(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 3 758 031 A1**

(12) **DEMANDE DE BREVET EUROPEEN**

(43) Date de publication:
30.12.2020 Bulletin 2020/53

(51) Int Cl.:
H01F 27/34 *(2006.01)*

(21) Numéro de dépôt: **20176687.0**

(22) Date de dépôt: **27.05.2020**

(84) Etats contractants désignés:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Etats d'extension désignés:
BA ME
Etats de validation désignés:
KH MA MD TN

(30) Priorité: **27.06.2019 FR 1907024**

(71) Demandeur: **Valeo Siemens eAutomotive France SAS**
95800 Cergy (FR)

(72) Inventeurs:
- **SARRAFIN-ARDEBILI, Farshid**
  95800 CERGY (FR)
- **YANG, Gang**
  92400 COURBEVOIE (FR)

(74) Mandataire: **Argyma**
14 Boulevard de Strasbourg
31000 Toulouse (FR)

(54) TRANSFORMATEUR ELECTRIQUE AYANT UNE REPARTITION D'INDUCTANCE DE FUITE CONTROLEE

(57) La présente invention vise un transformateur électrique comprenant un noyau magnétique et un bobinage primaire, formant un circuit primaire, et un bobinage secondaire, formant un circuit secondaire, transformateur électrique configuré de sorte que :
une première valeur L_{1so} d'inductance mesurée au circuit primaire avec le circuit secondaire ouvert,
une deuxième valeur L_{1ss} d'inductance mesurée au circuit primaire avec le circuit secondaire court-circuité, et
une troisième valeur L_{2po} d'inductance mesurée au circuit secondaire avec le circuit primaire ouvert,
sont telles que :

$$L_{2PO} - \frac{1}{n^2} L_M < A.(L_{1SO} - L_M)$$

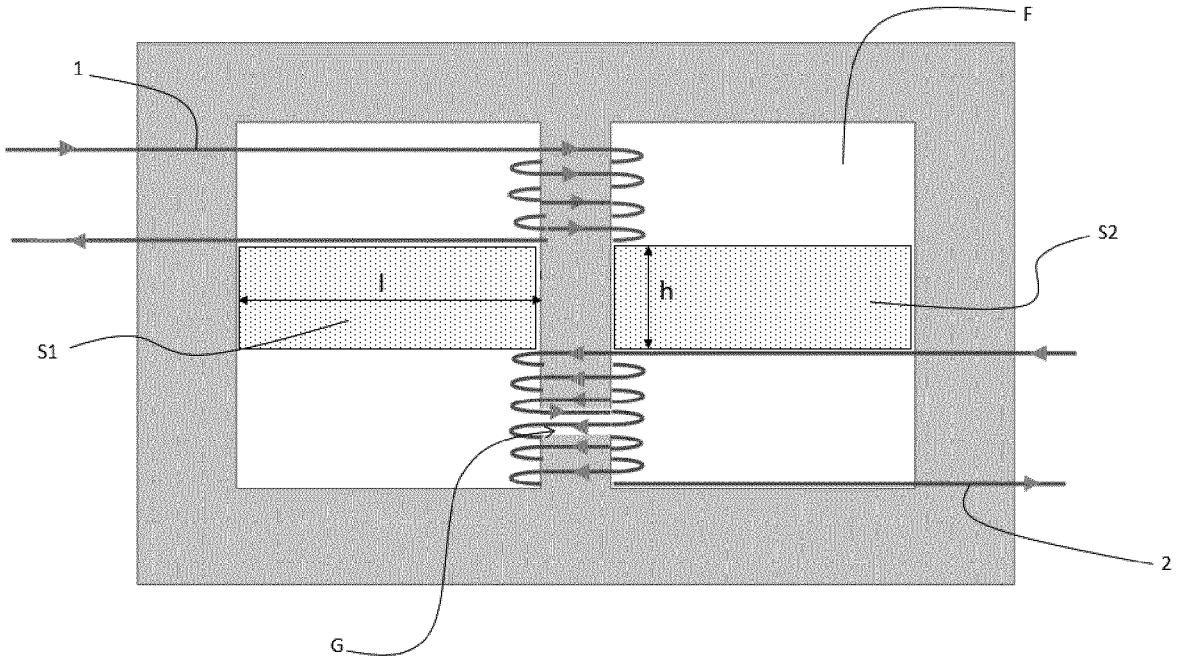
avec

$$L_M = \sqrt{(L_{1SO} - L_{1SS}) \times L_{1SO}.N^2}$$

où A est un nombre réel supérieur à 10.

EP 3 758 031 A1

Fig. 4



Description

DOMAINE TECHNIQUE DE L'INVENTION

[0001] La présente invention se rapporte au domaine des transformateurs électriques, par exemple intégrés à des convertisseurs de tension résonnants ou à tout autre type de convertisseurs de puissance.

[0002] La présente invention vise en particulier à permettre de contrôler la répartition de l'inductance de fuite dans un transformateur électrique.

ETAT DE LA TECHNIQUE

[0003] Un transformateur électrique permet le transfert d'énergie électrique d'un circuit primaire à un circuit secondaire.

[0004] Comme cela est connu, dans un transformateur électrique, on utilise un noyau magnétique et des bobinages dans lesquels circulent un courant électrique qui génère un champ magnétique permettant le transfert d'énergie électrique du circuit primaire au circuit secondaire. Plus précisément, dans un transformateur électrique, en particulier dans un convertisseur à inductance magnétisante ou dans un convertisseur résonnant, on a un bobinage primaire et un bobinage secondaire, formés par des enroulements autour d'un noyau magnétique, entre lesquels est transférée de l'énergie électrique.

[0005] Tout transformateur électrique présente une inductance de fuite, qui se traduit par une perte d'efficacité car une partie du flux magnétique créé au circuit primaire n'est pas captée par les enroulements du circuit secondaire. Des pertes supplémentaires peuvent en outre apparaître sur les enroulements. Dans le cas de convertisseurs de tension non résonnants, des surtensions peuvent par ailleurs survenir. La géométrie des bobinages d'un transformateur électrique, de même que le choix des matériaux magnétiques utilisés pour le noyau magnétique, ou encore la géométrie dudit noyau magnétique, notamment, sont configurés pour respecter des critères électriques et magnétiques. Un objectif du dimensionnement d'un transformateur électrique réside notamment dans la maîtrise de la valeur de l'inductance de fuite du transformateur électrique.

