



(22) Date de dépôt/Filing Date: 2004/09/08

(41) Mise à la disp. pub./Open to Public Insp.: 2005/03/11

(45) Date de délivrance/Issue Date: 2012/05/22

(30) Priorité/Priority: 2003/09/11 (FR03 50525)

(51) Cl.Int./Int.Cl. *H02K 21/00* (2006.01),
H02P 9/00 (2006.01), *H02P 9/30* (2006.01),
H02P 9/42 (2006.01)

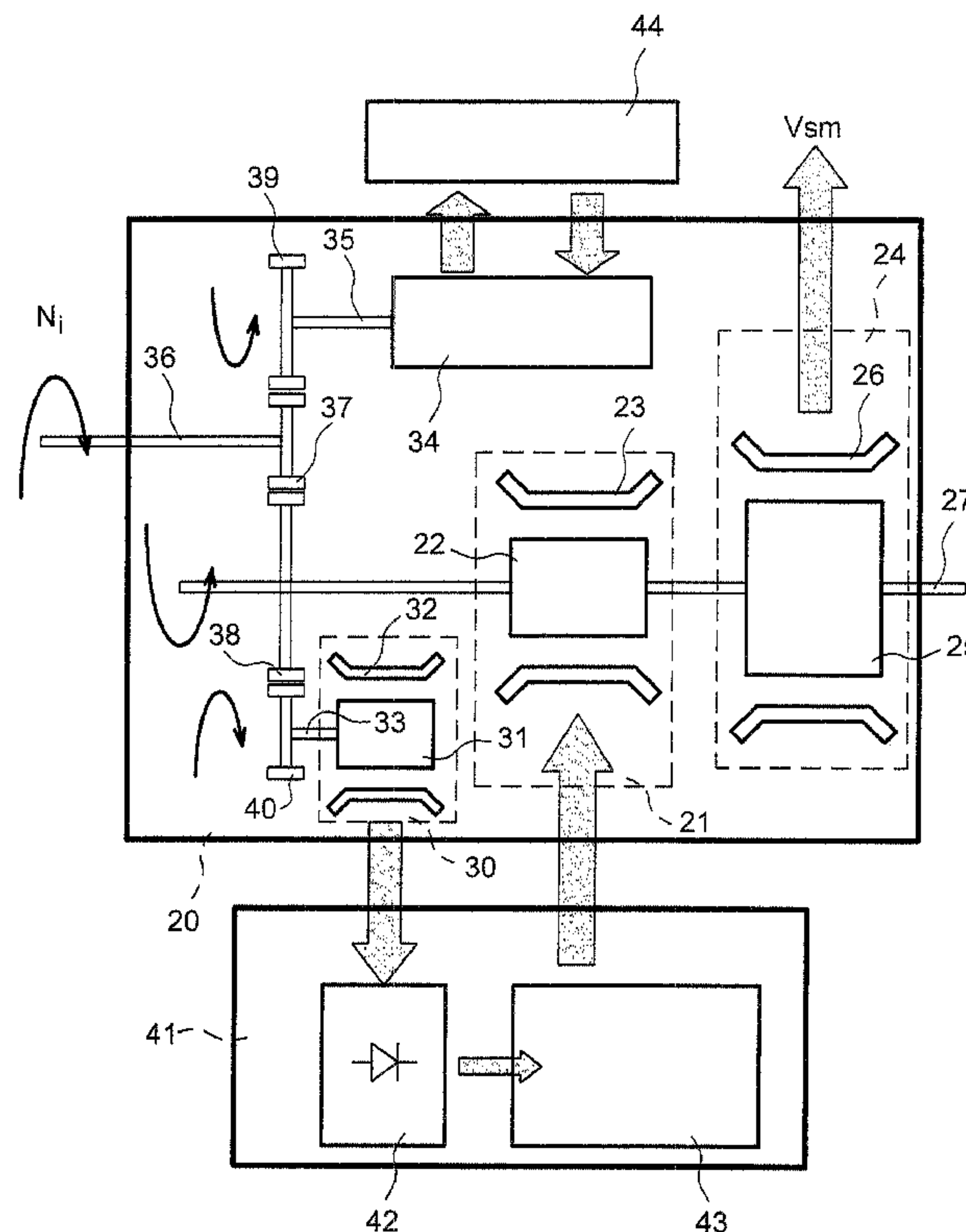
(72) Inventeur/Inventor:
LANDO, JEAN-LOUIS, FR

(73) Propriétaire/Owner:
AIRBUS OPERATIONS SAS, FR

(74) Agent: GOUDREAU GAGE DUBUC

(54) Titre : SYSTEME DE GENERATION ELECTRIQUE A FREQUENCE FIXE ET PROCEDE DE CONTROLE DE CELUI-CI

(54) Title: FIXED-FREQUENCY ELECTRICAL GENERATION SYSTEM AND PROCESS FOR CONTROLLING THE SYSTEM



(57) Abrégé/Abstract:

L'invention concerne un système de génération électrique à fréquence fixe, apte à être disposé en sortie d'un moteur à régime variable, qui comprend : - un étage primaire (30), qui est un générateur à aimants permanents, qui fournit l'énergie audit système lui permettant d'être autonome, - un étage secondaire (21), qui est une excitatrice, qui contrôle la magnétisation d'un étage tertiaire, - cet étage tertiaire (24), qui est un générateur principal, qui est l'étage de puissance de production de l'énergie électrique.

ABRÉGÉ DESCRIPTIF

L'invention concerne un système de
génération électrique à fréquence fixe, apte à être
5 disposé en sortie d'un moteur à régime variable, qui
comprend :

- un étage primaire (30), qui est un
générateur à aimants permanents, qui fournit l'énergie
audit système lui permettant d'être autonome,
- 10 - un étage secondaire (21), qui est une
excitatrice, qui contrôle la magnétisation d'un étage
tertiaire,
- cet étage tertiaire (24), qui est un
générateur principal, qui est l'étage de puissance de
15 production de l'énergie électrique.

Figure 2.

**SYSTEME DE GENERATION ELECTRIQUE A FREQUENCE FIXE ET
PROCEDE DE CONTROLE DE CELUI-CI**

DESCRIPTION

5 DOMAINE TECHNIQUE

L'invention concerne un système de génération électrique à fréquence fixe et un procédé de contrôle de celui-ci.

ETAT DE LA TECHNIQUE ANTERIEURE

10 Le domaine de l'invention est celui des systèmes de génération électrique alternative à bord des aéronefs. Mais c'est également celui de la production d'énergie électrique à partir d'une source mécanique de régime variable.

15 Les avions sont très souvent équipés d'alternateurs produisant du courant alternatif à fréquence constante.

 L'un des principaux avantages du courant alternatif à fréquence constante par rapport au courant
20 à fréquence variable, est sa simplicité d'emploi pour les consommateurs. Par contre, sa production nécessite une technique plus compliquée. En effet, l'obtention d'une fréquence constante oblige les constructeurs à prévoir un entraînement à vitesse constante. La
25 fréquence constante couramment utilisée est de 400 Hz.

 La figure 1 illustre une telle génération du courant alternatif à fréquence fixe avec :

- situés entre le moteur 8 et le bus 9 :

- un bloc d'entraînement à vitesse constante 10,

- un bloc d'alternateur 11,

- un relais de ligne 12,

5 - et un dispositif de régulation 13 relié à chacun de ces trois éléments 10, 11, 12 et à l'entrée du relais de ligne 12.

