

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

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

2 954 618

21 N° d'enregistrement national : 09 59367

51 Int Cl<sup>8</sup> : H 02 M 1/32 (2006.01), H 02 M 7/48, H 02 H 7/122

12

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 22.12.09.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la  
demande : 24.06.11 Bulletin 11/25.

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

60 Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

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

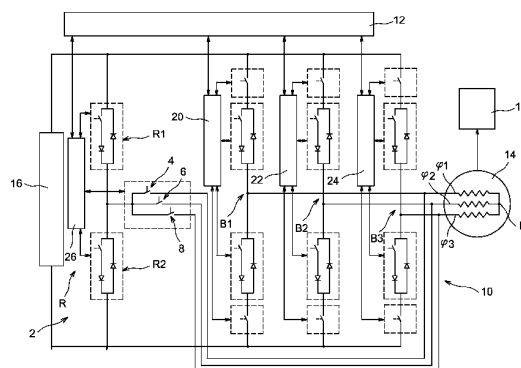
72 Inventeur(s) : GUITARD JEREMY, RICHARD FRE-  
DERIC et POL XAVIER.

73 Titulaire(s) : ASTRIUM SAS Société par actions sim-  
plifiée.

74 Mandataire(s) : BREVALEX.

54 ONDULEUR RECONFIGURABLE, A TOLERANCE DE PANNES, POUR L'ALIMENTATION D'UN MOTEUR  
TRIPHASE SYNCHRON A AIMANTS PERMANENTS, ET ENSEMBLE DESDITS ONDULEUR ET MOTEUR.

57 L'onduleur comprend: trois cellules de commutation (B1, B2, B3) comprenant des dispositifs de commutation (B11 à B32) et des dispositifs d'isolement (S11 à S33); au moins une cellule de redondance (R); un superviseur (12) pour détecter une anomalie de fonctionnement de l'onduleur, conduisant à l'arrêt du moteur (14), résultant d'une défaillance de l'une des trois cellules et induisant un défaut de l'une des phases du moteur. Chaque dispositif de commutation informe le superviseur d'un court-circuit affectant ce dispositif et le superviseur surveille la valeur intégrale de la valeur absolue du courant dans la phase défectueuse.



FR 2 954 618 - A1



**ONDULEUR RECONFIGURABLE, A TOLERANCE DE PANNES, POUR  
L'ALIMENTATION D'UN MOTEUR TRIPHASE SYNCHRON A AIMANTS  
PERMANENTS, ET ENSEMBLE DESDITS ONDULEUR ET MOTEUR**

**DESCRIPTION**

**DOMAINE TECHNIQUE**

La présente invention concerne un onduleur  
5 reconfigurable, à tolérance de pannes (en anglais,  
*reconfigurable, fault-tolerant inverter*), pour  
l'alimentation d'un moteur triphasé synchrone à aimants  
permanents (en anglais, *three-phase permanent-magnet  
synchronous motor*), ainsi qu'un ensemble desdits  
10 onduleur et moteur.

Elle s'applique notamment au domaine  
aérospatial et plus particulièrement au domaine  
spatial.

Depuis plus de deux décennies,  
15 l'électricité prend une importance croissante au sein  
des équipements spatiaux, aéronautiques, automobiles et  
ferroviaires. En effet, le développement de moyens de  
déplacement spatiaux, aériens et terrestres de plus en  
plus « électriques » a montré un fort potentiel  
20 d'optimisation par rapport à l'emploi de systèmes  
classiques d'actionnement, principalement par une  
simplification de la maintenance, une amélioration des  
rendements et une diminution des coûts de développement  
et d'exploitation. En particulier, la mutation  
25 résultante des architectures énergétiques occasionne  
une forte émergence de l'électronique de puissance.

Dans ce contexte, la présente invention  
concerne plus particulièrement les systèmes de

positionnement ou d'entraînement résultant de l'association d'un convertisseur continu-alternatif (onduleur) et d'un moteur triphasé synchrone à aimants permanents.

5

## ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE

Bien que très en vogue, le domaine technologique de l'électronique de puissance est critique pour l'obtention d'une fiabilité suffisante pour de tels systèmes à haut degré de disponibilité. En effet, les topologies classiquement utilisées pour les onduleurs ne permettent pas le maintien du fonctionnement en présence du mode de défaillance le plus commun : le court-circuit de l'un des interrupteurs de puissance que comporte l'onduleur.

Rappelons en effet qu'un onduleur est une structure en pont qui est généralement constituée à partir d'interrupteurs de puissance à semiconducteurs tels que les IGBT, c'est-à-dire les transistors bipolaires à porte isolée (en anglais, *insulated-gate bipolar transistors*).

Afin de satisfaire les exigences de disponibilité opérationnelle, la présente invention utilise une topologie d'onduleur à tolérance de pannes, dans laquelle l'onduleur est doté de redondances structurelles.

La figure 1 est une vue schématique et partielle d'un mode de réalisation particulier d'un onduleur de tension reconfigurable, à tolérance de pannes, que l'on peut utiliser dans la présente invention.

Au sujet des onduleurs de tension reconfigurables, à tolérance de pannes, on peut se reporter notamment aux documents suivants :

5 [1] FR 2 892 243, « Onduleur de tension reconfigurable à tolérance de pannes », invention de Jérôme Mavier et al.,

[2] US 7 436 686, correspondant au document [1],

10 [3] Thèse de Jérôme Mavier, « Convertisseurs génériques à tolérance de panne, applications pour le domaine aéronautique », soutenue le 22 mars 2007.

15 Dans l'exemple de la figure 1, l'onduleur de tension reconfigurable, à tolérance de pannes, est destiné à alimenter un moteur triphasé synchrone à aimants permanents (non représenté). Cet onduleur comprend un ensemble de commutation 2 comprenant trois  
20 cellules de commutation B1, B2, B3, appelées « bras », et une autre cellule de commutation R qui constitue une cellule de redondance, appelée « bras redondant ».