[0006] Il est également bien connu que, dans un transformateur électrique, au circuit primaire, une inductance de résonnance peut être connectée en série avec le bobinage primaire.

[0007] Quelles que soient les applications envisagées, l'inductance de résonnance est notamment dimensionnée comme un composant discret, qui fonctionne avec un transformateur électrique lui-même dimensionné comme un composant discret. Cependant, un tel transformateur électrique peut être configuré soit pour minimiser les fuites de flux magnétique, soit de telle sorte que l'inductance de résonance soit intégrée audit transformateur électrique en tant qu'inductance de fuite, de façon à supprimer un composant électronique de puissance discret et ainsi réduire le coût et l'encombrement du circuit correspondant.

[0008] Un problème technique découle ainsi du choix d'intégrer l'inductance de résonnance dans le transformateur électrique en exploitant son inductance de fuite ; cela suppose en effet de contrôler la répartition de la valeur de l'inductance de fuite du transformateur électrique entre le circuit primaire et le circuit secondaire.

[0009] A titre d'illustration, la figure 1 montre un schéma électrique équivalent d'un convertisseur résonnant LLC parfait, avec une tension d'entrée V_{SqFHA}, une tension de sortie V_{OutFHA} et une résistance de sortie R_{FHA}. La capacité de résonnance Cs et l'inductance de résonnance Ls sont en série et l'inductance magnétisante Lp est en parallèle de la sortie du convertisseur résonnant LLC. En général, dans un convertisseur résonnant LLC, il est souhaitable de placer l'inductance de résonnance Ls au circuit primaire.

[0010] Sur la figure 2, il est représenté un schéma électrique équivalent d'un convertisseur résonnant LLC2, selon un modèle de transformateur électrique non parfait, n étant le rapport de transformation du convertisseur résonnant LLC2, avec une inductance de fuite non négligeable au circuit secondaire.

[0011] L'inductance de résonnance est ici intégrée au convertisseur résonnant LLC2, au sens où il n'y a pas de composant électronique Ls discret. L'inductance de fuite du transformateur électrique assure la fonction d'inductance de résonnance et comprend une composante au circuit primaire L_{LK1} et une composante au circuit secondaire L_{LK2}.

[0012] De façon à faire coïncider le modèle non parfait du transformateur électrique au plus proche du circuit équivalent du circuit résonnant LLC parfait représenté sur la figure 1, il est essentiel que la valeur de l'inductance de fuite au circuit primaire L_{LK1} soit proche de la valeur de l'inductance de résonnance Ls, tout en minimisant la valeur de l'inductance de fuite au circuit secondaire L_{LK2}, de telle sorte que l'inductance de fuite au circuit secondaire L_{LK2} soit négligeable devant l'inductance de fuite au circuit primaire L_{LK1}. Autrement dit, on cherche à ce que la valeur de l'inductance de fuite au circuit secondaire L_{LK2} soit inférieure, voire négligeable devant la valeur de l'inductance de fuite au circuit primaire L_{LK1}.

[0013] Ainsi, notamment, le point de fonctionnement du convertisseur résonnant LLC2, comme de tout transformateur électrique, sa fréquence de découpage, et donc les pertes, sont liées à la répartition de la valeur de l'inductance de fuite entre le circuit primaire et le circuit secondaire. Une mauvaise répartition de l'inductance de fuite peut engendrer un déplacement important du point de fonctionnement du transformateur électrique par rapport à son point de fonctionne-

ment défini comme optimal, pouvant engendrer un risque de surchauffe, voire la casse de composants électroniques de puissance du transformateur électrique.

[0014] En particulier, dans certaines applications, la maîtrise de la répartition de l'inductance de fuite, entre le circuit primaire et le circuit secondaire d'un transformateur électrique, revêt une grande importance. Par exemple, tout type de convertisseur résonnant, y compris de topologie LC, LLC ou CLLC, requiert une inductance de fuite qui soit concentrée au circuit primaire. Cependant, pour certaines applications de convertisseur électrique réversible, comme les convertisseurs de type DAB (pour « dual-active bridge » en anglais), il est possible qu'une inductance de fuite non négligeable au circuit secondaire soit souhaitée.

[0015] Dans de nombreux cas d'utilisation, il est toutefois particulièrement avantageux que l'essentiel de la valeur de l'inductance de fuite se trouve au circuit primaire, de façon à assurer la fonction d'inductance de résonnance du transformateur électrique dans un circuit résonnant de type LC, LLC ou CLLC.

[0016] La présente invention permet notamment de déterminer la répartition de la valeur de l'inductance de fuite d'un transformateur électrique entre une inductance de fuite au circuit primaire et une inductance de fuite au circuit secondaire. L'invention permet aussi de déterminer la valeur de l'inductance magnétisante du transformateur électrique.

[0017] Dès lors, la présente invention permet en particulier de réaliser un transformateur électrique présentant une inductance de fuite souhaitée, notamment concentrée au circuit primaire.

PRESENTATION DE L'INVENTION

[0018] Plus précisément, l'invention vise un transformateur électrique comprenant un noyau magnétique et un bobinage primaire, formant un circuit primaire, et un bobinage secondaire, formant un circuit secondaire, transformateur électrique configuré de sorte que :

une première valeur L_{1so} d'inductance mesurée au circuit primaire avec le circuit secondaire ouvert,
une deuxième valeur L_{1ss} d'inductance mesurée au circuit primaire avec le circuit secondaire court-circuité, et
une troisième valeur L_{2po} d'inductance mesurée au circuit secondaire avec le circuit primaire ouvert,
sont telles que :

[Math. 1]

$$L_{2PO} - \frac{1}{n^2} L_M < A.(L_{1SO} - L_M)$$

avec

[Math. 2]

$$L_M = \sqrt{(L_{1SO} - L_{1SS}) \times L_{1SO}.N^2}$$

où A est un nombre réel supérieur à 10.