Bloc d'entraînement à vitesse constante 10

10 Sur la figure 1 le bloc d'entraînement à vitesse constante 10 est distinct du bloc alternateur 11. En fait, l'ensemble de ces deux éléments constitue un tout fixé généralement dans le voisinage de la partie inférieure du moteur 8 auquel il est couplé.

15 Ce bloc d'entraînement à vitesse constante 10, désigné par l'appellation abrégée CSD (« Constant Speed Drive »), est un dispositif dont l'arbre d'entrée est entraîné à une vitesse variant avec le régime moteur, et dont l'arbre de sortie délivre une vitesse
20 constante. Cet arbre de sortie entraîne donc le bloc alternateur 11 à vitesse constante et donc à fréquence constante puisque $f = p N$

 avec :

f = fréquence,

25 p = nombre de paires de pôles de l'alternateur 11,

N = nombre de tours/seconde du rotor de l'alternateur 11.

30 On fixe généralement une plage de variation de la vitesse d'entrée à l'intérieur de laquelle on peut avoir en sortie une vitesse constante.

Le bloc d'entraînement à vitesse constante
10 comprend :

- un bloc cylindre,
- un différentiel hydraulique.

5 Le bloc cylindre est constitué d'une pompe
et d'un moteur à barillets qui sont placés bout à bout.
Le moteur a un plateau fixe tandis que la pompe a un
plateau à inclinaison variable. Le contrôle de
l'inclinaison du plateau permet de faire varier la
10 vitesse de l'arbre du moteur ainsi que de choisir son
sens de rotation.

Le différentiel hydraulique est constitué
de deux planétaires et deux satellites. L'arbre
d'entrée est le porteur des planétaires et entraîne en
15 rotation la pompe hydraulique alimentant le moteur. Le
moteur entraîne en rotation le satellite de réglage de
vitesse. Le satellite de sortie entraîne le rotor de
l'alternateur.

Lorsque la vitesse de l'arbre d'entrée
20 varie, le plateau à inclinaison variable de la pompe
est positionné de manière à ajuster la vitesse du rotor
de l'alternateur en faisant varier celle du satellite
de réglage. Lorsque la vitesse à l'entrée est
insuffisante, on rajoute des tours/mn. Lorsque la
25 vitesse est trop élevée, on enlève des tours/mn en
inversant le sens de rotation du moteur. Lorsque le
régime d'entrée est exactement celui que l'on veut, le
plateau est en position verticale et le différentiel ne
tourne plus.

Bloc alternateur 11

L'alternateur comprend trois appareillages accolés :

- un alternateur principal ;
- 5 - une excitatrice ;
- un générateur à aimants permanents (PMG ou « Permanent Magnet Generator »).

Le générateur PMG, l'excitatrice, et l'alternateur possèdent chacun leur propre rotor. Les
10 trois rotors sont solidaires du même arbre et sont donc entraînés à la même vitesse.

Le rotor du générateur PMG comporte des aimants permanents. Dès que ce rotor est entraîné en rotation, on peut recueillir de l'énergie électrique
15 aux bornes du stator sans fournir aucune excitation. Ce courant électrique redressé est envoyé, par l'intermédiaire d'un boîtier de régulation, au stator inducteur de l'excitatrice. On recueille alors aux bornes du rotor de l'excitatrice un courant alternatif
20 qui, redressé par des diodes logées dans l'arbre d'entraînement commun (diodes tournantes), permet l'excitation de l'alternateur.

Dispositif régulateur 13

25 Ce régulateur de tension permet de maintenir une tension de sortie de valeur efficace constante.

L'alternateur est surexcité lorsque la tension tend à diminuer ou bien est sous-excité lorsque
30 la tension tend à augmenter. Pour cela on compare la tension de sortie de l'alternateur à une tension de

référence, l'écart est amplifié et un courant qui lui est proportionnel permet de modifier l'excitation et la force électromotrice de l'alternateur.

Différents systèmes de l'art connu
5 permettent une génération de courant à fréquence constante. Ces systèmes présentent de nombreux inconvénients :

- Le générateur IDG (« Integrated Drive Generator ») de la société Hamilton-Sundstrand consiste
10 en l'intégration dans une même enveloppe d'un CSD (« Constant Speed Drive ») et d'un alternateur triphasé à trois étages. Le CSD sert à réguler la vitesse mécanique pour l'entraînement de l'alternateur afin de générer une fréquence fixe de 400Hz. La valeur efficace
15 des tensions de sortie est réglée à 115V. Ce générateur présente de nombreux inconvénients : prix d'achat élevé, coût de maintenance élevé, qualité de l'huile essentielle, masse élevée, rendement faible, fiabilité médiocre, performances dépendantes de l'état
20 d'usure du CSD échangeur de taille importante (impact moteur), système non-réversible.

- Le générateur VSCF (« Variable Speed Constant Frequency ») de la société Hamilton-Sundstrand consiste en l'association d'un générateur VFG
25 (« Variable Frequency Generator ») et d'un convertisseur statique d'énergie électrique de type fréquence variable/fréquence fixe. Ce système nécessite souvent la création de deux réseaux électriques : un à fréquence fixe et un à fréquence variable, afin de
30 conserver des masses et des fiabilités raisonnables. Ce générateur présente de nombreux inconvénients : prix

d'achat élevé, masse élevée due à la présence d'un convertisseur statique et lignes d'alimentation dimensionnées pour 760Hz, rendement médiocre en fréquence fixe, fiabilité faible du convertisseur
5 statique inversement proportionnelle à la puissance, puissance faible en fréquence fixe, système non-réversible.

EXPOSÉ DE L'INVENTION

L'invention a pour objet de permettre une
10 alimentation de toute charge électrique en courant sous la forme de tensions triphasées de valeur efficace constante et de fréquence constante quel que soit le régime moteur compris entre des vitesses limites, qui sont, pour un aéronef, les vitesses « Ground Idle
15 speed » et « take-off speed », avec une meilleure fiabilité que les systèmes de l'art connu.

L'invention a également pour objet de permettre une utilisation en moteur asynchrone pour effectuer le démarrage du moteur auquel il est
20 accouplé.

L'invention propose un système de génération électrique à fréquence fixe apte à être disposé en sortie d'un moteur à régime variable,
25 caractérisé en ce qu'il comprend :

- un étage primaire, qui est un générateur à aimant permanents, qui fournit l'énergie audit système lui permettant d'être autonome,

- un étage secondaire, qui est une excitatrice, qui contrôle la magnétisation d'un étage tertiaire,

5 - cet étage tertiaire, qui est un générateur principal, qui est l'étage de puissance de production de l'énergie électrique, et en ce que l'excitatrice et le générateur principal ont leurs rotors solidaires d'un premier arbre, le stator du générateur principal fournissant la tension
10 de sortie, le générateur à aimants permanents a son rotor solidaire d'un second arbre, au moins une pompe à huile du circuit de refroidissement est solidaire d'un troisième arbre, ces trois arbres étant entraînés par un arbre d'entrée, qui est l'arbre du moteur, via des
15 engrenages.

