

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

①1 N° de publication : **3 091 423**

(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

②1 N° d'enregistrement national : **18 74380**

⑤1 Int Cl⁸ : **H 02 H 9/04 (2019.01), H 02 H 7/06, H 02 P 9/10**

①2 **DEMANDE DE BREVET D'INVENTION**

A1

②2 **Date de dépôt** : 28.12.18.

③0 **Priorité** :

④3 **Date de mise à la disposition du public de la demande** : 03.07.20 Bulletin 20/27.

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

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

Demande(s) d'extension :

⑦1 **Demandeur(s)** : **SAFRAN ELECTRICAL & POWER**
Société par actions simplifiée — FR.

⑦2 **Inventeur(s)** : **RENOTTE Alexis et MICHAUD Benoit.**

⑦3 **Titulaire(s)** : **SAFRAN ELECTRICAL & POWER**
Société par actions simplifiée.

⑦4 **Mandataire(s)** : **BREVALEX.**

⑤4 **PROTECTION CONTRE LES SURTENSIONS D'UN SYSTEME DE GENERATION D'ENERGIE ELECTRIQUE A VITESSE VARIABLE ET FREQUENCE CONSTANTE.**

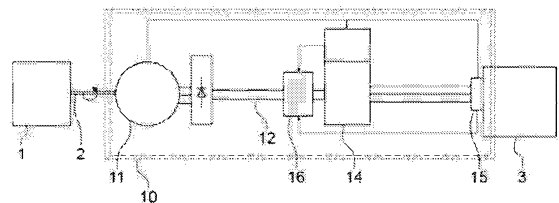
⑤7 Dispositif de protection contre les surtensions d'un système de génération d'énergie électrique à vitesse variable et fréquence constante comportant au moins un générateur à courant continu (11) relié par un bus à courant continu (12, 121, 122) aux bornes d'entrée d'au moins un onduleur (14) et au moins un module de régulation (4, 5, 41, 42) de la tension en sortie de l'au moins un onduleur, caractérisé en ce qu'il comporte

Un circuit (16) comportant au moins un interrupteur en série avec une résistance, le circuit étant relié entre les bornes d'entrée de l'au moins un onduleur,

Au moins un capteur de mesure de la tension continue aux bornes d'entrée de l'au moins un onduleur,

Un circuit de commande relié à l'au moins un capteur de mesure et apte à recevoir une tension mesurée par l'au moins un capteur de mesure, comparer la tension mesurée à un seuil et commander la fermeture de l'au moins un interrupteur si la tension mesurée est supérieure au seuil et son ouverture sinon.

Figure pour l'abrégé : Figure 1



FR 3 091 423 - A1



Description

Titre de l'invention : PROTECTION CONTRE LES SUR-TENSIONS D'UN SYSTEME DE GENERATION D'ENERGIE ELECTRIQUE A VITESSE VARIABLE ET FREQUENCE CONSTANTE

Domaine technique

[0001] La présente invention concerne de manière générale les systèmes de génération électrique utilisés dans les aéronefs. Elle concerne plus particulièrement un système à fréquence constante et à vitesse variable, dit système VSCF d'après l'anglais : « Variable Speed Constant Frequency ».

Technique antérieure

[0002] Dans le domaine aéronautique, il est connu d'utiliser un générateur électrique pour alimenter des équipements d'un aéronef. Il est nécessaire de prévoir des équipements pour empêcher des surtensions de se produire.

[0003] Ainsi un premier système de génération d'énergie électrique comporte un générateur relié à un centre de distribution de puissance qui alimente des charges de l'aéronef. En cas de surtension, un circuit dit circuit « crowbar » est apte à court-circuiter les lignes de puissance entre le générateur et le centre de distribution. Ces lignes de puissance sont alors reliées au neutre du réseau électrique de l'aéronef afin de faire chuter la tension. Un contacteur de ligne est ouvert et l'excitation du générateur est interrompue.

[0004] Ainsi, l'apparition d'une surtension a pour conséquence une interruption de service, avant un redémarrage du système électrique.

[0005] Il est à noter que le circuit « crowbar » agit juste en amont du centre de distribution de puissance, ce qui implique qu'un défaut électrique qui se produit se transmet dans tout le circuit de puissance.

[0006] Dans une autre application de génération d'énergie électrique, un équipement est prévu pour démagnétiser rapidement le générateur en coupant son excitation par une décharge de l'inductance de la bobine d'excitation du générateur dans une résistance. Il offre ainsi une solution de protection indépendante du système de contrôle du générateur, dissimilaire, et dimensionnée sur des puissances relativement faibles comparées à celles mise en jeu par l'équipement précédent car il n'agit que sur l'excitation du générateur et pas sur la puissance principale de la machine.

[0007] Cependant, cette solution impose la mise en série du dispositif de protection dans la ligne de l'excitation machine. Cela impacte donc les performances de régulation en ajoutant des chutes de tension sur le câblage d'excitation.

- [0008] Par ailleurs, un type de système pour générer de l'énergie électrique à partir du ou des moteurs de l'aéronef et à destination des différents équipements électriques équipant l'aéronef est le système à vitesse variable et fréquence constante, dit système VSCF d'après l'anglais « Variable Speed Constant Frequency ». Il s'agit d'un système de génération de puissance qui comporte un générateur entraîné directement par le moteur de l'aéronef et un convertisseur de puissance pour convertir la sortie du générateur en puissance de fréquence constante pour les charges de l'aéronef.
- [0009] Un tel système VSCF comporte classiquement un système de régulation de la tension.
- [0010] Un exemple de système de génération d'énergie électrique de ce type est décrit dans WO 92 17930. Il comporte un système d'écrêtage pour supprimer les surtensions sur le réseau continu, ainsi que sa régulation.
- [0011] Ce système d'écrêtage interagit avec un système de régulation de la tension par l'excitation du générateur. Cela implique que le système d'écrêtage et le système de régulation de la tension par l'excitation du générateur ne sont pas indépendants.
- [0012] De plus, ce système d'écrêtage est limité à une configuration à un unique générateur.
- [0013] L'invention a pour but de proposer un dispositif de protection contre les surtensions d'un système à vitesse variable et fréquence constante (VSCF) qui soit indépendant du système de régulation de la tension qui équipe le système VSCF.

Exposé de l'invention

- [0014] L'invention vise à résoudre les problèmes de la technique antérieure en fournissant un dispositif de protection contre les surtensions d'un système de génération d'énergie électrique à vitesse variable et fréquence constante comportant au moins un générateur à courant continu relié par un bus à courant continu aux bornes d'entrée d'au moins un onduleur et au moins un module de régulation de la tension en sortie de l'au moins un onduleur,
- caractérisé en ce qu'il comporte
- Un circuit comportant au moins un interrupteur en série avec une résistance, le circuit étant relié entre les bornes d'entrée de l'au moins un onduleur,
- Au moins un capteur de mesure de la tension continue aux bornes d'entrée de l'au moins un onduleur,
- Un circuit de commande relié à l'au moins un capteur de mesure et apte à recevoir une tension mesurée par l'au moins un capteur de mesure, comparer la tension mesurée à un seuil et commander la fermeture de l'au moins un interrupteur si la tension mesurée est supérieure au seuil et l'ouverture de l'au moins un interrupteur sinon.
- [0015] Le dispositif de protection contre les surtensions selon l'invention permet d'empêcher les surtensions en sortie du système de génération électrique à vitesse

variable et fréquence constante (VSCF), c'est-à-dire au niveau des charges d'aéronef qui sont alimentées par le système VSCF.

