

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
—
**INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**
—
COURBEVOIE
—

①① N° de publication : **3 117 661**
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)
②① N° d'enregistrement national : **20 13149**
⑤① Int Cl⁸ : **G 21 D 1/00 (2020.12)**

①②

BREVET D'INVENTION

B1

⑤④ Procédé pour régler automatiquement un système de chauffage à résonance cyclotronique ionique d'un réacteur thermonucléaire.

②② Date de dépôt : 14.12.20.

③③ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public
de la demande : 17.06.22 Bulletin 22/24.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du
brevet d'invention : 04.11.22 Bulletin 22/44.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de
recherche :

Se reporter à la fin du présent fascicule

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *EXCEM SAS* — FR.

⑦② Inventeur(s) : Broydé Frédéric et Clavelier Evelyne.

⑦③ Titulaire(s) : *EXCEM SAS*.

⑦④ Mandataire(s) :

FR 3 117 661 - B1



Description

Titre de l'invention : Procédé pour régler automatiquement un système de chauffage à résonance cyclotronique ionique d'un réacteur thermonucléaire

DOMAINE TECHNIQUE DE L'INVENTION

- [0001] L'invention concerne un procédé pour régler automatiquement un système de chauffage à résonance cyclotronique ionique d'un réacteur thermonucléaire. L'invention concerne aussi un réacteur thermonucléaire mettant en oeuvre ce procédé.

ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE

- [0002] Dans la suite, X et Y étant des quantités ou variables différentes, effectuer une action en fonction de X n'exclut pas la possibilité d'effectuer cette action en fonction de Y. Dans la suite, "couplé" fait toujours référence à un couplage électrique. Lorsque ce terme est appliqué à deux entités telles que des bornes, des conducteurs, des noeuds, etc, "couplé" peut indiquer que les entités sont directement couplées, c'est-à-dire connectées (ou, de façon équivalente, en contact électrique) l'une avec l'autre, ou que les entités sont indirectement couplées, une interaction électrique différente du couplage direct existant dans ce cas entre les entités, par exemple à travers un ou plusieurs composants. Lorsque ce terme est appliqué à deux entités à plusieurs bornes, telles que des accès, des connecteurs, etc, "couplé" peut indiquer que les entités sont directement couplées, chaque borne d'une des entités étant dans ce cas directement couplée à une et une seule des bornes de l'autre entité, ou que les entités sont indirectement couplées, une interaction électrique différente du couplage direct existant dans ce cas entre les bornes des entités, par exemple à travers un ou plusieurs composants.
- [0003] Le chauffage à résonance cyclotronique ionique est aussi appelé "chauffage cyclotronique ionique" en français, et est appelé "ion cyclotron resonance heating" ou "ICRH" ou "ion cyclotron radio-frequency heating" en anglais. Le chauffage à résonance cyclotronique ionique est une des techniques classiques de chauffage de plasma utilisées dans les réacteurs thermonucléaires basés sur un confinement magnétique du plasma chaud (ces réacteurs thermonucléaires sont habituellement appelés "tokamaks"). Un système de chauffage à résonance cyclotronique ionique peut par exemple fonctionner dans l'intervalle de fréquences de 35 MHz à 65 MHz. Pour obtenir une puissance supérieure à 5 MW dans cet intervalle de fréquences, il est recommandé d'utiliser une pluralité d'amplificateurs radiofréquence, une antenne à accès multiple, et une unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples. L'unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples est utilisée pour

obtenir que chaque amplificateur radiofréquence voie une charge optimale ou presque optimale, pour n'importe quel comportement du plasma, sauf, éventuellement, si un mode localisé au bord (appelé "edge localized mode" ou "ELM" en anglais) se produit dans la chambre à vide du réacteur thermonucléaire.

- [0004] Ainsi, dans un réacteur thermonucléaire comportant un système de chauffage à résonance cyclotronique ionique, le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique peut comporter :
- [0005] • une antenne, l'antenne ayant n accès appelés chacun "accès signal", où n est un entier supérieur ou égal à 2, l'antenne permettant, à une fréquence donnée, un transfert de puissance depuis les n accès signal jusqu'à un champ électromagnétique produit par l'antenne dans une chambre à vide du réacteur thermonucléaire ;
- une unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples ayant m accès d'entrée et n accès de sortie, où m est un entier supérieur ou égal à 2, l'unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples comportant p dispositifs à impédance réglable, où p est un entier supérieur ou égal à m , les p dispositifs à impédance réglable étant appelés les "dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord" et étant tels que, à la fréquence donnée, chacun des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord a une réactance, la réactance de n'importe lequel des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord étant réglable par moyen électrique, chacun des n accès de sortie étant directement ou indirectement couplé à un et un seul des accès signal ; et
- m amplificateurs radiofréquence de forte puissance, chacun des amplificateurs radiofréquence de forte puissance ayant une sortie, la sortie du dit chacun des amplificateurs radiofréquence de forte puissance étant directement ou indirectement couplée à un et un seul des m accès d'entrée, la sortie du dit chacun des amplificateurs radiofréquence de forte puissance étant utilisée pour appliquer une excitation à l'accès d'entrée auquel elle est directement ou indirectement couplée.
- [0006] Le réacteur thermonucléaire comporte en outre une pluralité d'unités de détection installées à différents endroits dans le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique, chacune des unités de détection comportant un coupleur directionnel utilisé pour capter deux variables électriques dans le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique, pour obtenir des "signaux de sortie d'unité de détection", chacun des signaux de sortie d'unité de détection étant principalement déterminé par une des variables électriques captées dans le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique.

- [0007] Selon l'état de l'art antérieur, un tel réacteur thermonucléaire est caractérisé en ce que, une "fréquence sélectionnée" étant choisie, on applique m excitations aux m accès d'entrée, une et une seule des excitations étant appliquée à chacun des accès d'entrée, chacune des excitations étant une porteuse non modulée ayant une fréquence qui est égale à la fréquence sélectionnée.
- [0008] Selon l'état de l'art antérieur, les signaux de sortie d'unité de détection sont utilisés pour régler automatiquement le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique, en employant un algorithme de régulation par recherche d'extremum qui règle, par moyen électrique, la réactance d'au moins un des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord, pour se rapprocher d'un extremum d'une variable de performance, la variable de performance étant une fonction réelle des signaux de sortie d'unité de détection. Ce type de système de régulation est lent. Ainsi, l'état de l'art antérieur n'enseigne pas de procédé précis et rapide pour régler automatiquement le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique du réacteur thermonucléaire. Par conséquent, selon l'état de l'art antérieur, pour éviter une détérioration des amplificateurs radiofréquence de forte puissance, en particulier lorsqu'un mode localisé au bord survient, de la puissance radiofréquence doit être gaspillée dans des charges (parfois appelées "dummy loads" en anglais) à chaque fois que le réglage n'est pas correct, et/ou les amplificateurs radiofréquence de forte puissance doivent opérer de façon permanente à une puissance de sortie réduite, par rapport à leur puissance de sortie maximale théorique.
- [0009] Le spécialiste comprend donc que l'état de l'art antérieur n'enseigne pas de procédé pour régler automatiquement un système de chauffage à résonance cyclotronique ionique d'un réacteur thermonucléaire, qui maximise la puissance que le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique peut fournir au plasma existant dans la chambre à vide du réacteur thermonucléaire.

