



(43) Date de la publication internationale
24 mars 2016 (24.03.2016)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2016/041767 A1

(51) Classification internationale des brevets :
F03G 3/08 (2006.01) *H02K 7/02* (2006.01)
F16F 15/305 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2015/069870

(22) Date de dépôt international :
31 août 2015 (31.08.2015)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
14 58701 16 septembre 2014 (16.09.2014) FR

(71) Déposant : IFP ENERGIES NOUVELLES [FR/FR]; 1
& 4 avenue du Bois-Préau, F-92852 Rueil-Malmaison
(FR).

(72) Inventeur : ODRU, Pierre; 0187 Rue Lenain de Tille-
mont, F-93100 Montreuil (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM,

AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR,
KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG,
MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM,
PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC,
SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN,
TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH,
GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ,
TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU,
TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE,
DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU,
LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK,
SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ,
GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

(54) Title : INERTIAL ENERGY STORAGE SYSTEM COMPRISING A DISK MADE OF A COMPOSITE MATERIAL

(54) Titre : SYSTÈME INERTIEL DE STOCKAGE D'ÉNERGIE COMPORTANT UN DISQUE EN MATÉRIAU COMPOSITE

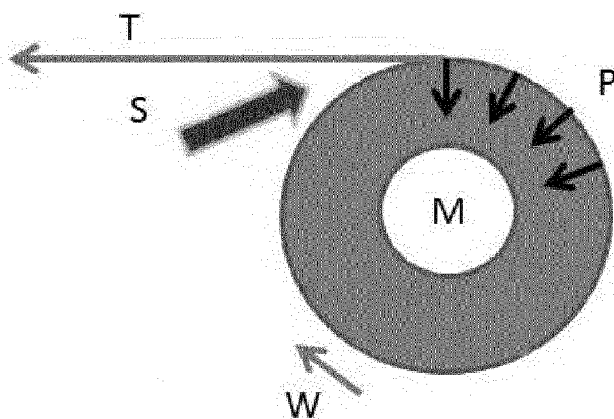


FIG. 4

(57) Abstract : Inertial energy storage system comprising a disk made of a composite material. The disk of the inertial energy storage system is formed by winding at least one ribbon around a hub, said ribbon consisting of a composite material with a thermohardenable matrix, each layer formed in this way being subjected to prestress under radial compression determined according to the radial stress acceptable during operation. The prestress under radial compression can be created by the tensioned winding of the composite ribbon. Each new layer consisting of a composite material with a thermohardenable matrix is welded to the layers that have already been deposited. The invention is especially applied to the field of energy storage in on-board applications.

(57) Abrégé : - Système inertielle de stockage de l'énergie comportant un disque fabriqué dans un matériau composite. - Le disque du système inertielle de stockage d'énergie est formé par l'enroulement autour d'un moyeu d'au moins un ruban constitué d'un matériau composite à matrice thermodurcissable, chaque couche ainsi formée étant soumise à une précontrainte en compression radiale déterminée en fonction de la contrainte radiale acceptable en service. La précontrainte en compression radiale peut être créée par l'enroulement sous tension du ruban de composite. Chaque nouvelle couche en matériau composite à matrice thermo-

durcissable est soudée aux couches déjà déposées. - Application notamment au domaine du stockage de l'énergie en application embarquée.

SYSTEME INERTIEL DE STOCKAGE D'ENERGIE COMPORTANT UN DISQUE EN MATERIAU COMPOSITE

La présente invention concerne le domaine du stockage de l'énergie en application
5 embarquée, ou non embarquée.

En particulier, l'invention concerne le stockage de l'énergie cinétique et sa restitution, via un volant d'inertie, aussi appelé système inertiel de stockage d'énergie (SISE). Appliqué de préférence aux véhicules terrestres, l'énergie peut être emmagasinée lors du freinage,
10 pour être restituée lors de l'accélération, permettant ainsi une meilleure gestion de la consommation énergétique. Mais elle peut aussi concerner le service au réseau électrique, où l'injection de puissance peut s'avérer nécessaire pour accorder rapidement les variations de l'offre et de la demande.

Un volant d'inertie est constitué d'une masse, entraînée par un moteur. L'énergie
15 fournie par le moteur permet de faire tourner la masse. Une fois lancée, la masse continue à tourner, même si le moteur ne l'alimente plus. C'est cette énergie cinétique que le volant d'inertie va stocker. L'accumulation de cette énergie et sa restitution peuvent se faire directement sous forme mécanique ou par transformation en électricité via un moteur
20 générateur et un système de contrôle commande. Si on les compare par exemple à des batteries électrochimiques (permettant de stocker de l'énergie électrique), les volants d'inertie peuvent accumuler et restituer de l'énergie rapidement, un très grand nombre de fois, mais en moins grande quantité. De ce fait, les volants d'inertie sont généralement utilisés pour répondre à des appels de puissance ponctuels.

25 L'énergie emmagasinée dans un volant d'inertie, caractérisé par un disque de rayon R et de masse m, est donnée par la formule suivante :

$$E_c = \frac{1}{2} m R^2 \omega^2 \quad (1)$$

où E_c est l'énergie cinétique, ω est la vitesse de rotation du volant. On observe donc que
30 l'énergie cinétique emmagasinée varie avec le carré du rayon du disque en rotation et avec le carré de sa vitesse angulaire, ce qui inciterait à fabriquer des disques de grand rayon.

Le dimensionnement d'un volant d'inertie doit toutefois tenir compte de la tenue mécanique du disque en rotation : au-delà d'une certaine vitesse de rotation, l'intégrité du volant n'est plus assurée. En effet, le disque subit une contrainte circonférentielle, résultant de la force centrifuge créée par la rotation d'un disque, et donnée par la formule suivante :

$$\sigma = \rho \omega^2 R^2 \quad (2)$$

où ρ est la masse volumique du matériau. Si cette contrainte circonférentielle devient supérieure à la contrainte maximale que le matériau peut supporter, il y a alors rupture du matériau. Ainsi, si $\sigma_{\max}$ est la contrainte circonférentielle maximale admissible pour le matériau constitutif du volant d'inertie, on a alors :

$$E_c = \frac{1}{2} m \frac{\sigma_{\max}}{\rho} \quad \text{ou encore} \quad \frac{E_c}{m} = \frac{\sigma_{\max}}{2\rho} \quad (3)$$

Cette relation indique que l'énergie emmagasinée dans le matériau (rapportée au poids) est proportionnelle à sa résistance mécanique et inversement proportionnelle à sa masse volumique, ce qui favorise les matériaux légers, à haute résistance mécanique. De plus dans le cas d'une application de volant d'inertie pour des véhicules, la légèreté et la compacité sont des qualités primordiales.

