



(51) Classification internationale des brevets :
G01R 27/32 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2019/053195

(22) Date de dépôt international :
19 décembre 2019 (19.12.2019)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1874052 21 décembre 2018 (21.12.2018) FR

(71) Déposants : SUPERGRID INSTITUTE [FR/FR] ;
23 rue Cyprian, 69100 VILLEURBANNE (FR). UNI-
VERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1 [FR/FR] ;
43 boulevard du onze novembre 1918, 69100 VILLEUR-
BANNE (FR). CENTRE NATIONAL DE LA RE-
CHERCHE SCIENTIFIQUE [FR/FR] ; 3 rue Michel
Ange, 75016 PARIS (FR). ECOLE CENTRALE DE

LYON [FR/FR] ; 36 avenue Guy de Collongue, 69130
ECULLY (FR). INSTITUT NATIONAL DES SCIEN-
CES APPLIQUEES DE LYON [FR/FR] ; 20 avenue
Albert Einstein, 69100 VILLEURBANNE (FR). UNI-
VERSITE JEAN MONNET SAINT ETIENNE [FR/FR]
; Maison de l'Université, 10 rue Tréfilerie, 42100 SAINT
ETIENNE (FR).

(72) Inventeurs : MOUHAI DALI, Amjad ; 23 rue Cyprian,
69100 VILLEURBANNE (FR). TOMEUR-DERVOU,
Damien ; 15 boulevard Latarjet, 69622 VILLEURBANNE
CEDEX (FR). SILVANT, Sébastien ; 23 rue Cyprian,
69100 VILLEURBANNE (FR).

(74) Mandataire : BALESTA, Pierre ; CABINET BEAU DE
LOMENIE, Immeuble Eurocentre, 179 Boulevard de Turin,
59777 LILLE (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO,
AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA,

(54) Title: METHOD FOR MODELLING AN ELECTRICAL CABLE

(54) Titre : PROCEDE DE MODELISATION D'UN CABLE ELECTRIQUE

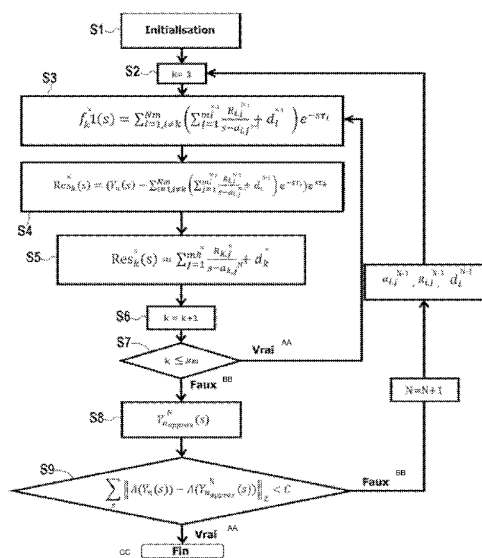


FIG.1

S1 Initialisation
AA True
BB False
CC End

(57) Abstract: Method for modeling an electrical cable in order to use the electrical cable in a plurality of propagation modes associated with delays in the temporal domain, said method using a transfer matrix and comprising steps according to which a cable propagation mode is selected, an approximation is calculated of the transfer matrix in the form of a first rational function comprising approximation terms associated with each of the cable propagation modes which are different from the selected propagation mode, a residue matrix associated with the propagation mode is determined, an approximation of the residue matrix is calculated, said steps are repeated successively for each of the cable propagation modes, and an approximate transfer matrix is determined using the set of previously approximated residue matrices.

(57) Abrégé : Procédé de modélisation d'un câble électrique pour l'utilisation dudit câble électrique dans une pluralité de modes de propagation associés à des retards dans le domaine temporel, le procédé utilisant une matrice de transfert, le procédé comprenant les étapes selon lesquelles on sélectionne un mode de propagation du câble, on calcule une approximation de la matrice de transfert sous la forme d'une première fonction rationnelle comprenant des termes d'approximation associés à chacun des modes de propagation du câble distincts du mode de propagation sélectionné, on détermine une matrice de résidu associée au mode de propagation, on calcule une approximation de la matrice de résidu, on répète ces étapes successivement pour chacun des modes de propagation du câble, on détermine une matrice de transfert approximée à partir de l'ensemble des matrices de résidu approximées précédemment.

CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée:

- avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))
- avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues (règle 48.2(h))

PROCEDE DE MODELISATION D'UN CABLE ELECTRIQUE

Domaine Technique

La présente invention concerne le domaine de la modélisation de câbles électriques permettant d'obtenir un modèle utilisable pour concevoir de tels câbles et réaliser des simulations du comportement de ces câbles électriques. L'invention porte plus précisément sur un procédé de modélisation d'un câble électrique.

Technique antérieure

La modélisation d'un câble électrique met généralement en œuvre des méthodes d'ajustement des paramètres linéaires et non-linéaires caractéristiques traduisant les réponses du câble électrique en fonction de la fréquence, lesdits paramètres étant inscrits dans une matrice de transfert qui est dépendante de la fréquence. Ces méthodes prévoient d'approximer la matrice de transfert par une fonction rationnelle.

La précision de l'approximation et la passivité de la matrice de transfert approximée sont deux facteurs critiques permettant d'évaluer la qualité d'un modèle de câble électrique. On comprend qu'un modèle précis permet de réaliser des simulations proches du comportement réel du câble électrique. De plus, un système passif ne génère pas d'énergie et ne peut libérer de l'énergie que si une telle énergie a été stockée au préalable dans le système. Un modèle passif permet donc de réaliser des simulations dans le domaine temporel qui ne divergent pas et qui sont donc d'autant plus précises. Aussi, il est primordial d'obtenir des modèles à la fois précis et passifs.

On connaît notamment du document US 8 195 412, un procédé dans lequel on approxime la matrice de transfert par une fonction rationnelle, puis on réalise ensuite un test de passivité sur le modèle obtenu. Lorsque ledit modèle n'est pas passif, une méthode de perturbation est employée pour forcer la passivité dudit modèle, a posteriori.

Un inconvénient de ce procédé est que la matrice de transfert approximée obtenue est mal conditionnée et que l'erreur d'approximation est importante. Ce procédé ne permet donc pas d'obtenir un modèle suffisamment précis. En outre, le traitement a posteriori visant à forcer la passivité est hasardeux et peu fiable de sorte qu'il ne garantit pas la passivité du modèle et qu'il affecte la précision de l'approximation. Le modèle obtenu par ce procédé de l'art antérieur n'est donc pas suffisamment précis et la conception de câbles électriques réalisée à partir d'un tel modèle n'est pas satisfaisante.

Exposé de l'invention

Un but de la présente invention est de proposer un procédé de modélisation d'un câble électrique remédiant aux problèmes précités.

Pour ce faire, l'invention porte sur un procédé de modélisation d'un câble électrique pour l'utilisation dudit câble électrique dans une pluralité de modes de propagation, chacun des modes de propagation étant associé à un retard dans le domaine temporel, le procédé utilisant une matrice de transfert décrivant les réponses dudit câble électrique en fonction de la fréquence, le procédé comprenant les étapes suivantes :

- a) on sélectionne un mode de propagation k du câble ;
- b) on calcule une approximation de la matrice de transfert sous la forme d'une première fonction rationnelle comprenant des termes d'approximation de la matrice transfert associés à chacun des modes de propagation du câble distincts du mode de propagation k sélectionné ;
- c) on détermine une matrice de résidu associée au mode de propagation k sélectionné en soustrayant à la matrice de transfert ladite première fonction rationnelle approximant la matrice de transfert;
- d) on calcule une approximation de la matrice de résidu associée au mode de propagation k sélectionné sous la forme d'une seconde fonction rationnelle ;
- e) on répète les étapes a) à d) successivement pour chacun des modes de propagation du câble, afin de déterminer un ensemble de secondes fonctions rationnelles approximant les matrices de résidu associées à chacun des modes de propagation ;
- f) on détermine une matrice de transfert approximée à partir de l'ensemble des secondes fonctions rationnelles calculées précédemment.