Chacune des trois cellules de commutation B1 ou B2 ou B3, comprend deux dispositifs de  
25 commutation B11-B12 ou B21-B22 ou B31-B32 (interrupteurs de puissance à semiconducteurs) qui sont montés en série. Chacun de ces dispositifs a des première et deuxième bornes et les première bornes ont un point commun. Les points communs correspondant aux  
30 bras B1, B2, B3 ont les références respectives P1, P2, P3. Pour alimenter le moteur, on connecte

respectivement les points P1, P2, P3 aux phases  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  du moteur.

Chacune des trois cellules de commutation B1, B2, B3 comprend aussi deux dispositifs d'isolement S11-S12 ou S21-S22 ou S31-S32 (interrupteurs d'isolement) ayant chacun des première et deuxième bornes. Les premières bornes sont destinées à être connectées respectivement aux deux bornes V1, V2 d'une source de tension continue (non représentée). Les deuxièmes bornes sont connectées respectivement aux deuxièmes bornes des dispositifs de commutation associés B11-B12 ou B21-B22 ou B31-B32.

La cellule de redondance R comprend deux dispositifs de commutation R1, R2 (interrupteurs de puissance à semiconducteurs) qui sont montés en série. Chacun de ces dispositifs a des première et deuxième bornes. Les premières bornes ont un point commun P4. Les deuxièmes bornes sont destinées à être respectivement connectées aux deux bornes V1, V2 de la source de tension continue.

La cellule de redondance R comprend aussi trois dispositifs de connexion 4, 6, 8 (interrupteurs de connexion) ayant chacun des première et deuxième bornes. Les premières bornes sont connectées au point commun P4 et les deuxièmes bornes sont destinées à être respectivement connectées aux trois phases  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  du moteur.

Le principe de fonctionnement de l'onduleur représenté sur la figure 1 est simple : en cas de panne, le bras défaillant, à savoir B1 ou B2 ou B3 est complètement isolé par les interrupteurs associés B11-

B12 ou B21-B22 ou B31-B32 et le bras redondant R vient se substituer au bras défaillant.

Cette topologie d'onduleur tolérant aux pannes nécessite un organe de gestion des redondances  
5 (non représenté sur la figure 1), appelé « superviseur ». Ce dernier est conçu pour :

- détecter une anomalie de fonctionnement de l'onduleur, anomalie qui conduit à l'arrêt du moteur alimenté par l'onduleur, qui résulte de la défaillance  
10 de l'un des trois bras B1, B2, B3, et qui induit un défaut de l'une des phases du moteur,
- isoler le bras défaillant,
- déterminer la cause de la défaillance, et
- commander une remise en marche du moteur  
15 ou une reconfiguration de l'onduleur, adaptée à l'anomalie détectée.

La réactivité de ce superviseur est cruciale pour empêcher le défaut de se propager et aussi pour corriger ce défaut le plus rapidement  
20 possible, afin que la mission d'un système contenant l'onduleur et le moteur alimenté par ce dernier ne soit pas affectée par la panne.

## **EXPOSÉ DE L'INVENTION**

25 La présente invention a justement pour objet un onduleur qui est pourvu d'un superviseur ayant une grande réactivité.

De façon précise, la présente invention a pour objet un onduleur de tension reconfigurable, à  
30 tolérance de pannes, destiné à alimenter un moteur

triphasé synchrone à aimants permanents, l'onduleur comprenant :

- des première à troisième cellules de commutation comprenant chacune :

5                   • deux dispositifs de commutation montés en série, et

                  • deux dispositifs d'isolement,

- au moins une quatrième cellule de commutation, constituant une cellule de redondance, et

10               - un organe de gestion de redondance, adapté pour

                  • détecter une anomalie de fonctionnement de l'onduleur, anomalie qui conduit à l'arrêt du moteur, qui résulte d'une défaillance de l'une des première à troisième cellules de commutation

15               et qui induit un défaut de l'une des phases du moteur,

                  • isoler la cellule de commutation défaillante,

20               • déterminer la cause de la défaillance, et

                  • commander une remise en marche du moteur ou une reconfiguration de l'onduleur, adaptée à l'anomalie détectée,

25               dans lequel chaque dispositif de commutation est adapté pour informer l'organe de gestion de redondance d'un court-circuit affectant ce dispositif de commutation, et dans lequel l'organe de gestion de redondance est en outre adapté pour surveiller la valeur intégrale de la valeur absolue du

30               courant dans la phase défectueuse.

Selon un mode de réalisation préféré de l'onduleur, objet de l'invention,

- dans les première à troisième cellules de commutation, les deux dispositifs de commutation montés en série ont chacun des première et deuxième bornes, les premières bornes ayant un point commun, destiné à être connecté à l'une des trois phases du moteur, et les deux dispositifs d'isolement ont chacun des première et deuxième bornes, les premières bornes étant destinées à être connectées respectivement aux deux bornes d'une source de tension continue, les deuxième bornes étant connectées respectivement aux deuxième bornes des dispositifs de commutation associés, et

- la quatrième cellule de commutation constituant une cellule de redondance, comprend :

- deux dispositifs de commutation montés en série, ayant chacun des première et deuxième bornes, les premières bornes ayant un point commun, les deuxième bornes étant destinées à être respectivement connectées aux deux bornes de la source de tension continue, et

- trois dispositifs de connexion ayant chacun des première et deuxième bornes, les premières bornes étant connectées au point commun correspondant à la quatrième cellule de commutation, chacune des deuxième bornes étant destinée à être connectée à l'une des trois phases du moteur.

De préférence, l'organe de gestion de redondance est en outre adapté pour comparer la valeur intégrale surveillée à un seuil prédéfini.

