

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
COURBEVOIE

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

3 131 573

21 N° d'enregistrement national : 22 00093

51 Int Cl⁸ : B 64 D 27/04 (2022.01), B 64 D 35/04, 33/00, B 64 C 27/12

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 06.01.22.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 07.07.23 Bulletin 23/27.

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

60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

Demanded(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : SAFRAN HELICOPTER ENGINES
Société par actions simplifiée à associé unique — FR.

72 Inventeur(s) : RICHARD Stéphane Raphaël Yves,
CEAUSU Enzo, PATIN Alexis Benjamin Cédric et BÉD-
DOK Stéphane Meyer.

73 Titulaire(s) : SAFRAN HELICOPTER ENGINES
Société par actions simplifiée à associé unique.

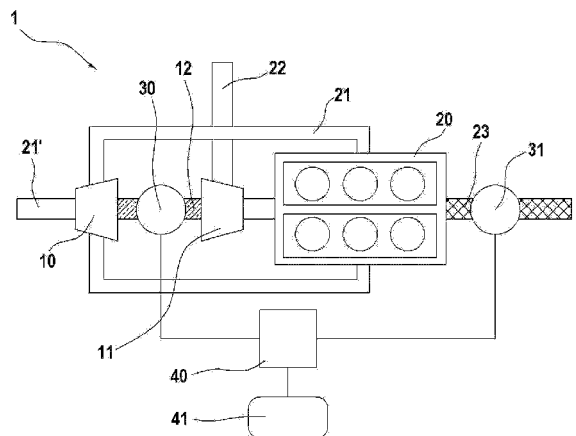
74 Mandataire(s) : CABINET BEAU DE LOMENIE.

54 Système propulsif hybride pour aéronef.

57 Système propulsif hybride pour aéronef

Système propulsif (1) hybride pour aéronef (100), comprenant un moteur à combustion (20) présentant un arbre de sortie (23), l'aéronef (100) étant configuré de sorte que tous ses régimes de fonctionnement soient tels que l'arbre de sortie (23) tourne entre 75% et 125% d'une vitesse de référence unique, le système propulsif (1) comprenant une turbine (10) connectée à l'échappement de gaz (21) du moteur à combustion (20), et un compresseur (11) mécaniquement couplé à la turbine (10) par un arbre rotatif (12), le compresseur (11) étant connecté à l'admission de gaz (22) du moteur à combustion (20), une première machine électrique réversible (30) couplée à l'arbre rotatif (12), une deuxième machine électrique réversible (31) couplée à l'arbre de sortie (23) du moteur à combustion (20), la première machine électrique réversible (30) et la deuxième machine électrique réversible (31) étant reliées électriquement l'une à l'autre.

Figure pour l'abrégé : Fig. 2.



FR 3 131 573 - A1



Description

Titre de l'invention : Système propulsif hybride pour aéronef

Domaine technique

- [0001] Le présent exposé concerne un système propulsif hybride pour aéronef.
- [0002] Les systèmes propulsifs du présent exposé sont particulièrement adaptés à des appareils aéronautiques tels que des appareils à voilure tournante (hélicoptères, drones, etc...) ou des appareils à voilure fixe.

Technique antérieure

- [0003] Les aéronefs sont très majoritairement propulsés par des systèmes utilisant des moteurs thermiques tels que des turbomachines ou des moteurs à combustion. Dans le cas des hélicoptères, des appareils à voilure fixe ou des drones, ce sont des moteurs isolés qui doivent à eux seuls fournir l'intégralité de la puissance nécessaire au bon fonctionnement de l'aéronef. Cela implique des contraintes sur les systèmes propulsifs en termes de dimensionnement, de mécanique et de thermodynamique. Il en résulte que de tels systèmes propulsifs sont massifs et que certaines pièces particulièrement exposées sont peu durables.
- [0004] De plus, ces systèmes propulsifs émettent des polluants tels que du CO₂, des suies ou des NO_x. La consommation des systèmes de propulsion est donc un enjeu majeur puisque chaque économie de carburant est double : cela diminue les coûts d'utilisation de l'aéronef pour l'opérateur et cela diminue également le rejet de polluants.
- [0005] Des systèmes propulsifs associent un moteur thermique à un électromoteur capable de prélever de l'énergie lorsque le moteur fournit un surplus de puissance par rapport à la puissance nécessaire pour faire fonctionner l'aéronef et de stocker cette énergie sous forme électrique. Cette énergie stockée peut ensuite être redistribuée là où elle est nécessaire. De cette façon, l'énergie fournie par le moteur thermique est mieux optimisée.
- [0006] Cependant, ces systèmes restent fortement consommateurs de carburant et donc fortement émetteurs de polluants. Par conséquent, leur acceptabilité sociale est faible et ils sont au mieux tout juste compatibles avec les normes environnementales actuelles, et risquent fortement de ne plus être compatibles avec les normes futures.
- [0007] Il existe donc un réel besoin pour un système propulsif plus performant, plus durable et plus économe en carburant, de sorte qu'il soit dépourvu, au moins en partie, des inconvénients inhérents aux systèmes propulsifs connus.

Exposé de l'invention

- [0008] Le présent exposé concerne un système propulsif hybride pour aéronef, comprenant

un moteur à combustion présentant un arbre de sortie mécaniquement couplé à un élément de propulsion de l'aéronef, l'aéronef étant configuré de sorte que tous ses régimes de fonctionnement soient tels que l'arbre de sortie tourne entre 75% et 125% d'une vitesse de référence unique, le système propulsif comprenant en outre une admission de gaz et un échappement de gaz, le système propulsif comprenant en outre une turbine connectée à l'échappement de gaz du moteur à combustion de façon à être entraînée par les gaz d'échappement du moteur à combustion, et un compresseur mécaniquement couplé à la turbine par un arbre rotatif, le compresseur étant connecté à l'admission de gaz du moteur à combustion, une première machine électrique réversible couplée audit arbre rotatif, une deuxième machine électrique réversible couplée à l'arbre de sortie du moteur à combustion, la première machine électrique réversible et la deuxième machine électrique réversible étant reliées électriquement l'une à l'autre.

- [0009] Préférentiellement, l'arbre de sortie tourne entre 80% et 120% de la vitesse de référence unique. Plus préférentiellement, l'arbre de sortie tourne entre 90% et 110% de la vitesse de référence unique. Encore plus préférentiellement, l'arbre de sortie tourne entre 95% et 105% de la vitesse de référence unique.
- [0010] Un tel système propulsif permet de récupérer une partie de l'énergie contenue dans les gaz d'échappement afin de la redistribuer dans le système propulsif. Cela représente donc une augmentation du rendement et de la puissance globale du système de l'ordre de 10 à 25% par rapport à un système propulsif classique sans traitement des gaz d'échappement. Par ailleurs, il est à noter que le présent système propulsif est décrit dans l'exemple d'une utilisation dans un aéronef, mais pourrait être utilisé dans d'autres véhicules propulsés.
- [0011] Le moteur à combustion est configuré pour faire tourner l'arbre de sortie à des vitesses resserrées autour d'une vitesse de référence. On parle alors de moteur à régime fixe. Dans une telle situation, le moteur à combustion peut être précisément optimisé pour cette vitesse de référence et être plus performant à cette vitesse qu'un moteur à combustion classique, qui couvre une gamme plus large de vitesses.
- [0012] En particulier, l'utilisation d'un régime fixe permet d'avoir des conditions thermodynamiques et mécaniques plus constantes au sein du moteur à combustion, ce qui permet d'affiner plus justement les différents composants de ce moteur à ces conditions. De ce fait, la récupération de l'énergie contenue dans les gaz d'échappement est facilitée et améliorée.
- [0013] Tous les précédents avantages permettent une diminution de la consommation en carburant du présent système propulsif par rapport aux systèmes propulsifs connus. Cette diminution en consommation représente donc une diminution des coûts d'usage de l'aéronef équipé d'un tel système propulsif. Par ailleurs, puisque la consommation

est moindre, l'émission de polluants d'un tel aéronef est aussi amoindrie.

