(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

COURBEVOIE

(11) **N° de publication :** **3 076 060**

(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

(21) **N° d'enregistrement national :** **17 63092**

(51) Int Cl[8] : ***H 01 F 6/06*** *(2018.01), H 02 H 9/02*

(12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

(22) **Date de dépôt :** 22.12.17.

(30) **Priorité :**

(43) **Date de mise à la disposition du public de la demande :** 28.06.19 Bulletin 19/26.

(56) **Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire :** *Se reporter à la fin du présent fascicule*

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

( ) **Demande(s) d'extension :**

(71) **Demandeur(s) :** *SUPERGRID INSTITUTE Société par actions simplifiée* — FR et *INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE Etablissement public* — FR.

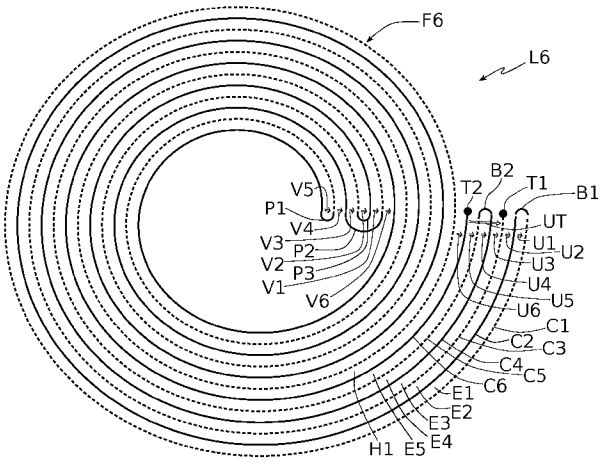
(72) **Inventeur(s) :** LEGENDRE PIERRE et TIXADOR PASCAL.

(73) **Titulaire(s) :** SUPERGRID INSTITUTE Société par actions simplifiée, INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE Etablissement public.

(74) **Mandataire(s) :** OPILEX.

(54) DIPOLE LIMITEUR DE COURANT A SUPRACONDUCTEUR, COMPORTANT AU MOINS QUATRE CABLES SUPRACONDUCTEURS.

(57) Dipôle limiteur de courant (L6) à supraconducteur, comportant un conducteur de type supraconducteur (F6) enroulé pour former une bobine bifilaire s'étendant selon un plan unique, une couche d'isolant (E1 à E11, H1) étant disposée entre deux spires de ladite bobine. Le conducteur de type supraconducteur (C1 à C6) est constitué d'au moins quatre câbles supraconducteurs (C1 à C6) distincts enroulés parallèlement et agencés selon au moins deux paires, chacune des paires étant formée de deux desdits câbles supraconducteurs (C1 à C6) qui sont électriquement reliés entre eux au niveau d'une première zone de connexion, et, au niveau d'une deuxième zone de connexion, l'un des câbles supraconducteurs d'une paire est électriquement relié à l'un des câbles supraconducteurs de l'autre paire, l'autre câble supraconducteur de chaque paire étant relié à un terminal de connexion électrique (T1, T2) ou à une paire supplémentaire.



FR 3 076 060 - A1

DIPÔLE LIMITEUR DE COURANT À SUPRACONDUCTEUR, COMPORTANT AU MOINS QUATRE CÂBLES SUPRACONDUCTEURS

L'invention a trait au domaine des limiteurs de courant à supraconducteur, destinés à des applications sous haute tension.

Ces limiteurs de courant, qui peuvent être résistifs, comportent un conducteur de type supraconducteur et sont, en fonctionnement normal, très faiblement résistifs. Lorsqu'un défaut électrique a pour conséquence une importante augmentation de la densité de courant dans le conducteur, ou lorsque ce dernier n'est plus suffisamment refroidi, le conducteur perd ses propriétés supraconductrices et le limiteur de courant devient fortement résistif, maintenant ainsi le courant en dessous d'une certaine valeur.

La longueur du conducteur de type supraconducteur nécessaire au limiteur de courant est proportionnelle à la tension du réseau ou dispositif à protéger. Elle atteint plusieurs centaines de mètres, voire des kilomètres, pour un limiteur de courant prévu pour la haute tension. Les limiteurs de courant sont donc de préférence enroulés de manière compacte pour limiter l'encombrement d'un tel dispositif qui peut néanmoins atteindre plusieurs mètres de diamètre.

Les documents EP0503448 et EP0935261 décrivent un limiteur de courant comportant un conducteur supraconducteur enroulé sensiblement sous forme d'une spirale pour former une bobine bifilaire s'étendant selon un plan unique.

L'invention a pour but d'améliorer les limiteurs de courant de l'art antérieur en proposant un agencement optimisé pour un conducteur supraconducteur et pour ses terminaux de connexion, et ce pour des tensions de l'ordre de 50 à 2000 kV et des courants nominaux de l'ordre de 1000 A à 10000 A.

A cet effet, l'invention vise un dipôle limiteur de courant à supraconducteur, comportant un conducteur de type supraconducteur enroulé pour former une bobine bifilaire s'étendant selon un plan unique, une couche d'isolant et/ou un espace étant disposé entre deux spires de ladite bobine. Ledit conducteur de type supraconducteur

est constitué d'au moins quatre câbles supraconducteurs distincts enroulés parallèlement et agencés selon au moins deux paires, chacune des paires étant formée de deux desdits câbles supraconducteurs, les câbles supraconducteurs étant reliés entre eux de sorte que le conducteur de type supraconducteur s'étende selon au moins deux allers-retours entre la périphérie et le centre de la bobine en reliant un premier terminal de connexion électrique à un deuxième terminal de connexion électrique.

Selon une caractéristique préférée, chacune des paires est formée de deux desdits câbles supraconducteurs qui sont électriquement reliés entre eux au niveau d'une première zone de connexion, et, au niveau d'une deuxième zone de connexion, l'un des câbles supraconducteurs d'une paire est électriquement relié à l'un des câbles supraconducteurs de l'autre paire, l'autre câble supraconducteur de chaque paire étant relié à un terminal de connexion électrique ou à une paire supplémentaire, l'une des zones de connexion étant située au centre de la bobine et l'autre des zones de connexion étant située à la périphérie de la bobine.

Ainsi, la différence de tension entre deux câbles adjacents peut être réduite.

L'invention peut également être améliorée en employant un isolant différent, dans son épaisseur ou ses caractéristiques, entre les différentes spires. En particulier, il est ainsi intéressant d'employer une épaisseur d'isolant plus ou moins importante, selon la différence de tension qui apparaitra entre deux câbles adjacents.

L'invention peut s'appliquer sur des bobinages bifilaires dans lequel le conducteur fait un ou plusieurs allers-retours. Un bobinage avec plusieurs allers-retours permet en effet de réduire la tension entre deux câbles, et donc de limiter la dimension des isolants nécessaires. Le limiteur de courant selon l'invention permet une meilleure tenue en tension, ce qui autorise la réalisation d'un limiteur de courant plus compact et/ou admettant une tension de fonctionnement plus importante. La tenue en tension désigne la capacité du limiteur de courant à résister à une importante différence de potentiel, au vu des hautes tensions en jeu, au sein des éléments de sa structure, sans qu'une décharge électrique ne se produise entre ces éléments, autrement dit en garantissant que la tension de claquage de chaque élément du limiteur de courant, en particulier les espaceurs entre chaque câble, soit toujours supérieure à la tension maximale qui peut apparaitre aux bornes de cet élément lorsque le limiteur de courant devient résistif en réponse à un défaut du circuit.

En effet, l'enroulement bifilaire sous forme de spirale permet d'optimiser l'espace et de compacter le limiteur de courant mais génère par ailleurs intrinsèquement une difficulté liée au fait que, en cas de défaut, lorsque le conducteur devient résistif, une forte tension se développe à ses bornes et dans sa structure. La nécessité pour le conducteur de type supraconducteur d'être enroulé sous forme de bobine bifilaire accentue la difficulté car le conducteur doit donc parcourir le même trajet aussi bien dans un sens de rotation que dans le sens de rotation inverse, ce qui limite les possibilités de placement des composants du limiteur de courant et de circuit de passage du conducteur de type supraconducteur. Une différence de tension, proportionnelle à la longueur du conducteur, est donc présente entre deux câbles adjacents.

Un limiteur de courant selon l'invention permet de mettre en œuvre une plus grande longueur de conducteur répartie en plusieurs tronçons de câble supraconducteur. La structure du limiteur de courant permet une meilleure tenue en tension, ce qui permet l'utilisation pour des tensions plus élevées qu'auparavant. En effet, l'agencement des câbles et des terminaux de connexion garantit une juxtaposition optimisée des éléments à tension élevée, tout en maintenant le tout dans une dimension plus compacte. Des objectifs a priori divergents (une meilleure tenue en tension et une meilleure compacité) sont ainsi atteints grâce à l'invention.

Le câble supraconducteur est un fil conducteur qui peut être d'une quelconque section, par exemple, ronde, ovale, ou rectangulaire. Il peut être constitué d'une âme recouverte d'un revêtement supraconducteur. Il peut avantageusement être constitué en partie d'un des matériaux suivants :

- $REBa_2Cu_3O_{7+x}$, ou RE représente un ou plusieurs éléments parmi Y et les terres rares (Gd, Nd, Dy, Eu, etc.) ;
- MgB_2 ;
- $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+x}$;
- Tout autre matériau supraconducteur et adapté à la fabrication de câbles limiteurs de courant.

En permettant au conducteur de type supraconducteur d'effectuer plusieurs allers-retours entre la périphérie et le centre de la bobine, des possibilités de répartition

avantageuse des potentiels apparaissent. Ces possibilités peuvent ensuite être concrétisées par une distribution adéquate des éléments permettant de relier les câbles supraconducteurs entre eux.

L'épaisseur variable d'une couche d'isolant à l'autre participe au gain de compacité tout en maintenant la tenue en tension nécessaire.

Le limiteur de courant peut comporter les caractéristiques additionnelles suivantes, seules ou en combinaison :

- au moins l'un des câbles supraconducteurs est interposé entre les deux câbles supraconducteurs qui sont reliés chacun à un terminal de connexion ;

- les deux câbles supraconducteurs d'une même paire sont de même longueur ;

- entre les deux câbles supraconducteurs reliés aux terminaux de connexion, le nombre de couches d'isolant est égal à la moitié du nombre total de câbles supraconducteurs ;

- les câbles supraconducteurs sont reliés entre eux au centre de la bobine, pour former lesdites paires, par des boucles de pontage ;

- lesdites boucles de pontage sont alignées ;

- lesdites boucles de pontage sont réparties régulièrement sur le contour interne de la bobine ;

- le conducteur de type supraconducteur est constitué de 2N câbles supraconducteurs agencés selon N paires, de N boucles de pontage au centre de la bobine et de N-1 boucles de pontage à la périphérie de la bobine ;

- le conducteur de type supraconducteur est constitué de 2N câbles supraconducteurs agencés selon N paires, de N-1 boucles de pontage au centre de la bobine et de N boucles de pontage à la périphérie de la bobine ;

- le conducteur de type supraconducteur est constitué de quatre câbles supraconducteurs agencés selon deux paires, de deux boucles de pontage au centre de la bobine et d'une boucle de pontage à la périphérie de la bobine ;

- les deux boucles de pontage au centre de la bobine sont adjacentes, et la boucle de pontage à la périphérie de la bobine est située entre les deux terminaux de connexion ;

- au sein de la bobine, entre le câble supraconducteur relié à un terminal de connexion et le câble supraconducteur adjacent qui est relié à l'autre terminal de connexion, la couche d'isolant a une épaisseur plus importante que les autres couches d'isolant ;

- les deux boucles de pontage du centre de la bobine sont adjacentes, et la boucle de pontage de la périphérie de la bobine contourne un terminal de connexion ;

- les deux boucles de pontage au centre de la bobine sont concentriques, et la boucle de pontage à la périphérie de la bobine contourne un terminal de connexion ;

- le conducteur de type supraconducteur est constitué de six câbles supraconducteurs agencés selon trois paires, de trois boucles de pontage au centre de la bobine et de deux boucles de pontage à la périphérie de la bobine ;

- les trois boucles de pontage au centre de la bobine sont adjacentes et les deux boucles de pontage à la périphérie de la bobine contournent chacune un terminal de connexion ;

- deux des boucles de pontage du centre de la bobine sont concentriques et l'une des boucles de pontage de la périphérie de la bobine est disposée entre les deux terminaux de connexion ;

- l'une des boucles de pontage du centre de la bobine traverse diamétralement le centre de la bobine, les deux autres boucles de pontage du centre de la bobine étant situées de part et d'autre de cette dernière, et l'une des boucles de pontage de la périphérie de la bobine est disposée entre les deux terminaux de connexion ;

- le conducteur de type supraconducteur est constitué de huit câbles supraconducteurs agencés selon quatre paires, de quatre boucles de pontage au centre de la bobine et de trois boucles de pontage à la périphérie de la bobine ;

- les quatre boucles de pontage au centre de la bobine sont adjacentes et l'une des boucles de pontage de la périphérie de la bobine contourne un terminal de

connexion et une autre des boucles de pontage, et la troisième boucle de pontage de la périphérie de la bobine est située entre les deux terminaux de connexion ;

- deux des boucles de pontage du centre de la bobine sont adjacentes, les deux autres boucles de pontage du centre de la bobine étant concentriques, et deux des boucles de pontage de la périphérie de la bobine sont situées entre les deux terminaux de connexion ;

- les quatre boucles de pontage du centre de la bobine sont adjacentes et les trois boucles de la périphérie de la bobine sont concentriques et entourent un terminal de connexion ;

- la couche d'isolant située entre deux câbles supraconducteurs dont la différence de potentiel est la plus faible, lorsque le dipôle limiteur de courant devient résistif, présente une épaisseur inférieure à celle des autres couches d'isolant ;

- la couche d'isolant située entre deux câbles supraconducteurs dont la différence de potentiel est la plus élevée, lorsque le dipôle limiteur de courant devient résistif, présente une épaisseur supérieure à celle des autres couches d'isolant ;

- le limiteur de courant comporte au moins deux couches d'isolant d'épaisseurs différentes ;

- le limiteur comporte en outre au moins deux couches d'isolant constituées d'un matériau différent ;

- la couche d'isolant située entre deux câbles supraconducteurs dont la différence de potentiel est la plus faible, lorsque le dipôle limiteur de courant devient résistif, présente une épaisseur inférieure à celle des autres couches d'isolant ;

- la couche d'isolant située entre deux câbles supraconducteurs dont la différence de potentiel est la plus élevée, lorsque le dipôle limiteur de courant devient résistif, présente une épaisseur supérieure à celle des autres couches d'isolant ;

- les câbles supraconducteurs forment un faisceau enroulé sur lui-même, l'une des couches d'isolant formant une couche d'isolant de faisceau disposée entre deux bobinages du faisceau, tandis que les autres couches d'isolant forment des couches d'isolant de câble disposées chacune entre deux câbles supraconducteurs ;

- la couche d'isolant de faisceau présente une épaisseur supérieure aux couches d'isolant de câble ;

- la couche d'isolant de faisceau présente une épaisseur supérieure à 2/3 de la somme des épaisseurs des couches d'isolant de câble ;

- la couche d'isolant de faisceau présente une épaisseur supérieure à 1,5 fois l'épaisseur d'une couche d'isolant de câble ;

- les câbles étant au nombre de 2n, la couche d'isolant de faisceau présente une épaisseur de l'ordre de n fois l'épaisseur d'une couche d'isolant de câble ;

- le limiteur de courant comporte 2N câbles supraconducteurs agencés selon N paires, N boucles de pontage au niveau d'une première zone de connexion, N-1 boucle de pontage au niveau d'une deuxième zone de connexion, et deux terminaux de connexion, la couche d'isolant de faisceau étant située entre deux câbles supraconducteurs reliés chacun à un terminal de connexion ;

- la première zone de connexion est située au centre de la bobine, et la deuxième zone de connexion est située en périphérie de la bobine ;

- la première zone de connexion est située en périphérie de la bobine, et la deuxième zone de connexion est située au centre de la bobine ;

- le limiteur de couple comporte quatre câbles supraconducteurs agencés selon deux paires, deux boucles de pontage au centre de la bobine, une boucle de pontage à la périphérie de la bobine, et deux terminaux de connexion, la couche d'isolant de faisceau étant située entre deux câbles supraconducteurs reliés chacun à un terminal de connexion ;

- le limiteur de courant comporte huit câbles supraconducteurs agencés selon quatre paires, quatre boucles de pontage au centre de la bobine, trois boucles de pontage à la périphérie de la bobine, et deux terminaux de connexion, la couche d'isolant de faisceau étant située entre deux câbles supraconducteurs reliés chacun à un terminal de connexion.

Un exemple préféré de réalisation de l'invention va maintenant être décrit en référence aux dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1 représente schématiquement un limiteur de courant selon l'art antérieur ;

- la figure 2 est une vue schématique d'un limiteur de courant conforme à un premier mode de réalisation de l'invention ;

- la figure 2B est une vue schématique d'un limiteur de courant selon une variante du mode de réalisation de la figure 2.

- la figure 3 est une vue schématique d'un limiteur de courant conforme à un deuxième mode de réalisation de l'invention ;

- la figure 4 est une vue schématique d'un limiteur de courant conforme à un troisième mode de réalisation de l'invention ;

- la figure 5 est une vue schématique d'un limiteur de courant conforme à un quatrième mode de réalisation de l'invention ;

- la figure 6 est une vue schématique d'un limiteur de courant conforme à un cinquième mode de réalisation de l'invention ;

- la figure 7 est une vue schématique d'un limiteur de courant conforme à un sixième mode de réalisation de l'invention ;

- la figure 8 est une vue schématique d'un limiteur de courant conforme à un septième mode de réalisation de l'invention ;

- la figure 9 est une vue schématique d'un limiteur de courant conforme à un huitième mode de réalisation de l'invention ;

- la figure 10 est une vue schématique d'un limiteur de courant conforme à un neuvième mode de réalisation de l'invention ;

- la figure 11 est une vue schématique d'un limiteur de courant conforme à un dixième mode de réalisation de l'invention ;

- la figure 12 est une vue schématique d'un limiteur de courant conforme à un onzième mode de réalisation de l'invention.

- la figure 13 est une vue schématique d'un limiteur de courant conforme à un douzième mode de réalisation ;

- la figure 14 est une vue schématique d'un limiteur de courant conforme à un treizième mode de réalisation ;

- la figure 15 est une vue schématique d'un limiteur de courant selon une variante du mode de réalisation de la figure 14.