Selon un mode de réalisation préféré de l'invention, l'organe de gestion de redondance est en outre adapté pour commander l'isolation électrique de l'une des deux phases du moteur, qui est exempte de défaut, dès la détection du défaut.

Dans ce cas, de préférence, l'organe de gestion de redondance est en outre adapté pour commander l'ouverture de la première des deux phases exemptes de défaut, dont le courant passe par zéro.

Selon un mode de réalisation particulier de l'invention, l'organe de gestion de redondance est en outre adapté pour commander la reconfiguration de l'onduleur dès qu'un nombre prédéfini de remises en marche du moteur est atteint.

La présente invention concerne aussi un ensemble onduleur-moteur triphasé synchrone à aimants permanents, tolérant aux pannes, comprenant :

- l'onduleur, objet de l'invention, et
- un moteur triphasé synchrone à aimants permanents, alimenté par l'onduleur.

#### **BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS**

La présente invention sera mieux comprise à la lecture de la description d'exemples de réalisation donnés ci-après, à titre purement indicatif et nullement limitatif, en faisant référence aux dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 est une vue schématique et partielle d'un mode de réalisation particulier d'un onduleur de tension reconfigurable, à tolérance de

pannes, que l'on peut utiliser dans la présente invention, et a déjà été décrite,

- la figure 2 est une vue schématique d'un mode de réalisation particulier de l'onduleur reconfigurable, à tolérance de pannes, objet de l'invention, et

- la figure 3 est une illustration temporelle du procédé qui est mis en oeuvre dans l'invention.

10

#### **EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS**

La figure 2 est une vue schématique d'un mode de réalisation particulier de l'onduleur de tension, objet de l'invention. L'onduleur de tension 10 représenté sur la figure 2 comprend :

- l'ensemble de commutation 2 que l'on a décrit en faisant référence à la figure 1, et

- un organe de gestion de redondance 12, également appelé « superviseur ».

L'onduleur 10 alimente un moteur triphasé synchrone à aimants permanents 14 et il est lui-même alimenté par une source de tension continue 16.

A titre purement indicatif et nullement limitatif, le moteur 14 est destiné à commander un actionneur 18, par exemple une servo-gouverne d'un engin spatial.

Le superviseur est conçu pour détecter et corriger les deux types de pannes qui peuvent affecter l'un des interrupteurs de puissance que comportent les cellules B1, B2 et B3 de l'onduleur : une panne de type court-circuit ou une panne de type circuit ouvert. Le

mode de défaillance le plus critique est le court-circuit. C'est malheureusement aussi le plus fréquent. Dans ce qui suit, on va considérer ce cas du court-circuit. Et l'on va expliquer comment le superviseur 12  
5 gère une panne de type interrupteur court-circuité.

Quand un interrupteur de puissance est court-circuité, il est traversé par un courant très important (de l'ordre de cinq fois le courant nominal par exemple), sort de sa zone de fonctionnement  
10 linéaire et entre dans sa zone de désaturation.

On précise que chaque cellule de commutation B1 ou B2 ou B3 de l'onduleur 10 est pourvue d'un circuit-pilote (en anglais, *driver*) 20 ou 22 ou 24 constituant un dispositif de commande rapprochée et de  
15 surveillance de cette cellule de commutation et des dispositifs d'isolement associés à cette cellule. La cellule de commutation R est, quant à elle, pourvue d'un circuit-pilote 26 constituant un dispositif de commande rapprochée et de surveillance de cette cellule  
20 de commutation et des dispositifs de connexion 4, 6, 8.

Les circuits-pilotes 20, 22, 24 et 26 communiquent avec le superviseur 12. A ce sujet, on se reportera notamment aux documents [1] (ou [2]) et [3].

Lorsque l'un des interrupteurs de puissance  
25 sort de la zone de fonctionnement linéaire, le circuit-pilote auquel il correspond est capable de détecter cette sortie du fonctionnement linéaire et d'envoyer un signal d'avertissement (en anglais, *flag*) au superviseur 12. Ce dernier commande alors le plus  
30 rapidement possible un blocage de l'interrupteur et de son complémentaire, c'est-à-dire le deuxième

interrupteur du bras comportant l'interrupteur court-circuité.

On admet dans ce qui suit qu'une panne est toujours suivie de l'envoi de ce signal d'avertissement, qui permet le lancement de la  
5 procédure de gestion de la panne par le superviseur.

Afin de limiter les forts courants du régime de défaut considéré, une commande de blocage, ou commande d'inhibition, de l'onduleur est envoyée par le  
10 superviseur 12 dès réception d'un signal d'avertissement par ce superviseur. Cela signifie que l'on demande l'ouverture (ou l'inhibition), le plus rapidement possible, des six interrupteurs de commutation des bras B1, B2 et B3 de l'onduleur.

15 Ce dernier se trouve alors dans l'une des deux configurations suivantes : soit l'onduleur est effectivement bloqué, soit l'un des six interrupteurs est encore en court-circuit.

Si l'onduleur est effectivement bloqué,  
20 cela signifie que le circuit-pilote a pu obtenir l'ouverture de chacun des interrupteurs : les six interrupteurs sont ouverts. L'envoi du signal d'avertissement se révèle être une « fausse panne » puisque l'interrupteur ayant causé l'envoi du signal  
25 est toujours commandable.

Il s'ensuit une annulation effective des courants, y compris dans la phase censée être défectueuse (parmi les phases  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  et  $\phi_3$  du moteur 14). Après cette fausse panne, on peut effectuer un  
30 redémarrage du moteur 14 avec la même configuration,

puisque la cellule n'est pas réellement défaillante :  
le court-circuit pouvait venir d'un défaut de commande.

Cependant, ce défaut peut se répéter et  
peut venir perturber le bon fonctionnement de  
5 l'actionneur 18 qui est commandé par le moteur 14.

