(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

COURBEVOIE

(11) **N° de publication :** ***3 132 591***

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

(21) **N° d'enregistrement national :** **22 01096**

(51) Int Cl[8] : ***H 01 F 6/00*** *(2022.01), H 02 K 1/02, 1/06, 55/00*

(12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

(22) **Date de dépôt :** 08.02.22.

(30) **Priorité :**

(43) **Date de mise à la disposition du public de la demande :** 11.08.23 Bulletin 23/32.

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

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

( ) **Demande(s) d'extension :**

(71) **Demandeur(s) :** *SAFRAN Société anonyme* — FR et *UNIVERSITE DE LORRAINE ETABLISSEMENT PUBLIC NATIONAL A CARACTERE SCIENTIFIQUE, CULTUREL, PROFESSIONNEL* — FR.

(72) **Inventeur(s) :** AYAT Sabrina Siham, DORGET Rémi Luc Stéphane et BIAUJAUD Rémy.

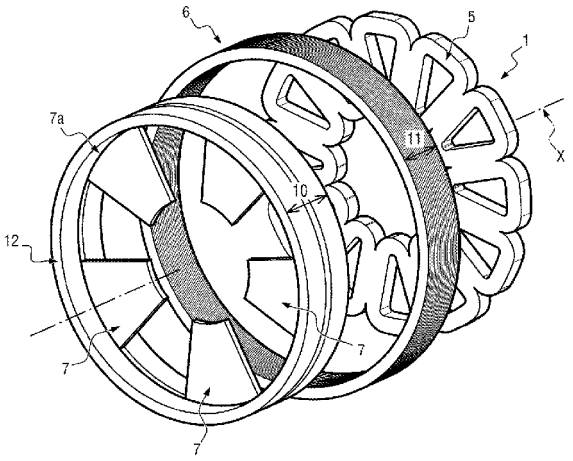
(73) **Titulaire(s) :** SAFRAN Société anonyme, UNIVERSITE DE LORRAINE ETABLISSEMENT PUBLIC NATIONAL A CARACTERE SCIENTIFIQUE, CULTUREL, PROFESSIONNEL.

(74) **Mandataire(s) :** REGIMBEAU.

(54) Protection des bobines d'une machine électrique.

(57) La présente invention concerne une machine électrique (1) supraconductrice à flux axial comprenant un inducteur (6, 7) et un induit (5), l'inducteur (6, 7) comprenant : - des pastilles supraconductrices (7) mobiles en rotation autour d'un axe (X) de la machine électrique (1) ; et - une bobine supraconductrice (6), centrée sur l'axe (X) et s'étendant radialement à l'extérieur des pastilles supraconductrices (7), la bobine supraconductrice (6) étant configurée pour générer un champ magnétique ; la machine électrique (1) étant caractérisée en ce qu'elle comprend en outre une barrière de flux (12) réalisée dans un matériau supraconducteur qui s'étend entre les pastilles supraconductrices (7) et la bobine supraconductrice (6), ladite barrière de flux (12) étant fixée sur une paroi circonférentielle (7a) des pastilles supraconductrices (7) de sorte à être solidaire en mouvement des pastilles supraconductrices (7).

Figure pour l'abrégé: Fig. 1



FR 3 132 591 - A1

Description

Titre de l'invention : Protection des bobines d'une machine électrique

DOMAINE DE L'INVENTION

[0001] La présente invention concerne le domaine des machines électriques comprenant des pastilles supraconductrices pouvant notamment être utilisées dans des aéronefs. En particulier, l'invention s'applique aux machines électriques à flux axial comprenant des pastilles magnétisées ou non-magnétisées, aux machines électriques à aimants supraconducteurs ou à barrières de flux supraconductrices, aux machines entièrement supraconductrices (induit et inducteur supraconducteurs) ou partiellement supraconductrices (induit ou inducteur supraconducteur).

ETAT DE LA TECHNIQUE

[0002] Une partie de l'ingénierie se préoccupe des futurs moyens de transport en cherchant à rendre les systèmes plus écologiques. Dans le domaine du transport aérien, différents projets et prototypes ont déjà vu le jour, comme SOLAR IMPULSE ou l'E-FAN d'Airbus. Les préoccupations environnementales, la réduction de la consommation de carburant et de bruit sont tant de critères qui encouragent l'utilisation de machines électriques. Pour pouvoir supplanter les technologies actuelles, les constructeurs aéronautiques travaillent sur l'augmentation de la puissance massique de ces machines électriques. Ainsi, une étude est conduite sur le gain qu'apporterait les matériaux supraconducteurs HTC (acronyme de haute température critique) pour les actionneurs embarqués.

[0003] Un matériau supraconducteur est un matériau qui, lorsqu'il est refroidi à une température inférieure à sa température critique, présente une résistivité nulle offrant ainsi la possibilité de faire circuler des courants continus sans pertes. De cela, plusieurs phénomènes en découlent comme la réponse diamagnétique pour toute variation du champ magnétique, permettant de réaliser d'excellents blindages magnétiques.

[0004] De manière connue en soi, une machine électrique comprend un inducteur et un induit. L'inducteur comprend une bobine supraconductrice réalisé avec des fils en matériau supraconducteur qui génère un champ magnétique modulé par des pastilles supraconductrices, qui font office d'écrans magnétiques. La bobine supraconductrice est contenue dans un cryostat, dont la température est sensiblement égale à la température ambiante (de l'ordre de 300 K) et qui peut être réalisé dans un matériau conducteur. En comparaison, la bobine supraconductrice est généralement à une température de l'ordre de 30 K. L'induit, quant à lui, comprend un système de bobinage triphasé en cuivre comprenant un agencement de bobines qui reposent sur un support

ferromagnétique ou amagnétique. La rotation des écrans fait varier le champ magnétique et induit, par la loi de Lenz, une force électromotrice dans les bobines. Le dimensionnement d'une telle machine conduit à une structure à flux axial sans système d'alimentation tournant (type bague/balais). La maintenance et les problèmes de sécurité, apportés par un système bague/balais tournant, sont donc évités.