- [0014] L'utilisation de deux machines électriques réversibles permet d'apporter un couple supplémentaire à l'arbre de sortie ce qui augmente la puissance motrice totale délivrée par le système propulsif. Ce couple supplémentaire ne pourrait pas être obtenu avec un système propulsif comprenant uniquement un moteur à combustion, et représente donc une amélioration des systèmes connus.
- [0015] Dans certains modes de réalisation, le système propulsif comprend une batterie connectée à au moins une des machines électriques réversibles, optionnellement via un module électronique de puissance.
- [0016] Dans cette configuration, de l'énergie électrique peut être stockée dans la batterie lorsque le système de propulsif produit plus d'énergie que nécessaire pour le fonctionnement de l'aéronef. De plus, l'énergie électrique ainsi stockée peut être redistribuée au moteur ou à d'autres parties de l'aéronef, à des instants où cette énergie est nécessaire.
- [0017] Le cas échéant, le module électronique de puissance permet d'adapter les caractéristiques électriques (puissance, tension, intensité, etc.) et/ou la nature alternative ou continue du courant reçu par la batterie et les machines électriques réversibles. Ainsi, les échanges d'énergie électrique entre les machines électriques et/ou la batterie sont facilités.
- [0018] Dans certains modes de réalisation, au moins l'une de la première machine électrique réversible et la deuxième machine électrique réversible est un moteur-générateur, par exemple de type synchrone à aimants permanents.
- [0019] En effet, les moteurs-générateurs de type synchrone à aimant permanents présentent des rendements meilleurs que les autres types de moteur générateur. Par conséquent, l'utilisation de tels moteurs-générateurs permet d'améliorer encore le rendement global du système de propulsion. Cet effet est d'autant plus grand si les deux machines électriques réversibles sont des moteurs-générateurs.
- [0020] Dans certains modes de réalisation, le système propulsif comprend un échangeur de chaleur prévu en aval du compresseur et en amont du moteur à combustion, l'échangeur de chaleur étant configuré pour ajuster la température des gaz sortant du compresseur avant leur entrée dans le moteur à combustion.
- [0021] La présence d'un échangeur de chaleur permet de refroidir les gaz en aval du compresseur. En effet, du fait de la compression, les gaz en aval du compresseur ont vu leur température augmenter. Ainsi, le compresseur permet d'atténuer cette augmentation de sorte que les gaz fournis au moteur à combustion soient à une température optimisée pour le fonctionnement du moteur à combustion. Le rendement du moteur à combustion s'en voit amélioré.
- [0022] Dans certains modes de réalisation, le taux de détente de la turbine est compris entre

1 et 5, voire entre 2 et 5.

- [0023] L'utilisation d'un tel taux de détente pour la turbine permet d'extraire une quantité optimale d'énergie provenant des gaz d'échappement du moteur à combustion. En effet, la récupération de l'énergie des gaz d'échappement engendre une contre-pression au niveau de l'échappement qui pourrait être néfaste pour le bon fonctionnement du moteur à combustion. A cet effet, le taux de détente prévu représente un compromis entre la récupération de l'énergie contenue dans les gaz d'échappement et la contre-pression engendrée par cette récupération.
- [0024] Dans certains modes de réalisation, la turbine présente un diamètre maximal compris entre 25 et 80 mm, voire entre 35 et 70 mm.
- [0025] Dans cette configuration, la turbine récupère l'énergie des gaz d'échappement de façon optimale tout en respectant les contraintes structurelles imposées par la géométrie de l'aéronef.
- [0026] Dans certains modes de réalisation, la vitesse de référence de l'arbre de sortie du moteur à combustion est comprise entre 3000 et 7000 tours par minute.
- [0027] Lorsque la vitesse de référence est prévue dans un tel intervalle, tous les régimes de fonctionnement de l'aéronef sont accessibles. Par ailleurs, l'utilisation d'une vitesse de référence prévue dans une telle gamme permet de garantir un fonctionnement du moteur à combustion dans des conditions où le ratio rendement/consommation est optimal.
- [0028] Dans certains modes de réalisation, le moteur à combustion est un moteur à pistons.
- [0029] L'utilisation d'un moteur à pistons est avantageuse en termes de masse, de rendement et de puissance fournie dans le cadre du présent système propulsif où le moteur à combustion présente un régime fixe, centré sur une vitesse de référence.
- [0030] Par ailleurs, un système propulsif utilisant un moteur à pistons à la place d'un turbomoteur est plus économe en carburant de 30 à 70%. Cela représente donc une économie de carburant supplémentaire.
- [0031] Dans certains modes de réalisation, le moteur à pistons est configuré pour être alimenté en combustible et en comburant selon un ratio compris entre 0,01 et 0,08.
- [0032] On comprend que le ratio numérique représente la masse de combustible divisée par la masse de comburant. A titre d'exemple non limitatif, le combustible peut être du kérosène, du gaz naturel, du biogaz ou de l'hydrogène.
- [0033] Lorsque le moteur à pistons est alimenté selon un tel ratio combustion/comburant, le mode de combustion est un mode de combustion pauvre. De cette façon, le débit de gaz d'échappement est plus grand, ce qui augmente la quantité d'énergie récupérable par la turbine. Cela représente également une amélioration du rendement global du système propulsif.
- [0034] Par ailleurs, le fonctionnement en combustion pauvre augmente la durée de vie de

certaines composants, en particulier celle de la turbine. En effet, la combustion pauvre permet de diminuer le nombre de particules et d'espèces oxydantes excitées dans les gaz d'échappement par rapport à une combustion classique. Les gaz d'échappement sont aussi à une température moins élevée lorsqu'ils entrent dans la turbine.

- [0035] Dans certains modes de réalisation, le moteur à pistons comprend 12 cylindres ou moins. Préférentiellement, le moteur à pistons comprend 6 cylindres ou moins. Encore plus préférentiellement, le moteur à pistons comprend 4 cylindres ou moins.
- [0036] Dans ce mode de réalisation, le faible nombre de cylindres représente une économie de masse pour le moteur à pistons. Par conséquent, le rendement global du système propulsif est amélioré. Ce faible nombre de cylindres est permis par le haut rendement du système propulsif.
- [0037] Dans certains modes de réalisation, le moteur à pistons est configuré pour effectuer un cycle Miller-Atkinson.
- [0038] Le cycle de Miller-Atkinson est un cycle utilisant une détente prolongée. Une telle détente prolongée du moteur à combustion permet d'augmenter l'énergie récupérable par la turbine, ce qui améliore le rendement global du système propulsif, typiquement de l'ordre de 5 à 10% par rapport aux systèmes propulsifs connus.
- [0039] Dans certains modes de réalisation, le système propulsif comprend un contrôleur configuré pour piloter les échanges d'énergie entre la première machine électrique réversible, la deuxième machine électrique réversible, l'arbre rotatif et l'arbre de sortie du moteur à pistons.
- [0040] Le contrôleur permet d'optimiser les échanges d'énergie entre les différentes parties du système propulsif, à savoir le moteur à combustion, les machines électriques réversibles et la batterie. De cette façon, le système propulsif présente un meilleur rendement.
- [0041] Dans certains modes de réalisation, le contrôleur est configuré pour, lorsque le moteur à combustion fournit une puissance mécanique inférieure à la puissance nécessaire au fonctionnement de l'aéronef, contrôler la première machine électrique réversible pour transformer de l'énergie mécanique de l'arbre rotatif en énergie électrique, et contrôler la deuxième machine électrique réversible pour transformer ladite énergie électrique en énergie mécanique fournie à l'arbre de sortie du moteur à combustion.
- [0042] Lorsque le contrôleur est configuré de la sorte, il est possible de fournir en continu une puissance à l'aéronef qui ne pourrait pas être fournie par le moteur à combustion seul. On parle alors de puissance maximale continue du système propulsif. Cette puissance maximale continue peut être par exemple requise lors des phases de croisière rapide. De plus, cela permet de produire davantage d'énergie sans changer le débit de combustible, ce qui représente une économie en carburant de l'ordre de 15 à 30% par

rapport aux systèmes propulsifs connus.

- [0043] Le contrôleur est aussi configuré pour prélever de l'énergie à la batterie et l'additionner à l'énergie électrique provenant de l'arbre rotatif afin d'alimenter la deuxième machine électrique réversible. Cet apport supplémentaire d'énergie permet d'augmenter la puissance par rapport à la puissance fournie pour la croisière rapide. Dans ces circonstances, la somme des puissances apportées par le moteur et la deuxième machine électrique peut correspondre à la puissance maximale requise, par exemple la puissance nécessaire pour le décollage de l'aéronef.
- [0044] Par ailleurs, un tel contrôle permet au système propulsif de fournir à l'aéronef une puissance suffisante pour accomplir un atterrissage d'urgence dans le cas où une avarie aurait touché le moteur à combustion et l'aurait rendu partiellement défaillant. La sécurité de l'aéronef est donc augmentée.
- [0045] Dans certains modes de réalisation, le contrôleur est configuré pour, lorsque le moteur à combustion fournit une puissance mécanique supérieure à la puissance nécessaire au fonctionnement de l'aéronef, contrôler la première machine électrique réversible pour transformer de l'énergie mécanique de l'arbre rotatif en énergie électrique, et contrôler la deuxième machine électrique réversible pour transformer de l'énergie mécanique de l'arbre de sortie du moteur à combustion en énergie électrique.
- [0046] Lorsque le contrôleur est configuré de la sorte, il est possible de recharger la batterie en cours d'utilisation de l'aéronef et lorsque la puissance nécessaire à la propulsion est inférieure à la puissance fournie par le moteur à combustion. Cela permet de restituer l'énergie stockée dans la batterie à des moments où cette énergie est nécessaire. Cette énergie peut également être utilisée pour faire fonctionner d'autres parties de l'aéronef, par exemple des équipements électriques ou électroniques embarqués.
- [0047] De plus, l'utilisation de la première et de la deuxième machine électrique réversible comme générateurs permet de recharger plus rapidement la batterie, par rapport à un cas où seule l'une des machines électriques réversibles serait impliquée dans la recharge.
- [0048] Dans certains modes de réalisation, le contrôleur est configuré pour, lorsque le moteur à combustion est en régime transitoire et sous-alimenté, contrôler la première machine électrique réversible pour transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique fournie à l'arbre rotatif.
- [0049] Lorsque le contrôleur est configuré de la sorte, il est possible de minimiser l'impact des régimes transitoires du système propulsif, dans lesquels le moteur à combustion est sous-alimenté en air. En effet, dans un tel cas, l'énergie fournie à la première machine électrique réversible permet d'accélérer la vitesse de rotation du compresseur et d'ainsi augmenter l'admission d'air du moteur à combustion, ce qui compense la sous-alimentation. En conséquence, le régime transitoire est écourté. Cela augmente donc la

rapidité d'exécution de certaines manœuvres de l'aéronef. Ainsi, la sécurité de l'utilisateur de l'aéronef est augmentée.