Pour éviter cela, l'utilisateur peut  
mémoriser un nombre maximum de redémarrages dans le  
superviseur 12 et configurer ce dernier de telle sorte  
que, lorsque ce nombre est atteint, le superviseur  
10 reconfigure l'onduleur, que la panne soit « fausse » ou  
« réelle ».

Si l'un des six interrupteurs est encore en  
court-circuit, cela signifie que la procédure interne  
du circuit pilote n'a pas fonctionné. On précise que  
15 cette procédure interne consiste à ouvrir (ou inhiber)  
automatiquement l'interrupteur (procédure très  
localisée).

Il s'agit alors du véritable mode critique  
qu'il faut diagnostiquer le plus rapidement possible.  
20 Le diagnostic peut être établi par le superviseur 12 en  
observant le courant dans la phase défectueuse, courant  
qui est censé s'annuler durablement (après le blocage  
de l'onduleur), alors que dans ce cas de panne, ce  
courant devient incontrôlable et peut atteindre de  
25 fortes valeurs (supérieures au courant nominal).

L'observation du courant dans la phase  
défectueuse peut être faite au moyen des capteurs de  
courants des phases qui sont nécessaires au  
fonctionnement nominal.

30 Une fois le diagnostic correctement établi,  
il faut que le superviseur commande l'isolement du bras

défaillant, contrôle que cet isolement a bien eu lieu et enfin reconfigure l'onduleur à l'aide du bras redondant R.

Ce processus pose deux problèmes  
5 importants :

1) Pour le superviseur, il faut traduire le fait qu'un courant « s'annule durablement ». Cet élément est nécessaire au diagnostic, mais très difficile à traduire de façon quantitative pour les  
10 raisons suivantes :

a) Au début du blocage, les moyennes instantanées des courants sont non nulles. Donc le test ne peut avoir lieu à ce moment-là. Il est très difficile d'évaluer au bout de combien de temps un  
15 diagnostic devient valide.

b) A cause du bruit des capteurs de courant, qui sont placés à proximité des cellules de commutation B1, B2, B3, et prévus pour le fonctionnement nominal, on ne peut pas espérer réaliser  
20 un test d'annulation qui soit simple ; sinon, il faut calibrer des marges autour de zéro, marges qui peuvent fausser le diagnostic dans certains cas.

c) Le mot « durablement » pose un problème : la durée du diagnostic doit être la plus  
25 courte possible, mais doit être également suffisamment longue pour avoir un degré de confiance élevé.

2) Une fois le diagnostic établi et la décision de reconfigurer l'onduleur prise, il faut pouvoir isoler la phase en défaut à l'aide des  
30 interrupteurs de sectionnement correspondants (à titre d'exemple, il s'agit des interrupteurs S11 et S12 si la

phase  $\varphi_1$  est défectueuse). Or, ces interrupteurs n'ont aucun pouvoir de coupure. Autrement dit, ils ne peuvent s'ouvrir que lorsque le courant qui les traverse est nul. Or, en position « onduleur bloqué », rien ne  
5 garantit le passage par zéro des courants dans la phase en défaut. Ceci est dû aux aimants permanents du moteur qui peuvent entretenir le régime de défaut.

La présente invention vise à résoudre ces deux problèmes.

10 Dans l'invention, pour apprécier si le courant dans la phase en défaut « s'annule durablement », on surveille la valeur intégrale de la valeur absolue du courant dans la phase en défaut. Cela permet de filtrer non seulement le régime transitoire  
15 du début du diagnostic lors du blocage de l'onduleur, mais aussi les bruits de mesure du courant.

De plus, il est avantageux de comparer cette valeur intégrale à un seuil prédéfini. Cela permet de réaliser un diagnostic rapide, sans « fenêtre  
20 glissante » de surveillance et sans avoir à déterminer une date précise de diagnostic. Sinon, cette date de diagnostic devrait être plusieurs fois confirmée, afin d'avoir un niveau de confiance élevé dans la décision.

Autrement dit, grâce à la notion  
25 d'intégrale, le diagnostic n'est pas dépendant d'un instant de décision, ce qui évite d'avoir à fixer des marges de tolérance réductrices.

On explique ci-après comment on surveille la valeur intégrale de la valeur absolue du courant  
30 dans la phase en défaut.

Les valeurs instantanées des courants de phase sont disponibles dans les moyens électroniques de commande qui assurent le pilotage de l'onduleur car ces valeurs sont nécessaires au pilotage de l'onduleur.

5 De plus, réaliser l'intégrale d'une valeur absolue est une opération calculatoire qui est aisément implémentable dans le superviseur 12.

En outre, dans l'invention, pour être sûr que le courant dans la phase en défaut va s'annuler, on commande l'isolation d'une phase saine, dès la  
10 détection du défaut. Dès la demande de blocage de l'onduleur et avant même d'avoir terminé le diagnostic, on ouvre, grâce aux interrupteurs d'isolement, la première phase saine dont le courant passe par zéro. La  
15 loi des nœuds sur le point neutre N du moteur 14 et les variations des forces contre-électromotrices du moteur assurent alors le passage par zéro des courants dans les deux phases restantes, et ce de façon très rapide (moins d'un tour mécanique du moteur). D'ici là le  
20 diagnostic aura eu le temps d'être réalisé et cet instant où les courants s'annulent permettra l'isolation de la phase en défaut, puis la reconfiguration et le redémarrage du système.

Une illustration temporelle du procédé mis  
25 en oeuvre dans l'exemple de l'invention, que l'on a décrit, est donnée par la figure 3.

Sur cette figure 3, le temps  $t$  est compté en abscisse et exprimé en millisecondes. Dans la partie A de la figure 3, les intensités  $i$  des courants  
30 considérés sont portées en ordonnée et exprimées en ampères.