[0019] Selon un mode de réalisation, A est un nombre réel supérieur ou égal à 50.

[0020] Selon un mode de réalisation, A est un nombre réel inférieur ou égal à 100.

[0021] L'invention vise aussi un procédé de réalisation d'un transformateur, ledit transformateur électrique présentant un noyau magnétique, un circuit primaire et un circuit secondaire, ledit procédé comprenant les étapes suivantes :

la sélection d'une géométrie de noyau magnétique pour le transformateur électrique à réaliser ;
la détermination d'une épaisseur d'entrefer correspondant à une valeur souhaitée d'inductance magnétisante du transformateur électrique à réaliser ;
l'enroulement d'enroulements secondaires sur un noyau magnétique ayant la géométrie sélectionnée et l'épaisseur d'entrefer, de façon à recouvrir ledit entrefer ;
la détermination d'une valeur de reluctance de fuite du transformateur électrique en fonction du ratio entre une valeur souhaitée d'inductance de fuite au circuit primaire du transformateur électrique à réaliser, et la valeur souhaitée de l'inductance magnétisante du transformateur électrique à réaliser ;
la détermination d'une distance h entre des enroulements primaires, destinés à former le circuit primaire du transformateur électrique à réaliser et les enroulements secondaires, en fonction de ladite valeur de reluctance de fuite ;

l'enroulement des enroulements primaires sur le noyau magnétique du transformateur électrique à ladite distance h des enroulements secondaires.

[0022] Selon un mode de réalisation, le noyau magnétique est sélectionné de type E ou de type EI.

[0023] Selon un mode de réalisation, on met en œuvre l'équation

[Math. 3]
$$L_M = N_1{}^2 * \frac{\mu_0 S}{e}$$

où N1 est le nombre d'enroulements au circuit primaire, μ_0 est la perméabilité électromagnétique de l'air et S est la surface effective de section magnétique du transformateur électrique,
pour déterminer la valeur de l'épaisseur e de l'entrefer requise, correspondant à la valeur souhaitée de l'inductance magnétisante L_M.

[0024] Selon un mode de réalisation, on met en œuvre les équations

[Math. 4]
$$Rgap = \frac{1}{\mu_0} * \frac{e}{S}$$

où Rgap est la reluctance de l'entrefer du transformateur électrique, μ_0 est la perméabilité électromagnétique de l'air, e est l'épaisseur de l'entrefer du transformateur électrique et S est la surface effective de section magnétique du transformateur électrique
et

[Math. 5]
$$\frac{Rgap}{Rfuite} = \frac{Lf1}{L_M}$$

où Rfuite est la reluctance de fuite du transformateur électrique, Lf1 est l'inductance de fuite au circuit primaire du transformateur électrique et L_M est l'inductance magnétisante du transformateur électrique,
pour déterminer la valeur de la reluctance de fuite du transformateur électrique.

[0025] Selon un mode de réalisation, on met en œuvre l'équation :

[Math. 6]
$$Rfuite = \frac{1}{2\mu_0} * \frac{l}{h * m}$$

où Rfuite est la reluctance de fuite du transformateur électrique, μ_0 est la perméabilité électromagnétique de l'air, m est la profondeur de noyau magnétique du transformateur électrique et l est la largeur d'une zone de fuite électromagnétique entre les enroulements primaires et les enroulements secondaires, correspondant à la distance séparant une jambe extérieure et une jambe centrale du noyau magnétique de type E ou de type EI,
pour déterminer la valeur de la distance h entre les enroulements primaires et les enroulements secondaires.

PRESENTATION DES FIGURES

[0026] L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple, et se référant aux dessins annexés donnés à titre d'exemples non limitatifs, dans lesquels des références identiques sont données à des objets semblables et sur lesquels :

Fig. 1 : la figure 1 (déjà commentée) représente le circuit électrique équivalent d'un convertisseur résonnant parfait ;
Fig. 2 : la figure 2 (déjà commentée) représente le circuit électrique équivalent d'un convertisseur résonnant non

parfait ;
Fig. 3 : la figure 3 représente le circuit magnétique équivalent d'un transformateur électrique présentant une géométrie donnée ;
Fig. 4 : la figure 4 montre le schéma d'un transformateur électrique selon un exemple de réalisation de l'invention ;
Fig. 5 : la figure 5 représente un schéma-bloc montrant les étapes de mise en œuvre du procédé de réalisation d'un transformateur électrique selon un exemple de l'invention.

[0027] Il faut noter que les figures exposent l'invention de manière détaillée pour mettre en œuvre l'invention, lesdites figures pouvant bien entendu servir à mieux définir l'invention le cas échéant.

DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

[0028] La présente invention permet de déterminer la valeur des inductances de fuite, respectivement au circuit primaire et au circuit secondaire, dans un transformateur électrique.

[0029] Un objectif induit réside dans l'adaptation de la géométrie d'un transformateur électrique pour que lesdites inductances de fuite au circuit primaire et au circuit secondaire soient conformes à des valeurs d'inductance souhaitées, respectivement au circuit primaire et au circuit secondaire. En particulier, lorsque le transformateur électrique est alimenté au circuit primaire uniquement, les flux magnétiques, non câblés au circuit secondaire, fuitent au circuit primaire. Ce cas de figure correspond au circuit magnétique équivalent représenté, comme exemple, sur la figure 3.

[0030] Notamment, comme indiqué précédemment, il peut être souhaité que l'essentiel de la valeur de l'inductance de fuite d'un transformateur électrique se trouve au circuit primaire. Autrement dit, dans ce cas, on cherche à minimiser la valeur de l'inductance de fuite au circuit secondaire. On souhaite alors que la valeur de l'inductance de fuite au circuit secondaire soit petite devant la valeur de l'inductance au circuit primaire, par exemple au moins dix fois plus petite, de préférence 50 à 100 fois plus petite.