- [0050] Dans certains modes de réalisation, le contrôleur est configuré pour, lorsque le moteur à combustion est à l'arrêt, contrôler la deuxième machine électrique réversible pour transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique fournie à l'arbre de sortie du moteur à combustion.
- [0051] Lorsque le contrôleur est configuré de la sorte, il est possible de faciliter le démarrage du système propulsif. Le démarrage peut également être entièrement réalisé de cette façon, sans autre apport d'énergie que celui fourni par la deuxième machine électrique réversible. Cela rend cette opération plus économe en carburant, ce qui participe au caractère économe du présent système propulsif. Par ailleurs, cette configuration améliore la sécurité de l'appareil dans le cas où un redémarrage du moteur à combustion est nécessaire en vol.
- [0052] Cette configuration permet également de s'affranchir d'un démarreur dédié pour le moteur à combustion. Cela représente donc une économie de masse et de coûts.
- [0053] Dans certains modes de réalisation, le système propulsif comprend une troisième machine électrique réversible reliée électriquement à la première et/ou la deuxième machines électrique réversible, la troisième machine électrique réversible étant mécaniquement couplée à un arbre secondaire configuré pour entraîner un élément de propulsion secondaire de l'aéronef.
- [0054] Dans une telle configuration, il est possible d'alimenter un élément de propulsion secondaire à l'aide du système propulsif. Cela représente une économie de coût et de masse puisque deux éléments de propulsion sont alimentés par un seul système propulsif.
- [0055] Le présent exposé concerne par ailleurs un aéronef comprenant un système propulsif selon l'un quelconque des précédents modes de réalisation.
- [0056] Un tel aéronef présente les avantages correspondants du système propulsif décrit ci-dessus.
- [0057] Dans certains modes de réalisation, l'aéronef est un hélicoptère et l'élément de propulsion est un rotor d'hélice propulsive et l'élément de propulsion secondaire est un rotor de queue.
- [0058] Dans cette configuration, il n'est pas nécessaire de fournir un système supplémentaire pour entraîner le rotor de queue, ce qui représente une économie de coût et de masse.
- [0059] Dans d'autres modes de réalisation, l'aéronef est un aéronef à voilure fixe tel qu'un avion, un drone à voilure fixe ou encore un Avion à Décollage et Atterrissage Vertical (appelé ADAV ou en anglais VTOL pour *Vertical Take-Off and Landing*).
- [0060] Les caractéristiques et avantages précités, ainsi que d'autres, apparaîtront à la lecture

de la description détaillée qui suit, d'exemples de réalisation du dispositif proposé. Cette description détaillée fait référence aux dessins annexés.

Brève description des dessins

- [0061] Les dessins annexés sont schématiques et visent avant tout à illustrer les principes de l'exposé.
- [0062] Sur ces dessins, d'une figure à l'autre, des éléments (ou parties d'élément) identiques sont repérés par les mêmes signes de référence.
- [0063] [Fig.1] La [Fig.1] représente schématiquement un hélicoptère comprenant un système propulsif selon un mode de réalisation.
- [0064] [Fig.2] La [Fig.2] représente un système propulsif selon un premier mode de réalisation.
- [0065] [Fig.3] La [Fig.3] représente le système propulsif selon le premier mode de réalisation lorsque ce dernier fournit sa puissance maximale.
- [0066] [Fig.4] La [Fig.4] représente le système propulsif selon le premier mode de réalisation lorsque la batterie est pleine.
- [0067] [Fig.5] La [Fig.5] représente le système propulsif selon le premier mode de réalisation lorsque la batterie est vide.
- [0068] [Fig.6] La [Fig.6] représente le système propulsif selon le premier mode de réalisation lorsque le moteur à combustion est en sous-alimentation.
- [0069] [Fig.7] La [Fig.7] représente le système propulsif selon le premier mode de réalisation lors du démarrage du moteur à combustion.
- [0070] [Fig.8] La [Fig.8] représente le système propulsif selon le premier mode de réalisation lorsque le moteur à combustion est défaillant.
- [0071] [Fig.9] La [Fig.9] représente le système propulsif selon une première variante du premier mode de réalisation fonctionnant sans batteries.
- [0072] [Fig.10] La [Fig.10] représente le système propulsif selon une deuxième variante du premier mode de réalisation incluant un élément de propulsion secondaire.

Description des modes de réalisation

- [0073] Afin de rendre plus concret l'exposé, un exemple de dispositif est décrit en détail ci-après, en référence aux dessins annexés. Il est rappelé que l'invention ne se limite pas à cet exemple.
- [0074] La [Fig.1] représente schématiquement un hélicoptère 100 comprenant un système propulsif 1 selon un mode de réalisation de l'invention. Le système propulsif 1 est couplé à un moyen de propulsion de l'hélicoptère 100, par exemple à l'hélice principale.
- [0075] La [Fig.2] représente schématiquement le système propulsif 1. Le système propulsif 1 comprend un moteur à pistons 20 présentant un échappement 21, une admission 22 et

un arbre de sortie 23. Le système propulsif 1 comprend en outre une turbine 10 et un compresseur 11 mécaniquement couplés par un arbre rotatif 12. La turbine 10 est entraînée par l'échappement 21 tandis que le compresseur 11 est intégré à l'admission 22. On comprend que l'air pénétrant dans l'admission 22 passe par le compresseur 11 avant d'entrer dans le moteur à pistons 20. Par ailleurs, la turbine 10 est connectée à un échappement résiduel 21' configuré pour convoyer les gaz sortant de la turbine 10.

- [0076] L'entraînement de la turbine 10 par les gaz d'échappement du moteur à pistons 20 permet la mise en rotation du compresseur 11 par l'intermédiaire de l'arbre rotatif 12. Cependant, dans le présent exemple, la turbine 10 est dimensionnée pour fournir plus d'énergie que l'énergie nécessaire à la mise en rotation du compresseur 11 afin de pouvoir soutirer une partie de cette énergie, comme il sera détaillé par la suite.
- [0077] Dans le présent exemple, la turbine 10 peut être une turbine à soupape de décharge ou une turbine à géométrie variable.
- [0078] Le moteur à pistons 20 est configuré pour fonctionner à régime fixe. Le moteur à combustion 20 est configuré pour faire tourner l'arbre de sortie 23 à des vitesses resserrées autour d'une vitesse de référence. La vitesse de référence peut être comprise entre 3000 et 7000 tours par minutes.
- [0079] De plus, le moteur à pistons 20 présente au plus 12 cylindres et autant de pistons disposés dans lesdits cylindres. Dans le présent exemple, le moteur à pistons 20 comprend 6 cylindres.
- [0080] Le moteur à pistons 20 peut présenter une quelconque architecture adéquate, notamment parmi une architecture en V, en ligne, en H, à étoile, en W, rotative ou rotative inversée. D'autres architectures peuvent être envisagées.
- [0081] Une première machine électrique réversible 30 est couplée mécaniquement à l'arbre rotatif 12 et une deuxième machine électrique réversible 31 est couplée à l'arbre de sortie 23. La première machine réversible 30 et la deuxième machine réversible 31 sont reliées électriquement. Il est entendu que deux éléments « reliés électriquement » sont capable d'échanger de l'énergie électrique. Par exemple, des éléments reliés électriquement peuvent faire partie d'un même circuit électrique, ou être reliés physiquement par un câble ou un fil électrique.
- [0082] La première machine électrique réversible 30 est configurée pour échanger de l'énergie mécanique avec l'arbre rotatif 12 et pour convertir cette énergie mécanique en énergie électrique ou vice versa. La deuxième machine électrique réversible 31 est configurée pour échanger de l'énergie mécanique avec l'arbre de sortie 23 et pour convertir cette énergie mécanique en énergie électrique ou vice versa.
- [0083] Dans ce mode de réalisation, une batterie 41 est connectée électriquement à la première et/ou la deuxième machine réversible 30, 31. Cette batterie 41 est configurée pour stocker de l'énergie électrique produite par la première et/ou la deuxième

machine électrique 30, 31. La batterie 41 est aussi configurée pour restituer de l'énergie à la première et/ou la deuxième machine réversible 30, 31.

