

(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
COURBEVOIE

(11) Nº de publication : **3 083 365**  
(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)  
(21) Nº d'enregistrement national : **18 55758**  
(51) Int Cl<sup>8</sup> : **H 01 F 27/40 (2018.01), H 05 K 1/16**

(12)

## BREVET D'INVENTION

**B1**

(54) TRANSFORMATEUR COMPORTANT UN CIRCUIT IMPRIME.

(22) Date de dépôt : 27.06.18.

(30) Priorité :

(43) Date de mise à la disposition du public de la demande : 03.01.20 Bulletin 20/01.

(45) Date de la mise à disposition du public du brevet d'invention : 17.07.20 Bulletin 20/29.

(56) Liste des documents cités dans le rapport de recherche :

*Se reporter à la fin du présent fascicule*

(60) Références à d'autres documents nationaux apparentés :

Demande(s) d'extension :

(71) Demandeur(s) : SAFRAN ELECTRONICS & DEFENSE Société par actions simplifiée — FR.

(72) Inventeur(s) : CHETANNEAU PATRICE et GUILLOT FRANCOIS.

(73) Titulaire(s) : SAFRAN ELECTRONICS & DEFENSE Société par actions simplifiée.

(74) Mandataire(s) : CABINET BOETTCHER.

FR 3 083 365 - B1



L'invention concerne le domaine des transformateurs comportant un circuit imprimé.

#### ARRIERE PLAN DE L'INVENTION

Un capteur de courant à vanne de flux utilise la propriété d'un matériau magnétique formant un noyau magnétique de se saturer à partir d'un certain niveau d'excitation magnétique. En référence à la figure 1, pour un champ magnétique  $H$  croissant, la pente de la fonction de transfert entre le champ magnétique  $H$  et l'induction magnétique  $B$  diminue grandement à partir d'une valeur dite de saturation du noyau magnétique. La valeur de saturation, sur la figure 1, correspond aux intervalles  $\Delta H$  et  $\Delta B$ .

En référence aux figures 2 et 3, dans un capteur de courant à vanne de flux classique 1 destiné à mesurer un courant  $I_m$  circulant sur un conducteur, un générateur de signaux rectangulaires 2 applique une tension d'excitation rectangulaire  $V_{ex}$  aux bornes d'un enroulement d'excitation 3 enroulé autour d'un noyau magnétique 4. Le courant d'excitation  $I_{ex}$  circulant dans l'enroulement d'excitation 3 est mesuré par un module de mesure 5. Un détecteur de crêtes 6, relié au module de mesure 5, fournit deux informations : le niveau de saturation et la différence des courants de crête du courant d'excitation  $I_{ex}$ . Le niveau de saturation permet d'asservir l'amplitude de la tension d'excitation  $V_{ex}$ . La différence des courants de crête du courant d'excitation  $I_{ex}$  permet d'estimer le courant à mesurer  $I_m$  et d'asservir, via un convertisseur de tension en courant 7, l'amplitude d'un courant de démagnétisation qui circule dans un enroulement de démagnétisation 8 et qui permet de compenser le flux magnétique produit dans le noyau magnétique 4 par le courant à mesurer  $I_m$ .

Les capteurs de courant à vanne de flux sont privilégiés dans un certain nombre d'applications. C'est no-

tamment le cas pour la mesure d'un courant circulant dans un organe de coupure de type SSPC (pour « Solid State Power Controller ») à destination d'un équipement utilisateur, ou bien pour la mesure d'un courant circulant dans 5 un organe de conversion d'énergie de type PEM (pour « Power Electronic Module ») relié à une phase d'un moteur.

#### OBJET DE L'INVENTION

L'invention a pour objet d'améliorer la reproductibilité industrielle et de réduire le coût d'un capteur de 10 courant à vanne de flux.

#### RESUME DE L'INVENTION

En vue de la réalisation de ce but, on propose un transformateur comportant un circuit imprimé et un noyau magnétique, le circuit imprimé comprenant une couche isolante, un ensemble traversant primaire d'au moins un trou métallisé primaire s'étendant au travers de la couche isolante, l'ensemble traversant primaire formant une portion d'un enroulement primaire du transformateur, un ensemble traversant secondaire d'au moins un trou métallisé secondaire s'étendant au travers de la couche isolante, l'ensemble traversant secondaire formant une portion d'un enroulement secondaire du transformateur, le noyau magnétique s'étendant dans une épaisseur du circuit imprimé. 15 20

Les caractéristiques électriques du trou métallisé primaire et du trou métallisé secondaire du circuit imprimé sont parfaitement reproductibles. Par ailleurs, en intégrant le noyau magnétique du transformateur selon l'invention dans une épaisseur du circuit imprimé, on maîtrise parfaitement le matériau utilisé pour sa fabrication, sa structure et donc ses caractéristiques. 25 30

De plus, le transformateur selon l'invention est peu coûteux, puisqu'il est formé d'un circuit imprimé, de trous métallisés et d'un noyau magnétique directement intégré au circuit imprimé.

Ainsi, en intégrant le transformateur selon l'invention dans un capteur de courant à vanne de flux, on améliore la reproductibilité industrielle et on réduit le coût dudit capteur de courant à vanne de flux.

5 L'invention sera mieux comprise à la lumière de la description qui suit d'un mode de mise en œuvre particulier non limitatif de l'invention.

#### BREVE DESCRIPTION DES DESSINS

Il sera fait référence aux dessins annexés, parmi  
10 lesquels :

- la figure 1 représente la courbe d'une fonction de transfert entre un champ magnétique et une induction magnétique ;

15 - la figure 2 représente un capteur de courant à vanne de flux existant ;

- la figure 3 représente la courbe d'une tension d'excitation et la courbe d'un courant d'excitation qui excitent un noyau magnétique du capteur de courant à vanne de flux existant ;

20 - la figure 4 représente un nouveau capteur de courant à vanne de flux comprenant un transformateur selon l'invention ;

- la figure 5 représente un pont diviseur de courant intégré dans un circuit imprimé et utilisé pour mesurer un courant à mesurer ;

25 - la figure 6 est une vue en coupe du transformateur selon l'invention utilisé dans le nouveau capteur de courant à vanne de flux ;

- la figure 7 est une vue analogue à celle de la  
30 figure 6, mais de dessus.

