(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

COURBEVOIE

(11) **N° de publication :** ***3 131 126***

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

(21) **N° d'enregistrement national :** **21 13932**

(51) Int Cl[8] : ***H 02 K 3/42*** *(2022.01), H 02 K 16/02, 16/04, 55/04*

(12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

(22) **Date de dépôt :** 17.12.21.

(30) **Priorité :**

(43) **Date de mise à la disposition du public de la demande :** 23.06.23 Bulletin 23/25.

(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 :**

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

(71) **Demandeur(s) :** *SAFRAN Société anonyme* — FR et *UNIVERSITE DE LORRAINE Etablissement public à caractère scientifique, culturel et professionnel* — FR.

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

(73) **Titulaire(s) :** SAFRAN Société anonyme, UNIVERSITE DE LORRAINE Etablissement public à caractère scientifique, culturel et professionnel.

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

(54) Machine électrique à écrans magnétiques supraconducteurs.

(57) Cette machine électrique à barrières de flux comprend un stator comprenant un inducteur annulaire et un induit comprenant au moins un agencement de bobines électromagnétiques, et un rotor (7) comprenant des pastilles supraconductrices montées radialement à l'intérieur de l'inducteur, caractérisée en ce qu'elle comprend des écrans magnétiques (13) supraconducteurs à proximité de l'au moins un agencement de bobines électromagnétiques.

Figure pour l'abrégé : Fig 5a

FR 3 131 126 - A1

Description

Titre de l'invention : Machine électrique à écrans magnétiques supraconducteurs

Domaine technique

[0001] La présente invention concerne la réduction des flux de fuite dans des machines électriques.

[0002] La présente invention est applicable pour des machines électriques supraconductrices ou non supraconductrices, ainsi que des machines à flux axial, radial ou à flux transverse.

[0003] Une application particulièrement intéressante de l'invention concerne les turbomachines destinées à l'alimentation de réseaux de bord d'aéronefs en énergie électrique.

Techniques antérieures

[0004] Les systèmes de propulsion pour aéronef électrique ou hybride nécessitent l'utilisation de moteurs électriques capables de rivaliser avec, voire dépasser, les performances des moteurs thermiques.

[0005] Les machines électriques destinées à la propulsion des avions électriques nécessitent d'être capables de fournir des densités de puissance électrique supérieures à environ 20kW par kg.

[0006] Dans ce contexte, l'utilisation de machines les plus efficaces possible est avantageuse pour pouvoir atteindre ces niveaux de densité de puissance.

[0007] L'utilisation de machines supraconductrices permet en premier lieu d'obtenir une bonne efficacité.

[0008] En effet, lorsqu'ils sont refroidis à une température inférieure à leur température critique, les matériaux supraconducteurs ont une résistivité nulle, qui permet une circulation des courants continus sans perte.

[0009] A cette température, ils présentent également une réponse diamagnétique pour toute variation du champ magnétique. Ce comportement est analogue à celui d'une barrière de champ magnétique.

[0010] L'absence de résistivité des matériaux supraconducteurs à une température inférieure à leur température critique permet donc d'augmenter la densité de courant circulant dans les conducteurs.

[0011] En effet, l'absence de perte par effet Joule dans les conducteurs supraconducteurs permet d'éviter une augmentation linéaire des besoins en refroidissement avec l'augmentation de la puissance des moteurs électriques supraconducteurs. Il reste néanmoins nécessaire de les refroidir à des températures inférieures à la température

critique des matériaux supraconducteurs utilisés, qui est typiquement de l'ordre de 100 Kelvin voire 150 Kelvin.

[0012] On a représenté sur la [Fig.1] un exemple de mode de réalisation d'une machine électrique 1 supraconductrice à barrières de flux et à flux axial sans noyau magnétique, également appelée sans fer.

[0013] La machine électrique 1 comprend un stator 2 comprenant un inducteur 3 supraconducteur annulaire ainsi qu'un ou plusieurs agencements 5 de bobines électromagnétiques 6 induites, l'inducteur 3 étant coaxial aux agencements 5 de bobines électromagnétiques 6.

[0014] La machine électrique comprend également un rotor 7 comprenant des pastilles 8 supraconductrices disposées radialement à l'intérieur de l'inducteur annulaire 3 et rotatives par rapport au stator 2. L'axe de rotation du rotor correspond à l'axe du flux axial de la machine électrique 1. Les pastilles 8 supraconductrices sont refroidies, à l'hélium, à l'azote ou à l'hydrogène par exemple, et réalisent la variation du champ magnétique grâce à la réponse diamagnétique des pastilles 8 supraconductrices. Les pastilles 8 supraconductrices ont par exemple une forme circulaire ou de section annulaire, cette dernière forme améliorant la densité de puissance de la machine électrique.

[0015] L'exemple plus particulièrement illustré à la [Fig.1] correspond à une machine à flux axial comportant un rotor 7 encadré par deux stators 2. Dans ce cas, un ensemble de pastilles 8 est encadré de part et d'autre par un agencement 5 de bobines électromagnétiques 6. En variante, on pourrait également avoir un stator encadré par deux rotors. Dans cette variante, un agencement 5 de bobines électromagnétiques est encadré de part et d'autre par un ensemble de pastilles supraconductrices 8.

[0016] Une telle machine peut fonctionner en mode générateur ou moteur.

[0017] Dans un mode de fonctionnement en générateur, l'inducteur 3 crée un champ magnétique intense, les pastilles 8 supraconductrices réalisent la variation de ce champ magnétique, autrement dit elles le modulent, et les bobines électromagnétiques 6, ici induites, sont exposées au champ magnétique variable créé par la rotation du rotor 7 : une force électromotrice est générée selon la loi de Faraday.

[0018] Dans un mode de fonctionnement en moteur, l'inducteur 3 crée un champ magnétique intense, les pastilles 8 supraconductrices sont exposées au champ magnétique variable créé par les bobines électromagnétiques 6, ici inductrices, ce qui entraine leur mise en rotation.

[0019] Dans une machine électrique conventionnelle, le flux magnétique est guidé par des matériaux ferromagnétiques aussi appelés noyau magnétique, fer, ou culasse. Cependant, ces matériaux sont lourds et ont tendance à saturer lorsque l'induction augmente.

[0020] Ainsi, pour une machine électrique sans fer ou dont le fer est saturé, le flux magnétique est partiellement guidé dans l'air, et des flux de fuites importants apparaissent autour des bobines électromagnétiques, nuisant aux performances de la machine électrique.

[0021] On a représenté schématiquement sur la [Fig.2] des bobines électromagnétiques 6 comprenant une surface utile 10 située au centre du bobinage définissant les contours 11 de chaque bobines électromagnétique 6. Un flux utile passe au travers de la surface utile et participe au fonctionnement normal de la machine électrique 1 tandis que le flux de fuite 12 se propage à proximité des contours 11 des bobines électromagnétiques 6. Le flux de fuite 12 ne participe ainsi pas à la génération du couple de la machine électrique 1 et altère également les performances de la machine électrique 1 en générant des pertes au sein des bobinages qu'il traverse.