Exposé de l'invention

- [0010] L'invention a pour objet un procédé pour régler automatiquement un système de chauffage à résonance cyclotronique ionique d'un réacteur thermonucléaire, qui maximise la puissance que le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique peut fournir au plasma existant dans la chambre à vide du réacteur thermonucléaire.
- [0011] Le procédé selon l'invention est un procédé pour régler automatiquement un système de chauffage à résonance cyclotronique ionique d'un réacteur thermonucléaire, le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique comportant une antenne et une unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples, l'antenne ayant n accès appelés chacun "accès signal", où n est un entier supérieur ou égal à 2, l'antenne permettant, à une fréquence donnée, un transfert de puissance depuis les n

accès signal jusqu'à un champ électromagnétique produit par l'antenne dans une chambre à vide du réacteur thermonucléaire, l'unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples ayant m accès d'entrée et n accès de sortie, où m est un entier supérieur ou égal à 2, l'unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples comportant p dispositifs à impédance réglable, où p est un entier supérieur ou égal à m , les p dispositifs à impédance réglable étant appelés les "dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord" et étant tels que, à la fréquence donnée, chacun des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord a une réactance, la réactance de n'importe lequel des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord étant réglable par moyen électrique, chacun des n accès de sortie étant directement ou indirectement couplé à un et un seul des accès signal, le procédé comportant les étapes suivantes :

- [0012] • sélectionner une fréquence appelée la "fréquence sélectionnée" ;
- appliquer m excitations aux m accès d'entrée, une et une seule des excitations étant appliquée à chacun des accès d'entrée, chacune des excitations étant un signal passe-bande ayant une fréquence porteuse et une enveloppe complexe, la fréquence porteuse de ladite chacune des excitations étant égale à la fréquence sélectionnée, les m enveloppes complexes des m excitations étant linéairement indépendantes dans l'ensemble des fonctions complexes d'une variable réelle, considéré comme un espace vectoriel sur le corps des nombres complexes ;
- capter, en chacun d'au moins m endroits dans le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique, une ou plusieurs variables électriques, pour obtenir des "signaux de sortie d'unité de détection", chacun des signaux de sortie d'unité de détection étant principalement déterminé par au moins une des variables électriques captées à un des dits au moins m endroits dans le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique ;
- estimer q paramètres d'accord en utilisant les signaux de sortie d'unité de détection, où q est un entier supérieur ou égal à m , chacun des paramètres d'accord étant une quantité dépendante d'une matrice impédance vue par les accès de sortie ; et
- régler, par moyen électrique, la réactance d'au moins un des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord, en fonction des q paramètres d'accord.
- [0013] Ladite unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples comporte m accès d'entrée et n accès de sortie. Il est supposé que ladite unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples se comporte, à ladite fréquence donnée, par rapport à ses accès d'entrée et à ses accès de sortie, sensiblement comme un

dispositif linéaire passif, où “passif” est utilisé au sens de la théorie des circuits. Plus précisément, ladite unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples se comporte normalement, à ladite fréquence donnée, par rapport aux n accès de sortie et aux m accès d'entrée, sensiblement comme un dispositif linéaire passif à $n + m$ accès.

- [0014] Par exemple, un ou plusieurs des q paramètres d'accord peuvent être sensiblement proportionnels au module, ou à la phase, ou à la partie réelle, ou à la partie imaginaire d'un élément de ladite matrice impédance vue par les accès de sortie, ou d'un élément de l'inverse de ladite matrice impédance vue par les accès de sortie (cet inverse étant une matrice admittance vue par les accès de sortie), ou d'un élément d'une matrice de répartition (en anglais : “scattering matrix”) vue par les accès de sortie.
- [0015] Une matrice impédance présentée par les accès d'entrée dépend de ladite matrice impédance vue par les accès de sortie. Par conséquent, un ou plusieurs des q paramètres d'accord peuvent par exemple être sensiblement proportionnel au module, ou à la phase, ou à la partie réelle, ou à la partie imaginaire d'un élément de ladite matrice impédance présentée par les accès d'entrée, ou d'un élément de l'inverse de ladite matrice impédance présentée par les accès d'entrée (cet inverse étant une matrice admittance présentée par les accès d'entrée), ou d'un élément d'une matrice de répartition présentée par les accès d'entrée.
- [0016] Par exemple, il est possible que les dites m enveloppes complexes sont telles que l'influence de n'importe laquelle des excitations sur chacune d'au moins m des variables électriques peut être déterminée à partir de la connaissance des dites m enveloppes complexes et des signaux de sortie d'unité de détection. Dans la phrase précédente, “des variables électriques” signifie “des au moins m variables électriques captées aux dits au moins m endroits dans le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique”, et “peut être déterminé” signifie “peut être déterminé avec une précision suffisante, par exemple une précision relative inférieure à 5 pour cent, ou inférieure à 1 pour cent”.
- [0017] Par exemple, il est possible que le procédé selon l'invention comporte en outre l'étape d'utiliser un ou plusieurs des signaux de sortie d'unité de détection, pour activer un ou plusieurs signaux d'alerte si la présence d'un mode localisé au bord est suspectée ou détectée dans la chambre à vide du réacteur thermonucléaire. Dans ce cas, il est possible que le procédé selon l'invention comporte en outre l'étape de réduire une puissance des excitations, pendant un temps donné, si un des un ou plusieurs signaux d'alerte a été activé ; et il est possible que la réactance d'au moins un des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord soit réglée en fonction des q paramètres d'accord et en fonction de la possible activation d'un ou plusieurs des un ou plusieurs signaux d'alerte.

- [0018] Par exemple, il est possible qu'une puissance moyenne des excitations ne varie pas au cours du temps, s'il n'y a pas d'activation d'un des un ou plusieurs signaux d'alerte.
- [0019] Par exemple, il est possible que chacune des excitations soit une porteuse modulée en amplitude, le taux de modulation étant par exemple inférieur ou égal à 4 pour cent pour chacune des excitations. Une telle modulation peut être utilisée pour obtenir que les dites m enveloppes complexes soient linéairement indépendantes dans l'ensemble des fonctions complexes d'une variable réelle, et qu'une puissance moyenne des excitations ne varie pas au cours du temps, s'il n'y a pas d'activation d'un des un ou plusieurs signaux d'alerte.
- [0020] Par exemple, il est possible que chacune des excitations soit une porteuse modulée en phase, la variation de phase produite par la modulation étant par exemple inférieure ou égale à 5 degrés pour chacune des excitations. Une telle modulation peut être utilisée pour obtenir que les dites m enveloppes complexes soient linéairement indépendantes dans l'ensemble des fonctions complexes d'une variable réelle, et qu'une puissance moyenne des excitations ne varie pas au cours du temps, s'il n'y a pas d'activation d'un des un ou plusieurs signaux d'alerte.
- [0021] Par exemple, il est possible qu'un modèle numérique soit utilisé dans l'étape de régler, par moyen électrique, la réactance d'au moins un des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord, en fonction des q paramètres d'accord.
- [0022] Un appareil mettant en oeuvre le procédé selon l'invention est un réacteur thermonucléaire comportant un système de chauffage à résonance cyclotronique ionique, le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique comportant :
- [0023] • une antenne, l'antenne ayant n accès appelés chacun "accès signal", où n est un entier supérieur ou égal à 2, l'antenne permettant, à une fréquence donnée, un transfert de puissance depuis les n accès signal jusqu'à un champ électromagnétique produit par l'antenne dans une chambre à vide du réacteur thermonucléaire ; et
- une unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples ayant m accès d'entrée et n accès de sortie, où m est un entier supérieur ou égal à 2, l'unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples comportant p dispositifs à impédance réglable, où p est un entier supérieur ou égal à m , les p dispositifs à impédance réglable étant appelés les "dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord" et étant tels que, à la fréquence donnée, chacun des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord a une réactance, la réactance de n'importe lequel des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord étant réglable par moyen électrique, chacun des n accès de sortie étant directement ou indirectement couplé à un et un seul des accès signal ;

[0024] le réacteur thermonucléaire étant caractérisé en ce qu'il comporte en outre des moyens pour :

- [0025]
- sélectionner une fréquence appelée la "fréquence sélectionnée" ;
 - appliquer m excitations aux m accès d'entrée, une et une seule des excitations étant appliquée à chacun des accès d'entrée, chacune des excitations étant un signal passe-bande ayant une fréquence porteuse et une enveloppe complexe, la fréquence porteuse de ladite chacune des excitations étant égale à la fréquence sélectionnée, les m enveloppes complexes des m excitations étant linéairement indépendantes dans l'ensemble des fonctions complexes d'une variable réelle, considéré comme un espace vectoriel sur le corps des nombres complexes ;
 - capter, en chacun d'au moins m endroits dans le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique, une ou plusieurs variables électriques, pour obtenir des "signaux de sortie d'unité de détection", chacun des signaux de sortie d'unité de détection étant principalement déterminé par au moins une des variables électriques captées à un des dits au moins m endroits dans le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique ;
 - estimer q paramètres d'accord en utilisant les signaux de sortie d'unité de détection, où q est un entier supérieur ou égal à m , chacun des paramètres d'accord étant une quantité dépendante d'une matrice impédance vue par les accès de sortie ; et
 - régler, par moyen électrique, la réactance d'au moins un des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord, en fonction des q paramètres d'accord.

[0026] Par exemple, il est possible qu'un modèle numérique soit utilisé pour régler, par moyen électrique, la réactance d'au moins un des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord, en fonction des q paramètres d'accord.