#### DESCRIPTION DETAILLEE DE L'INVENTION

En référence à la figure 4, un capteur de courant à vanne de flux 10 est ici utilisé pour mesurer un courant à mesurer  $I_m$  qui circule sur un conducteur 11.

35 Le capteur de courant à vanne de flux 10 comporte un

transformateur selon l'invention 12 comprenant un noyau magnétique 13, un enroulement primaire et un enroulement secondaire. L'enroulement primaire est le conducteur 11. Le noyau magnétique 13 s'étend autour du conducteur 11.  
5 L'enroulement secondaire est un enroulement de mesure 14 enroulé autour du noyau magnétique 13.

Le capteur de courant à vanne de flux 10 comporte une pluralité de composants électroniques formant une partie numérique 15 et une partie analogique 16.

10 La partie numérique 15 comporte un composant de traitement numérique qui est en l'occurrence un FPGA mais qui pourrait être un composant différent : microcontrôleur, processeur, ASIC, etc.

Le capteur de courant à vanne de flux 10 comprend de plus un circuit d'acquisition 17. Le circuit d'acquisition 17 appartient à la partie analogique 16.

Le circuit d'acquisition 17 est relié à l'enroulement de mesure 14.

20 Le circuit d'acquisition 17 comprend un filtre passe-haut 19 et un convertisseur analogique numérique 20 connecté à une sortie du filtre passe-haut 19.

25 Le convertisseur analogique numérique 20 est ici un convertisseur 12 bits dont le fonctionnement est cadencé à une fréquence Fech. Ici Fech = 100MHz. Le convertisseur analogique numérique 20 pourrait bien sûr présenter des caractéristiques différentes.

Le circuit d'acquisition 17 acquiert une tension de mesure analogique  $V_e$  aux bornes de l'enroulement de mesure 14. La tension de mesure  $V_e$  est appliquée en entrée du filtre passe-haut 19.  
30

La tension résultante est appliquée en entrée du convertisseur analogique numérique 20 qui produit un signal de mesure numérique  $S_m$ .

Le capteur de courant à vanne de flux 10 comprend un générateur haute fréquence 22. Le générateur haute

fréquence 22 est intégré dans le FPGA (on pourrait remplacer le terme « intégré » par l'un des termes suivants : programmé, implémenté, mis en œuvre, etc.)

Le générateur haute fréquence 22 produit un signal de référence numérique de fréquence  $f_0$ , un signal de référence numérique de fréquence  $2.f_0$  et un signal de référence numérique de fréquence  $3.f_0$ .

Le signal de référence numérique de fréquence  $f_0$  est ici de la forme :

$$S1r = \sin(\omega_0 t).$$

Le signal de référence numérique de fréquence  $2.f_0$  est ici de la forme :

$$S2r = \cos(2.\omega_0 t).$$

Le signal de référence numérique de fréquence  $3.f_0$  est ici de la forme :

$$S3r = \sin(3.\omega_0 t).$$

Le capteur de courant à vanne de flux 10 comprend de plus un circuit d'excitation 23. Le circuit d'excitation 23 est implanté dans le FPGA.

Le circuit d'excitation 23 est relié au générateur haute fréquence 22.

Le circuit d'excitation 23 comporte un circuit d'excitation brute 24 et un circuit d'asservissement d'excitation 25.

Le circuit d'excitation brute 24 reçoit le signal de référence numérique de fréquence  $f_0$  et le signal de référence numérique de fréquence  $3.f_0$  et produit à partir de ces signaux un signal d'excitation partiel numérique de fréquence  $f_0$  et un signal d'excitation partiel numérique de fréquence  $3.f_0$ .

Le signal d'excitation partiel numérique de fréquence  $f_0$  est ici de la forme :

$$S1p = k1 \cdot \sin(\omega_0 t).$$

Le signal d'excitation partiel numérique de fréquence  $3.f_0$  est ici de la forme :

$$S3p = k2 \cdot \sin(3 \cdot \omega_0 t).$$

Le circuit d'excitation brute 24 additionne le signal d'excitation partiel numérique de fréquence  $f_0$  et le signal d'excitation partiel numérique de fréquence 5  $3.f_0$  pour générer un signal d'excitation numérique brut. Le signal d'excitation numérique brut est de la forme :  
 $Seb = S1p + S3p = k1 \cdot \sin(\omega_0 t) + k2 \cdot \sin(3\omega_0 t).$

Le circuit d'asservissement d'excitation 25 est relié au générateur haute fréquence 22.

Le circuit d'asservissement d'excitation 25 reçoit 10 le signal de référence numérique de fréquence  $3.f_0$  et produit à partir du signal de référence numérique de fréquence  $3.f_0$  un signal de démodulation numérique de fréquence  $3.f_0$ .

15 Le signal de démodulation numérique de fréquence  $3.f_0$  est ici de la forme :

$$S3d = k3 \cdot \sin(3 \cdot \omega_0 t).$$

Le circuit d'asservissement d'excitation 25 comporte 20 un premier multiplicateur 27, un deuxième multiplicateur 28, un intégrateur 29 et un premier amplificateur 30. Le premier amplificateur 30 est connecté à une sortie de l'intégrateur 29.

25 Le premier multiplicateur 27 multiplie le signal de mesure numérique  $S_m$  par le signal de démodulation numérique de fréquence  $3.f_0$ . Le signal résultant est appliqué en entrée de l'intégrateur 29.

On note que le premier multiplicateur 27 et l'intégrateur 29 jouent le rôle d'un premier démodulateur synchrone.

30 Le premier amplificateur 30 produit alors un signal d'erreur numérique. Le deuxième multiplicateur 28 multiplie le signal d'excitation numérique brut  $Seb$  par le signal d'erreur numérique pour obtenir un signal d'excitation numérique. Le signal d'excitation numérique est de la 35 forme :

$$Se = k0 \cdot (k1 \cdot \sin(\omega_0 t) + k2 \cdot \sin(3\omega_0 t)).$$

Le capteur de courant à vanne de flux 10 comprend de plus un circuit d'asservissement de démagnétisation 32. Le circuit d'asservissement de démagnétisation 32 est 5 intégré dans le FPGA.