Exposé de l'invention

[0022] La présente invention a donc pour but de pallier les inconvénients précités et de diminuer les flux de fuite en l'absence de fer dans une machine électrique ou en cas de saturation du fer.

[0023] La présente invention a pour objet une machine électrique à barrières de flux comprenant un stator comprenant un inducteur annulaire et un induit comprenant au moins un agencement de bobines électromagnétiques, et un rotor comprenant des pastilles supraconductrices montées radialement à l'intérieur de l'inducteur, la machine électrique comprenant des écrans magnétiques supraconducteurs à proximité de l'au moins un agencement de bobines électromagnétiques.

[0024] Les écrans magnétiques ainsi disposés permettent de diminuer les flux de fuite et d'augmenter la valeur maximale d'induction de l'entrefer, ce qui se traduit par une augmentation de la force électromotrice de la machine jusqu'à 30%. De plus, les pertes alternatives, également appelées pertes AC, peuvent être réduites de 15%.

[0025] Avantageusement, la machine électrique fonctionne à flux axial selon l'axe de rotation du rotor, l'au moins un agencement de bobines électromagnétiques étant axialement positionné d'un côté et/ou de l'autre du rotor, laissant un entrefer entre le rotor et l'au moins un agencement de bobines électromagnétiques, l'au moins un agencement de bobines électromagnétiques comprenant des bobines électromagnétiques orientées selon l'axe de rotation du rotor et disposées sous forme annulaire.

[0026] Dans un mode de réalisation particulier, l'inducteur est réalisé en matériau supraconducteur.

[0027] Avantageusement, les écrans magnétiques sont réalisés en ReBCO, préférentiellement en YBCO, ou en BSCCO, ou en MgB2.

[0028] Avantageusement, les écrans magnétiques sont réalisés à partir de procédés de

croissance de germes ou d'empilements de rubans supraconducteurs.

[0029] Avantageusement, les écrans magnétiques sont positionnés dans l'entrefer entre le rotor et l'au moins un agencement de bobines électromagnétiques, et/ou de sorte que l'au moins un agencement de bobines électromagnétiques est positionné entre le rotor et les écrans magnétiques.

[0030] Dans un mode de réalisation, les écrans magnétiques supraconducteurs suivent la forme des contours des bobines électromagnétiques de sorte que les flux de fuites situés sur le contour de chaque bobine électromagnétique sont diminués.

[0031] Dans un autre mode de réalisation, les écrans magnétiques supraconducteurs sont une bande de film radiale s'étendant le long d'une seule partie des bobines électromagnétiques.

[0032] Avantageusement, la machine électrique comprend une enceinte de refroidissement comprenant un fluide de refroidissement à moins de 150 Kelvin de l'au moins un agencement de bobines électromagnétiques avec les écrans magnétiques.

[0033] Dans un mode de réalisation, l'au moins un agencement de bobines électromagnétiques est collé en contact avec les écrans magnétiques dans l'enceinte de refroidissement.

[0034] L'invention a également pour objet une enceinte de refroidissement comprenant un fluide de refroidissement à moins de 150 Kelvin, ainsi qu'un agencement de bobines électromagnétiques et des écrans magnétiques supraconducteurs à proximité de l'au moins un agencement de bobines électromagnétiques.

[0035] L'invention a également pour objet un aéronef comprenant une machine électrique telle que définie précédemment et/ou une enceinte de refroidissement telle que définie précédemment.

Brève description des dessins

[0036] D'autres buts, caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description suivante, donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif, et faite en référence aux dessins annexés sur lesquels :

[0037] [Fig.1] dont il a déjà été fait mention, illustre schématiquement et en vue éclatée une machine électrique à barrière de flux selon l'état de la technique ;

[0038] [Fig.2] dont il a déjà été fait mention, illustre schématiquement des bobines électromagnétiques d'une machine électrique selon l'état de la technique ;

[0039] [Fig.3] est une vue schématique d'un mode de réalisation d'écrans magnétiques d'une machine électrique selon l'invention ;

[0040] [Fig.4] est une vue schématique d'un second mode de réalisation d'écrans magnétiques d'une machine électrique selon l'invention ;

[0041] [Fig.5a]

[0042] et

[0043] [Fig.5b]

[0044] et

[0045] [Fig.5c] sont des vues en coupe schématiques de différents modes de réalisation et de position d'écrans magnétiques d'une machine électrique selon l'invention ;

[0046] [Fig.6a]

[0047] et

[0048] [Fig.6b]

[0049] et

[0050] [Fig.6c]

[0051] et

[0052] [Fig.7a]

[0053] et

[0054] [Fig.7b]

[0055] et

[0056] [Fig.7c] sont des vues en coupe schématiques de différents modes de réalisation d'une enceinte de refroidissement d'une machine électrique selon l'invention ; et

[0057] [Fig.8] est un exemple de mode de réalisation d'une enceinte de refroidissement d'une enceinte de refroidissement d'une machine électrique selon l'invention.

Exposé détaillé d'au moins un mode de réalisation

[0058] On a représenté schématiquement sur la [Fig.3] une vue d'un mode de réalisation d'écrans magnétiques 13 supraconducteurs.

[0059] Ces écrans magnétiques 13 supraconducteurs peuvent être positionnés dans une machine électrique 1 supraconductrice à barrières de flux et à flux axial sans noyau magnétique selon la [Fig.1].

[0060] Dans le mode de réalisation illustré à la [Fig.1], la machine électrique 1 comprend, alignés sur un même axe A et à l'intérieur de l'inducteur 3, deux agencements 5 de bobines électromagnétiques 6 disposés de part et d'autre du rotor 7 comprenant les pastilles 8 supraconductrices. Les bobines électromagnétiques 6 sont disposées radialement afin que le flux utile passant au travers de leur surface utile 10 soit variable en fonction de la position des pastilles 8 supraconductrices du rotor 7. Un seul agencement 5 de bobines électromagnétiques 6 peut également être utilisé d'un côté ou de l'autre du rotor 7. En variante, on pourrait également avoir un stator encadré par un ou deux rotors. Dans cette variante, un agencement 5 de bobines électromagnétiques est encadré de part et d'autre par un ensemble de pastilles supraconductrices 8.

[0061] Un entrefer 15 existe entre chaque agencement de bobines électromagnétiques 6 et le rotor 7.

[0062] De plus, les écrans magnétiques 13 sont positionnés à proximité de bobines électro-

magnétiques 6 telles qu'illustrées à la [Fig.2]. Le terme « à proximité » signifie en particulier que les écrans magnétiques 13 peuvent être en contact direct avec les bobines électromagnétiques 6 ou à une distance proche desdites bobines, par exemple à une distance inférieure à dix fois la distance de l'entrefer 15, autrement dit la distance entre les bobines électromagnétiques et les pastilles 8 du rotor 7.