- la figure 16 est une vue schématique d'un limiteur de courant conforme à un quinzième mode de réalisation.

La figure 1 représente un limiteur de courant A1 selon l'art antérieur. Un tel limiteur de courant est constitué de l'enroulement d'un conducteur de type supraconducteur et de couches isolantes, sous forme de spirale. Le limiteur de courant A1 selon l'art antérieur comporte un unique conducteur A2 enroulé sous forme de bobine bifilaire, chaque extrémité du conducteur A2 étant relié à un terminal de connexion A3, A4.

Les figures 2 à 16 représentent schématiquement un limiteur de courant selon divers modes de réalisation, et variantes, de l'invention. Les figures 2 à 16 montrent schématiquement la bobine résultant de ces enroulements, vue de dessus, de manière à montrer les structures d'enroulement et les connexions qui caractérisent l'invention. Le conducteur de type supraconducteur est enroulé de manière à former une bobine bifilaire s'étendant selon un plan unique (le plan des dessins). Les connexions électriques sont représentées de manière simplifiée, à la manière d'un schéma électrique, étant entendu que l'homme du métier saura réaliser ces connexions de manière pratique au vu notamment des contraintes mécaniques, d'encombrement et de coût. Dans les modes de réalisation des figures 2 à 12 :

- le limiteur de courant est un dipôle ;

- le limiteur de courant comporte un seul conducteur de type supraconducteur dont chaque extrémité est reliée à un terminal de connexion ;

- les deux terminaux de connexion forment les bornes du dipôle limiteur de courant ;

- le conducteur de type supraconducteur est constitué d'au moins deux paires de câbles supraconducteurs.

Dans les modes de réalisation des figures 13 à 16 :

- le limiteur de courant comporte un ou plusieurs conducteurs de type supraconducteur dont chaque extrémité est reliée à un terminal de connexion ;

- le conducteur de type supraconducteur est constitué d'au moins une paire de câbles supraconducteurs.

Pour faciliter la lecture, toutes les figures respectent la convention suivante :

- l'un des câbles supraconducteurs d'une paire est représenté en traits pleins tandis que l'autre des câbles supraconducteurs de cette même paire est représenté en traits pointillés, de manière à différencier clairement sur les figures le câble « aller » (le courant circule dans un sens, par exemple de la périphérie vers le centre) du câble « retour » (le courant circule dans l'autre sens, par exemple du centre vers la périphérie) d'une même paire de câbles supraconducteurs ;

- l'espace blanc entre les câbles supraconducteurs est constitué d'un isolant bobiné en parallèle avec le conducteur de sorte que toutes les spires de la bobine que constitue l'enroulement soient maintenues isolées les unes des autres par une couche de cet isolant. L'isolant est représenté schématiquement par l'espace blanc entre les câbles pour simplifier la figure. Il s'agit cependant d'un isolant, par exemple, en feuilles ou en bandes.

Toutes ces figures présentent les terminaux de connexion (bornes) du limiteur en périphérie de la bobine. Il est également possible d'employer des géométries quasi-identiques avec les terminaux de connexion au centre de la bobine. Ces schémas ne sont pas représentés mais sont des variantes possibles de l'invention.

Le limiteur de courant est refroidi, par exemple par un bain d'azote liquide, afin d'être maintenu aux températures nécessaires au maintien des propriétés supraconductrices du conducteur. L'isolant présent entre les spires du conducteur est donc de préférence poreux, ou muni de canaux, pour permettre le refroidissement par passage de fluide ou par bain.

La longueur du conducteur de type supraconducteur, et donc le nombre de spires de l'enroulement, est également simplifiée sur les dessins. A titre d'exemple, pour un limiteur de courant prévu pour 25 kV et dont le conducteur de type supraconducteur a une résistance linéique permettant une chute de tension de 50 V/m lorsqu'il devient

résistif, ce conducteur devra avoir une longueur de l'ordre de 500 m, ce qui conduit à une bobine bifilaire de plusieurs mètres de diamètre et à un très grand nombre de tours.

Pour faciliter la description, une même convention est employée pour désigner les câbles et les tensions qui sont présentes entre ces câbles. Selon cette convention, si un limiteur de courant comporte X câbles :

- les câbles sont numérotés C1 à CX ;

- la tension présente, à la périphérie de l'enroulement, entre les câbles C1 et C2 est numérotée U1, celle présente entre les câbles C2 et C3 est numérotée U2,..., celle présente entre les câbles C(X-1) et CX est numérotée U(X-1) ;

- la tension présente, à la périphérie de l'enroulement, entre les câble CX et C1 (après un tour de l'enroulement) est numérotée UX ;

- la tension présente, au centre de l'enroulement, entre les câbles C1 et C2 est numérotée V1, celle présente entre les câbles C2 et C3 est numérotée V2,..., celle présente entre les câbles C(X-1) et CX est numérotée V(X-1) ;

- la tension présente, au centre de l'enroulement, entre les câble C1 et CX (après un tour de l'enroulement) est numérotée VX ;

- la couche isolante présente entre les câbles C1 et C2 est numérotée E1, celle présente entre les câbles C2 et C3 est numérotée E2,..., celle présente entre les câbles C(X-1) et CX est numérotée E(X-1) ;

- la couche isolante présente entre les câble CX et C1 est numérotée H1.

Les tensions sont représentées par des flèches sur les dessins mais seule la valeur absolue de ces tensions est considérée dans le présent texte.

La figure 2 est relative à un premier mode de réalisation de l'invention visant un limiteur de courant L1 qui comporte un conducteur de type supraconducteur F1. Le conducteur F1 est constitué de quatre câbles supraconducteurs C1, C2, C3, C4 enroulés parallèlement, sensiblement sous forme de spirale, avec quatre couches d'isolant E1, E2, E3, H1.

Au niveau de la périphérie de la spirale, le câble C1 est relié à un terminal de connexion T1 et le câble C4 est relié à un terminal de connexion T2. Les terminaux de

connexion T1 et T2 sont les deux bornes par lesquelles le limiteur de courant L1 peut être relié à un circuit électrique pour y remplir sa fonction qui est de limiter le courant, dans ce circuit. Lorsque le limiteur de courant agit pour limiter le courant, le conducteur F1 devient fortement résistif et une tension apparait entre ces deux terminaux de connexion T1, T2. Cette tension est de niveau haute tension, dans la présente application.

Les deux terminaux de connexion T1, T2 sont placés dans la même zone de la périphérie de la spirale mais sont disposés de part et d'autre de l'épaisseur constituée des quatre câbles supraconducteurs C1, C2, C3, C4 et des trois couches d'isolant E1, E2, E3 prises entre eux. Sur la périphérie de la spirale, les câbles supraconducteurs C2 et C3, au centre de cette épaisseur, sont électriquement reliés entre eux par une boucle de pontage B1.

Le câble C4, raccordé au terminal de connexion T2, et le câble C3, raccordé à la boucle de pontage B1, sont de plus électriquement reliés ensemble au centre de la spirale, grâce à une boucle de pontage P1 et forment ainsi une première paire de câbles supraconducteurs. De même, le câble C1, raccordé au terminal de connexion T1, et le câble C2, raccordé à la boucle de pontage B1, sont de plus électriquement reliés ensemble au centre de la spirale, grâce à une boucle de pontage P2 et forment ainsi une deuxième paire de câbles supraconducteurs. Les boucles de pontage P1, P2 sont ici adjacentes et alignées.

Le conducteur F1 parcourt ainsi, grâce aux deux paires C1, C2 et C3, C4 de câbles supraconducteurs, deux allers-retours entre la périphérie et le centre de la spirale.

Les câbles supraconducteurs C1 à C4 forment un faisceau enroulé sur lui-même, l'une des couches d'isolant H1 formant une couche d'isolant de faisceau disposée entre deux bobinages du faisceau, tandis que les autres couches d'isolant E1 à E3 forment des couches d'isolant de câble disposées chacune entre deux câbles supraconducteurs.

Une tension se développe aux bornes du limiteur de courant L1 et dans sa structure, lorsqu'il devient résistif par perte des caractéristiques supraconductrices des câbles C1, C2, C3, C4 en réponse à une augmentation du courant due, par exemple à un défaut du circuit. La tension présente dans ce cas entre les terminaux de connexion

T1, T2 est notée UT sur la figure 2. La distance entre les terminaux de connexion T1, T2 est fonction des épaisseurs des câbles supraconducteurs et des couches d'isolant.

De plus, chaque couche d'isolant doit assurer la tenue en tension de la tension qui apparait entre les deux câbles qu'elle sépare. La tension la plus élevée qui se développe au sein du limiteur de courant L1, entre deux câbles déterminés, conditionne donc l'épaisseur maximale nécessaire pour les couches d'isolant E1, E2, E3, H1. Ces épaisseurs de couche d'isolant sont ici optimisées conjointement au positionnement des câbles en vue d'un gain en épaisseur d'enroulement et/ou d'une meilleure tenue en tension de l'ensemble.

Chacune des épaisseurs d'isolant E1, E2, et E3 doit tenir respectivement une tension U1, U2, U3 en périphérie de la bobine et une tension V1, V2, V3 au centre de la bobine. Dans cet exemple, U1 est supérieure à V1 et U3 est supérieure à V3, tandis que V2 est supérieure à U2. Ces tension correspondant au maximum à UT / 2 dans la mesure où le conducteur F1 fait deux allers-retours entre la périphérie et le centre de la bobine en parcourant les quatre câbles C1, C2, C3, C4. En effet, la tension moyenne entre le câble C1 et le câble C2 sera de UT / 4, mais cette tension entre C1 et C2 sera en réalité variable et vaudra au minimum 0 (V1), et au maximum 2 x UT / 4 (U1).

En effet, si l'on considère que le terminal T2 est au potentiel UT, et que le limiteur de courant L1, lorsqu'il devient résistif, ramène le terminal T1 au potentiel zéro, alors chaque câble C1 à C4 procure une chute de tension de UT / 4. Dans ce cas :

- Le terminal T2 est donc au potentiel UT ;

- la boucle de pontage P1 est au potentiel 3.UT / 4 (soit UT - ¼ UT) car le câble C4 a été parcouru entre le terminal T2 et la boucle de pontage P1 ;

- la boucle de pontage B1 est au potentiel UT / 2 (soit UT – 2/4 UT) car le câble C4 et le câble C3 ont été parcourus entre le terminal T2 et la boucle de pontage B1 ;

- la boucle de pontage P2 est au potentiel UT / 4 (soit UT - ¾ UT) car le câble C4, le câble C3 et le câble C2 ont été parcourus entre le terminal T2 et la boucle de pontage P2 ;

- le terminal T1 est donc au potentiel zéro.

La tension maximale qui doit donc être tenue par la couche isolante H1 est donc la tension U4 qui apparait entre le terminal T2 (au potentiel UT) et le câble C1 (relié par un tour de spirale au terminal T1). Chacune des autres couches d'isolant E1 à E3 devra quant à elle tenir une tension maximale équivalent à 2 x UT / 4 = UT / 2.

La tension la plus importante qui se développe au sein du limiteur de courant L1, lorsqu'il est résistif, est donc la tension U4. Le câble C1 étant relié au terminal T1, la tension U4 est égale à la tension UT diminuée de la chute de tension provoquée par un tour de spirale du câble C1. La tension U4 est inférieure à UT de, par exemple, quelques dizaines ou centaines de volts (si l'on considère quelques mètres de câble C1 provoquant une chute de tension de 50 à 100 V/m). On peut la considérer comme quasi-égale à UT.

Pour la tenue en tension de U4, la couche d'isolant H1 qui est disposée entre le câble C4 et le câble C1 a une épaisseur supérieure à celle des couches d'isolant E1, E2 et E3, et/ou éventuellement un matériau différent ou une structure différente.

Dans le présent exemple, la couche d'isolant H1 a une épaisseur égale au double de l'épaisseur d'une couche d'isolant E1, E2, ou E3. Plus généralement, la couche d'isolant H1 a de préférence une épaisseur de l'ordre de N fois l'épaisseur d'une couche d'isolant E1, E2, ou E3, N étant le nombre d'allers-retours.

La figure 2B représente le même mode de réalisation de l'invention que la figure 2, avec un simple prolongement des câbles au niveau des terminaux T1 et T2, de sorte que les terminaux et les boucles de pontage ne soient pas alignés.

Cette variante ne change que très légèrement la distribution des potentiels. Elle est applicable pour tous les autres modes de réalisation qui seront détaillés par la suite.

La figure 3 représente un deuxième mode de réalisation de l'invention où un limiteur de courant L2 comporte un conducteur de type supraconducteur F2 qui est ici constitué de huit câbles supraconducteurs C1 à C8 enroulés parallèlement, sensiblement sous forme de spirale, avec huit couches d'isolant E1 à E7 et H1.

Au niveau de la périphérie de la spirale, le câble C1 est relié à un terminal de connexion T1 et le câble C8 est relié à un terminal de connexion T2 pour la liaison du limiteur de courant L2 au circuit électrique à protéger.

Les deux terminaux de connexion T1, T2 sont placés dans la même zone de la périphérie de la spirale mais sont disposés de part et d'autre de l'épaisseur constituée des huit câbles supraconducteurs C1 à C8 et des sept couches d'isolant E1 à E7 prises entre eux. Entre les terminaux T1, T2, les câbles supraconducteurs C2 à C7, au centre de cette épaisseur, sont électriquement reliés entre eux, deux à deux, par des boucles de pontage. Les câbles C2 et C3 sont reliés par une boucle de pontage B1, les câbles C4 et C5 sont reliés par une boucle de pontage B2, et les câbles C6 et C7 sont reliés par une boucle de pontage B3.

Le câble C1, raccordé au terminal de connexion T1, et le câble C2, raccordé à la boucle de pontage B1, sont de plus électriquement reliés ensemble au centre de la spirale, grâce à une boucle de pontage P1 et forment ainsi une première paire de câbles supraconducteurs.

Le câble C3, raccordé à la boucle de pontage B1, et le câble C4, raccordé à la boucle de pontage B2, sont de plus électriquement reliés ensemble au centre de la spirale, grâce à une boucle de pontage P2 et forment ainsi une deuxième paire de câbles supraconducteurs.

Le câble C5, raccordé à la boucle de pontage B2, et le câble C6, raccordé à la boucle de pontage B3, sont de plus électriquement reliés ensemble au centre de la spirale, grâce à une boucle de pontage P3 et forment ainsi une troisième paire de câbles supraconducteurs.

Le câble C7, raccordé à la boucle de pontage B3, et le câble C8, raccordé au terminal de connexion T2, sont de plus électriquement reliés ensemble au centre de la spirale, grâce à une boucle de pontage P4 et forment ainsi une quatrième paire de câbles supraconducteurs.

Les boucles de pontage P1, P2, P3, P4 sont ici adjacentes mais non alignées, elles sont réparties régulièrement sur le contour interne de la bobine.

Le conducteur F2 parcourt ainsi, grâce aux quatre paires de câbles supraconducteurs C1 à C8, quatre allers-retours entre la périphérie et le centre de la spirale.

Au centre de la spirale, les boucles de pontage P1 à P4 sont angulairement réparties de manière régulière, en cercle, pour donner plus d'espace de montage à

chacune. En variante, ces boucles de pontage P1 à P4 peuvent être alignées comme celles du premier mode de réalisation ou répartie sur une portion du cercle central. Le montage en cercle peut simplifier la fabrication du limiteur de courant. Il suffit d'une pièce centrale sous forme de disque isolant avec quatre prises pour connecter les câbles.

Les câbles supraconducteurs C1 à C8 forment un faisceau enroulé sur lui-même, l'une des couches d'isolant H1 formant une couche d'isolant de faisceau disposée entre deux bobinages du faisceau, tandis que les autres couches d'isolant E1 à E7 forment des couches d'isolant de câble disposées chacune entre deux câbles supraconducteurs.

Dans ce deuxième mode de réalisation, la tension qui se développe aux bornes du limiteur de courant L2, lorsqu'il devient résistif, est également notée UT sur la figure 3.

Chacune des épaisseurs d'isolant E1 à E7 doit tenir une tension correspondant au maximum à UT / 4 dans la mesure où le conducteur F2 fait quatre allers-retours entre la périphérie et le centre de la bobine en parcourant les huit câbles C1 à C8.

En effet, si l'on considère que le terminal T2 est au potentiel UT, et que le limiteur de courant L2, lorsqu'il devient résistif, ramène le terminal T1 au potentiel zéro, alors chaque câble C1 à C8 procure une chute de tension de UT / 8. Dans ce cas :

- Le terminal T2 est donc au potentiel UT ;

- la boucle de pontage P4 est au potentiel 7.UT / 8 (soit UT - 1/8 UT) car seul le câble C8 a été parcouru entre le terminal T2 et la boucle de pontage P4 ;

- la boucle de pontage B3 est au potentiel 3.UT / 4 (soit UT – 2/8 UT) car le câble C8 et le câble C7 ont été parcourus entre le terminal T2 et la boucle de pontage B3 ;

- la boucle de pontage P3 est au potentiel 5.UT / 8 (soit UT - 3/8 UT) car le câble C8, le câble C7 et le câble C6 ont été parcourus entre le terminal T2 et la boucle de pontage P3 ;

- la boucle de pontage B2 est au potentiel UT / 2 (soit UT – 4/8 UT) car les câbles C8, C7, C6, et C5 ont été parcourus entre le terminal T2 et la boucle de pontage B2 ;

- la boucle de pontage P2 est au potentiel 3.UT / 8 (soit UT - 5/8 UT) car les câbles C8, C7, C6, C5, et C4 ont été parcourus entre le terminal T2 et la boucle de pontage P2 ;

- la boucle de pontage B1 est au potentiel UT / 4 (soit UT – 6/8 UT) car les câbles C8, C7, C6, C5, C4, et C3 ont été parcourus entre le terminal T2 et la boucle de pontage B1 ;

- la boucle de pontage P1 est au potentiel UT / 8 (soit UT - 7/8 UT) car les câbles C8, C7, C6, C5, C4, C3 et C2 ont été parcourus entre le terminal T2 et la boucle de pontage P1 ;

- le terminal T1 est donc au potentiel zéro.

La tension maximale qui doit être tenue par la couche isolante H1 est donc la tension U8 qui apparait entre le terminal T2 (au potentiel UT) et le câble C1 (relié par un tour de spirale au terminal T1). Chacune des autres couches d'isolant E1 à E7 doit quant à elle tenir une tension maximale équivalent à 2 x UT / 8 = UT / 4.