Le circuit d'asservissement de démagnétisation 32 est relié au générateur haute fréquence 22.

Le circuit d'asservissement de démagnétisation 32 reçoit le signal de référence numérique de fréquence 2.f0 10 et produit à partir du signal de référence numérique de fréquence 2.f0 un signal de démodulation numérique de fréquence 2.f0.

Le signal de démodulation numérique de fréquence 2.f0 est ici de la forme :

$$15 \quad S_{2d} = k4 \cdot \cos(2 \cdot \omega_0 t).$$

Le circuit d'asservissement de démagnétisation 32 comporte un troisième multiplicateur 33, un filtre passe-bas 34 et un deuxième amplificateur 35. Le deuxième amplificateur 35 est connecté à une sortie du filtre passe-bas 20 34.

Le troisième multiplicateur 33 multiplie le signal de mesure numérique  $S_m$  par le signal de démodulation numérique de fréquence 2.f0. Le signal résultant est appliqué en entrée du filtre passe-bas 34. Le deuxième amplificateur 35 produit alors un signal image numérique du courant à mesurer  $I_m$ , qui est aussi un signal de démagnétisation numérique  $S_{dm}$ . Le signal image numérique, ou signal de démagnétisation numérique  $S_{dm}$ , est de la forme 25

$$S_{dm} = k \cdot I_m.$$

On note que le troisième multiplicateur 33 et le filtre passe-bas 34 jouent le rôle d'un deuxième démodulateur synchrone.

Le capteur de courant à vanne de flux 10 comprend de plus un sommateur 36. Le sommateur 36 est implémenté dans 35 le FPGA.

Le sommateur 36 somme le signal d'excitation numérique  $S_e$  et le signal de démagnétisation numérique  $S_{dm}$  pour obtenir un signal d'injection numérique  $S_i$ .

On a :

$$5 \quad S_i = k_0 \cdot (k_1 \sin(\omega_0 t) + k_2 \sin(3\omega_0 t)) + k I_m.$$

Le capteur de courant à vanne de flux 10 comporte en outre un circuit d'injection 37. Le circuit d'injection 37 appartient à la partie analogique 16.

10 Le circuit d'injection 37 est relié au sommateur 36 et à l'enroulement de mesure 14.

Le circuit d'injection 37 comprend un convertisseur numérique analogique 38.

15 Le convertisseur numérique analogique 38 est ici un convertisseur 12 bits dont le fonctionnement est cadencé à la fréquence  $F_{ech}$  ( $F_{ech} = 100MHz$ ). Le convertisseur numérique analogique 38 pourrait bien sûr présenter des caractéristiques différentes.

20 Le convertisseur numérique analogique 38 acquiert le signal d'injection numérique  $S_i$ , produit un courant d'excitation analogique  $I_e$  à partir du signal d'injection numérique  $S_i$ , et injecte le courant d'excitation  $I_e$  dans l'enroulement de mesure 14.

On décrit maintenant le fonctionnement du capteur de courant à vanne de flux 10.

25 Le circuit d'excitation 23 génère un signal d'excitation numérique  $S_e$ , qui est transformé en un courant d'excitation  $I_e$  et injecté dans l'enroulement de mesure 14.

30 La tension de mesure  $V_e$  est acquise puis numérisée pour produire un signal de mesure numérique  $S_m$ .

En sortie du deuxième amplificateur 35, on obtient un signal image numérique du courant à mesurer  $I_m$ . Ce signal image numérique est utilisé pour estimer le courant à mesurer  $I_m$ .

35 Le signal image numérique est aussi un signal de dé-

magnétisation numérique  $S_{dm}$  qui permet de compenser le flux magnétique produit par le courant à mesurer  $I_m$ .

Grâce au sommateur 36 et par mise en parallèle, on additionne facilement le signal de démagnétisation numérique  $S_{dm}$  et le signal d'excitation numérique  $S_e$ . Le courant d'excitation  $I_e$  permet donc à la fois d'exciter le noyau magnétique 13 et de démagnétiser le noyau magnétique 13. Le courant de démagnétisation est donc intégré dans le courant d'excitation  $I_e$ .

La saturation du noyau magnétique 13 provoque une dissymétrie de la tension de mesure  $V_e$ , ladite tension de mesure  $V_e$  étant constituée par la somme d'une composante de fréquence  $f_0$  en  $\sin(\omega_0 t)$ , correspondant à la fondamentale, et d'une composante de fréquence  $2.f_0$  en  $\cos(2\omega_0 t)$ , correspondant à la composante harmonique d'ordre 2.

On note que l'amplitude du signal d'excitation partiel numérique de fréquence  $f_0$  et celle du signal d'excitation partiel numérique de fréquence  $3.f_0$  sont réglées pour obtenir un courant d'excitation  $I_e$  dont la composante de fréquence  $3.f_0$  (ou composante harmonique d'ordre 3) est en phase avec la composante de fréquence  $f_0$  (ou fondamentale).

La composante harmonique d'ordre 3 de la tension de mesure  $V_e$ , obtenue après démodulation synchrone via le premier démodulateur synchrone, est positive. En cas de saturation du noyau magnétique 13, la composante harmonique d'ordre 3 est atténuée plus fortement que la fondamentale et la composante harmonique d'ordre 3 après démodulation synchrone devient négative, car l'harmonique d'ordre 3 passe en opposition de phase avec la fondamentale.

Ainsi, lorsque le courant d'excitation  $I_e$  est tel que le noyau magnétique 13 se rapproche de la saturation, le rapport de l'amplitude de la composante harmonique d'ordre 1 et de l'amplitude de la composante harmonique

d'ordre 3 de la tension de mesure  $V_e$  évolue jusqu'à annulation de la composante harmonique d'ordre 3, puis jusqu'à inversion de phase de la composante harmonique d'ordre 3. Le point de fonctionnement correspondant à 5 l'annulation de la composante harmonique d'ordre 3 de la tension de mesure  $V_e$  est donc un point de fonctionnement optimal du capteur de courant à vanne de flux 10. Ce point de fonctionnement optimal correspond au coude 9 de la courbe de fonction de transfert de la figure 1.