[0063] Les écrans magnétiques 13 illustrés à la [Fig.3] comprennent un orifice central 16 et sont disposés face aux bobines électromagnétiques 6 de sorte que chaque écran magnétique 13 est placé face à une bobine électromagnétique 6 et couvre entièrement la bobine 6. Chaque orifice central 16 d'écran magnétique 13 est de taille semblable à celle de la surface utile 10 de chaque bobine électromagnétique 6.

[0064] Les écrans magnétiques 13 suivent la forme des contours 11 des bobines électromagnétiques 6 en faisant écran devant les contours 11 de sorte que les flux de fuite 12 situés à proximité des contours 11 sont diminués grâce à la réponse diamagnétique des écrans magnétiques 13 face aux flux magnétiques présents dans la machine électrique 1.

[0065] En particulier, un écran magnétique 13 est de forme trapézoïdale.

[0066] On a représenté sur la [Fig.4] un second mode de réalisation d'écrans magnétiques 13. Dans cette variante, les écrans magnétiques 13 peuvent ne recouvrir que partiellement les bobines électromagnétiques 6, par exemple dans le cas où une partie telle que la tête T d'une bobine électromagnétique 6 est très peu exposée au champ magnétique de l'inducteur 3 et n'a pas besoin d'être recouverte par un écran magnétique 13. La tête T est par exemple la partie située en périphérie radiale d'un agencement 5 de bobines électromagnétiques 6. Dans ce cas, un écran magnétique 13 peut être une bande de film radiale s'étendant le long d'une seule partie des bobines électromagnétiques 6, par exemple le long des grands côtés C.

[0067] Les écrans magnétiques 13 sont par exemple réalisés en ReBCO (« Rare-earth barium copper oxide » en terme anglo-saxon), en particulier en YBCO (« Yttrium barium copper oxide »). Dans un autre mode de réalisation, les écrans magnétiques 13 sont réalisés en BSCCO (« Bismuth strontium calcium copper oxide ») ou encore en MgB2 (« Magnesium diboride »).

[0068] Dans un mode particulier de réalisation, les écrans magnétiques 13 sont réalisés par procédé de croissance de germe. Ce procédé consiste à former un cristal par adjonction progressive de matière sur la surface d'un germe préexistant.

[0069] Dans un autre mode de réalisation, les écrans magnétiques 13 sont réalisés par empilement de rubans supraconducteurs, ce type de procédé permettant une meilleure tenue mécanique des écrans magnétiques 13.

[0070] Par exemple, les écrans magnétiques 13 ont une épaisseur de 0,5 millimètres à 1 centimètre. L'épaisseur à réaliser pour un écran magnétique 13 dépend de sa tem-

pérature de fonctionnement ainsi que de l'amplitude du champ magnétique auquel l'écran magnétique 13 fait face.

[0071] On a représenté schématiquement sur les figures 5a, 5b et 5c des portions de coupes axiales des différentes positions possibles des écrans magnétiques 13 dans la machine électrique 1. Les écrans magnétiques 13 sont positionnés par rapport au rotor 7 et à un agencement 5 de bobines électromagnétiques 6. Dans un mode de réalisation comprenant deux agencements 5 de bobines électromagnétiques 6 de part et d'autre du rotor 7 tel qu'illustré à la [Fig.1], les écrans magnétiques 13 seront disposés de la même manière symétriquement par rapport au rotor 7.

[0072] La [Fig.5a] illustre un mode de réalisation dans lequel les écrans magnétiques 13 sont positionnés dans l'entrefer 15 entre le rotor 7 et un agencement 5 de bobines électromagnétiques 6.

[0073] La [Fig.5b] illustre un autre mode de réalisation dans lequel les écrans magnétiques 13 sont positionnés à l'extrémité axiale de la machine électrique 1 de sorte qu'un agencement 5 de bobines électromagnétiques 6 est positionné entre le rotor 7 et les écrans magnétiques 13.

[0074] La [Fig.5c] illustre un dernier mode de réalisation dans lequel les écrans magnétiques 13 réunissent les conditions des figures 5a et 5b. En particulier, des écrans magnétiques 13 sont positionnés de part et d'autre des agencements 5 de bobines électromagnétiques 6.

[0075] Les matériaux supraconducteurs nécessitent d'être refroidis à des températures cryogéniques pour utiliser les effets supraconducteurs de la matière. Les températures cryogéniques sont de l'ordre de moins de 150° Kelvin. De plus, les bobines électromagnétiques nécessitent également d'être refroidies.

[0076] Cependant, l'inducteur 3, l'induit représenté par les bobines électromagnétiques 6, les pastilles 8 supraconductrices, et les écrans magnétiques 13 ne fonctionnent pas nécessairement aux mêmes températures. Des systèmes d'étanchéité sont donc déployés entre les différents éléments.

[0077] En particulier, la machine électrique 1 comprend une enceinte de refroidissement 17 étanche permettant de contenir un agencement 5 de bobines électromagnétiques 6 avec les écrans magnétiques 13 associés aux bobines électromagnétiques 6 pour diminuer les flux de fuite 12.

[0078] Plusieurs enceintes de refroidissement 17 sont utilisées lorsque la machine électrique 1 comprend plusieurs agencements 5 de bobines électromagnétiques 6. Par exemple, pour deux agencements 5 de bobines électromagnétiques 6, la machine électrique 1 comprend deux enceintes de refroidissement 17 contenant chacune un agencement 5 de bobines électromagnétiques 6 et les écrans magnétiques 13 correspondants.

[0079] L'enceinte de refroidissement 17 comprend un fluide de refroidissement 18 à moins

de 150° Kelvin. Le fluide de refroidissement 18 est par exemple de l'hélium, de l'hydrogène ou de l'azote.

[0080] On a représenté schématiquement sur les figures 6a, 6b et 6c différents mode de réalisation et de disposition d'écrans magnétiques 13 et de bobines électromagnétiques 6 dans l'enceinte de refroidissement 17 dans le cas où les écrans magnétiques 13 sont dans l'entrefer 15 entre le rotor 7 et les bobines électromagnétiques 6.

[0081] L'enceinte de refroidissement 17 comprend un support 20, un couvercle 21, un fluide de refroidissement 18, des bobines électromagnétiques 6, en particulier un agencement 5 de bobines électromagnétiques 6 et des écrans magnétiques 13.

[0082] Le support 20 et le couvercle 21 forment la paroi et délimitent le volume de l'enceinte de refroidissement 17, dont l'étanchéité est assurée par des joints toriques 22. L'enceinte de refroidissement 17 comprend en outre au moins une entrée et au moins une sortie de fluide permettant de faire circuler le fluide de refroidissement 18 dans l'enceinte de refroidissement 17 depuis une source externe.