Avantageusement :

- le rotor du générateur à aimants permanents est entraîné directement (pas de CSD) par l'arbre du moteur, et son stator alimente un organe de
20 contrôle extérieur,

- le stator de l'excitatrice est alimenté par des courants triphasés de fréquence variable provenant d'un onduleur de courant triphasé dudit organe de contrôle extérieur,

25 - le rotor du générateur principal est solidaire de celui de l'excitatrice et est entraîné par l'arbre du moteur, ses bobinages rotoriques triphasés étant interconnectés directement (pas de redresseur) avec ceux de l'excitatrice,

30 Dans un mode de fonctionnement en génératrice synchrone, l'arbre d'entrée étant entraîné

en régime variable, ledit système convertit l'énergie mécanique d'entrée en énergie électrique pour la restituer sous la forme de tensions et de courants triphasés au stator de l'étage principal, qui sont
5 distribués ensuite sur un réseau alternatif.

Dans un mode de fonctionnement en moteur asynchrone, le stator de l'étage principal est alimenté par des tensions triphasées et le stator de l'excitatrice est court-circuité, l'énergie absorbée
10 étant électrique et l'énergie générée étant mécanique.

L'invention concerne également un procédé de contrôle dudit système dans le cas d'un fonctionnement en génératrice synchrone.

15 Dans un premier mode, dans lequel on contrôle la tension au stator de l'étage principal, ce procédé comprend deux boucles de régulation :

- une boucle de courant d'excitation ;
- une boucle tension de sortie.

20 Dans un second mode, dans lequel on contrôle la fréquence du système, ce procédé comprend :

- une boucle de fréquence d'excitation ;
- une boucle fréquence de sortie.

25 Le générateur de l'invention présente les caractéristiques avantageuses suivantes :

- Il ne comporte ni CSD (« constant speed drive ») ni diodes tournantes : son rotor est directement entraîné par le moteur en régime variable.
- 30 Les bobinages rotoriques de l'excitatrice et du

générateur principal sont directement interconnectés.
Il produit une fréquence fixe.

• Le rotor du générateur principal est alimenté par des courants triphasés de fréquence
5 variable dépendant du régime d'entraînement mécanique :
le champ rotorique du générateur principal est un champ tournant par rapport à un observateur situé sur le rotor.

• L'armature statorique de l'excitatrice
10 est alimentée par des courants triphasés de fréquence variable dépendant du régime d'entraînement mécanique.
Le champ statorique de l'excitatrice est un champ tournant par rapport à un observateur situé sur le stator.

• Les courants triphasés de fréquence
15 variable alimentant le stator de l'excitatrice sont générés par un onduleur de tension triphasé situé dans l'organe de contrôle (GCU ou « Generator Control Unit »).

20 Il en découle les avantages suivants :
- simplicité et bonne fiabilité,
- coût de maintenance faible,
- bon rendement,
- masse faible,
25 - fonctionnement en démarreur possible.

Le système de l'invention peut être utilisé dans les domaines suivants :

- génération principale, auxiliaire et
30 dernier secours d'aéronefs,

- renouveau des flottes existantes d'aéronefs pour un gain de fiabilité et gain financier,
- ouverture à la concurrence dans le domaine des fréquences fixes.

5 BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

La figure 1 illustre un générateur de courant alternatif de l'art connu.

La figure 2 illustre le système de génération électrique à fréquence fixe de l'invention.

10 La figure 3 illustre le fonctionnement du système de l'invention.

La figure 4 illustre le fonctionnement du système de l'invention en génératrice synchrone.

15 La figure 5 illustre le fonctionnement du système de l'invention en moteur asynchrone.

Les figures 6 et 7 illustrent respectivement un procédé de contrôle de la tension et un procédé de contrôle de la fréquence du système de l'invention, dans le cas du fonctionnement en 20 génératrice synchrone illustré sur la figure 4.

EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

Le système de génération de fréquence fixe de l'invention est un convertisseur électromécanique qui permet d'alimenter toute charge électrique en 25 énergie, sous la forme de tensions triphasées de valeur efficace et de fréquence constantes, à partir d'une source mécanique de régime variable.

La topologie de ce système 20 est basée sur un système à trois étages, comme illustré sur la figure

2 :

- un étage primaire 30 appelé « générateur à aimants permanents » (PMG) qui fournit l'énergie électrique permettant au système d'être autonome,

5 - un étage secondaire d'excitation 21, appelé « excitatrice », qui sert à contrôler la magnétisation d'un étage tertiaire 24,

- cet étage tertiaire 24, appelé « générateur principal », qui est l'étage de puissance
10 de production d'énergie électrique.

Une pompe à huile 34 reliée à un échangeur thermique 44, permet de refroidir le système.

Un jeu d'engrenages 37, 38, 39 et 40 permet d'entraîner en rotation le rotor 25 du générateur principal 24 dans un rapport adapté suivant
15 l'application. Il en est de même en ce qui concerne l'excitatrice 21, le générateur à aimants permanents 30 ainsi que la pompe à huile 34 du circuit de refroidissement. Le système est contrôlé par un
20 dispositif électronique « temps réel » basée sur une architecture microprocesseur ou DSP (processeur de signaux numériques).

Ce principe de générateur à trois étages permet d'éviter les liaisons de type bague ou balai
25 dans un souci de bonne fiabilité. De plus, ce système ne comporte ni CSD (« Constant Speed Drive ») ni redresseur tournant.

Ce système 20 est tel que :

- l'excitatrice 21 et le générateur principal 24 ont leurs rotors 22 et 25 solidaires d'un
30

premier arbre 27, le stator 26 du générateur principal 24 fournissant la tension de sortie V_{sm} ,

- le générateur à aimants permanents 30 a son rotor 31 solidaire d'un second arbre 33,

5 - au moins une pompe à huile du circuit de refroidissement 34 est solidaire d'un troisième arbre 35.

Ces trois arbres 27, 33 et 35 sont entraînés par l'arbre d'entrée 36, qui est l'arbre du
10 moteur, via les engrenages 37, 38, 39 et 40.

Un échangeur thermique 44 est relié, en entrée et en sortie, à la pompe à huile du circuit de refroidissement 34.

Un organe de contrôle 41, comprenant un
15 élément redresseur 42 suivi d'un onduleur triphasé 43, est relié, en entrée, au stator 32 du générateur à aimant permanent 30 et, en sortie, au stator 23 de l'excitatrice 21.

La figure 3 présente la topologie générale
20 du système de l'invention. Pour des raisons de simplification de l'exposé, tous les bobinages sont supposés bipolaires et triphasés. Le principe reste valable dans le cas général de bobinages multipolaires et/ou polyphasés ; de même, le sens de rotation de
25 l'arbre d'entrée peut être soit horaire (CW), soit anti-horaire (CCW). Les rotors 22 et 25 de l'excitatrice 21 et du générateur principal 24 sont solidaires de l'arbre principal 27 et portent des bobinages triphasés. Ces bobinages sont interconnectés
30 directement. L'arbre principal 27 et l'arbre d'entrée 36 s'engrènent l'un l'autre avec un rapport de vitesses

adapté à l'application. Le bobinage statorique 23 de l'excitatrice 21 sert à produire le champ d'excitation du système, le bobinage statorique 26 du générateur principal 24 est l'étage de puissance de production
5 d'énergie électrique.