Breve description des dessins

[0027] D'autres avantages et caractéristiques ressortiront plus clairement de la description qui va suivre de modes particuliers de réalisation de l'invention, donnés à titre d'exemples non limitatifs, et représentés dans les dessins annexés sur lesquels :

- [0028]
- la figure 1 représente un schéma-bloc d'un système de chauffage à résonance cyclotronique ionique d'un réacteur thermonucléaire selon l'invention (premier mode de réalisation et deuxième mode de réalisation) ; et
 - la figure 2 représente un schéma-bloc d'un système de chauffage à résonance cyclotronique ionique d'un réacteur thermonucléaire selon l'invention (troisième mode de réalisation).

[0029] EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE CERTAINS MODES DE RÉALISATION

[0030] Premier mode de réalisation.

[0031] Au titre d'un premier mode de réalisation d'un dispositif selon l'invention, donné à titre d'exemple non limitatif, nous avons représenté sur la [fig.1] le schéma-bloc d'un système de chauffage à résonance cyclotronique ionique d'un réacteur thermonucléaire selon l'invention, le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique étant prévu pour être capable de délivrer une puissance d'au moins 10 MW, le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique comportant :

- [0032] • une antenne (1), l'antenne ayant $n = 4$ accès appelés chacun "accès signal", l'antenne permettant, à une fréquence donnée choisie dans l'intervalle de fréquences de 50 MHz à 90 MHz, un transfert de puissance depuis les n accès signal jusqu'à un champ électromagnétique produit par l'antenne dans une chambre à vide (2) du réacteur thermonucléaire ;
- une unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples (4), aussi appelé "accordeur d'antenne à accès antenne multiples", ayant $m = 4$ accès d'entrée et n accès de sortie, l'unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples comportant p dispositifs à impédance réglable, où p est un entier supérieur ou égal à m , les p dispositifs à impédance réglable étant appelés les "dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord" et étant tels que, à la fréquence donnée, chacun des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord a une réactance, la réactance de n'importe lequel des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord étant réglable par moyen électrique, chacun des n accès de sortie étant indirectement couplé à un et un seul des accès signal à travers une ligne de transmission coaxiale (3) ;
- m amplificateurs radiofréquence de forte puissance (6) pouvant fournir chacun 3 MW à la fréquence donnée, chacun des amplificateurs radiofréquence de forte puissance ayant une sortie, la sortie du dit chacun des amplificateurs radiofréquence de forte puissance étant indirectement couplée à un et un seul des m accès d'entrée à travers une ligne de transmission coaxiale (5) ; et
- une unité de génération de signal et de commande (7) ;

[0033] le réacteur thermonucléaire étant caractérisé en ce que :

- [0034] • l'unité de génération de signal et de commande sélectionne une fréquence appelée la "fréquence sélectionnée", dans l'intervalle de fréquences de 50 MHz à 90 MHz ;
- l'unité de génération de signal et de commande délivre, aux amplificateurs radiofréquence de forte puissance, des signaux tels que les amplificateurs radiofréquence de forte puissance sont utilisés pour appliquer m excitations aux m accès d'entrée, une et une seule des excitations étant appliquée à chacun des

accès d'entrée, chacune des excitations étant un signal passe-bande ayant une fréquence porteuse et une enveloppe complexe, la fréquence porteuse de ladite chacune des excitations étant égale à la fréquence sélectionnée, les m enveloppes complexes des m excitations étant linéairement indépendantes dans l'ensemble des fonctions complexes d'une variable réelle, considéré comme un espace vectoriel sur le corps des nombres complexes ;

- m unités de détection, qui ne sont pas montrées sur la figure 1, sont utilisées pour capter, en chacun des m accès d'entrée, une ou plusieurs variables électriques, pour obtenir des "signaux de sortie d'unité de détection", chacun des signaux de sortie d'unité de détection étant principalement déterminé par au moins une des variables électriques captées à un des m accès d'entrée ;
- l'unité de génération de signal et de commande estime q paramètres d'accord en utilisant les signaux de sortie d'unité de détection, où $q = 2m^2$, chacun des paramètres d'accord étant une quantité réelle dépendante d'une matrice impédance vue par les accès de sortie ; et
- l'unité de génération de signal et de commande règle, par moyen électrique, les réactances des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord, en fonction des q paramètres d'accord.

[0035] Une puissance moyenne des excitations ne varie pas au cours du temps.

[0036] Chacune des excitations est un signal passe-bande (en anglais : "bandpass signal"). Ce type de signal est parfois incorrectement appelé "signal bande passante" (de l'anglais "passband signal") ou "signal bande étroite" (en anglais : "narrow-band signal"). Un signal passe-bande est n'importe quel signal réel $s(t)$, où t désigne le temps, tel que le spectre de $s(t)$ est inclus dans un intervalle de fréquence $[f_c - W/2, f_c + W/2]$, où f_c est une fréquence appelée la "fréquence porteuse" et W est une fréquence appelée "largeur de bande", qui satisfait $W < 2f_c$. Ainsi, la transformée de Fourier de $s(t)$, notée $S(f)$, est non négligeable seulement à l'intérieur des intervalles de fréquence $[-f_c - W/2, -f_c + W/2]$ et $[f_c - W/2, f_c + W/2]$. L'enveloppe complexe du signal réel $s(t)$, appelée en anglais "complex envelope" ou "complex baseband equivalent" ou encore "baseband-equivalent signal", est un signal complexe $s_B(t)$ dont la transformée de Fourier $S_B(f)$ est non négligeable seulement dans l'intervalle de fréquence $[-W/2, W/2]$ et satisfait $S_B(f) = kS(f_c + f)$ dans cet intervalle, où k est une constante réelle qui est choisie égale à la racine carrée de 2 par certains auteurs. La partie réelle de $s_B(t)$ est appelée la composante en phase, et la partie imaginaire de $s_B(t)$ est appelée la composante en quadrature. Le spécialiste sait que le signal passe-bande $s(t)$ peut par exemple être obtenu :

[0037] - comme résultat de la modulation en phase et en amplitude d'une unique porteuse à la fréquence f_c ;

- [0038] - comme une combinaison linéaire d'un premier signal et d'un second signal, le premier signal étant le produit de la composante en phase et d'une première porteuse sinusoïdale de fréquence f_c , le second signal étant le produit de la composante en quadrature et d'une seconde porteuse sinusoïdale de fréquence f_c , la seconde porteuse sinusoïdale étant déphasée de 90° par rapport à la première porteuse sinusoïdale ;
- [0039] - d'autres façons, par exemple sans utiliser aucune porteuse, par exemple en utilisant directement une sortie filtrée d'un convertisseur numérique-analogique.
- [0040] L'intervalle de fréquence $[f_c - W/2, f_c + W/2]$ est une bande passante du signal passe-bande. Selon les définitions, il est clair que, pour un signal passe-bande donné, plusieurs choix de fréquence porteuse f_c et de largeur de bande W sont possibles, si bien que la bande passante du signal passe-bande n'est pas définie de façon unique. Cependant, toute bande passante du signal passe-bande doit contenir toute fréquence à laquelle le spectre de $s(t)$ n'est pas négligeable.
- [0041] L'enveloppe complexe du signal réel $s(t)$ dépend clairement du choix d'une fréquence porteuse f_c . Cependant, pour une fréquence porteuse donnée, l'enveloppe complexe du signal réel $s(t)$ est définie de façon unique, pour un choix donné de la constante réelle k .
- [0042] Une et une seule des dites m excitations est appliquée à chacun des accès d'entrée, les m excitations étant appliquées simultanément. Chacune des dites m excitations est un signal passe-bande ayant une bande passante qui contient la fréquence sélectionnée. La fréquence sélectionnée étant considérée comme la fréquence porteuse, chacune des excitations a une et une seule enveloppe complexe, les m enveloppes complexes des m excitations étant linéairement indépendantes dans E , où E est l'ensemble des fonctions complexes d'une variable réelle, considéré comme un espace vectoriel sur le corps des nombres complexes.
- [0043] Les q paramètres d'accord sont suffisants pour permettre une détermination d'une matrice impédance présentée par les accès d'entrée (qui dépend de la matrice impédance vue par les accès de sortie). L'expression "sont suffisants pour permettre une détermination d'une matrice impédance présentée par les accès d'entrée" n'implique pas qu'une matrice impédance présentée par les accès d'entrée est déterminée, mais il est possible qu'une matrice impédance présentée par les accès d'entrée soit déterminée.
- [0044] Les informations transportées par les signaux de sortie d'unité de détection doivent être suffisantes pour permettre à l'unité de génération de signal et de commande d'estimer les q paramètres d'accord. Les unités de détection peuvent par exemple être telles que, pour n'importe lequel des accès d'entrée, les signaux de sortie d'unité de détection comportent : un premier signal de sortie d'unité de détection proportionnel à une première variable électrique, la première variable électrique étant une tension aux