- [0016] Le dispositif de protection contre les surtensions selon l'invention est indépendant du système de régulation de la tension qui équipe le système VSCF. La régulation peut être réalisée par le contrôle de la tension d'excitation du générateur ou par le contrôle de l'onduleur.
- [0017] Il y a ainsi une ségrégation claire entre le système de régulation et le dispositif de protection contre les surtensions. Par ailleurs, le contacteur de ligne, la gestion de l'excitation et le dispositif de coupure des circuits de modulation de largeur d'impulsion (PWM) jouent le rôle de protection de second rang et sont dissimilaires du dispositif de protection contre les surtensions.
- [0018] Le dispositif de protection contre les surtensions selon l'invention ne nécessite pas de mesure de la tension en sortie du système VSCF.
- [0019] Le dispositif de protection contre les surtensions selon l'invention permet de limiter la tension continue au sein du système VSCF sans impacter le contrôle du générateur. Les contraintes de contrôle dynamique sur le système de régulation sont donc limitées.
- [0020] Le dispositif de protection contre les surtensions selon l'invention est compatible avec une architecture de système comportant plusieurs sources d'énergie et/ou relié à plusieurs réseaux de distribution électrique.
- [0021] En limitant les surtensions en sortie de l'onduleur, le dispositif selon l'invention permet d'avoir un délai supplémentaire pour compenser cette surtension par le système de régulation de la tension ou pour engager une action de protection, ce qui limite les contraintes sur le générateur et sa régulation.
- [0022] Ce délai supplémentaire permet par exemple d'utiliser le contacteur de ligne comme moyen de protection, malgré son temps d'ouverture relativement long, par exemple de l'ordre de 30 ms.
- [0023] Le dispositif selon l'invention permet une meilleure continuité de service des charges de l'aéronef.
- [0024] Le dispositif selon l'invention limite les surtensions en amont de l'onduleur, ce qui limite la transmission des défauts.
- [0025] Dans le cas d'un système VSCF comportant un onduleur équipé d'un point milieu capacitif, le dispositif selon l'invention empêche l'apparition d'une tension continue en sortie de l'onduleur en cas de court-circuit d'un semi-conducteur de l'onduleur, sans court-circuiter le générateur.
- [0026] Selon des caractéristiques préférées alternatives, l'au moins un module de régulation de la tension en sortie de l'au moins un onduleur est adapté pour contrôler l'au moins un onduleur ou pour contrôler le courant d'excitation de l'au moins un générateur.
- [0027] Selon une caractéristique préférée, le circuit de commande est apte à recevoir une

valeur de tension mesurée en sortie de l'au moins un onduleur par au moins un capteur de tension, et apte à commander l'ouverture d'un contacteur de ligne situé en sortie de l'au moins un onduleur.

[0028] Selon une caractéristique préférée, le circuit de commande est apte à commander l'arrêt du fonctionnement de l'au moins un onduleur.

[0029] Selon une caractéristique préférée, le circuit de commande est apte à commander l'arrêt de l'excitation de l'au moins un générateur.

[0030] Dans un mode particulier de réalisation de l'invention, le système à vitesse variable et fréquence constante comporte un onduleur comportant un ou deux modules d'onduleurs chacun relié aux bornes d'entrée de l'onduleur, un point milieu capacitif relié au neutre de l'aéronef étant relié aux bornes d'entrée de l'onduleur via deux condensateurs respectifs. Le dispositif comporte un premier capteur de tension pour mesurer la tension entre une première borne d'entrée de l'onduleur et le point milieu capacitif, un second capteur de tension pour mesurer la tension entre une seconde borne d'entrée de l'onduleur et le point milieu capacitif et deux interrupteurs respectivement entre la première borne de l'onduleur et le point milieu capacitif et entre la seconde borne de l'onduleur et le point milieu capacitif.

[0031] L'invention concerne aussi un procédé de protection contre les surtensions d'un système à vitesse variable et fréquence constante dans le mode particulier de réalisation de l'invention précédemment présenté, caractérisé en ce qu'il comporte des étapes de :

Détection d'un court-circuit sur un semi-conducteur d'onduleur connecté à l'une des bornes d'entrée de l'onduleur,

Commande de la fermeture de l'interrupteur correspondant à ladite une des bornes d'entrée de l'onduleur,

Arrêt de la commande de l'onduleur,

Commande d'ouverture du contacteur de ligne et coupure du courant d'excitation du générateur,

Commande de la fermeture de l'interrupteur correspondant à l'autre des bornes d'entrée de l'onduleur après une temporisation.

[0032] L'invention concerne aussi un système de génération d'énergie électrique à vitesse variable et fréquence constante comportant au moins un générateur à courant continu relié par un bus à courant continu aux bornes d'entrée d'au moins un onduleur et au moins un module de régulation de la tension en sortie de l'au moins un onduleur, caractérisé en ce qu'il comporte un dispositif de protection contre les surtensions tel que précédemment présenté.

Breve description des dessins

- [0033] D'autres caractéristiques et avantages apparaîtront à la lecture de la description suivante d'un mode de réalisation préféré donné à titre d'exemple non limitatif, décrit en référence aux figures dans lesquelles :
- [0034] [fig.1] représente un système d'alimentation électrique équipé d'un dispositif de protection contre les surtensions selon un mode de réalisation de l'invention,
- [0035] [fig.2a] représente un premier mode de réalisation d'un module de régulation de tension équipant le système d'alimentation électrique de la figure 1,
- [0036] [fig.2b] représente un second mode de réalisation d'un module de régulation de tension équipant le système d'alimentation électrique de la figure 1,
- [0037] [fig.3] représente le dispositif de protection contre les surtensions selon un premier mode de réalisation de l'invention,
- [0038] [fig.4] représente les tensions RMS au point de régulation, avec et sans le dispositif de protection contre les surtensions selon l'invention,
- [0039] [fig.5] représente le dispositif de protection contre les surtensions selon un second mode de réalisation de l'invention,
- [0040] [fig.6a]
- [0041] [fig.6b]
- [0042] [fig.6c]
- [0043] [fig.6d]
- [0044] [fig.6e] représentent des chronogrammes en cas de court-circuit d'un semi-conducteur de l'onduleur représenté à la figure 5,
- [0045] [fig.7] représente le fonctionnement du dispositif de protection contre les surtensions en cas de court-circuit d'un semi-conducteur de l'onduleur représenté à la figure 5, selon un mode de réalisation de l'invention,
- [0046] [fig.8] représente le dispositif de protection contre les surtensions selon un troisième mode de réalisation de l'invention.

Description des modes de réalisation

- [0047] Selon un mode de réalisation préféré représenté à la figure 1, un système d'alimentation électrique 10 comporte un système à fréquence constante et à vitesse variable (VSCF) entraîné par un moteur primaire 1 via un arbre 2. Le moteur primaire est typiquement un moteur d'aéronef.
- [0048] A partir de son entrée reliée à l'arbre 2, le système VSCF 10 comporte un générateur 11. Il s'agit d'un générateur à courant continu ou de manière équivalente d'un générateur à courant alternatif relié à un redresseur ou convertisseur alternatif/continu. On considère dans la suite le premier cas. Des bornes de sortie du générateur 11 sont reliées à une liaison à courant continu, ou bus de puissance, 12. La liaison à courant continu 12 est reliée aux bornes d'entrée d'un onduleur, ou convertisseur continu/al-

ternatif 14.