[0083] La [Fig.6a] illustre un mode de réalisation dans lequel les écrans magnétiques 13 sont collés axialement aux bobines électromagnétiques 6 et dans lequel les écrans magnétiques 13 sont collés au support 20, en particulier collés dans le fond 23 du support 20. Le collage des écrans magnétiques 13 au support 20 permet en particulier de rigidifier la paroi de l'enceinte de refroidissement 17 et d'améliorer ainsi la tenue mécanique de l'enceinte de refroidissement 17. En effet, l'entrefer 15 de la machine électrique 1 étant minimisé pour de meilleures performances, et le support 20 passant au niveau de l'entrefer 15, le support 20 est assez fin, de l'ordre de quelques millimètres.

[0084] Dans ce mode de réalisation, les bobines électromagnétiques 6 sont collées aux écrans magnétiques 13 si leur température de fonctionnement est égale ou inférieure à celle des écrans magnétiques 13. Le fluide de refroidissement 18 est donc situé entre les bobines électromagnétiques 6 et le couvercle 21, à l'une des extrémités axiales de la machine électrique 1.

[0085] La [Fig.6b] illustre un mode de réalisation dans lequel les écrans magnétiques 13 sont collés au fond 23 du support 20, permettant de rigidifier la paroi de l'enceinte de refroidissement 17 et d'améliorer ainsi la tenue mécanique de l'enceinte de refroidissement 17. Dans ce mode de réalisation, les bobines électromagnétiques 6 sont entourées de fluide de refroidissement 18. Ce mode de réalisation est avantageux si les bobines électromagnétiques 6 fonctionnent à des températures supérieures à celles des écrans magnétiques 13. Le fluide de refroidissement 18 est donc situé entre les bobines électromagnétiques 6 et le couvercle 21, ainsi qu'entre les bobines électromagnétiques 6 et les écrans magnétiques 13 afin de refroidir les écrans magnétiques 13.

[0086] Dans ce mode de réalisation, l'enceinte de refroidissement 17 comprend des cales 25

de manière à garantir le bon positionnement des bobines électromagnétiques 6.

[0087] La [Fig.6c] illustre une variante du mode de réalisation illustré à la [Fig.6b] dans lequel les écrans magnétiques 13 sont collés au fond 23 du support 20, permettant de rigidifier la paroi de l'enceinte de refroidissement 17 et d'améliorer ainsi la tenue mécanique de l'enceinte de refroidissement 17. Dans cette variante, les bobines électromagnétiques 6 sont au contact du couvercle 21, par exemple collées au couvercle 21. Le fluide de refroidissement 18 est donc situé entre les bobines électromagnétiques 6 et les écrans magnétiques 13 afin de refroidir les écrans magnétiques 13 et les bobines électromagnétiques 6.

[0088] Dans cette variante, les cales 25 ne sont pas nécessaires si les bobines électromagnétiques 6 sont collées au couvercle 21 et que les écrans magnétiques 13 sont collés au support 20. Cette variante permet également de rigidifier le couvercle 21 et d'éviter les pertes d'étanchéité.

[0089] On a représenté schématiquement sur les figures 7a, 7b et 7c différents modes de réalisation et de disposition d'écrans magnétiques 13 et de bobines électromagnétiques 6 dans l'enceinte de refroidissement 17 dans le cas où l'agencement 5 de bobines électromagnétiques 6 est positionné entre le rotor 7 et les écrans magnétiques 13.

[0090] L'enceinte de refroidissement 17 comprend un support 20, un couvercle 21, un fluide de refroidissement 18, des bobines électromagnétiques 6 et des écrans magnétiques 13.

[0091] Le support 20 et le couvercle 21 forment la paroi de l'enceinte de refroidissement 17, dont l'étanchéité est assurée par des joints toriques 22.

[0092] La [Fig.7a] illustre un mode de réalisation dans lequel les bobines électromagnétiques 6 sont collées axialement au fond 23 du support 20 et dans lequel les écrans magnétiques 13 sont collés aux bobines électromagnétiques 6. Le collage des bobines électromagnétiques 6 au support 20 permet en particulier de rigidifier la paroi de l'enceinte de refroidissement 17 et d'améliorer ainsi la tenue mécanique de l'enceinte de refroidissement 17. En effet, l'entrefer 15 de la machine électrique 1 étant minimisé pour de meilleures performances, et le support 20 passant au niveau de l'entrefer 15, le support 20 est assez fin, de l'ordre de quelques millimètres.

[0093] Dans ce mode de réalisation, les bobines électromagnétiques 6 sont collées aux écrans magnétiques 13 si leur température de fonctionnement est égale ou inférieure à celle des écrans magnétiques 13. Le fluide de refroidissement 18 est donc situé entre les écrans magnétiques 13 et le couvercle 21, à l'une des extrémités axiales de la machine électrique 1.

[0094] La [Fig.7b] illustre un mode de réalisation dans lequel les bobines électromagnétiques 6 sont collées au fond 23 du support 20, permettant de rigidifier la paroi de l'enceinte de refroidissement 17 et d'améliorer ainsi la tenue mécanique de l'enceinte de refroidissement 17. Dans ce mode de réalisation, les écrans magnétiques 13 sont

entourés de fluide de refroidissement 18. Ce mode de réalisation est avantageux si les bobines électromagnétiques 6 fonctionnent à des températures supérieures à celles des écrans magnétiques 13. Le fluide de refroidissement 18 est donc situé entre les écrans magnétiques 13 et le couvercle 21, ainsi qu'entre les bobines électromagnétiques 6 et les écrans magnétiques 13 afin de refroidir les écrans magnétiques 13 et les bobines électromagnétiques 6.

[0095] Dans ce mode de réalisation, l'enceinte de refroidissement 17 comprend des cales 25 de manière à garantir le bon positionnement des écrans magnétiques 13.

[0096] La [Fig.7c] illustre une variante du mode de réalisation illustré à la [Fig.7b] dans lequel les bobines électromagnétiques 6 sont collées au fond 23 du support 20, permettant de rigidifier la paroi de l'enceinte de refroidissement 17 et d'améliorer ainsi la tenue mécanique de l'enceinte de refroidissement 17. Dans cette variante, les écrans magnétiques 13 sont au contact du couvercle 21, par exemple collés au couvercle 21. Le fluide de refroidissement 18 est donc situé entre les bobines électromagnétiques 6 et les écrans magnétiques 13 afin de refroidir les écrans magnétiques 13 et les bobines électromagnétiques 6.

[0097] Dans cette variante, les cales 25 ne sont pas nécessaires si les écrans magnétiques 13 sont collés au couvercle 21 et que les bobines électromagnétiques 6 sont collées au support 20. Cette variante permet également de rigidifier le couvercle 21 et d'éviter les pertes d'étanchéité.

[0098] Les modes de réalisations illustrés aux figures 6a, b, c et 7a, b, c sont compatibles lorsque des écrans magnétiques 13 sont placés de part et d'autre d'un agencement 5 de bobines électromagnétiques 6 selon la [Fig.5c].