La tension la plus élevée qui se développe au sein du limiteur de courant L2 est donc la tension U8 qui est créée entre le terminal de connexion T2 et le câble C1 après que ce dernier ait fait un tour de spirale depuis le terminal T1. U8 est égale à la tension UT diminuée de la chute de tension provoquée par un tour de spirale du câble C1.

Pour la tenue en tension de U8, la couche d'isolant H1 qui est disposée entre le câble C8 et le câble C1 a une épaisseur supérieure à celle des couches d'isolant E1 à E7.

Dans le présent exemple, la couche d'isolant H1 a une épaisseur à peu près égale à 4 fois l'épaisseur d'une des couches d'isolant E1 à E7. Plus généralement dans ce mode de réalisation, la couche d'isolant H1 a de préférence une épaisseur de l'ordre de N fois l'épaisseur d'une couche d'isolant E1 à E7, N étant le nombre d'allers-retours.

La figure 4 est relative à un troisième mode de réalisation selon lequel le limiteur de courant L3 comporte un conducteur de type supraconducteur F3 constitué, comme dans le premier mode de réalisation, de quatre câbles supraconducteurs C1, C2, C3, C4 enroulés parallèlement, sensiblement sous forme de spirale, avec quatre couches d'isolant E1, E2, E3, H1.

Au niveau de la périphérie de la spirale, le câble C2 est relié à un terminal de connexion T1 et le câble C4 est relié à un terminal de connexion T2.

Les deux terminaux de connexion T1, T2 sont placés dans la même zone de la périphérie de la spirale mais sont disposés de part et d'autre du câble C3 et des deux couches d'isolant E2, E3 entourant ce dernier.

Selon ce troisième mode de réalisation :

- de part et d'autre du terminal T1, les câbles supraconducteurs C1 et C3 sont électriquement reliés par une boucle de pontage B1 ;

- Le câble C4, raccordé au terminal de connexion T2, et le câble C3, raccordé à la boucle de pontage B1, sont de plus électriquement reliés ensemble au centre de la spirale, grâce à une boucle de pontage P1 et forment ainsi une première paire de câbles supraconducteurs ;

- le câble C2, raccordé au terminal de connexion T1, et le câble C1, raccordé à la boucle de pontage B1, sont de plus électriquement reliés ensemble au centre de la spirale, grâce à une boucle de pontage P2 et forment ainsi une deuxième paire de câbles supraconducteurs.

Les boucles de pontage P1, P2 sont ici adjacentes et alignées. Elles peuvent également être disposées en cercle, de manière similaire à la figure 3.

Le conducteur F3 parcourt ainsi, grâce aux deux paires C1, C2 et C3, C4 de câbles supraconducteurs, deux allers-retours entre la périphérie et le centre de la spirale. Cependant, le parcours suivi pour ces allers-retours est différent de celui du premier mode de réalisation en raison du positionnement différent des boucles de pontage P1, P2, B1.

Dans ce troisième mode de réalisation, la tension qui se développe aux bornes du limiteur de courant L3 quand il devient résistif est également notée UT sur la figure 4.

Chacune des épaisseurs d'isolant E1, E2, et E3 doit tenir respectivement une tension U1, U2, U3, en périphérie de la bobine et V1, V2, V3, au centre de la bobine. Parmi ces tensions, la tension maximale est de UT / 2.

La répartition des potentiels, avec chaque câble C1 à C4 procurant une chute de tension de UT / 4, est la suivante :

- Le terminal T2 est donc au potentiel UT ;

- la boucle de pontage P1 est au potentiel 3.UT / 4 (soit UT - ¼ UT) car le câble C4 a été parcouru entre le terminal T2 et la boucle de pontage P1 ;

- la boucle de pontage B1 est au potentiel UT / 2 (soit UT – 2/4 UT) car le câble C4 et le câble C3 ont été parcourus entre le terminal T2 et la boucle de pontage B1 ;

- la boucle de pontage P2 est au potentiel UT / 4 (soit UT - ¾ UT) car le câble C4, le câble C3 et le câble C1 ont été parcourus entre le terminal T2 et la boucle de pontage P2 ;

- le terminal T1 est donc au potentiel zéro.

U4 a une valeur de UT / 2 augmentée de la valeur de la chute de tension provoquée par un tour de spirale, tandis que parmi U1, U2, U3, V1, V2, V3, la valeur maximale est de UT / 2. La tension maximale qui doit donc être tenue par la couche isolante H1 est donc la tension U4. Chacune des autres couches d'isolant E1 à E3 doit tenir une tension égale à UT / 2, tandis que la couche H1 doit tenir une tension légèrement supérieure.

Dans le présent exemple, les couches d'isolant E1 à E3 et H1 sont d'égale épaisseur, étant toutes alignées sur l'épaisseur de H1.

En variante, la couche d'isolant H1 peut avoir, comme dans le premier mode de réalisation, une épaisseur différente de celles des couches d'isolant E1 à E3. Dans ce cas, elle aurait une épaisseur supérieure car la tension qu'elle doit tenir est supérieure de la valeur correspondant à la chute de tension liée à un tour de spirale, ce

qui peut être une valeur importante dans le cas de spirales à grand diamètre et faible nombre de tours.

La figure 5 représente un quatrième mode de réalisation de l'invention, qui est une variante du troisième mode de réalisation. Cette variante vise un limiteur de courant L4 muni d'un câble de type supraconducteur F4, avec une disposition différente des bouches de pontage P1, P2.

Selon ce quatrième mode de réalisation :

- de part et d'autre du terminal T1, les câbles supraconducteurs C1 et C3 sont électriquement reliés par une boucle de pontage B1 ;

- Le câble C4, raccordé au terminal de connexion T2, et le câble C1, raccordé à la boucle de pontage B1, sont de plus électriquement reliés ensemble au centre de la spirale, grâce à une boucle de pontage P1 et forment ainsi une première paire de câbles supraconducteurs ;

- le câble C2, raccordé au terminal de connexion T1, et le câble C3, raccordé à la boucle de pontage B1, sont de plus électriquement reliés ensemble au centre de la spirale, grâce à une boucle de pontage P2 et forment ainsi une deuxième paire de câbles supraconducteurs.

A la différence du troisième mode de réalisation, les boucles de pontage P1, P2 ne sont pas adjacentes. Elles sont ici concentriques. Les boucles de pontage P1 et P2 ainsi concentriques donnent des possibilités différentes de connexion au centre de la spirale, par exemple par une seule et même pièce recourbée, à deux pistes parallèles.

De même que dans le troisième mode de réalisation, la répartition des tensions propres à ce quatrième mode de réalisation est la suivante :

- Le terminal T2 est donc au potentiel UT ;

- la boucle de pontage P1 est au potentiel 3.UT / 4 ;

- la boucle de pontage B1 est au potentiel UT / 2 ;

- la boucle de pontage P2 est au potentiel UT / 4 ;

- le terminal T1 est au potentiel zéro.

La tension maximale qui doit donc être tenue par l'une des couches isolantes E1, E2, E3, ou H1 est donc également la tension U4. Chacune des couches d'isolant E1 à E3 doit tenir au maximum une tension égale à UT / 2, tandis que la couche H1 doit tenir une tension supérieure. Cela permet également d'avoir des couches d'isolant E1 à E3 et H1 d'égale épaisseur, alignées sur celle de H1.

En variante, la couche d'isolant H1 peut également avoir, comme dans le premier mode de réalisation, une épaisseur différente de celles des couches d'isolant E1 à E3, notamment une épaisseur supérieure.

Les figures 6 à 8 visent des modes de réalisation dans lesquels le limiteur de courant comporte 6 câbles supraconducteurs répartis en trois paires.

La figure 6 représente un cinquième mode de réalisation de l'invention où un limiteur de courant L5 comporte un conducteur de type supraconducteur F5 qui est ici constitué de 6 câbles supraconducteurs C1 à C6 enroulés avec six couches d'isolant E1 à E5 et H1.

Les câbles C2 et C5 sont reliés respectivement, sur la périphérie de la spirale, aux terminaux de connexion T1 et T2.

Les deux terminaux de connexion T1, T2 sont ici disposés de part et d'autre des câbles C3 et C4 avec leurs trois couches d'isolant relatives E2, E3, E4.

Au niveau de la périphérie de la spirale, la boucle de pontage B1 relie le câble C1 et le câble C3, et la boucle de pontage B2 relie le câble C4 et le câble C6.

Au niveau du centre de la spirale :

- les câbles C5 et C6 sont reliés par une boucle de pontage P1, formant une première paire de câbles supraconducteurs ;

- les câbles C3 et C4 sont reliés par une boucle de pontage P2, formant une deuxième paire de câbles supraconducteurs ;

- les câbles C1 et C2 sont reliés par une boucle de pontage P3, formant une troisième paire de câbles supraconducteurs.

Les boucles de pontage P1, P2, P3 sont ici adjacentes et alignées.

Le conducteur F5 parcourt ainsi, grâce aux trois paires de câbles supraconducteurs C1 à C6, trois allers-retours entre la périphérie et le centre de la spirale.

Selon ce cinquième mode de réalisation, si l'on considère que le terminal T2 est au potentiel UT, et que le limiteur de courant L5, lorsqu'il devient résistif, ramène le terminal T1 au potentiel zéro, alors chaque câble C1 à C6 procure une chute de tension de UT / 6. Dans ce cas :

- Le terminal T2 est donc au potentiel UT ;
- la boucle de pontage P1 est au potentiel 5.UT / 6 (soit UT – 1/6 UT) ;
- la boucle de pontage B2 est au potentiel 2.UT / 3 (soit UT – 2/6 UT) ;
- la boucle de pontage P2 est au potentiel UT / 2 (soit UT – 3/6 UT) ;
- la boucle de pontage B1 est au potentiel UT / 3 (soit UT – 4/6 UT) ;
- la boucle de pontage P3 est au potentiel UT / 6 (soit UT – 5/6 UT) ;
- le terminal T1 est donc au potentiel zéro.

A la différence des modes de réalisation précédents, le terminal T2 n'est pas adjacent au câble C1 vers le centre de l'enroulement. La tension U5 se développe entre le terminal T2 et le câble C6. La tension notée U6 sur la figure 6 est celle que apparait entre le câble C6 et le câble C1 au niveau de la zone située à un tour de spirale du terminal T1.

Parmi les tensions U1, U2, U3, U4, U5, V1, V2, V3, V4, V5 la valeur maximale est de UT / 3. La tension U6 a également une valeur maximale proche de UT / 3 (car elle apparait entre le câble C6 au potentiel 2.UT / 3 et le câble C1 au potentiel UT / 3 diminué de la chute de tension causée par un tour de spirale).

Dans ce cinquième mode de réalisation, la tension la plus élevée qui se développe au sein du limiteur de courant L5 est la tension V6 qui apparait au centre de la spirale, entre la boucle de pontage P3 et le câble C6. Cette tension est proche de 2.UT / 3. Le potentiel du câble C6 à cet endroit est en effet proche de 5.UT / 6 (car cet endroit est à un tour de spirale de la boucle de pontage P1), tandis que la boucle de pontage P3 est au potentiel UT / 6.

La couche d'isolant H1 est donc ici dimensionnée pour la tenue en tension de V6. Dans le présent exemple illustré, toutes les couches d'isolant sont de la même épaisseur. Les épaisseurs des couches E1 à E5 sont donc alignées sur celle de H1.

En variante, comme dans le premier et deuxième mode de réalisation, la couche d'isolant H1 peut être d'une épaisseur plus importante que les autres, elle sera alors dimensionnée pour la tenue d'une tension de 2.UT / 3 tandis que l'épaisseur des autres couches d'isolant E1 à E5 sera dans ce cas plus petite, dimensionnée pour la tenue d'une tension de UT / 3. Selon un exemple de cette variante, l'épaisseur de la couche d'isolant H1 peut valoir le double de l'épaisseur des autres couches d'isolant E1 à E5.

La figure 7 est relative à un sixième mode de réalisation qui est une variante du cinquième mode de réalisation. Cette variante vise une disposition différente des boucles de pontage P1, P2, P3, B1, B2 qui modifie le parcours du conducteur F6 et donc la répartition des tensions au sein du limiteur de courant L6.

Selon ce sixième mode de réalisation :

- les câbles C3 et C6 sont reliés respectivement, sur la périphérie de la spirale, aux terminaux de connexion T1 et T2 ;

- Les deux terminaux de connexion T1, T2 sont ici disposés de part et d'autre des câbles C4 et C5 avec leurs trois couches d'isolant relatives E3, E4, E5.

Au niveau de la périphérie de la spirale, la boucle de pontage B1 relie le câble C1 et le câble C2, et la boucle de pontage B2 relie le câble C4 et le câble C5.

Au niveau du centre de la spirale :

- les câbles C5 et C6 sont reliés par une boucle de pontage P1, formant la première paire de câbles supraconducteurs ;

- les câbles C1 et C4 sont reliés par une boucle de pontage P2, formant la deuxième paire de câbles supraconducteurs ;

- les câbles C2 et C3 sont reliés par une boucle de pontage P3, formant la troisième paire de câbles supraconducteurs.

Les boucles de pontage P2 et P3 sont concentriques et sont alignées avec la boucle de pontage P1.

La répartition des potentiels est alors la suivante :

- Le terminal T2 est au potentiel UT ;
- la boucle de pontage P1 est au potentiel 5.UT / 6 (soit UT – 1/6 UT) ;
- la boucle de pontage B2 est au potentiel 2.UT / 3 (soit UT – 2/6 UT) ;
- la boucle de pontage P2 est au potentiel UT / 2 (soit UT – 3/6 UT) ;
- la boucle de pontage B1 est au potentiel UT / 3 (soit UT – 4/6 UT) ;
- la boucle de pontage P3 est au potentiel UT / 6 (soit UT – 5/6 UT) ;
- le terminal T1 est au potentiel zéro.

Selon ce sixième mode de réalisation, le terminal T2 est adjacent au câble C1.

La répartition des tensions notées sur la figure 7 est la suivante :

- parmi U5 et V5, la valeur maximale est de UT / 3 ;
- parmi U4 et V4, la valeur maximale est de UT / 3 ;
- parmi U3 et V3, la valeur maximale est de 2.UT / 3 ;
- parmi U2 et V2, la valeur maximale est de UT / 3 ;
- parmi U1 et V1, la valeur maximale est de UT / 3 ;
- U6 vaut un peu moins de 2.UT / 3 (il vaut 2.UT / 3 diminué de la chute de tension d'un tour de spirale).

Dans ce sixième mode de réalisation, la tension la plus élevée qui se développe au sein du limiteur de courant L6 est la tension U3 qui apparait entre la boucle de pontage B2 et le terminal T1, et qui vaut 2.UT / 3.

La couche d'isolant E3 est donc ici dimensionnée pour la tenue en tension de U3. Dans le présent exemple illustré, toutes les couches d'isolant sont de la même

épaisseur. Les épaisseurs des couches E1, E2, E4, E5, H1 sont donc alignées sur celle de E3.

En variante, comme dans le premier et deuxième mode de réalisation, les couches d'isolant E3 et H1 peuvent être d'une épaisseur plus importante que les autres, elles seront alors dimensionnées pour la tenue d'une tension de 2.UT / 3 tandis que l'épaisseur des autres couches d'isolant E1, E2, E4, E5 sera dans ce cas plus petite.

La figure 8 est relative à un septième mode de réalisation qui est une variante du sixième mode de réalisation. Cette variante vise une disposition différente des boucles de pontage P1, P2, P3 au centre de la spirale. Le parcours du conducteur F7 n'est cependant pas modifié et donc la répartition des tensions au sein du limiteur de courant L7 est la même que pour le sixième mode de réalisation.

Selon ce septième mode de réalisation, les boucles de pontage P1 et P3 sont diamétralement opposées, tandis que la boucle de pontage P2 relie le câble C1 au câble C4 en traversant diamétralement le centre de la spirale, les deux autres boucles de pontage P1, P3 étant situées de part et d'autre de cette dernière.

La répartition des potentiels et des tensions étant la même que pour le sixième mode de réalisation, la tension la plus élevée qui se développe au sein du limiteur de courant L7 est donc la tension U3 qui apparait entre la boucle de pontage B2 et le terminal T1, et qui vaut 2.UT / 3.

Les couches d'isolant sont dimensionnées comme pour le sixième mode de réalisation, avec, en variante, des couches d'isolant d'épaisseurs différentes, notamment avec des épaisseurs E3 et H1 plus importantes que les autres.

La disposition des boucles de pontage P1, P2, P3 au centre de la spirale permet des possibilités supplémentaires de connexion.

La figure 9 est relative à un huitième mode de réalisation où un limiteur de courant L8 comporte un conducteur de type supraconducteur F8 qui est ici constitué de 8 câbles supraconducteurs C1 à C8 enroulés avec huit couches d'isolant E1 à E7 et H1.

Selon ce huitième mode de réalisation :

- les câbles C4 et C8 sont reliés respectivement, sur la périphérie de la spirale, aux terminaux de connexion T1 et T2 ;

- Les deux terminaux de connexion T1, T2 sont ici disposés de part et d'autre des câbles C5 à C7 avec leur quatre couches d'isolant relatives E4 à E7 ;

Au niveau de la périphérie de la spirale, la boucle de pontage B1 relie le câble C1 et le câble C5, la boucle de pontage B2 relie le câble C2 et le câble C3 et la boucle de pontage B3 relie le câble C6 et le câble C7.

Au niveau du centre de la spirale :

- les câbles C7 et C8 sont reliés par une boucle de pontage P1, formant la première paire de câbles supraconducteurs ;

- les câbles C5 et C6 sont reliés par une boucle de pontage P2, formant la deuxième paire de câbles supraconducteurs ;

- les câbles C3 et C4 sont reliés par une boucle de pontage P3, formant la troisième paire de câbles supraconducteurs ;

- les câbles C1 et C2 sont reliés par une boucle de pontage P4, formant la quatrième paire de câbles supraconducteurs.

Les boucles de pontage P1, P2, P3 et P4 sont ici adjacentes et alignées.

Considérant que chaque câble C1 à C8 procure une chute de tension de UT / 8, lors de l'apparition d'une tension UT aux bornes du limiteur de courant L8 devenu résistif :

- Le terminal T2 est donc au potentiel UT ;

- la boucle de pontage P1 est au potentiel 7.UT / 8 (soit UT – 1/8 UT) ;

- la boucle de pontage B3 est au potentiel 3.UT / 4 (soit UT – 2/8 UT) ;

- la boucle de pontage P2 est au potentiel 5.UT / 8 (soit UT – 3/8 UT) ;

- la boucle de pontage B1 est au potentiel UT / 2 (soit UT – 4/8 UT) ;

- la boucle de pontage P4 est au potentiel 3.UT / 8 (soit UT – 5/8 UT) ;

- la boucle de pontage B2 est au potentiel UT / 4 (soit UT – 6/8 UT) ;

- la boucle de pontage P3 est au potentiel UT / 8 (soit UT – 7/8 UT) ;

- le terminal T1 est donc au potentiel zéro.