- [0049] L'onduleur 14 a une sortie triphasée à fréquence constante, délivrant par exemple une tension alternative de 115 V phase-neutre ou 230 V phase-neutre. La sortie de l'onduleur 14 est un point de régulation 15, relié à un centre de distribution de puissance 3. Le centre de distribution de puissance 3 alimente des charges d'aéronef non représentées.
- [0050] Selon l'invention, le système VSCF comporte un dispositif de protection contre les surtensions, ou écrêteur de tension, 16 relié au bus de puissance 12, en amont de l'onduleur 14. L'écrêteur de tension 16 est décrit dans la suite. Le dispositif de protection contre les surtensions permet d'empêcher les surtensions en sortie du système VSCF, c'est-à-dire au niveau des charges d'aéronef qui sont alimentées par le système VSCF.
- [0051] Il est à noter que des filtres sont classiquement utilisés. Ils ont été omis dans la figure 1 pour simplifier l'exposé.
- [0052] Le système VSCF comporte un module 4 de régulation de tension au point de régulation 15, dont un premier mode de réalisation est représenté à la figure 2a. Dans cette figure, seuls le générateur 11, l'onduleur 14 et le point de régulation 15 du système VSCF ont été représentés. On rappelle que la sortie de l'onduleur 14 est triphasée, mais pour simplifier, elle est représentée aux figures 2a et 2b comme si elle était monophasée.
- [0053] La régulation de la tension au point de régulation 15 peut être réalisée suivant deux modes.
- [0054] Dans le premier mode, dit « inverter master », la régulation de la tension au point de régulation 15 est mise en œuvre par le contrôle de l'onduleur 14. Le contrôle de l'excitation du générateur 11 est asservi au contrôle de l'onduleur ce qui permet d'optimiser la tension continue au sein du système VSCF pour minimiser les pertes du système et la masse du filtre de sortie.
- [0055] Le module de régulation 4 comporte des capteurs de tension 41 et des capteurs de courant 42 au point de régulation 15, pour mesurer respectivement la tension et le courant au point de régulation sur chaque phase. Pour simplifier l'exposé, on considère dans la suite un seul capteur de tension et un seul capteur de courant.
- [0056] Le capteur de tension 41 est relié à un premier comparateur 43 qui compare la tension mesurée à une valeur de consigne, par exemple égale à 115 V.
- [0057] La sortie du premier comparateur 43 est reliée à différents étages de régulation en cascade 44₁, 44₂ et 44₃.
- [0058] Un limiteur 45 pour limiter la consigne de courant et un second comparateur 46 sont reliés en série entre les étages de régulation 44₁ et 44₂. Le capteur de courant 42 est relié au second comparateur 46 qui compare la consigne de courant en sortie du

limiteur 45 et le courant mesuré au point de régulation 15.

- [0059] La sortie du second comparateur 46 est reliée à l'entrée de l'étage de régulation 44₂.
- [0060] Une première sortie de l'étage de régulation 44₂ est reliée à un circuit de modulation de largeur d'impulsion (PWM) 47 dont la sortie est reliée à l'onduleur 14. Le circuit 47 est apte à délivrer des ordres de contrôle à l'onduleur 14.
- [0061] Une seconde sortie de l'étage de régulation 44₂ est reliée à l'étage de régulation 44₃ dont la sortie est reliée au générateur 11. L'étage de régulation 44₃ permet de contrôler le courant d'excitation du générateur 11, et ainsi sa tension de sortie.
- [0062] La figure 2b représente le second mode de réalisation du module 4 de régulation de tension au point de régulation 15. Dans cette figure, seuls le générateur 11, l'onduleur 14 et le point de régulation 15 du système VSCF ont été représentés.
- [0063] Le second mode, dit « excitation master » est une régulation de la tension au point de régulation 15 par le contrôle du courant d'excitation du générateur 11. L'onduleur 14 est en suiveur avec un taux de modulation fixe ce qui impose une tension de sortie au point de régulation 15 proportionnelle à la tension au niveau de la liaison à courant continu 12. La régulation est indépendante de la tension au niveau de la liaison à courant continu 12.
- [0064] Le module de régulation 5 comporte des capteurs de tension 51 et des capteurs de courant 52 au point de régulation 15, pour mesurer respectivement la tension et le courant au point de régulation pour chaque phase. Comme précédemment, pour simplifier l'exposé, on considère dans la suite un seul capteur de tension et un seul capteur de courant.
- [0065] Le capteur de tension 51 est relié à un comparateur 53 qui compare la tension mesurée à une valeur de consigne de tension, par exemple égale à 115 V.
- [0066] La sortie du premier comparateur 53 est reliée à un étage de régulation en cascade 54.
- [0067] Le capteur de courant 52 est relié à un limiteur 55 qui reçoit également la valeur de consigne de tension. La sortie du limiteur 55 est reliée à une entrée de l'étage de régulation 54.
- [0068] La sortie de l'étage de régulation 54 est reliée au générateur 11. L'étage de régulation 54 permet de contrôler le courant d'excitation du générateur 11, et ainsi sa tension de sortie.
- [0069] Le capteur de courant 52 a également une sortie reliée à une entrée d'un limiteur 56 dont la sortie est reliée à l'onduleur 14.
- [0070] Le limiteur 56 est apte à modifier les ordres de contrôle à l'onduleur 14 pour limiter le courant au point de régulation lors d'un court-circuit réseau.
- [0071] La figure 3 représente plus particulièrement l'écriteur de tension 16 selon un premier mode de réalisation. L'écriteur 16 est intégré au système VSCF ou en variante il est

disposé dans un équipement distinct et est relié au système VSCF.