On a les grandeurs suivantes :

- f_i : fréquence de révolution de l'arbre d'entrée (36)
- f_m : fréquence de révolution de l'arbre principal (27)
- f_{re} : fréquence rotor excitatrice (22)
- 10 f_{se} : fréquence stator excitatrice (23)
- f_{rm} : fréquence rotor générateur principal (25)
- f_{sm} : fréquence stator générateur principal (26)

L'arbre d'entrée 36 est entraîné à régime variable dans le sens des aiguilles d'une montre (CW) à
15 la fréquence f_i . En conséquence, l'arbre principal 27 tourne à la fréquence f_m en sens inverse (CCW). Par hypothèse, le bobinage statorique 23 de l'excitatrice 21 est alimenté par des courants triphasés de manière à générer un champ magnétique tournant (théorème de
20 Galileo Ferraris). Ce champ a pour fréquence instantanée f_{se} et pour amplitude maximale H_e , celles-ci étant toutes deux contrôlées.

Pour un observateur placé sur le bobinage rotorique 22 de l'excitatrice 21, les fréquences se
25 combinent pour donner naissance à des forces électromotrices triphasées (loi de Faraday) d'amplitude maximale E_{re} proportionnelle à l'amplitude maximale H_e et de fréquence $f_{re} = f_m + f_{se}$.

Par principe, les bobinages rotoriques 22
30 de l'excitatrice 21 sont électriquement directement interconnectés aux bobinages rotoriques 25 du

générateur principal 24. Ainsi, les forces électromotrices triphasées disponibles au rotor 25 de l'excitatrice 21 donnent naissance à des courants triphasés qui traversent les bobinages rotoriques 25 du
 5 générateur principal 24. L'amplitude maximale I_{rm} de ces courants est proportionnelle à l'amplitude E_{re} . La fréquence de ces courants f_{rm} et la fréquence des forces électromotrices qui en sont à l'origine f_{re} sont donc égales : $f_{rm} = f_{re}$.

10 Pour un observateur placé sur le rotor 25 du générateur principal 24, le rotor 25 est immobile mais il est le siège d'un champ magnétique tournant de fréquence de révolution f_{rm} et d'amplitude H_m proportionnelle à I_{rm} .

15 Pour un observateur placé sur le stator 26 du générateur principal 24, le rotor 25 tourne mécaniquement dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (CCW) à une fréquence de révolution f_m . A ce mouvement se superpose un champ magnétique qui tourne,
 20 quant à lui, par rapport au rotor 25 également en sens inverse des aiguilles d'une montre à une fréquence f_{rm} . Au stator 26, le champ magnétique résultant de cette combinaison est un champ tournant en sens inverse des aiguilles d'une montre à la fréquence f_{sm} égale à la
 25 somme des deux fréquences : $f_{sm} = f_m + f_{rm}$. Les bobinages statoriques 26 du générateur principal 24 sont donc le siège de forces électromotrices triphasées d'amplitude maximale E_{sm} proportionnelle à H_m et de fréquence f_{sm} .

On obtient un système de trois équations :

30
$$f_{re} = f_m + f_{se}$$

$$f_{rm} = f_{re}$$

$$f_{sm} = f_m + f_{rm}$$

La solution de ce système donne :

$$f_{sm} = 2 \cdot f_m + f_{se}.$$

Par hypothèse on est capable d'asservir la
 5 fréquence de révolution f_{se} du champ tournant statorique
 de l'excitatrice 21 selon la loi suivante :
 $f_{se} = f_{ref} - 2 \cdot f_m$. La fréquence f_{ref} est la fréquence
 électrique que l'on souhaite obtenir et garder
 constante.

10 On obtient alors :

$$f_{sm} = 2 \cdot f_m + f_{se} = 2 \cdot f_m + (f_{ref} - 2 \cdot f_m) \Rightarrow f_{sm} = f_{ref}$$

Avec une telle loi d'excitation, le système
 de l'invention est capable de générer des
 forces électromotrices triphasées de valeur efficace E_{sm}
 15 de fréquence constante égale à f_{ref} quel que soit le
 régime d'entraînement f_m . L'écart de fréquence est
 compensé par un choix judicieux et un réglage en temps
 réel de la fréquence du champ d'excitation f_{se} .
 L'excitatrice 21 joue un rôle double : l'excitation
 20 (réglage de E_{sm}), et la compensation de fréquence
 (réglage de f_{se} pour que $f_{sm} = f_{ref}$). En outre, la
 puissance nécessaire au niveau du stator 23 de
 l'excitatrice 21 est négligeable par rapport à celle
 que fournit l'étage de puissance (générateur principal
 25 21), convertie depuis l'entrée mécanique.

Modes de fonctionnement

Dans la mesure où le système de l'invention
 ne comporte aucun élément unidirectionnel par
 30 construction (pas de diodes), il est naturellement
 réversible. Il existe donc deux modes de

fonctionnement, en moteur et en générateur :

- Lorsque l'arbre mécanique 27 est entraîné en rotation et que le système est excité, l'énergie absorbée est mécanique et l'énergie générée est électrique. Trois tensions apparaissent au stator 26 de l'étage principal dont la fréquence est égale à celle du champ qui leur donne naissance. S'il y a présence de charges électriques, trois courants triphasés sont fournis par le stator 26 de l'étage principal 24 : il s'agit d'un fonctionnement en génératrice synchrone (ou alternateur), comme illustré sur la figure 4.

- Lorsque le stator 26 de l'étage principal 24 est alimenté par des tensions triphasées et que le stator 23 de l'excitatrice 21 est court-circuité, l'énergie absorbée est électrique et l'énergie générée est mécanique, le rotor 22 se met spontanément en rotation. La fréquence de rotation de l'arbre mécanique 27 est toujours inférieure ou égale à celle du champ stator : il s'agit d'un fonctionnement en moteur asynchrone, comme illustré sur la figure 5.

Le contrôle du système de l'invention est possible grâce à des équations scalaires car la fréquence des modes perturbateurs est faible devant celle des autres modes. On peut se contenter d'apporter des corrections au système sur des valeurs moyennées de grandeurs.

Dans un fonctionnement de type génératrice synchrone, les perturbations (non prévisibles) sont la fréquence f_i de l'arbre d'entrée 36 et le courant de charge I_{sm} du générateur 24. Les grandeurs à réguler sont la valeur efficace de la tension V_{sm} et la

fréquence f_{sm} de l'étage de puissance du système de l'invention. Les grandeurs de contrôle sont la valeur maximale du courant d'excitation I_{se} et sa fréquence f_{se} . Dans un tel dispositif, les perturbations sont
5 « lentes » devant les grandeurs à réguler. En effet, dans une application aéronautique, l'inertie mécanique du réacteur est grande et la fréquence mécanique f_i de l'arbre d'entrée 36 varie lentement par rapport aux autres grandeurs. D'autre part, à cause des effets
10 inductifs du réseau électrique, les variations des courants de charge restent « lentes ».