Les tensions maximales qui doivent donc être tenues par l'une les couches isolantes E1 à E7, ou H1 sont donc :

- la tension U4 qui apparait entre le câble C5, au niveau de la boucle de pontage B1, et le terminal T1, et qui vaut au maximum UT / 2 ;

- la tension V4 qui apparait au centre de la spirale, entre les boucles de pontage P2 et P3, et qui vaut UT / 2 ;

- la tension U8 qui apparait en périphérie de la spirale, entre le terminal T2 et le câble C1, et qui vaut au maximum UT / 2 diminué de la chute de tension d'un tour de spirale en périphérie ;

- la tension V8 qui apparait au centre de la spirale, entre la boucle de pontage P4 et le câble C8, et qui vaut au maximum UT / 2 diminué de la chute de tension d'un tour de spirale au centre.

L'agencement des boucles de pontage P1 à P4, B1 à B3 permet de faire en sorte que seule la couche d'isolant E4 assure la tenue en tension des tensions U4 et V4. Cette dernière doit donc être dimensionnée pour la tenue en tension de UT / 2. Chacune des autres couches d'isolant E1 à E3, E5 à E7 doit quant à elle tenir une tension équivalent à UT / 4, sauf H1 qui peut être dimensionnée comme E4.

Dans le présent exemple illustré, toutes les couches d'isolant sont de la même épaisseur. Les épaisseurs des couches E1 à E3, E5 à E7 sont donc alignées sur celle de E4 et H1.

En variante, comme dans le premier et deuxième mode de réalisation, les couches d'isolant E4 et H1 peuvent être d'une épaisseur plus importante que les autres, par exemple du double de l'épaisseur.

La figure 10 est relative à un neuvième mode de réalisation qui est une variante du huitième mode de réalisation. Le limiteur de courant L9 comporte ici un conducteur de type supraconducteur F9 qui est ici constitué de 8 câbles supraconducteurs C1 à C7 enroulés avec huit couches d'isolant E1 à E7 et H1. Selon cette variante, les boucles de pontage P1, P2, P3, et P4 sont distribuées régulièrement

sur le centre de la spirale. Les boucles de pontage P1 et P3 sont diamétralement opposées, de même que les boucles de pontage P2 et P4. Les boucles de pontage P1, P2, P3, P4 sont ici adjacentes mais non alignées, elles sont réparties régulièrement sur le contour interne de la bobine.

Les autres caractéristiques de ce neuvième mode de réalisation sont les mêmes que pour le huitième mode de réalisation.

La figure 11 est relative à un dixième mode de réalisation où un limiteur de courant L10 comporte un conducteur de type supraconducteur F10 qui est ici constitué de 8 câbles supraconducteurs C1 à C8 enroulés avec huit couches d'isolant E1 à E7 et H1.

Selon ce dixième mode de réalisation :

- les câble C3 et C8 sont reliés respectivement, sur la périphérie de la spirale, aux terminaux de connexion T1 et T2 ;

- Les deux terminaux de connexion T1, T2 sont ici disposés de part et d'autre des câbles C4 à C7 avec leurs cinq couches d'isolant relatives E3 à E7.

Au niveau de la périphérie de la spirale, la boucle de pontage B1 relie le câble C1 et le câble C2, la boucle de pontage B2 relie le câble C4 et le câble C5, la boucle de pontage B3 relie le câble C6 et le câble C7.

Au niveau du centre de la spirale :

- les câbles C7 et C8 sont reliés par une boucle de pontage P1, formant la première paire de câbles supraconducteurs ;

- les câbles C5 et C6 sont reliés par une boucle de pontage P2, formant la deuxième paire de câbles supraconducteurs ;

- les câbles C4 et C1 sont reliés par une boucle de pontage P3, formant la troisième paire de câbles supraconducteurs ;

- les câbles C2 et C3 sont reliés par une boucle de pontage P4, formant la quatrième paire de câbles supraconducteurs.

Les boucles de pontage P1 et P2 sont ici adjacentes et alignées, tandis que les boucles de pontage P3 et P4 sont concentriques.

La répartition des potentiels est alors la suivante :

- Le terminal T2 est donc au potentiel UT ;

- la boucle de pontage P1 est au potentiel 7.UT / 8 (soit UT – 1/8 UT) ;

- la boucle de pontage B3 est au potentiel 3.UT / 4 (soit UT – 2/8 UT) ;

- la boucle de pontage P2 est au potentiel 5.UT / 8 (soit UT – 3/8 UT) ;

- la boucle de pontage B2 est au potentiel UT / 2 (soit UT – 4/8 UT) ;

- la boucle de pontage P3 est au potentiel 3.UT / 8 (soit UT – 5/8 UT) ;

- la boucle de pontage B1 est au potentiel UT / 4 (soit UT – 6/8 UT) ;

- la boucle de pontage P4 est au potentiel UT / 8 (soit UT – 7/8 UT) ;

- le terminal T1 est donc au potentiel zéro.

Selon ce dixième mode de réalisation, le terminal T2 est adjacent au câble C1.

La répartition des tensions notées sur la figure 11 (en périphérie de la spirale) est donc la suivante :

- U7 vaut UT / 4 ;

- U6 vaut zéro ;

- U5 vaut UT / 4 ;

- U4 vaut zéro ;

- U3 vaut UT / 2 ;

- U2 vaut UT / 4 ;

- U1 vaut zéro ;

- U8 vaut un peu plus que 3.UT / 4 (U8 vaut 3.UT / 4 augmentée de la chute de tension d'un tour de spirale).

Au centre de la spirale, parmi les tensions V1 à V7, la valeur maximale est de UT / 4, et la tension V8 est proche de UT / 2.

Dans ce dixième mode de réalisation, la tension la plus élevée qui se développe au sein du limiteur de courant L10 est la tension U8 qui apparait entre le terminal T2 et le câble C1 adjacent, et vaut un peu plus de 3.UT / 4.

La couche d'isolant H1 est donc ici dimensionnée pour la tenue en tension de U8. Dans le présent exemple illustré, toutes les couches d'isolant sont de la même épaisseur. Les épaisseurs des couches E1 à E7 sont donc alignées sur celle de H1.

En variante, comme dans le premier et deuxième mode de réalisation, la couche d'isolant H1 peut être d'une épaisseur plus importante que les autres, elle sera alors dimensionnée pour la tenue d'une tension supérieure à 3.UT / 4 tandis que l'épaisseur des autres couches d'isolant sera dans ce cas plus petite.

En variante, chaque couche d'isolant a une épaisseur propre qui est adaptée à la tension qu'elle doit tenir. Ainsi, selon cette variante :

- E7, E6, E5, E4, E2 et E1 ont une épaisseur dimensionnée pour la tenue en tension de UT / 4 car toutes ces couches d'isolant auront à tenir une tension de l'ordre de U/4, soit en périphérie, soit au centre de la bobine ;

- E3 a une épaisseur double de E7 ;

- H1 a la plus grande épaisseur, dimensionnée pour la tenue en tension d'un peu plus de 3.UT / 4.

La figure 12 représente un onzième mode de réalisation où un limiteur de courant L11 comporte un conducteur de type supraconducteur F11 qui est une variante du neuvième mode de réalisation. Les boucles de pontage P1, P2, P3, P4 au centre de la spirale sont identiques aux boucles de pontage correspondantes du neuvième mode de réalisation, de même que les câbles C4 et C8, reliés respectivement, sur la périphérie de la spirale, aux terminaux de connexion T1 et T2.

Selon cette variante, au niveau de la périphérie de la spirale, la boucle de pontage B1 relie le câble C1 et le câble C7, la boucle de pontage B2 relie le câble C2 et le câble C6, la boucle de pontage B3 relie le câble C3 et le câble C5. Les boucles de pontage B1, B2 et B3 sont concentriques.

La répartition des potentiels est alors la suivante :

- Le terminal T2 est au potentiel UT ;

- la boucle de pontage P1 est au potentiel 7.UT / 8 (soit UT – 1/8 UT) ;

- la boucle de pontage B1 est au potentiel 3.UT / 4 (soit UT – 2/8 UT) ;

- la boucle de pontage P4 est au potentiel 5.UT / 8 (soit UT – 3/8 UT) ;

- la boucle de pontage B2 est au potentiel UT / 2 (soit UT – 4/8 UT) ;

- la boucle de pontage P2 est au potentiel 3.UT / 8 (soit UT – 5/8 UT) ;

- la boucle de pontage B3 est au potentiel UT / 4 (soit UT – 6/8 UT) ;

- la boucle de pontage P3 est au potentiel UT / 8 (soit UT – 7/8 UT) ;

- le terminal T1 est au potentiel zéro.

Selon ce onzième mode de réalisation, le terminal T2 est adjacent au câble C1.

La répartition des tensions notées sur la figure 12 est donc la suivante :

- U1 à U7 valent UT / 4 ;

- U8 vaut un peu moins que UT / 4 ;

- V2 et V6 valent UT / 2.

- V4 et V8 valent UT / 4.

Dans ce onzième mode de réalisation, les tensions les plus élevées qui se développent au sein du limiteur de courant L11 sont les tensions V2 et V6 qui apparaissent au centre de la spirale, respectivement entre la boucle de pontage P3 et le câble C2 adjacent, et entre la boucle de pontage P1 et le câble C6, et valent un peu plus de UT / 2.

Les couches d'isolant E2 et E6 sont donc ici dimensionnées pour la tenue des tensions V2 et V6. Dans le présent exemple illustré, toutes les couches d'isolant sont de la même épaisseur. Les épaisseurs des couches E1, E3, E4, E5, E7, H1 sont donc alignées sur celle de E2 et E6.

En variante, comme dans le premier et deuxième mode de réalisation, les couches d'isolant E2 et E6 peuvent être les seules à être d'une épaisseur plus importante que les autres, elles seront alors dimensionnée pour la tenue d'une tension

légèrement supérieure à UT / 2 tandis que l'épaisseur des autres couches d'isolant sera dans ce cas plus petite.

La figure 13 illustre un douzième mode de réalisation selon lequel le limiteur de courant L12 comporte 8 câbles supraconducteurs. Les câbles C1, C4, C5, et C8 sont relié ensemble, au niveau de la périphérie de la bobine par trois boucles de pontage B10 qui sont également reliées au terminal de connexion T1. Les câbles C2, C3, C6, et C7 sont également reliés ensemble, au niveau de la périphérie de la bobine par trois boucles de pontage B20 qui sont également reliées au terminal de connexion T2.

Au niveau du centre de la bobine :

- les câbles C1 et C2 sont reliés par une boucle de pontage P4 ;

- les câbles C3 et C4 sont reliés par une boucle de pontage P3 ;

- les câbles C5 et C6 sont reliés par une boucle de pontage P2 ;

- les câbles C7 et C8 sont reliés par une boucle de pontage P1.

Les couches d'isolant E1, E3, E5, et E7 ont la même épaisseur dimensionnée pour la tenue en tension de la tension maximale apparaissant entre T1 et T2.

Les couches d'isolant E2, E4, E6, et H1 ont une même épaisseur qui est largement inférieure à l'épaisseur des couches d'isolant E1, E3, E5, et E7.

La figure 14 illustre un treizième mode de réalisation selon lequel le limiteur de courant L13 comporte 8 câbles supraconducteurs. Les câbles C1, C2, C3, et C4 sont relié ensemble, au niveau de la périphérie de la bobine, directement par le terminal de connexion T1. Les câbles C5, C6, C7, et C8 sont également reliés ensemble, au niveau de la périphérie de la bobine, directement par le terminal de connexion T2.

Au niveau du centre de la bobine :

- les câbles C1 et C8 sont reliés par une boucle de pontage P1 ;

- les câbles C2 et C7 sont reliés par une boucle de pontage P2 ;

- les câbles C3 et C6 sont reliés par une boucle de pontage P3 ;

- les câbles C4 et C5 sont reliés par une boucle de pontage P4.

Les couches d'isolant E4 et H1 ont la même épaisseur dimensionnée pour la tenue en tension de la tension maximale apparaissant entre T1 et T2.

Les couches d'isolant E1, E2, E3, E5, E6, et E7 ont une même épaisseur qui est largement inférieure à l'épaisseur des couches d'isolant E4 et H1.

La figure 15 illustre une variante du mode de réalisation de la figure 14. Selon cette variante, le limiteur de courant L14 comporte en son centre un disque de liaison 10 portant les quatre boucles de liaison P1, P2, P3, P4.

Les liaisons au niveau du centre de la bobine sont les mêmes que pour la figure 14 :

- les câbles C1 et C8 sont reliés par la boucle de pontage P1 ;

- les câbles C2 et C7 sont reliés par la boucle de pontage P2 ;

- les câbles C3 et C6 sont reliés par la boucle de pontage P3 ;

- les câbles C4 et C5 sont reliés par la boucle de pontage P4.

Cependant, les boucles de liaison traversent le disque 10 qui les supporte et facilite le montage et les connexions au centre de la bobine. Les autres caractéristiques sont identiques à celles de la figure 14.

La figure 16 illustre un quinzième mode de réalisation selon lequel le limiteur de courant L15 comporte 12 câbles.

Au niveau de la périphérie :

- les câbles C1, C2 et C3 sont reliés au terminal T1.
- les câbles C10, C11 et C12 sont reliés au terminal T2.
- les câbles C4 et C9 sont reliés à la boucle de pontage B1
- les câbles C5 et C8 sont reliés à la boucle de pontage B2
- les câbles C6 et C7 sont reliés à la boucle de pontage B3.

Au niveau du centre de la bobine :

- les câbles C1 et C6 sont reliés à la boucle de pontage P4.
- les câbles C2 et C5 sont reliés à la boucle de pontage P5.
- les câbles C3 et C4 sont reliés à la boucle de pontage P6.
- les câbles C7 et C12 sont reliés à la boucle de pontage P1.
- les câbles C8 et C11 sont reliés à la boucle de pontage P2.
- les câbles C9 et C10 sont reliés à la boucle de pontage P3.

Les couches d'isolant E1, E2, E4, E5, E7, E8, E10 et E11 ont une même épaisseur qui peut être réduite au minimum.

Les couches d'isolant E3, E6, E9 et H1 peuvent être dimensionnées d'une manière similaire au cas de la figure 2.

En conclusion, dans tous les modes de réalisation décrits ci-dessus, on joue sur la disposition des boucles de pontage et/ou des épaisseurs de couches isolantes pour augmenter la tenue en tension et/ou rendre plus compact le limiteur de courant.

D'autres variantes de réalisation du limiteur de courant peuvent être mises en œuvre sans sortir du cadre de l'invention. Par exemple, chaque conducteur de type supraconducteur peut être formé d'un conducteur unique, ou peut être formé de plusieurs câbles supraconducteurs mis en parallèle entre eux (ce qui conduit à une simple augmentation de la section du conducteur). Les boucles de pontage quant à elles peuvent être réalisées de différentes manières : conducteur replié sur lui-même, pièce munie d'un bornier de connexion et de pistes conductrices intermédiaires, dispositifs mécaniques de fixation, ou autre. La résistance électrique des boucles de pontage est de préférence faible, par exemple, du niveau de celle du cuivre.

Par ailleurs, le limiteur de courant peut avoir un nombre quelconque de tours de spirale, bien au-delà du faible nombre de tours des exemples schématiques décrits ici en vue d'expliquer le principe. L'expression « enroulements en spirale » doit de plus être comprise au sens large, c'est à dire que le conducteur de type supraconducteur est enroulé en couches par rotations successives, la section pouvant être, par exemple, carrée ou d'une quelconque autre forme.

Sur la vue schématique des figures 4, 5, 6, 9, 10, 12, et 13 une ou des boucles de pontage entourent un terminal de connexion, étant entendu que l'homme du métier saura réaliser de telles connexions sur le dispositif réel, par exemple en faisant transiter le terminal en question par un plan perpendiculaire au plan du dessin, en vue de le dégager des boucles de pontage et de réaliser les connexions de bornes.

Dans les exemples décrits, le centre de la bobine forme une première zone de connexion munie de boucles de pontage et la périphérie de la bobine forme une deuxième zone de connexion munie de boucles de pontage, de sorte que deux câbles supraconducteurs sont électriquement reliés entre eux au niveau de la première zone de connexion et, au niveau de la deuxième zone de connexion, l'un des câbles supraconducteurs d'une paire est électriquement relié à l'un des câbles supraconducteurs d'une autre paire, l'autre câble supraconducteur de chaque paire étant relié à un terminal de connexion électrique ou à une paire supplémentaire. Cependant, en variante, la première zone de connexion peut être située en périphérie de la bobine, et la deuxième zone de connexion peut être située au centre de la bobine, les boucles de pontage étant alors inversées, et les terminaux de connexion se retrouvent alors au centre de la bobine.

Par ailleurs, dans tous les schémas à l'exception de la figure 2B, pour des raisons de simplicité, on a présenté les terminaux de connexion T1 et T2 côte à côte. Cependant, les terminaux de connexion peuvent également être décalés angulairement (par exemple d'un quart de tour), si leur raccordement à un circuit est ainsi facilité.

REVENDICATIONS

1. Dipôle limiteur de courant (L1 à L15) à supraconducteur, comportant un conducteur de type supraconducteur (F1 à F15) enroulé pour former une bobine bifilaire s'étendant selon un plan unique, une couche d'isolant (E1 à E11, H1) étant disposée entre deux spires de ladite bobine, caractérisé en ce que ledit conducteur de type supraconducteur (F1 à F15) est constitué d'au moins quatre câbles supraconducteurs (C1 à C12) distincts enroulés parallèlement et agencés selon au moins deux paires, chacune des paires étant formée de deux desdits câbles supraconducteurs (C1 à C12), les câbles supraconducteurs (C1 à C12) étant reliés entre eux de sorte que le conducteur de type supraconducteur s'étende selon au moins deux allers-retours entre la périphérie et le centre de la bobine en reliant un premier terminal de connexion électrique (T1) à un deuxième terminal de connexion électrique (T2).