- [0084] Un module électronique de puissance 40 est configuré pour adapter la puissance reçue et/ou transmise par la batterie 41 à la première et la deuxième machine électrique réversible 30, 31. Le module électronique de puissance 40 est aussi configuré pour adapter la nature alternative ou continue du courant en fonction du type de courant accepté par la batterie 41 d'une part et par la première et de la deuxième machine réversible 30, 31 d'autre part.
- [0085] Un contrôleur 50 est apte à contrôler la première et la deuxième machine électrique réversible 30, 31, la batterie 41 et le module de puissance 40. En particulier, le contrôleur 50 est configuré pour contrôler la première machine électrique réversible 30 afin qu'elle fournisse de l'énergie mécanique à l'arbre rotatif 12 ou qu'elle en prélève pour la transformer en énergie électrique. Le contrôleur 50 est également configuré pour contrôler le comportement de la deuxième machine électrique vis-à-vis de l'arbre de sortie 23 de façon analogue mais indépendante. Le contrôleur 50 est par ailleurs configuré pour contrôler le module de puissance 40, de sorte que le module de puissance 40 abaisse ou élève la tension électrique qui est reçue par la batterie 41 ou les machines électriques réversibles 30, 31, ou qu'il fournisse un courant continu ou alternatif à ces mêmes éléments.
- [0086] De plus, le contrôleur 50 est apte à contrôler la batterie 41 pour qu'elle stocke de l'énergie électrique ou qu'elle en délivre à la première et/ou la deuxième machine électrique réversible 30, 31.
- [0087] La [Fig.4] représente le système propulsif 1, par exemple lorsque ce dernier fournit sa puissance maximale continue. Pour cela, le contrôleur 50 contrôle la première machine électrique réversible 30 pour qu'elle prélève de l'énergie mécanique de l'arbre rotatif 12 et la transforme en énergie électrique. Cette énergie électrique est délivrée à la deuxième machine électrique 31. Alternativement ou en complément, et comme cela est représenté sur la [Fig.3], le contrôleur 50 peut contrôler la batterie 41 pour qu'elle restitue de l'énergie électrique stockée à la deuxième machine électrique 31. Lorsque que cette énergie électrique est restituée en complément de l'énergie fournie par la première machine électrique réversible 30, le système propulsif peut atteindre puissance maximale ponctuelle plus grande que la puissance maximale continue permettant, par exemple, le décollage de l'aéronef.
- [0088] Parallèlement, le contrôleur 50 contrôle la deuxième machine électrique réversible 31 pour qu'elle transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique et qu'elle fournisse cette énergie mécanique à l'arbre de sortie 23. Par conséquent, l'énergie totale de l'arbre de sortie 23 est la somme de l'énergie mécanique fournie par le moteur à pistons 20 et de l'énergie mécanique fournie par la deuxième machine

électrique réversible 31. La circulation de cette énergie est représentée par les flèches de la [Fig.3].

- [0089] C'est dans cette configuration que le système de propulsion 1 peut atteindre un maximum de puissance ponctuel fournie à l'arbre de sortie. Toutefois, ce cas de figure se généralise à toutes les situations pour lesquelles on souhaite un couple (ou une puissance) au niveau de l'arbre de sortie 23 supérieur à ce qui peut être fourni par le moteur à combustion seul.
- [0090] La [Fig.4] représente le système propulsif 1 par exemple lors d'une phase de vol de l'hélicoptère 100 dans laquelle la batterie 41 est intégralement chargée. Dans de telles circonstances, le contrôleur 50 contrôle la première machine électrique réversible 30 pour qu'elle prélève de l'énergie mécanique de l'arbre rotatif 12 et la transforme en énergie électrique. Cette énergie électrique est délivrée à la deuxième machine électrique 31. La circulation de cette énergie est représentée par les flèches de la [Fig.4].
- [0091] Parallèlement, le contrôleur 50 contrôle la deuxième machine électrique réversible 31 pour qu'elle transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique et qu'elle fournisse cette énergie mécanique à l'arbre de sortie 23. Durant cette phase de vol, le système propulsif 1 peut fournir suffisamment de puissance à l'hélicoptère 100 pour que ce dernier puisse fonctionner dans de bonnes conditions sans que l'énergie stockée dans la batterie 41 n'ait besoin d'être impliquée. Cependant, le contrôleur 50 peut quand même solliciter la batterie 41 dans la propulsion si cela s'avère judicieux.
- [0092] La [Fig.5] représente le système propulsif 1 par exemple lors d'une phase de vol de l'hélicoptère dans laquelle la batterie 41 est déchargée ou partiellement chargée. Dans de telles circonstances, le contrôleur 50 contrôle la première machine électrique réversible 30 pour qu'elle prélève de l'énergie mécanique de l'arbre rotatif 12 et la transforme en énergie électrique. Alternativement ou en complément, le contrôleur 50 contrôle la deuxième machine électrique réversible 31 pour qu'elle prélève de l'énergie mécanique de l'arbre de sortie 23 et la transforme en énergie électrique. L'énergie électrique en provenance de la première machine électrique réversible 30 et/ou de la deuxième machine électrique réversible 31 est fournie à la batterie, ce qui la permet de recharger.
- [0093] Le contrôleur 50 entre préférentiellement dans cette configuration lorsque la batterie 41 n'est pas intégralement chargée et lorsque le moteur à pistons 20 fournit une puissance supérieure à la puissance nécessaire à entraîner l'arbre de sortie 23 pour assurer un bon fonctionnement de l'hélicoptère 100.
- [0094] La [Fig.6] représente le système propulsif 1 par exemple lorsque le moteur à pistons 20 est sous-alimenté. Dans une telle circonstance, le contrôleur 50 contrôle la batterie 41 pour fournir de l'énergie électrique à la première machine électrique réversible 30

et contrôle la première machine électrique réversible 30 pour transformer cette énergie électrique en énergie mécanique. De cette façon, la rotation de l'arbre rotatif 12 est accélérée ce qui augmente le taux de compression du compresseur 11 ainsi que le débit dans le compresseur 11. Le moteur à pistons 20 voit donc son approvisionnement en gaz augmenter, et ces gaz ont une température plus élevée.

[0095] Le contrôleur 50 entre préférentiellement dans cette configuration lors de l'apparition de régime transitoires du moteur à pistons 20. En effet, dans de tels régimes transitoires, pour des systèmes propulsifs connus, le temps de réponse du moteur à pistons peut augmenter brièvement, ce qui augmente également le temps nécessaire au système propulsif pour ajuster la puissance délivrée vers une puissance cible commandée par l'utilisateur. Inversement, la présente configuration permet de minimiser le temps de réponse du moteur à pistons 20 en augmentant le débit d'air dans le moteur à pistons 20, diminuant de ce fait le temps nécessaire au système propulsif pour atteindre la puissance cible.

[0096] Le contrôleur 50 peut aussi entrer dans cette configuration lorsqu'un redémarrage en vol du moteur à pistons 20 est nécessaire, ce qui permet de faciliter ce redémarrage. La sécurité de l'hélicoptère 100 est donc améliorée.

[0097] La [Fig.7] représente le système propulsif 1 par exemple lorsque le moteur à pistons 20 est à l'arrêt. Dans de telles circonstances, le contrôleur 50 contrôle la deuxième machine électrique réversible 31 pour qu'elle mette en rotation l'arbre de sortie 23. Pour cela, le contrôleur 50 commande la batterie 41 pour qu'elle fournisse de l'énergie électrique à la deuxième machine électrique réversible 31. Cette mise en rotation préliminaire permet de faciliter le démarrage du moteur à pistons 20.

[0098] La [Fig.8] représente le système propulsif 1 par exemple lorsque le moteur à pistons 20 présente une avarie et/ou a cessé de fonctionner normalement. Dans ces circonstances, de l'énergie résiduelle peut être récupérée par la turbine 10. Ainsi, le contrôleur 50 contrôle la première machine électrique réversible 30 pour qu'elle prélève de l'énergie mécanique de l'arbre rotatif 12 et la transforme en énergie électrique. Cette énergie électrique est délivrée à la deuxième machine électrique 31. Par ailleurs, le cas échéant, le contrôleur 50 contrôle la batterie 41 pour qu'elle restitue de l'énergie électrique stockée à la deuxième machine électrique 31. De plus, le contrôleur 50 contrôle la deuxième machine électrique réversible 31 pour qu'elle transforme de l'énergie électrique en énergie mécanique et qu'elle fournisse cette énergie mécanique à l'arbre de sortie 23.

[0099] La puissance résiduelle contenue dans les gaz d'échappement du moteur à pistons 20, à l'aide du soutien de la batterie 41, permet au système propulsif 1 de fournir suffisamment de puissance à l'hélicoptère pour permettre ou assister un atterrissage d'urgence.