[0005] Cette machine électrique est partiellement supraconductrice dans la mesure où seul l'inducteur est réalisé dans un matériau supraconducteur, par opposition à une machine totalement supraconductrice dont toutes les parties actives sont conçues avec des matériaux supraconducteurs.

[0006] Dans ce qui suit, on désignera par « inducteur » la bobine HTC et les pastilles supraconductrices configurées pour moduler le flux magnétique crée par la bobine HTC. On notera que, dans une machine électrique supraconductrice à barrières de flux, on utilise le comportement diamagnétique des pastilles supraconductrices quand elles sont refroidies hors champ. Les pastilles supraconductrices sont dans ce cas non-magnétisées et forment un écran (écrantage) qui dévie les lignes de champ, lorsqu'elles sont plongées dans un champ magnétique. Le champ magnétique est alors concentré et de forte amplitude entre les pastilles supraconductrices non-magnétisées et faible en aval de celles-ci. En variante, les pastilles supraconductrices peuvent être magnétisées et former des aimants supraconducteurs. On parle alors de machine à aimants supraconducteurs.

[0007] Afin de réduire au maximum le volume et la masse de la machine électrique ainsi que sa densité de puissance, la bobine supraconductrice de l'inducteur doit être placée au plus proche du rotor. Cette configuration permet en outre de limiter le coût de la machine électrique, le prix des fils supraconducteurs pouvant être élevé. Cependant, plus la bobine supraconductrice est proche du rotor, plus elle est exposée au champ magnétique modulé par les pastilles supraconductrices, ce qui peut générer des pertes en courant alternatif importantes dans la bobine supraconductrice ou dans son cryostat si celui-ci est conducteur. Il est alors nécessaire d'augmenter le refroidissement de la bobine supraconductrice et le cas échéant de son cryostat. Or, les pertes dans les éléments cryogéniques sont beaucoup plus couteuses à évacuer que les pertes à température ambiante. Par ailleurs, l'exposition au champ magnétique peut faire perdre ses propriétés supraconductrices à la bobine supraconductrice, réduisant ainsi l'efficacité de la machine électrique.

[0008] Il a donc été proposé de conserver un cryostat en aluminium afin que les courants induits dans celui-ci protègent la bobine supraconductrice. Toutefois, une telle configuration a pour effet d'entrainer des pertes au sein du cryostat. Par ailleurs, un système de refroidissement dédié au cryostat devient nécessaire, ce qui augmente la masse de la machine électrique ainsi que sa complexité.

Exposé de l'invention

[0009] Un but de l'invention est de proposer une machine supraconductrice dont le volume, la masse et la densité de puissance sont optimisés.

[0010] L'invention s'applique à tout type de machine supraconductrice à flux axial, qui comprennent notamment les machines partiellement supraconductrices ou totalement supraconductrices, à barrières de flux ou à aimants supraconducteurs.

[0011] Il est à cet effet proposé, selon un premier aspect de l'invention, une machine électrique supraconductrice à flux axial comprenant un inducteur et un induit, l'inducteur comprenant :

- des pastilles supraconductrices mobiles en rotation autour d'un axe de la machine électrique ; et
- une bobine supraconductrice, centrée sur l'axe et s'étendant radialement à l'extérieur des pastilles supraconductrices, la bobine supraconductrice étant configurée pour générer un champ magnétique ; et
- une barrière de flux réalisée dans un matériau supraconducteur qui s'étend entre les pastilles supraconductrices et la bobine supraconductrice, ladite barrière de flux étant fixée sur une paroi circonférentielle des pastilles supraconductrices de sorte à être solidaire en mouvement des pastilles supraconductrices.

[0012] Certaines caractéristiques préférées mais non limitatives de la machine électrique selon le premier aspect sont les suivantes, prises individuellement ou en combinaison :

- la barrière de flux est sensiblement cylindrique de révolution ;
- une épaisseur axiale de la barrière de flux est comprise entre 0,1 fois et 1 fois une épaisseur axiale de la bobine supraconductrice ;
- la barrière de flux est discontinue sur sa circonférence et comprend au moins une fente s'étendant suivant une direction sensiblement radiale par rapport à l'axe ;
- la machine électrique comprend en outre une couche isolante logée dans la fente ;
- la machine électrique comprend en outre un cryostat logeant la bobine supraconductrice ;
- le cryostat est réalisé dans un matériau conducteur, par exemple de l'aluminium ; - un rayon interne de la barrière de flux est égal à un rayon externe des pastilles supraconductrices ; et/ou
- un rayon externe de la barrière de flux est strictement inférieur à un rayon interne de la bobine supraconductrice.

[0013] Selon un deuxième aspect, l'invention propose un aéronef comprenant une machine électrique selon le premier aspect.