[0031] Pour un transformateur électrique considéré, présentant notamment une géométrie propre, l'invention permet de déterminer l'inductance de fuite au circuit primaire, la valeur de l'inductance de fuite au circuit secondaire et la valeur de l'inductance magnétisante.

[0032] A cette fin, on réalise trois mesures d'inductance sur ledit transformateur électrique.

[0033] On réalise une première mesure d'inductance au circuit primaire L_{1so}, avec le circuit secondaire ouvert.

[0034] On réalise une deuxième mesure d'inductance au circuit primaire L_{1ss}, avec le circuit secondaire court-circuité,

[0035] On réalise une troisième mesure d'inductance au circuit secondaire L_{2po}, avec le circuit primaire ouvert.

[0036] Ensuite, on résout le système d'équations suivants :

[Math. 7]

$$L_{1SO} = L_{Lk1} + L_M$$

[Math. 8]

$$L_{1SS} = L_{Lk1} + \frac{L_M . n^2 . L_{Lk2}}{L_M + n^2 . L_{Lk2}}$$

[Math. 9]

$$L_{2PO} = L_{Lk2} + \frac{1}{n^2} . L_M$$

[0037] On détermine ainsi la valeur de l'inductance de fuite au primaire L_{Lk1}, la valeur de l'inductance de fuite au secondaire L_{Lk2} et la valeur de l'inductance magnétisante L_M du transformateur électrique.

[0038] Grâce à la connaissance des valeurs de l'inductance de fuite au circuit primaire L_{Lk1}, de l'inductance de fuite au circuit secondaire L_{Lk2} et de l'inductance magnétisante L_M, et compte tenu de valeurs souhaitées de l'inductance de fuite au circuit primaire et de l'inductance de fuite au circuit secondaire, on adapte la géométrie du transformateur électrique de façon à tendre vers lesdites valeurs souhaitées.

[0039] En particulier, pour concentrer la valeur de l'inductance de fuite du transformateur électrique on circuit primaire, on s'assure que le ratio entre l'inductance de fuite au circuit primaire et l'inductance de fuite au circuit secondaire soit

supérieur à 10, notamment compris entre 10 et 100, en particulier compris entre 50 et 100.

[0040] Autrement dit, selon l'invention, on configure de préférence le transformateur électrique de telle sorte que la première mesure d'inductance au circuit primaire L_{1so}, la deuxième mesure d'inductance au circuit primaire L_{1ss}, et troisième mesure d'inductance au circuit secondaire L_{2po} d'inductance mesurée au circuit secondaire avec le circuit primaire ouvert, soient telles que :

[Math. 10]

$$L_{2PO} - \frac{1}{n^2} L_M < A.(L_{1SO} - L_M)$$

avec

[Math. 11]

$$L_M = \sqrt{(L_{1SO} - L_{1SS}) \times L_{1SO}.N^2}$$

où A est un nombre réel supérieur à 10, notamment supérieur à 50, notamment inférieur ou égal à 100, et N est le rapport de transformation du transformateur électrique.

[0041] Un objectif de l'invention est ainsi de réaliser un transformateur électrique, en configurant comme souhaité la répartition de l'inductance de fuite dudit transformateur électrique, notamment en concentrant ladite inductance de fuite au circuit primaire. A cette fin, on réalise un circuit magnétique équivalent du transformateur électrique, en fonction de sa géométrie, comme représenté sur la figure 3. Le circuit magnétique équivalent représenté sur la figure 3 correspond ainsi à une géométrie donnée d'un transformateur électrique alimenté par une tension V1, ledit transformateur électrique étant considéré, en termes de positionnement des bobinages primaire et secondaire, de rapport de transformation, du nombre et des dimensions des jambes du noyau magnétique, de la position de l'entrefer, etc., avec des valeurs pour des composants électriques équivalents, en particulier pour les reluctances équivalentes R1, R2, R3, R4. Ces valeurs ne sont pas aisément mesurables mais on peut influencer leur répartition en modifiant la géométrie du transformateur électrique.

[0042] En référence à la figure 3, il est ainsi représenté un flux magnétique total flux_total dont une portion flux_sec est transférée au circuit secondaire tandis que deux autres portions flux_leak1, flux_leak2 correspondent aux flux magnétiques fuitant au circuit primaire.

[0043] Partant du schéma magnétique équivalent de la figure 3, il est possible, grâce à la connaissance de valeurs souhaitées de l'inductance magnétisante et des inductances de fuite au circuit primaire L_{LK1} et au circuit secondaire L_{LK2}, notamment déterminées conformément à l'invention et correspondant au transformateur électrique considéré ou à réaliser, du fait de son type de géométrie, de déterminer des critères géométriques du transformateur électrique, dont en particulier l'épaisseur de l'entrefer et le positionnement relatif des bobinages primaire et secondaire.

[0044] D'autres critères géométriques peuvent être pris en compte dans le cadre de la mise en œuvre du procédé de réalisation d'un transformateur électrique selon un exemple de l'invention, dont la position de l'entrefer, le nombre et les dimensions des jambes du noyau magnétique, par exemple, pour influer sur la répartition des reluctances équivalentes R1, R2, R3, de façon à obtenir une répartition souhaitée de la valeur des inductances de fuite dans le transformateur électrique. Par exemple, on peut analyser le circuit magnétique équivalent de la figure 3 en correspondance avec le schéma de transformateur électrique de la figure 4. Dès lors, sur le circuit magnétique équivalent de la figure 3, les reluctances R1 et R3 représentent les reluctances de fuite correspondant aux zones de fuite S1, S2 sur la figure 4. La reluctance R2 représente la reluctance de l'entrefer G, recouvert par l'enroulement secondaire 2 sur la figure 4. Ainsi, en réduisant la valeur des reluctances de fuite R1 et R3, par rapport à la reluctance R2, on augmente le flux magnétique qui traverse la zone de séparation des enroulements primaires et secondaires et, ainsi, on augmente la valeur de l'inductance de fuite au circuit primaire. Cette réduction de valeur des reluctances de fuite R1, R2 peut notamment être réalisée par un éloignement des enroulements primaires et secondaires.

