



- (51) Classification internationale des brevets :
H01H 9/54 (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2012/076399
- (22) Date de dépôt international :
20 décembre 2012 (20.12.2012)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
1162413 23 décembre 2011 (23.12.2011) FR
- (71) Déposant : **ALSTOM TECHNOLOGY LTD** [CH/CH];
Brown Boveri Strasse 7, CH-5400 Baden (CH).
- (72) Inventeurs : **DUPRAZ, Jean-Pierre**; Route de Dagneux,
F-01360 Bressolles (FR). **GRIESHABER, Wolfgang**; 139
rue Duguesclin, F-69006 Lyon (FR). **COLLET, Michel**;
2, rue Bonnard, F-69003 Lyon (FR).
- (74) Mandataire : **ILGART, Jean-Christophe**; Brevalex, 95
rue d'Amsterdam, F-75378 Paris Cedex 8 (FR).
- (81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM,

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

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

Publiée :

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

(54) Title : MECHATRONIC CIRCUIT BREAKER DEVICE AND ASSOCIATED TRIPPING METHOD AND USE THEREOF
IN INTERRUPTING A HIGH DIRECT CURRENT

(54) Titre : DISPOSITIF DISJONCTEUR MECATRONIQUE ET PROCEDE DE DECLenchement ASSOCIE ET APPLICA-
TION A LA COUPURE DE COURANT CONTINU ELEVE

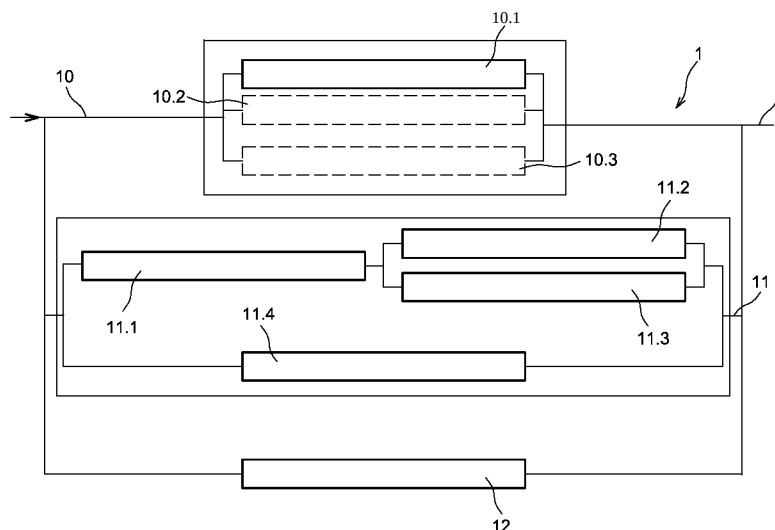


FIG. 1

(57) Abstract : The invention relates to a novel mechatronic circuit breaker (1) and to its associated tripping method for interrup-
ting both alternating currents and direct currents at high voltage.

(57) Abrégé : L'invention concerne un nouveau disjoncteur mécatronique (1) et son procédé de déclenchement associé pour couper
aussi bien des courants alternatifs que des courants continus sous haute tension.

**DISPOSITIF DISJONCTEUR MECATRONIQUE ET PROCEDE DE
DECLENCHEMENT ASSOCIE ET APPLICATION A LA COUPURE DE
COURANT CONTINU ELEVE**

5

DESCRIPTION

DOMAINE TECHNIQUE

L'invention concerne un nouveau dispositif disjoncteur mécatronique et son procédé de déclenchement associé .

L'application principale visée par l'invention est la coupure de courant continu d'intensité élevée dans une ligne de transmission et/ou distribution, aux niveaux de tensions typiquement supérieurs à 50kVCC, jusqu'à 800kVCC et au delà. Le domaine concerné par le courant continu sous tension élevée est aussi communément désigné sous le sigle HVDC, pour High Voltage Direct Current en anglais) .

L'invention peut aussi s'appliquer à la coupure de courants continus sous des tensions de valeur moindre, typiquement dans la gamme de 1kVCC à 50kVCC ou encore à la coupure de courants alternatifs.

ART ANTÉRIEUR

La coupure des courants dans les réseaux de transmission et/ou distribution de courant continu sous tension élevée (HDVC) est devenue un enjeu crucial car leur maîtrise conditionne directement le développement desdits réseaux.