DESCRIPTION DES FIGURES

[0014] D'autres caractéristiques, buts et avantages de l'invention ressortiront de la des-

cription qui suit, qui est purement illustrative et non limitative, et qui doit être lue en regard des dessins annexés sur lesquels :

[0015] La [Fig.1] est une vue éclatée, schématique et partielle d'un exemple de machine électrique à flux axial conforme à un mode de réalisation de l'invention ;

[0016] La [Fig.2] est une vue simplifiée en coupe dans un plan normal à l'axe de rotation du rotor de la machine électrique de la [Fig.1] ;

[0017] La [Fig.3] est une vue de face d'un exemple de réalisation d'une barrière de flux conforme à un mode de réalisation de l'invention ;

[0018] La [Fig.4] représente la répartition des pertes volumique (W/m^3) au sein d'une bobine supraconductrice dans un machine électrique conforme à l'art antérieur, c'est-à-dire dépourvue de barrière de flux ;

[0019] La [Fig.5] est une vue en coupe partielle suivant un plan comprenant l'axe de rotation du rotor d'une machine électrique d'un exemple de cryostat et de bobine supraconductrice pouvant être utilisés dans une machine électrique conforme à l'invention ;

[0020] La [Fig.6] illustre un exemple d'aéronef pouvant comprendre une machine électrique conforme à un mode de réalisation de l'invention.

[0021] Sur l'ensemble des figures, les éléments similaires portent des références identiques.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

[0022] Dans ce qui suit, l'invention va être décrite et illustrée dans le cas d'une machine électrique à flux axial partiellement supraconductrice à barrières de flux avec des pastilles non-magnétisées. Comme cela a déjà été indiqué plus haut, ceci n'est cependant pas limitatif, l'invention s'appliquant mutatis mutandis à des machines électriques comprenant des pastilles magnétisées, à des machines électriques à aimants supraconducteurs, ainsi qu'à des machines électriques entièrement supraconductrices (induit et inducteur supraconducteurs).

[0023] Sur la [Fig.1] est représentée schématiquement une machine électrique 1 à flux axial supraconductrice à barrières de flux selon un mode de réalisation de l'invention comprenant de manière conventionnelle une partie tournante, ou rotor, et une partie fixe, ou stator.

[0024] Dans la présente demande, on appelle axe X du rotor, son axe de rotation. La direction axiale correspond à la direction de l'axe X et une direction radiale est une direction perpendiculaire à cet axe et passant par lui. Par ailleurs, la direction circonférentielle (ou latérale) correspond à une direction perpendiculaire à l'axe X et ne passant pas par lui. Sauf précision contraire, interne (respectivement, intérieur) et externe (respectivement, extérieur), respectivement, sont utilisés en référence à une direction radiale de sorte que la partie ou la face interne d'un élément est plus proche de l'axe X

que la partie ou la face externe du même élément.

[0025] De manière connue en soi, la machine électrique 1 à flux axial supraconductrice comprend un induit 2 et un inducteur 3. L'induit 2 comporte un agencement 4 de bobines électromagnétiques 5 non supraconductrices, généralement en cuivre. L'inducteur 3 comporte une bobine supraconductrice 6 coaxiale à l'agencement 4 des bobines électromagnétiques 5 de l'induit 2 et des pastilles supraconductrices 7 montées sur une structure porteuse 8 qui sont disposées dans un même plan orthogonal à l'axe X et radialement à l'intérieur de la bobine supraconductrice 6. La bobine supraconductrice 6 est en outre contenue dans un cryostat 9, qui peut être réalisé dans un matériau conducteur tel que de l'aluminium. Optionnellement, l'inducteur 3 comprend en outre une culasse statorique comportant une couronne de fer 8. Ici, le rotor est formé par les pastilles supraconductrices 7 qui sont entrainées en rotation autour d'un axe de rotation s'étendant selon la direction axiale. Le stator est formé par l'agencement 4 de bobines électromagnétiques 5 et la bobine supraconductrice 6.

[0026] Les pastilles supraconductrices 7 sont en matériau supraconducteur et sont réparties de manière équidistante autour de l'axe de rotation X, ce qui permet une variation spatiale du champ électromagnétique dans l'entrefer. Ici, les pastilles supraconductrices 7 sont non-magnétisées. Dans une variante de réalisation, les pastilles supraconductrices 7 pourraient être magnétisées.

[0027] Par exemple, les pastilles supraconductrices 7 et la bobine supraconductrices 6 peuvent être réalisées en YBCO (acronyme anglais de Yttrium Barium Copper Oxide pour Oxydes mixtes de Baryum, de Cuivre et d'Yttrium), en GdBCO (acronyme anglais de Gadolinium-Barium-Copper-Oxygen), en NbTi (pour niobium-titane), en MgB2 (diborure de magnésium) ou tout matériau RE-Ba-Cu-O, où RE peut comprendre n'importe quelle terre rare.

[0028] Les pastilles supraconductrices 7 et la bobine supraconductrice 6 sont généralement obtenues grâce au procédé de croissance de germe. On pourra notamment se référer à l'article de M. Morita, H. Teshima, et H. Hirano, « Development of oxide superconductors », Nippon Steel Technical Report, vol. 93, p. 18–23, 2006 pour plus de détails sur ce procédé. En particulier, ce type de procédé consiste à former un cristal par solidification progressive de matière sur la surface d'un germe préexistant. Les pièces 7, 6 ainsi obtenues sont donc généralement de formes circulaires ou rectangulaires. En variante, il a également été proposé de réaliser les pastilles 7 et/ou la bobine 6 par frittage. Cependant, la connexion inter-grain associée à ce procédé de fabrication a tendance à diminuer les performances des pièces obtenues. Un autre procédé consiste à utiliser des rubans supraconducteurs (ou « tapes » en anglais). On parle dans ce cas d'empilements de rubans (ou « stack of tapes » en anglais). Ces pièces, dont le noyau supraconducteur est renforcé par la matrice des rubans les

constituant, présentent une bonne tenue mécanique. Cette bonne tenue mécanique est particulièrement avantageuse lorsque les pièces sont magnétisées (machine à aimants supraconducteurs).

[0029] La bobine supraconductrice 6 de l'inducteur 3 est une bobine supraconductrice statique alimentée en courant continu. Le cas échéant, lorsque la machine électrique 1 comprend une culasse 4, celle-ci assure une tenue mécanique des bobines électromagnétiques 5 de l'induit 2. En d'autres termes, l'inducteur 2 est supraconducteur tandis que l'induit 3 est non-supraconducteur.