bornes du dit n'importe lequel des accès d'entrée ; et un second signal de sortie d'unité de détection proportionnel à une seconde variable électrique, la seconde variable électrique étant un courant entrant dans ledit n'importe lequel des accès d'entrée. Ladite tension aux bornes du dit n'importe lequel des accès d'entrée peut être une tension complexe et ledit courant entrant dans ledit n'importe lequel des accès d'entrée peut être un courant complexe. Alternativement, les unités de détection peuvent par exemple être telles que, pour n'importe lequel des accès d'entrée, les signaux de sortie d'unité de détection comportent : un premier signal de sortie d'unité de détection proportionnel à une première variable électrique, la première variable électrique étant une tension incidente au dit n'importe lequel des accès d'entrée ; et un second signal de sortie d'unité de détection proportionnel à une seconde variable électrique, la seconde variable électrique étant une tension réfléchie au dit n'importe lequel des accès d'entrée. Ladite tension incidente au dit n'importe lequel des accès d'entrée peut être une tension incidente complexe et ladite tension réfléchie au dit n'importe lequel des accès d'entrée peut être une tension réfléchie complexe.

[0045] Le spécialiste comprend comment de tels signaux de sortie d'unité de détection peuvent être traités pour par exemple obtenir que les $2m^2$ paramètres d'accord décrivent une matrice impédance présentée par les accès d'entrée (par exemple, m^2 paramètres d'accord étant chacun un nombre réel proportionnel à la partie réelle d'un élément de cette matrice impédance, et m^2 paramètres d'accord étant chacun un nombre réel proportionnel à la partie imaginaire d'un élément de cette matrice impédance), ou pour par exemple obtenir que les $2m^2$ paramètres d'accord décrivent une matrice de répartition (en anglais : "scattering matrix") présentée par les accès d'entrée (par exemple, m^2 paramètres d'accord étant chacun un nombre réel proportionnel au module d'un élément de cette matrice de répartition, et m^2 paramètres d'accord étant chacun un nombre réel proportionnel à une phase d'un élément de cette matrice de répartition). Par exemple, des explications convenables sont fournies dans l'appendice C de l'article de F. Broydé et E. Clavelier intitulé "A Typology of Antenna Tuner Control Schemes, for One or More Antennas", publié dans *Excem Research Papers in Electronics and Electromagnetics*, no. 1 (doi: 10.5281/zenodo.3902749) en juin 2020.

[0046] Dans la suite, en accord avec le "IEC multilingual dictionary of electricity" édité par le *Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale* en 1983, "commande en boucle ouverte" (traduction littérale de l'expression "open-loop control" de la langue anglaise), synonyme de "commande en chaîne ouverte", signifie une commande qui ne fait pas usage d'une mesure de la grandeur commandée, et "commande en boucle fermée" (traduction littérale de l'expression "closed-loop control" de la langue anglaise), synonyme de "commande en chaîne fermée" et de

“asservissement”, signifie une commande où l’action sur le système commandé est rendue dépendante d’une mesure de la grandeur commandée.

[0047] La réactance nominale de chacun des dispositifs à impédance réglable de l’unité d’accord est, à un instant donné, déterminée par l’unité de génération de signal et de commande en fonction d’une “instruction de réglage d’unité d’accord”, qui est générée à l’intérieur de l’unité de génération de signal et de commande. Une nouvelle instruction de réglage d’unité d’accord est générée de façon répétée. Par exemple, une nouvelle instruction de réglage d’unité d’accord peut être générée périodiquement, par exemple toutes les 20 microsecondes. Chacune des instructions de réglage d’unité d’accord peut être de n’importe quel type de message numérique. Chacune des instructions de réglage d’unité d’accord est utilisée par l’unité de génération de signal et de commande pour déterminer des “signaux de contrôle d’accord”, qui sont délivrés à l’unité d’accord à accès d’entrée multiples et accès de sortie multiples pour contrôler les réactances des dispositifs à impédance réglable de l’unité d’accord.

[0048] Le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique utilise un procédé de commande en boucle fermée basé sur un modèle, dans lequel au moins une des instructions de réglage d’unité d’accord est déterminée en fonction :

- [0049] • d’une ou plusieurs quantités déterminées par la fréquence sélectionnée ;
 • d’une ou plusieurs variables déterminées par une ou plusieurs des instructions de réglage d’unité d’accord précédentes ; et
 • des q paramètres d’accord.

[0050] Le modèle est un modèle numérique qui décrit l’effet des signaux de contrôle d’accord sur les réactances des dispositifs à impédance réglable de l’unité d’accord. Le modèle numérique peut aussi être tel qu’il prend en compte l’effet d’une ou plusieurs températures mesurées dans le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique, sur les réactances des dispositifs à impédance réglable de l’unité d’accord.

[0051] Des procédés de commande en boucle fermée basés sur un modèle, convenables pour commander un accordeur d’antenne à accès antenne multiples d’un émetteur radio, sont divulgués dans la demande internationale numéro PCT/IB2019/051501 du 25 février 2019 (WO 2019/180520), intitulée “Method of automatic adjustment of a tuning unit, and apparatus for radio communication using this method”, et sont discutés dans la section XI du dit article intitulé “A Typology of Antenna Tuner Control Schemes, for One or More Antennas”, où ils sont dénommés “type 1 subtype c ”. Le spécialiste comprend comment il peut adapter l’enseignement de cette demande internationale et de cet article, au présent système de chauffage à résonance cyclotronique ionique d’un réacteur thermonucléaire selon l’invention. En particulier, le spécialiste comprend que le réacteur thermonucléaire selon l’invention met en oeuvre un procédé très précis et très rapide pour régler automatiquement un système de chauffage à

résonance cyclotronique ionique d'un réacteur thermonucléaire.

[0052] Ainsi, il n'est pas nécessaire de gaspiller de la puissance radiofréquence dans des charges à chaque fois que le réglage n'est pas correct, et/ou de faire opérer les amplificateurs radiofréquence de forte puissance à une puissance de sortie réduite, par rapport à leur puissance de sortie maximale théorique. Puisque l'unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples est telle qu'elle peut procurer, à ladite fréquence sélectionnée, pour des valeurs convenables des signaux de contrôle d'accord, un transfert de puissance à faibles pertes depuis les accès d'entrée jusqu'aux accès de sortie, nous pouvons conclure que l'invention maximise la puissance que le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique peut fournir au plasma existant dans la chambre à vide du réacteur thermonucléaire.

[0053] Deuxième mode de réalisation.

[0054] Au titre d'un deuxième mode de réalisation d'un dispositif selon l'invention, donné à titre d'exemple non limitatif, nous avons représenté sur la [fig. 1] le schéma-bloc d'un système de chauffage à résonance cyclotronique ionique d'un réacteur thermonucléaire selon l'invention, le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique comportant :

- [0055] • une antenne (1), l'antenne ayant $n = 4$ accès appelés chacun "accès signal", l'antenne permettant, à une fréquence donnée, un transfert de puissance depuis les n accès signal jusqu'à un champ électromagnétique produit par l'antenne dans une chambre à vide (2) du réacteur thermonucléaire ;
- une unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples (4), aussi appelé "accordeur d'antenne à accès antenne multiples", ayant $m = 4$ accès d'entrée et n accès de sortie, l'unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples comportant p dispositifs à impédance réglable, où p est un entier égal à $m(m + 1)$, les p dispositifs à impédance réglable étant appelés les "dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord" et étant tels que, à la fréquence donnée, chacun des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord a une réactance, la réactance de n'importe lequel des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord étant réglable par moyen électrique, chacun des n accès de sortie étant indirectement couplé à un et un seul des accès signal à travers une ligne de transmission (3) ; et
- m amplificateurs radiofréquence (6), chacun des amplificateurs radiofréquence ayant une sortie, la sortie de dit chacun des amplificateurs radiofréquence étant indirectement couplée à un et un seul des m accès d'entrée à travers une ligne de transmission (5) ;