Les matériaux composites, réalisés à partir de fibres de verre, de carbone, ou d'aramide, et enrobés dans une matrice de résine (Figure 1), répondent à ces exigences de résistance mécanique et de légèreté. Ainsi, l'utilisation de ces matériaux pour la fabrication d'un volant d'inertie permet d'atteindre des vitesses théoriques très élevées, et donc d'emmagasiner des quantités d'énergie plus importantes.

Un volant d'inertie opérationnel en matériau composite est un ensemble complexe faisant appel à de nombreuses technologies. Seul le disque en rotation, sa conception et ses propriétés sont l'objet de la présente invention.

La Figure 2 montre un exemple de disque d'un volant d'inertie. Le disque d'un volant d'inertie fabriqué en matériau composite est généralement formé d'une succession de couches concentriques bobinées, chaque couche étant formée de fibres synthétiques (F),

caractérisées par leur distance radiale à l'axe de rotation (r), enroulées circonférentiellement autour d'un moyeu (M) selon un axe de rotation (A), et maintenues entre elles et sur le moyeu par une matrice en résine. Un disque d'un volant d'inertie est donc généralement évidé en son centre et décrit par un rayon intérieur (R_1) et un rayon extérieur (R_2), la différence entre ces deux rayons étant appelée épaisseur dans la direction du rayon (e). A noter qu'un disque d'un volant d'inertie peut être plus ou moins épais (E) suivant l'axe de rotation.

Cet enroulement des fibres d'un disque engendre une anisotropie de la résistance mécanique lorsque de tels disques sont mis en rotation. Plus précisément, les caractéristiques de résistance mécanique de tels disques soumis à un mouvement rotatif sont très différentes suivant que l'on se situe dans l'axe des fibres qui les constituent (direction circonférentielle DC dans la Figure 1), ou dans l'axe transverse (direction radiale DR dans la Figure 1), où les fibres parallèles sont liées par une matrice de résine beaucoup moins résistante.

Les calculs des contraintes induites dans un disque en rotation rapide tenant compte de cette anisotropie sont bien connus des spécialistes et peuvent être réalisés de différentes manières, incluant des méthodes par éléments finis ou en utilisant l'équation d'équilibre des efforts du disque en rotation résolue en anisotropie. On pourra par exemple se référer au document suivant :

Kauv, J., Bonal, J., Odru, P., Stockage inertiel de l'énergie, § 2.2, 2.3 et 2.4, Techniques de l'Ingénieur, D 4 030v2.

Ainsi, en résolvant l'équation différentielle d'équilibre d'un disque dans le cas anisotrope et en supposant que le cisaillement peut être négligé, on obtient les expressions suivantes pour la contrainte radiale σ_r et la contrainte circonférentielle σ_θ :

$$\sigma_r = \lambda r^{\alpha-1} (\alpha C_{rr} + C_{r\theta}) + \mu r^{-\alpha-1} (-\alpha C_{rr} + C_{r\theta}) - \frac{\rho \omega^2 r^2}{(9 - \alpha^2) C_{rr}} (3C_{rr} + C_{r\theta}) \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = \lambda r^{\alpha-1} (\alpha C_{\theta r} + C_{\theta\theta}) + \mu r^{-\alpha-1} (C_{\theta\theta} - \alpha C_{\theta r}) - \frac{\rho \omega^2 r^2}{(9 - \alpha^2) C_{rr}} (3C_{\theta r} + C_{\theta\theta})$$

où r est le rayon du disque, avec $C_{rr} = \frac{E_r}{1-\nu_{\theta r}\nu_{r\theta}}$, $C_{r\theta} = C_{\theta r} = \frac{\nu_{r\theta}E_{\theta}}{1-\nu_{\theta r}\nu_{r\theta}}$, $C_{\theta\theta} = \frac{E_{\theta}}{1-\nu_{\theta r}\nu_{r\theta}}$,

et où E est le module d'Young anisotrope, ν est le coefficient de Poisson anisotrope,

$\alpha = \sqrt{\frac{C_{\theta\theta}}{C_{rr}}}$, et λ et μ sont des constantes à déterminer en fonction des conditions aux limites

du disque (généralement contraintes radiales au droit des rayons intérieurs et extérieurs nulles).

La Figure 3 présente l'évolution de la contrainte circonférentielle (σ_{θ}) et de la contrainte radiale (σ_r) en fonction de la distance à l'axe de rotation (r) du disque, dans le cas d'un disque de rayon intérieur de 30 cm et de rayon extérieur 60 cm, tournant à une vitesse de 500 radians par seconde. On constate sur cette figure que la contrainte circonférentielle est plus élevée que la contrainte radiale. Mais la résistance mécanique des fibres étant généralement très supérieure à celle de la matrice, ceci n'est pas un facteur dimensionnant. On constate également que la contrainte radiale est maximale sur le rayon moyen du disque. Cette valeur maximale est alors à comparer avec la contrainte maximale radiale supportable par la résine utilisée pour fabriquer le disque. Or la contrainte radiale qui peut être supportée par la résine est généralement faible, et facilement atteignable pour un disque en matériau composite d'un volant d'inertie en service (c'est-à-dire lorsque le disque du volant d'inertie est mis en rotation).

Par conséquent, il est important, afin d'éviter des ruptures catastrophiques, de trouver des solutions permettant à la matrice de supporter cette traction importante.

Les contraintes induites radialement dans la matrice sont très dépendantes de l'épaisseur du disque dans la direction du rayon (différence entre le rayon extérieur et le rayon intérieur) en rotation, et croissent rapidement en fonction de celle-ci. Le disque doit donc être dimensionné relativement mince dans le sens de son rayon. Mais il en résulte alors une moindre performance en termes d'énergie disponible, à épaisseur constante suivant l'axe de rotation du disque.