La matrice de transfert est dépendante de la fréquence. Elle contient une pluralité de paramètres décrivant le comportement et donc les réponses linéaires ou non-linéaires du câble électrique, de préférence sur un échantillonnage en fréquence choisi. Ladite matrice de transfert lie de préférence le courant traversant le câble électrique et la tension aux bornes du câble. Elle est de préférence calculée à partir d'une équation de propagation du câble dont les modes de propagations sont les solutions. Cette matrice de transfert initiale est considérée comme passive. Elle peut être déterminée par une méthode des éléments finis, par une méthode analytique ou numérique ou encore grâce à des mesures réalisées sur le câble électrique.

Chacun des modes de propagation décrit l'état d'une onde traversant le câble électrique. Le retard associé à un mode de propagation est le temps nécessaire pour que l'onde correspondante traverse le câble d'un bout à l'autre. Les retards sont déterminés par intégration, comme proposé par Bode.

Chacun des termes d'approximation de la première fonction rationnelle est une approximation de la matrice de transfert, sous la forme de fonction rationnelle, associée à un des modes de propagation. Les termes d'approximation peuvent comprendre des termes traduisant la contribution du retard associé à chacun des modes de propagation, excepté le mode de propagation k sélectionné.

La première fonction rationnelle prend en compte les termes d'approximation associés à chacun des modes de propagation du câble excepté les termes d'approximation associés au mode de propagation k sélectionné. Le calcul de la première fonction rationnelle associée au mode de propagation k sélectionné ne prend pas en compte les termes d'approximation et notamment la contribution du mode de propagation k sélectionné et le retard associé. La première fonction rationnelle associée au mode de propagation k sélectionné est de préférence une somme de termes d'approximations de la matrice de transfert sous forme de fonction rationnelle associés à chacun des modes de propagation, hormis au mode de propagation k sélectionné. Les termes d'approximation associés au mode de propagation k sélectionné sont retirés lors du calcul de la première fonction rationnelle, de sorte que la première fonction rationnelle ne prend en compte que les termes d'approximation associés aux modes de propagation distincts du mode de propagation k sélectionné. La première fonction rationnelle $fk1(s)$ associée au mode de propagation k sélectionné s'écrit de préférence :

$$fk1(s) = \sum_{i=1, i \neq k}^{Nm} \left(\sum_{j=1}^{mi} \frac{R_{i,j}}{s - a_{i,j}} + d_i \right) e^{-s\tau_i}$$

Où $a_{i,j}$ sont les pôles, $R_{i,j}$ et d_i sont des matrices constantes indépendantes de la fréquence, Nm est le nombre de pôles du système, s est la fréquence angulaire complexe et τ_i est le retard associé au mode de propagation i et mi est le nombre de pôles.

Les pôles $a_{i,j}$ sont de préférence choisis initialement de manière arbitraire.

La matrice de résidu associée au mode de propagation k sélectionné forme un reste mathématique traduisant la contribution du mode de propagation k sélectionné et de préférence du retard associé, considéré dans le domaine temporel. La matrice de résidu associée au mode de propagation k sélectionné oscille à la fréquence correspondant au retard associé audit mode de propagation k sélectionné.

La succession des étapes a), b), c) et d) pour un mode de propagation k sélectionné est réalisée pour chacun des modes de propagation, de sorte que

ces étapes sont répétées successivement autant de fois que le nombre de modes de propagations existants. A chaque répétition de ces étapes, une nouvelle matrice de résidu associée au mode de propagation k sélectionné est déterminée. De plus, à chaque répétition de ces étapes, ladite matrice de résidu déterminée est approximée par une seconde fonction rationnelle associée au mode de propagation k sélectionné.

La matrice de transfert approximée est de préférence déterminée en additionnant l'ensemble des secondes fonctions rationnelles approximant les matrices de résidus associées à chacun des modes de propagation.

Grâce à l'invention, la matrice de transfert approximée est obtenue en réalisant une approximation de la matrice de résidu pour chacun des modes de propagation et donc pour chaque retard, contrairement aux procédés de l'art antérieur qui prévoient d'approximer directement une matrice de transfert contenant l'ensemble des paramètres et retards associés à tous les modes de propagation. L'approximation de la matrice de transfert est donc obtenue de manière itérative et progressive, chaque mode de propagation étant considéré individuellement et séparément. Un intérêt est de réduire l'erreur d'approximation générée par les retards afin d'améliorer la précision de la matrice de transfert approximée finale et donc du modèle obtenu. En outre, la précision de la matrice de transfert approximée grâce au procédé selon l'invention permet également de réduire les risques de violations de passivité. Le procédé selon l'invention permet de faire converger la matrice de transfert approximée vers la matrice de transfert initiale, en réduisant progressivement l'erreur d'approximation. La précision de modèle obtenu est telle que sa passivité est garantie.

De plus, grâce à l'invention, la matrice de transfert approximée est conditionnée et placée dans une forme adaptée à son intégration dans le domaine temporel, ce qui facilite et améliore les simulations réalisées à partir du modèle obtenu.

De préférence, on multiplie la matrice de résidu associée au mode de propagation k sélectionné par un retard associé audit mode de propagation k sélectionné, avant l'étape de calcul de l'approximation de ladite matrice de résidu. Un intérêt est de rendre ladite matrice de résidu moins oscillante dans le domaine temporel en supprimant l'oscillation induite par le retard associé au mode de propagation k sélectionné. En effet, le reste mathématique issu de la soustraction de la première fonction rationnelle à la matrice de transfert oscille à la fréquence correspondant au retard associé mode de propagation k sélectionné.

Avantageusement, la matrice de résidu $\text{Res}_k(s)$ associée au mode de propagation k sélectionné est déterminée d'après l'équation suivante :

$$\text{Res}_k(s) = (Y_n(s) - \sum_{i=1, i \neq k}^{Nm} \left(\sum_{j=1}^{mi} \frac{R_{i,j}}{s - a_{i,j}} + d_i \right) e^{-s\tau_i}) e^{s\tau_k}$$

où $Y_n(s)$ est la matrice de transfert du câble, s est la fréquence angulaire complexe, $R_{i,j}$ sont des matrices indépendantes de la fréquence, k étant le mode de propagation sélectionné, $a_{i,j}$ sont des pôles du système, τ_i est la constante associée au retard du mode de propagation i , Nm est le nombre de modes de propagation du câble, mi est le nombre de pôles, d_i est une matrice constante indépendante de la fréquence. La fréquence angulaire complexe s est également appelée pulsation.

La matrice de résidu associée au mode de propagation k sélectionné s'écrit également :

$$\text{Res}_k(s) = (Y_n(s) - fk1(s)) e^{s\tau_k}$$

où $fk1(s)$ est la première fonction rationnelle approximant la matrice de transfert. τ_k est le retard associé au mode de propagation k sélectionné. On remarque que cette première fonction rationnelle prend la forme d'une somme sur l'ensemble des modes de propagation hormis le mode de propagation k sélectionné. Aussi, la première fonction rationnelle ne prend effectivement pas en compte le retard associé au mode de propagation k sélectionné. La matrice de résidu associée au mode k sélectionné ne prend en compte que la contribution du retard associé audit mode de propagation k sélectionné. La multiplication par $e^{s\tau_k}$ permet de compenser le retard associé au mode de propagation k sélectionné.

La matrice de résidu est de préférence calculée sur un échantillonnage de fréquence choisi.

De manière avantageuse, la matrice de résidu $\text{Res}_k(s)$ associée au mode de propagation k sélectionné est approximée sous la forme de la seconde fonction rationnelle suivante :

$$\text{Res}_k(s) \approx \sum_{j=1}^{mk} \frac{R_{k,j}}{s - a_{k,j}} + d_k$$

où mk est le nombre de pôles associés au mode de propagation k sélectionné, s est la fréquence angulaire complexe, $R_{k,j}$ sont des matrices indépendantes de la fréquence associées au mode de propagation k sélectionné, $a_{k,j}$ sont des pôles

du système associés au mode de propagation k sélectionné et d_k est une matrice constante indépendante de la fréquence.

