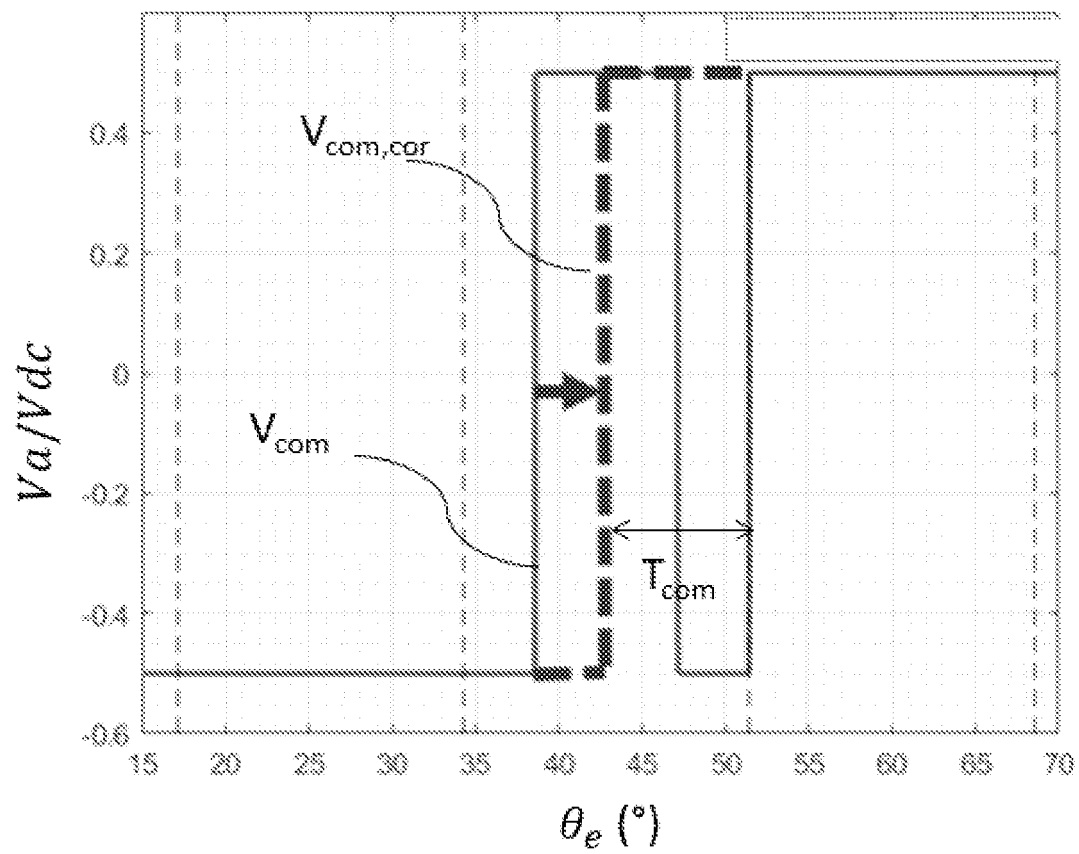
[Fig. 11]



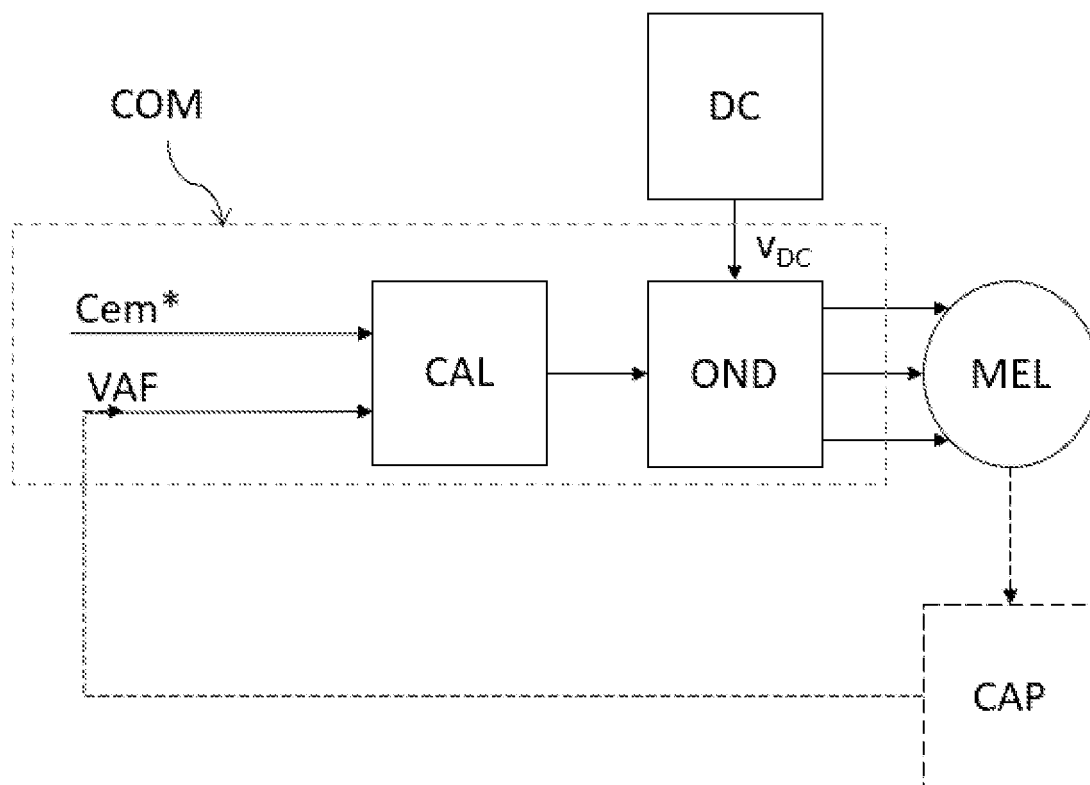
[Fig. 12]



[Fig. 13]



[Fig. 14]



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

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

N° d'enregistrement
national

FA 926226
FR 2312112

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		
A	EP 4 216 424 A1 (IFP ENERGIES NOW [FR]) 26 juillet 2023 (2023-07-26) * alinéa [0063] - alinéa [0064]; figure 1 *	1-9	H02P 21/14 H02P 27/08
A	WO 2022/185381 A1 (MITSUBISHI ELECTRIC CORP [JP]) 9 septembre 2022 (2022-09-09) * abrégé; figure 1 *	1-9	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			H02P
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
17 mai 2024		Hascher, Thierry	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire			

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2312112 FA 926226

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 **17 - 05 - 2024**
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche			Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)		Date de publication
EP 4216424	A1	26-07-2023	EP	4216424	A1	26-07-2023
			FR	3131992	A1	21-07-2023

WO 2022185381	A1	09-09-2022	CN	116918237	A	20-10-2023
			EP	4304078	A1	10-01-2024
			JP	7378662	B2	13-11-2023
			JP	WO2022185381	A1	09-09-2022
			US	2024063746	A1	22-02-2024
			WO	2022185381	A1	09-09-2022