- [0072] L'écriteur 16 est relié entre les bornes d'entrée de l'onduleur 14. Il agit donc sur la tension de la liaison à courant continu 12, en amont de l'onduleur 14.
- [0073] L'écriteur 16 comporte un capteur 161 de tension V_{dc} pour mesurer la tension aux bornes d'entrée de l'onduleur 14. Le capteur 161 est relié à un circuit 162 de commande de l'écriteur 16 pour lui fournir la tension V_{dc} mesurée. Le circuit de commande 162 est relié à un interrupteur 163. L'interrupteur 163 est par exemple un transistor bipolaire, notamment un transistor bipolaire à grille isolée (IGBT), ou un transistor à effet de champ, notamment un MOSFET. L'écriteur 16 peut comporter plusieurs interrupteurs. Dans la suite, on considère le cas d'un transistor à effet de champ. Le circuit de commande 162 est alors relié à la grille du transistor à effet de champ 163.
- [0074] En variante, le circuit de commande 162 est aussi relié à un capteur de tension au point de régulation (non représenté), au circuit de contrôle de générateur et au circuit de commande de l'onduleur.
- [0075] Le transistor à effet de champ 163 a sa source reliée à une borne d'entrée de l'onduleur 14 et son drain est relié en série avec une résistance 164, elle-même reliée en parallèle avec une diode 165. La résistance 164 et la diode 165 sont d'autre part reliées à l'autre borne d'entrée de l'onduleur 14. La résistance 164 permet de dissiper l'énergie lorsque l'interrupteur 163 est fermé.
- [0076] Il est à noter qu'un condensateur C est relié entre les bornes d'entrée de l'onduleur 14 et que la sortie de l'onduleur est reliée au point de régulation 15 au travers d'un filtre 17 connu en soi.
- [0077] La commande de l'interrupteur de l'écriteur peut être réalisée selon différent mode de régulation, par exemple de type PI ou encore de type à hystérésis. On décrit dans la suite l'exemple d'une commande à hystérésis.
- [0078] Le fonctionnement de l'écriteur est alors le suivant. Le capteur 161 mesure la tension V_{dc} . La tension V_{dc} mesurée est comparée par le circuit de commande 162 à un seuil qui dépend d'un niveau de tension inférieur à une limite maximale de tension au point de régulation 15. Tant que la tension V_{dc} demeure inférieure au seuil, l'interrupteur 163 est ouvert et l'écriteur 16 est inactif.
- [0079] Si la tension V_{dc} dépasse le seuil, l'écriteur 16 est activé. Le circuit de commande 162 commande la fermeture de l'interrupteur 163 de manière à faire baisser la tension V_{dc} .
- [0080] Le fonctionnement de l'écriteur est indépendant de la régulation de la tension au point de régulation, qu'il s'agisse d'une régulation de l'excitation du générateur ou par le contrôle de l'onduleur. En effet, une régulation de l'excitation du générateur est indépendante de la tension continue au sein du système VSCF et donc de l'action de

l'écriteur, car le seuil utilisé par l'écriteur est supérieur, au gain de l'onduleur près, à la consigne de tension au point de régulation 15. Ainsi, même si l'écriteur est activé, la régulation de tension au point de régulation n'est pas affectée. Dans le cas d'une régulation effectuée par le contrôle de l'onduleur, l'activation de l'écriteur limite les contraintes sur le générateur et sur l'onduleur en limitant la tension et protège le système en cas de défaillance du contrôle de l'onduleur.

- [0081] En cas de dysfonctionnement ou de tension trop élevée, le circuit de commande 162 peut également commander l'ouverture du contacteur de ligne, non représenté, situé au niveau du point de régulation et procéder à la coupure de l'excitation du générateur.
- [0082] En variante, le capteur de tension au point de régulation mesure la tension au point de régulation et fournit la valeur mesurée au circuit de commande 162. La valeur de la mesure de tension au point de régulation peut indiquer une surtension. Le circuit de commande 162 peut alors commander l'ouverture du contacteur de ligne et commander l'ouverture de tous les interrupteurs de l'onduleur pour stopper la commande de l'onduleur.
- [0083] Selon une autre variante, l'écriteur peut aussi agir pour commander de couper l'excitation de la machine et commander l'ouverture du contacteur de ligne afin de protéger le réseau électrique avion en cas de défaut.
- [0084] La figure 4 représente les tensions RMS au point de régulation, avec et sans l'écriteur selon l'invention.
- [0085] Plus précisément, les courbes 100 représentent les tensions RMS à ne pas dépasser par le système de génération de tension pendant les transitoires de délestage ou de clarification de court-circuit.
- [0086] La courbe 101 représente la tension pour un système de génération VSCF avec un contrôle type « excitation master ».
- [0087] L'amplitude de la surtension est directement liée au design du générateur (stator principal) et impose de limiter l'inductance de la machine pour limiter la surtension.
- [0088] La durée du plateau de la courbe 101 est liée au design du rotor principal et notamment à l'énergie stockée dans ce circuit ($1/2 LI^2$) et à la constante de temps de décharge de ce circuit à travers sa résistance interne et les diodes tournantes. Afin de réduire cette durée, il est nécessaire de réduire la constante de temps L/R ce qui a un impact direct sur les pertes de la machine et sa masse. Réduire l'inductance L va nécessiter l'augmentation du courant du rotor principal pour générer une induction équivalente et peut amener à des limitations liées à la saturation du circuit magnétique ainsi qu'une augmentation des pertes dans le rotor en I^2 . Augmenter la résistance R va également augmenter les pertes et conduire à un échauffement plus important. Ce transitoire impose des contraintes très importantes sur le design du générateur et en particulier sur le design du rotor principal.

- [0089] La pente de décroissance de la tension (courbe 101) est principalement gérée par le circuit de contrôle de l'excitation du générateur, mais le temps de réponse du circuit d'excitation peut lui aussi ralentir le temps de réponse du système.
- [0090] La courbe 102 représente la tension pour le système VSCF équipé de l'écrêteur selon l'invention.
- [0091] Il est possible de limiter la tension au point de régulation par l'écrêteur.
- [0092] De plus, l'écrêteur selon l'invention permet de limiter les contraintes sur le design du générateur, de limiter les contraintes sur les semi-conducteurs des onduleurs (tenue en tension des composants et pertes par commutation) et également de limiter les contraintes sur le circuit d'excitation en augmentant son temps de réponse.
- [0093] On détaille maintenant le fonctionnement nominal de l'écrêteur. Deux cas sont à considérer pour définir le gain maximum de l'onduleur entre la tension continue d'entrée et la tension de sortie de l'onduleur.
- [0094] Le premier cas est une modulation simple, sans harmonique 3 ni contrôle vectoriel. On détaille maintenant le fonctionnement de l'écrêteur dans ce cas.
- [0095] La fonction de transfert de l'onduleur lors du contrôle nominal est :
- [0096]
- $$V_{dc} \xrightarrow{r} \frac{V_{por}}{2\sqrt{2}} \xrightarrow{V_{por}}$$
- [0097] où r est la profondeur de modulation de l'onduleur, $r < 1$, et V_{por} est la tension au point de régulation 15.
- [0098] Dans ce cas de contrôle, en limitant la tension V_{dc} du bus 12 à 384 V, on limite la tension au point de régulation 15 à 135,8 Vrms.
- [0099] L'écrêteur agit comme un tampon entre la régulation de l'excitation du générateur et la tension réseau. L'activation de l'écrêteur permet de donner au système un temps supplémentaire pour confirmer un éventuel défaut. Lorsque l'écrêteur est activé :
- Soit la régulation de l'excitation réussit à réduire la tension du bus DC et l'écrêteur se réouvre,
- Soit l'écrêteur reste fermé plus de 40ms et l'ouverture du contacteur de ligne et l'arrêt du fonctionnement de l'onduleur sont commandés, dans le cas du mode « inverter master » où l'excitation du générateur est asservie au contrôle de l'onduleur ; de plus l'arrêt de l'excitation du générateur est commandé, dans le cas du mode « excitation master ».
- [0100] Le second cas est un contrôle de la tension au point de régulation 15 utilisant l'harmonique 3. On détaille maintenant le fonctionnement de l'écrêteur dans ce cas.
- [0101] Dans le cas d'un contrôle fondé sur l'harmonique 3, la fonction de transfert de l'onduleur devient :
- [0102]