Etat de la technique

Des solutions visant à limiter la fragilité d'un volant d'inertie fabriqué en matériau composite mis en rotation rapide ont été proposées dans l'art antérieur.

Une solution peut consister à disposer un premier bobinage intérieur en fibres de verre, sur lequel on vient bobiner des fibres de carbone. Le composite verre, plus lourd et moins raide que le composite carbone, va venir créer une pression à l'interface qui va contrarier quelque peu la traction dans la matrice.

Les documents US4996016A et US4187738A proposent d'appliquer des précontraintes en compression dans l'épaisseur (dans la direction du rayon) du composite, de manière à améliorer le comportement mécanique du volant d'inertie et à mieux utiliser son potentiel. Dans les deux cas, les procédés décrits utilisent des matrices en résines dites thermodurcissables. Les matrices thermodurcissables nécessitent une opération de polymérisation par cuisson afin de leur donner leur forme définitive. Dans le cas de la fabrication du disque d'un volant d'inertie suivant le brevet US4187738A, l'utilisation d'une résine thermodurcissable oblige à procéder à une opération de polymérisation en température, entre chacune des fabrications des couches d'un disque d'un volant d'inertie. De plus, lors de cette cuisson, la résine thermodurcissable devient liquide et s'essore, rendant le maintien de la précontrainte aléatoire.

Dans un tout autre domaine, celui des canalisations destinées à transporter des fluides sous pression, le document US4514245A propose une solution de renforcement de tube en acier par un composite à matrice thermoplastique enroulé sous tension et soudé sur lui-même. Cette technologie permet, en mettant en compression le tube en acier, d'augmenter de manière substantielle sa capacité à répondre à une augmentation de pression en mobilisant une plus grande plage de la réserve élastique de l'acier.

La présente invention concerne un système inertiel de stockage et de restitution de l'énergie comprenant un disque en matériau composite. Selon l'invention, ledit disque est fabriqué en exploitant un procédé alternatif de résorption des contraintes de tractions

radiales naissant dans un disque d'un volant d'inertie fabriqué en matériaux composites mis en rotation rapide, en utilisant sur tout ou partie de l'enroulement circonférentiel un composite à matrice thermoplastique, enroulé de façon à créer une précontrainte en compression radiale venant contrarier les contraintes liées à la rotation.

5

Le procédé selon l'invention

10 Ainsi, la présente invention concerne un système inertiel de stockage d'énergie comportant au moins un disque en rotation, ledit disque étant formé par l'enroulement autour d'un moyeu d'au moins un ruban constitué d'un matériau composite, ledit composite étant formé de fibres enrobées dans une matrice, ledit enroulement formant une série de couches concentriques. Le système comporte au moins les caractéristiques suivantes :

- ladite matrice dudit composite dudit ruban est de nature thermoplastique ;
- 15 - ladite couche est soumise à une précontrainte en compression radiale déterminée en fonction de la contrainte radiale acceptable en service par ledit composite ;
- ledit ruban est soudé sur lesdites couches sous-jacentes.

20 Selon un mode préféré de mise en œuvre de la présente invention, ladite couche peut être soumise à ladite précontrainte par enroulement sous tension dudit ruban de composite

Préférentiellement, ladite soudure peut être une soudure thermique.

25 Selon un mode de mise en œuvre de la présente invention, ladite contrainte radiale acceptable en service peut correspondre à la contrainte radiale maximale supportable par ladite matrice, pondérée par un coefficient de sécurité compris entre 0 et 1.

Préférentiellement, ledit coefficient de sécurité est inférieur à 0.8.

30 Selon un mode de mise en œuvre de la présente invention, au moins lesdites couches formant la moitié la plus externe dudit disque peuvent être soumises à ladite précontrainte.

Selon un autre mode de mise en œuvre de la présente invention, au moins une couche en contact avec ledit moyeu peut être soumise à ladite précontrainte.

35

Selon un mode particulier de mise en œuvre de la présente invention, l'ensemble desdites couches peut être soumis à ladite précontrainte.

Avantageusement, lesdites fibres peuvent être de nature minérale.

5

Préférentiellement, lesdites fibres peuvent être choisies parmi le verre, le carbone et l'aramide.

10 Selon un mode particulier de mise en œuvre de la présente invention, lesdites couches peuvent comporter des fibres de nature différente.

Selon un mode préféré de mise en œuvre de la présente invention, lesdites couches peuvent être soumises à des valeurs de précontraintes radiales différentes en fonction de leur distance radiale.

15

On peut définir un procédé de fabrication d'un système inertiel de stockage d'énergie comportant au moins un disque en rotation, en réalisant au moins les étapes suivantes :

20

- on forme ledit disque par l'enroulement autour d'un moyeu d'au moins un ruban constitué d'un matériau composite de fibres enrobées dans une matrice thermoplastique, ledit enroulement formant des couches successives,
- on soumet, au moins une couche dudit disque, à une précontrainte en compression radiale déterminée en fonction de la contrainte radiale acceptable en service par ledit composite, ledit ruban de ladite couche étant soudé aux couches sous-jacentes.

25

Selon un mode préféré de mise en œuvre du procédé selon invention, on peut appliquer ladite précontrainte par tension sur le ruban, en cours d'enroulement.

30

Préférentiellement, ledit ruban peut être soudé par mise en fusion de ladite matrice thermoplastique.

En outre, l'invention concerne un véhicule comprenant au moins un système inertiel de stockage de l'énergie selon la description ci-dessus.

35

Par ailleurs, l'invention concerne un réseau de distribution de l'électricité comprenant au moins un système inertiel de stockage de l'énergie selon la description ci-dessus.

Présentation succincte des Figures

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

La Figure 1 illustre la composition d'un matériau composite, formé de fibres enrobées dans une matrice en résine.

10 La Figure 2 présente un exemple de disque d'un volant d'inertie fabriqué en matériau composite.

La Figure 3 présente l'évolution dans un disque en rotation rapide de la contrainte circonférentielle σ_θ et de la contrainte radiale σ_r , en fonction de la distance à l'axe de rotation.

15 La Figure 4 illustre la création de contraintes de compression radiale (P) par enroulement (W) sous tension (T) d'un ruban de composite sur un moyeu (M), ledit ruban étant soudé aux couches préexistantes par soudage (S).