[0045] Il faut choisir une géométrie de noyau magnétique telle que l'entrefer soit encadré, de part et d'autre, par un enroulement appartenant au bobinage secondaire, en vue de minimiser l'inductance de fuite au circuit secondaire L_{LK2}. En analysant le circuit magnétique équivalent de la figure 3, dans le sens « inverse » et en déplaçant la source de tension V1 du côté du flux secondaire flux sec, les réluctances R1 et R3, 100 fois supérieures par rapport à la reluctance R4 du circuit magnétique, bloquent la traversée de tout flux magnétique de fuite. Par conséquent, tout le flux magnétique passera par le flux primaire flux_pri avec un flux de fuite minimisé.

[0046] En référence aux figures 4 et 5, il va maintenant être détaillé un procédé de réalisation d'un transformateur

électrique fondé sur l'exploitation des équations et principes proposés précédemment, relatifs à la répartition de l'inductance de fuite d'un transformateur électrique entre le circuit primaire et le circuit secondaire.

[0047] L'exemple détaillé ci-après concerne plus particulièrement la réalisation d'un transformateur électrique à inductance de fuite intégrée concentrée au circuit primaire, ayant un noyau magnétique F de type E ou de type EI.

[0048] Pour réaliser un transformateur électrique avec une valeur d'inductance magnétisante L_M souhaitée et la valeur de l'inductance de fuite souhaitée et concentrée au circuit primaire, on met en oeuvre les équations développées ci-après.

[Math. 12]

$$L_M = {N_1}^2 * \frac{\mu_0 S}{e}$$

avec :

N1 est le nombre d'enroulements primaires ;
μ_0 est la perméabilité de l'air ;
S est la surface effective de section magnétique du transformateur électrique ;
e est l'épaisseur de l'entrefer G du transformateur électrique.

[Math. 13]

$$Rgap = \frac{1}{\mu_0} * \frac{e}{S}$$

avec R_{gap} est la reluctance de l'entrefer G.

[Math. 14]

$$\frac{Rgap}{Rfuite} = \frac{Lf1}{L_M}$$

avec :

Rfuite est la reluctance de fuite du transformateur électrique ;
Lf1 est la valeur souhaitée de l'inductance de fuite du transformateur électrique au circuit primaire ;
L_M est la valeur souhaitée de l'inductance magnétisante du transformateur électrique.

[0049] La réluctance de fuite Rfuite entre les enroulements primaire 1 et secondaire 2 prend en compte les zones S1, S2 entre les enroulements primaires 1 et les enroulements secondaires 2.

[0050] Dès lors, pour un transformateur électrique ayant un noyau magnétique F de type E ou de type EI, avec une profondeur de noyau magnétique notée m, la réluctance de fuite Rfuite peut être estimée au moyen de l'équation suivante :

[Math. 15]

$$Rfuite = \frac{1}{2\mu_0} * \frac{l}{h * m}$$

où h est la distance séparant les enroulements primaire 1 et secondaire 2 et l la largeur des zones S1, S2, comme indiqué sur la figure 4. La largeur l correspond ainsi à la largeur d'une zone de fuite électromagnétique entre les enroulements primaires 1 et les enroulement secondaires 2, correspondant à la distance séparant une jambe extérieure

et une jambe centrale du noyau magnétique F de type E ou de type EI

[0051] Certains transformateurs électriques, notamment ayant un noyau magnétique de type PQ, ont une profondeur de noyau magnétique ayant une valeur non constante. Dans ce cas, une valeur efficace estimée de la profondeur de noyau magnétique peut être utilisée pour mettre en œuvre le procédé de réalisation d'un transformateur électrique selon un exemple de l'invention.

[0052] Pour une autre géométrie de transformateur électrique selon laquelle les enroulements du circuit primaire sont répartis sur deux portions haute et basse, de part et d'autre des enroulements secondaires, la distance calculée h peut être calculée comme correspondant à la somme des deux distances respectives entre chaque portion d'enroulements du circuit primaire et les enroulements du circuit secondaire, repartie de façon symétrique.

[0053] Des outils de simulation connus peuvent par ailleurs être mis en œuvre pour analyser la valeur de la réluctance de fuite Rfuite du transformateur électrique à réaliser.

[0054] Pour concevoir et réaliser un transformateur électrique, conformément à l'invention, notamment un transformateur électrique dans lequel la valeur de l'inductance de fuite est concentrée au circuit primaire, il convient par conséquent de mettre en œuvre les étapes ci-dessous, en référence à la figure 5.

[0055] D'abord, on définit (étape E1) la valeur souhaitée de l'inductance de fuite Lf1 et celle de l'inductance magnétisante L_M du transformateur électrique à réaliser. Ensuite, il convient de choisir (étape E2) une géométrie de noyau magnétique, par exemple, selon l'exemple de la figure 4, un noyau magnétique de type E, pour le transformateur électrique à réaliser. Dès lors, on applique l'équation [Math. 12] (étape E3) ci-dessus pour calculer l'épaisseur e de l'entrefer G requise, correspondant à la valeur souhaitée de l'inductance magnétisante L_M. On enroule (étape E4) alors les enroulements secondaires 2 sur le noyau magnétique F correspondant à la géométrie choisie et à l'épaisseur entrefer G calculée, de façon à recouvrir ledit entrefer G entièrement par les enroulements secondaires 2. Grâce aux équations [Math. 13] et [Math. 14], on calcule (étape E5) la valeur de la reluctance de fuite Rfuite en fonction du ratio entre la valeur souhaitée de l'inductance de fuite Lf1 au circuit primaire, qui, de préférence, concentre l'inductance de fuite du transformateur électrique, et la valeur souhaitée de l'inductance magnétisante L_M du transformateur électrique. Grâce à l'équation [Math. 15], on calcule (étape E6) la valeur de la distance h entre les enroulements primaires 1 et les enroulements secondaires 2. On enroule (étape E7) alors les enroulements primaires 1 sur le noyau magnétique du transformateur électrique afin de respecter ladite distance h.