$$V_{dc} \xrightarrow{r} \frac{V_{por}}{\sqrt{6}} \xrightarrow{V_{por}}$$

- [0103] Ainsi, en limitant la tension V_{dc} à 332 V, on limite la tension au point de régulation 15 à 135,5 Vrms.
- [0104] Dans le cas d'un contrôle fondé sur l'harmonique 3, on peut encore utiliser l'écrêteur pour limiter les transitoires de tension. Cette configuration a l'avantage de limiter la tension V_{dc} à une valeur inférieure et donc de diminuer l'impact sur l'onduleur 14 en termes de tenue en tension et pertes.
- [0105] L'écrêteur 16 selon l'invention permet de détecter un défaut de régulation de l'onduleur 14.
- [0106] Dans ce cas, l'écrêteur 16 est activé et limite alors la tension V_{dc} . Cela fournit un délai de 10 à 15 ms pour demander l'ouverture du contacteur de ligne, arrêter l'onduleur et l'excitation du générateur.
- [0107] La tension au point de régulation reste ainsi inférieure à une valeur prédéterminée.
- [0108] La figure 5 représente un second mode de réalisation d'écrêteur de tension adapté au cas d'un onduleur 24 équipé d'un point milieu capacitif PM relié au neutre de l'aéronef.
- [0109] L'onduleur 24 comporte un ou deux modules d'onduleur, dans l'exemple représenté deux modules d'onduleur 24_1 et 24_2 chacun relié aux bornes d'entrée de l'onduleur. Le point milieu PM est relié aux bornes d'entrée de l'onduleur via deux condensateurs respectifs C1 et C2.
- [0110] L'écrêteur 26 est relié entre les bornes d'entrée de l'onduleur 24. L'écrêteur 26 comporte un capteur 261_1 de tension pour mesurer la tension V_{dc1} entre une première borne, par exemple la borne positive, d'entrée de l'onduleur 24 et le point milieu capacitif PM, c'est-à-dire le neutre de l'aéronef. De manière similaire, l'écrêteur 26 comporte un capteur 261_2 de tension pour mesurer la tension V_{dc2} entre l'autre borne, par exemple la borne négative, d'entrée de l'onduleur 24 et le point milieu capacitif PM.
- [0111] Les capteurs 261_1 et 261_2 sont reliés à un circuit 262 de commande de l'écrêteur 26 pour lui fournir les tensions V_{dc1} et V_{dc2} mesurées. Le circuit de commande 262 est relié à des interrupteurs 263_1 et 263_2 respectivement entre la première borne de l'onduleur 24 et le point milieu capacitif PM et entre la seconde borne de l'interrupteur et le point milieu capacitif PM. Les interrupteurs comportent par exemple des transistors, ici au nombre de quatre à titre d'exemple.
- [0112] Les interrupteurs 263_1 et 263_2 sont chacun reliés à une résistance respective de dissipation d'énergie 264_1 et 264_2 . Les résistances 264_1 et 264_2 sont d'autre part reliées chacune à une borne d'entrée respective de l'onduleur 24.
- [0113] L'écrêteur 26 est en quelque sorte un double écrêteur comportant deux modules écrêteurs similaires, l'un entre la première borne d'entrée de l'onduleur 24 et le point milieu capacitif PM et l'autre entre la seconde borne d'entrée de l'onduleur 24 et le

point milieu capacitif PM.

- [0114] Il est à noter que la sortie de l'onduleur 24 est reliée au point de régulation 15 au travers d'un filtre 27 connu en soi.
- [0115] Le fonctionnement de l'écrêteur 26 est décrit dans la suite.
- [0116] Les figures 6a à 6e représentent un exemple de chronogrammes en cas de court-circuit d'un semi-conducteur de l'onduleur équipé d'un point milieu capacitif tel que représenté à la figure précédente.
- [0117] L'écrêteur 26 améliore la protection du réseau électrique de l'aéronef contre l'apparition d'une tension continue en sortie de l'onduleur.
- [0118] En cas de court-circuit d'un semi-conducteur de l'onduleur, la tension présente aux bornes du demi-pont capacitif sera appliquée sur la tension de sortie au point de régulation. Les actions classiques de protection du réseau électrique sont de couper l'excitation de la machine et d'ouvrir un contacteur en sortie de l'onduleur. Ces protections ont un temps de réponse supérieur à 10 ms, alors que la composante continue de la tension de sortie doit être inférieure à 6V en moins de 5ms.
- [0119] Dans le cas d'un onduleur tel que représenté à la figure 3, il est possible de détecter un défaut d'un semi-conducteur en moins de 10 μ s (protection désaturation), d'activer rapidement l'interrupteur de l'écrêteur et de décharger ainsi le condensateur à travers la résistance en moins de 2ms :
- [0120]
$$V = U_0 e^{-t/\tau}$$
- [0121] où :
- V est la tension continue en fin de décharge de condensateur,
 - U_0 est la tension initiale aux bornes du condensateur,
 - t est le temps de décharge,
 - τ est la constante de temps RC, avec R qui est la résistance de l'écrêteur et C la capacité du condensateur aux bornes d'entrée de l'onduleur.
- [0122] Dans le cas d'un onduleur équipé d'un point milieu capacitif, tel que représenté à la figure 5, l'utilisation de l'écrêteur 26 permet en plus de ne pas court-circuiter le générateur pendant le temps nécessaire pour couper l'excitation au rotor du générateur, et limite ainsi le courant de court-circuit vu par le générateur.
- [0123] La figure 6a représente l'apparition d'un court-circuit sur un semi-conducteur de l'onduleur, ici un semi-conducteur d'onduleur connecté à la première borne d'entrée de l'onduleur 24. La figure 6b représente la commande du premier module écrêteur. La figure 6c représente la tension V_{por} au point de régulation 15. La figure 6d représente la tension V_{C1} aux bornes du condensateur C1 et la tension V_{C2} aux bornes du condensateur C2. La figure 6e représente la commande du second module écrêteur.
- [0124] La figure 7 représente le fonctionnement du dispositif de protection contre les sur-

tensions en cas de court-circuit d'un semi-conducteur de l'onduleur équipé d'un point milieu capacitif tel que représenté à la figure 5, sous la forme d'un organigramme comportant des étapes E1 à E5.