20

Description détaillée du système

Ainsi la présente invention concerne un système inertiel de stockage de l'énergie, appelé aussi volant d'inertie, comportant au moins un disque en rotation formé par
25 l'enroulement, autour d'un moyeu, d'au moins un ruban constitué d'un matériau composite, l'enroulement formant une série de couches concentriques. Pour au moins une couche dudit disque, ledit ruban est formé de fibres enrobées dans une matrice thermoplastique. De plus, ladite couche est enroulée de sorte à générer une précontrainte en compression radiale déterminée en fonction de la contrainte de traction acceptable en service (c'est-à-dire
30 lorsque le disque est mis en rotation) par ledit composite. Par ailleurs, selon l'invention, le ruban de ladite couche est soudé sur les couches sous-jacentes.

Les caractéristiques principales de la présente invention sont détaillées ci-après.

a) Matrice thermoplastique

5

Le disque selon l'invention repose en particulier sur le fait qu'au moins une couche du disque d'un volant d'inertie est constituée d'un matériau composite dont les fibres sont enrobées dans une matrice thermoplastique.

10

L'utilisation d'une matrice thermoplastique permet de souder, couche par couche, instantanément, et en continu, les différentes couches de ruban de composite formant un disque. Selon l'invention, au moins une couche du disque du volant d'inertie est soudée aux couches déjà formées. Selon un mode de réalisation de la présente invention, au moins une couche du disque du volant d'inertie est fabriquée en soudant l'intérieur du ruban de matériau composite, constitué de fibres enrobées dans une matrice thermoplastique, sur le rayon extérieur du disque déjà fabriqué. L'assemblage de couches ainsi formé tient alors immédiatement.

15

Selon un mode de réalisation de la présente invention, la soudure est une soudure thermique.

20

Selon un mode de réalisation de la présente invention, au moins une couche du disque du volant d'inertie est fabriquée en soudant cette nouvelle couche au groupe de sous-couches déjà formées, à l'aide par exemple d'un chalumeau, pour faire fondre, par mise en fusion, la résine thermoplastique, et ainsi souder ladite nouvelle couche audit groupe de sous-couches.

25

Un avantage de la présente invention par rapport à l'art antérieur est apporté par le fait que, contrairement aux matrices thermodurcissables, une résine thermoplastique ne nécessite pas d'étape de polymérisation, longue et coûteuse en termes de dépense énergétique, pendant laquelle la résine est fluide et sans consistance mécanique. De plus, dans le cas du document US4514245A, une étape de polymérisation est appliquée pour chaque couche, entre chaque mise en précontrainte. Par ailleurs, la polymérisation peut rendre aléatoire le comportement de la pièce ainsi formée, après mise sous précontrainte. Et enfin, dans le domaine de canalisations fabriquées selon le document US4514245A,

30

l'utilisation d'un composite à matrice thermoplastique sous effort de précontrainte a montré d'excellentes caractéristiques de tenue dans le temps au fluage, à l'environnement, et à la fatigue.

5

b) Précontrainte en compression radiale

La présente invention repose en particulier sur le fait qu'au moins une couche du disque d'un volant d'inertie soit soumise à une précontrainte en compression radiale déterminée en fonction de la contrainte radiale acceptable en service par ledit composite. On entend par contrainte radiale acceptable en service une valeur de contrainte au plus égale à la contrainte radiale maximale supportable, c'est-à-dire avant rupture, par la matrice de résine. L'homme du métier a parfaite connaissance de la façon dont définir une valeur de contrainte radiale acceptable en service.

15

Cette caractéristique vise à améliorer le comportement sous contrainte radiale de la matrice de résine. En particulier, cette caractéristique vise à contrebalancer les contraintes radiales, de traction, qui naissent dans la matrice suite à une mise en rotation, permettant une répartition plus harmonieuse de ces contraintes. On exploite de cette façon la différence de contraintes induite par la force centrifuge entre l'intérieur et l'extérieur du disque mis en rotation. De plus, à dimension égale, le fait de diminuer les contraintes radiales dans la résine, voire de les annuler, permet d'augmenter la sécurité mais aussi la durée de vie du système.

20

Selon un mode de réalisation de la présente invention, la contrainte radiale acceptable en service correspond à la valeur de la contrainte radiale qui peut être supportée, avant rupture, par le matériau mis en rotation rapide, valeur à laquelle on applique un coefficient de sécurité compris entre 0 et 1.

25

Selon un mode préféré de réalisation de l'invention, le coefficient de sécurité est inférieur à 0.8. On définit ainsi une marge de sécurité, visant à éviter d'atteindre une contrainte totale trop proche de la valeur de rupture du matériau.

30

Selon un mode préféré de mise en œuvre de la présente invention, au moins une couche du disque d'un volant d'inertie est soumise à ladite précontrainte en compression par enroulement sous tension du ruban de composite.

5 Selon un mode particulier de mise en œuvre de la présente invention, la précontrainte en compression est créée par l'enroulement sous tension du ruban de composite pour au moins une couche du disque d'un volant d'inertie. Cette opération est aussi connue sous le terme de fretage.

10 Selon un mode particulier de réalisation de la présente invention, la tension T à exercer dans le ruban pour induire une précontrainte en compression radiale P sur une couche à fabriquer est donnée par la formule bien connue du spécialiste :

$$\frac{T}{el} = \frac{PR}{e},$$

dans laquelle l est la largeur du ruban, e est son épaisseur, et R est le rayon d'application.

15 On en déduit alors :

$$P = \frac{T}{lR}.$$

Cette pression P induit alors dans l'ensemble du disque un système de contraintes bien connu (contraintes de pression sur la paroi externe d'un tube épais, équations dites de Lamé), que l'on peut calculer en exprimant que, sur la frontière externe du disque, la
20 contrainte dans le sens radial σ_r (cf équation (4) ci-dessus) est égale à P .

Préférentiellement, la précontrainte en compression est obtenue par l'enroulement sous tension du ruban de composite, le ruban étant lui-même soudé à la couche précédemment formée. La Figure 4 illustre la création de contraintes de compression radiale
25 (P) par enroulement (W) sous tension (T) d'un ruban de composite sur un moyeu (M), ledit ruban étant soudé aux couches préexistantes par soudage (S).