10 En sortie du premier amplificateur 30, on obtient un signal d'erreur numérique.

Le signal d'erreur numérique permet d'asservir le courant d'excitation  $I_e$ . L'asservissement consiste à contrôler le courant d'excitation  $I_e$  pour annuler la composante harmonique d'ordre 3 de la tension de mesure  $V_e$ . Le capteur de courant à vanne de flux 10 fonctionne ainsi en permanence sur le point de fonctionnement optimal. On obtient de la sorte un gain maximal des dissymétries introduites par le courant à mesurer  $I_m$  et détectables sur la tension de mesure  $V_e$ . On note que cet asservissement par démodulation synchrone de la composante harmonique d'ordre 3 est peu sensible aux perturbations électromagnétiques externes, car tous les signaux de fréquence différente de la fréquence  $3.f_0$  génèrent des produits 15 d'intermodulation dont les composantes sont filtrées par le filtre passe-bas 34 connecté en sortie du troisième multiplicateur 33. On note par ailleurs que cet asservissement n'a pas besoin d'être très rapide, car les variations provenant de paramètres extérieurs (température, 20 vieillissement) sont relativement lentes. 25

Ainsi, l'enroulement de mesure 14 est utilisé à la fois pour exciter le noyau magnétique 13, pour contrôler cette excitation, pour mesurer le courant à mesurer  $I_m$ , et pour compenser le flux magnétique produit dans le 30

noyau magnétique 13 par le courant à mesurer  $I_m$  (démagnétisation).

La mutualisation de ces fonctions sur un seul enroulement de mesure 14 permet de simplifier, de réduire le 5 coût et la masse, et de faciliter la fabrication du capteur de courant à vanne de flux 10.

On note par ailleurs que la chaîne de traitement de la mesure est principalement numérique : un unique FPGA permet de mettre en œuvre une grande partie de cette 10 chaîne de traitement.

La numérisation de la chaîne de traitement augmente la fiabilité et la robustesse de celle-ci (notamment en température), réduit son coût, facilite sa fabrication et améliore sa reproductibilité industrielle.

15 L'amélioration de la régulation du point de fonctionnement grâce à la démodulation par le premier démodulateur synchrone permet par ailleurs d'obtenir une meilleure immunité aux bruits.

De plus, l'utilisation des démodulateurs synchrones 20 permet de fonctionner à haute fréquence, ce qui autorise une bande passante importante du courant à mesurer  $I_m$  tout en conservant une très bonne immunité aux perturbations électromagnétiques externes.

Comme la mesure se fait toujours dans le point de 25 fonctionnement optimal correspondant au coude 9 de saturation, la sensibilité du capteur de courant à vanne de flux 10 est constante dans la plage de température. La précision du capteur de courant à vanne de flux 10 est donc bonne dans une plage importante de température.

30 Comme on l'a indiqué plus tôt, le capteur de courant à vanne de flux 10 mesure un courant à mesurer  $I_m$  qui circule sur un conducteur 11.

Cette situation ne soulève pas de difficulté particulière lorsque le courant à mesurer  $I_m$  est faible (inférieur 35 à 1A par exemple).

Cependant, lorsque le courant à mesurer est important, une difficulté majeure se présente.

Le courant de démagnétisation, qui permet de compenser le flux magnétique produit dans le noyau magnétique 5 par le courant à mesurer  $I_m$ , doit être lui aussi très important. La valeur du courant de démagnétisation doit être égale à celle du courant à mesurer divisé par le rapport de transformation du transformateur 12, associé aux caractéristiques de l'enroulement primaire et de 10 l'enroulement secondaire.

Or, le nombre de spires de l'enroulement de mesure 14 est limité par son encombrement et par l'inductance résultante. Plus l'inductance est élevée, plus la vitesse de changement du courant de démagnétisation (issue du signal de démagnétisation numérique  $S_{dm}$ ) sera limitée, et donc plus la bande passante du capteur de courant à vanne de flux 10 sera limitée. Ainsi, augmenter le nombre de spires de l'enroulement secondaire n'est pas une solution efficace.

20 Augmenter le courant de démagnétisation n'est pas non plus une solution efficace. En effet, cela implique de générer une tension de démagnétisation très importante sous un courant de démagnétisation important, ce qui est complexe à réaliser avec des composants standards.

25 On note que ce problème n'est pas propre au capteur de courant à vanne de flux 10 qui vient d'être décrit, mais concerne tout les capteurs de courant à vanne de flux (et notamment ceux qui comportent un enroulement dédié à la démagnétisation).

30 Pour résoudre cette difficulté, on met en œuvre un pont diviseur de courant de manière à réduire la valeur du courant à mesurer.

En référence aux figures 5 à 7, le capteur de courant à vanne de flux 10 comprend un circuit imprimé selon 35 l'invention 40 sur lequel sont notamment montés la plura-

lité de composants électroniques formant la partie numérique 15 et la partie analogique 16.

Le circuit imprimé selon l'invention 40 comprend ici une première couche conductrice 41, une deuxième couche 5 conductrice 42 et une couche isolante 43. La première couche conductrice 41 et la deuxième couche conductrice 42 s'étendent ici chacune sur une face opposée du circuit imprimé 40.

La première couche conductrice 41 comprend une première piste 44 et la deuxième couche conductrice 42 comprend une deuxième piste 45. La couche isolante 43 s'étend donc entre la première piste 44 et la deuxième piste 45.

Le circuit imprimé 40 comporte de plus un premier ensemble traversant d'au moins un premier trou métallisé 47 et un deuxième ensemble traversant d'au moins un deuxième trou métallisé 48. Ici, en l'occurrence, le premier ensemble traversant comprend plusieurs premiers trous métallisés 47 et le deuxième ensemble traversant comprend plusieurs deuxièmes trous métallisés 48. Les premiers trous métallisés 47 et les deuxièmes trous métallisés 48 ont ici tous un même premier diamètre.