2. Dipôle limiteur de courant selon la revendication 1, caractérisé en ce que chacune des paires est formée de deux desdits câbles supraconducteurs (C1 à C12) qui sont électriquement reliés entre eux au niveau d'une première zone de connexion, et en ce que, au niveau d'une deuxième zone de connexion, l'un des câbles supraconducteurs d'une paire est électriquement relié à l'un des câbles supraconducteurs de l'autre paire, l'autre câble supraconducteur de chaque paire étant relié à un terminal de connexion électrique (T1, T2) ou à une paire supplémentaire, l'une des zones de connexion étant située au centre de la bobine et l'autre des zones de connexion étant située à la périphérie de la bobine.

3. Dipôle limiteur de courant l'une des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce que au moins l'un des câbles supraconducteurs est interposé entre les deux câbles supraconducteurs qui sont reliés chacun à un terminal de connexion (T1, T2).

4. Dipôle limiteur de courant selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que les deux câbles supraconducteurs d'une même paire sont de même longueur.

5. Dipôle limiteur de courant selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que, entre les deux câbles supraconducteurs reliés aux terminaux de connexion (T1, T2), le nombre de couches d'isolant (E1 à E11, H1) est égal à la moitié du nombre total de câbles supraconducteurs (C1 à C12).

6. Dipôle limiteur de courant selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que les câbles supraconducteurs (C1 à C12) sont reliés entre eux au centre de la bobine, pour former lesdites paires, par des boucles de pontage (P1 à P6).

7. Dipôle limiteur de courant selon la revendication 6, caractérisé en ce que lesdites boucles de pontage (P1 à P6) sont alignées.

8. Dipôle limiteur de courant selon la revendication 6, caractérisé en ce que lesdites boucles de pontage (P1 à P6) sont réparties régulièrement sur le contour interne de la bobine.

9. Dipôle limiteur de courant selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le conducteur de type supraconducteur (F1 à F15) est constitué de 2N câbles supraconducteurs (C1 à C12) agencés selon N paires, de N boucles de pontage (P1, à P6) au centre de la bobine et de N-1 boucles de pontage (B1 à B3) à la périphérie de la bobine.

10. Dipôle limiteur de courant selon l'une des revendications 1 à 8, caractérisé en ce que le conducteur de type supraconducteur est constitué de 2N câbles supraconducteurs agencés selon N paires, de N-1 boucles de pontage au centre de la bobine et de N boucles de pontage à la périphérie de la bobine.

11. Dipôle limiteur de courant selon la revendication 7, caractérisé en ce que le conducteur de type supraconducteur (F1, F3, F4) est constitué de quatre câbles supraconducteurs (C1 à C4) agencés selon deux paires, de deux boucles de pontage (P1, P2) au centre de la bobine et d'une boucle de pontage (B1) à la périphérie de la bobine.

12. Dipôle limiteur de courant selon la revendication 11, caractérisé en ce que les deux boucles de pontage (P1, P2) au centre de la bobine sont adjacentes, et en ce que la boucle de pontage (B1) à la périphérie de la bobine est située entre les deux terminaux de connexion (T1, T2).

13. Dipôle limiteur de courant selon la revendication 12, caractérisé en ce que, au sein de la bobine, entre le câble supraconducteur (C4) relié à un terminal de connexion (T2) et le câble supraconducteur adjacent (C1) qui est relié à l'autre terminal de connexion (T1), la couche d'isolant (H1) a une épaisseur plus importante que les autres couches d'isolant (E1 à E3).

14. Dipôle limiteur de courant selon la revendication 11, caractérisé en ce que les deux boucles de pontage (P1, P2) du centre de la bobine sont adjacentes, et en ce que la boucle de pontage (B1) de la périphérie de la bobine contourne un terminal de connexion (T1).

15. Dipôle limiteur de courant selon la revendication 11, caractérisé en ce que les deux boucles de pontage (P1, P2) au centre de la bobine sont concentriques, et en ce que la boucle de pontage (B1) à la périphérie de la bobine contourne un terminal de connexion (T1).

16. Dipôle limiteur de courant selon la revendication 9, caractérisé en ce que le conducteur de type supraconducteur (F5, F6, F7) est constitué de six câbles supraconducteurs (C1 à C6) agencés selon trois paires, de trois boucles de pontage (P1, P2, P3) au centre de la bobine et de deux boucles de pontage (B1, B2) à la périphérie de la bobine.

17. Dipôle limiteur de courant selon la revendication 16, caractérisé en ce que les trois boucles de pontage (P1, P2, P3) au centre de la bobine sont adjacentes et en ce que les deux boucles de pontage (B1, B2) à la périphérie de la bobine contournent chacune un terminal de connexion (T1, T2).

18. Dipôle limiteur de courant selon la revendication 16, caractérisé en ce que deux des boucles de pontage (P2, P3) du centre de la bobine sont concentriques et en ce que l'une des boucles de pontage (B2) de la périphérie de la bobine est disposée entre les deux terminaux de connexion (T1, T2).

19. Dipôle limiteur de courant selon la revendication 16, caractérisé en ce que l'une des boucles de pontage (P2) du centre de la bobine traverse diamétralement le centre de la bobine, les deux autres boucles de pontage (P1, P3) du centre de la bobine étant situées de part et d'autre de cette dernière, et en ce que l'une des boucles

de pontage (B2) de la périphérie de la bobine est disposée entre les deux terminaux de connexion (T1, T2).

20. Dipôle limiteur de courant selon la revendication 9, caractérisé en ce que le conducteur de type supraconducteur (L3 ; L8 à L11) est constitué de huit câbles supraconducteurs (C1 à C8) agencés selon quatre paires, de quatre boucles de pontage (P1 à P4) au centre de la bobine et de trois boucles de pontage (B1 à B3) à la périphérie de la bobine.

21. Dipôle limiteur de courant selon la revendication 20, caractérisé en ce que les quatre boucles de pontage (P1 à P4) au centre de la bobine sont adjacentes et en ce que l'une des boucles de pontage (B1) de la périphérie de la bobine contourne un terminal de connexion (T1) et une autre des boucles de pontage (B2), et en ce que la troisième boucle de pontage (B3) de la périphérie de la bobine est située entre les deux terminaux de connexion (T1, T2).

22. Dipôle limiteur de courant selon la revendication 20, caractérisé en ce que deux des boucles de pontage (P1, P2) du centre de la bobine sont adjacentes, les deux autres boucles de pontage (P3, P4) du centre de la bobine étant concentriques, et en ce que deux des boucles de pontage (B2, B3) de la périphérie de la bobine sont situées entre les deux terminaux de connexion (T1, T2).

23. Dipôle limiteur de courant selon la revendication 20, caractérisé en ce que les quatre boucles de pontage (P1 à P4) du centre de la bobine sont adjacentes et en ce que les trois boucles (B1 à B3) de la périphérie de la bobine sont concentriques et entourent un terminal de connexion (T1, T2).

24. Dipôle limiteur de courant selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la couche d'isolant située entre deux câbles supraconducteurs dont la différence de potentiel est la plus faible, lorsque le dipôle limiteur de courant devient résistif, présente une épaisseur inférieure, un matériau différent, ou une structure différente à celle des autres couches d'isolant.

25. Dipôle limiteur de courant selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la couche d'isolant située entre deux câbles supraconducteurs dont la différence de potentiel est la plus élevée, lorsque le dipôle limiteur de courant

devient résistif, présente une épaisseur supérieure, un matériau différent, ou une structure différente à celle des autres couches d'isolant.