[0030] Les pastilles supraconductrices 7 peuvent présenter toute forme adaptée.

[0031] Dans un premier mode de réalisation, chaque pastille supraconductrice 7 présente, de manière connue en soi, la forme d'un disque plein (solide).

[0032] Dans un deuxième mode de réalisation, la pastille supraconductrice 7 peut être creuse afin d'adapter sa forme à l'épaisseur de pénétration du champ magnétique dans la pastille 7. Chaque pastille supraconductrice 7 comprend à cet effet une paroi circonférentielle qui présente :

- une première bordure,
- une deuxième bordure opposée à la première bordure
- une face interne reliant la première bordure et la deuxième bordure
- une face externe opposée à la face interne et
- une cavité formée entre la première bordure, la deuxième bordure et délimitée par la face interne de la paroi circonférentielle.

[0033] La face interne s'étend radialement à l'intérieur de la face externe. La pastille supraconductrice 7 est donc creuse en ce qu'elle présente une cavité qui, comme on le verra dans ce qui suit, peut être débouchante, traversante ou enfermée dans la pastille supraconductrice 7. La cavité est de préférence vide (dépourvue de matériau).

[0034] Optionnellement, la pastille supraconductrice 7 peut comprendre une ou plusieurs parois supplémentaires divisant la cavité en plusieurs parties. Le cas échéant, un orifice traversant peut être formé dans tout ou partie des parois. On pourra se référer au document FR3104804 au nom de la Demanderesse pour plus de détails sur ces différentes formes de réalisation de pastilles supraconductrices 7 avec cavité.

[0035] Dans un troisième mode de réalisation illustré sur les figures 1, 2 et 4, la forme des pastilles supraconductrices 7 est adaptée (optimisée) de sorte à maximiser le rapport écrantage/masse des pastilles 7, c'est-à-dire que la forme des pastilles supraconductrices 7 est adaptée afin que la variation de la composante axiale du champ magnétique induit, et donc l'écrantage du flux magnétique, soit maximal, tout en minimisant la masse des pastilles supraconductrices 7. On peut ainsi obtenir une augmentation de la vitesse de rotation du rotor et donc de la puissance de la machine électrique 1. A cet effet, les pastilles supraconductrices 7 peuvent avoir une forme po-

lygonale présentant au moins cinq côtés. Par exemple, la pastille 7 présente une forme hexagonale, de préférence celle d'un hexagone régulier isométrique. En variante, la face 8 de chaque pastille supraconductrice 7 présente la géométrie et les dimensions d'un secteur d'anneau. Par secteur d'anneau, on comprendra ici la forme délimitée d'une part par deux cercles coaxiaux, de diamètre différent, et d'autre part par deux segments de droite issus du centre des cercles. Le secteur d'anneau comprend ainsi deux côtés opposés courbes et deux côtés opposés droits.

[0036] On pourra se référer au document FR3104803 au nom de la Demanderesse pour plus de détails sur ces différentes formes de réalisation de pastilles supraconductrices 7.

[0037] Le champ magnétique est généré par la bobine supraconductrice 6. Par conséquent, il suffit d'éteindre la bobine supraconductrice 6 pour couper le champ magnétique dans la machine électrique supraconductrice. Cela présente un avantage dans la mesure où des pastilles supraconductrices 7 qui sont refroidies en présence d'un champ magnétique ne sont pas capables d'écranter le champ magnétique. Ainsi, il est nécessaire que le champ magnétique à écranter apparaisse à un instant postérieur au refroidissement des pastilles supraconductrices 7 pour leur permettre de jouer leur rôle d'écrans magnétiques, ce qui est rendu possible par l'utilisation de la bobine supraconductrice 6. Dans l'invention, la bobine supraconductrice 6 peut donc être éteinte lorsque les pastilles supraconductrices 7 sont chaudes et allumée une fois qu'elles sont refroidies.

[0038] Les bobines 5 de l'induit 2 peuvent également présenter toute forme adaptée. De manière connue en soi, les bobines 5 peuvent notamment présenter une forme de secteur d'anneau, comme illustré sur les figures 1, 2 et 4.

[0039] Afin d'optimiser le volume, la masse et la densité de puissance de la machine électrique 1, la machine électrique 1 comprend en outre une barrière de flux 12 réalisée dans un matériau supraconducteur qui s'étend entre les pastilles supraconductrices 7 et la bobine supraconductrice 6. La barrière de flux 12 est par ailleurs fixée sur la paroi circonférentielle des pastilles supraconductrices 7 (au niveau de sa partie radialement externe 7a) de sorte à être solidaire en mouvement des pastilles supraconductrices 7. La partie radialement externe 7a de la paroi circonférentielle des pastilles 7 correspond ici à la partie de la pastille 7 qui s'étend circonférentiellement par rapport à l'axe X et qui est la plus éloignée de l'axe X. La barrière de flux 12 fait donc partie du rotor de la machine électrique 1 et est positionnée entre les pastilles supraconductrices 7 et la bobine supraconductrice 6 de sorte à masquer au moins partiellement la bobine supraconductrice 6. L'écrantage de la bobine supraconductrice 6 par la barrière de flux 12 permet ainsi de protéger la bobine supraconductrice 6 des variations de champ réalisées par la rotation des pastilles supraconductrices 7. Ainsi, la présence de la barrière de flux 12 permet de rapprocher la bobine supraconductrice 6 des pastilles su-

praconductrices 7, et donc de réduire son diamètre (et par conséquent d'améliorer la compacité et la masse de la machine électrique 1).