Un « trou métallisé » pourrait aussi être appelé un « via ». Le « trou métallisé » peut être réalisé par tout type de procédé. Le « trou métallisé » peut en particulier être rendu conducteur par dépôt d'un matériau métallique ou de tout type de matériau conducteur. Le « trou métallisé » peut aussi être rendu conducteur par insertion d'un tube ou d'un rivet métallique, ou de tout type de conducteur.

Chaque premier trou métallisé 47 et chaque deuxième trou métallisé 48 relient la première piste 44 et la deuxième piste 45 en s'étendant au travers de la couche isolante 43.

Le premier ensemble traversant et le deuxième ensemble traversant forment respectivement une première branche 51 et une deuxième branche 52 d'un pont diviseur de courant 53.

5 Ainsi, le courant à mesurer  $I_m$  est en réalité ici non pas un courant principal  $I_p$  dont on veut connaître la valeur, mais le courant à mesurer  $I_m$  est issu d'une division du courant principal  $I_p$  et est utilisé pour estimer la valeur du courant principal  $I_p$ . Le courant principal 10  $I_p$  circule dans la première piste 44, dans la première branche 51 et la deuxième branche 52 du pont diviseur de courant 53, et dans la deuxième piste 45.

On voit bien ici que le conducteur 11 évoqué plus haut, sur lequel circule le courant à mesurer, est le 15 deuxième ensemble traversant (ou la deuxième branche 52).

Ici, le courant principal  $I_p$  est égal à 10A.

Le nombre de premiers trous métallisés 47 du premier ensemble traversant est neuf fois plus important que celui de deuxièmes trous métallisés 48 du deuxième ensemble 20 traversant. La deuxième résistance de la deuxième branche 52 est donc neuf fois plus élevée que la première résistance de la première branche 51.

Le courant à mesurer  $I_m$ , circulant dans la deuxième branche 52 du pont diviseur de courant 53, est égal à 1A, 25 alors que le courant circulant dans la première branche 51 du pont diviseur de courant 53 est égal à 9A.

On met ici à profit les propriétés de reproductibilité des caractéristiques électriques de plusieurs trous métallisés de même diamètre et adjacents sur le même circuit imprimé 40.

La première résistance de la première branche 51 et la deuxième résistance de la deuxième branche 52 sont mal connues mais leur rapport, lui, est connu de manière très précise grâce à cette reproductibilité.

Le premier ensemble traversant et le deuxième ensemble traversant sont donc équivalents à deux résistances shunt de rapport parfaitement maîtrisé.

On connaît donc de manière très précise le rapport entre le courant à mesurer  $I_m$  et le courant principal  $I_p$ . Mesurer le courant à mesurer  $I_m$  permet d'estimer très précisément le courant principal  $I_p$ , tout en réduisant celui-ci pour réduire le courant de démagnétisation requis.

Le courant à mesurer  $I_m$  est mesuré grâce au transformateur selon l'invention 12 que l'on décrit désormais plus en détail.

Le transformateur selon l'invention 12 comporte le circuit imprimé 40 ou, plus exactement, une portion du circuit imprimé 40, car le circuit imprimé porte aussi la partie numérique 15 et la partie analogique 16.

Le deuxième ensemble traversant qui vient d'être décrit est aussi appelé ici « ensemble traversant primaire ». Les deuxièmes trous métallisés 48 sont des « trous métallisés primaires ».

Le circuit imprimé 40 comporte de plus un troisième ensemble traversant comportant au moins un troisième trou métallisé 56 s'étendant au travers de la couche isolante 43, et un quatrième ensemble traversant comportant au moins un quatrième trou métallisé 57 s'étendant au travers de la couche isolante 43. Ici, en l'occurrence, le troisième ensemble traversant comprend plusieurs troisièmes trous métallisés 56 et le quatrième ensemble traversant comprend plusieurs quatrièmes trous métallisés 57. Les troisièmes trous métallisés 56 et les quatrièmes trous métallisés 57 ont ici tous un même deuxième diamètre qui, pour une raison d'encombrement, est inférieur au premier diamètre des premiers trous métallisés 47 et des deuxièmes trous métallisés 48. Le nombre de troi-

sièmes trous métallisés 56 est égal au nombre de quatrièmes trous métallisés 57.

Le troisième ensemble traversant et le quatrième ensemble traversant forment un ensemble appelé ici « ensemble traversant secondaire ». Dans l'ensemble traversant secondaire, les troisièmes trous métallisés 56 forment au moins un, en l'occurrence plusieurs « premiers trous métallisés secondaires » 56, et les quatrièmes trous métallisés 57 forment au moins un, en l'occurrence plusieurs « deuxièmes trous métallisés secondaires » 57.

Le transformateur 12 comporte de plus le noyau magnétique 13. Le noyau magnétique 13 s'étend dans une épaisseur du circuit imprimé 40.

Le noyau magnétique 13 présente la forme d'un tube de sections extérieure et intérieure rectangulaires. On note que le noyau magnétique 13 pourrait bien évidemment présenter une forme différente. Le noyau magnétique 13 comporte une portion de noyau primaire 60 et une portion de noyau secondaire 61.

L'ensemble traversant primaire s'étend à l'intérieur du noyau magnétique 13, à proximité de la portion de noyau primaire 60.

L'ensemble traversant primaire forme ainsi une portion d'un enroulement primaire du transformateur 12, ledit enroulement primaire comportant ici une seule spire.

Les premiers trous métallisés secondaires 56 s'étendent à l'intérieur du noyau magnétique 13, à proximité de la portion de noyau secondaire 61. Les deuxièmes trous métallisés secondaires 57 s'étendent à l'extérieur du noyau magnétique 13, à proximité de la portion de noyau secondaire 61.

On voit que les premiers trous métallisés secondaires 56 et les deuxièmes trous métallisés secondaires 57 sont reliés entre eux par des éléments conducteurs 65 (par exemple, mais pas nécessairement, des pistes) qui

s'étendent sur la première couche conductrice 41 et sur la deuxième couche conductrice 42. Seuls deux éléments conducteurs 65 sont représentés sur la figure 7.