[0056] le réacteur thermonucléaire comportant en outre une unité de génération de signal et de commande (7), et étant caractérisé en ce que :

- [0057] • l'unité de génération de signal et de commande sélectionne une fréquence appelée la "fréquence sélectionnée" ;
- l'unité de génération de signal et de commande délivre, aux amplificateurs radiofréquence, des signaux tels que les amplificateurs radiofréquence sont utilisés pour appliquer m excitations aux m accès d'entrée, une et une seule des excitations étant appliquée à chacun des accès d'entrée, chacune des excitations étant un signal passe-bande ayant une fréquence porteuse et une enveloppe complexe, la fréquence porteuse de ladite chacune des excitations étant égale à la fréquence sélectionnée, les m enveloppes complexes des m excitations étant linéairement indépendantes dans l'ensemble des fonctions complexes d'une variable réelle, considéré comme un espace vectoriel sur le corps des nombres complexes ;
- [0058] • n unités de détection, qui ne sont pas montrées sur la figure 1, sont utilisées pour capter, en chacun des n accès de sortie, une ou plusieurs variables électriques, pour obtenir des "signaux de sortie d'unité de détection", chacun des signaux de sortie d'unité de détection étant principalement déterminé par au moins une des variables électriques captées à un des n accès de sortie ;
- l'unité de génération de signal et de commande utilise un ou plusieurs des signaux de sortie d'unité de détection, pour activer un ou plusieurs signaux d'alerte si la présence d'un mode localisé au bord est suspectée dans la chambre à vide du réacteur thermonucléaire ;
- l'unité de génération de signal et de commande réduit de sensiblement 20 pour cent une puissance des excitations, pendant un temps donné égal à une milliseconde, si un des un ou plusieurs signaux d'alerte a été activé ;
- l'unité de génération de signal et de commande estime q paramètres d'accord en utilisant les signaux de sortie d'unité de détection, où $q = 2n^2$, chacun des paramètres d'accord étant une quantité réelle dépendante d'une matrice impédance vue par les accès de sortie ; et
- l'unité de génération de signal et de commande règle, par moyen électrique, les réactances des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord, en fonction des q paramètres d'accord et en fonction de la possible activation d'un ou plusieurs des un ou plusieurs signaux d'alerte.
- [0059] L'article de F. Broydé et E. Clavelier intitulé "Some Properties of Multiple-Antenna-Port and Multiple-User-Port Antenna Tuners", publié dans *IEEE Trans. on Circuits and Systems — I: Regular Papers*, Vol. 62, No. 2, pages 423 à 432, en février 2015, et la section XI du dit article intitulé "A Typology of Antenna Tuner Control Schemes, for One or More Antennas" expliquent l'avantage d'avoir p supérieur ou égal à $m(m + 1)$.

- [0060] Les q paramètres d'accord sont suffisants pour permettre une détermination de la matrice impédance vue par les accès de sortie. L'expression "sont suffisants pour permettre une détermination de la matrice impédance vue par les accès de sortie" n'implique pas que la matrice impédance vue par les accès de sortie est déterminée, mais il est possible que la matrice impédance vue par les accès de sortie soit déterminée.
- [0061] Les informations transportées par les signaux de sortie d'unité de détection doivent être suffisantes pour permettre à l'unité de génération de signal et de commande d'estimer les q paramètres d'accord. Les unités de détection peuvent par exemple être telles que, pour n'importe lequel des accès de sortie, les signaux de sortie d'unité de détection comportent : un premier signal de sortie d'unité de détection proportionnel à une première variable électrique, la première variable électrique étant une tension aux bornes du dit n'importe lequel des accès de sortie ; et un second signal de sortie d'unité de détection proportionnel à une seconde variable électrique, la seconde variable électrique étant un courant sortant du dit n'importe lequel des accès de sortie. Ladite tension aux bornes du dit n'importe lequel des accès de sortie peut être une tension complexe et ledit courant sortant du dit n'importe lequel des accès de sortie peut être un courant complexe. Alternativement, les unités de détection peuvent par exemple être telles que, pour n'importe lequel des accès de sortie, les signaux de sortie d'unité de détection comportent : un premier signal de sortie d'unité de détection proportionnel à une première variable électrique, la première variable électrique étant une tension incidente au dit n'importe lequel des accès de sortie ; et un second signal de sortie d'unité de détection proportionnel à une seconde variable électrique, la seconde variable électrique étant une tension réfléchie au dit n'importe lequel des accès de sortie. Ladite tension incidente au dit n'importe lequel des accès de sortie peut être une tension incidente complexe et ladite tension réfléchie au dit n'importe lequel des accès de sortie peut être une tension réfléchie complexe.
- [0062] Le spécialiste comprend comment de tels signaux de sortie d'unité de détection peuvent être traités pour par exemple obtenir que les $2n^2$ paramètres d'accord décrivent une matrice impédance vue par les accès de sortie, ou pour par exemple obtenir que les $2n^2$ paramètres d'accord décrivent une matrice de répartition vue par les accès de sortie. Par exemple, des explications convenables sont fournies dans l'appendice C du dit article intitulé "A Typology of Antenna Tuner Control Schemes, for One or More Antennas".
- [0063] La réactance nominale de chacun des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord est, à un instant donné, déterminée par l'unité de génération de signal et de commande en fonction d'une "instruction de réglage d'unité d'accord", qui est générée à l'intérieur de l'unité de génération de signal et de commande. Une nouvelle ins-

truction de réglage d'unité d'accord est générée de façon répétée.

- [0064] Le spécialiste sait comment les signaux de sortie d'unité de détection peuvent être utilisés pour détecter la présence d'un mode localisé au bord dans la chambre à vide du réacteur thermonucléaire, par exemple en se basant sur la présence de grandes et rapides variations de coefficients de réflexion.
- [0065] Le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique utilise un procédé de commande en boucle ouverte, ce procédé de commande étant donc basé sur un modèle. Le procédé de commande en boucle ouverte est tel que : si un des un ou plusieurs signaux d'alerte est activé, alors aucune nouvelle instruction de réglage d'unité d'accord n'est générée ; et si aucun des un ou plusieurs signaux d'alerte n'est activé, alors une nouvelle instruction de réglage d'unité d'accord est générée périodiquement, en fonction d'une ou plusieurs quantités dépendantes de la fréquence sélectionnée, et en fonction des q paramètres d'accord.
- [0066] Le modèle est un modèle numérique qui décrit l'effet d'une instruction de réglage d'unité d'accord sur les réactances des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord, et/ou sur les caractéristiques de l'unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples. Le modèle numérique peut aussi être tel qu'il prend en compte l'effet d'une ou plusieurs températures mesurées dans le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique, sur les réactances des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord, et/ou sur les caractéristiques de l'unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples.
- [0067] Des procédés de commande en boucle ouverte basés sur un modèle, convenables pour commander un accordeur d'antenne à accès antenne multiples d'un émetteur radio, sont divulgués dans la demande internationale numéro PCT/IB2015/057161 du 17 septembre 2015 (WO 2017/033048), intitulée "Method for automatically adjusting a tuning unit, and automatic tuning system using this method", et sont discutés dans la section XI du dit article intitulé "A Typology of Antenna Tuner Control Schemes, for One or More Antennas", où ils sont dénommés "type 3". Le spécialiste comprend comment il peut adapter l'enseignement de cette demande internationale et de cet article, au présent système de chauffage à résonance cyclotronique ionique d'un réacteur thermonucléaire selon l'invention. En particulier, le spécialiste comprend que le réacteur thermonucléaire selon l'invention met en oeuvre un procédé précis et très rapide pour régler automatiquement un système de chauffage à résonance cyclotronique ionique d'un réacteur thermonucléaire.
- [0068] Ainsi, il n'est pas nécessaire de gaspiller de la puissance radiofréquence dans des charges à chaque fois que le réglage n'est pas correct, et/ou de faire opérer les amplificateurs radiofréquence de façon permanente à une puissance de sortie réduite, par rapport à leur puissance de sortie maximale théorique. Puisque l'unité d'accord à accès

d'entrée multiples et accès de sortie multiples est telle qu'elle peut procurer, à ladite fréquence sélectionnée, pour des réglages convenables des réactances des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord, un transfert de puissance à faibles pertes depuis les accès d'entrée jusqu'aux accès de sortie, nous pouvons conclure que l'invention maximise la puissance que le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique peut fournir au plasma existant dans la chambre à vide du réacteur thermonucléaire.

[0069] Troisième mode de réalisation.