• Fonctionnement en génératrice synchrone

Dans un fonctionnement en génératrice synchrone, comme illustré sur la figure 4, le sens du
15 transfert de l'énergie est indiqué à l'aide des flèches 50 à 55. L'arbre d'entrée 36 est entraîné en régime variable par une source d'énergie mécanique (boîte à accessoires du réacteur). Cette énergie mécanique est
20 convertie en énergie électrique par le système de l'invention, qui la restitue sous la forme de tensions et de courants triphasés au stator 26 de l'étage principal 24, et qui sont distribués ensuite sur le réseau alternatif (3x115V-AC/400Hz). Le contrôle de la
25 valeur efficace et de la fréquence de ces tensions est obtenu par une action sur le courant d'excitation I_{se} . Le stator 23 de l'excitatrice 21 est alimenté par un onduleur triphasé 43 qui permet de contrôler en temps réel l'amplitude maximale du courant d'excitation I_{se}
30 ainsi que sa fréquence instantanée f_{se} . Les sources d'énergie servant à l'alimentation de l'ensemble des

dispositifs électroniques de contrôle, y compris la source de tension primaire E de l'onduleur 43, sont fournies de façon autonome à partir du générateur PMG 30 et de dispositifs redresseurs 42 au niveau du
5 calculateur de contrôle 41.

La figure 6 représente un schéma-bloc en boucle fermée d'un procédé de contrôle de la tension V_{sm} du système à contrôler, qui est en fait constitué de deux sous-systèmes : le générateur électrique 20 et
10 l'onduleur triphasé 43 qui l'alimente.

Pour le sous-système « générateur » 20, la grandeur de sortie à contrôler est la tension V_{sm} au stator 26 de l'étage principal 24, alors que la grandeur de contrôle à l'entrée est la valeur maximale
15 I_{se} du courant au stator 23 de l'excitatrice 21. Deux autres grandeurs interviennent au sein de ce sous-système 20 : la fréquence f_i de rotation mécanique de l'arbre d'entrée 36 et le courant de charge I_{sm} du générateur 24. Ces deux dernières grandeurs peuvent
20 être mesurées mais ne peuvent pas être contrôlées : il s'agit de perturbations.

Pour le sous-système « onduleur » 43, la grandeur de sortie à contrôler est le courant d'excitation I_{se} à l'entrée de l'excitatrice 21 alors
25 que la grandeur de contrôle à l'entrée est le rapport cyclique α de l'onduleur 43 (par exemple $0 \leq \alpha \leq +1$). La perturbation de ce sous-système est la tension d'alimentation E de l'onduleur 43 qui, étant produite à fréquence variable par l'étage PMG 30, va dépendre du
30 régime d'entraînement et, par conséquent, ne peut pas être contrôlée.

Le procédé de contrôle de la tension V_{sm} est constitué de deux boucles de régulation : une boucle « courant d'excitation : I_{se} » et une boucle « tension de sortie V_{sm} ».

5 Concernant la boucle « I_{se} », le rapport cyclique α est calculé à partir de la différence instantanée ε_i entre le courant d'excitation de référence $I_{se\ REF}$ et le courant d'excitation « I_{se} » réel mesuré par un capteur. Dans cette boucle, les
10 paramètres de calcul sont l'impédance d'entrée Z_e du stator 23 de l'excitatrice 21 et la tension d'alimentation E de l'onduleur 43.

 Concernant la boucle « V_{sm} », le courant de référence $I_{se\ REF}$ de l'onduleur 43 est calculé à partir
15 de la différence instantanée ε_v entre la tension de référence $V_{sm\ REF}$ (par exemple 115V) et la tension de sortie réelle « V_{sm} » mesurée au moyen d'un capteur. Les performances du procédé sont ajustées au moyen du bloc R_v (réseau correcteur).

20 Ce procédé permet d'obtenir une tension de sortie V_{sm} qui est maintenue égale à la tension de référence $V_{sm\ REF}$ quel que soit l'état des perturbations extérieures f_i et I_{sm} .

 La figure 7 représente un schéma-bloc en
25 boucle fermée (BF) d'un procédé de contrôle de la fréquence f_{sm} du système à contrôler. Comme précédemment, le système à contrôler est constitué des deux sous-systèmes « générateur » 20 et « onduleur » 43.

30 Pour le sous-système « générateur » 20 la grandeur de sortie à contrôler est la fréquence f_{sm} au

stator 26 de l'étage principal 24 alors que la grandeur de contrôle à l'entrée est la fréquence f_{se} du courant au stator 23 de l'étage excitatrice 21. La perturbation de ce sous-système 20 est la fréquence de rotation mécanique f_i de l'arbre d'entrée 36.

Pour le sous-système « onduleur » 43, la grandeur de sortie à contrôler est la fréquence f_{se} du courant d'excitation à l'entrée de l'excitatrice 21 alors que la grandeur de contrôle à l'entrée est le rapport de modulation β de l'onduleur 43 (par exemple $-0,25 \leq \beta \leq +1,25$). Ce paramètre β est égal au rapport de la fréquence d'excitation instantanée f_{se} à la fréquence de modulation f_u ($f_u = f_{se}(n_i = \text{idle})$).

Le procédé de contrôle de la fréquence f_{sm} est constitué de deux boucles de régulation : une boucle « fréquence d'excitation : f_{se} » et une boucle double « fréquence de sortie : f_{sm} ».

Concernant la boucle « f_{se} », le rapport de modulation β est calculé à partir de la différence instantanée εf_{se} entre la fréquence d'excitation de référence f_{seREF} et la fréquence du courant d'excitation $\langle f_{se} \rangle$ calculée à partir de la mesure en temps réel de I_{se} (procédé de contrôle de tension). Dans cette boucle, le paramètre de calcul est la fréquence de modulation f_u .

Concernant la boucle « f_{sm} », la fréquence de référence f_{seREF} de l'onduleur est calculée à partir de la différence instantanée εf_{sm} entre la fréquence de référence f_{seREF} entre (par exemple 400Hz), le double $2 \times \langle f_m \rangle$ de la fréquence instantanée de rotation

mécanique du rotor (mesurée à partir des tensions fournies par l'étage PMG 30 et du rapport d'engrenages K_{GR}) et, enfin, la fréquence de sortie réelle $\langle f_{sm} \rangle$ du générateur 24 calculée à partir de la mesure en temps
5 réel de V_{sm} (procédé de contrôle de tension). Les performances du système sont ajustées au moyen du bloc R_F (réseau correcteur).

Ce procédé de contrôle de la fréquence permet d'obtenir une fréquence de sortie f_{sm} qui est
10 maintenue égale à la fréquence de référence f_{smREF} quel que soit l'état de la perturbation extérieure f_i .

• Fonctionnement en moteur asynchrone

Dans un fonctionnement en moteur
15 asynchrone, comme illustré sur la figure 5, le sens de transfert de l'énergie est indiqué à l'aide des flèches 60 à 66. Il est inversé par rapport à un fonctionnement en générateur. Le stator 26 de l'étage principal 24 est alimenté par un système de tensions triphasées
20 provenant d'une source de puissance électrique externe au dispositif (3x115V-AC/400Hz : groupe de parc ou générateur APU). Une partie de l'énergie électrique ainsi injectée dans le système 20 est extraite au stator 23 de l'excitatrice 21 sous la forme de courants
25 triphasés. Cette énergie peut soit être dissipée sous forme d'effet Joule (solution triviale), soit être convertie et réinjectée sur une source électrique réversible SE (par exemple : réseau continu 28V-DC), de façon contrôlée, au moyen d'un convertisseur statique
30 de faible puissance. Le reste de l'énergie, c'est-à-dire la plus grande partie, est converti sous forme

mécanique par la mise en rotation de l'arbre d'entrée
 36. Dans le cas de récupération sur un réseau continu,
 le contrôle du rapport cyclique γ du hacheur 43' permet
 de maîtriser le courant d'appel I_{sm} sur la source de
 5 puissance externe pendant la séquence de démarrage.