[0099] On a représenté sur la [Fig.8] un exemple de mode de réalisation d'une enceinte de refroidissement 17 cylindrique. Ce mode de réalisation est compatible avec les modes de réalisation précédent. L'enceinte de refroidissement 17 comprend un support 20 et un couvercle 21 pouvant être solidarisé par un système de fixation, par exemple un ensemble de vis 26. Le support 20 comprend des logements 27 destinés à recevoir des bobines électromagnétiques 6 et des écrans magnétiques 13. Le couvercle 21 comprend une entrée 28 et une sortie 29 de fluide permettant de faire circuler le fluide de refroidissement 18 dans l'enceinte de refroidissement 17 depuis une source externe (non représentée). En variante, l'entrée 28 et la sortie 29 de fluide sont positionnées sur le support 20. Dans une seconde variante, l'entrée 28 et la sortie 29 de fluide sont positionnées sur la périphérie radiale 30 de l'enceinte de refroidissement 17.

[0100] L'enceinte de refroidissement 17 comprend également une paroi interne 31 anti-recirculation positionnée de sorte que le fluide de refroidissement 18 traverse tout le volume de l'enceinte de refroidissement 17 entre l'entrée 28 et la sortie 29 de l'enceinte de refroidissement 17 sans sortir directement après son entrée. La paroi

interne 31 est par exemple située dans le couvercle 21 ou dans le support 20.

Revendications

[Revendication 1] Machine électrique à barrières de flux comprenant un stator (2) comprenant un inducteur (3) annulaire et un induit comprenant au moins un agencement (5) de bobines électromagnétiques (6), et un rotor (7) comprenant des pastilles (8) supraconductrices montées radialement à l'intérieur de l'inducteur (3), caractérisée en ce qu'elle comprend des écrans magnétiques (13) supraconducteurs à proximité de l'au moins un agencement (5) de bobines électromagnétiques (6).

[Revendication 2] Machine électrique selon la revendication 1, caractérisée en ce qu'elle fonctionne à flux axial selon l'axe de rotation du rotor, l'au moins un agencement (5) de bobines électromagnétiques (6) étant axialement positionné d'un côté et/ou de l'autre du rotor (7), laissant un entrefer (15) entre le rotor (7) et l'au moins un agencement (5) de bobines électromagnétiques (6), l'au moins un agencement (5) de bobines électromagnétiques (6) comprenant des bobines électromagnétiques (6) orientées selon l'axe de rotation du rotor (7) et disposées sous forme annulaire.

[Revendication 3] Machine électrique selon l'une des revendications 1 et 2, dans laquelle l'inducteur (3) est réalisé en matériau supraconducteur.

[Revendication 4] Machine électrique selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans laquelle les écrans magnétiques (13) sont réalisés en ReBCO, préférentiellement en YBCO, ou en BSCCO, ou en MgB2.

[Revendication 5] Machine électrique selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans laquelle les écrans magnétiques (13) sont réalisés à partir de procédés de croissance de germes ou d'empilements de rubans supraconducteurs.

[Revendication 6] Machine électrique selon l'une quelconque des revendications 2 à 5, dans laquelle les écrans magnétiques (13) sont positionnés dans l'entrefer (15) entre le rotor (7) et l'au moins un agencement (5) de bobines électromagnétiques (6), et/ou de sorte que l'au moins un agencement (5) de bobines électromagnétiques (6) est positionné entre le rotor (7) et les écrans magnétiques (13).

[Revendication 7] Machine électrique selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, dans laquelle les écrans magnétiques (13) supraconducteurs suivent la forme des contours (11) des bobines électromagnétiques (6) de sorte que les flux de fuites (12) situés sur le contour (11) de chaque bobine électromagnétique (6) sont diminués.

[Revendication 8] Machine électrique selon l'une quelconque des revendications 1 à 6,

dans laquelle les écrans magnétiques (13) supraconducteurs sont une bande de film radiale s'étendant le long d'une seule partie (C) des bobines électromagnétiques (6).

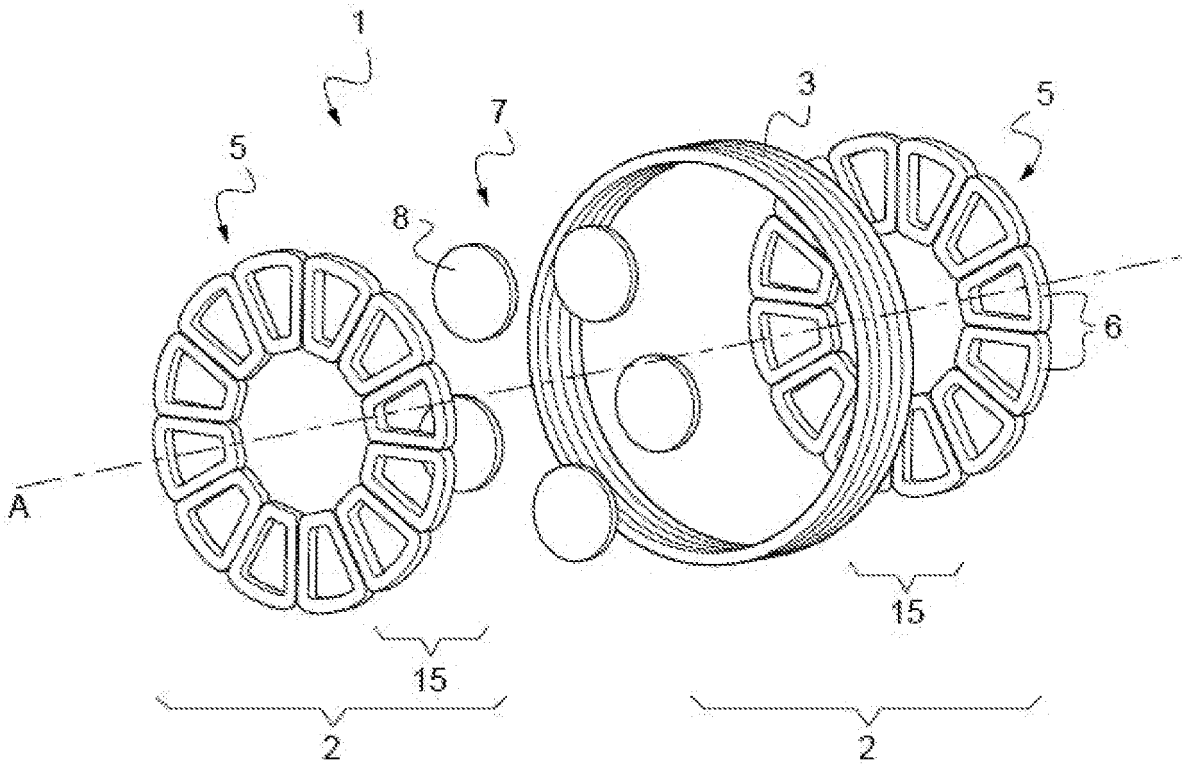
[Revendication 9] Machine électrique selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, comprenant une enceinte de refroidissement (17) comprenant un fluide de refroidissement (18) à moins de 150 Kelvin de l'au moins un agencement (5) de bobines électromagnétiques (6) avec les écrans magnétiques (13).