[0070] Au titre d'un troisième mode de réalisation d'un dispositif selon l'invention, donné à titre d'exemple non limitatif, nous avons représenté sur la [fig.2] le schéma-bloc d'un système de chauffage à résonance cyclotronique ionique d'un réacteur thermonucléaire selon l'invention, le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique étant prévu pour être capable de délivrer une puissance d'au moins 10 MW, le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique comportant :

- [0071] • une antenne (1), l'antenne ayant $n = 8$ accès appelés chacun "accès signal", l'antenne permettant, à une fréquence donnée choisie dans l'intervalle de fréquences de 35 MHz à 65 MHz, un transfert de puissance depuis les n accès signal jusqu'à un champ électromagnétique produit par l'antenne dans une chambre à vide (2) du réacteur thermonucléaire ;
- une unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples (4), aussi appelé "accordeur d'antenne à accès antenne multiples", ayant $m = 4$ accès d'entrée et n accès de sortie, l'unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples comportant p dispositifs à impédance réglable, où p est un entier supérieur ou égal à $2m$, les p dispositifs à impédance réglable étant appelés les "dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord" et étant tels que, à la fréquence donnée, chacun des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord a une réactance, la réactance de n'importe lequel des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord étant réglable par moyen électrique, chacun des n accès de sortie étant indirectement couplé à un et un seul des accès signal à travers une ligne de transmission coaxiale (3) contenant une fenêtre agissant comme une barrière pour le vide et le tritium ; et
- m amplificateurs radiofréquence de forte puissance (6) pouvant fournir chacun 3 MW à la fréquence donnée, chacun des amplificateurs radiofréquence de forte puissance ayant une sortie, la sortie du dit chacun des amplificateurs radiofréquence de forte puissance étant indirectement couplée à un et un seul des m accès d'entrée à travers une ligne de transmission coaxiale (5) ;

[0072] le réacteur thermonucléaire comportant en outre une unité de génération de signal et

de commande (7) et étant caractérisé en ce que :

- [0073] • l'unité de génération de signal et de commande sélectionne une fréquence appelée la "fréquence sélectionnée", dans l'intervalle de fréquences de 35 MHz à 65 MHz ;
- l'unité de génération de signal et de commande délivre, aux amplificateurs radiofréquence de forte puissance, des signaux tels que les amplificateurs radiofréquence de forte puissance sont utilisés pour appliquer m excitations aux m accès d'entrée, une et une seule des excitations étant appliquée à chacun des accès d'entrée, chacune des excitations étant un signal passe-bande ayant une fréquence porteuse et une enveloppe complexe, la fréquence porteuse de ladite chacune des excitations étant égale à la fréquence sélectionnée, les m enveloppes complexes des m excitations étant linéairement indépendantes dans l'ensemble des fonctions complexes d'une variable réelle, considéré comme un espace vectoriel sur le corps des nombres complexes ;
- des unités de détection, qui ne sont pas montrées sur la figure 2, sont utilisées pour capter, en chacun d'au moins m endroits dans le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique, une ou plusieurs variables électriques, pour obtenir des "signaux de sortie d'unité de détection", chacun des signaux de sortie d'unité de détection étant principalement déterminé par au moins une des variables électriques captées à un des dits au moins m endroits dans le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique ;
- l'unité de génération de signal et de commande utilise un ou plusieurs des signaux de sortie d'unité de détection, pour activer un ou plusieurs signaux d'alerte si la présence d'un mode localisé au bord est détectée dans la chambre à vide du réacteur thermonucléaire ;
- l'unité de génération de signal et de commande estime q paramètres d'accord en utilisant les signaux de sortie d'unité de détection, où q est un entier supérieur ou égal à m , chacun des paramètres d'accord étant une quantité dépendante d'une matrice impédance vue par les accès de sortie ; et
- l'unité de génération de signal et de commande règle, par moyen électrique, la réactance d'au moins un des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord, en fonction des q paramètres d'accord et en fonction de la possible activation d'un ou plusieurs des un ou plusieurs signaux d'alerte.

[0074] Les q paramètres d'accord sont suffisants pour permettre une détermination de la matrice impédance vue par les accès de sortie et une détermination d'une matrice impédance présentée par les accès d'entrée. L'expression "sont suffisants pour permettre une détermination de la matrice impédance vue par les accès de sortie et une détermination d'une matrice impédance présentée par les accès d'entrée" n'implique

pas qu'une matrice impédance vue par les accès de sortie et/ou une matrice impédance présentée par les accès d'entrée sont déterminées, mais il est possible qu'une matrice impédance vue par les accès de sortie et/ou une matrice impédance présentée par les accès d'entrée soient déterminées.

[0075] La réactance nominale de chacun des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord est, à un instant donné, déterminée par l'unité de génération de signal et de commande en fonction d'une "instruction de réglage d'unité d'accord", qui est générée à l'intérieur de l'unité de génération de signal et de commande. Une nouvelle instruction de réglage d'unité d'accord est générée de façon répétée.

[0076] Le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique utilise un procédé de commande en boucle ouverte basé sur un modèle, dans lequel, si un des un ou plusieurs signaux d'alerte est activé, alors aucune nouvelle instruction de réglage d'unité d'accord n'est générée ; et si aucun des un ou plusieurs signaux d'alerte n'est activé, alors une nouvelle instruction de réglage d'unité d'accord est générée périodiquement et en fonction :

- [0077] • d'une ou plusieurs quantités dépendantes de la fréquence sélectionnée ; et
 • d'une détermination de la matrice impédance vue par les accès de sortie, ou toute information équivalente (par exemple, une matrice admittance vue par les accès de sortie, une matrice de répartition vue par les accès de sortie, etc).

[0078] De plus, un algorithme de régulation par recherche d'extremum, plus lent, est utilisé pour régler les paramètres du modèle utilisé par le procédé de commande en boucle ouverte basé sur un modèle, pour obtenir un réglage parfait du système de chauffage à résonance cyclotronique ionique. Cet algorithme de régulation par recherche d'extremum règle ces paramètres du modèle, pour se rapprocher d'un extremum d'une variable de performance, la variable de performance étant une fonction réelle de la matrice impédance présentée par les accès d'entrée, ou de n'importe quelle information équivalente. Le spécialiste comprend comment cet algorithme de régulation par recherche d'extremum peut être mis en oeuvre. Le spécialiste comprend que le réacteur thermonucléaire selon l'invention met en oeuvre un procédé très précis et très rapide pour régler automatiquement un système de chauffage à résonance cyclotronique ionique d'un réacteur thermonucléaire.

[0079] Ainsi, il n'est pas nécessaire de gaspiller de la puissance radiofréquence dans des charges à chaque fois que le réglage n'est pas correct, et/ou de faire opérer les amplificateurs radiofréquence de forte puissance à une puissance de sortie réduite, par rapport à leur puissance de sortie maximale théorique. Puisque l'unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples est telle qu'elle peut procurer, à ladite fréquence sélectionnée, pour des réglages convenables des réactances des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord, un transfert de puissance à faibles pertes

depuis les accès d'entrée jusqu'aux accès de sortie, nous pouvons conclure que l'invention maximise la puissance que le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique peut fournir au plasma existant dans la chambre à vide du réacteur thermonucléaire.

[0080] INDICATIONS SUR LES APPLICATIONS INDUSTRIELLES

[0081] Dans tous les modes de réalisation décrits ci-dessus, l'unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples a $m = 4$ accès d'entrée, mais ceci n'est nullement une caractéristique de l'invention. Dans tous les modes de réalisation décrits ci-dessus, chacun des accès de sortie est indirectement couplé à un et un seul des accès signal à travers une ligne de transmission, mais ceci n'est nullement une caractéristique de l'invention. Dans tous les modes de réalisation décrits ci-dessus, chacun des accès d'entrée est indirectement couplé à la sortie d'un et un seul amplificateur radio-fréquence à travers une ligne de transmission, mais ceci n'est nullement une caractéristique de l'invention.

[0082] Le procédé selon l'invention est approprié pour régler automatiquement un système de chauffage à résonance cyclotronique ionique d'un réacteur thermonucléaire. Le réacteur thermonucléaire peut par exemple être un réacteur thermonucléaire expérimental, ou un réacteur thermonucléaire d'une centrale électrique. Puisque l'invention maximise la puissance que le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique peut fournir au plasma existant dans la chambre à vide du réacteur thermonucléaire, elle améliore le rendement du réacteur thermonucléaire.