L'approximation de la matrice de résidu associée au mode de propagation k sélectionné permet d'obtenir un jeu de paramètres $a_{k,j}$, $R_{k,j}$, $d_{k,j}$ traduisant les réponses linéaires du câble électrique associés au mode de propagation k sélectionné.

Préférentiellement, le calcul de l'approximation de la matrice de résidu associée au mode de propagation k sélectionné sous la forme d'une seconde fonction rationnelle est réalisé par une technique d'ajustement utilisant des méthodes de Krylov. Ces méthodes sont des méthodes d'approximation rationnelle et mettent en œuvre des approximations par moindres carrés. Les méthodes de Krylov permettent d'approximer précisément la matrice de résidu, ce qui améliore la précision de la matrice de transfert finale déterminée par le procédé selon l'invention et donc la précision du modèle obtenu.

Selon un aspect particulièrement avantageux de l'invention, les étapes a) à f) sont répétées jusqu'à ce qu'une condition d'arrêt soit satisfaite. Tant que la condition d'arrêt n'est pas satisfaite, les étapes menant à la détermination de la matrice de transfert approximée sont répétées. En revanche, lorsque la condition d'arrêt est vérifiée, le procédé est interrompu et la matrice de transfert approximée obtenue est conservée et utilisée comme modèle. Le procédé est donc itératif et récursif.

De préférence, le procédé de modélisation comprend une étape de test de passivité visant à vérifier la passivité de la matrice de transfert approximée, et la condition d'arrêt est satisfaite lorsque la passivité de la matrice de transfert approximée est confirmée par le test de passivité. Le procédé est donc poursuivi tant que la matrice de transfert approximée obtenue n'est pas passive. Un intérêt est donc de s'assurer de la passivité du modèle obtenu.

De manière non limitative, la condition d'arrêt peut également être une condition sur la précision de la matrice de transfert approximée obtenue suite à l'étape f). Dans ce cas, on réalise de préférence un test de précision sur ladite matrice de transfert approximée. Un intérêt est de s'assurer que le modèle obtenu est précis. Sans sortir du cadre de l'invention, la condition d'arrêt peut être une condition de passivité et/ou de précision de la matrice de transfert approximée. Grâce au procédé selon l'invention, la précision de l'approximation est avantageusement suffisante pour rendre les violations de passivité négligeables.

Avantageusement, la condition d'arrêt est satisfaite lorsque l'écart entre les valeurs propres de la matrice de transfert initiale et les valeurs propres de la

matrice de transfert approximée est inférieure à un seuil prédéterminé. La matrice de transfert approximée est de préférence considérée comme passive si ses valeurs propres sont positives. La matrice de transfert initiale étant passive, ses valeurs propres sont positives. Aussi, lorsque les valeurs propres de la matrice de transfert approximée sont suffisamment proches de celles de la matrice de transfert initiale, le modèle obtenu est considéré comme passif, en plus d'être particulièrement précis.

De préférence, la condition d'arrêt est satisfaite lorsque l'équation suivante est vérifiée :

$$\sum_s \left\| \Lambda(Y_n(s)) - \Lambda(Y_{n_{approx}}(s)) \right\|_2 < C$$

où $Y_n(s)$ est la matrice de transfert du câble électrique, s est la fréquence angulaire complexe, $Y_{n_{approx}}(s)$ est la matrice de transfert approximée déterminée, et C est un seuil de passivité prédéterminé, $\Lambda(Y_n(s))$ est l'ensemble des valeurs propres de la matrice de transfert et $\Lambda(Y_{n_{approx}}(s))$ est l'ensemble des valeurs propres de la matrice de transfert approximée.

Cette condition d'arrêt, non limitative, est une condition sur la passivité de la matrice de transfert approximée. Un intérêt est de garantir la passivité du modèle obtenu. Le seuil C est choisi arbitrairement de sorte qu'en dessous de ce seuil, la matrice de transfert approximée converge et est considérée comme passive.

En variante, la norme calculée pourrait être une norme infinie.

Avantageusement, l'étape de calcul d'une approximation de la matrice de résidu associée au mode de propagation k sélectionné sous la forme d'une seconde fonction rationnelle comprend la détermination des pôles $a_{k,j}$ du système associés au mode de propagation k sélectionné et, lorsque la condition d'arrêt n'est pas satisfaite, on répète les étapes a) à f), l'approximation de la matrice de transfert sous la forme d'une première fonction rationnelle étant réalisée à partir des pôles associés à l'ensemble des modes de propagation du câble déterminés précédemment.

Tant que la condition d'arrêt n'est pas satisfaite, une nouvelle itération du procédé, comprenant l'ensemble des étapes a) à f) est répétée. De préférence, les étapes menant à la détermination de la matrice de transfert approximée sont répétées tant que ladite matrice de transfert approximée n'est pas passive.

Avantageusement, l'étape de calcul d'une approximation de la matrice de résidu associée au mode de propagation k sélectionné comprend également la détermination de matrices $R_{k,j}$ et d_k indépendantes de la fréquence, associée audit mode de propagation k sélectionné. Lors de la nouvelle itération du

procédé, les étapes a) à f) sont répétées en approximant la matrice de transfert sous la forme d'une première fonction rationnelle à partir desdites matrices $R_{i,j}$ et d_i indépendantes de la fréquence déterminés précédemment pour l'ensemble des modes de propagation.

Lors de la première itération du procédé de modélisation, les pôles $a_{i,j}$ et les matrices $R_{i,j}$ et d_i sont choisis arbitrairement.

Chaque itération du procédé permet de déterminer un nouveau jeu de paramètres $a_{i,j}$, $R_{i,j}$, d_i .

A chaque nouvelle itération du procédé, les pôles $a_{i,j}$ et les matrices indépendantes de la fréquence $R_{i,j}$ et d_i déterminés lors de l'itération précédente sont utilisés pour approximer la nouvelle matrice de transfert sous la forme d'une première fonction rationnelle, afin de déterminer les matrices de résidu associées aux différents modes de propagation. Ces paramètres sont améliorés à chaque itération du procédé et l'erreur d'approximation considérée sur l'ensemble des modes de propagation d'une itération donnée est inférieure à l'erreur d'approximation de l'itération précédente. La passivité et la précision de la matrice de transfert approximée et donc du modèle obtenu à chaque nouvelle itération sont améliorées, jusqu'à satisfaire la condition d'arrêt.

Le procédé permet donc d'améliorer la précision et d'assurer la passivité du modèle final en déterminant de nouveaux pôles $a_{i,j}$ et matrices indépendantes de la fréquence $R_{i,j}$ et d_i en réalisant des itération successives, les violations de passivité de la matrice de transfert approximée obtenue étant réduites à chaque nouvelle itération.

En outre, les procédés de l'art antérieur prévoient de réaliser une étape a posteriori visant à forcer la passivité du modèle, par exemple à l'aide d'une méthode de perturbation. Cette étape dégrade l'approximation réalisée. Au contraire, le procédé selon l'invention permet d'améliorer la passivité du modèle de manière récursive et progressive jusqu'à obtention d'un modèle précis et passif. La passivité de la matrice de transfert approximée n'est pas assurée au détriment de la précision mais conjointement à la précision de ladite matrice de transfert approximée. La précision est au cœur du procédé. Aussi, le procédé permet de faire converger la matrice de transfert approximée vers la matrice de transfert initiale et ainsi garantir de manière fiable la passivité du modèle final. L'erreur d'approximation finale est particulièrement faible.

L'invention porte également sur un procédé de conception d'un câble électrique à partir de la matrice de transfert approximée obtenue par la mise en œuvre du procédé de modélisation décrit précédemment.

L'invention porte par ailleurs sur un procédé de simulation du comportement d'un câble électrique à partir de la matrice de transfert approximée obtenue par la mise en œuvre du procédé de modélisation décrit précédemment.

L'invention propose également un programme d'ordinateur comportant des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé de modélisation d'un câble (mis en œuvre par un dispositif électronique) tel que défini ci-avant lorsque ledit programme est exécuté par un ordinateur.