[0040] Par ailleurs, la barrière de flux 12 étant solidaire du rotor, elle n'est pas exposée à un champ variable et donc ne risque pas d'être démagnétisée.

[0041] Enfin, la présence de la barrière de flux 12 entre les pastilles supraconductrices 7 et la bobine supraconductrice 6 réduit les pertes au sein du cryostat 9 résultant de son exposition au champ magnétique variable rotorique, et supprime donc le besoin d'un système de refroidissement dédié, ce qui réduit le coût d'utilisation de la machine électrique 1. Il est en outre possible de rapprocher la paroi du cryostat 9 du rotor 7, 12.

[0042] Avantageusement, la présence de la barrière de flux 12 permet en outre d'écranter le champ magnétique en tête des bobines 5 et de rediriger le champ magnétique vers les régions actives de la machine électrique 1, ce qui limite les risques de déformation des bobines 5 et améliore ainsi la densité de puissance de la machine électrique 1.

[0043] La barrière de flux 12 présente une forme sensiblement cylindrique de révolution autour de l'axe X et s'étend de manière sensiblement continue autour de l'axe X de rotation. Toutefois, la barrière de flux 12 comprend au moins une discontinuité 13 pour ne pas écranter le champ magnétique au sein des pastilles supraconductrices 7. En effet, en l'absence de discontinuité 13, des boucles de courant seraient susceptibles de se former à la périphérie des pastilles supraconductrices 7, écrantant ainsi le champ magnétique à l'intérieur des pastilles 7, ce qui nuirait au fonctionnement de la machine électrique 1.

[0044] La discontinuité 13 peut être obtenue en réalisant une fente 13 dans la barrière de flux 12 (comme illustré sur la [Fig.3]). Une telle fente 13 permet ainsi de casser les boucles de courant. Optionnellement, pour assurer l'existence de la discontinuité 13 dans la barrière de flux 12 à tout moment, une couche isolante 14 peut être placée dans la fente 13 formée dans la barrière de flux 12. L'épaisseur de la fente 13 peut alors être sensiblement égale à l'épaisseur de la couche isolante 14. La couche isolante 14 peut par exemple comprendre un film polyimide tel que du Kapton présentant une épaisseur de 0,025 mm.

[0045] La barrière de flux 12 est placée à l'extérieur des pastilles supraconductrices 7 et à l'intérieur de la bobine supraconductrice 6. Un rayon interne R_1 (c'est-à-dire le rayon minimal) de la barrière de flux est donc égal au rayon externe maximal des pastilles supraconductrices 7, tandis que son rayon externe R_2 (c'est-à-dire ici son rayon maximal) est strictement inférieur au rayon interne R_3 de la bobine supraconductrice 6 afin d'éviter tout contact entre la barrière de flux 12 et la bobine supraconductrice 6, la barrière de flux 12 devant tourner solidairement avec les pastilles supraconductrices 7 tandis que la bobine supraconductrice doit rester fixe. Il existe donc un jeu entre la bobine supraconductrice 6 et la barrière de flux 12.

[0046] Une épaisseur axiale 10 (qui correspond à une dimension mesurée suivant un axe parallèle à l'axe X) de la barrière de flux 12 est déterminée en fonction de l'intensité du champ magnétique à écranter. L'épaisseur axiale 10 de la barrière de flux 12 est en particulier choisie de sorte à recouvrir la région où la majorité des pertes volumiques électromagnétiques est générée (voir [Fig.4]). Ainsi, l'épaisseur axiale 10 de la barrière de flux 12 peut être comprise entre 0,1 fois et 1 fois l'épaisseur axiale 11 de la bobine supraconductrice 6 (voir [Fig.1]).

[0047] La barrière de flux 12 est réalisée dans un matériau supraconducteur. En particulier, la barrière de flux 12 peut être réalisée dans l'un quelconque des matériaux supraconducteurs envisagés pour les pastilles supraconductrices 7 listés plus haut. De préférence, la barrière de flux 12 est réalisée dans le même matériau supraconducteur que les pastilles supraconductrices 7.

[0048] La barrière de flux 12 peut être monobloc avec les pastilles supraconductrices 7 utilisées pour la modulation du flux, c'est-à-dire formée intégralement et en une seule pièce avec les pastilles 7. Lorsque la barrière de flux 12 et les pastilles 7 sont monobloc, par simplicité de réalisation, elles pourront avoir la même épaisseur axiale.

[0049] En variante, la barrière de flux 12 peut être rapportée et fixée sur les pastilles supraconductrices 7. Dans ce cas, l'épaisseur axiale 10 de la barrière de flux 12 peut être différente de celle des pastilles supraconductrices et déterminée en fonction du champ magnétique à écranter.

[0050] La barrière de flux 12 peut présenter une hauteur sensiblement comprise entre 5 et 20 millimètres. Par hauteur, on comprendra ici la dimension suivant une direction radiale à l'axe X de rotation, correspondant à la différence entre le rayon externe R_2 de la barrière de flux 12 et son rayon interne R_1 de la barrière.

Procédé de fabrication

[0051] La barrière de flux 12 peut être obtenue par croissance de germes ou par empilement de rubans.

[0052] Lorsque la barrière de flux 12 est obtenue par croissance de germes, le procédé de fabrication comprend les étapes suivantes :

[0053]
- réalisation d'une pièce type pastille conventionnelle en forme de disque par croissance de germes selon la forme finale la plus approchante de la barrière de flux 12 ;
- usinage de la pièce ainsi obtenue de sorte à obtenir la forme finale de la barrière de flux 12 ; et
- optionnellement, insertion d'une couche isolante 14 telle que décrite ci-avant.