- [0100] Les modes de fonctionnement précédemment décrits en rapport avec les figures 3 à 8, sont indépendants les uns des autres. Un système propulsif selon l'invention peut être capable de réaliser un nombre quelconque de ces modes de fonctionnement.
- [0101] La [Fig.9] représente une première variante du système propulsif 1 dans lequel une batterie 41 n'est pas prévue. Cette configuration permet d'alléger le système propulsif 1. Son fonctionnement reste identique au fonctionnement précédemment décrit, à l'exception du stockage d'énergie qui n'est plus prévu, et l'énergie électrique circule directement entre la première et la deuxième machine électrique réversible 30, 31, ou éventuellement via un module électronique de puissance 40 similaire à celui déjà décrit.
- [0102] La [Fig.10] représente une deuxième variante du système propulsif 1 dans laquelle une troisième machine électrique réversible 32 entraînant un arbre secondaire 24 est prévu. La troisième machine électrique réversible 32 est connectée électriquement à la batterie 41, à la première et à la deuxième machine électrique réversible 30, 31. L'arbre secondaire 24 permet d'entraîner un rotor de queue de l'hélicoptère 100. Cette variante est compatible avec la première variante, et peut être prévue sans batterie.
- [0103] Bien que la présente invention ait été décrite en se référant à des exemples de réalisation spécifiques, il est évident que des modifications et des changements peuvent être effectués sur ces exemples sans sortir de la portée générale de l'invention telle que définie par les revendications. En particulier, des caractéristiques individuelles des différents modes de réalisation illustrés/mentionnés peuvent être combinées dans des modes de réalisation additionnels. Par conséquent, la description et les dessins doivent être considérés dans un sens illustratif plutôt que restrictif.
- [0104] Toutes les caractéristiques décrites en référence à un procédé sont transposables, seules ou en combinaison, à un dispositif, et inversement, toutes les caractéristiques décrites en référence à un dispositif sont transposables, seules ou en combinaison, à un procédé.

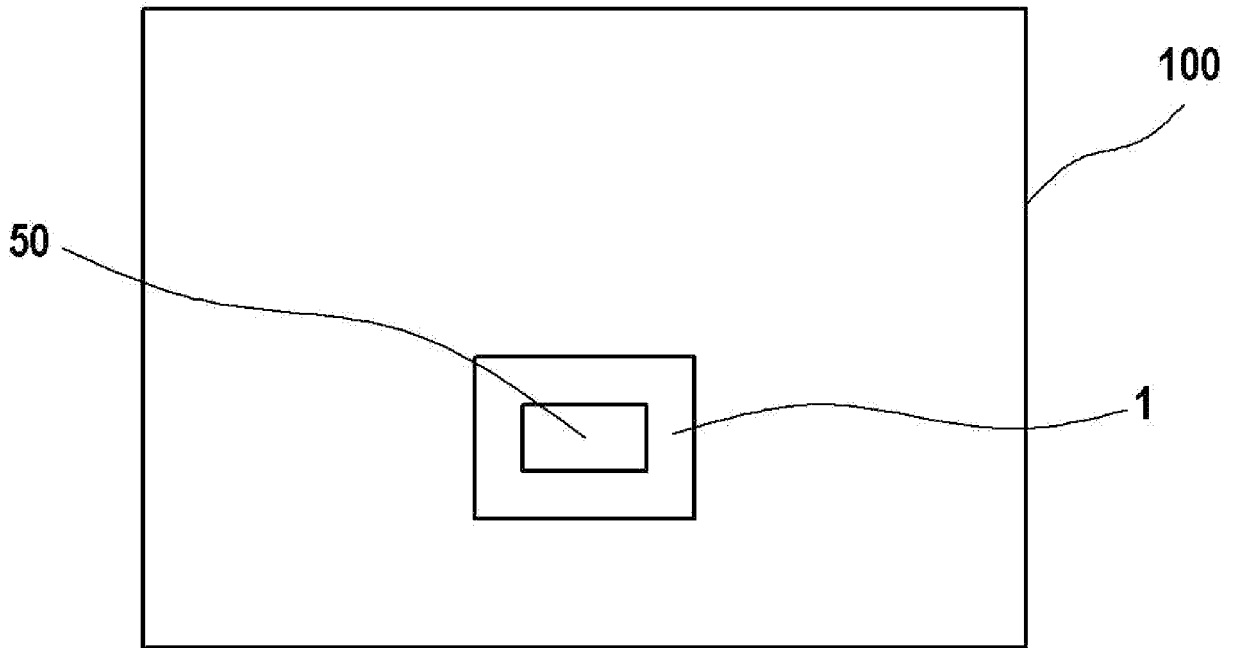
Revendications

- [Revendication 1] Système propulsif (1) hybride pour aéronef (100), comprenant un moteur à combustion (20) présentant un arbre de sortie (23) mécaniquement couplé à un élément de propulsion de l'aéronef (100), l'aéronef (100) étant configuré de sorte que tous ses régimes de fonctionnement soient tels que l'arbre de sortie (23) tourne entre 75% et 125% d'une vitesse de référence unique, le système propulsif (1) comprenant en outre une admission de gaz (22) et un échappement de gaz (21), le système propulsif (1) comprenant en outre une turbine (10) connectée à l'échappement de gaz (21) du moteur à combustion (20) de façon à être entraînée par les gaz d'échappement du moteur à combustion (20), et un compresseur (11) mécaniquement couplé à la turbine (10) par un arbre rotatif (12), le compresseur (11) étant connecté à l'admission de gaz (22) du moteur à combustion (20), une première machine électrique réversible (30) couplée à l'arbre rotatif (12), une deuxième machine électrique réversible (31) couplée à l'arbre de sortie (23) du moteur à combustion (20), la première machine électrique réversible (30) et la deuxième machine électrique réversible (31) étant reliées électriquement l'une à l'autre.
- [Revendication 2] Système propulsif (1) selon la revendication 1, comprenant une batterie (41) connectée à au moins une des machines électrique réversibles (30,31), optionnellement via un module électronique de puissance (40).
- [Revendication 3] Système propulsif (1) selon la revendication 1 ou 2, dans lequel le moteur à combustion (20) est un moteur à pistons.
- [Revendication 4] Système propulsif (1) selon la revendication 3, dans lequel le moteur à pistons (20) est configuré pour être alimenté en combustible et en comburant selon un ratio compris entre 0,01 et 0,08.
- [Revendication 5] Système propulsif (1) selon l'une des revendications 1 à 4, comprenant un contrôleur (50) configuré pour piloter les échanges d'énergie entre la première machine électrique réversible (30), la deuxième machine électrique réversible (31), l'arbre rotatif (12) et l'arbre de sortie (23) du moteur à pistons (20).
- [Revendication 6] Système propulsif (1) selon la revendication 5, dans lequel le contrôleur (50) est configuré pour, lorsque le moteur à combustion (20) fournit une puissance mécanique inférieure à la puissance né-

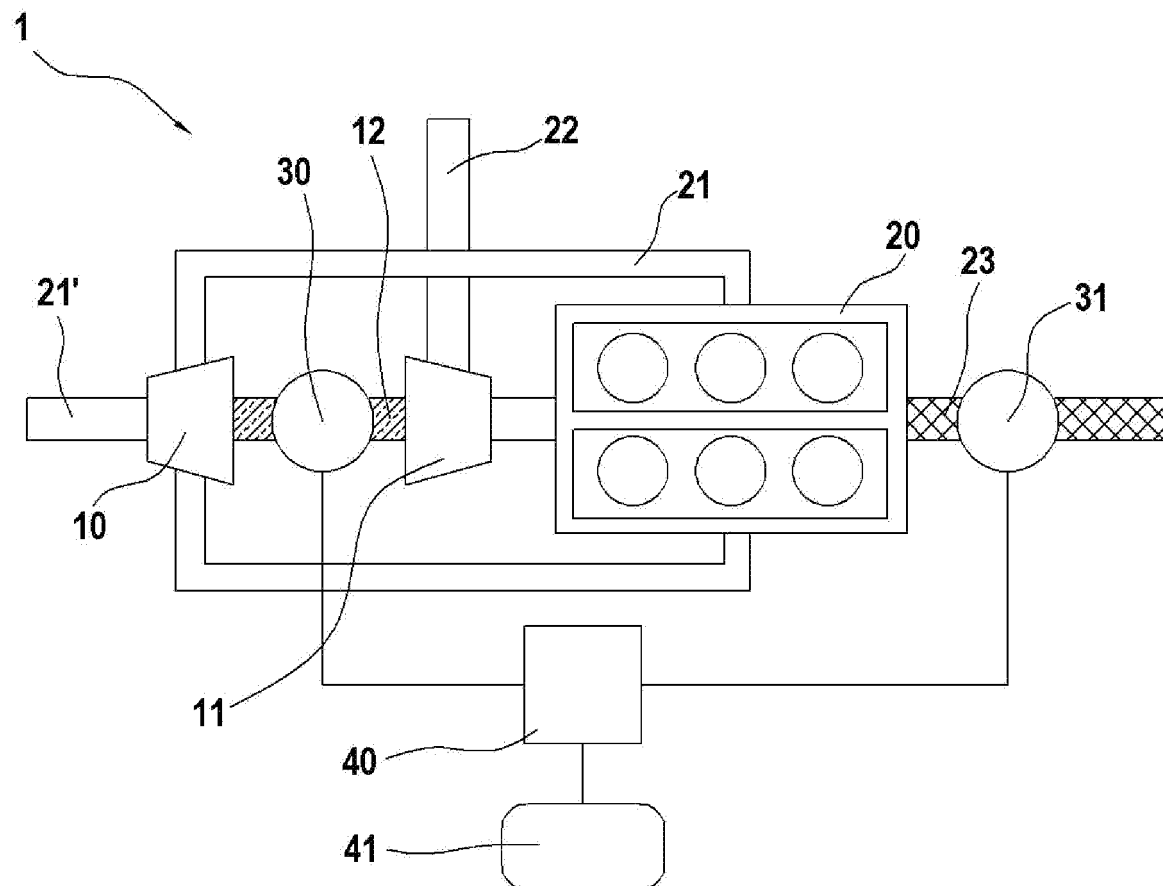
cessaire au fonctionnement de l'aéronef (100), contrôler la première machine électrique réversible (30) pour transformer de l'énergie mécanique de l'arbre rotatif (12) en énergie électrique, et contrôler la deuxième machine électrique réversible (31) pour transformer ladite énergie électrique en énergie mécanique fournie à l'arbre de sortie (23) du moteur à combustion (20).