L'invention propose également un programme d'ordinateur comportant des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé de modélisation (mis en œuvre par un serveur) tel que défini ci-avant lorsque ledit programme est exécuté par un ordinateur.

A noter que les programme d'ordinateur mentionnés dans le présent exposé peuvent utiliser n'importe quel langage de programmation, et être sous la forme de code source, code objet, ou de code intermédiaire entre code source et code objet, tel que dans une forme partiellement compilée, ou dans n'importe quelle autre forme souhaitable.

L'invention propose également un support d'enregistrement lisible par un ordinateur sur lequel est enregistré un programme d'ordinateur comprenant des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé (mis en œuvre par un dispositif électronique) tel que défini ci-avant.

L'invention propose également un support d'enregistrement lisible par un ordinateur sur lequel est enregistré un programme d'ordinateur comprenant des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé (mis en œuvre par un serveur) tel que défini ci-avant.

Les supports d'enregistrement (ou d'information) mentionnés dans le présent exposé peuvent être n'importe quelle entité ou dispositif capable de stocker le programme. Par exemple, le support peut comporter un moyen de stockage, tel qu'une ROM, par exemple un CD ROM ou une ROM de circuit microélectronique, ou encore un moyen d'enregistrement magnétique, par exemple une disquette (floppy disc) ou un disque dur.

D'autre part, les supports d'enregistrement peuvent correspondre à un support transmissible tel qu'un signal électrique ou optique, qui peut être acheminé via un câble électrique ou optique, par radio ou par d'autres moyens. Le programme selon l'invention peut être en particulier téléchargé sur un réseau de type Internet.

Alternativement, les supports d'enregistrement peuvent correspondre à un circuit intégré dans lequel le programme est incorporé, le circuit étant adapté pour exécuter ou pour être utilisé dans l'exécution du procédé en question.

Brève description des dessins

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui suit d'un mode de réalisation de l'invention donné à titre d'exemple non limitatif, en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

[Fig. 1] La figure 1 est un diagramme illustrant les étapes d'un mode de mise en œuvre du procédé de modélisation selon l'invention ;

[Fig. 2] La figure 2 est un graphe illustrant l'évolution de la précision de la matrice de transfert approximée obtenue grâce au procédé de modélisation selon l'invention, en fonction du nombre d'itération du procédé selon l'invention ; et

[Fig. 3] La figure 3 est un graphe illustrant l'évolution de la passivité de la matrice de transfert approximée obtenue grâce au procédé de modélisation selon l'invention, en fonction du nombre d'itération du procédé selon l'invention.

Description des modes de réalisation

L'invention porte sur un procédé de modélisation d'un câble électrique. Ce procédé de modélisation permet d'obtenir un modèle traduisant le comportement du câble électrique sous la forme d'une matrice de transfert approximée.

La figure 1 est un diagramme illustrant les étapes d'un mode de mise en œuvre du procédé de modélisation selon l'invention.

Dans cet exemple, on réalise une première étape **S1** d'initialisation dans laquelle on fournit un câble électrique et on identifie des modes de propagation du câble électrique. Dans cette première étape, on calcule également les retards dans le domaine temporel, associés à chacun des modes de propagation. Ces retards sont exprimés sous la forme e^{t_i} dans le domaine fréquentiel. On forme de plus une matrice de transfert $Y_n(s)$ décrivant les réponses du câble électrique en fonction de la fréquence. Pour former ladite matrice de transfert $Y_n(s)$ on identifie les réponses du câble électrique, par exemple à l'aide des équations des télégraphistes. La matrice de transfert peut être déterminée par une méthode des éléments finis, par une méthode analytique ou encore grâce à des mesures réalisées sur le câble électrique.

De plus, on choisit de manière arbitraire un jeu de pôles $a_{i,j}^0$ initiaux du système ainsi que des jeux de matrices indépendantes de la fréquence $R_{i,j}^0$ et d_i^0 initiales, où j indique le mode de propagation et i indique le pôle.

Durant cette première étape **S1** d'initialisation, on place également un indice N à 1, N étant le numéro de l'itération. Une première itération du procédé selon l'invention est alors réalisée à l'aide desdits pôles et matrices initiaux.

Dans une deuxième étape **S2**, on sélectionne un mode de propagation, dit mode de propagation k sélectionné, parmi l'ensemble des modes de propagation.

Dans cet exemple, on sélectionne un premier mode de propagation en fixant d'abord la valeur de k à 1, k étant le numéro du mode de propagation sélectionné.

Dans une troisième étape **S3**, on calcule une approximation de la matrice de transfert $Y_n(s)$ sous la forme d'une première fonction rationnelle $fk1^N(s)$ associée au mode de propagation k sélectionné, pour l'itération N . Ladite première fonction rationnelle $fk1^N(s)$ comprend des termes d'approximation de la matrice de transfert associés à l'ensemble des modes de propagation distincts du mode de propagation k sélectionné. Les retards et paramètres associés au mode de propagation k sélectionné ne sont pas considérés. Plus précisément, la première fonction rationnelle est calculée en réalisant une somme de termes d'approximation de la matrice de transfert sur l'ensemble des modes de propagation hormis le mode de propagation k sélectionné.

Dans cet exemple, la première fonction rationnelle $fk1^N(s)$ associée au mode de propagation k sélectionné, pour l'itération N pendante, est calculée d'après l'équation suivante :

$$fk1^N(s) = \sum_{i=1, i \neq k}^{Nm} \left(\sum_{j=1}^{mi^{N-1}} \frac{R_{i,j}^{N-1}}{s - a_{i,j}^{N-1}} + d_i^{N-1} \right) e^{-s\tau_i}$$

Lors de la première itération du procédé, correspondant à $N=1$, les pôles $a_{i,j}^0$ et matrices indépendantes de la fréquence $R_{i,j}^0$ et d_i^0 initiaux, fixés arbitrairement, sont utilisés pour déterminer $fk1^1(s)$.

Dans une quatrième étape **S4**, on calcule une matrice de résidu $Res_k^N(s)$ associée au mode de propagation k sélectionné, pour l'itération N . Cette matrice de résidu est obtenue en soustrayant à la matrice de transfert $Y_n(s)$ ladite première fonction rationnelle $fk1^N(s)$ approximant la matrice de transfert sur l'échantillonnage en fréquence et en multipliant le résultat par $e^{s\tau_k}$, pour éliminer le retard associé audit mode de propagation k sélectionné.

La matrice de résidu est calculée d'après l'équation suivante:

$$Res_k^N(s) = (Y_n(s) - fk1^N(s))e^{s\tau_k}$$

Ou encore :

$$Res_k^N(s) = \left(Y_n(s) - \sum_{i=1, i \neq k}^{Nm} \left(\sum_{j=1}^{mi^{N-1}} \frac{R_{i,j}^{N-1}}{s - a_{i,j}^{N-1}} + d_i^{N-1} \right) e^{-s\tau_i} \right) e^{s\tau_k}$$

La matrice de résidu $\text{Res}_k^N(s)$ dépend de la fréquence et est associée au mode de propagation k sélectionné. Elle constitue un reste mathématique traduisant la contribution du mode de propagation k sélectionné et du retard associé.

Selon une cinquième étape **S5**, on réalise une approximation de la matrice de résidu associée au mode de propagation k sélectionné, pour l'itération N , sous la forme d'une seconde fonction rationnelle $fk2^N(s)$. La matrice de résidu $\text{Res}_k^N(s)$ associée au mode de propagation k sélectionné est approximée sous la forme :

$$\text{Res}_k^N(s) \approx fk2^N(s) = \sum_{j=1}^{mk^N} \frac{R_{k,j}^N}{s - a_{k,j}^N} + d_k^N$$

où mk^N est le nombre de pôles associés au mode de propagation k sélectionné pour l'itération N , s est la fréquence angulaire complexe, $R_{k,j}^N$ sont des matrices indépendantes de la fréquence associées au mode de propagation k sélectionné, $a_{k,j}^N$ sont des pôles déterminés du système associés au mode de propagation k sélectionné et d_k^N est une matrice constante indépendante de la fréquence, associée au mode de propagation k sélectionné.