[0054] L'étape d'usinage peut notamment comprendre la réalisation d'un orifice central traversant dans le disque de sorte de sorte à obtenir le cylindre de révolution ainsi que d'une ou plusieurs discontinuités 13, typiquement des fentes.

[0055] Lorsque la barrière de flux 12 est obtenue par empilement de rubans, le procédé de fabrication comprend les étapes suivantes :

[0056]
- prédécoupage des rubans suivant la forme cylindrique de révolution de la barrière de flux 12 ;
- empilement des rubans ainsi prédécoupés de manière conventionnelle pour obtenir la barrière de flux 12 ;
- usinage d'une ou de plusieurs discontinuités 13 ; et
- optionnellement, insertion d'une couche isolante 14 telle que décrite ci-avant.

[0057] Le cas échéant, la barrière de flux 12 et les pastilles supraconductrices 7 peuvent être formées intégralement en une seule pièce. En d'autres termes, la barrière de flux 12 et les pastilles supraconductrices 7 peuvent être fabriquées simultanément par croissance de germes ou par empilement de rubans. L'épaisseur axiale 10 de la barrière de flux 12 peut alors être égale à l'épaisseur axiale des pastilles supraconductrices 7 (généralement, de l'ordre de dix à vingt millimètres) pour simplifier le procédé de fabrication.

[0058] La machine électrique 1 peut notamment être utilisée dans un aéronef 100.

Revendications

[Revendication 1] Machine électrique (1) supraconductrice à flux axial comprenant un inducteur (6, 7) et un induit (5), l'inducteur (6, 7) comprenant :
- des pastilles supraconductrices (7) mobiles en rotation autour d'un axe (X) de la machine électrique (1) ; et
- une bobine supraconductrice (6), centrée sur l'axe (X) et s'étendant radialement à l'extérieur des pastilles supraconductrices (7), la bobine supraconductrice (6) étant configurée pour générer un champ magnétique ;
la machine électrique (1) étant caractérisée en ce qu'elle comprend en outre une barrière de flux (12) réalisée dans un matériau supraconducteur qui s'étend entre les pastilles supraconductrices (7) et la bobine supraconductrice (6), ladite barrière de flux (12) étant fixée sur une paroi circonférentielle (7a) des pastilles supraconductrices (7) de sorte à être solidaire en mouvement des pastilles supraconductrices (7).

[Revendication 2] Machine électrique (1) selon la revendication 1, dans laquelle la barrière de flux (12) est sensiblement cylindrique de révolution.

[Revendication 3] Machine électrique (1) selon l'une des revendications 1 et 2, dans laquelle une épaisseur axiale (10) de la barrière de flux (12) est comprise entre 0,1 fois et 1 fois une épaisseur axiale (11) de la bobine supraconductrice (6).

[Revendication 4] Machine électrique (1) selon l'une des revendications 1 à 3, dans laquelle la barrière de flux (12) est discontinue sur sa circonférence et comprend au moins une fente (13) s'étendant suivant une direction sensiblement radiale par rapport à l'axe (X).

[Revendication 5] Machine électrique (1) selon la revendication 4, comprenant en outre une couche isolante (14) logée dans la fente (13).

[Revendication 6] Machine électrique (1) selon l'une des revendications 1 à 5, comprenant en outre un cryostat (9) logeant la bobine supraconductrice (6).

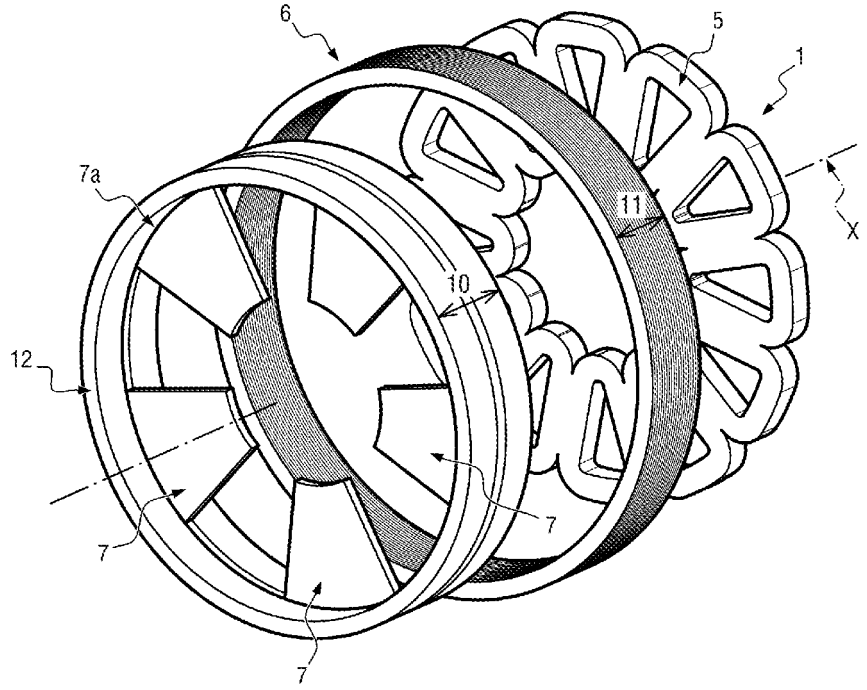
[Revendication 7] Machine électrique (1) selon la revendication 6, dans laquelle le cryostat (9) est réalisé dans un matériau conducteur, par exemple de l'aluminium.

[Revendication 8] Machine électrique (1) selon l'une des revendications 1 à 7, dans laquelle un rayon interne (R1) de la barrière de flux (12) est égal à un rayon externe des pastilles supraconductrices (7).