A ce jour, il semble se dégager un consensus parmi l'ensemble des acteurs des réseaux dans l'approche à avoir pour réaliser une telle coupure : il

est nécessaire, pour couper réellement les courants en un temps inférieur à quelques millisecondes, de réaliser un dispositif formant un disjoncteur mécatronique en associant au moins une cellule de
5 coupure à élément semi-conducteur en parallèle électrique avec un absorbeur d'énergie et avec en parallèle électrique au moins un interrupteur-sectionneur mécanique capable d'une part de faire passer le courant permanent dans sa position de
10 fermeture avec des pertes d'insertion minimales et donc d'éviter les pertes importantes dans l'élément(s) semi-conducteur de coupure et d'autre part de tenir la tension de rétablissement aux bornes du dispositif dans sa position d'ouverture.

15 On peut citer ici la demande de brevet EP1538645 qui a initiée ce principe de réalisation de disjoncteur mécatronique. Bien qu'idéalement adaptable à la coupure de courants continus élevés avec des thyristors IGCT en tant qu'éléments semi-conducteurs de
20 coupure, il apparaît que l'interrupteur mécanique de type Thomson présenté en figure 5A, n'a pu réellement être mis en œuvre. En outre, à la lecture de ce document, il ne ressort pas vraiment si et comment il est possible de réaliser la coupure des courants
25 continus à des niveaux de tensions très élevés, typiquement supérieurs à 50kVCC. Par ailleurs, le mode de blocage automatique des thyristors dans la branche auxiliaire suppose que le temps de pleine ouverture de l'interrupteur mécanique soit plus court que la demi-période propre du circuit oscillant utilisé pour la
30 commutation de la branche principale vers la branche

auxiliaire. Cette dépendance est préjudiciable, car les critères de choix de la fréquence propre de ce circuit oscillant peuvent conduire à des fréquences propres trop élevées au regard des technologies accessibles pour la réalisation de l'interrupteur mécanique. De plus, cette demande de brevet EP1538645 suppose qu'il est possible de créer une oscillation du courant primaire lui-même, oscillation telle que celui-ci s'annule, condition nécessaire à l'auto-blocage des thyristors IGCT. Dans la réalité, l'énergie électromagnétique présente dans le réseau L au moment de l'apparition du défaut est telle que l'insertion du circuit oscillant n'a pas d'effet significatif sur le courant primaire. Autrement dit, ce principe est inopérant pour application de transport d'énergie par courants continus lorsque les grandeurs nominales primaires excèdent respectivement le kilo Ampère pour les courants et la centaine de kilo-Volts pour les tensions .

Plus récemment, il a été proposé dans la demande de brevet WO 2011/057675 de réaliser un tel dispositif disjoncteur mécatronique comprenant une branche principale, i.e. celle parcourue par le courant permanent en régime nominal, avec un interrupteur-sectionneur mécanique en série électrique avec une cellule de coupure constituée d'un transistor IGBT et d'une diode en antiparallèle, une varistance en parallèle électrique, et une branche auxiliaire unique avec une pluralité de cellules de coupure constituée chacune d'un transistor IGBT et d'une diode en antiparallèle, la résistance intrinsèque de la branche

auxiliaire étant bien inférieure à celle de la branche principale. Un tel disjoncteur mécatronique est supposé fonctionner de la manière suivante : en régime permanent, le transistor IGBT est à l'état passant et
5 l'interrupteur-sectionneur mécanique est fermé, tous les transistors IGBT des cellules de coupure de la branche auxiliaire sont à l'état non passant. En régime permanent, le courant permanent circule donc à travers la branche principale. En cas de défaut sur la ligne de
10 transmission HDVC, qui se traduit au moins par une surintensité, tous les transistors IGBT des cellules de coupure de la branche auxiliaire basculent à l'état passant et le transistor IGBT de la cellule de coupure de la branche principale bascule à l'état non passant.
15 Tout le courant est commuté dans la branche auxiliaire, l'interrupteur-sectionneur mécanique est alors ouvert. Alors tous les transistors IGBT des cellules de coupure de la branche auxiliaire basculent à l'état non passant et le courant est alors commuté vers la varistance. Le
20 courant est alors coupé et la surtension limitée.