Exemples d'utilisations du système de l'invention

Le système de l'invention peut être
 utilisé, notamment sur un aéronef comme générateur
 10 principal, auxiliaire et/ou comme générateur de dernier
 secours.

Par exemple le système de l'invention peut
 être monté sur la boîte à accessoires d'un turbo-fan
 dont le régime sur l'arbre d'entrée du générateur
 15 varie de 4500 RPM (ralenti moteur au sol, $f_i = 75\text{Hz}$) à
 9000 RPM (fréquence maximale au décollage, $f_i = 150\text{Hz}$).
 Par un rapport d'engrenages de 1.333, on obtient une
 fréquence mécanique au rotor 25 du système telle que :
 $100\text{Hz} \leq f_m \leq 200 \text{ Hz}$ en régime normal.

20 Si on choisit de générer des tensions à une
 fréquence de $f_{sm} = 400 \text{ Hz}$, la loi de contrôle de
 l'excitation doit être la suivante :

- au ralenti moteur ($f_m = 100\text{Hz}$) : $f_e = 200\text{Hz}$
- au décollage ($f_m = 200 \text{ Hz}$) : $f_e = 0 \text{ Hz}$
- 25 - a un régime donné entre 4500 et 9000 RPM
 ($f_m = 400 \psi$; $0,25 \leq \psi \leq 0,50$) : $f_e = 400 (1-2 \psi)$.

Cette loi d'excitation permet bien de
 générer une fréquence de 400Hz constante sur
 l'intervalle 4500-9000 RPM.

30

• Génération principale

S'il est utilisé en générateur principal, le système de l'invention est accouplé à la boîte à accessoires et est entraîné mécaniquement par le moteur. En fonctionnement normal, le système de
5 l'invention se comporte comme une génératrice synchrone (alternateur triphasé).

Si pour une raison quelconque, le régime d'entraînement venait à dépasser le seuil de 9000 RPM (« engine over-speed »), le système de l'invention
10 reste contrôlable à condition d'inverser le sens de rotation du champ d'excitation ($f_{se} < 0$) pour ralentir le champ H_m , par rapport à la fréquence du rotor 25.

Dans la mesure où le système de l'invention est réversible de par sa configuration (pas d'élément
15 unidirectionnel), il peut être utilisé en moteur électrique pour démarrer le moteur de l'aéronef. Pour obtenir un mode de fonctionnement en moteur asynchrone, le stator 23 de l'excitatrice 21 doit être court-circuité de façon contrôlée, ou bien on doit transférer
20 de l'énergie sur le réseau électrique de façon contrôlée au moyen d'un convertisseur statique. D'autre part, le stator 26 du générateur principal 24 doit être alimenté par le réseau alternatif en triphasé. Le sens de transfert des énergies est inversé.

25

• Génération de dernier secours

S'il est utilisé en générateur de dernier secours, le système de l'invention est accouplé à une éolienne (hélice à pas variable). En cas de perte des
30 générateurs principaux, cet ensemble se déploie à l'extérieur de l'aéronef et est entraîné en rotation

par la vitesse de l'air. A ce moment, le système de l'invention assure la disponibilité des systèmes essentiels de l'aéronef.

5 • Génération auxiliaire

S'il est utilisé en générateur auxiliaire, le système de l'invention peut être utilisé pour alimenter l'aéronef au sol, moteurs éteints. Il peut également servir à démarrer le générateur APU
10 (« Auxiliary Power Unit ») dans un fonctionnement en moteur.

REVENDICATIONS

1. Système de génération électrique à fréquence fixe apte à être disposé en sortie d'un
5 moteur à régime variable, caractérisé en ce qu'il comprend :

- un étage primaire (30), qui est un générateur à aimants permanents, qui fournit l'énergie audit système lui permettant d'être autonome,
- 10 - un étage secondaire (21), qui est une excitatrice qui contrôle la magnétisation d'un étage tertiaire,
- cet étage tertiaire (24), qui est un générateur principal, qui est l'étage de puissance de
15 production de l'énergie électrique,
en ce que l'étage secondaire (21) et l'étage tertiaire (24) ont leurs rotors (22 et 25) solidaires d'un premier arbre (27), le stator (26) de l'étage tertiaire (24) fournissant la tension de sortie (V_{sm}), en ce que
20 l'étage primaire (30) a son rotor (31) solidaire d'un second arbre (33), en ce qu'au moins une pompe à huile du circuit de refroidissement (34) est solidaire d'un troisième arbre (35), et en ce que ces trois arbres (
27, 33 et 35) sont entraînés par l'arbre d'entrée (36),
25 qui est l'arbre du moteur, via des engrenages (37, 38, 39 et 40).

2. Système selon la revendication 1, dans lequel le rotor (31) du générateur à aimants
30 permanents (30) est entraîné par l'arbre du moteur

(36), et son stator (32) alimente un organe de contrôle extérieur (41).

3. Système selon la revendication 2, dans
5 lequel le stator (23) de l'excitatrice (21) est alimenté par des courants triphasés de fréquence variable provenant d'un onduleur de courant triphasé (43) dudit organe de contrôle extérieur (41).

10 4. Système selon la revendication 3, dans lequel le rotor (25) du générateur principal (24) est solidaire de celui (22) de l'excitatrice (21) et est entraîné par l'arbre du moteur (36), ses bobinages rotoriques triphasés étant interconnectés avec ceux de
15 l'excitatrice.

5. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, qui comprend un arbre d'entrée (36) entraîné en régime variable et qui
20 convertit l'énergie mécanique en énergie électrique pour la restituer sous la forme de tensions et de courants triphasés au stator (26) de l'étage principal (24), qui sont distribués ensuite sur un réseau alternatif.

25

6. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans lequel le stator (26) de l'étage principal (24) est alimenté par des tensions triphasées et le stator (23) de l'excitatrice (21) est
30 court-circuité, l'énergie absorbée étant électrique et l'énergie générée étant mécanique.

7. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, comprenant un convertisseur statique qui permet de transférer de l'énergie sur le réseau électrique de façon contrôlée.

8. Procédé de contrôle du système selon la revendication 5, dans lequel on contrôle la tension (V_{sm}) au stator de l'étage principal (24), et qui comprend deux boucles de régulation :

- une boucle de courant d'excitation ;
- une boucle tension de sortie.

9. Procédé de contrôle du système selon la revendication 5, dans lequel on contrôle la fréquence du système, qui comprend :

- un boucle de fréquence d'excitation ;
- une boucle fréquence de sortie.

10. Utilisation du système de l'invention selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, sur un aéronef comme générateur électrique, comme moteur électrique ou les deux.