Sur cette partie A, on a représenté les trois courants  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$  qui sont fournis par l'onduleur de la figure 2 et qui circulent dans les connexions du moteur 14. On suppose qu'un court-circuit  
5 apparaît dans le bras B1 de l'onduleur, à un instant  $t_0=30$  ms après l'instant choisi comme origine sur la figure 3.

La partie B de la figure 3 représente les variations  $I$  (en A.ms) de la valeur intégrale de la  
10 valeur absolue du courant dans la phase en défaut ( $\phi_1$  dans l'exemple) en fonction du temps  $t$ . La ligne en pointillés  $S$  correspond au seuil prédéfini, mentionné plus haut.

L'instant  $t_0+500$  ns (environ) correspond à  
15 l'instant en lequel le circuit-pilote est alerté de l'apparition du court-circuit dans le bras B1 de l'onduleur et en lequel l'onduleur est bloqué.

L'instant  $t_1$  peu différent de 31 ms correspond à l'annulation du courant ( $i_2$  dans l'exemple  
20 représenté) dans l'une des deux phases saines, et à l'isolement de cette phase.

L'instant  $t_2$  peu différent de 32 ms correspond à l'instant en lequel l'intégrale  $I$  dépasse la valeur du seuil  $S$ .

25 L'instant  $t_3$  peu différent de 43 ms correspond à l'instant en lequel le courant dans la phase défaillante s'annule, cette phase est isolée, et la connexion des bras sains B2, B3 et du bras redondant R a lieu.

30 On mentionne dans ce qui suit des avantages de la présente invention :

1) Le procédé utilisé dans l'invention permet l'isolation du défaut (ce défaut ne se propage pas), le diagnostic, la reconfiguration et enfin la remise en fonctionnement du système formé par l'onduleur et le moteur.

2) Le procédé fonctionne en temps réel sur le système, ce qui implique une excellente réactivité et permet, par exemple, une poursuite quasiment sans interruption de la mission d'un engin spatial comportant un tel système ; en effet, la procédure dure typiquement entre 5 ms et 50 ms pour des applications aux servogouvernes spatiales.

3) Le principe du procédé est très simple. Il ne nécessite ni d'importantes ressources informatiques, ni d'outils mathématiques complexes.

4) Il conduit à une augmentation significative de la fiabilité d'un convertisseur de courant continu en courant alternatif triphasé, destiné à alimenter une machine synchrone à aimants permanents : le taux de pannes horaire est environ divisé par 100.

5) Parmi toutes les solutions proposées pour améliorer la fiabilité des onduleurs triphasés, l'invention présente l'un des meilleurs compromis surcoût/performances.

6) Contrairement à beaucoup d'autres solutions connues pour résoudre ce problème, avec l'invention le régime de fonctionnement après reconfiguration est identique au régime initial. Autrement dit, le régime de secours n'est pas « dégradé ».

7) Les exemples que l'on a donné de l'invention peuvent être étendus à volonté pour être tolérant au nombre de pannes souhaité. Le procédé est inchangé : il suffit d'ajouter d'autres bras  
5 redondants, montés en parallèle avec le bras R de la figure 2.

8) Le processus exposé est « transparent » pour toutes les boucles d'asservissement que comportent les lois de pilotage de l'ensemble convertisseur-  
10 moteur. On entend par là que ce procédé n'impose aucune modification de ces lois de pilotage.

9) Le processus exposé n'implique ni un surdimensionnement, ni une modification de conception du moteur. Par exemple, beaucoup de processus connus  
15 dans ce domaine nécessitent l'accès physique au point neutre N du moteur, ce qui n'est pas le cas dans l'invention.

10) Ce processus ne nécessite aucun capteur physique supplémentaire, propre à sa mise en oeuvre :  
20 ce processus utilise simplement des capteurs qui font classiquement partie des ensembles connus onduleur-moteur triphasé synchrone à aimants permanents, à savoir les capteurs de courant des phases du moteur et le capteur de position du moteur.

25 11) La reconfiguration de l'onduleur est réversible : la présente invention n'utilise aucun élément à usage unique tel qu'un fusible. Cela permet de vérifier que la redondance est opérationnelle lors de tests fonctionnels.

30 Afin de faciliter les opérations de maintenance, l'ensemble onduleur-moteur est

avantageusement prévu pour fournir automatiquement des informations sur son état : ainsi, aucun diagnostic n'est à prévoir de la part d'un opérateur pour savoir si la redondance a été consommée. Afin de fournir ces  
5 informations, le superviseur est muni d'une mémoire logicielle qu'il peut partager avec d'autres logiciels qui sont responsables de la maintenance.

**REVENDICATIONS**

1. Onduleur de tension reconfigurable (10),  
à tolérance de pannes, destiné à alimenter un moteur  
5 triphasé synchrone à aimants permanents (14),  
l'onduleur comprenant :
- des première à troisième cellules de  
commutation (B1, B2, B3) comprenant chacune :
    - deux dispositifs de commutation (B11-  
10 B12, B21-B22, B31-B32) montés en série, et
    - deux dispositifs d'isolement (S11-  
S12, S21-S22, S31-S32),
  - au moins une quatrième cellule de  
commutation (R), constituant une cellule de redondance,  
15 et
  - un organe de gestion de redondance (12),  
adapté pour
    - détecter une anomalie de  
fonctionnement de l'onduleur, anomalie qui conduit à  
20 l'arrêt du moteur, qui résulte d'une défaillance de  
l'une des première à troisième cellules de commutation  
et qui induit un défaut de l'une des phases du moteur,
    - isoler la cellule de commutation  
défaillante,
    - 25 • déterminer la cause de la  
défaillance, et
    - commander une remise en marche du  
moteur ou une reconfiguration de l'onduleur, adaptée à  
l'anomalie détectée,
    - 30 dans lequel chaque dispositif de  
commutation est adapté pour informer l'organe de

gestion de redondance (12) d'un court-circuit affectant ce dispositif de commutation, et dans lequel l'organe de gestion de redondance est en outre adapté pour surveiller la valeur intégrale (I) de la valeur absolue du courant dans la phase défectueuse.