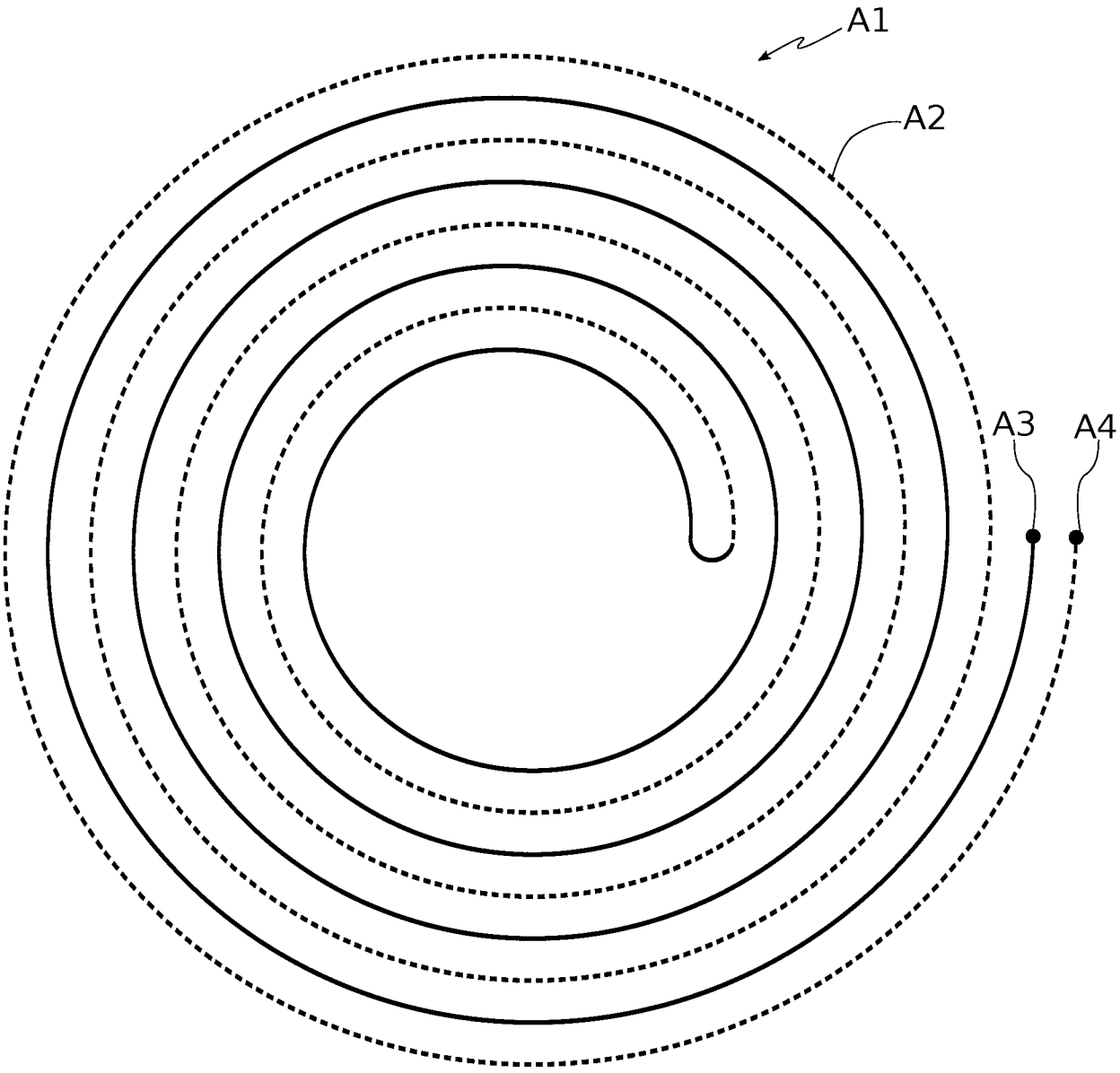


Fig. 1

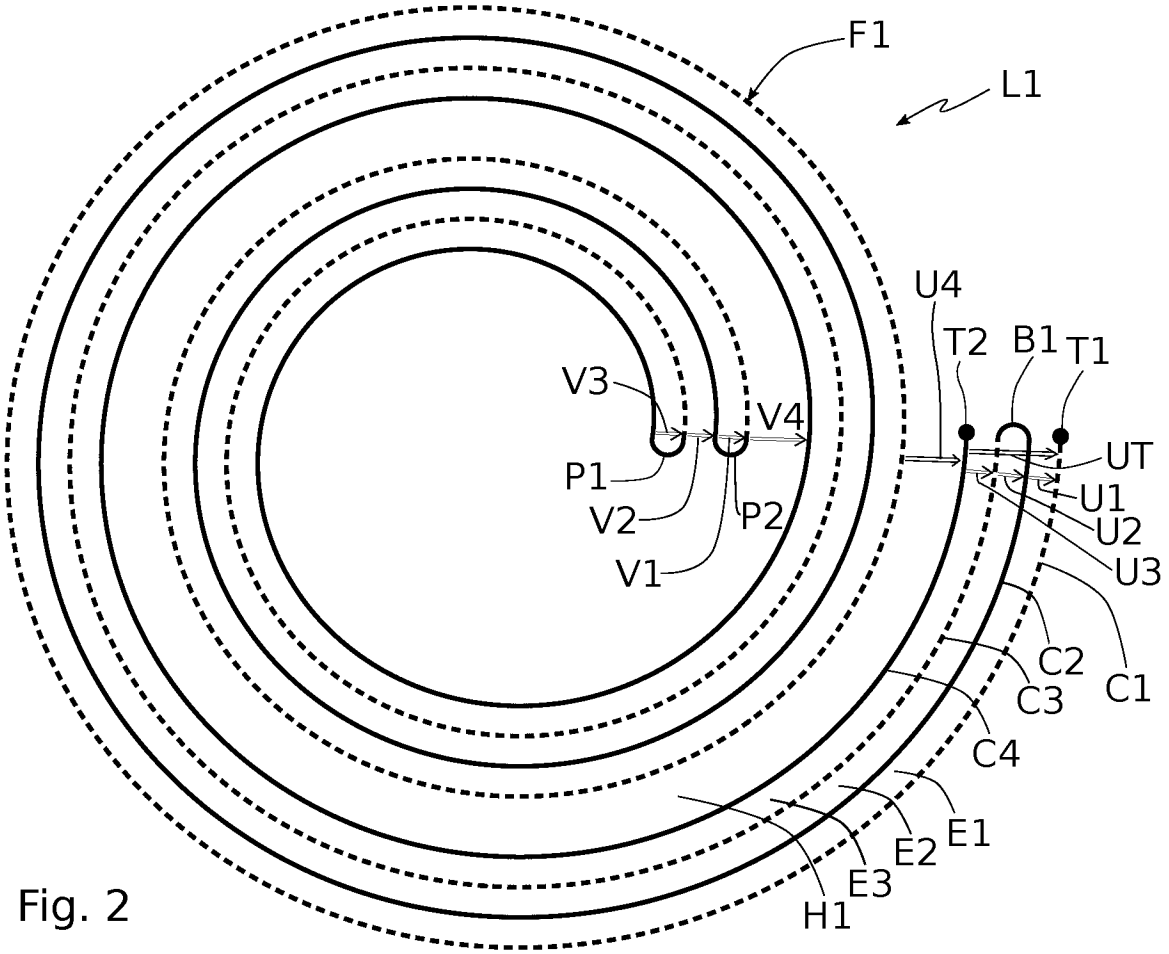

F1
L1
U4
T2
B1
T1
V3
V4
UT
P1
U1
V2
P2
U2
U3
V1
C2
C1
C3
C4
E1
E2
E3
H1

Fig. 2

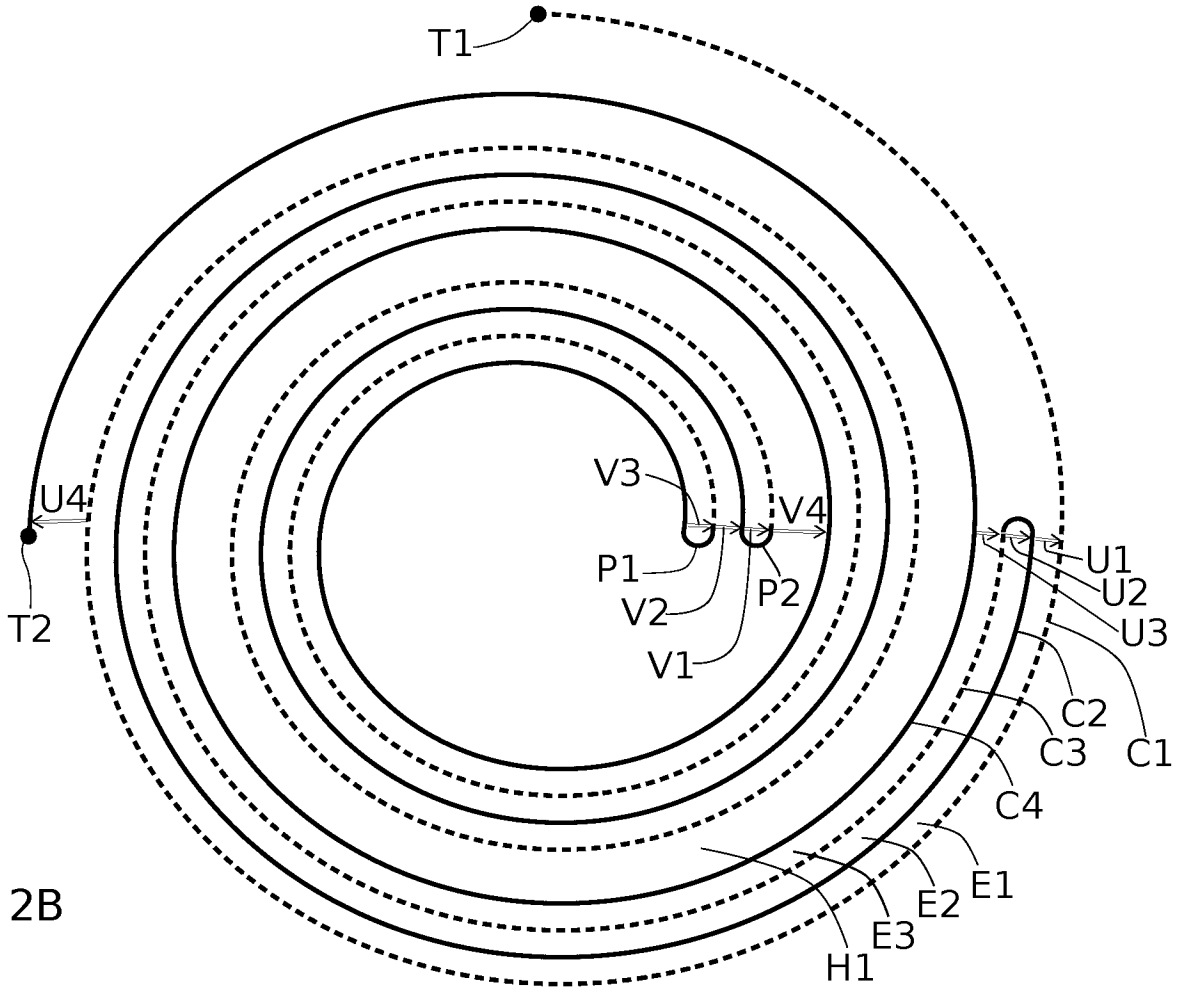

T1
V3
U4
V4
P1
U1
P2
U2
T2
V2
U3
V1
C2
C3
C1
C4
E1
E2
E3
H1

Fig. 2B

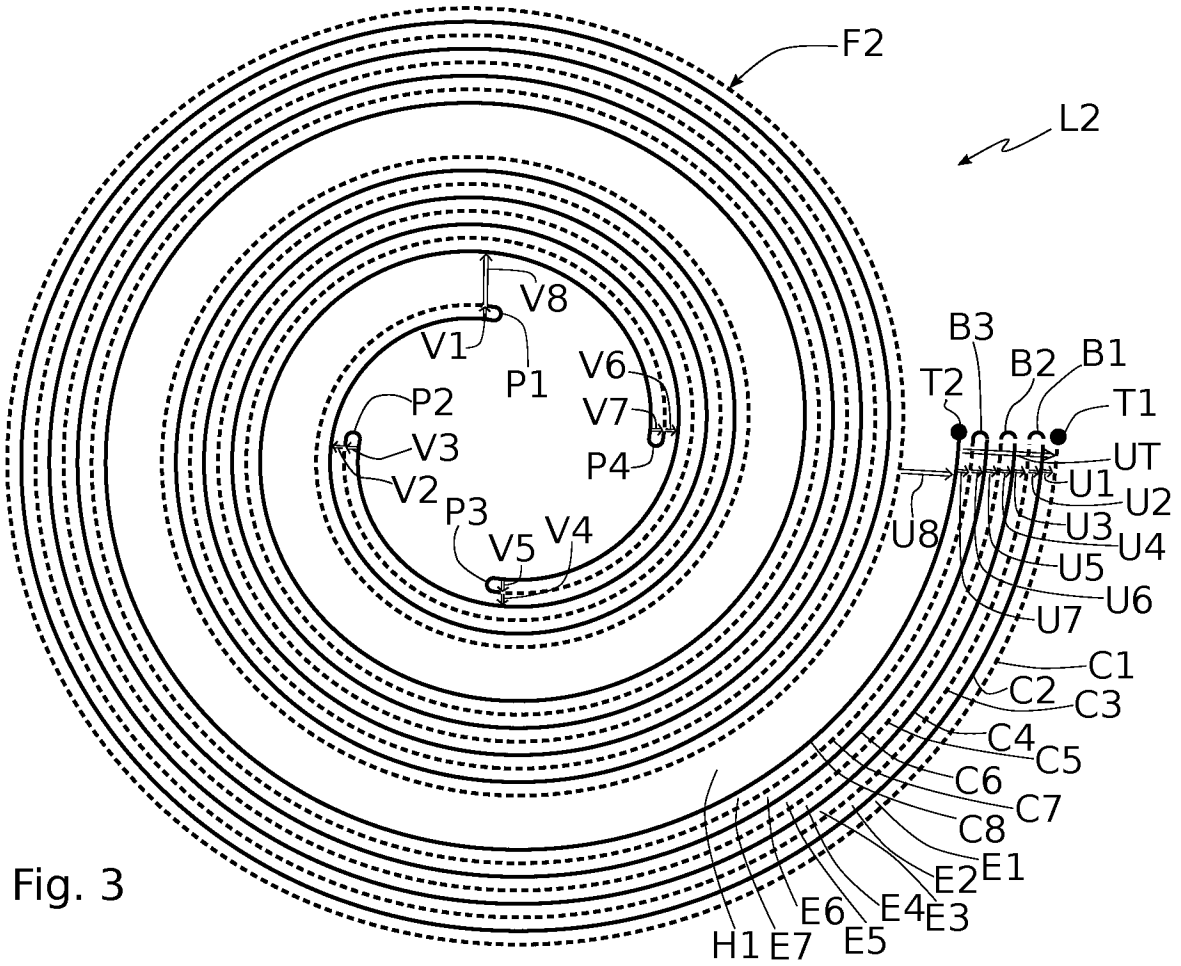

F2
L2
V8
V1
P1
V6
V7
P2
V3
P4
V2
P3
V5
V4
B3
B2
B1
T2
T1
UT
U1
U2
U3
U4
U5
U6
U7
U8
C1
C2
C3
C4
C5
C6
C7
C8
E1
E2
E3
E4
E5
E6
E7
H1