[Revendication 10] Machine électrique selon la revendication 9, dans laquelle l'au moins un agencement (5) de bobines électromagnétiques (6) est collé en contact avec les écrans magnétiques (13) dans l'enceinte de refroidissement (17).

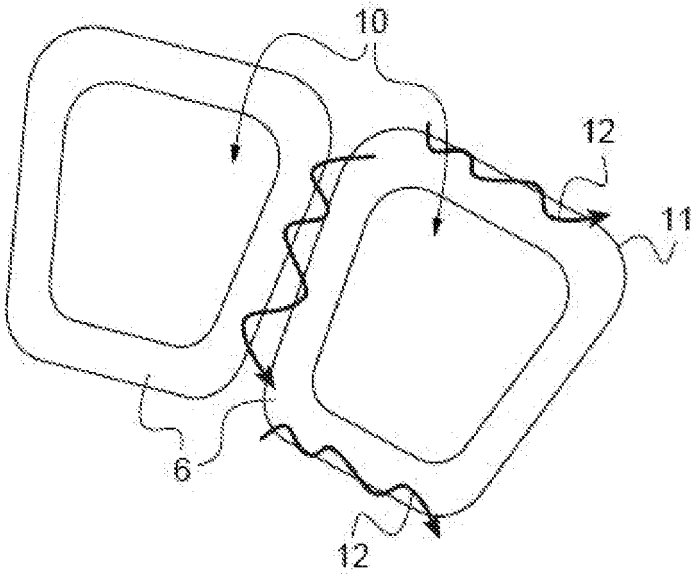
[Revendication 11] Enceinte de refroidissement comprenant un fluide de refroidissement (18) à moins de 150 Kelvin, caractérisée en ce qu'elle comprend un agencement (5) de bobines électromagnétiques (6) et des écrans magnétiques (13) supraconducteurs à proximité de l'au moins un agencement (5) de bobines électromagnétiques (6).

[Revendication 12] Aéronef caractérisé en ce qu'il comprend une machine électrique selon l'une quelconque des revendications 1 à 10 et/ou une enceinte de refroidissement (17) selon la revendication 11.

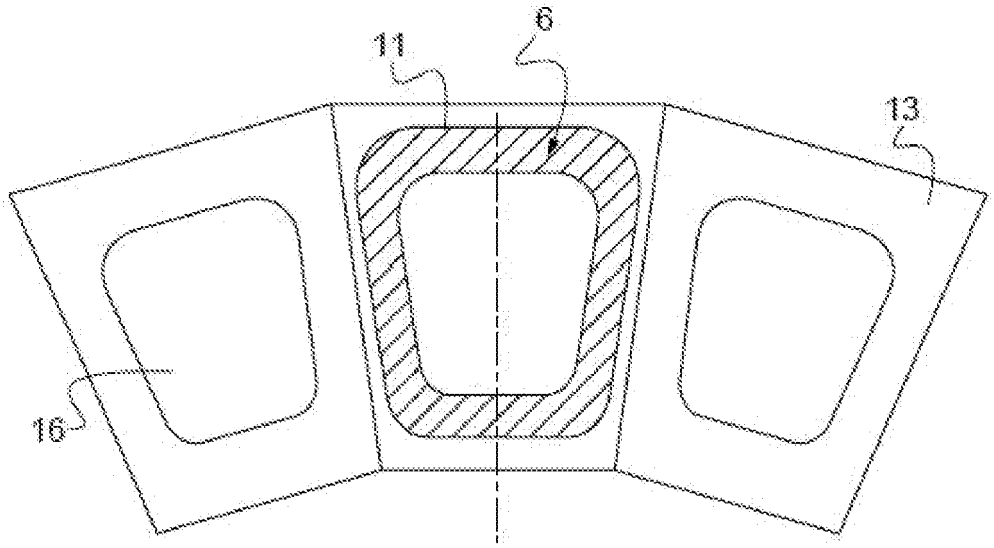
[Fig. 1]



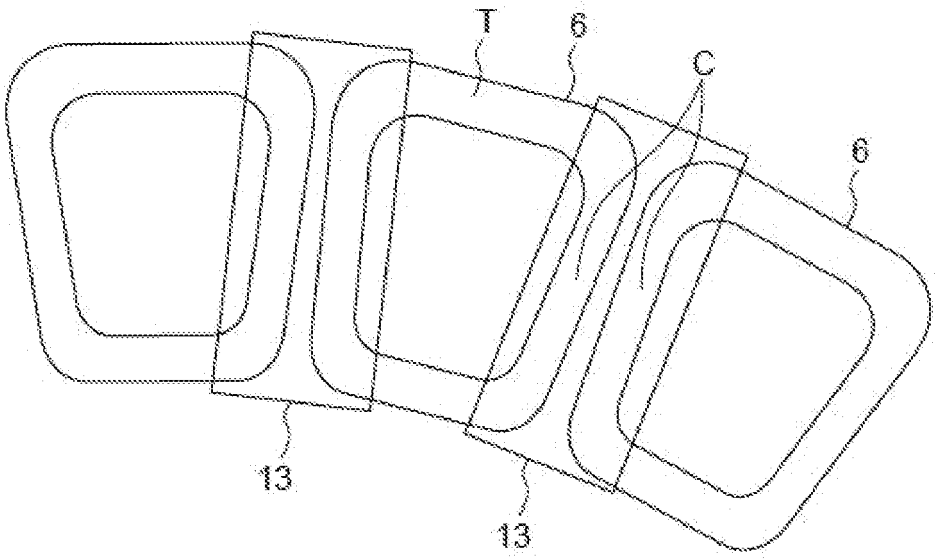
[Fig. 2]



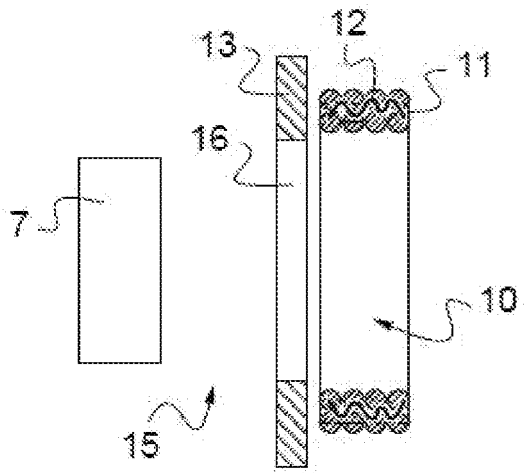
[Fig. 3]