Selon un mode de réalisation de la présente invention, l'opération de mise en tension des fibres peut être reproduite pour une couche supplémentaire, les effets s'additionnant
30 puisque l'on reste dans le domaine de l'élasticité.

Selon un mode de mise en œuvre de la présente invention, les couches formant le disque d'un volant d'inertie sont soumises à des valeurs de précontraintes radiales différentes en fonction de leur distance radiale (distance d'une couche donnée à l'axe de rotation du disque).

Ainsi, l'application d'une précontrainte en compression radiale permet une meilleure optimisation du potentiel du composite, ainsi qu'une amélioration significative des performances du volant, en terme d'énergie disponible. En particulier, le volant peut être rendu plus compact à énergie équivalente, ou embarquer plus d'énergie à dimension identique. Ou encore, à dimension équivalente, les performances en tenue dans le temps, et donc la sécurité, peuvent être augmentées.

Ainsi le système selon l'invention concerne un système de stockage inertiel de l'énergie dont le disque est constitué d'au moins une couche de matériau composite à base de matrice thermoplastique, cette couche étant soudée aux couches pré-existantes et soumise à une précontrainte en compression radiale afin de contrarier, lorsque le disque tourne, des contraintes de traction radiales préjudiciables car localisées dans la matrice de résine.

Variantes

Selon un mode préféré de réalisation de la présente invention, la moitié la plus externe du disque d'un volant d'inertie est formée de couches constituées de fibres enrobées dans une matrice thermoplastique, et sont soumises à une précontrainte en compression radiale. Un disque ainsi formé est caractérisé par une augmentation de la contrainte circonférentielle dans les couches externes du disque. Toutefois ces contraintes sont appliquées de manière à ne pas être critiques dans le dimensionnement du disque d'un volant d'inertie.

Selon un mode de réalisation de la présente invention dans lequel le volant est bobiné sur un moyeu métallique, au moins la couche de composite en contact avec ledit moyeu est

soumise à une précontrainte de compression radiale. En effet, le moyeu métallique, situé sur le rayon intérieur du composite, subit des contraintes liées aux efforts centrifuge. Etant sur un rayon suffisamment petit, les efforts sont supportables par le métal. Toutefois l'allongement du composite sous l'effet des contraintes centrifuges pour une vitesse de rotation donnée est bien supérieur à celui du métal au droit de leur liaison, même si le métal est du titane. Il en résulte des difficultés importantes de collage et des risques de désunion des deux pièces. Ainsi, le fait d'appliquer une précontrainte de compression radiale sur une partie suffisante de composite en contact avec le moyeu métallique permet de contribuer de manière très positive à la tenue du système en service, en évitant la désolidarisation des couches composites du moyeu.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, l'ensemble des couches du disque d'un volant d'inertie est soumis à une précontrainte en compression radiale.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, on applique une précontrainte de compression radiale pour toutes les couches de composite.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, les couches de composite sont soumises à des valeurs de précontraintes radiales différentes en fonction de leur distance radiale. Selon un mode particulier de mise en œuvre de l'invention, la précontrainte en compression radiale augmente avec la distance à l'axe de rotation.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, les fibres constituant le matériau composite sont de nature minérale. Selon un mode de réalisation de la présente invention, les fibres constituant le matériau composite sont choisies parmi le verre, le carbone et l'aramide.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, les couches constituant le disque du volant d'inertie comportent des fibres de nature différente. Selon un mode particulier de réalisation de la présente invention, un disque est par exemple constitué d'une moitié la plus interne en fibres de verre, et d'une moitié la plus externe en fibres de carbone. Selon un autre mode particulier de réalisation de la présente invention, le disque est constitué de trois types de fibres différentes, comprenant la fibre de verre, la fibre d'aramide, et la fibre de carbone.

En outre, l'invention concerne un procédé de fabrication d'un système inertiel de stockage d'énergie comportant au moins un disque en rotation. Le procédé comporte au moins les étapes suivantes :

- 5 - on forme ledit disque par l'enroulement autour d'un moyeu d'au moins un ruban constitué d'un matériau composite de fibres enrobées dans une matrice thermoplastique, ledit enroulement formant des couches successives,
- on soumet, au moins une couche dudit disque, à une précontrainte en compression radiale déterminée en fonction de la contrainte acceptable en service par ledit
- 10 composite, ledit ruban de ladite couche étant soudé aux couches sous-jacentes.

L'invention concerne également un véhicule, terrestre ou non, comprenant au moins un système inertiel de stockage de l'énergie dont au moins un disque est fabriqué selon le procédé selon l'invention.

15

L'invention concerne également un réseau de distribution électrique, comprenant au moins un système inertiel de stockage de l'énergie dont au moins un disque est fabriqué selon le procédé selon l'invention.

20 L'invention concerne également une éolienne, comprenant au moins un système inertiel de stockage de l'énergie dont au moins un disque est fabriqué selon le procédé selon l'invention.

25 **Exemples**

On considère dans un premier temps un volant d'inertie fabriqué selon l'art antérieur.

30 Soit un disque en rotation rapide réalisé à partir d'un enroulement de fibres de carbone dans une matrice de résine, les fibres étant enroulées sur un rayon intérieur de 20 cm, et un rayon extérieur de 30 cm. Les caractéristiques classiques d'un matériau composite à base de fibres de verre ou de fibres de carbone sont résumées dans le Tableau 1. On peut constater dans ce tableau, la très importante résistance mécanique dans le sens des fibres

du composite (valeurs élevées des contraintes circonférentielles supportables par les deux types de matériaux composites), notamment lorsqu'elle est rapportée à son poids, ainsi que la faiblesse de ces mêmes caractéristiques dans le sens transverse (valeurs faibles des contraintes radiales supportables par les deux types de matériaux composites).