- [0125] Lorsqu'à l'étape E1 un court-circuit sur un semi-conducteur d'onduleur connecté à la première borne d'entrée de l'onduleur 24 est détecté (figure 6a), cette étape est suivie de l'étape E2 à laquelle le premier module écrêteur est commandé (figure 6b) au bout de 10 μ s avec un rapport cyclique de 1. Cela permet de décharger le condensateur C1 via la résistance 264₁ en moins de 2ms et protéger ainsi les charges connectées au réseau électrique de l'aéronef. Pendant ce temps, les protections de l'onduleur auront inhibé les commandes de l'ensemble des semi-conducteurs (ou interrupteurs) afin d'empêcher la circulation du courant de défaut.
- [0126] Ainsi, la décharge du condensateur C1 par la résistance 264₁ permet de garantir l'absence de composante continue sur le réseau (figure 6c) en moins de 5ms sans pour autant court-circuiter le générateur, puisque le second module écrêteur est resté ouvert. Cela aura uniquement pour conséquence de charger le condensateur C2 à la tension du bus à courant continu (figure 6d).
- [0127] L'étape suivante E3 est l'arrêt de la commande des deux modules d'onduleurs.
- [0128] L'étape suivante E4 est la commande d'ouverture du contacteur de ligne et la coupure du courant d'excitation du générateur.
- [0129] Une fois le contacteur de ligne ouvert et le courant d'excitation du générateur coupé, l'étape E4 est suivie de l'étape E5 à laquelle une temporisation, par exemple de 100 ms, est lancée. A l'issue de cette temporisation, le générateur est désexcité. Le deuxième module écrêteur (figure 6e) est alors commandé pour décharger le condensateur C2 à travers la résistance 264₂.
- [0130] Le dispositif est alors en position de sécurité et a empêché l'apparition d'une tension continue en sortie de l'onduleur en moins de 2ms.
- [0131] En cas de court-circuit sur un semi-conducteur d'onduleur connecté à la seconde borne de l'onduleur 24, le fonctionnement est similaire en inversant la commande des premier et second modules écrêteur.
- [0132] La figure 8 représente un écrêteur de tension selon un troisième mode de réalisation de l'invention.
- [0133] Dans ce mode de réalisation, le système VSCF est adapté pour être entraîné par deux moteurs primaires 1₁ et 1₂ via des arbres respectifs 2₁ et 2₂.
- [0134] A partir de ses entrées reliées aux arbres 2₁ et 2₂, le système VSCF comporte deux générateurs respectifs 11₁ et 11₂. Il est à noter qu'en variante plusieurs générateurs peuvent être entraînés par un même moteur. Des bornes de sortie des générateurs 11₁ et 11₂ sont reliées à deux liaisons à courant continu, ou bus de puissance, respectives 12₁ et 12₂. Les liaisons à courant continu 12₁ et 12₂ sont reliées aux bornes d'entrée de

deux onduleurs respectifs, ou convertisseur continu/alternatif, 14_1 et 14_2 .

- [0135] Les onduleurs 14_1 et 14_2 ont respectivement des sorties triphasées à fréquence constante, délivrant par exemple une tension alternative de 115 V phase-neutre ou 230 V phase-neutre. Les sorties des onduleurs 14_1 et 14_2 sont des points de régulation 15_1 et 15_2 , reliés à des centres de distribution de puissance 3_1 et 3_2 . Les centres de distribution de puissance 3_1 et 3_2 alimentent des charges d'aéronef non représentées.
- [0136] Le système VSCF comporte encore deux modules 4_1 et 4_2 de régulation de tension au point de régulation 15_1 et 15_2 .
- [0137] Selon l'invention, le système VSCF comporte un dispositif de protection contre les surtensions, ou écrêteur de tension, 16 relié aux bus de puissance 12_1 et 12_2 , en amont des onduleurs 14_1 et 14_2 . L'écrêteur de tension 16 est similaire à celui qui a été précédemment décrit.

Revendications

- [Revendication 1] Dispositif de protection contre les surtensions d'un système de génération d'énergie électrique à vitesse variable et fréquence constante comportant au moins un générateur à courant continu (11, 11₁, 11₂) relié par un bus à courant continu (12, 12₁, 12₂) aux bornes d'entrée d'au moins un onduleur (14, 24₁, 24₂, 14₁, 14₂) et au moins un module de régulation (4, 5, 4₁, 4₂) de la tension en sortie de l'au moins un onduleur, caractérisé en ce qu'il comporte
- Un circuit (16) comportant au moins un interrupteur (163, 263₁, 263₂) en série avec une résistance (164, 264₁, 264₂), le circuit étant relié entre les bornes d'entrée de l'au moins un onduleur,
- Au moins un capteur (161, 261₁, 261₂) de mesure de la tension continue aux bornes d'entrée de l'au moins un onduleur,
- Un circuit de commande (162, 262) relié à l'au moins un capteur de mesure et apte à recevoir une tension mesurée par l'au moins un capteur de mesure, comparer la tension mesurée à un seuil et commander la fermeture de l'au moins un interrupteur si la tension mesurée est supérieure au seuil et l'ouverture de l'au moins un interrupteur sinon.
- [Revendication 2] Dispositif de protection contre les surtensions d'un système à vitesse variable et fréquence constante selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'au moins un module de régulation de la tension en sortie de l'au moins un onduleur est adapté pour contrôler l'au moins un onduleur.
- [Revendication 3] Dispositif de protection contre les surtensions d'un système à vitesse variable et fréquence constante selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'au moins un module de régulation de la tension en sortie de l'au moins un onduleur est adapté pour contrôler le courant d'excitation de l'au moins un générateur.
- [Revendication 4] Dispositif de protection contre les surtensions d'un système à vitesse variable et fréquence constante selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que le circuit de commande est apte à recevoir une valeur de tension mesurée en sortie de l'au moins un onduleur par au moins un capteur de tension, et apte à commander l'ouverture d'un contacteur de ligne situé en sortie de l'au moins un onduleur.
- [Revendication 5] Dispositif de protection contre les surtensions d'un système à vitesse variable et fréquence constante selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que le circuit de commande est apte à

- commander l'arrêt du fonctionnement de l'au moins un onduleur.
- [Revendication 6] Dispositif de protection contre les surtensions d'un système à vitesse variable et fréquence constante selon la revendication 5, caractérisé en ce que le circuit de commande est apte à commander l'arrêt de l'excitation de l'au moins un générateur.
- [Revendication 7] Dispositif de protection contre les surtensions d'un système à vitesse variable et fréquence constante selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, le système à vitesse variable et fréquence constante comportant un onduleur (24) comportant un ou deux modules d'onduleurs chacun relié aux bornes d'entrée de l'onduleur, un point milieu capacitif relié au neutre de l'aéronef étant relié aux bornes d'entrée de l'onduleur via deux condensateurs respectifs (C1, C2), le dispositif comportant un premier capteur (261₁) de tension pour mesurer la tension (Vdc1) entre une première borne d'entrée de l'onduleur (24) et le point milieu capacitif, un second capteur (261₂) de tension pour mesurer la tension (Vdc2) entre une seconde borne d'entrée de l'onduleur 24 et le point milieu capacitif et deux interrupteurs (263₁, 263₂) respectivement entre la première borne de l'onduleur (24) et le point milieu capacitif et entre la seconde borne de l'onduleur et le point milieu capacitif.
- [Revendication 8] Système de génération d'énergie électrique à vitesse variable et fréquence constante comportant au moins un générateur à courant continu relié par un bus à courant continu aux bornes d'entrée d'au moins un onduleur et au moins un module de régulation de la tension en sortie de l'au moins un onduleur, caractérisé en ce qu'il comporte un dispositif de protection contre les surtensions selon l'une quelconque des revendications 1 à 7.
- [Revendication 9] 9. Procédé de protection contre les surtensions d'un système de génération d'énergie électrique à vitesse variable et fréquence constante selon la revendication 8, caractérisé en ce qu'il comporte des étapes de :
 Détection (E1) d'un court-circuit sur un semi-conducteur d'onduleur connecté à l'une des bornes d'entrée de l'onduleur (24),
 Commande (E2) de la fermeture de l'interrupteur correspondant à ladite une des bornes d'entrée de l'onduleur,
 Arrêt (E3) de la commande de l'onduleur,
 Commande (E4) d'ouverture du contacteur de ligne et coupure du courant d'excitation du générateur,
 Commande (E5) de la fermeture de l'interrupteur correspondant à

l'autre des bornes d'entrée de l'onduleur après une temporisation.