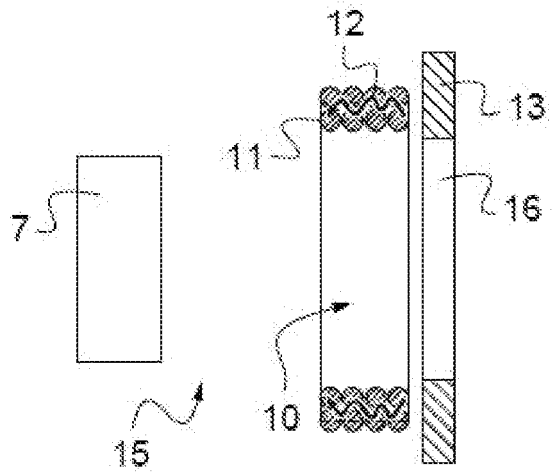
[Fig. 4]



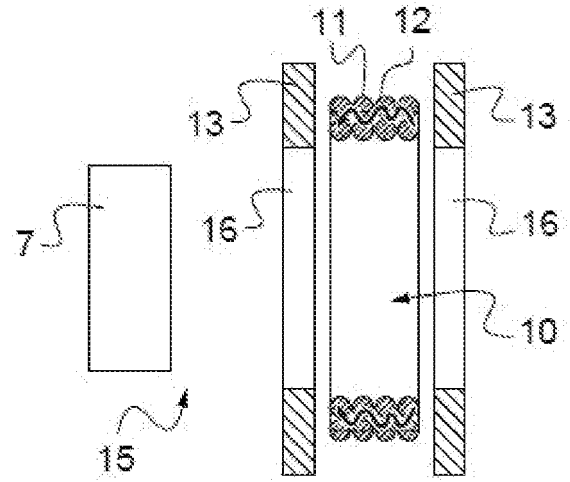
[Fig. 5a]



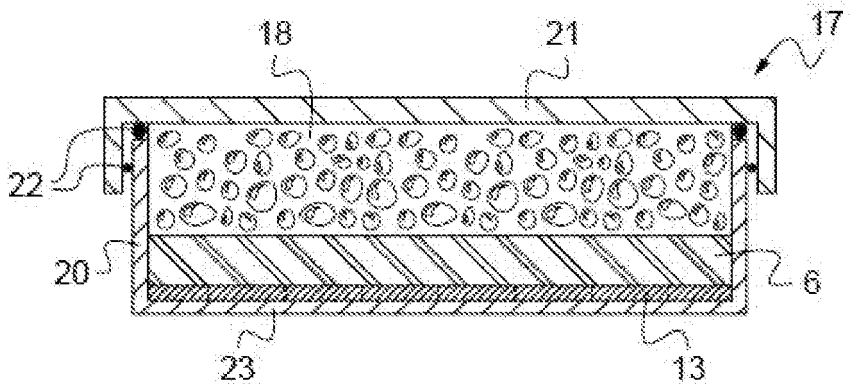
[Fig. 5b]



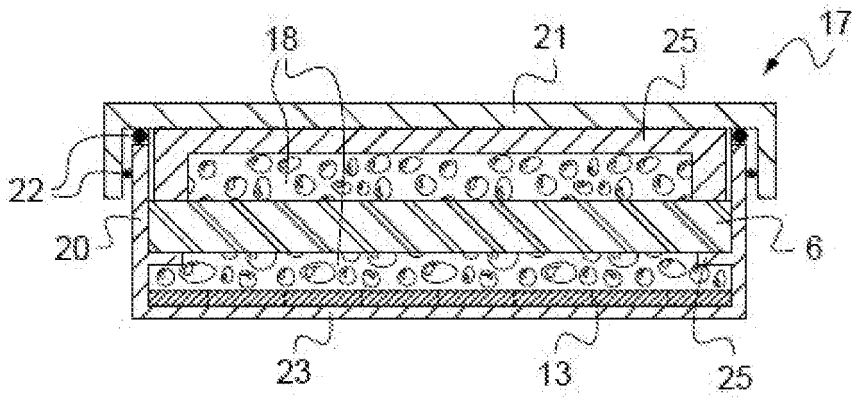
[Fig. 5c]



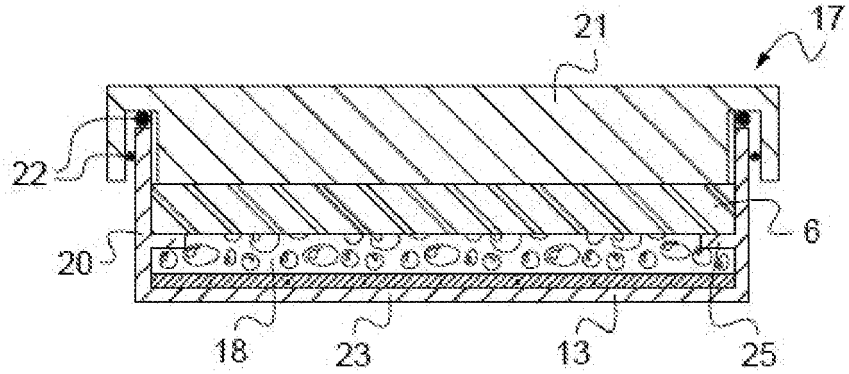
[Fig. 6a]



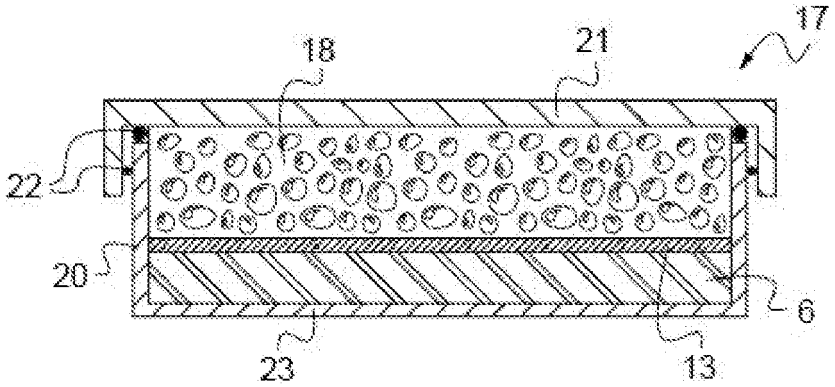
[Fig. 6b]



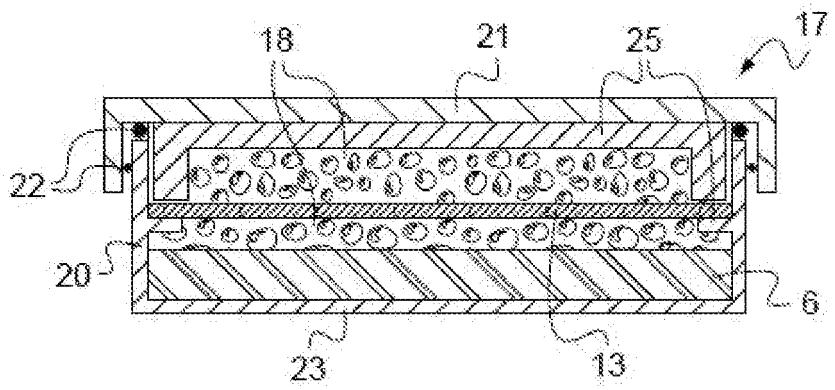
[Fig. 6c]