1 / 6



2 / 6

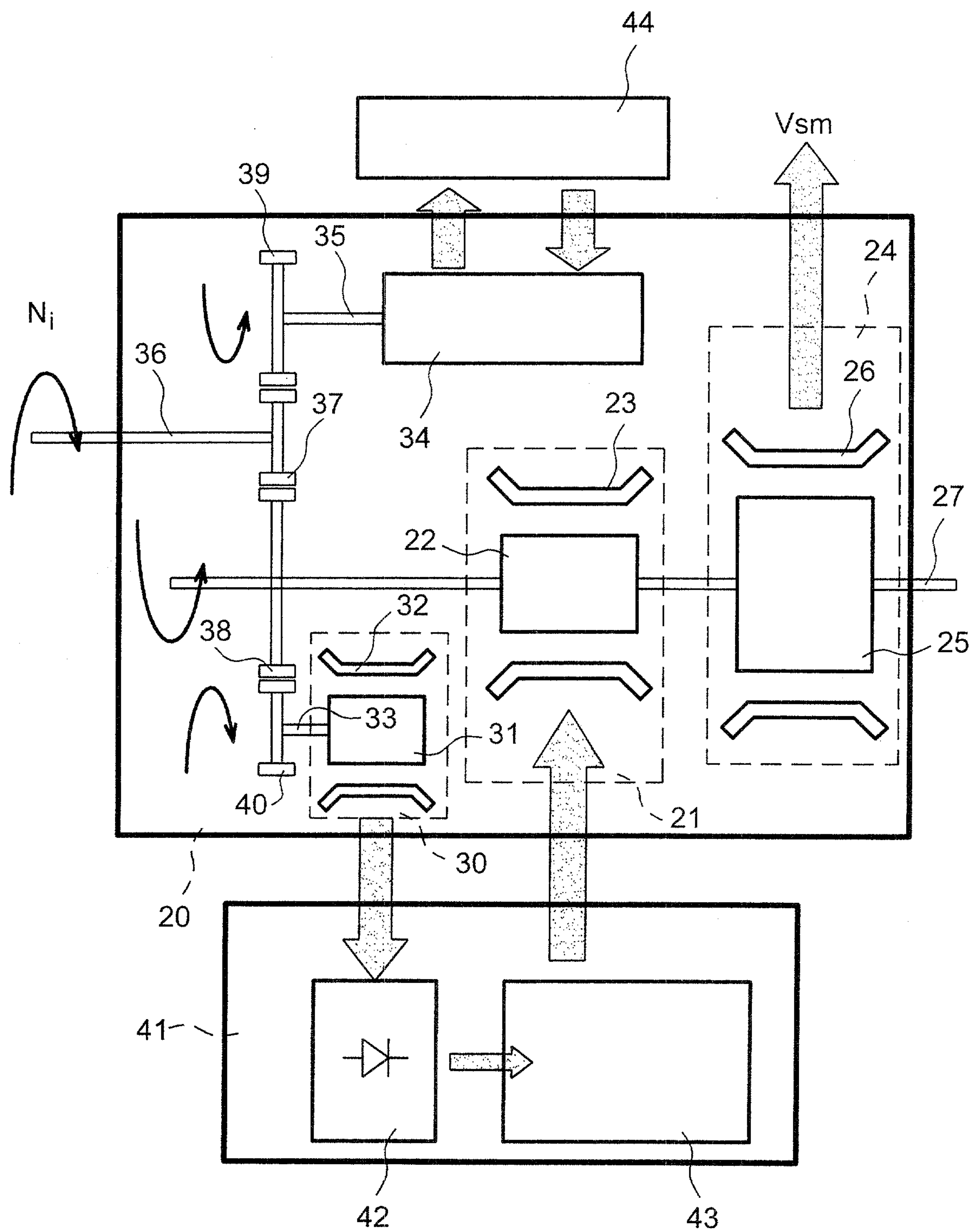


FIG. 2

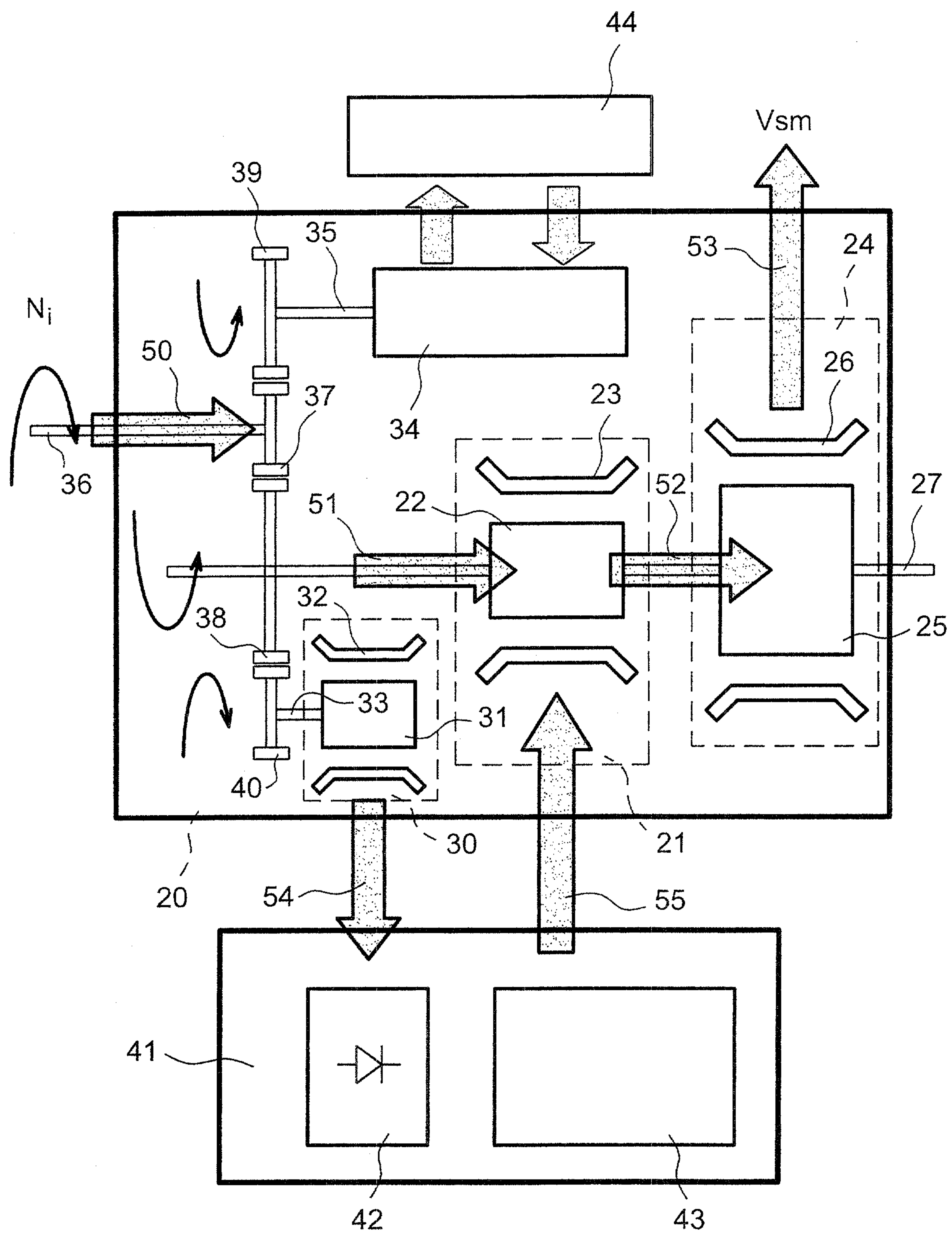


FIG. 4