Cette approximation de la matrice de résidu, sous la forme d'une seconde fonction rationnelle associée au mode de propagation k sélectionné, est alors conservée dans une mémoire.

L'approximation de la matrice de résidu est de préférence réalisée par une technique d'ajustement utilisant des méthodes de Krylov. L'approximation de la matrice de résidu permet de déterminer de nouveaux pôles $a_{k,j}^N$ et matrices indépendantes de la fréquence $R_{k,j}^N$ et d_k^N associés au mode de propagation k sélectionné, pour l'itération N .

Dans une sixième étape **S6**, on sélectionne un nouveau mode de propagation parmi les modes de propagation n'ayant pas encore été sélectionnés. Dans cet exemple, la valeur de k est incrémentée, de sorte que le mode de propagation suivant est sélectionné.

Dans une septième étape **S7**, on vérifie si l'ensemble des modes de propagation ont été sélectionnés et traités et donc si une matrice de résidu a été déterminée et approximée pour chacun des modes de propagation. Dans cet exemple non limitatif, on compare le numéro du nouveau mode de propagation k sélectionné au nombre de modes de propagation N_m .

Si k est inférieur à N_m , et donc si tous les modes de propagation n'ont pas été sélectionnés et traités, les troisième **S3**, quatrième **S4**, cinquième **S5**,

sixième **S6** et septième **S7** étapes sont répétées pour le nouveau mode de propagation k sélectionné.

Au contraire, si tous les modes de propagation ont été sélectionnés et traités, et donc si une matrice de résidu a été déterminée et approximée pour chacun des modes de propagation, il est procédé à une huitième étape **S8** détaillées ci-dessous.

En d'autres mots, les troisième **S3**, quatrième **S4**, cinquième **S5**, sixième **S6** et septième **S7** étapes sont répétées pour chacun des modes de propagation, afin de déterminer un ensemble de secondes fonctions rationnelles approximant les matrices de résidu associées à chacun desdits modes de propagation. Lesdites secondes fonctions rationnelles sont déterminées de manière progressive pour l'ensemble des modes de propagation et donc retard par retard et gardées en mémoire. Un intérêt est d'améliorer la précision du modèle final.

La répétition des étapes trois à sept pour chacun des modes de propagation permet de déterminer de nouveaux pôles a_{ij}^N du système ainsi que de nouvelles matrices indépendantes de la fréquence R_{ij}^N et d_i^N .

Lorsque toutes les secondes fonctions rationnelles ont été déterminées, on réalise une huitième étape **S8** de détermination d'une matrice de transfert approximée $Y_n\_approx^N(s)$ dépendant de la fréquence, pour l'itération N . Cette matrice de transfert approximée $Y_n\_approx^N(s)$ est formée en additionnant l'ensemble des secondes fonctions rationnelles calculées précédemment par répétition des étapes trois **S3** à sept **S7** pour chacun des modes de propagation.

La matrice de transfert approximée $Y_n\_approx^N(s)$ constitue une approximation de la matrice de transfert $Y_n(s)$ fournie initialement, décrivant les réponses linéaires et non-linéaires du câble électrique.

On réalise alors une neuvième étape **S9** de test de passivité visant à vérifier la passivité de la matrice de transfert approximée $Y_n\_approx^N$ déterminée précédemment. En variante, le test pourrait être un test de précision de la matrice de transfert approximée. Pour réaliser ce test de passivité, on calcule l'ensemble des valeurs propres $\Lambda(Y_n(s))$ de la matrice de transfert $Y_n(s)$ fournie initialement et l'ensemble des valeurs propres $\Lambda(Y_n\_approx^N(s))$ de la matrice de transfert approximée $Y_n\_approx^N(s)$. On calcule alors l'écart entre les valeurs propres $\Lambda(Y_n\_approx^N(s))$ de la matrice de transfert approximée $Y_n\_approx^N(s)$ et les valeurs propres $\Lambda(Y_n(s))$ de la matrice de transfert $Y_n(s)$ fournie initialement et on compare cet écart à un seuil de passivité prédéterminé. Dans cet exemple non limitatif, on calcule ledit écart et on le compare au seuil prédéterminé en contrôlant que la relation suivante est vérifiée :

$$\sum_s \left\| \Lambda(Y_n(s)) - \Lambda(Y_{n_{approx}}^N(s)) \right\|_2 < C$$

C est le seuil de passivité prédéterminé. Ce seuil de passivité est choisi de sorte que, lorsque la relation ci-dessous est vérifiée, la matrice de transfert approximée $Y_{n_{approx}}^N(s)$ pour l'itération N est considérée passive.

Lorsque la relation ci-dessus est vérifiée, une condition d'arrêt est rencontrée. Le procédé de modélisation selon l'invention est alors interrompu et la matrice de transfert approximée $Y_{n_{approx}}^N(s)$ déterminée précédemment est conservée afin d'être utilisée comme modèle.

En revanche, lorsque la relation ci-dessus n'est pas vérifiée, la condition d'arrêt n'est pas satisfaite et une nouvelle itération du procédé de modélisation est réalisée. Pour ce faire, la valeur de N est incrémentée de 1.

Les nouveaux pôles a_{ij}^{N-1} du système ainsi que les nouvelles matrices indépendantes de la fréquence R_{ij}^{N-1} et d_i^{N-1} déterminés par la répétition des étapes trois **S3** à sept **S7** pour chacun des modes de propagation de l'itération N-1 précédente sont alors utilisés comme conditions initiales pour la nouvelle itération N du procédé. Par exemple, les pôles déterminés lors d'une deuxième itération sont utilisés pour réaliser la troisième itération.

Plus précisément, la troisième étape **S3** de la nouvelle itération N du procédé, consistant à approximer la matrice de transfert sous la forme d'une première fonction rationnelle, est réalisée à partir des pôles a_{ij}^{N-1} et des matrices indépendantes de la fréquence R_{ij}^{N-1} et d_i^{N-1} associés à l'ensemble des modes de propagation du câble déterminés lors de l'itération précédente N-1.

Aussi, les troisième, quatrième, cinquième, sixième et septième étapes sont répétées et une nouvelle matrice de transfert approximée $Y_{n_{approx}}^N(s)$ est déterminée. Cette nouvelle matrice de transfert approximée à l'aide des pôles et matrices déterminés précédemment est plus précise que celle de l'itération précédente et les violations de passivité sont réduites.

Tant que le test de passivité de la neuvième étape **S9** et que la condition d'arrêt n'est pas satisfaite, une nouvelle itération du procédé est réalisée.

Lorsque la condition d'arrêt est satisfaite, le test est passé avec succès et la matrice de transfert approximée déterminée est conservée et forme le modèle obtenu. La passivité et la précision de la matrice de transfert approximée et donc du modèle obtenu à chaque nouvelle itération sont améliorées, jusqu'à satisfaire la condition d'arrêt.

Le procédé selon l'invention permet d'obtenir une matrice de transfert approximée $Y_{n_{approx}}^N(s)$ passive et précise utilisable pour réaliser des

simulations de comportement du câble électrique ou pour concevoir de tels câbles.

La figure **2** montre l'évolution de la différence entre la matrice de transfert $Y_n(s)$ décrivant les réponses du câble en fonction de la fréquence et la matrice de transfert approximée $Y_{n\_approx}^N(s)$ en fonction du nombre d'itérations N du procédé de modélisation selon l'invention. La figure **2** traduit l'erreur d'approximation.

On constate que l'erreur d'approximation décroît rapidement et devient très faible après une dizaine d'itération. La matrice de transfert approximée $Y_{n\_approx}^N(s)$ est donc aussi précise que voulu.

La figure **3** montre l'évolution de la valeur absolue de la plus petite valeur propre $\Lambda(Y_{n\_approx}^N(s))$ de la matrice de transfert approximée $Y_{n\_approx}^N(s)$ en fonction du nombre d'itérations N du procédé de modélisation selon l'invention. Lorsque ladite plus petite valeur propre est négative, la matrice de transfert approximée n'est pas passive. Lorsque ladite plus petite valeur propre est positive, la matrice de transfert approximée est passive. Le graphe de la figure **3** traduit donc la passivité de la matrice de transfert approximée.