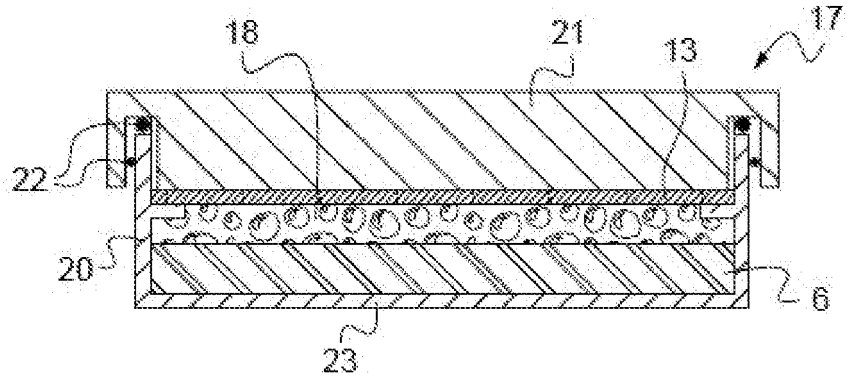
[Fig. 7a]



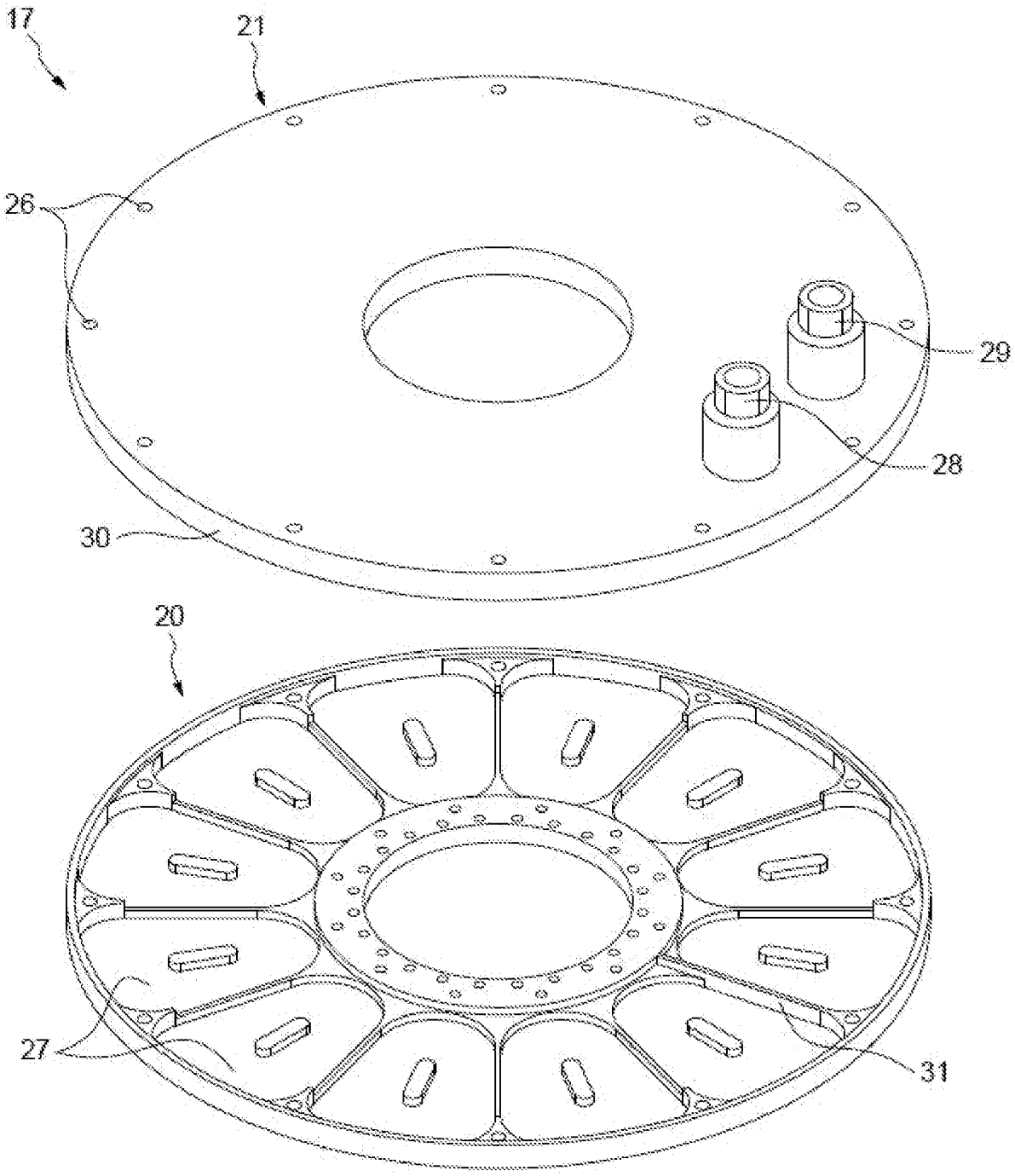
[Fig. 7b]



[Fig. 7c]



[Fig. 8]



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 902726
FR 2113932

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X	WO 2021/116575 A1 (SAFRAN [FR]; UNIV DE LORRAINE [FR]) 17 juin 2021 (2021-06-17) * abrégé; figures 1,6 * * page 1, lignes 6-7 * * page 6, lignes 31-32 * * page 7, lignes 6-9 * * page 11, lignes 9-12 * * page 13, lignes 24-26 * -----	1-12	H02K3/42 H02K16/02 H02K16/04 H02K55/04
X	A Colle ET AL: "Evaluation des Pertes dans une Machine Supraconductrice à Modulation de Flux Evaluation des Pertes dans une Machine Supracon- ductrice à Modulation de Flux", , 1 novembre 2018 (2018-11-01), XP055649650, Extrait de l'Internet: URL:https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01910634/document [extrait le 2019-12-05] * abrégé; figure 1 * * 1.Introduction; 2.Topologie de L'inducteur * -----	1-3,11, 12	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) H02K H01F
X	FR 3 093 599 A1 (SAFRAN [FR]) 11 septembre 2020 (2020-09-11) * abrégé; revendication 8; figure 1 * * alinéas [0017], [0028], [0039] * -----	1-3,11, 12	
A	DE 21 15 798 A1 (SIEMENS AG) 12 octobre 1972 (1972-10-12) * abrégé * -----	1-12	

Date d'achèvement de la recherche	Examinateur
17 août 2022	Güvener, Cem

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 2113932 FA 902726

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **17-08-2022**
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
WO 2021116575 A1	17-06-2021	FR 3104804 A1	18-06-2021
		WO 2021116575 A1	17-06-2021
FR 3093599 A1	11-09-2020	AUCUN	
DE 2115798 A1	12-10-1972	AUCUN	

EPO FORM P0465