5 / 6

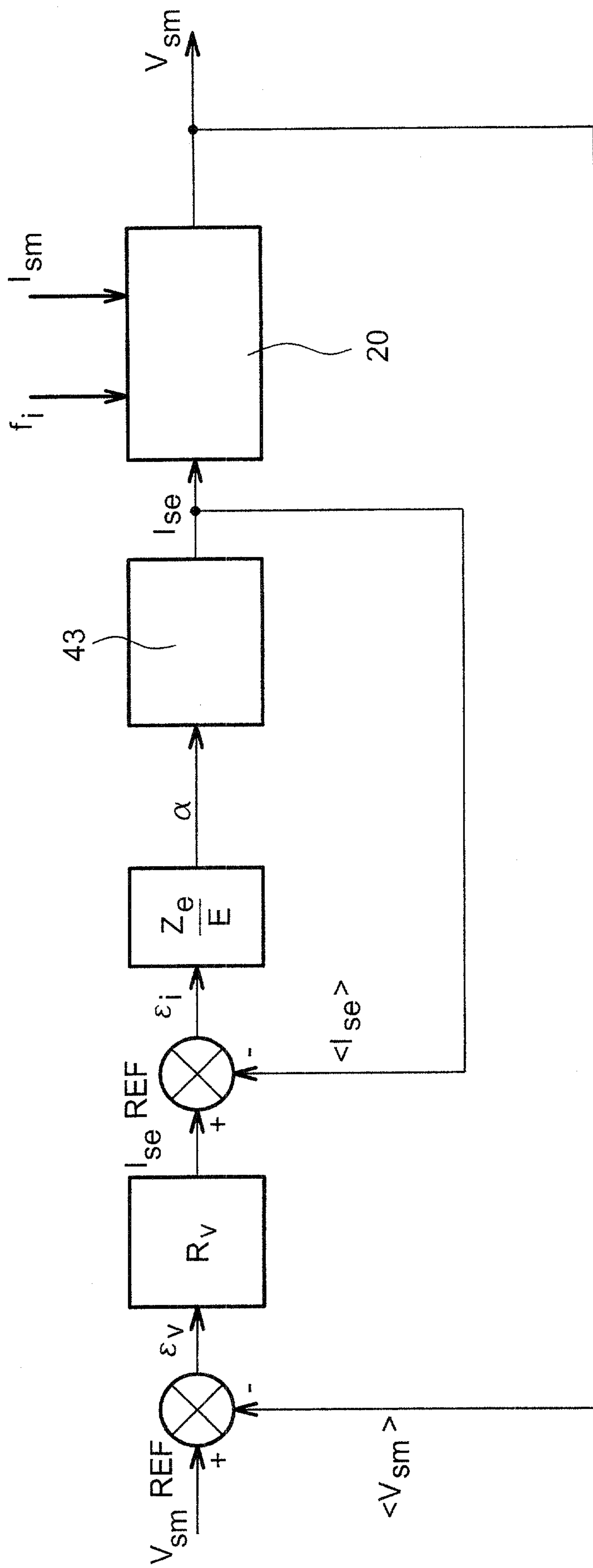


FIG. 6

6 / 6

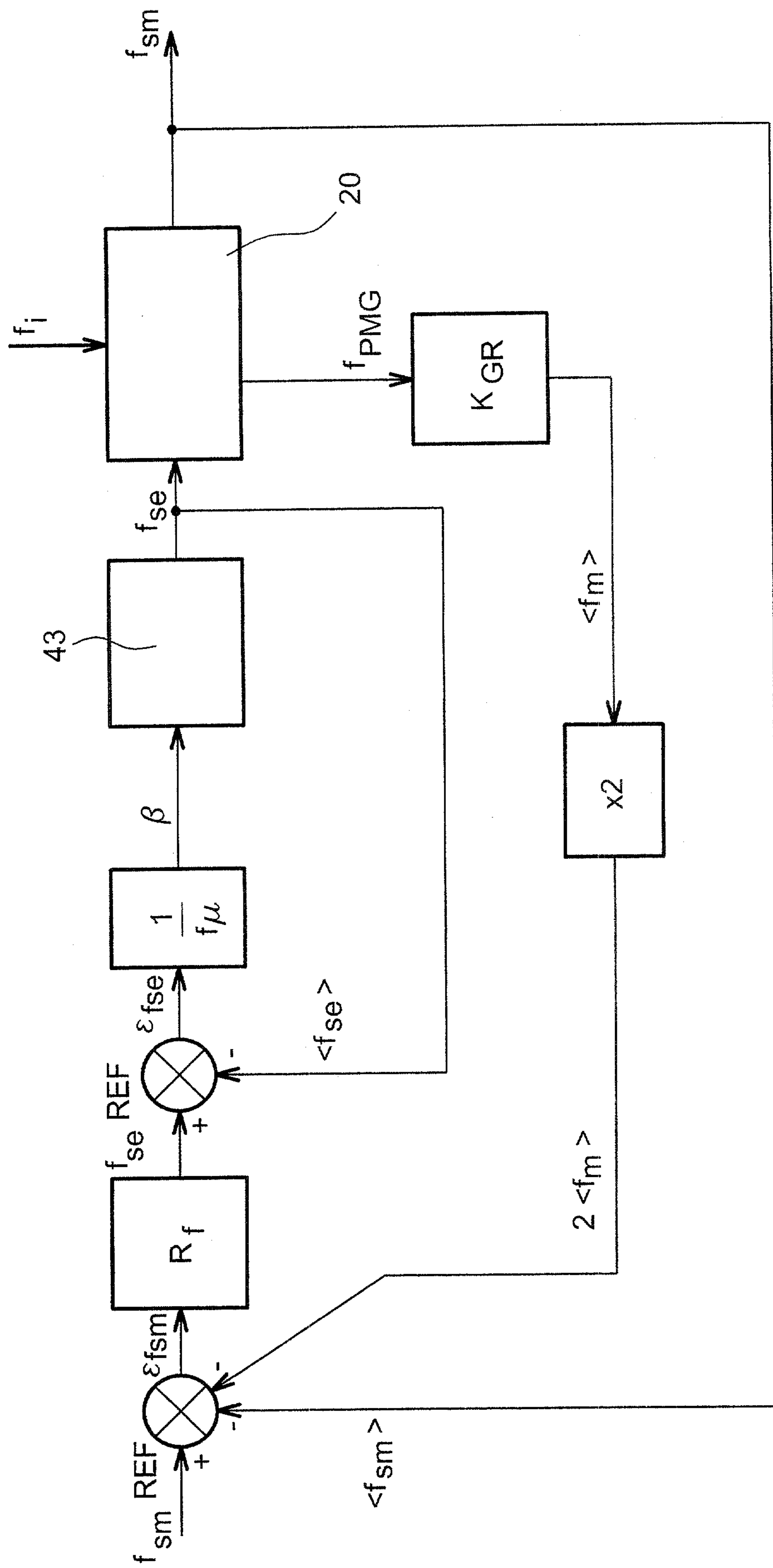


FIG. 7