2. Onduleur selon la revendication 1, dans lequel

- dans les première à troisième cellules de commutation, les deux dispositifs de commutation montés en série ont chacun des première et deuxième bornes, les premières bornes ayant un point commun (P1, P2, P3), destiné à être connecté à l'une des trois phases du moteur (14), et les deux dispositifs d'isolement ont chacun des première et deuxième bornes, les premières bornes étant destinées à être connectées respectivement aux deux bornes d'une source de tension continue (16), les deuxième bornes étant connectées respectivement aux deuxième bornes des dispositifs de commutation associés, et

- la quatrième cellule de commutation (R), constituant une cellule de redondance, comprend :

• deux dispositifs de commutation (R1, R2) montés en série, ayant chacun des première et deuxième bornes, les premières bornes ayant un point commun (P4), les deuxième bornes étant destinées à être respectivement connectées aux deux bornes de la source de tension continue (16), et

• trois dispositifs de connexion ayant chacun des première et deuxième bornes, les premières bornes étant connectées au point commun (P4)

correspondant à la quatrième cellule de commutation, chacune des deuxièmes bornes étant destinée à être connectée à l'une des trois phases du moteur (14).

5                   3. Onduleur selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, dans lequel l'organe de gestion de redondance (12) est en outre adapté pour comparer la valeur intégrale surveillée (I) à un seuil prédéfini (S).

10

                  4. Onduleur selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel l'organe de gestion de redondance (12) est en outre adapté pour commander l'isolation électrique de l'une des deux phases du  
15   moteur, qui est exempte de défaut, dès la détection du défaut.

                  5. Onduleur selon la revendication 4, dans lequel l'organe de gestion de redondance (12) est en  
20   outre adapté pour commander l'ouverture de la première des deux phases exemptes de défaut, dont le courant passe par zéro.

                  6. Onduleur selon l'une quelconque des  
25   revendications 1 à 5, dans lequel l'organe de gestion de redondance (12) est en outre adapté pour commander la reconfiguration de l'onduleur (10) dès qu'un nombre prédéfini de remises en marche du moteur (14) est atteint.

30

7. Ensemble onduleur-moteur triphasé synchrone à aimants permanents, tolérant aux pannes, comprenant :

- l'onduleur (10) selon l'une quelconque  
5 des revendications 1 à 6, et
- un moteur triphasé synchrone à aimants permanents (14), alimenté par l'onduleur.