Fig. 3

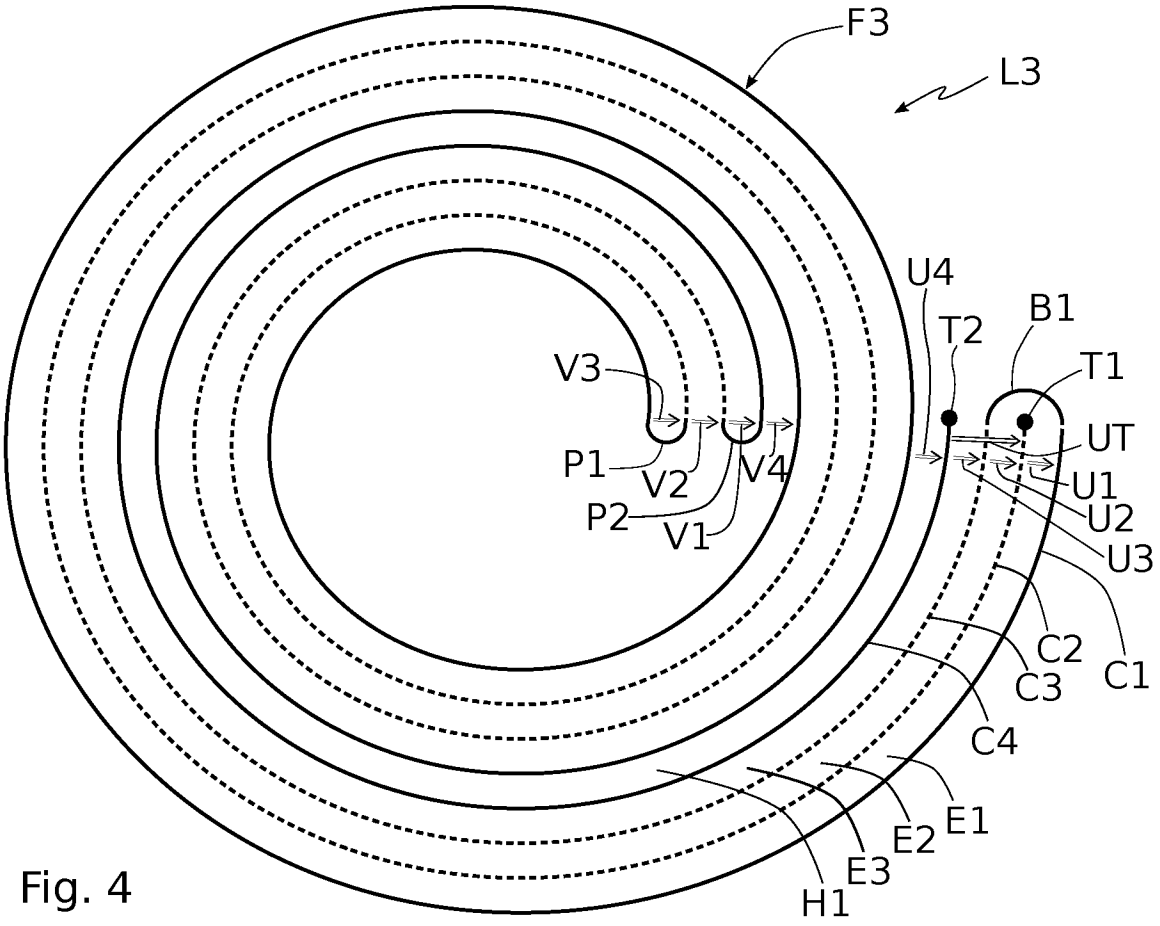

F3
L3
U4
T2
B1
T1
V3
UT
P1
V2
V4
U1
P2
V1
U2
U3
C2
C1
C3
C4
E1
E2
E3
H1

Fig. 4

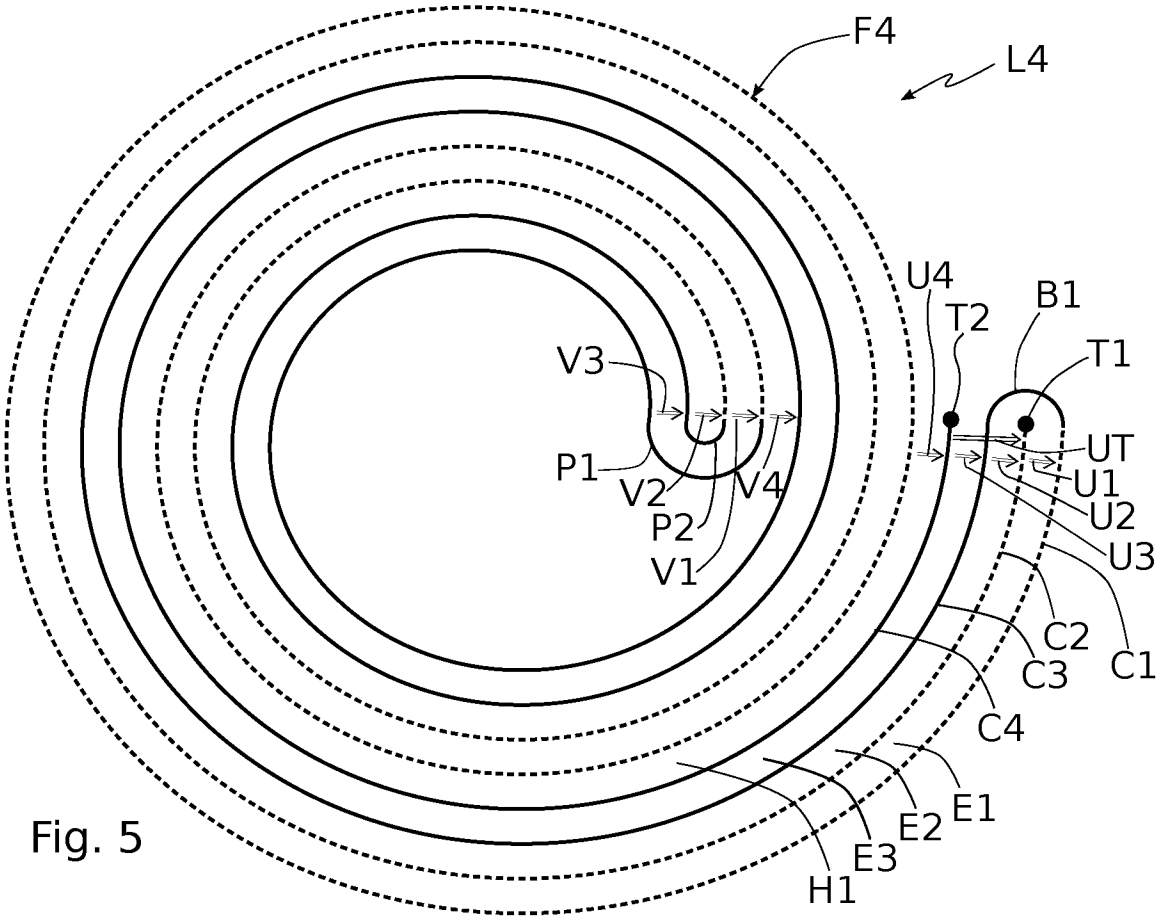

F4
L4
U4
B1
T2
T1
V3
UT
P1
U1
V2
V4
U2
P2
U3
V1
C2
C1
C3
C4
E1
E2
E3
H1

Fig. 5

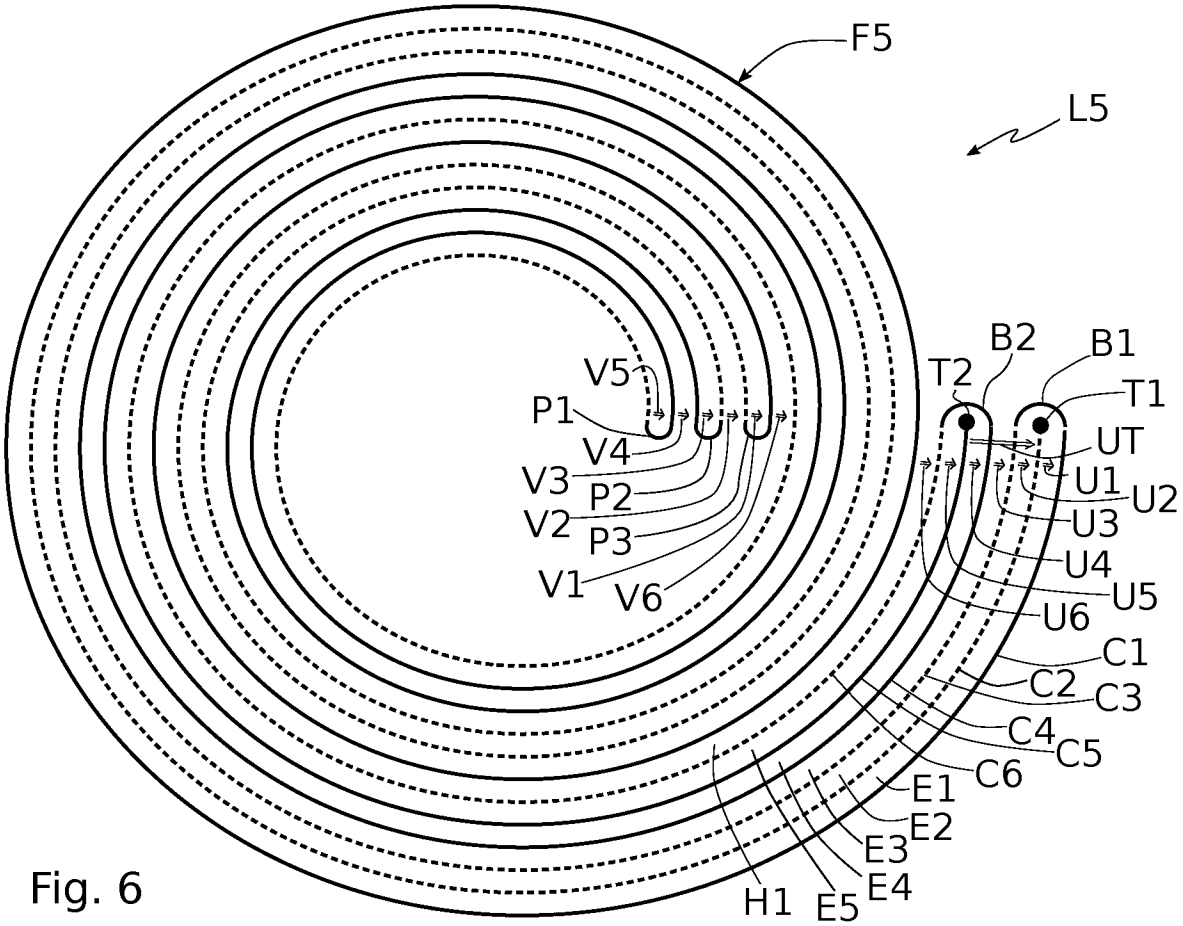

F5
L5
B2
B1
T2
T1
V5
UT
P1
U1
U2
V4
V3
P2
U3
V2
P3
U4
V1
V6
U5
U6
C1
C2
C3
C4
C5
C6
E1
E2
E3
E4
E5
H1

Fig. 6

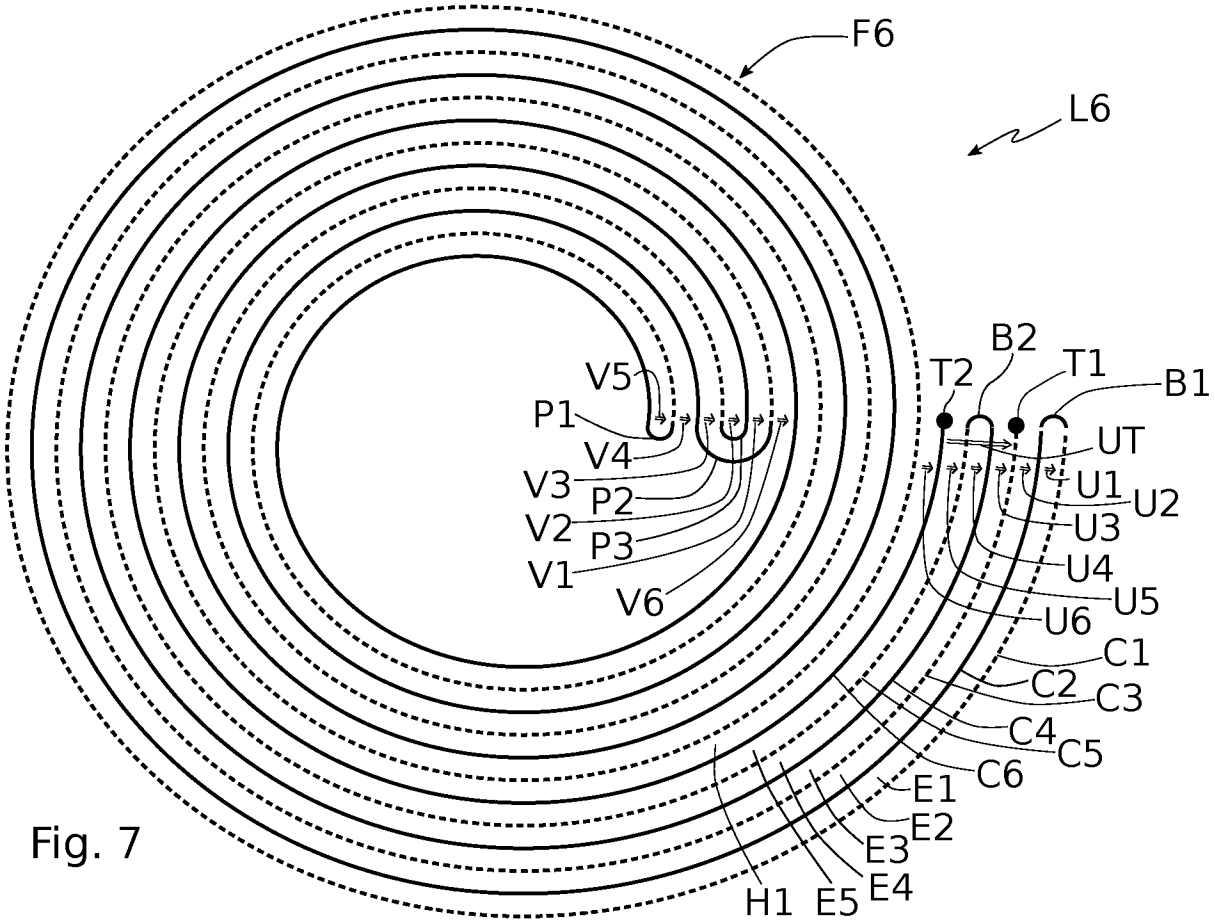

F6
L6
V5
P1
V4
V3
P2
V2
P3
V1
V6
T2
B2
T1
B1
UT
U1
U2
U3
U4
U5
U6
C1
C2
C3
C4
C5
C6
E1
E2
E3
E4
H1
E5

Fig. 7

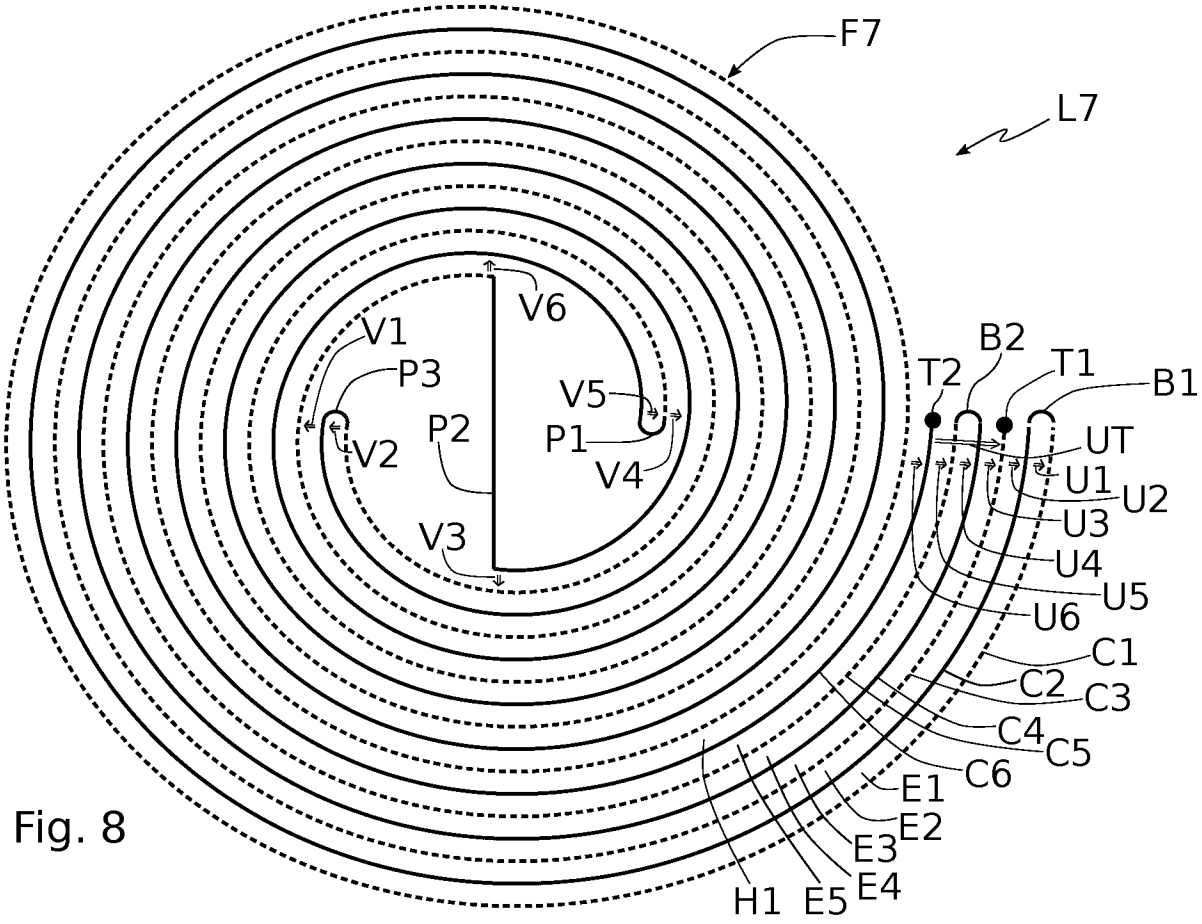

F7
L7
V6
V1
P3
V2
P2
V5
P1
V4
V3
T2
B2
T1
B1
UT
U1
U2
U3
U4
U5
U6
C1
C2
C3
C4
C5
C6
E1
E2
E3
E4
H1
E5

Fig. 8

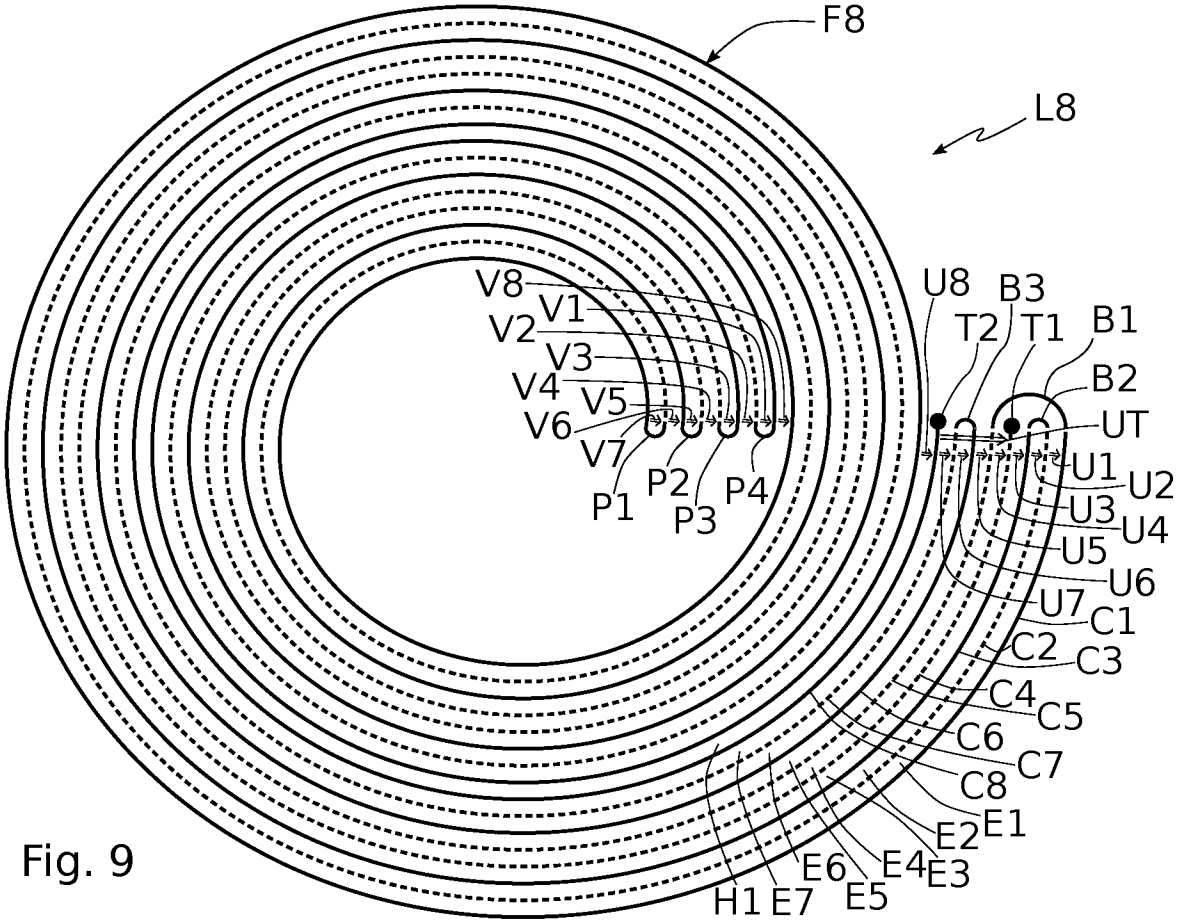

F8
L8
V8
V1
V2
V3
V4
V5
V6
V7
P1
P2
P3
P4
U8
B3
T2
T1
B1
B2
UT
U1
U2
U3
U4
U5
U6
U7
C1
C2
C3
C4
C5
C6
C7
C8
E1
E2
E3
E4
E5
E6
E7
H1

Fig. 9

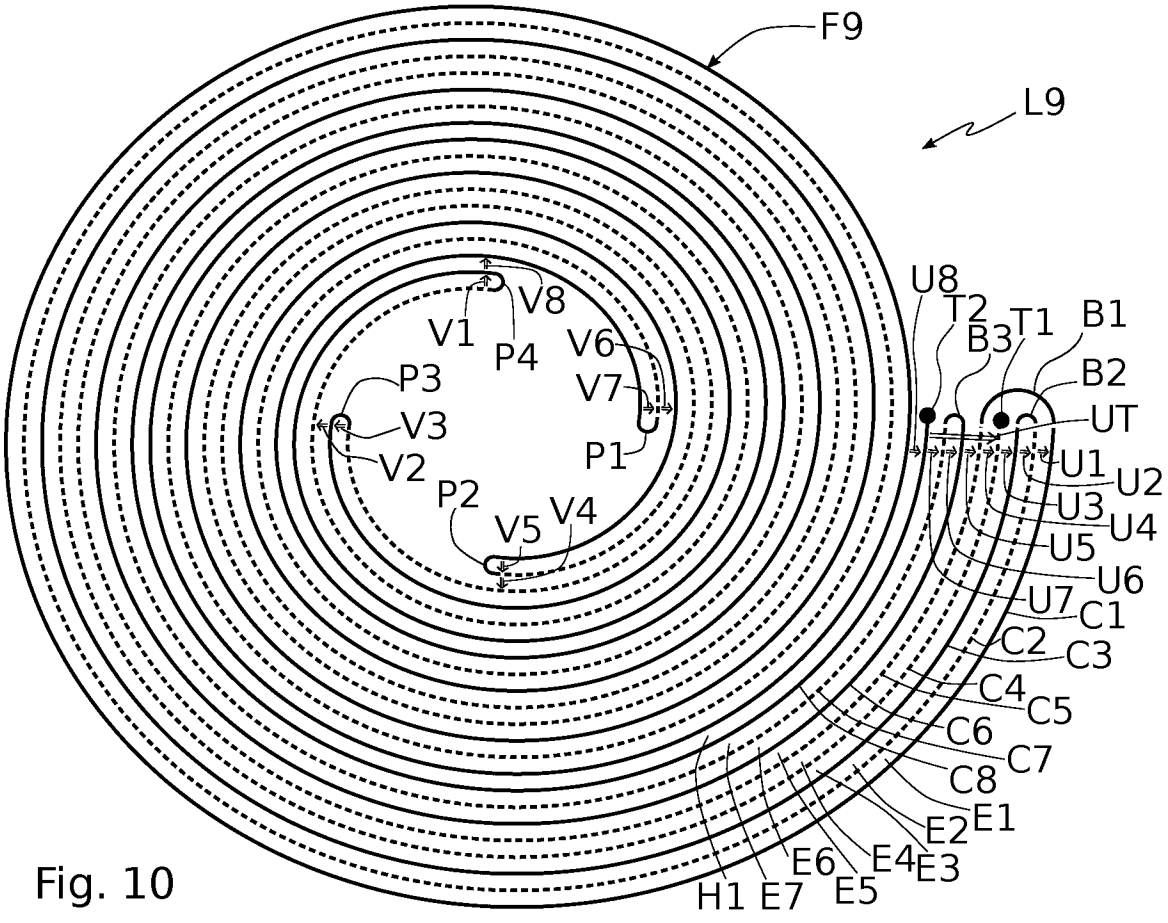

F9
L9
V8
V1
P4
V6
V7
P3
V3
V2
P1
P2
V5
V4
U8
T2
T1
B1
B3
B2
UT
U1
U2
U3
U4
U5
U6
U7
C1
C2
C3
C4
C5
C6
C7
C8
E1
E2
E3
E4
E5
E6
E7
H1

Fig. 10

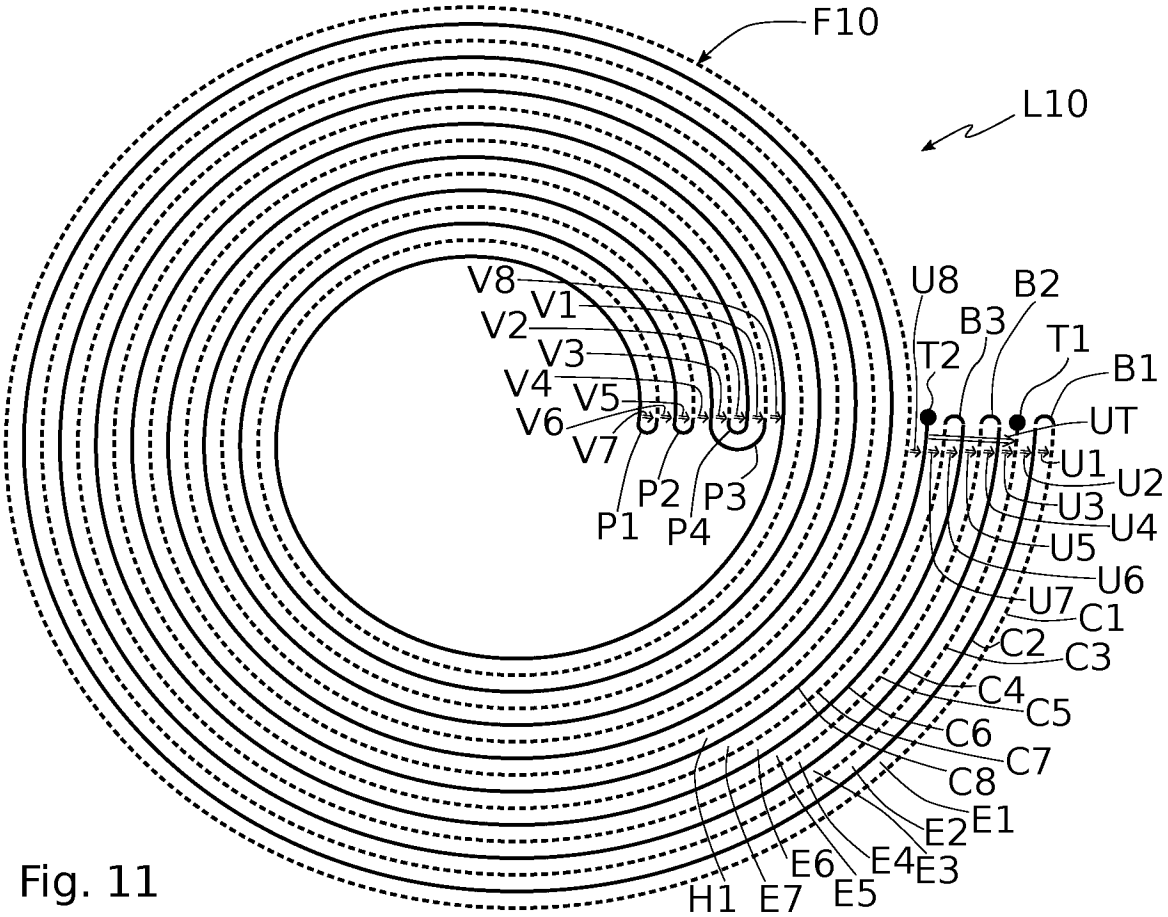

F10
L10
V8
V1
V2
V3
V4
V5
V6
V7
P1
P2
P3
P4
U8
B2
B3
T1
T2
B1
UT
U1
U2
U3
U4
U5
U6
U7
C1
C2
C3
C4
C5
C6
C7
C8
E1
E2
E3
E4
E5
E6
E7
H1

Fig. 11

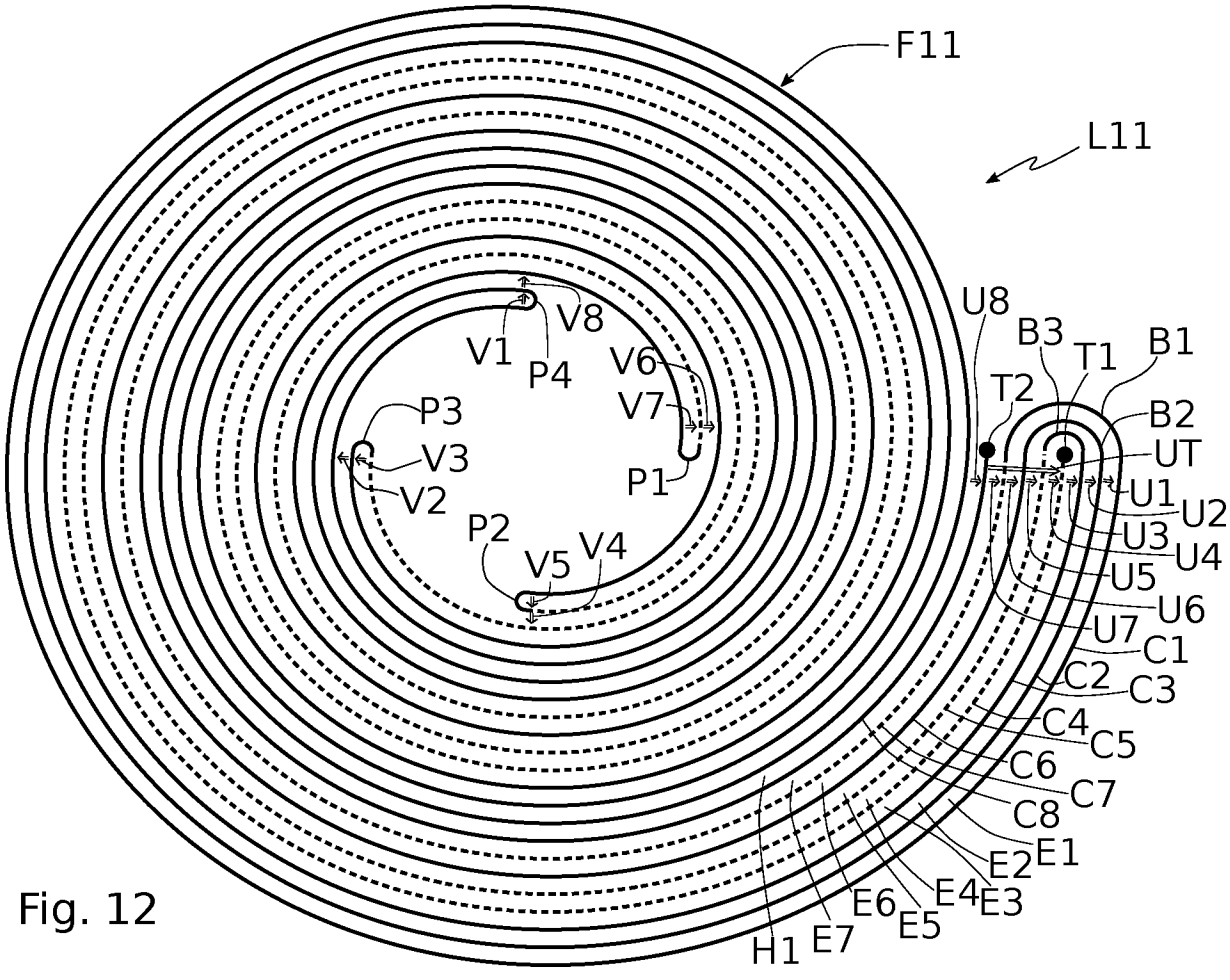

F11
L11
V8
V1
P4
V6
V7
P3
V3
V2
P1
P2
V5
V4
U8
B3
T1
B1
T2
B2
UT
U1
U2
U3
U4
U5
U6
U7
C1
C2
C3
C4
C5
C6
C7
C8
E1
E2
E3
E4
E5
E6
E7
H1