Le troisième ensemble traversant forme ainsi une première portion de l'enroulement secondaire du transformateur 12. Le quatrième ensemble traversant forme ainsi une deuxième portion de l'enroulement secondaire du transformateur. L'ensemble traversant secondaire forme donc une portion de l'enroulement secondaire du transformateur 12.

L'enroulement secondaire comporte une pluralité de spires, chaque spire comprenant un premier trou métallisé secondaire 56, un deuxième trou métallisé secondaire 57 et un élément conducteur 65.

Comme on l'aura compris, l'enroulement secondaire du transformateur 12 est l'enroulement de mesure 14 évoqué plus tôt.

On décrit maintenant la fabrication du circuit imprimé 40 et du noyau magnétique 13 qui s'étend dans une épaisseur du circuit imprimé 40.

Le circuit imprimé 40 comprend une première couche de « prépreg » (pour « préimprégné ») et une deuxième couche de « prépreg ». La première couche de prépreg et la deuxième couche de prépreg ne sont pas polymérisées.

Le noyau magnétique 13 comporte un mélange d'une poudre magnétique et d'une résine constituant un liant de la poudre magnétique.

La poudre magnétique est formée d'une structure cristalline, en l'occurrence de grenat d'yttrium et de fer ( $\text{Y}_3\text{Fe}_{15}\text{O}_{12}$ ).

La résine est une résine époxy.

Le noyau magnétique 13 est déposé sur la première couche de prépreg par sérigraphie.

Puis, le noyau magnétique 13 est recouvert par la deuxième couche de prépreg.

Le circuit imprimé 40 est ensuite passé dans un four.

On perce alors le circuit imprimé 40 pour réaliser les trous métallisés qui ont été décrits.

5 Alternativement, il est possible fabriquer le noyau magnétique 13 en utilisant une technologie de fabrication additive par frittage laser.

10 La poudre magnétique est déposée sur une première couche de prépreg. Puis, un faisceau laser est utilisé pour agglomérer la couche de poudre magnétique sur des zones prédéfinies de manière à former le noyau magnétique 13.

15 Le noyau magnétique 13 est alors recouvert par la deuxième couche de préprep.

La fabrication du noyau magnétique 13 par frittage laser semble plus efficace. En effet, dans le cas de la fabrication par sérigraphie, on constate que, dans le mélange de poudre magnétique et de résine, on trouve autant d'entrefers que de particules de poudre magnétique. Ces entrefers diminuent les performances du noyau magnétique 13. Dans le cas du frittage laser, les particules de la poudre magnétique sont fusionnées, ce qui évite de créer lesdits entrefers.

25 Bien entendu, l'invention n'est pas limitée au mode de réalisation décrit mais englobe toute variante entrant dans le champ de l'invention telle que définie par les revendications.

30 On a indiqué que le capteur de courant à vanne de flux comporte une partie numérique et une partie analogique, et que le convertisseur analogique numérique et le convertisseur numérique analogique appartiennent à la partie analogique. Bien sûr, on pourrait considérer que ces composants sont des composants numériques, et même qu'ils sont directement intégrés dans le FPGA (ou dans un 35 microcontrôleur ou autre composant numérique), de sorte

qu'ils appartiendraient alors à la partie numérique.

On a indiqué ici que la première couche conductrice comprenant la première piste et la deuxième couche conductrice comprenant la deuxième piste s'étendent ici chacune sur une face opposée du circuit imprimé. Bien sûr, la première couche conductrice et la deuxième couche conductrice pourraient être des couches internes du circuit imprimé, séparées par une ou plusieurs couches isolantes.

On a aussi décrit des ensembles traversant comprenant chacun un ou des trous métallisés. Les trous métallisés traversent ici une même couche isolante. Bien sûr, les trous métallisés pourraient traverser plusieurs couches isolantes, voir même une ou des couches isolantes et une ou des couches conductrices. Des ensembles traversant distincts pourraient aussi traverser des piles de couches distinctes.

On a indiqué ici que l'ensemble traversant secondaire comprend au moins un premier trou métallisé secondaire et au moins un deuxième trou métallisé secondaire qui s'étendent de part et d'autre d'une portion de noyau secondaire du noyau magnétique. Bien sûr, il est possible aussi que l'ensemble traversant primaire comprenne au moins un premier trou métallisé primaire et au moins un deuxième trou métallisé primaire qui s'étendent de part et d'autre d'une portion de noyau primaire du noyau magnétique. Les deux configurations peuvent aussi coexister.

Bien sûr, le transformateur selon l'invention peut être utilisé dans tout type d'application requérant un transformateur : l'invention n'est aucunement limitée aux capteurs de courant à vanne de flux.

REVENDICATIONS

1. Transformateur comportant un circuit imprimé (40) et un noyau magnétique (13), le circuit imprimé comprenant une couche isolante (43), un ensemble traversant primaire d'au moins un trou métallisé primaire (48) s'étendant au travers de la couche isolante (43), l'ensemble traversant primaire formant une portion d'un enroulement primaire du transformateur, un ensemble traversant secondaire d'au moins un trou métallisé secondaire (56, 57) s'étendant au travers de la couche isolante (43), l'ensemble traversant secondaire formant une portion d'un enroulement secondaire du transformateur, le noyau magnétique s'étendant dans une épaisseur du circuit imprimé (40).

2. Transformateur selon la revendication 1, dans lequel l'ensemble traversant primaire comprend au moins un premier trou métallisé primaire et au moins un deuxième trou métallisé primaire qui s'étendent de part et d'autre d'une portion de noyau primaire du noyau magnétique, et/ou dans lequel l'ensemble traversant secondaire comprend au moins un premier trou métallisé secondaire (56) et au moins un deuxième trou métallisé secondaire (57) qui s'étendent de part et d'autre d'une portion de noyau secondaire (61) du noyau magnétique.

3. Transformateur selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le noyau magnétique (13) est réalisé à partir notamment d'une poudre magnétique.