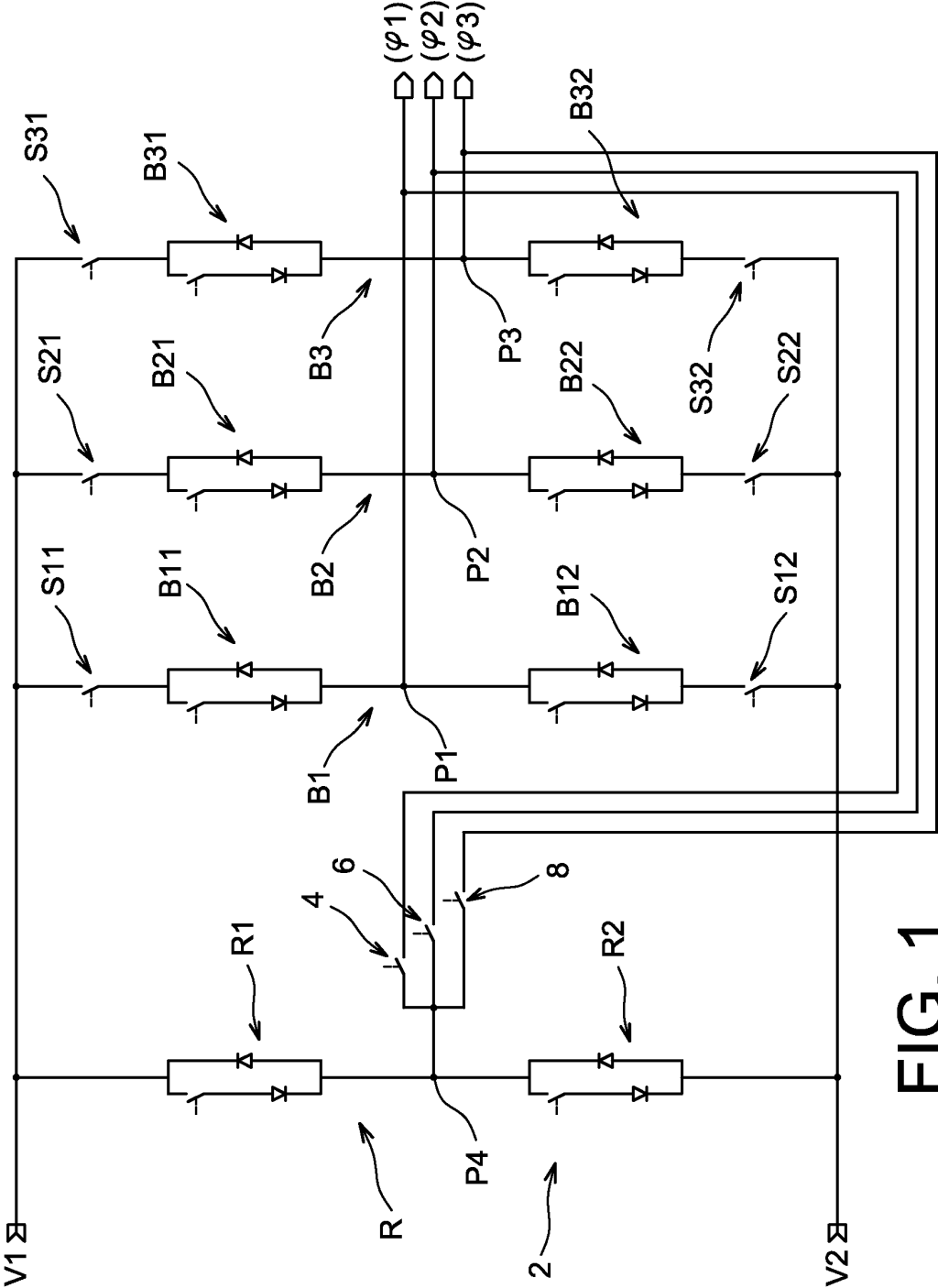
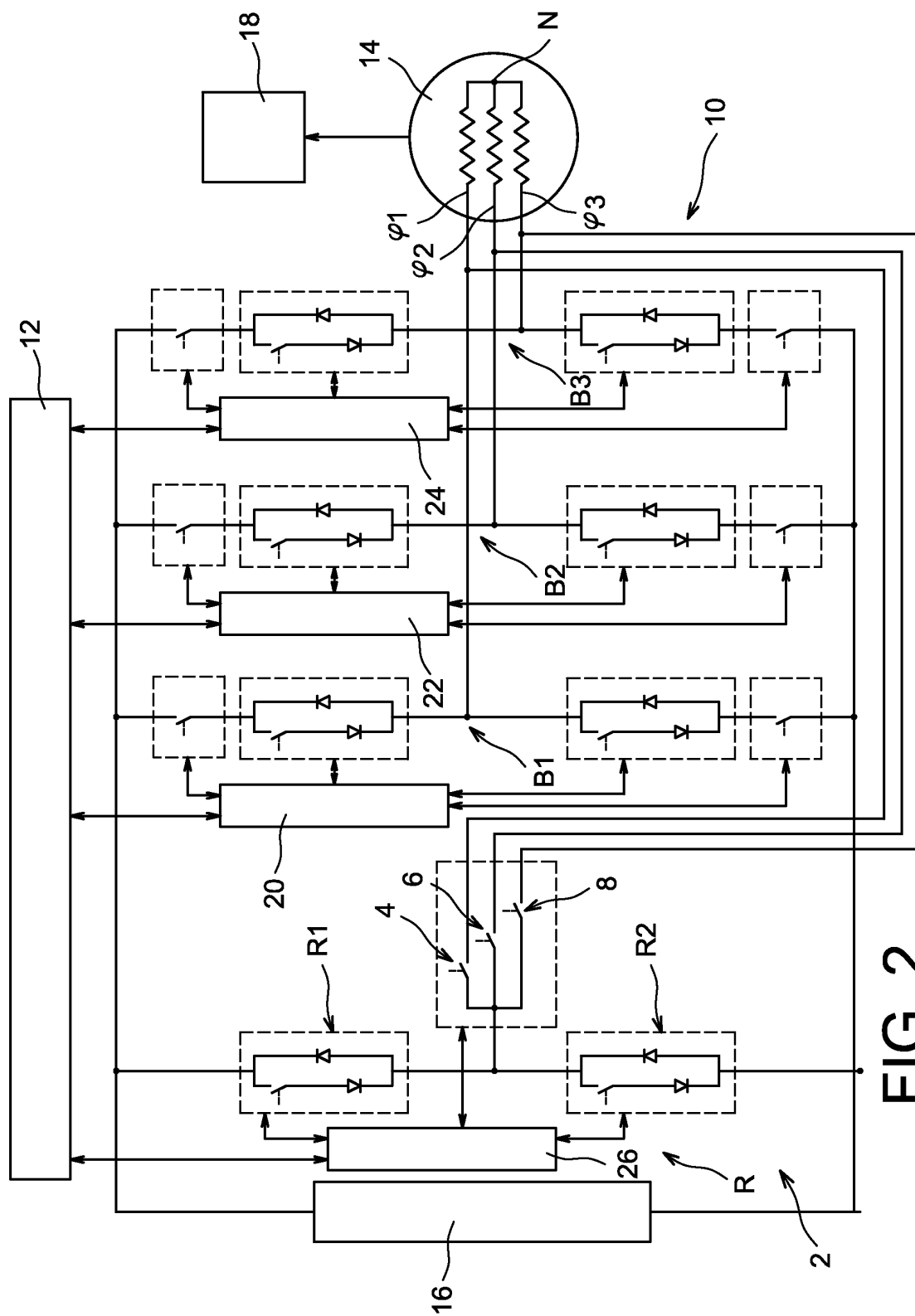
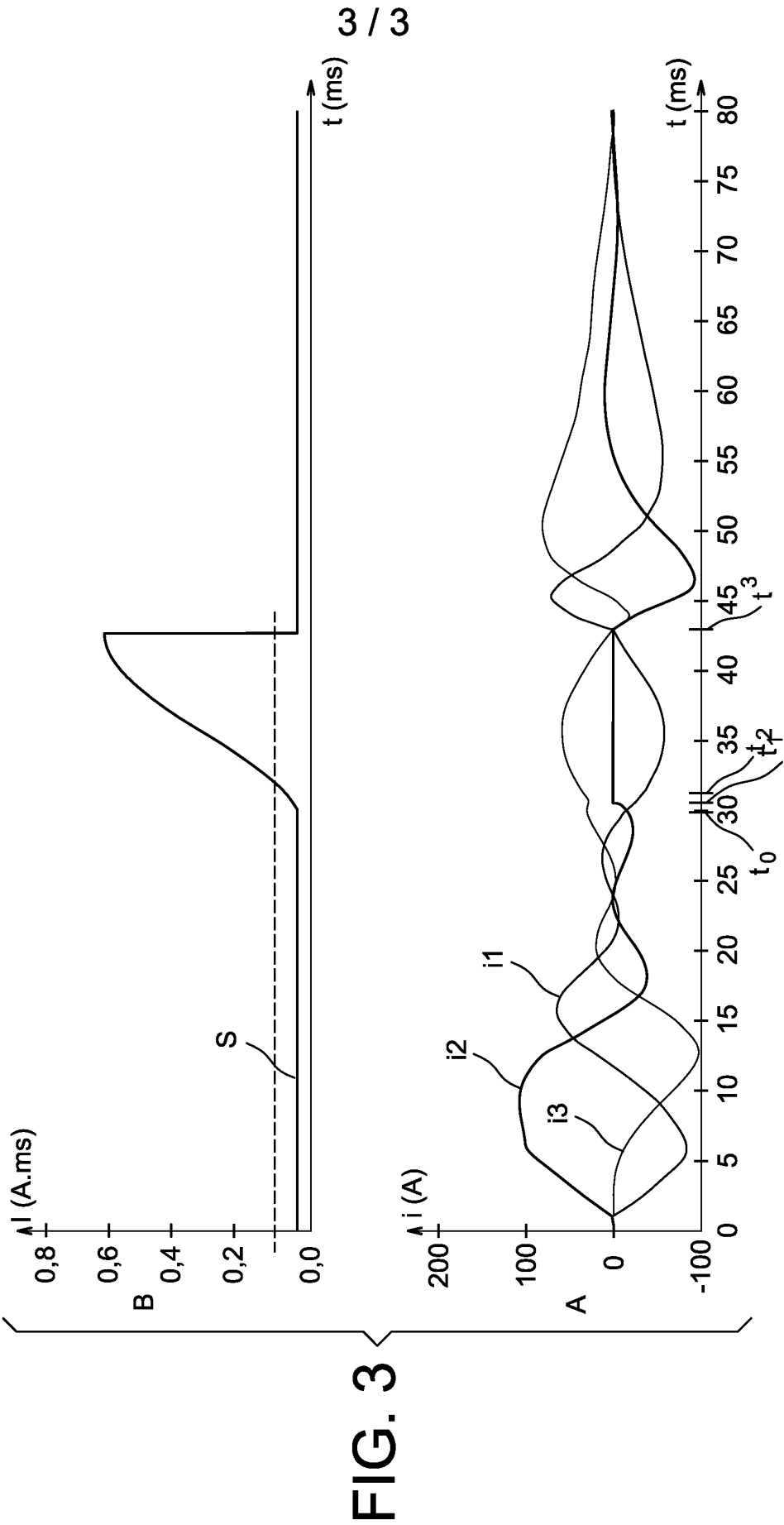