[Fig. 1]

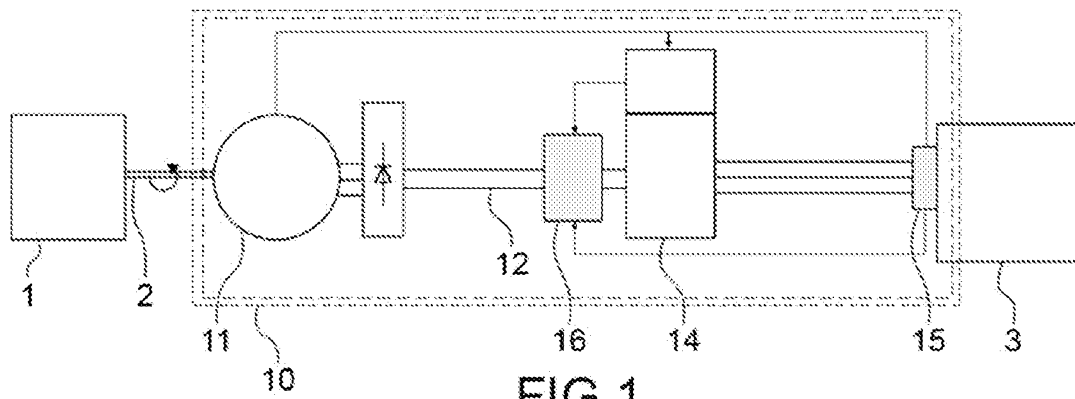


FIG. 1

[Fig. 2a]

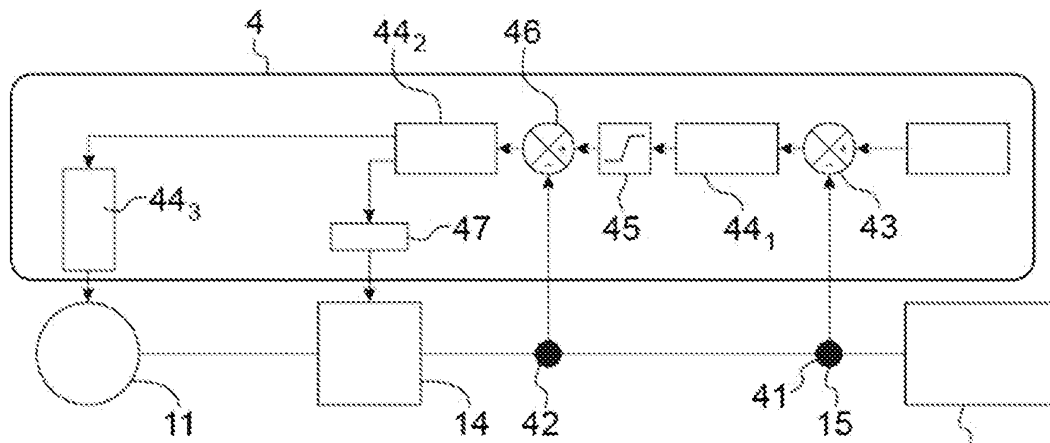


FIG. 2a

[Fig. 2b]

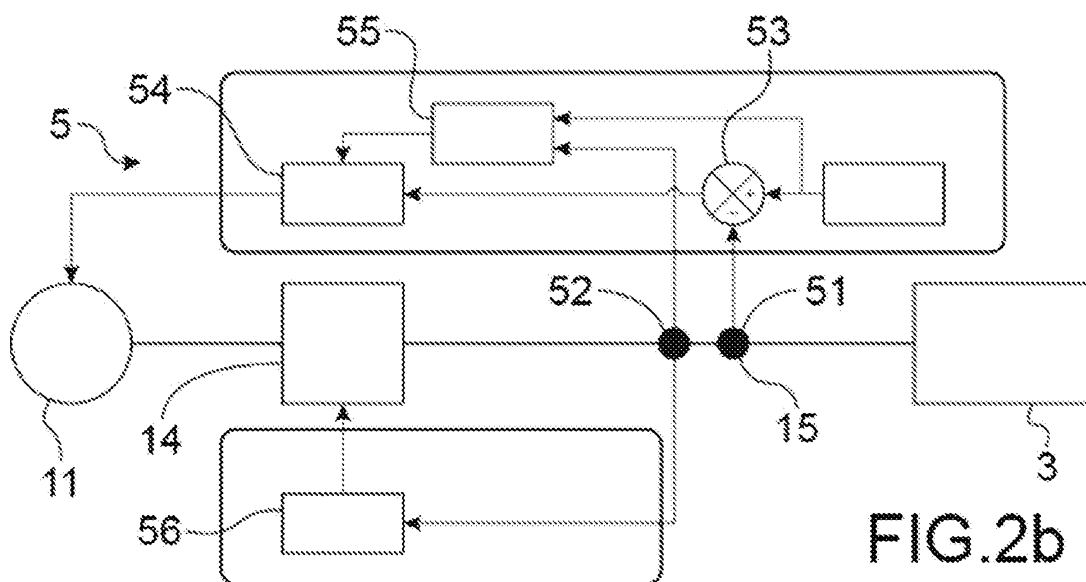


FIG. 2b

[Fig. 3]

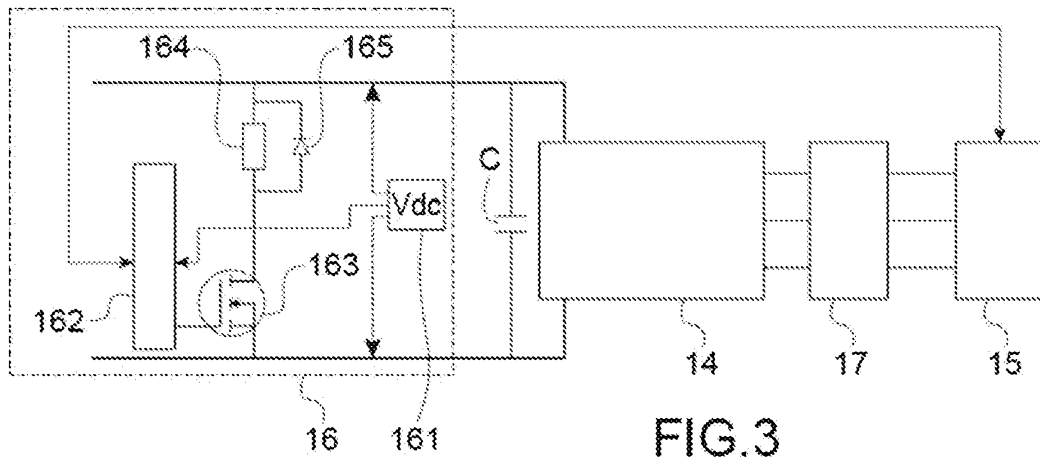


FIG.3

[Fig. 4]