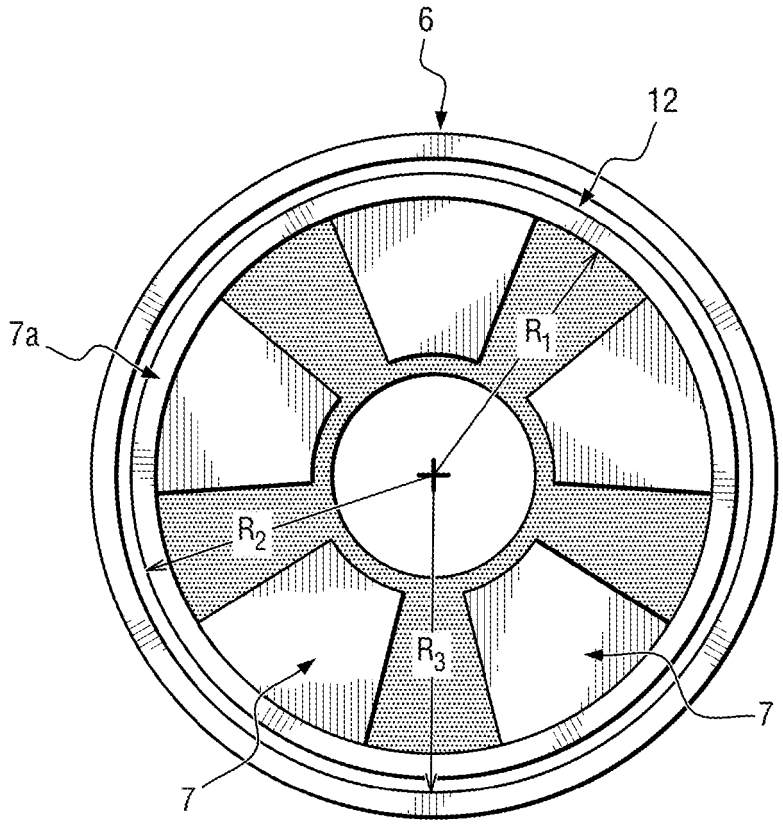
[Revendication 9] Machine électrique (1) selon l'une des revendications 1 à 8, dans laquelle un rayon externe (R_2) de la barrière de flux (12) est strictement inférieur à un rayon interne (R_3) de la bobine supraconductrice (6).

[Revendication 10] Aéronef (100) comprenant une machine électrique (1) selon l'une des revendications 1 à 9.

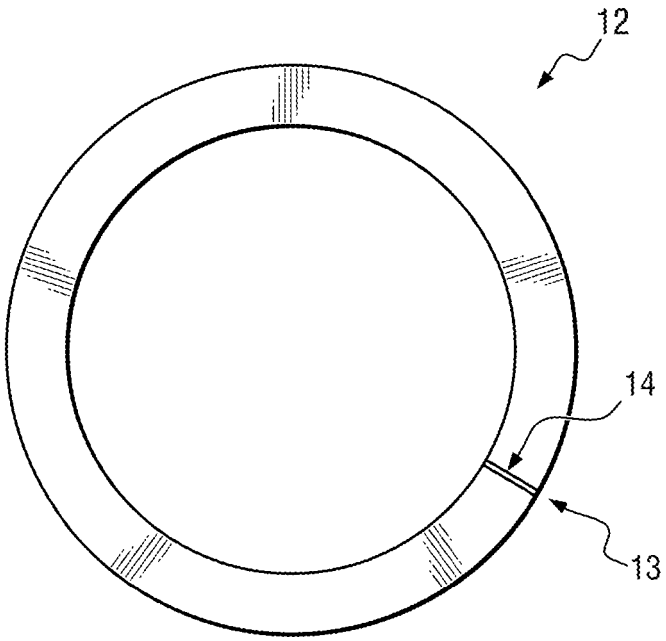
[Fig. 1]



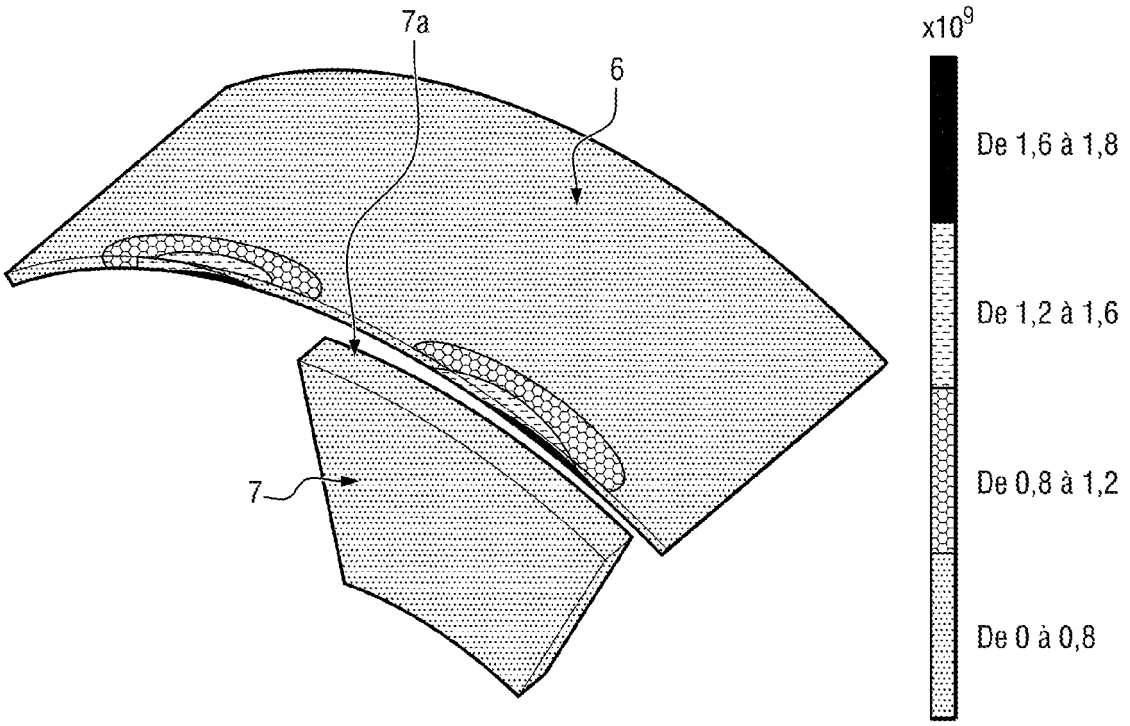
[Fig. 2]