FIG. 1



## FIG. 2





# RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement  
national

FA 730460  
FR 0959367

| DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Revendication(s)<br>concernée(s) | Classement attribué<br>à l'invention par l'INPI             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Catégorie                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Citation du document avec indication, en cas de besoin,<br>des parties pertinentes                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                  |                                                             |
| X,D                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | FR 2 892 243 A1 (AIRBUS FRANCE SAS [FR];<br>CENTRE NAT RECH SCIENT [FR]; TOULOUSE INST<br>NAT) 20 avril 2007 (2007-04-20)                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 1,3-7                            | H02M1/32<br>H02M7/48<br>H02H7/122                           |
| Y                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | * page 11, ligne 17 - ligne 27 *<br>* page 12, ligne 4 - ligne 13 *<br>* page 13, ligne 25 - page 14, ligne 4 *<br>* page 14, ligne 27 - page 15, ligne 4 *<br>* page 15, ligne 15 - page 16, ligne 19 *<br>* page 20, ligne 27 - page 21, ligne 2 *<br>* figure 1B *                                                                                                                                              | 2                                |                                                             |
| Y,D                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | -----<br>Jérôme Mavier: "Convertisseur génériques<br>à tolérance de panne, applications pour le<br>domaine aéronautique"[Online]<br>22 mars 2007 (2007-03-22), pages 1-195,<br>XP002594900<br>Toulouse<br>L'Institut National Polytechnique de<br>Toulouse<br>Extrait de l'Internet:<br>URL:http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive<br>/00000534/01/mavier.pdf><br>[extrait le 2010-07-29]<br>* page 76 - page 77 * | 2                                | DOMAINES TECHNIQUES<br>RECHERCHÉS (IPC)<br><br>H02M<br>H02H |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | -----<br>US 5 491 622 A (CAROSA PAUL F [US])<br>13 février 1996 (1996-02-13)<br>* page 2, ligne 21 - page 3, ligne 44 *<br>* figure 2 *                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1                                |                                                             |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | -----<br>RICARDEAU F ET AL: "Fault-tolerant<br>inverter for on-board aircraft EHA"<br>EUROPEAN CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS<br>AND APPLICATIONS, 2007, XP002594901 DOI:<br>10.1109/EPE.2007.4417537<br>* le document en entier *                                                                                                                                                                                | 1                                |                                                             |
| Date d'achèvement de la recherche                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Examineur                        |                                                             |
| 2 août 2010                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Roider, Anton                    |                                                             |
| <p>CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul<br/>Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un<br/>autre document de la même catégorie<br/>A : arrière-plan technologique<br/>O : divulgation non-écrite<br/>P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention<br/>E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure<br/>à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date<br/>de dépôt ou qu'à une date postérieure.<br/>D : cité dans la demande<br/>L : cité pour d'autres raisons<br/>&amp; : membre de la même famille, document correspondant</p> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                  |                                                             |

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE**  
**RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 0959367 FA 730460**

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 **02-08-2010**  
 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<br>au rapport de recherche | Date de<br>publication | Membre(s) de la<br>famille de brevet(s) | Date de<br>publication |
|-------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------------|------------------------|
| FR 2892243 A1                                   | 20-04-2007             | US 2007086226 A1                        | 19-04-2007             |
| US 5491622 A                                    | 13-02-1996             | AUCUN                                   |                        |