[0056] Le cas échéant, des ajustements de la disposition des enroulements primaires 1 et/ou secondaires 2 peuvent être réalisés en fonction de mesures effectives des inductances de fuite et de l'inductance magnétisante sur le transformateur électrique ainsi réalisé. Ces mesures complémentaires permettent d'ajuster finement la distance h pour atteindre la valeur souhaitée d'inductance de fuite au primaire de façon encore plus précise.

Revendications

1. Transformateur électrique comprenant un noyau magnétique et un bobinage primaire, formant un circuit primaire, et un bobinage secondaire, formant un circuit secondaire, transformateur électrique configuré de sorte que :

   une première valeur L_{1so} d'inductance mesurée au circuit primaire avec le circuit secondaire ouvert,
   une deuxième valeur L_{1ss} d'inductance mesurée au circuit primaire avec le circuit secondaire court-circuité, et
   une troisième valeur L_{2po} d'inductance mesurée au circuit secondaire avec le circuit primaire ouvert,
   sont telles que :

$$L_{2PO} - \frac{1}{n^2} L_M < A.(L_{1SO} - L_M)$$

   avec

$$L_M = \sqrt{(L_{1SO} - L_{1SS}) \times L_{1SO}.N^2}$$

   où A est un nombre réel supérieur à 10.

2. Transformateur électrique selon la revendication 1, dans lequel A est un nombre réel supérieur ou égal à 50.

3. Transformateur électrique selon la revendication 1 ou 2, dans lequel A est un nombre réel inférieur ou égal à 100.

4. Procédé de réalisation d'un transformateur, ledit transformateur électrique présentant un noyau magnétique (F), un circuit primaire et un circuit secondaire, ledit procédé comprenant les étapes suivantes :

la sélection (E2) d'une géométrie de noyau magnétique (F) pour le transformateur électrique à réaliser ;
la détermination (E3) d'une épaisseur d'entrefer (G) correspondant à une valeur souhaitée d'inductance magnétisante (L_M) du transformateur électrique à réaliser ;
l'enroulement (E4) d'enroulements secondaires (2) sur un noyau magnétique (F) ayant la géométrie sélectionnée et l'épaisseur d'entrefer (G), de façon à recouvrir ledit entrefer (G) ;
la détermination (E5) d'une valeur de reluctance de fuite (Rfuite) du transformateur électrique en fonction du ratio entre une valeur souhaitée d'inductance de fuite (Lf1) au circuit primaire du transformateur électrique à réaliser, et la valeur souhaitée de l'inductance magnétisante (L_M) du transformateur électrique à réaliser ;
la détermination (E6) d'une distance h entre des enroulements primaires (1), destinés à former le circuit primaire du transformateur électrique à réaliser et les enroulements secondaires (2), en fonction de ladite valeur de reluctance de fuite (Rfuite) ;
l'enroulement (E7) des enroulements primaires (1) sur le noyau magnétique (F) du transformateur électrique à ladite distance h des enroulements secondaires (2).

5. Procédé selon la revendication 4, dans lequel le noyau magnétique est sélectionné de type E ou de type EI.

6. Procédé selon la revendication 5, dans lequel on met en œuvre l'équation :

$$L_M = N_1{}^2 * \frac{\mu_0 S}{e}$$

où N_1 est le nombre d'enroulements au circuit primaire, μ_0 est la perméabilité électromagnétique de l'air et S est la surface effective de section magnétique du transformateur électrique,
pour déterminer la valeur de l'épaisseur e de l'entrefer (G) requise, correspondant à la valeur souhaitée de l'inductance magnétisante L_M.

7. Procédé selon la revendication 5 ou 6, dans lequel on met en œuvre les équations :

$$Rgap = \frac{1}{\mu_0} * \frac{e}{S}$$

où R_{gap} est la reluctance de l'entrefer (G) du transformateur électrique, μ_0 est la perméabilité électromagnétique de l'air, e est l'épaisseur de l'entrefer (G) du transformateur électrique et S est la surface effective de section magnétique du transformateur électrique
et

$$\frac{Rgap}{Rfuite} = \frac{Lf1}{L_M}$$

où Rfuite est la reluctance de fuite du transformateur électrique, Lf1 est l'inductance de fuite au circuit primaire du transformateur électrique et L_M est l'inductance magnétisante du transformateur électrique,
pour déterminer (E5) la valeur de la reluctance de fuite (Rfuite) du transformateur électrique.

8. Procédé selon l'une des revendications 5 à 7, dans lequel on met en œuvre l'équation :

$$Rfuite = \frac{1}{2\mu_0} * \frac{l}{h * m}$$

où Rfuite est la reluctance de fuite du transformateur électrique, μ_0 est la perméabilité électromagnétique de l'air, m est la profondeur de noyau magnétique du transformateur électrique et I est la largeur d'une zone de fuite électromagnétique (S1) entre les enroulements primaires (1) et les enroulement secondaires (2), correspondant à

la distance séparant une jambe extérieure et une jambe centrale du noyau magnétique (F) de type E ou de type EI, pour déterminer (E6) la valeur de la distance h entre les enroulements primaires (1) et les enroulements secondaires (2).