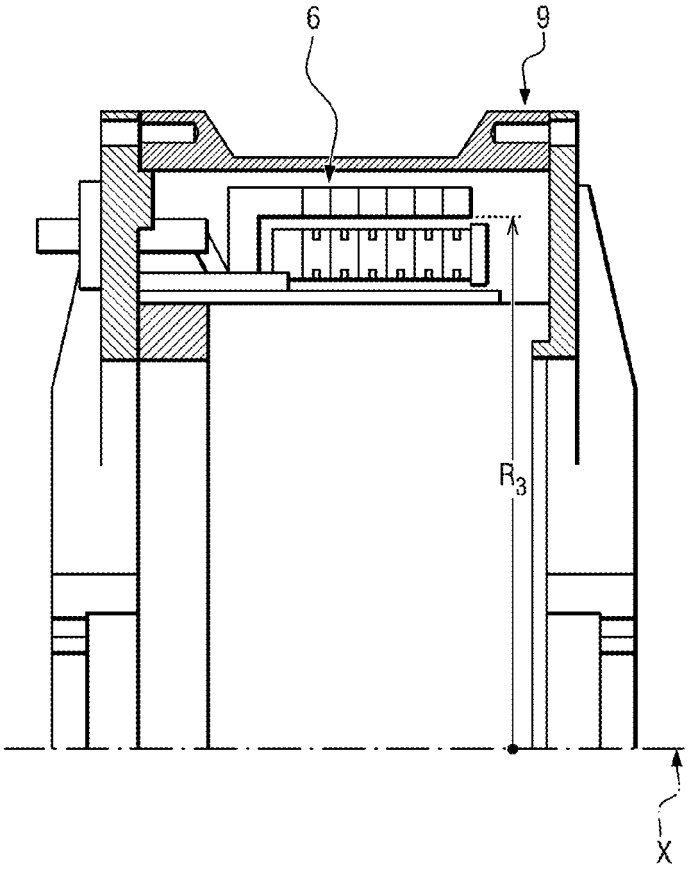
[Fig. 3]



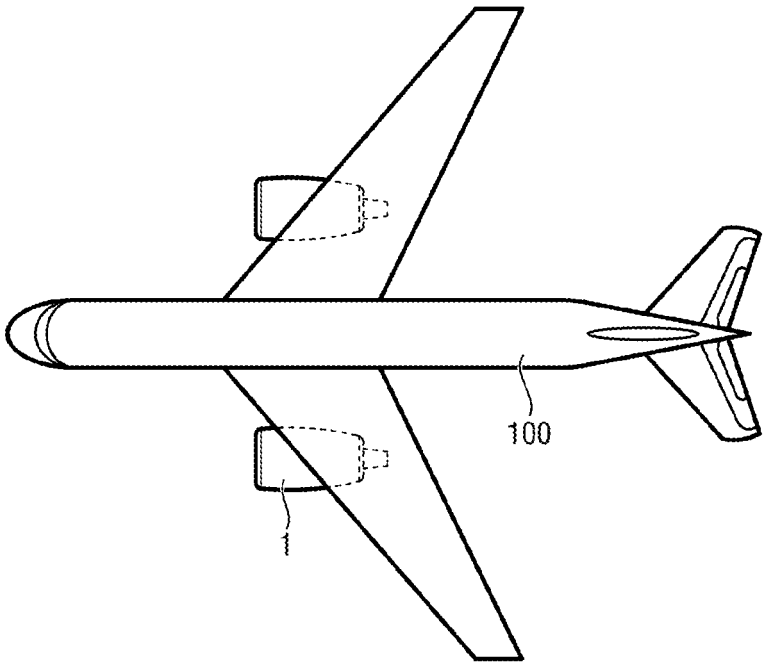
[Fig. 4]



[Fig. 5]



[Fig. 6]



RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

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

N° d'enregistrement national

FA 905825
FR 2201096

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	FR 3 104 341 A1 (SAFRAN [FR]) 11 juin 2021 (2021-06-11) * le document en entier * -----	1-10	H01F6/00 H02K1/02 H02K1/06 H02K55/00
A	FR 3 108 214 A1 (SAFRAN [FR]) 17 septembre 2021 (2021-09-17) * le document en entier * -----	1-10	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			H02K H01F

Date d'achèvement de la recherche	Examinateur
18 octobre 2022	von Rauch, Marianne

CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS

X : particulièrement pertinent à lui seul
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie
A : arrière-plan technologique
O : divulgation non-écrite
P : document intercalaire

T : théorie ou principe à la base de l'invention
E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.
D : cité dans la demande
L : cité pour d'autres raisons
.....
& : membre de la même famille, document correspondant

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2201096 FA 905825

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 **18-10-2022**
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
FR 3104341 A1	11-06-2021	EP 4070442 A1	12-10-2022
		FR 3104341 A1	11-06-2021
		WO 2021110618 A1	10-06-2021
FR 3108214 A1	17-09-2021	FR 3108214 A1	17-09-2021
		WO 2021181049 A1	16-09-2021

EPO FORM P0465