5

Le Tableau 2 illustre les variations des contraintes induites dans un volant fabriqué à partir de fibres de carbone, tournant à une vitesse de rotation de 2900 radians par seconde (soit près de 28 000 tours/min), en fonction de la distance radiale (distance à l'axe de rotation). Pour des raisons de sécurité, on considère qu'une contrainte circonférentielle de 1000 MPa et une contrainte radiale de 25 MPa sont acceptables en service par un volant ainsi fabriqué. L'analyse des contraintes dans le volant indique que la contrainte circonférentielle acceptable est quasiment atteinte sur le rayon intérieur du volant (997 MPa). Toutefois on observe que les contraintes circonférentielles décroissent vers l'extérieur du disque (de 997 à 727 MPa). On constate par ailleurs que les contraintes radiales, c'est-à-dire dans la matrice de résine, sont maximales au centre du disque et atteignent quasiment la valeur de rupture d'un composite en fibres de carbone (45 MPa). Ceci est inacceptable, car pouvant entraîner un délaminage avec risque associé de rupture catastrophique.

20 Tableau 1

Caractéristiques mécaniques	Composite en fibres de verre	Composite en fibres de carbone
Module d'Young sens fibres	55 000 MPa	140 000 MPa
Module d'Young transverse	13 000 MPa	10 000 MPa
Contrainte circonférentielle maximale	1 500 MPa	1 800 MPa
Contrainte radiale maximale	40 MPa	45 MPa
Densité :	2,1	1,6

Tableau 2

Distance radiale (m)	Contrainte circonférentielle (MPa)	Contrainte radiale (MPa)
0.2	997	0
0.21	949	19
0.22	915	32.5
0.23	889	40.7
0.24	868	44.6
0.25	850	44.9

0.26	830	41.8
0.27	810	35.6
0.28	787	26.7
0.29	760	14.7
0.3	727	0

Dans un deuxième temps, on considère un système selon l'invention.

Plus précisément, on considère un disque d'un système inertiel de stockage d'énergie en matériau composite à base de fibres de carbone et de résine. Le rayon intérieur de ce disque est de 20 cm et le rayon extérieur est de 30 cm. Une première moitié de ce disque (c'est-à-dire jusqu'à une distance radiale de 25 cm) est fabriquée en utilisant une résine thermodurcissable ou thermoplastique, sans application d'une précontrainte. Ensuite, sur cette partie de volant utilisée comme mandrin de support, on bobine les fibres de carbone enrobées dans une matrice thermoplastique sous une précontrainte en compression radiale de 9 MPa par cm d'épaisseur de composite posé sous précontrainte. La soudure réalisée au moment de l'enroulement assure la stabilité immédiate de l'ensemble et prévient de tout déroulement ultérieur intempestif du composite.

Le Tableau 3 illustre les variations, en fonction de la distance radiale, de la contrainte de compression radiale induite dans le disque ainsi fabriqué. En tenant compte du fait qu'il s'agit d'un système épais, la contrainte de compression radiale introduite par la précontrainte au niveau du rayon moyen est de -34 MPa. Ainsi, lorsque le volant est mis en rotation à une vitesse de 28 000 tr/mn, la contrainte de traction apparaissant dans la résine et égale à 45 MPa (voir plus haut) est contrariée par cette précontrainte en compression de -34 MPa.

20

Le Tableau 4 présente les variations, en fonction de la distance radiale, de la contrainte radiale et de la contrainte circonférentielle résultantes de l'application de la précontrainte radiale en compression. On observe dans ce tableau que la contrainte radiale résultante est ainsi ramenée à un niveau acceptable en service, d'environ 17 MPa environ au maximum (Tableau 4), ce qui est une valeur largement supportable par la matrice de résine (valeur à rupture de 45 MPa) et même inférieure à la contrainte radiale jugée acceptable en service (25 MPa). On note aussi que les contraintes circonférentielles, dans les fibres, sont devenues prépondérantes sur l'extérieur du disque, mais restent cependant acceptables par rapport à la résistance mécanique du matériau dans la direction

25

circonférentielle (valeur maximale supportable par le matériau de 1800 MPa et valeur maximale acceptable en service de 1000 MPa).

5

Tableau 3

Distance radiale (m)	Contrainte de compression radiale introduite par la précontrainte (MPa)
20	0
21	-8
22	-15
23	-22
24	-28
25 intérieur	-34
25 extérieur	-34
26	-30
27	-24
28	-17
29	-9
30	0

10

Tableau 4

Distance radiale (m)	Contrainte circonférentielle résultante (MPa)	Contrainte radiale résultante (MPa)
20	826	0
21	783	11,34
22	749	17,51
23	719	18,7
24	691	16,6
25 intérieur	662	10,9
25 extérieur	943	10,9
26	968	11,8
27	991	11,7
28	1010	9,6
29	1027	5,7
30	983	0

REVENDICATIONS

- 5 1. Système inertiel de stockage d'énergie comportant au moins un disque en rotation, ledit disque étant formé par l'enroulement autour d'un moyeu d'au moins un ruban constitué d'un matériau composite, ledit composite étant formé de fibres enrobées dans une matrice, ledit enroulement formant une série de couches concentriques, caractérisé en ce que, pour au moins une couche dudit disque :
 - ladite matrice dudit composite dudit ruban est de nature thermoplastique ;
 - 10 - ladite couche est soumise à une précontrainte en compression radiale déterminée en fonction de la contrainte radiale acceptable en service par ledit composite,
 - ledit ruban est soudé sur lesdites couches sous-jacentes.
- 15 2. Système selon la revendication 1, dans lequel ladite couche est soumise à ladite précontrainte par enroulement sous tension dudit ruban de composite.
3. Système selon l'une des revendications précédentes, dans lequel ladite soudure est une soudure thermique.
- 20 4. Système selon l'une des revendications précédentes, dans lequel ladite contrainte radiale acceptable en service correspond à la contrainte radiale maximale supportable par ladite matrice, pondérée par un coefficient de sécurité compris entre 0 et 1.
- 25 5. Système selon la revendication 4, dans lequel ledit coefficient de sécurité est inférieur à 0.8.
- 30 6. Système selon l'une des revendications précédentes, dans lequel au moins lesdites couches formant la moitié la plus externe dudit disque sont soumises à ladite précontrainte.
7. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans lequel au moins une couche en contact avec ledit moyeu est soumise à ladite précontrainte.
- 35 8. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel l'ensemble desdites couches est soumis à ladite précontrainte.