Revendications

[Revendication 1]

Procédé pour régler automatiquement un système de chauffage à résonance cyclotronique ionique d'un réacteur thermonucléaire, le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique comportant une antenne (1) et une unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples (4), l'antenne ayant n accès appelés chacun "accès signal", où n est un entier supérieur ou égal à 2, l'antenne permettant, à une fréquence donnée, un transfert de puissance depuis les n accès signal jusqu'à un champ électromagnétique produit par l'antenne dans une chambre à vide (2) du réacteur thermonucléaire, l'unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples ayant m accès d'entrée et n accès de sortie, où m est un entier supérieur ou égal à 2, l'unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples comportant p dispositifs à impédance réglable, où p est un entier supérieur ou égal à m , les p dispositifs à impédance réglable étant appelés les "dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord" et étant tels que, à la fréquence donnée, chacun des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord a une réactance, la réactance de n'importe lequel des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord étant réglable par moyen électrique, chacun des n accès de sortie étant directement ou indirectement couplé à un et un seul des accès signal, le procédé comportant les étapes suivantes :

sélectionner une fréquence appelée la "fréquence sélectionnée" ;

appliquer m excitations aux m accès d'entrée, une et une seule des excitations étant appliquée à chacun des accès d'entrée, chacune des excitations étant un signal passe-bande ayant une fréquence porteuse et une enveloppe complexe, la fréquence porteuse de ladite chacune des excitations étant égale à la fréquence sélectionnée, les m enveloppes complexes des m excitations étant linéairement indépendantes dans l'ensemble des fonctions complexes d'une variable réelle, considéré comme un espace vectoriel sur le corps des nombres complexes ;

capter, en chacun d'au moins m endroits dans le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique, une ou plusieurs variables électriques, pour obtenir des "signaux de sortie d'unité de détection", chacun des signaux de sortie d'unité de détection étant principalement déterminé par au moins une des variables électriques captées à un des dits au moins m endroits dans le système de chauffage à résonance cyclo-

tronique ionique ;

estimer q paramètres d'accord en utilisant les signaux de sortie d'unité de détection, où q est un entier supérieur ou égal à m , chacun des paramètres d'accord étant une quantité dépendante d'une matrice

impédance vue par les accès de sortie ; et

régler, par moyen électrique, la réactance d'au moins un des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord, en fonction des q paramètres d'accord.

- [Revendication 2] Procédé selon la revendication 1, dans lequel une puissance moyenne des excitations ne varie pas au cours du temps.
- [Revendication 3] Procédé selon la revendication 1, comportant en outre l'étape d'utiliser un ou plusieurs des signaux de sortie d'unité de détection, pour activer un ou plusieurs signaux d'alerte si la présence d'un mode localisé au bord est suspectée dans la chambre à vide du réacteur thermonucléaire.
- [Revendication 4] Procédé selon la revendication 3, dans lequel une puissance moyenne des excitations ne varie pas au cours du temps, s'il n'y a pas d'activation d'un des un ou plusieurs signaux d'alerte.
- [Revendication 5] Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel un modèle numérique est utilisé dans l'étape de régler, par moyen électrique, la réactance d'au moins un des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord, en fonction des q paramètres d'accord.
- [Revendication 6] Réacteur thermonucléaire comportant un système de chauffage à résonance cyclotronique ionique, le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique comportant :
- une antenne (1), l'antenne ayant n accès appelés chacun "accès signal", où n est un entier supérieur ou égal à 2, l'antenne permettant, à une fréquence donnée, un transfert de puissance depuis les n accès signal jusqu'à un champ électromagnétique produit par l'antenne dans une chambre à vide (2) du réacteur thermonucléaire ; et
- une unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples (4) ayant m accès d'entrée et n accès de sortie, où m est un entier supérieur ou égal à 2, l'unité d'accord à accès d'entrée multiples et accès de sortie multiples comportant p dispositifs à impédance réglable, où p est un entier supérieur ou égal à m , les p dispositifs à impédance réglable étant appelés les "dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord" et étant tels que, à la fréquence donnée, chacun des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord a une réactance, la réactance de n'importe lequel des dispositifs à impédance réglable de l'unité

d'accord étant réglable par moyen électrique, chacun des n accès de sortie étant directement ou indirectement couplé à un et un seul des accès signal ;

le réacteur thermonucléaire étant caractérisé en ce qu'il comporte en outre des moyens pour :

sélectionner une fréquence appelée la "fréquence sélectionnée" ;

appliquer m excitations aux m accès d'entrée, une et une seule des excitations étant appliquée à chacun des accès d'entrée, chacune des excitations étant un signal passe-bande ayant une fréquence porteuse et une enveloppe complexe, la fréquence porteuse de ladite chacune des excitations étant égale à la fréquence sélectionnée, les m enveloppes complexes des m excitations étant linéairement indépendantes dans l'ensemble des fonctions complexes d'une variable réelle, considéré comme un espace vectoriel sur le corps des nombres complexes ;

capter, en chacun d'au moins m endroits dans le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique, une ou plusieurs variables électriques, pour obtenir des "signaux de sortie d'unité de détection", chacun des signaux de sortie d'unité de détection étant principalement déterminé par au moins une des variables électriques captées à un des dits au moins m endroits dans le système de chauffage à résonance cyclotronique ionique ;

estimer q paramètres d'accord en utilisant les signaux de sortie d'unité de détection, où q est un entier supérieur ou égal à m , chacun des paramètres d'accord étant une quantité dépendante d'une matrice impédance vue par les accès de sortie ; et

régler, par moyen électrique, la réactance d'au moins un des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord, en fonction des q paramètres d'accord.

[Revendication 7]

Réacteur thermonucléaire selon la revendication 6, dans lequel une puissance moyenne des excitations ne varie pas au cours du temps.

[Revendication 8]

Réacteur thermonucléaire selon la revendication 6, dans lequel un ou plusieurs des signaux de sortie d'unité de détection sont utilisés pour activer un ou plusieurs signaux d'alerte si la présence d'un mode localisé au bord est suspectée dans la chambre à vide du réacteur thermonucléaire.

[Revendication 9]

Réacteur thermonucléaire selon la revendication 8, dans lequel une puissance moyenne des excitations ne varie pas au cours du temps, s'il n'y a pas d'activation d'un des un ou plusieurs signaux d'alerte.

[Revendication 10] Réacteur thermonucléaire selon l'une quelconque des revendications 6 à 9, dans lequel un modèle numérique est utilisé pour régler, par moyen électrique, la réactance d'au moins un des dispositifs à impédance réglable de l'unité d'accord, en fonction des q paramètres d'accord.

[Fig. 1]