Lors des premières itérations, la plus petite valeur propre est négative et sa valeur absolue est élevée, ce qui traduit une matrice de transfert approximée non-passive. A partir de la 28^{ème} itération, la plus petite valeur propre devient positive, ce qui se traduit par un pic sur la courbe. A partir de la 28^{ème} itération, ladite matrice de transfert approximée est donc passive et peut être conservée comme modèle.

Revendications

1. Procédé de modélisation d'un câble électrique pour l'utilisation dudit câble électrique dans une pluralité de modes de propagation, chacun des modes de propagation étant associé à un retard dans le domaine temporel, le procédé utilisant une matrice de transfert décrivant les réponses dudit câble électrique en fonction de la fréquence, le procédé comprenant les étapes suivantes :
 - a) on sélectionne un mode de propagation k du câble ;
 - b) on calcule une approximation de la matrice de transfert sous la forme d'une première fonction rationnelle comprenant des termes d'approximation de la matrice de transfert associés à chacun des modes de propagation du câble distincts du mode de propagation k sélectionné ;
 - c) on détermine une matrice de résidu associée au mode de propagation k sélectionné en soustrayant à la matrice de transfert ladite première fonction rationnelle approximant la matrice de transfert ;
 - d) on calcule une approximation de la matrice de résidu associée au mode de propagation k sélectionné sous la forme d'une seconde fonction rationnelle ;
 - e) on répète les étapes a) à d) successivement pour chacun des modes de propagation du câble, afin de déterminer un ensemble de secondes fonctions rationnelles approximant les matrices de résidu associées à chacun des modes de propagation ;
 - f) on détermine une matrice de transfert approximée à partir de l'ensemble des secondes fonctions rationnelles calculées précédemment.
2. Procédé de modélisation selon la revendication 1, dans lequel on multiplie la matrice de résidu associée au mode de propagation k sélectionné par un retard associé audit mode de propagation k sélectionné, avant l'étape de calcul de l'approximation de ladite matrice de résidu.
3. Procédé de modélisation selon la revendication 2, dans lequel la matrice de résidu $\text{Res}_k(s)$ associée au mode de propagation k sélectionné est déterminée d'après l'équation suivante :

$$\text{Res}_k(s) = (Y_n(s) - \sum_{i=1, i \neq k}^{Nm} \left(\sum_{j=1}^{mi} \frac{R_{i,j}}{s - a_{i,j}} + d_i \right) e^{-s\tau_i}) e^{s\tau_k}$$

où $Y_n(s)$ est la matrice de transfert du câble, s est la fréquence angulaire complexe, $R_{i,j}$ sont des matrices indépendantes de la fréquence, k étant le mode de propagation sélectionné, $a_{i,j}$ sont des pôles du système, τ_i est la constante associée au retard du mode de propagation i , Nm est le nombre de

modes de propagation du câble, m_i est le nombre de pôles, d_i est une matrice constante indépendante de la fréquence.

4. Procédé de modélisation selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel la matrice de résidu $\text{Res}_k(s)$ associée au mode de propagation k sélectionné est approximée sous la forme de la seconde fonction rationnelle suivante :

$$\text{Res}_k(s) \approx \sum_{j=1}^{m_k} \frac{R_{k,j}}{s - a_{k,j}} + d_k$$

où m_k est le nombre de pôles associés au mode de propagation k sélectionné, s est la fréquence angulaire complexe, $R_{k,j}$ sont des matrices indépendantes de la fréquence associées au mode de propagation k sélectionné, $a_{k,j}$ sont des pôles du système associés au mode de propagation k sélectionné et d_k est une matrice constante indépendante de la fréquence.

5. Procédé de modélisation selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, dans le calcul de l'approximation de la matrice de résidu associée au mode de propagation k sélectionné sous la forme d'une seconde fonction rationnelle est réalisé par une technique d'ajustement utilisant des méthodes de Krylov.
6. Procédé de modélisation selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel les étapes a) à f) sont répétées jusqu'à ce qu'une condition d'arrêt soit satisfaite.
7. Procédé de modélisation selon la revendication 6, comprenant une étape de test de passivité visant à vérifier la passivité de la matrice de transfert approximée, et dans lequel la condition d'arrêt est satisfaite lorsque la passivité de la matrice de transfert approximée est confirmée par le test de passivité.
8. Procédé de modélisation selon la revendication 7, dans lequel la condition d'arrêt est satisfaite lorsque l'écart entre les valeurs propres de la matrice de transfert et les valeurs propres de la matrice de transfert approximée est inférieur à un seuil de passivité prédéterminé.
9. Procédé de modélisation selon la revendication 8, dans lequel la condition d'arrêt est satisfaite lorsque l'équation suivante est vérifiée :

$$\sum_s \left\| \Lambda(Y_n(s)) - \Lambda(Y_{n_{approx}}(s)) \right\|_2 < C$$

où $Y_n(s)$ est la matrice de transfert du câble électrique, s est la fréquence angulaire complexe, $Y_{n_{approx}}(s)$ est la matrice de transfert approximée déterminée, et C est le seuil de passivité prédéterminé, $\Lambda(Y_n(s))$ est

l'ensemble des valeurs propres de la matrice de transfert et $\Lambda(Y_n\_approx(s))$ est l'ensemble des valeurs propres de la matrice de transfert approximée.

10. Procédé de modélisation selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans lequel l'étape de calcul d'une approximation de la matrice de résidu associée au mode de propagation k sélectionné sous la forme d'une seconde fonction rationnelle comprend la détermination des pôles $a_{k,j}$ du système associés au mode de propagation k sélectionné et dans lequel, lorsque la condition d'arrêt n'est pas satisfaite, on répète les étapes a) à f), l'approximation de la matrice de transfert sous la forme d'une première fonction rationnelle étant réalisée à partir des pôles associés à l'ensemble des modes de propagation du câble déterminés précédemment.
11. Procédé de conception d'un câble électrique à partir de la matrice de transfert approximée obtenue par la mise en œuvre du procédé de modélisation selon l'une quelconque 1 à 10.
12. Procédé de simulation du comportement d'un câble électrique à partir de la matrice de transfert approximée obtenue par la mise en œuvre du procédé de modélisation selon l'une quelconque 1 à 10.
13. Programme d'ordinateur comportant des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé de modélisation selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, lorsque ledit programme est exécuté par un ordinateur.
14. Support d'enregistrement lisible par un ordinateur sur lequel est enregistré un programme d'ordinateur comprenant des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé de modélisation selon l'une quelconque des revendications 1 à 10.