- [Revendication 7] Système propulsif (1) selon la revendication 5 ou 6, dans lequel le contrôleur (50) est configuré pour, lorsque le moteur à combustion (20) fournit une puissance mécanique supérieure à la puissance nécessaire au fonctionnement de l'aéronef (100), contrôler la première machine électrique réversible (30) pour transformer de l'énergie mécanique de l'arbre rotatif (12) en énergie électrique, et contrôler la deuxième machine électrique réversible (31) pour transformer de l'énergie mécanique de l'arbre de sortie (23) du moteur à combustion (20) en énergie électrique.
- [Revendication 8] Système propulsif (1) selon l'une des revendications 5 à 7, dans lequel le contrôleur (50) est configuré pour, lorsque le moteur à combustion (20) est en régime transitoire et sous-alimenté, contrôler la première machine électrique réversible (30) pour transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique fournie à l'arbre rotatif (12).
- [Revendication 9] Système propulsif (1) selon l'une des revendications 5 à 8, dans lequel le contrôleur (50) est configuré pour, lorsque le moteur à combustion (20) est à l'arrêt, contrôler la deuxième machine électrique réversible (31) pour transformer de l'énergie électrique en énergie mécanique fournie à l'arbre de sortie (23) du moteur à combustion (20).
- [Revendication 10] Système propulsif (1) selon l'une des revendications 5 à 9, comprenant une troisième machine électrique réversible (32) reliée électriquement à la première et/ou la deuxième machines électrique réversible (30, 31), la troisième machine électrique réversible (32) étant mécaniquement couplée à un arbre secondaire (24) configuré pour entraîner un élément de propulsion secondaire de l'aéronef (100).

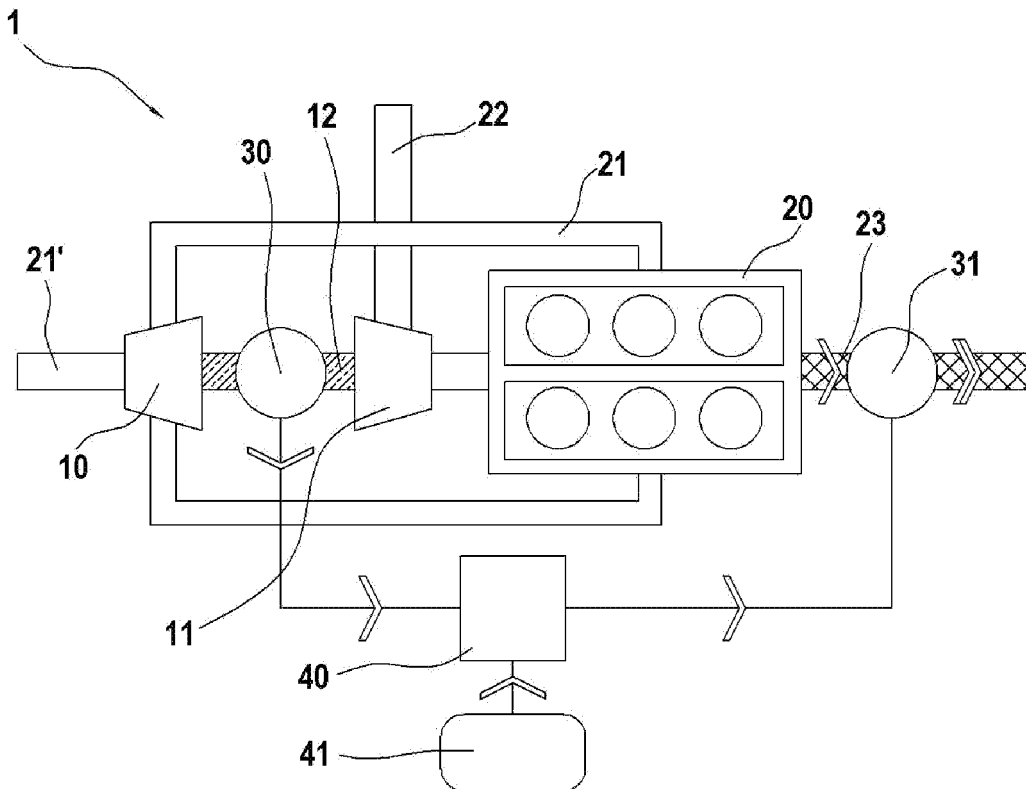
[Fig. 1]



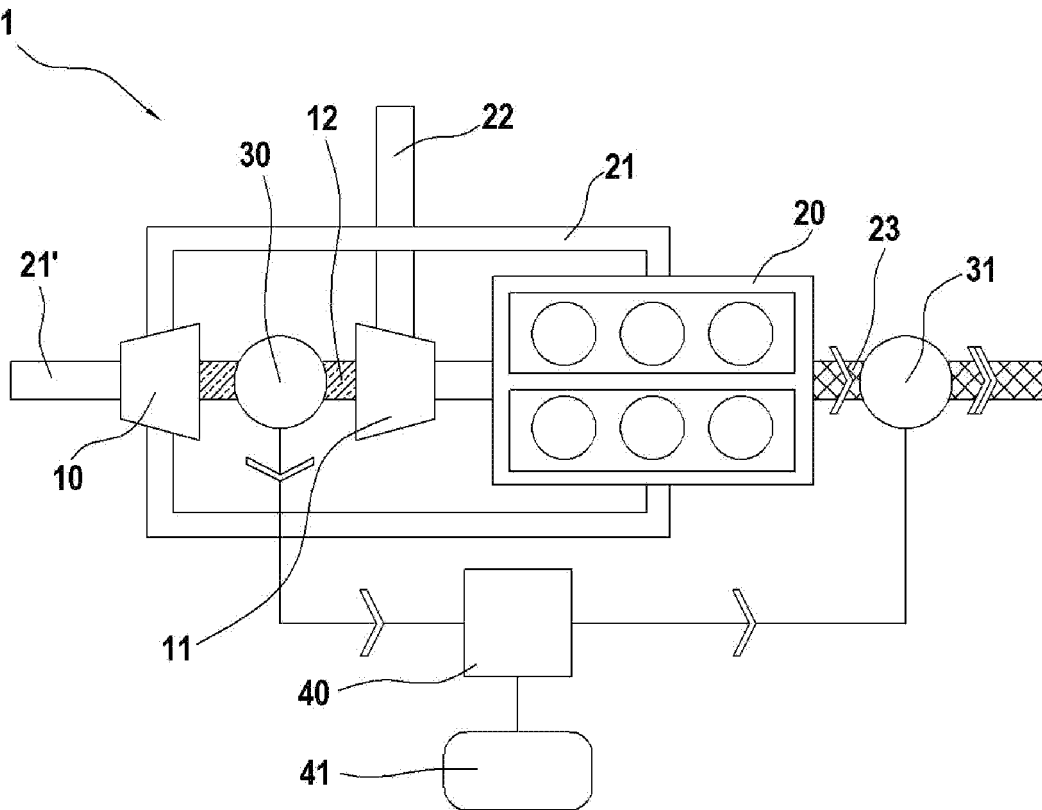
[Fig. 2]