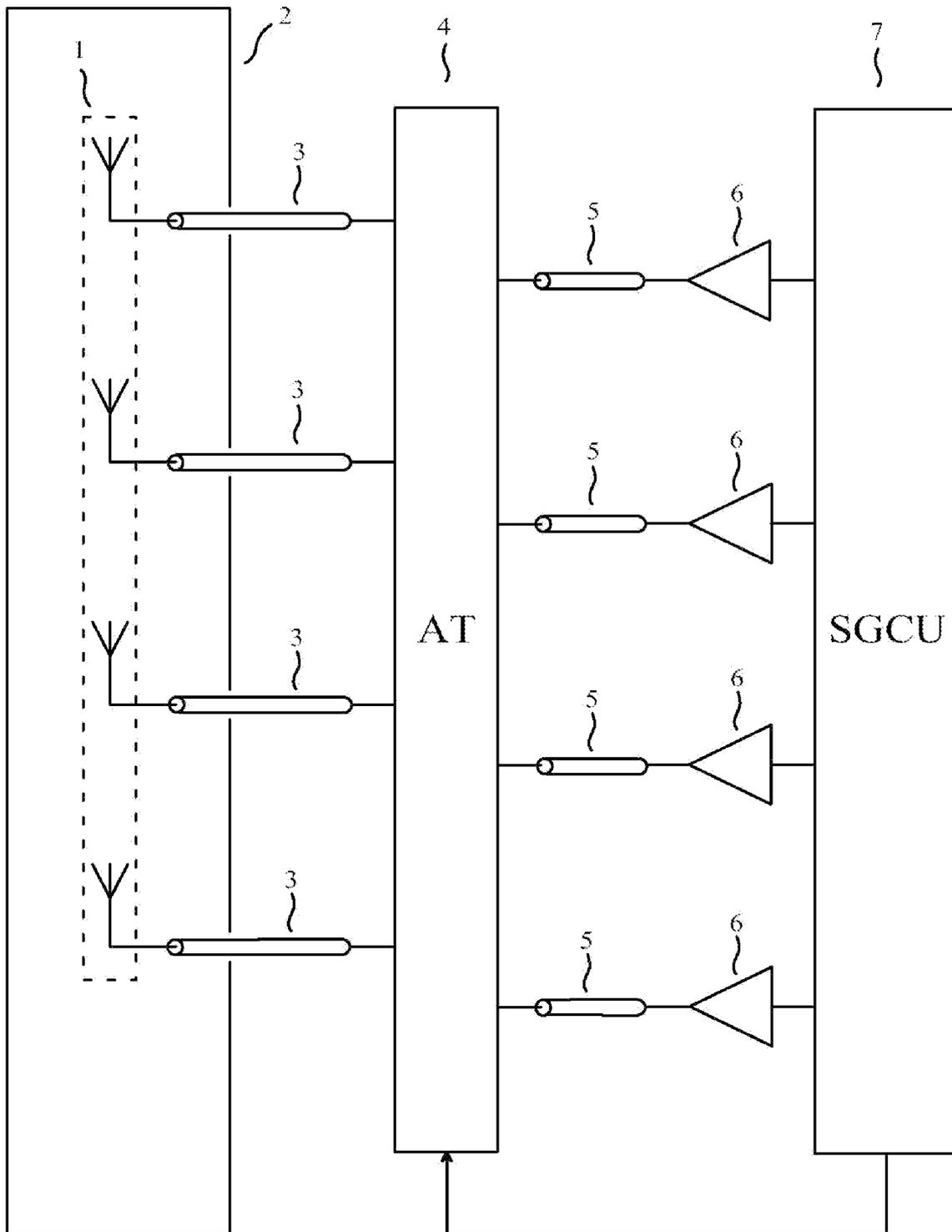


FIG. 1

[Fig. 2]

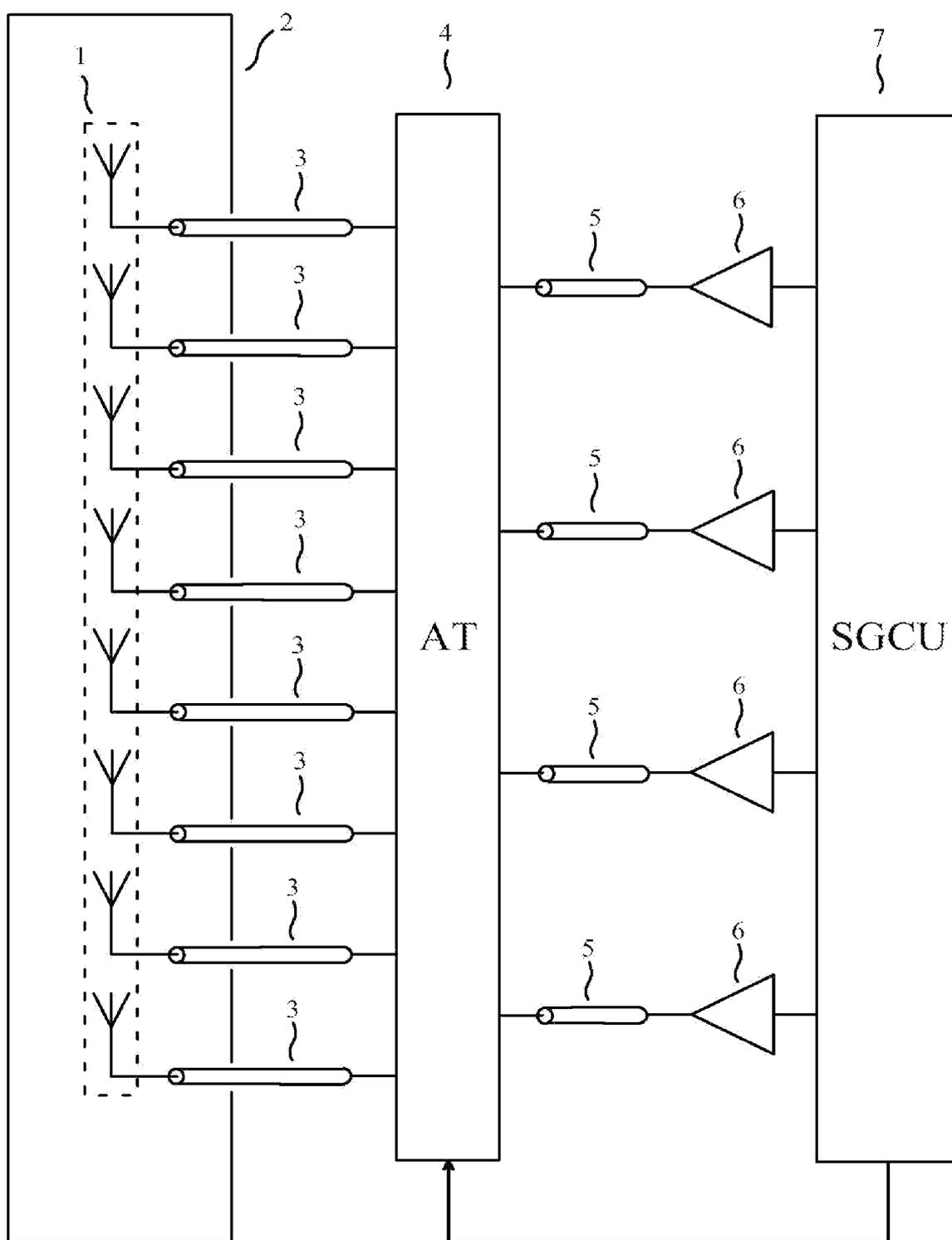


FIG. 2

RAPPORT DE RECHERCHE

articles L.612-14, L.612-53 à 69 du code de la propriété intellectuelle

OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

L'I.N.P.I. annexe à chaque brevet un "RAPPORT DE RECHERCHE" citant les éléments de l'état de la technique qui peuvent être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention, au sens des articles L. 611-11 (nouveau) et L. 611-14 (activité inventive) du code de la propriété intellectuelle. Ce rapport porte sur les revendications du brevet qui définissent l'objet de l'invention et délimitent l'étendue de la protection.

Après délivrance, l'I.N.P.I. peut, à la requête de toute personne intéressée, formuler un "AVIS DOCUMENTAIRE" sur la base des documents cités dans ce rapport de recherche et de tout autre document que le requérant souhaite voir prendre en considération.

CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

Le demandeur a présenté des observations en réponse au rapport de recherche préliminaire.

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

Le demandeur a modifié la description pour en éliminer les éléments qui n'étaient plus en concordance avec les nouvelles revendications.

Les tiers ont présenté des observations après publication du rapport de recherche préliminaire.

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

La répartition des documents entre les rubriques 1, 2 et 3 tient compte, le cas échéant, des revendications déposées en dernier lieu et/ou des observations présentées.

Les documents énumérés à la rubrique 1 ci-après sont susceptibles d'être pris en considération pour apprécier la brevetabilité de l'invention.

Les documents énumérés à la rubrique 2 ci-après illustrent l'arrière-plan technologique général.

Les documents énumérés à la rubrique 3 ci-après ont été cités en cours de procédure, mais leur pertinence dépend de la validité des priorités revendiquées.

Aucun document n'a été cité en cours de procédure.

1. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE SUSCEPTIBLES D'ETRE PRIS EN CONSIDERATION POUR APPRECIER LA BREVETABILITE DE L'INVENTION

NEANT

2. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE ILLUSTRANT L'ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE GENERAL

JOSHI R. ET AL: "Online impedance matching system for ICRH-RF experiments on SST-1 tokamak",
FUSION ENGINEERING AND DESIGN,
vol. 100, 1 novembre 2015 (2015-11-01),
pages 293-300, XP055854915,
NL
ISSN: 0920-3796, DOI:
10.1016/j.fusengdes.2015.06.095
Extrait de l'Internet:
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379615301241/pdf?md5=cd1c8bd8423038faf9afd81a554cde3c&pid=1-s2.0-S0920379615301241-main.pdf>

US 2018/041184 A1 (BROYDE FREDERIC [FR] ET AL) 8 février 2018 (2018-02-08)

3. ELEMENTS DE L'ETAT DE LA TECHNIQUE DONT LA PERTINENCE DEPEND DE LA VALIDITE DES PRIORITES

NEANT