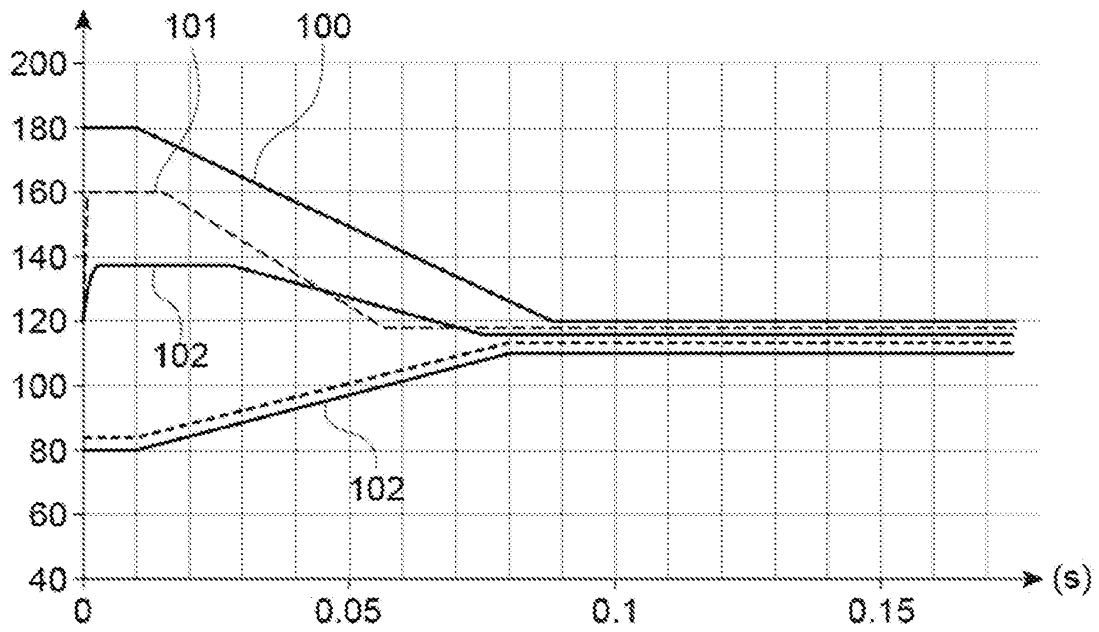


FIG.4

[Fig. 6d]

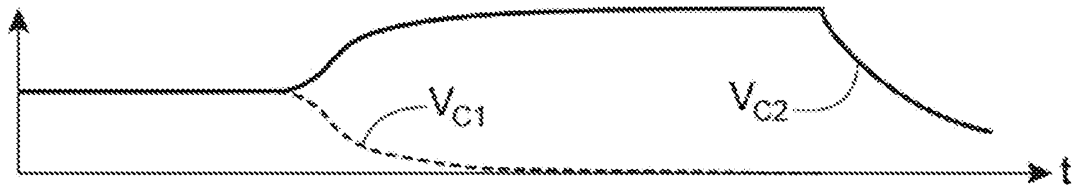


FIG.6d

[Fig. 6e]

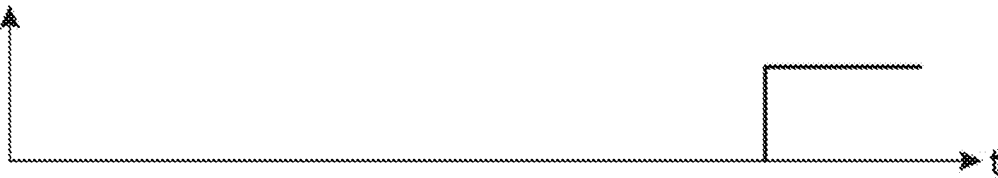


FIG.6e

[Fig. 7]

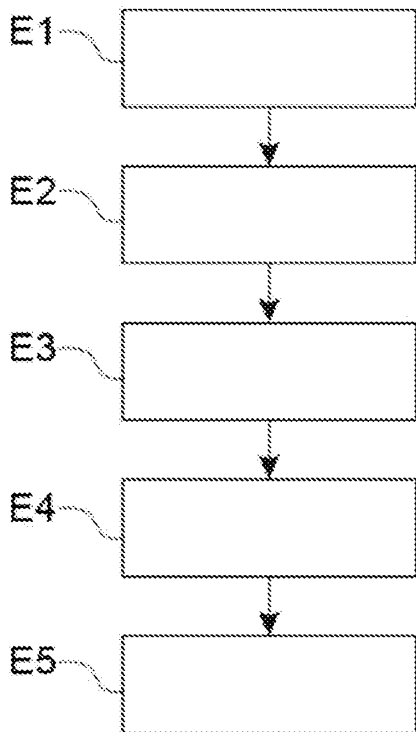


FIG.7

[Fig. 8]

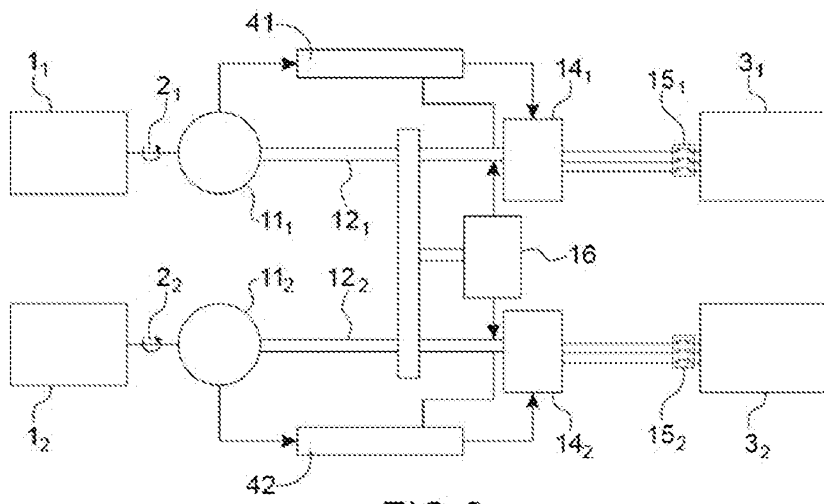


FIG. 8

**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

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

N° d'enregistrement
national

FA 864892
FR 1874380

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X A	US 6 577 483 B1 (STREICHER JOHN T [US] ET AL) 10 juin 2003 (2003-06-10) * abrégé * * figures 1-2 * * colonne 5, ligne 17 - ligne 47 * -----	1-6,8,9 7	H02H9/04 H02H7/06 H02P9/10
X,D A	WO 92/17930 A1 (SUNDSTRAND CORP [US]) 15 octobre 1992 (1992-10-15) * abrégé * * colonne 5, ligne 3 - colonne 6, ligne 50 * * figure 1 * -----	1-6,8,9 7	
A	US 2013/077201 A1 (SAGONA JOHN DUWARD [US]) 28 mars 2013 (2013-03-28) * abrégé * * figures 1-3 * * alinéa [0013] - alinéa [0016] * -----	1-9	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			H02H H02P
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
25 octobre 2019		Operti, Antonio	
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 1874380 FA 864892**

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 **25-10-2019**

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
US 6577483	B1	10-06-2003	AUCUN	

WO 9217930	A1	15-10-1992	EP 0540716 A1	12-05-1993
			US 5194801 A	16-03-1993
			WO 9217930 A1	15-10-1992

US 2013077201	A1	28-03-2013	EP 2573891 A2	27-03-2013
			US 2013077201 A1	28-03-2013