1/2

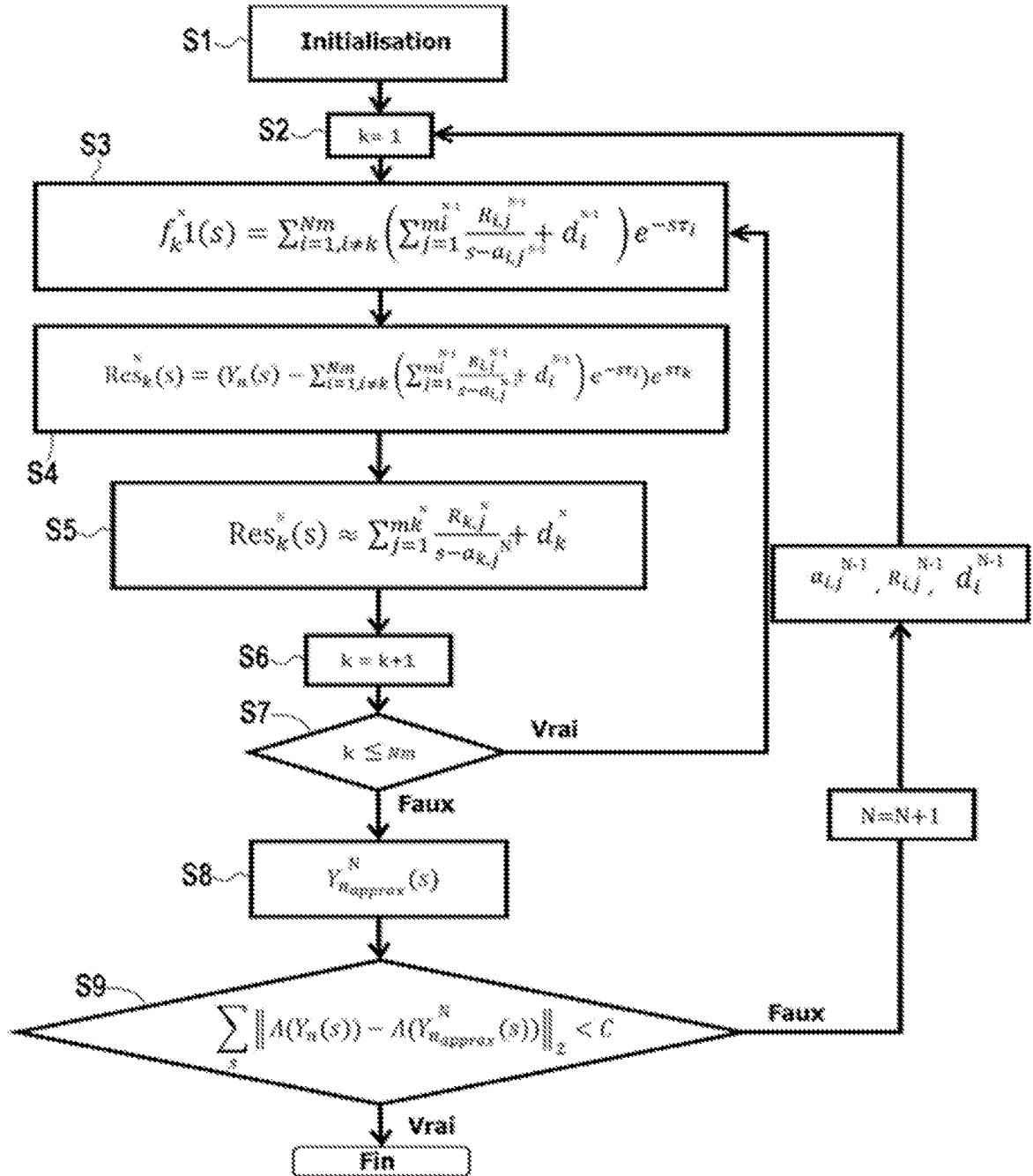


FIG.1

2/2

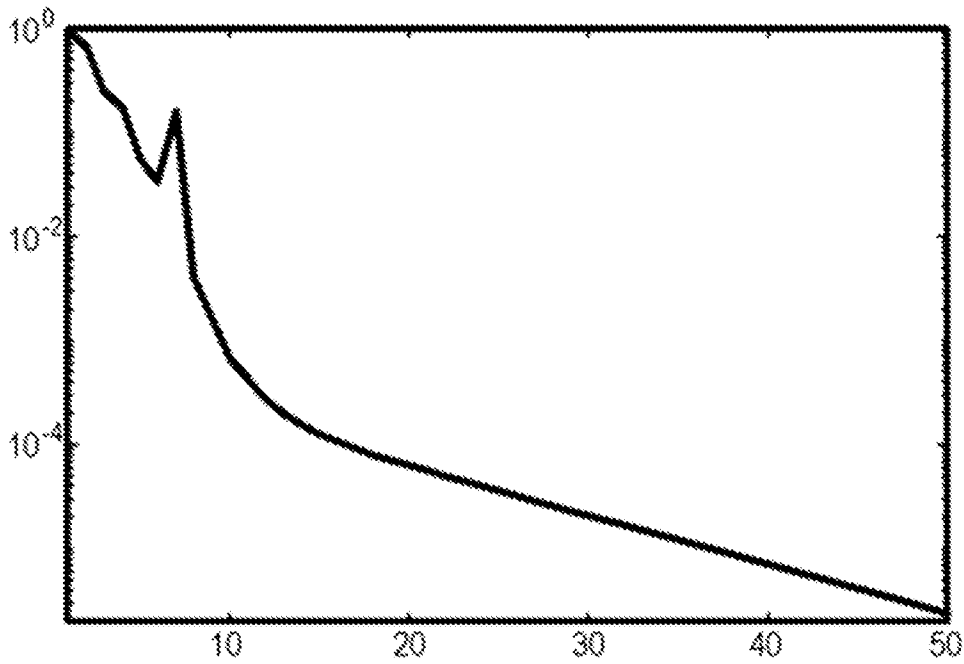


FIG.2

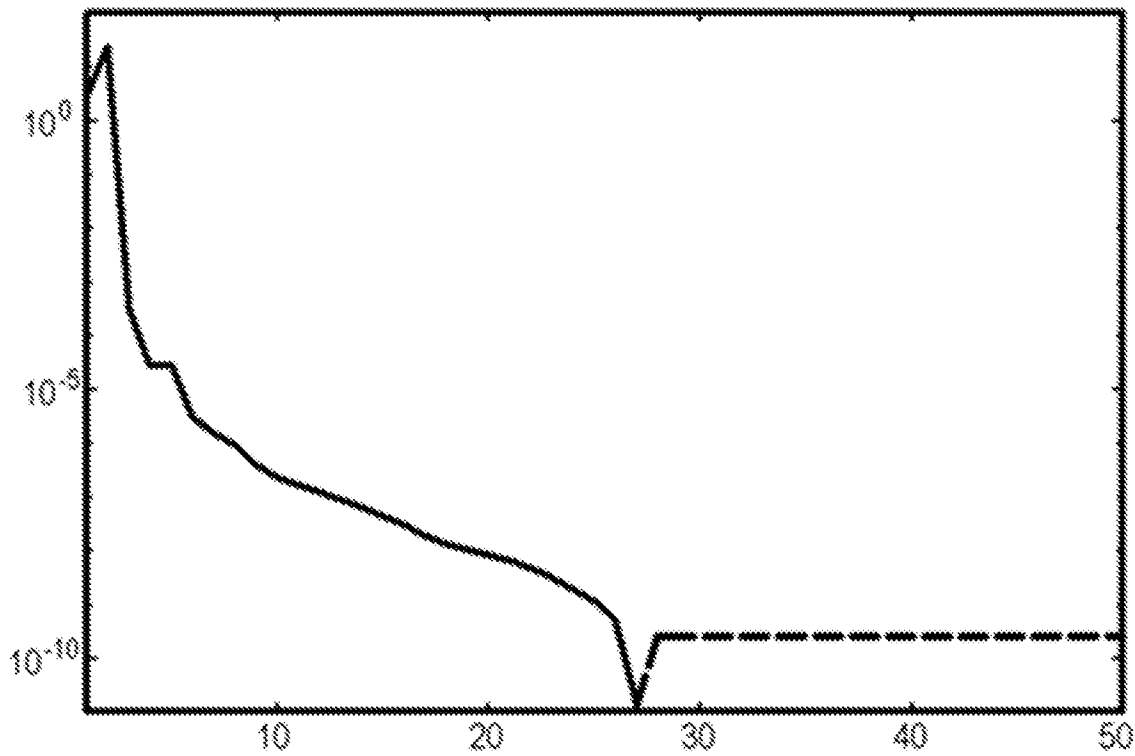


FIG.3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/FR2019/053195

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER G01R 27/32(2006.01)i According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC				
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G01R Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, WPI Data				
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT				
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.		
A	US 8195412 B2 (GUSTAVSEN BJORN [NO]; HEITZ CHRISTOPH [CH] ET AL.) 05 June 2012 (2012-06-05) cited in the application abstract; figure 10 column 1, line 65 - column 3, line 24 column 5, line 29 - column 6, line 9	1-10,12-14		
A	ATEF MORCHED ET AL. "A UNIVERSAL MODEL FOR ACCURATE CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS ON OVERHEAD LINES AND UNDERGROUND CABLES" <i>IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, IEEE SERVICE CENTER, NEW YORK, NY, US</i> , Vol. 14, No. 3, 01 July 1999 (1999-07-01), pages 1032-1038 ISSN: 0885-8977, XP011089130 abstract 1 Introduction 2.2 Rational function approximation	1-10,12-14		
☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.				
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top; border: none;"> * Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed </td> <td style="width: 50%; vertical-align: top; border: none;"> "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family </td> </tr> </table>			* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family			
Date of the actual completion of the international search 06 April 2020		Date of mailing of the international search report 17 April 2020		
Name and mailing address of the ISA/EP European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer Bauer, Rodolphe Telephone No.		