Fig. 1

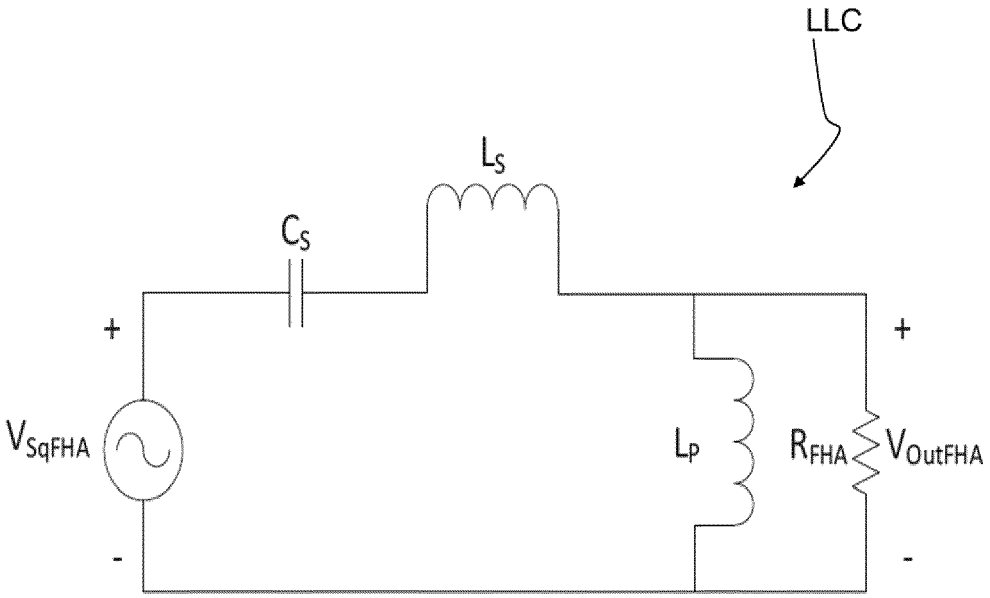

LLC
L_S
C_S
+
V_{SqFHA}
-
L_P
+
R_{FHA}
V_{OutFHA}
-

Fig. 2

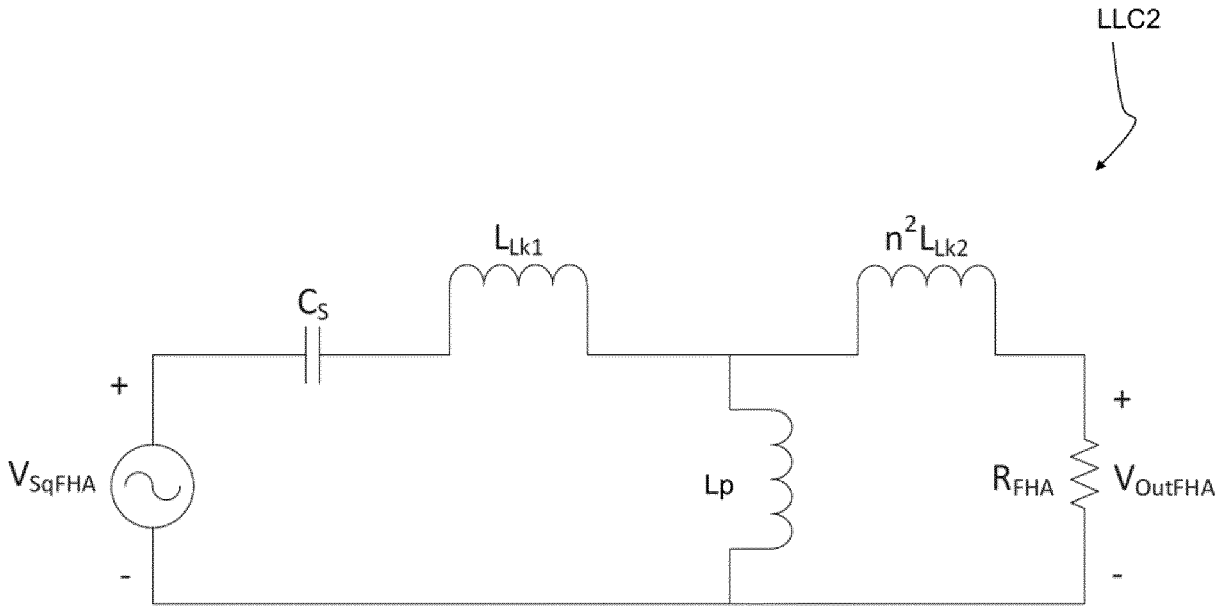

LLC2
L_{Lk1}
n^2L_{Lk2}
C_S
+
V_{SqFHA}
-
Lp
+
R_{FHA}
V_{OutFHA}
-

Fig. 3

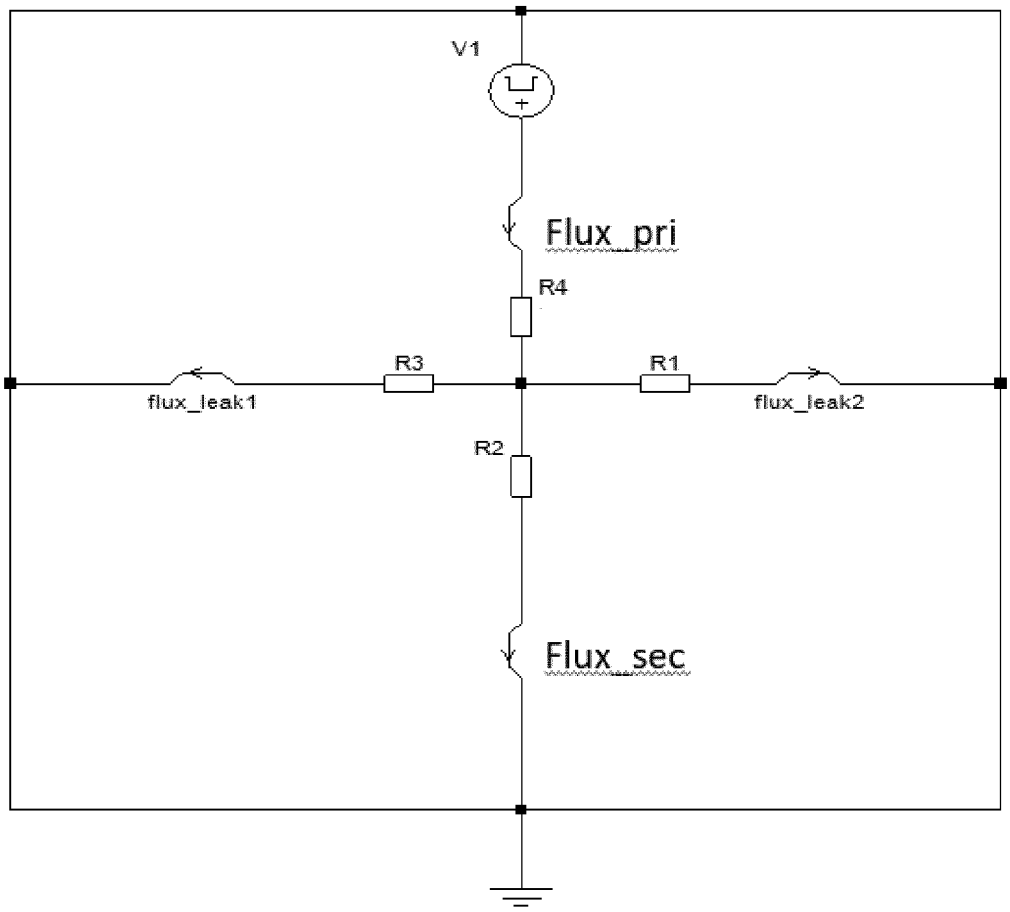

V1
Flux_pri
R4
R3
R1
flux_leak1
flux_leak2
R2
Flux_sec

Fig. 4

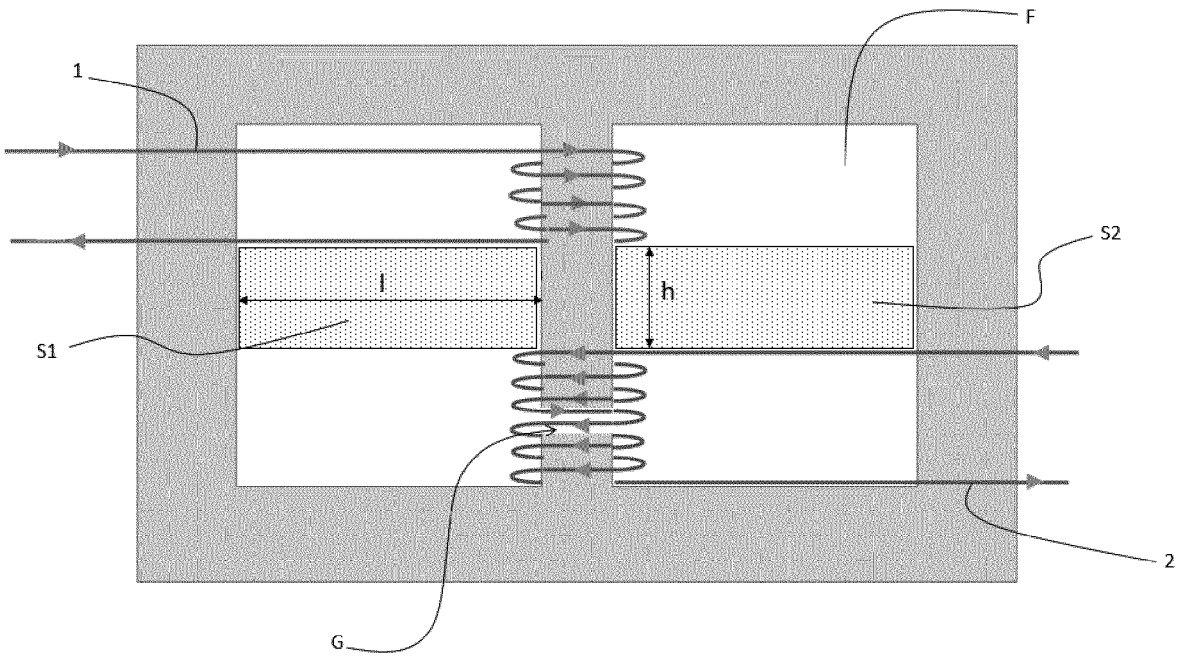
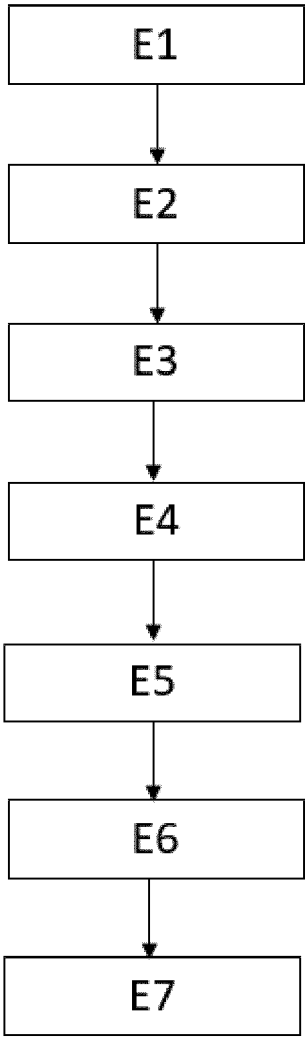

F
1
S2
l
h
S1
2
G

Fig. 5



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numéro de la demande
EP 20 17 6687

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (IPC)
X Y	GB 2 489 532 A (REDISEM LTD [CN]) 3 octobre 2012 (2012-10-03) * figures 3a,4 * * page 6, ligne 30 - page 7, ligne 6 * -----	1-3 4-8	INV. H01F27/34
Y	JP H05 67536 A (YOKOGAWA ELECTRIC CORP) 19 mars 1993 (1993-03-19) * figures 1-4 * * alinéa [0015] - alinéa [0029] * -----	4-8	

DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (IPC)

H01F

Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications

Lieu de la recherche	Date d'achèvement de la recherche	Examinateur
Munich	10 novembre 2020	Tano, Valeria

CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES

X : particulièrement pertinent à lui seul
Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie
A : arrière-plan technologique
O : divulgation non-écrite
P : document intercalaire

T : théorie ou principe à la base de l'invention
E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date
D : cité dans la demande
L : cité pour d'autres raisons

& : membre de la même famille, document correspondant

EPO FORM 1503 03.82 (P04C02)

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET EUROPEEN NO. EP 20 17 6687

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche européenne visé ci-dessus.
Lesdits members sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

10-11-2020

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
GB 2489532 A	03-10-2012	GB 2489532 A	03-10-2012
		WO 2012131350 A2	04-10-2012
JP H0567536 A	19-03-1993	AUCUN	

EPO FORM P0460

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82