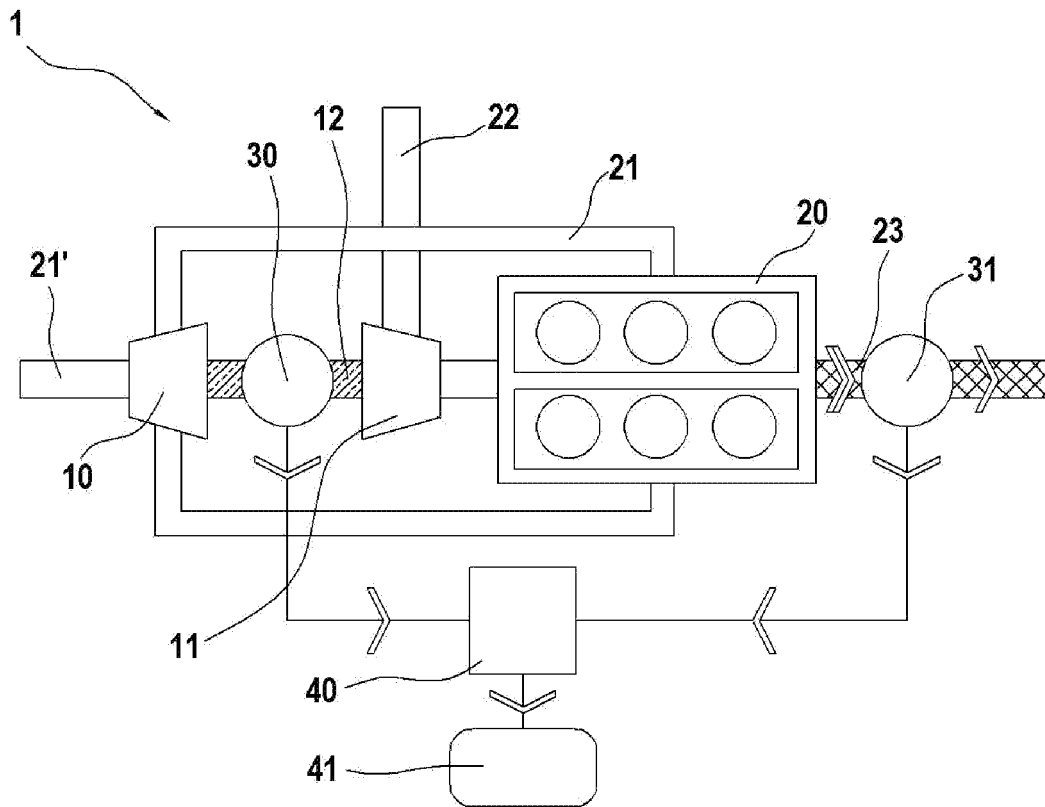
[Fig. 3]



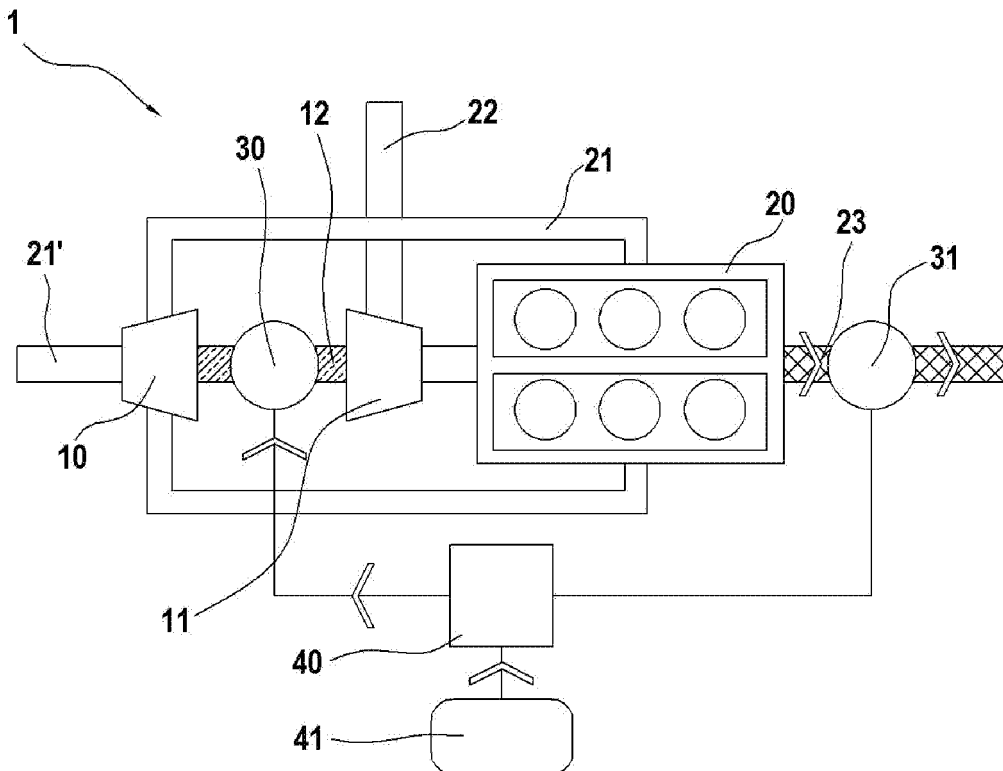
[Fig. 4]



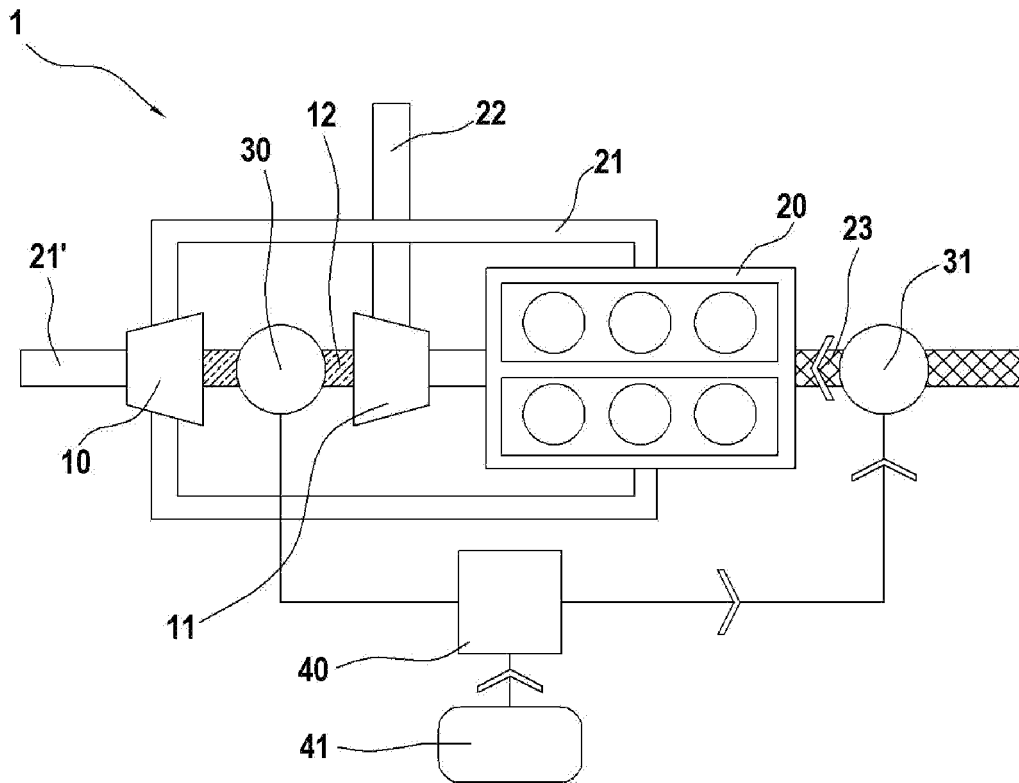
[Fig. 5]