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/FR2019/053195**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Alessandro Castagnotto ET AL. "Stability-Preserving, Adaptive Model Order Reduction of DAEs by Krylov-Subspace Methods" 28 August 2015 (2015-08-28), Retrieved from the Internet: https://arxiv.org/pdf/1508.07227.pdf XP055608778 abstract pages 4-6	1-10,12-14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/FR2019/053195

Box No. II Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 2 of first sheet)

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1. ☐ Claims Nos.:
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:

2. ☒ Claims Nos.: **11**
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:

Claim 11 defines a method for designing a cable whereas the application describes a method for modelling a cable.

No design method is described. The design is certainly mentioned, but not described. Paragraphs 45, 93 are not sufficiently disclosed.

The applicant is advised that claims relating to inventions in respect of which no international search report has been established need not be the subject of a preliminary examination (PCT Rule 66.1(e)).

In its capacity as International Preliminary Examining Authority the EPO generally will not carry out a preliminary examination for subject matter that has not been searched.

This applies whether or not the claims were amended after receipt of the search report or during any Chapter II procedure.

However, after entry into the regional phase before the EPO an additional search may be carried out in the course of the examination (cf. EPO Guidelines, C-IV, 7.2) if the deficiencies that led to the declaration under PCT Article 17(2) have been corrected.

3. ☐ Claims Nos.:
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/FR2019/053195

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	8195412	B2	05 June 2012	BR	PI0721521	A2	15 January 2013
				CN	101663587	A	03 March 2010
				EP	2130054	A1	09 December 2009
				US	2010023288	A1	28 January 2010
				WO	2008119389	A1	09 October 2008

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2019/053195

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE

INV. G01R27/32

ADD.

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)

G01R

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	US 8 195 412 B2 (GUSTAVSEN BJORN [NO]; HEITZ CHRISTOPH [CH] ET AL.) 5 juin 2012 (2012-06-05) cité dans la demande abrégé; figure 10 colonne 1, ligne 65 - colonne 3, ligne 24 colonne 5, ligne 29 - colonne 6, ligne 9 ----- -/--	1-10, 12-14



Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents



Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent

"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date

"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)

"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens

"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

"X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

"Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

"&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

6 avril 2020

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

17/04/2020

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Bauer, Rodolphe

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/FR2019/053195

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	ATEF MORCHED ET AL: "A UNIVERSAL MODEL FOR ACCURATE CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS ON OVERHEAD LINES AND UNDERGROUND CABLES", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, IEEE SERVICE CENTER, NEW YORK, NY, US, vol. 14, no. 3, 1 juillet 1999 (1999-07-01), pages 1032-1038, XP011089130, ISSN: 0885-8977 abrégé 1 Introduction 2.2 Rational function approximation -----	1-10, 12-14
A	Alessandro Castagnotto ET AL: "Stability-Preserving, Adaptive Model Order Reduction of DAEs by Krylov-Subspace Methods", 28 août 2015 (2015-08-28), XP055608778, Extrait de l'Internet: URL:https://arxiv.org/pdf/1508.07227.pdf abrégé pages 4-6 -----	1-10, 12-14

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALEDemande internationale n°
PCT/FR2019/053195**Cadre n° II Observations - lorsqu'il a été estimé que certaines revendications ne pouvaient pas faire l'objet d'une recherche (suite du point 2 de la première feuille)**

Le rapport de recherche internationale n'a pas été établi en ce qui concerne certaines revendications conformément à l'article 17.2)a) pour les raisons suivantes :

1. ☐ Les revendications n°^{os} se rapportent à un objet à l'égard duquel l'administration chargée de la recherche internationale n'est pas tenue de procéder à la recherche, à savoir :

2. ☒ Les revendications n°^{os} 11 parce qu'elles se rapportent à des parties de la demande internationale qui ne remplissent pas suffisamment les conditions prescrites pour qu'une recherche significative puisse être effectuée, en particulier :

voir FEUILLE ANNEXÉE PCT/ISA/210

3. ☐ Les revendications n°^{os} parce qu'elles sont des revendications dépendantes et ne sont pas rédigées conformément aux dispositions de la deuxième et de la troisième phrases de la règle 6.4.a).

Cadre n° III Observations - lorsqu'il y a absence d'unité de l'invention (suite du point 3 de la première feuille)

L'administration chargée de la recherche internationale a trouvé plusieurs inventions dans la demande internationale, à savoir:

1. ☐ Comme toutes les taxes additionnelles exigées ont été payées dans les délais par le déposant, le présent rapport de recherche internationale porte sur toutes les revendications pouvant faire l'objet d'une recherche.

2. ☐ Comme toutes les revendications qui se prêtent à la recherche ont pu faire l'objet de cette recherche sans effort particulier justifiant des taxes additionnelles, l'administration chargée de la recherche internationale n'a sollicité le paiement d'aucunes taxes de cette nature.

3. ☐ Comme une partie seulement des taxes additionnelles demandées a été payée dans les délais par le déposant, le présent rapport de recherche internationale ne porte que sur les revendications pour lesquelles les taxes ont été payées, à savoir les revendications n°^{os}:

4. ☐ Aucune taxes additionnelles demandées n'ont été payées dans les délais par le déposant. En conséquence, le présent rapport de recherche internationale ne porte que sur l'invention mentionnée en premier lieu dans les revendications; elle est couverte par les revendications n°^{os}:

Remarque quant à la réserve ☐ Les taxes additionnelles étaient accompagnées d'une réserve de la part du déposant et, le cas échéant, du paiement de la taxe de réserve.

☐ Les taxes additionnelles étaient accompagnées d'une réserve de la part du déposant mais la taxe de réserve n'a pas été payée dans le délai prescrit dans l'invitation.

☐ Le paiement des taxes additionnelles n'était assorti d'aucune réserve.

SUITE DES RENSEIGNEMENTS INDIQUES SUR PCT/ISA/ 210

Suite du cadre II.2

Revendications nos.: 11

La revendication 11 définit un procédé de conception d'un câble alors que la demande décrit un procédé de modélisation d'un câble.

Aucun procédé de conception n'est décrit. La conception est certes mentionnée, mais pas décrite. Les paragraphes 45, 93 ne constituent pas un exposé suffisant.

L'attention du déposant est attirée sur le fait que les revendications ayant trait aux inventions pour lesquelles aucun rapport de recherche n'a été établi ne peuvent faire obligatoirement l'objet d'un rapport préliminaire d'examen (Règle 66.1(e) PCT). Le déposant est averti que la ligne de conduite adoptée par l'OEB agissant en qualité d'administration chargée de l'examen préliminaire international est, normalement, de ne pas procéder à un examen préliminaire sur un sujet n'ayant pas fait l'objet d'une recherche. Cette attitude restera inchangée, indépendamment du fait que les revendications aient ou n'aient pas été modifiées, soit après la réception du rapport de recherche, soit pendant une quelconque procédure sous le Chapitre II. Si la demande devait être poursuivie dans la phase régionale devant l'OEB, il est rappelé au déposant qu'une recherche pourrait être effectuée durant la procédure d'examen devant l'OEB (voir Directive OEB C-IV, 7.2) à condition que les problèmes ayant conduit à la déclaration conformément à l'Article 17(2) PCT aient été résolus.

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2019/053195

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication		Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 8195412	B2	05-06-2012	BR	PI0721521 A2	15-01-2013
			CN	101663587 A	03-03-2010
			EP	2130054 A1	09-12-2009
			US	2010023288 A1	28-01-2010
			WO	2008119389 A1	09-10-2008