9. Système selon l'une des revendications précédentes, dans lequel lesdites fibres sont de nature minérale.

10. Système selon la revendication 7, dans lequel lesdites fibres sont choisies parmi le verre,
5 le carbone et l'aramide.

11. Système selon l'une des revendications précédentes, dans lequel lesdites couches comportent des fibres de nature différente.

10 12. Système selon l'une des revendications précédentes, dans lequel lesdites couches sont soumises à des valeurs de précontraintes radiales différentes en fonction de leur distance radiale.

13. Procédé de fabrication d'un système inertiel de stockage d'énergie comportant au moins
15 un disque en rotation, caractérisé en ce que l'on effectue au moins les étapes suivantes :
- on forme ledit disque par l'enroulement autour d'un moyeu d'au moins un ruban constitué d'un matériau composite de fibres enrobées dans une matrice thermoplastique, ledit enroulement formant des couches successives,
- on soumet, au moins une couche dudit disque, à une précontrainte en compression
20 radiale déterminée en fonction de la contrainte radiale acceptable en service par ledit composite, ledit ruban de ladite couche étant soudé aux couches sous-jacentes.

14. Procédé selon la revendication 13, dans lequel on applique ladite précontrainte par
25 tension sur le ruban, en cours d'enroulement.

15. Procédé selon l'une des revendications 13 à 14, dans lequel ledit ruban est soudé par
mise en fusion de ladite matrice thermoplastique.

16. Véhicule, caractérisé en ce qu'il comprend au moins un système inertiel de stockage de
30 l'énergie selon l'une des revendications 1 à 12.

17. Réseau de distribution de l'électricité, caractérisé en ce qu'il comprend au moins un
système inertiel de stockage de l'énergie selon l'une des revendications 1 à 12.