4. Transformateur selon la revendication 3, le noyau magnétique comportant un mélange d'une résine et de la poudre magnétique et étant déposé par sérigraphie sur une couche du circuit imprimé.

5. Transformateur selon la revendication 3, le noyau magnétique étant formé par frittage laser de la poudre magnétique déposée sur une couche du circuit im-

primé (40).

6. Transformateur selon l'une des revendications 3 à 5, dans lequel la poudre magnétique comporte du grenat d'yttrium et de fer.

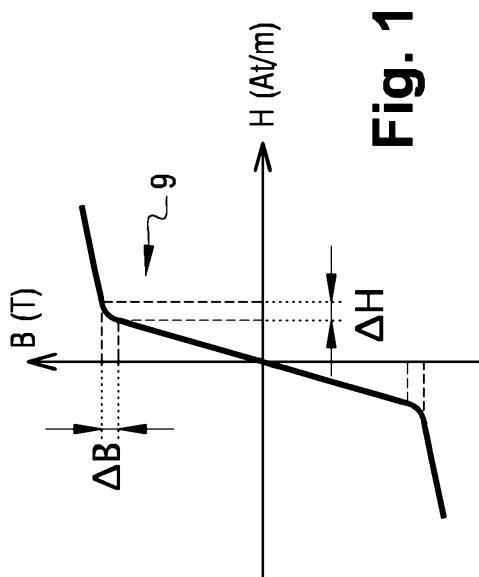


Fig. 1

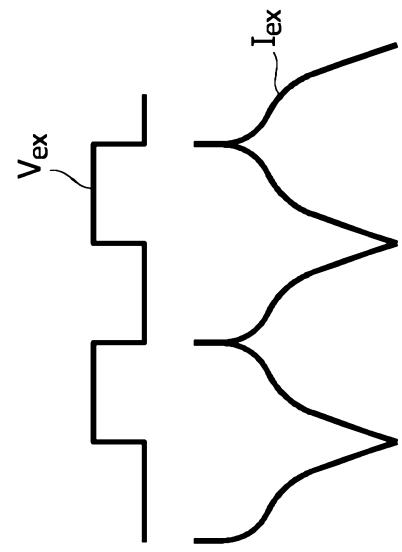
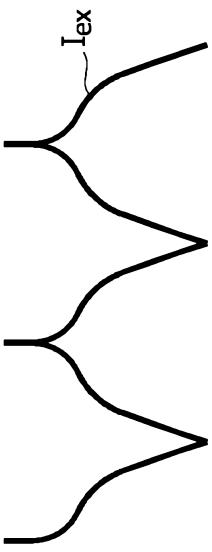
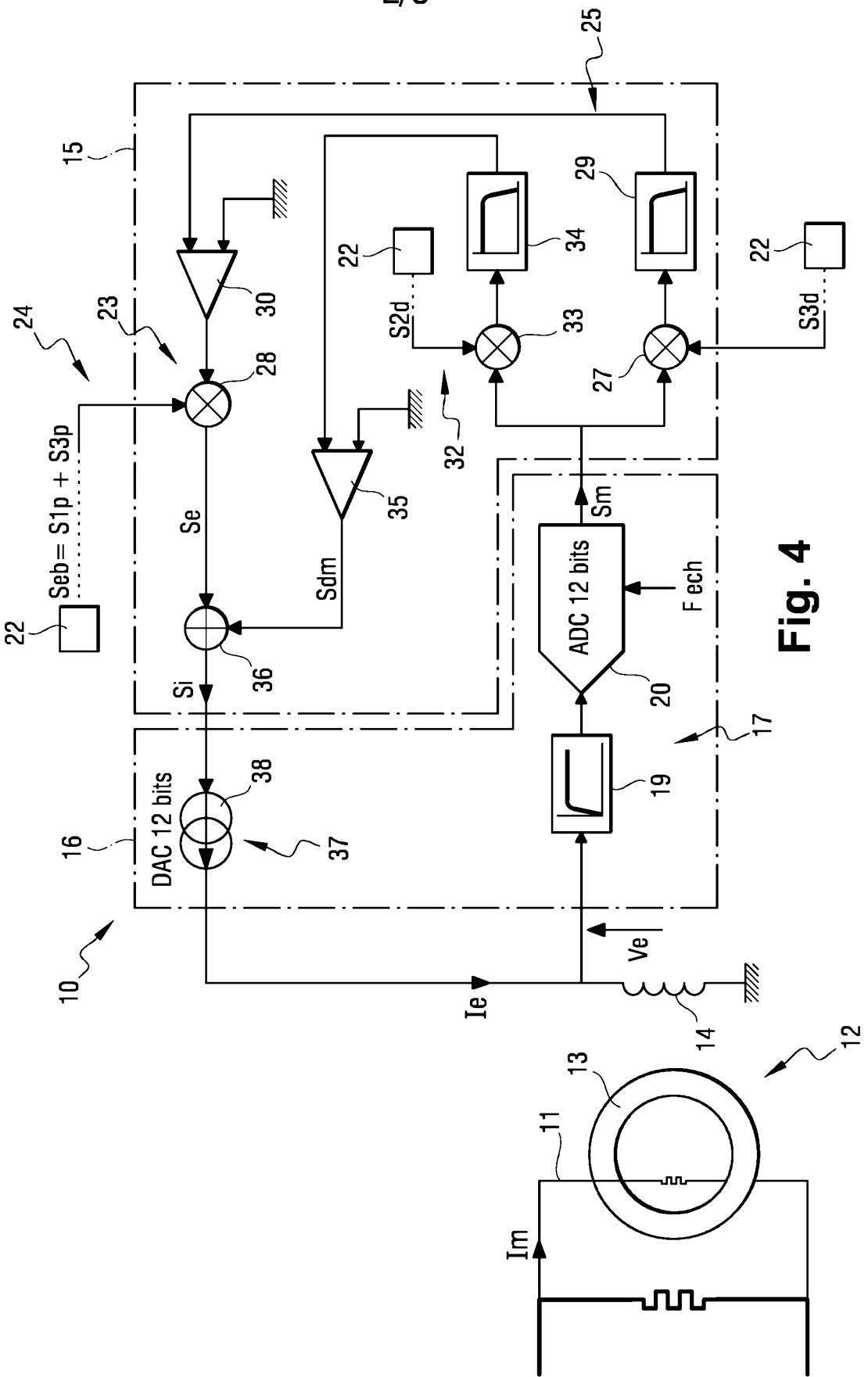