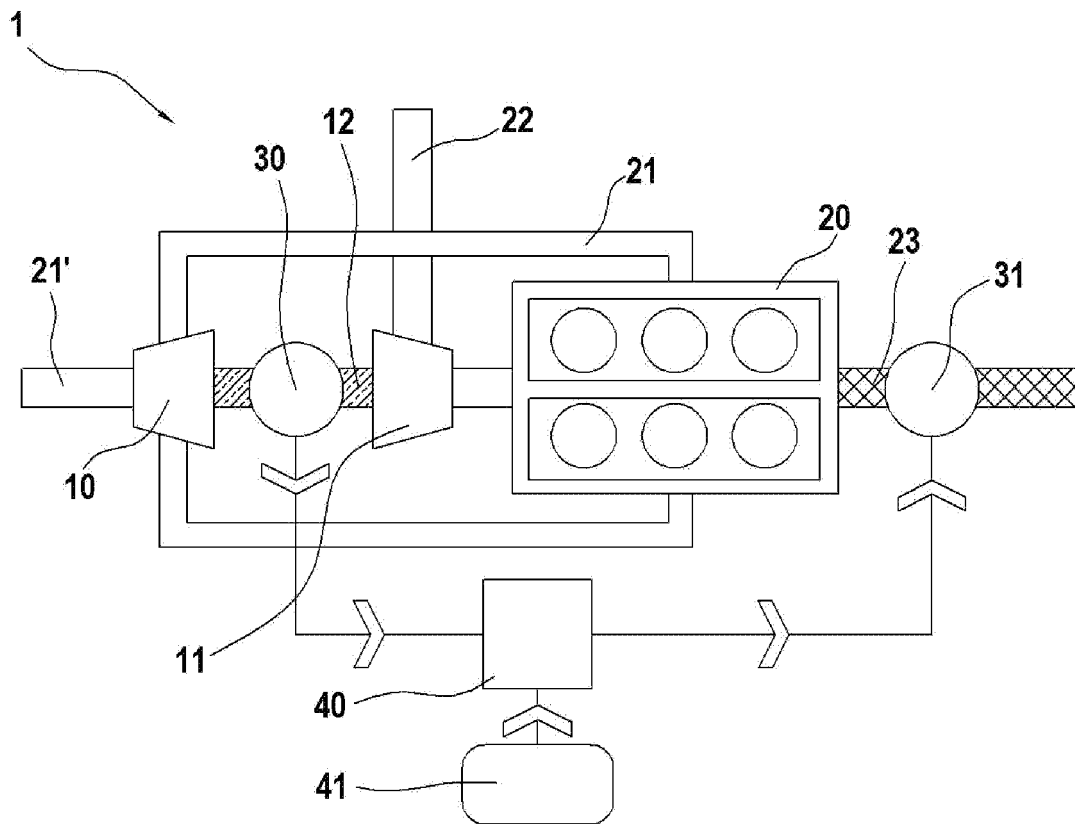
[Fig. 6]



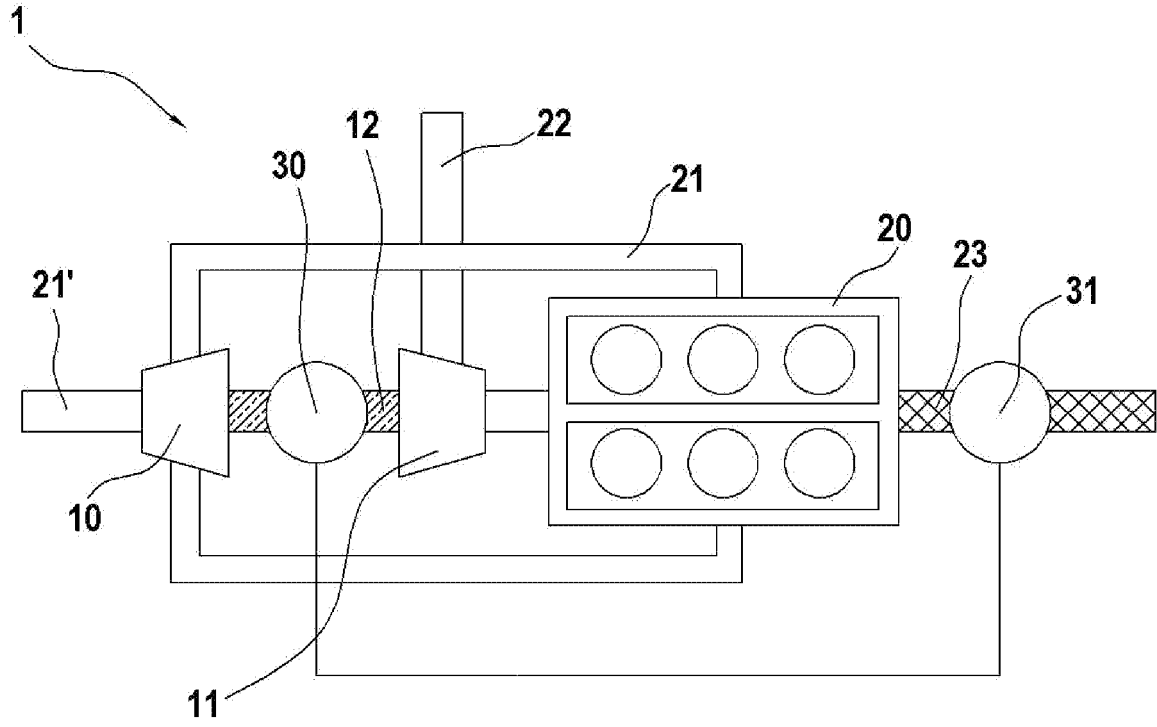
[Fig. 7]



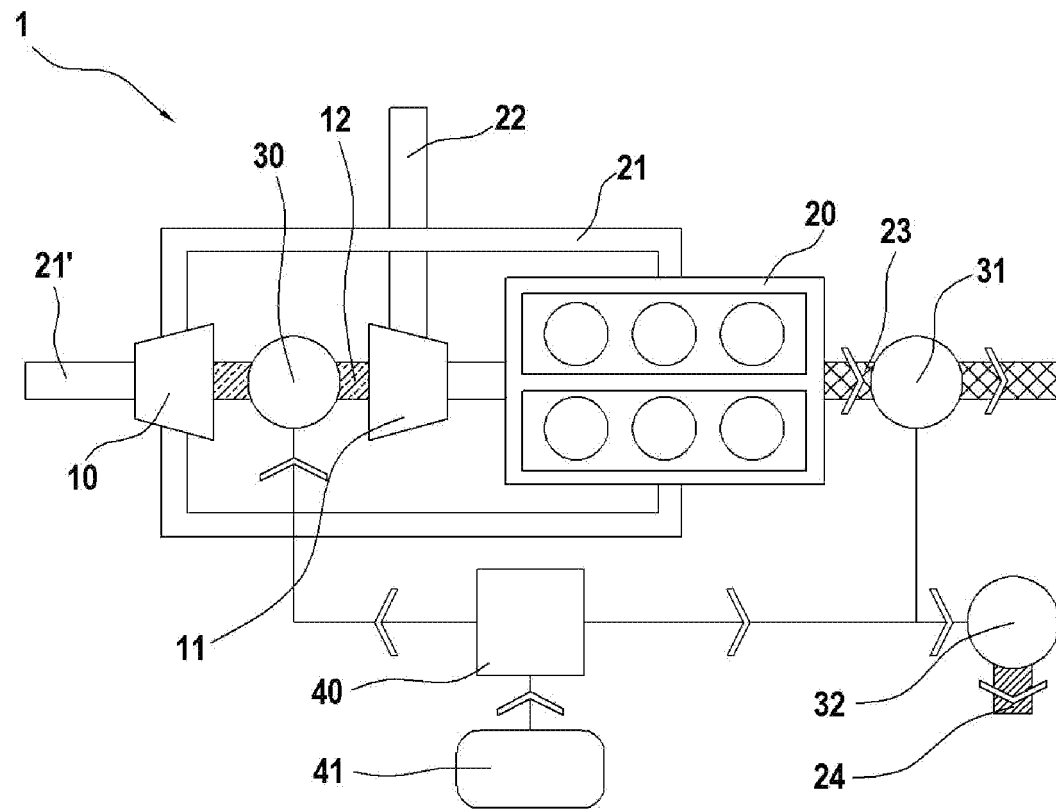
[Fig. 8]



[Fig. 9]



[Fig. 10]



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

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

FA 903989
FR 2200093

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	EP 3 415 436 A1 (GEN ELECTRIC [US]) 19 décembre 2018 (2018-12-19)	1, 2, 5-10	B64D27/04 B64D35/04
Y	* alinéa [0038] - alinéa [0107] * -----	3, 4	B64D33/00 B64C27/12
Y	CN 105 386 875 B (UNIV TSINGHUA) 29 mars 2017 (2017-03-29) * abrégé *	3, 4	
A	US 2014/346283 A1 (SALYER IVAL O [US]) 27 novembre 2014 (2014-11-27) * alinéa [0016] - alinéa [0035] * -----	1-10	
A	WO 2020/190223 A1 (ACIKEL GUERKAN [TR]) 24 septembre 2020 (2020-09-24) * alinéa [0029] *	1-10	
A	EP 3 228 544 A1 (HAMILTON SUNDSTRAND CORP [US]) 11 octobre 2017 (2017-10-11) * alinéa [0008] - alinéa [0047] * -----	1-10	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC)
			B64D
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
21 juillet 2022		Götsch, Stefan	
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	

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 2200093 FA 903989**

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 **21-07-2022**
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
EP 3415436	A1	19-12-2018	CA 3006678 A1	12-12-2018
			CN 109018377 A	18-12-2018
			EP 3415436 A1	19-12-2018
			JP 6723565 B2	15-07-2020
			JP 2019023068 A	14-02-2019
			US 2018354632 A1	13-12-2018
			US 2020290745 A1	17-09-2020

CN 105386875	B	29-03-2017	AUCUN	

US 2014346283	A1	27-11-2014	AUCUN	

WO 2020190223	A1	24-09-2020	EP 3902744 A1	03-11-2021
			WO 2020190223 A1	24-09-2020

EP 3228544	A1	11-10-2017	EP 3228544 A1	11-10-2017
			US 2017291712 A1	12-10-2017