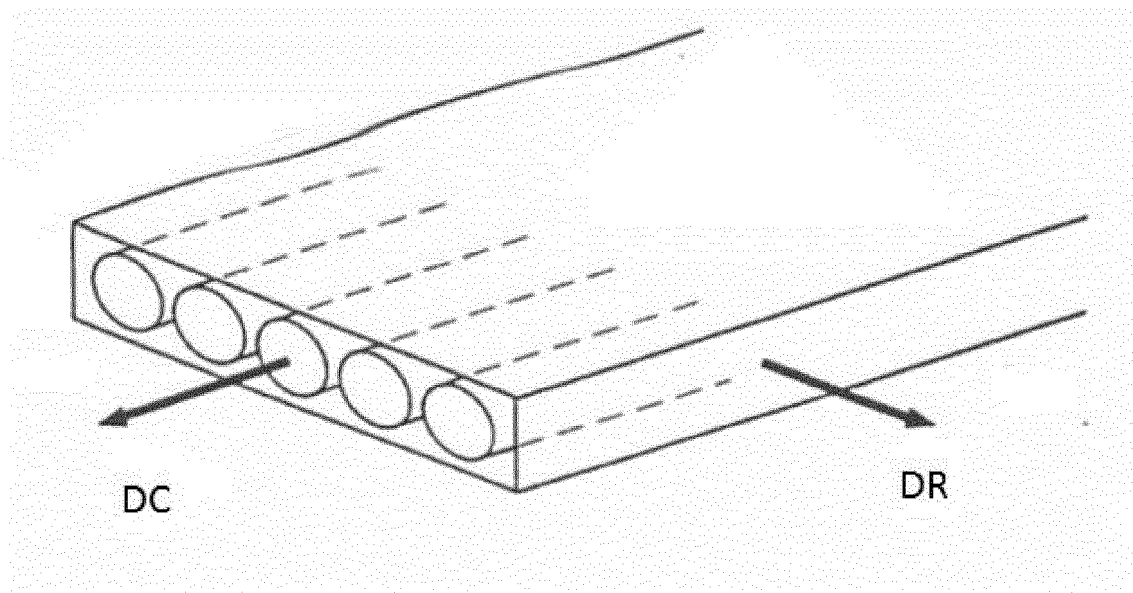


FIG. 1

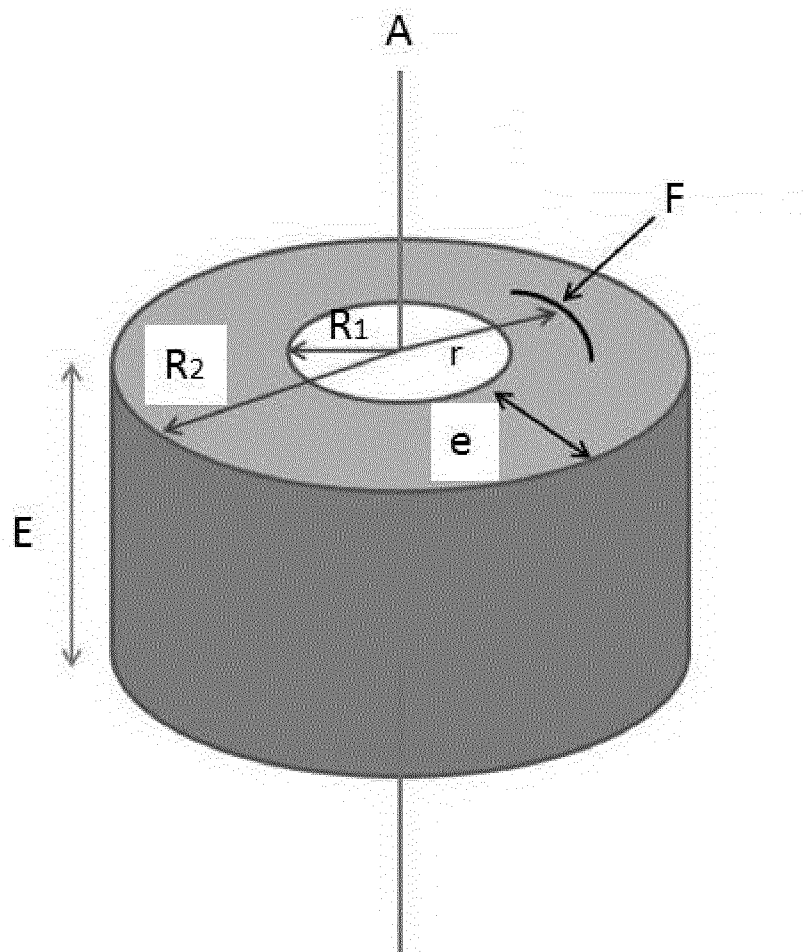


FIG. 2

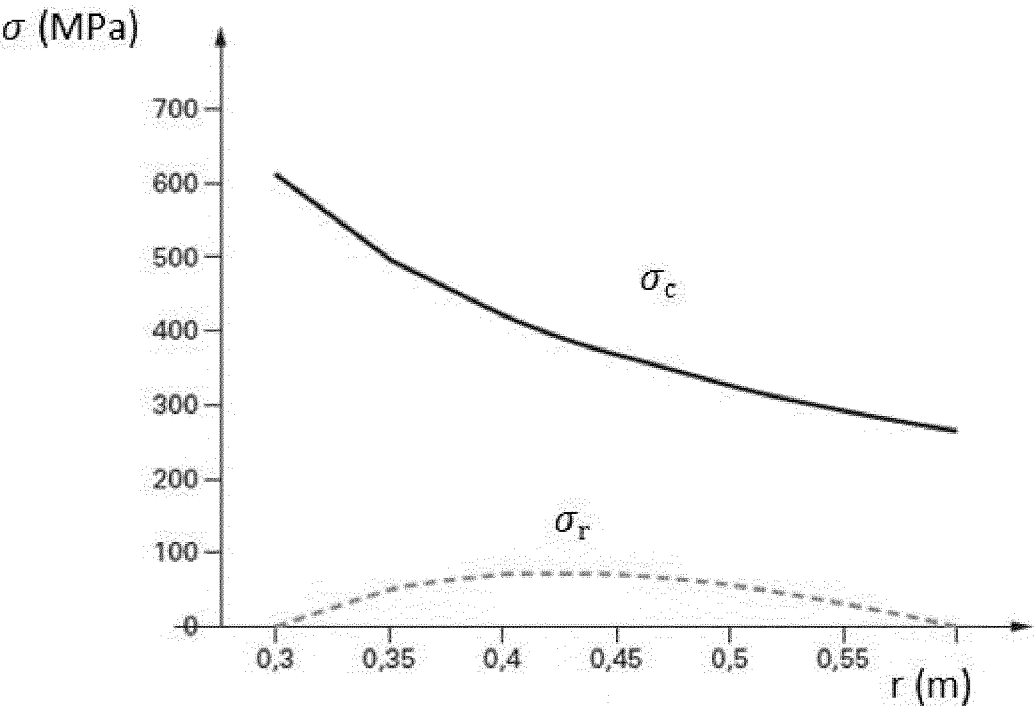


FIG. 3

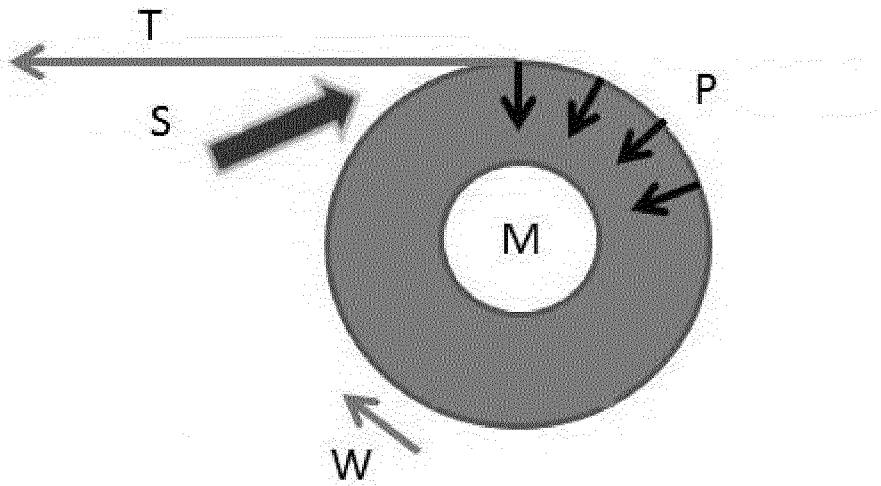


FIG. 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2015/069870

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. F03G3/08 F16F15/305 H02K7/02
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

F03G F16F H02K F16C

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 2003/049430 A1 (SPEARS WARD R [US]) 13 March 2003 (2003-03-13) the whole document	1-17
Y	US 4 285 251 A (SWARTOUT BRUCE E) 25 August 1981 (1981-08-25) the whole document	1-17
A	DE 21 19 015 A1 (SCHÖLL ET AL) 26 October 1972 (1972-10-26) the whole document	1-17
A	US 4 507 983 A (KISS GABOR D [US]) 2 April 1985 (1985-04-02) the whole document	1-17



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

1 December 2015

Date of mailing of the international search report

09/12/2015

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Alquezar Getan, M

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2015/069870

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2003049430	A1	13-03-2003	NONE
US 4285251	A	25-08-1981	FR 2436267 A1 11-04-1980 US 4285251 A 25-08-1981
DE 2119015	A1	26-10-1972	NONE
US 4507983	A	02-04-1985	NONE

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2015/069870

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
INV. F03G3/08 F16F15/305 H02K7/02
ADD.

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)
F03G F16F H02K F16C

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)
EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
Y	US 2003/049430 A1 (SPEARS WARD R [US]) 13 mars 2003 (2003-03-13) le document en entier -----	1-17
Y	US 4 285 251 A (SWARTOUT BRUCE E) 25 août 1981 (1981-08-25) le document en entier -----	1-17
A	DE 21 19 015 A1 (SCHÖLL ET AL) 26 octobre 1972 (1972-10-26) le document en entier -----	1-17
A	US 4 507 983 A (KISS GABOR D [US]) 2 avril 1985 (1985-04-02) le document en entier -----	1-17



Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents



Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent

"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date

"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)

"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens

"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

"X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

"Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

"&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

1 décembre 2015

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

09/12/2015

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Alquezar Getan, M

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2015/069870

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2003049430	A1	13-03-2003	AUCUN
US 4285251	A	25-08-1981	FR 2436267 A1 11-04-1980 US 4285251 A 25-08-1981
DE 2119015	A1	26-10-1972	AUCUN
US 4507983	A	02-04-1985	AUCUN