Fig. 2

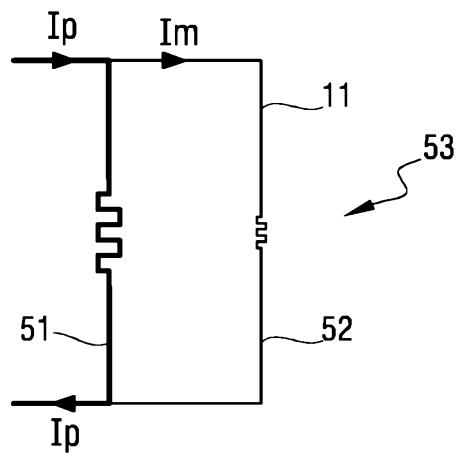
Fig. 3



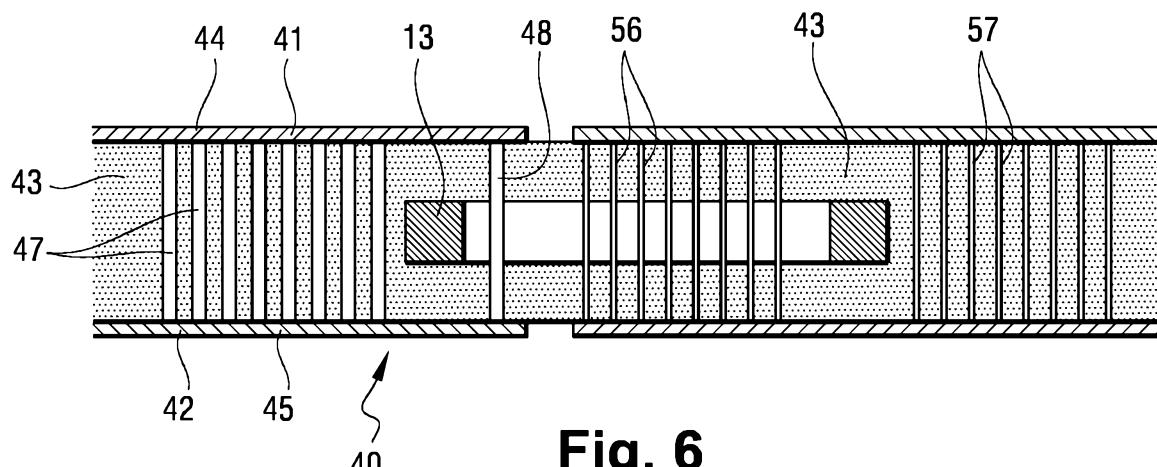


**Fig. 4**

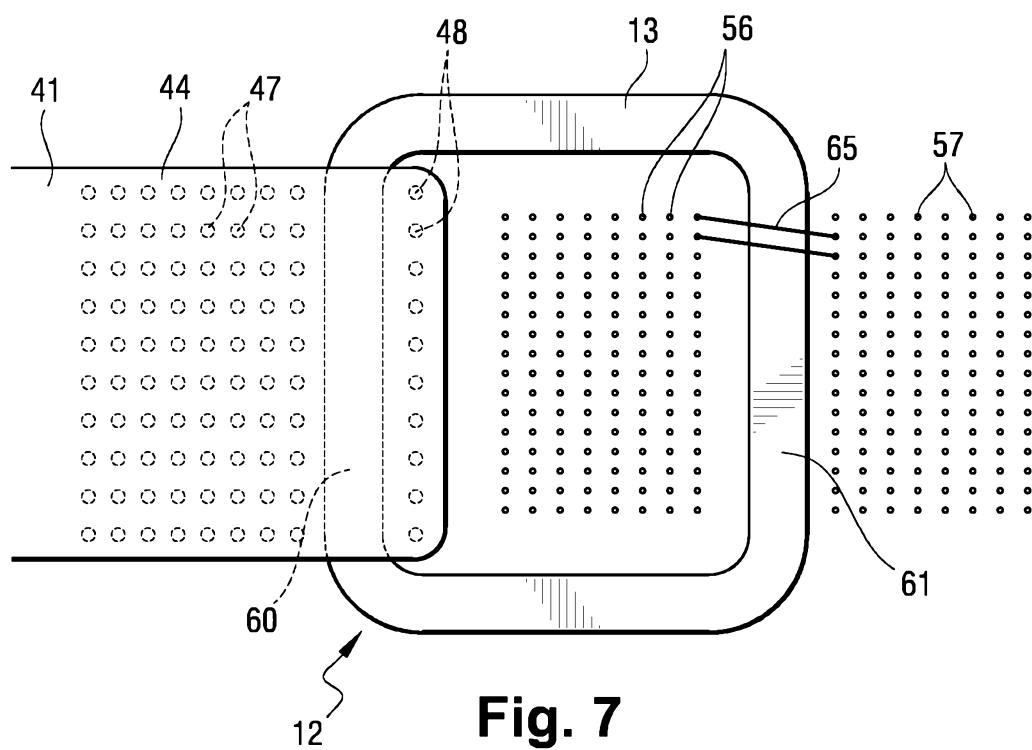
3/3



**Fig. 5**



**Fig. 6**



**Fig. 7**

# RAPPORT DE RECHERCHE

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

## OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

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

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

## CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

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

[x] Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

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

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

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

## DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

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

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

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

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

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

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

US 2017/222563 A1 (NOMA TAKASHI [JP] ET  
AL) 3 août 2017 (2017-08-03)

DE 10 2016 119164 A1 (PHOENIX CONTACT GMBH  
& CO [DE]) 12 avril 2018 (2018-04-12)

JP 2015 070367 A (TDK CORP)  
13 avril 2015 (2015-04-13)

CN 105 632 893 A (UNIV TSINGHUA)  
1 juin 2016 (2016-06-01)

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

NEANT

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

NEANT