Fig. 12

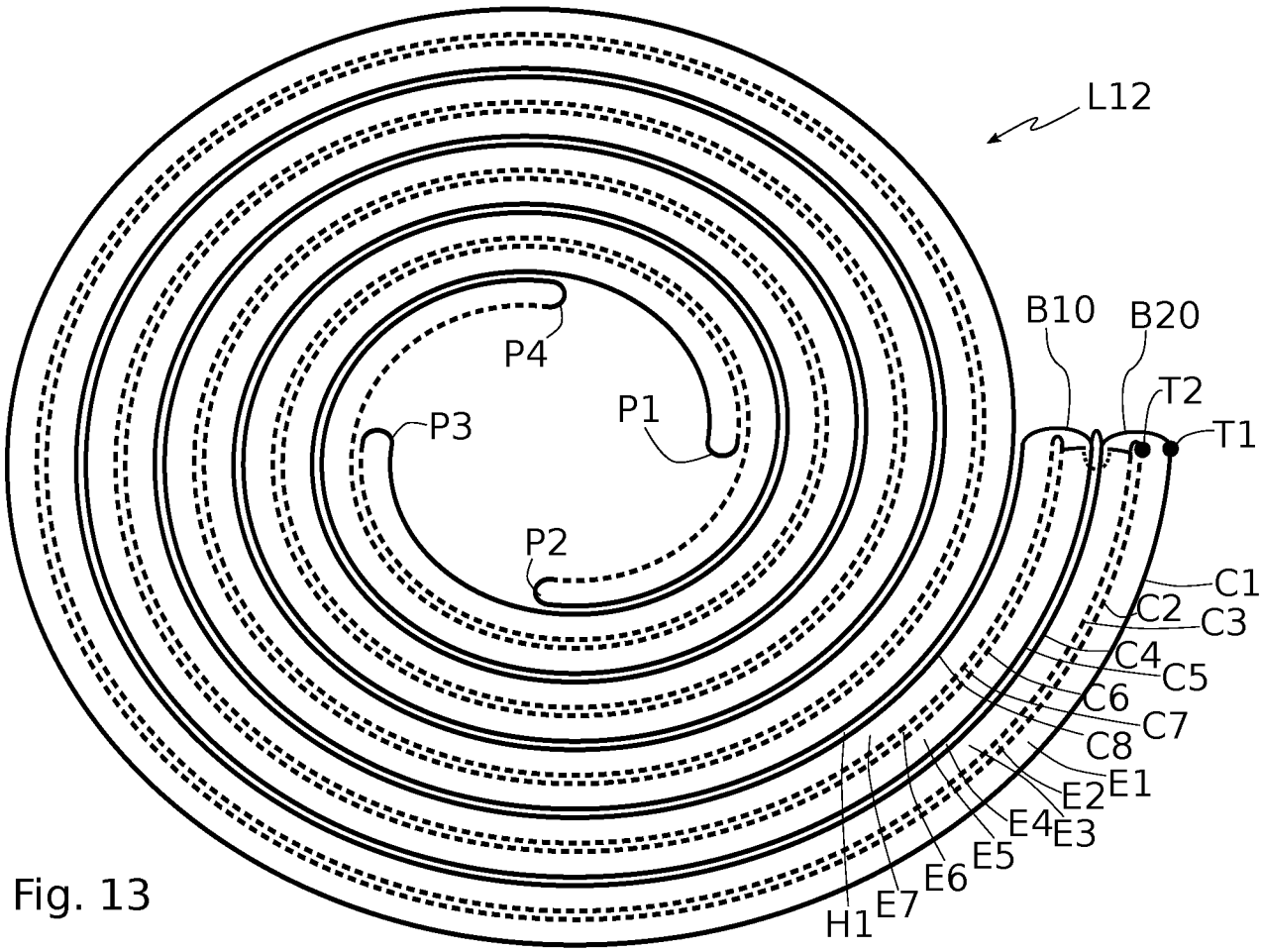

L12
B10
B20
T2
T1
P4
P1
P3
P2
C1
C2
C3
C4
C5
C6
C7
C8
E1
E2
E3
E4
E5
E6
E7
H1

Fig. 13

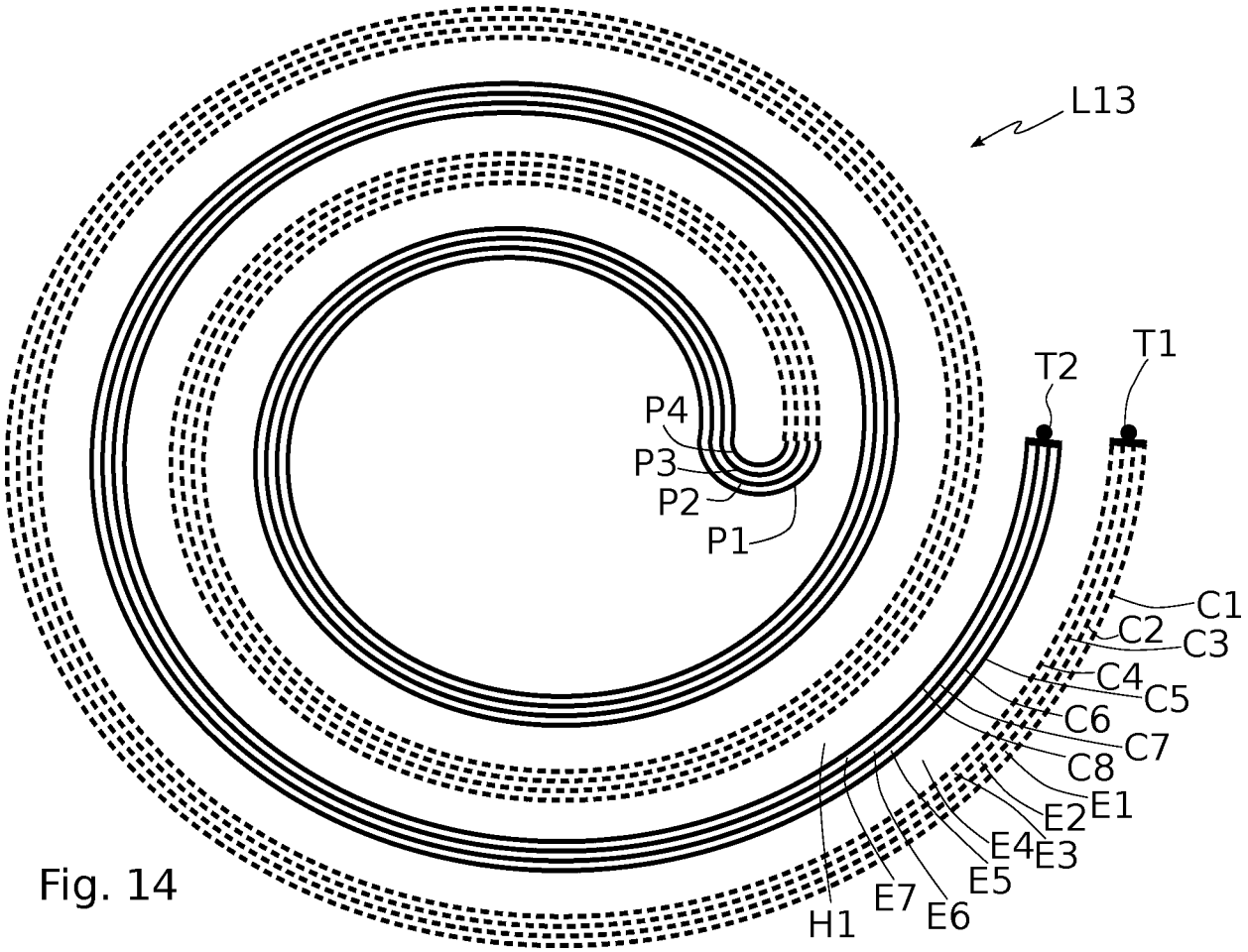

L13
T2
T1
P4
P3
P2
P1
C1
C2
C3
C4
C5
C6
C7
C8
E1
E2
E3
E4
E5
E6
E7
H1

Fig. 14

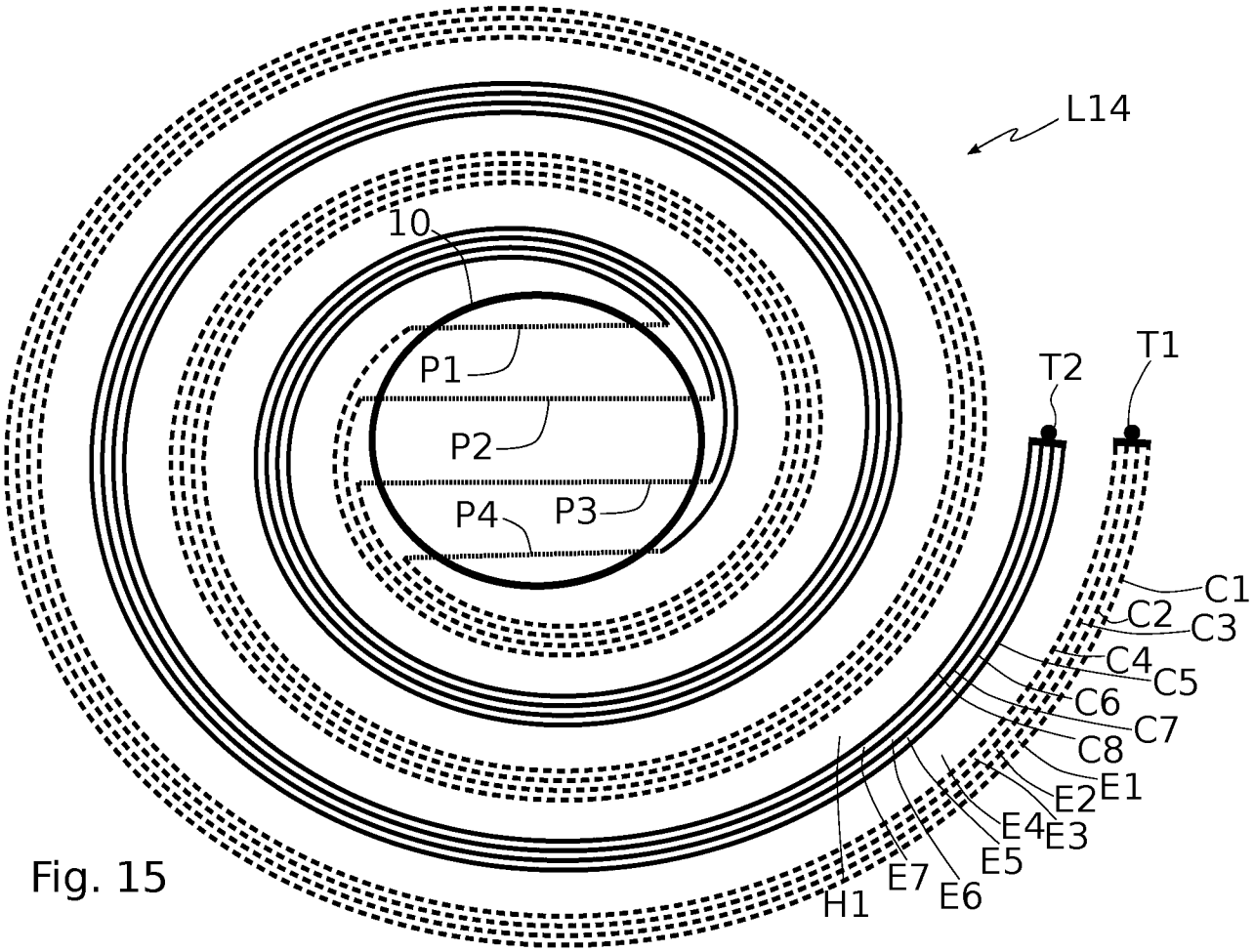

L14
10
P1
P2
P4
P3
T2
T1
C1
C2
C3
C4
C5
C6
C7
C8
E1
E2
E4
E3
E5
E7
E6
H1

Fig. 15

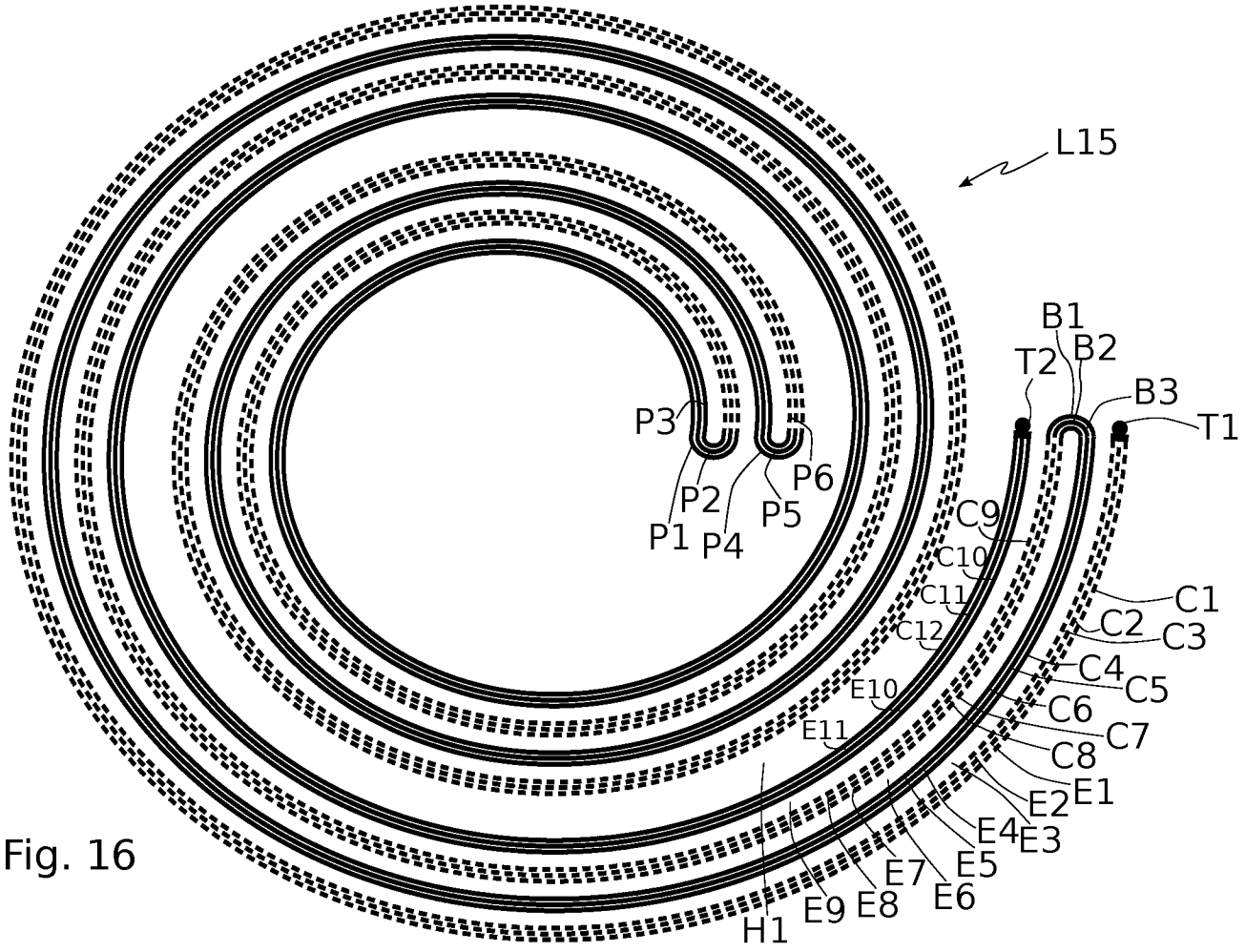

L15
B1
B2
T2
B3
T1
P3
P2
P1
P4
P5
P6
C9
C10
C11
C12
C1
C2
C3
C4
C5
C6
C7
C8
E1
E2
E4
E3
E5
E7
E6
E8
E9
E10
E11
H1

Fig. 16

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement national

FA 848859
FR 1763092

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
X A	US 2011/116198 A (UNKNOWN) 19 mai 2011 (2011-05-19) * abrégé * * alinéa [0037]; figure 3 *	1-10,24, 25 11-23	H01F6/06 H02H9/02
A	CN 102 592 774 B (INST ELECTRICAL ENG CAS; JIANGSU ZHONGTIAN TECHNOLOGY CO LTD) 12 février 2014 (2014-02-12) * figures 2a-3 *	1-25	
A	CN 103 117 145 A (INST ELECTRICAL ENG CAS) 22 mai 2013 (2013-05-22) * figures 2a-3 *	1-25	
A	JP H03 226228 A (TOSHIBA CORP) 7 octobre 1991 (1991-10-07) * abrégé; figure 3 *	1-25	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) H01F H01L

Date d'achèvement de la recherche	Examinateur
3 septembre 2018	Rouzier, Brice

CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS

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 bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure.
D : cité dans la demande
L : cité pour d'autres raisons

& : membre de la même famille, document correspondant

EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1763092 FA 848859

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du 03-09-2018
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2011116198	A	19-05-2011	----------	
CN 102592774	B	12-02-2014	AUCUN	
CN 103117145	A	22-05-2013	AUCUN	
JP H03226228	A	07-10-1991	AUCUN	

EPO FORM P0465