Les inconvénients d'un tel disjoncteur mécatronique sont nombreux. Tout d'abord, il est indiqué (voir page 19 lignes 7-18) que si, dans les développements futurs, il était trouvé un disjoncteur
25 électromécanique capable d'accomplir les mêmes fonctions qu'un disjoncteur à semi-conducteur actuel (transistor IGBT), typiquement capable de couper un courant de 2kA en moins de 1ms et capable de supporter une tension de 2kV, alors ce type de disjoncteur
30 pourrait être prévu seul dans la branche principale en lieu et place du transistor IGBT et de l'interrupteur-

sectionneur mécanique monté en série. Or, d'une part trouver un tel disjoncteur électromécanique nécessite de très lourds développements et d'autre part cela nécessiterait une maintenance accrue du fait même de la
5 création d'un arc et donc de l'usure associée. De plus, dans l'ensemble des modes de réalisation proposés dans cette demande WO 2011/057675, aucun dispositif n'est prévu pour d'une part permettre la protection des transistors IGBT prévus dans la branche principale,
10 i.e. celle parcourue par le courant permanent en régime nominal, et d'autre part faciliter la commutation du courant vers la branche auxiliaire, lors de leur basculement de l'état passant à l'état non passant. Enfin, l'inconvénient majeur du disjoncteur
15 mécatronique proposé est que son fonctionnement suppose une puissance de commande très importante pour réaliser la commutation instantanée de l'ensemble des transistors IGBT de la branche principale. Tel que décrit dans la demande de brevet WO 2011/057675, le
20 disjoncteur mécatronique ne peut pas fonctionner, les temps d'établissement du courant dans les branches n'ayant pas été pris en compte. Ce temps peut être extrêmement grand compte tenu des grandes dimensions nécessaires aux applications revendiquées pour des
25 tensions supérieures par exemple à 100 kV. En outre, une telle commande de transistors IGBT est en pratique de mise en œuvre complexe.

Le but de l'invention est alors de proposer un nouveau dispositif disjoncteur mécatronique qui
30 pallie tout ou partie des inconvénients précités de

l'art antérieur, et notamment de ceux des demandes de brevet EP1538645 et WO 2011/057675 précitées.

Un but particulier est de proposer un dispositif disjoncteur mécatronique, qui puisse
5 convenir à la fois pour la coupure des courants alternatifs dans une large gamme de tensions, typiquement de 15kV à 145kV, et pour la coupure des courants continus, typiquement de 40kVCC à 600kVCC et pour une large gamme de courants, typiquement de 1,5kA
10 à 4,5kA.

EXPOSÉ DE L'INVENTION

Pour ce faire, l'invention a pour objet, un dispositif disjoncteur mécatronique destiné à couper un
15 courant électrique circulant à travers un moyen de transmission de l'énergie électrique comportant:

- une branche principale comprenant au moins un module principal comprenant au moins une sous-
branche comprenant au moins un interrupteur-sectionneur
20 mécanique monté en série avec au moins une cellule de coupure constituée d'au moins un élément semi-conducteur de puissance à taux de conduction contrôlée;

- une branche auxiliaire montée en parallèle électrique de la branche principale et
25 comprenant:

- au moins une première sous-branche, dite sous-branche de temporisation, définissant une inductance de fuite de la sous-branche de temporisation par rapport à la branche principale et une résistance
30 distribuée de tous les composants de la sous-branche de temporisation et comprenant au moins une première

cellule de coupure constituée d'une pluralité de thyristors de puissance mis en cascade, au moins une des sous-branches de temporisation comprenant en outre au moins un premier module d'aide à la commutation
5 comprenant au moins un premier condensateur avec en parallèle électrique sa résistance de décharge et un limiteur de surtension;

- une deuxième sous-branche, dite sous-branche d'armement, montée en parallèle électrique
10 de la sous-branche de temporisation et définissant une inductance de fuite de la sous-branche d'armement par rapport à la sous-branche de temporisation et une résistance distribuée de tous les composants de la sous-branche d'armement, et comprenant au moins une
15 deuxième cellule de coupure constituée d'une pluralité de thyristors de puissance mis en cascade et, au moins un deuxième module d'aide à la commutation comprenant au moins un deuxième condensateur avec en parallèle électrique sa résistance de décharge et un limiteur de
20 surtension;

- au moins un limiteur de surtension principal en parallèle électrique de la branche principale .

On précise ici que par « thyristor de
25 puissance », il faut comprendre un thyristor au sens général, c'est-à-dire un interrupteur électronique de type semi-conducteur qui peut être commandé à l'allumage, par sa gâchette, mais pas à l'extinction, celle ci étant déclenchée par le passage à zéro du
30 courant à son entrée. Il peut donc s'agir aussi de ses variantes connues sous l'acronyme anglais « PPT », pour

« Pulsed Power Thyristor », ou sous l'acronyme anglais
« GTO », pour « Gâte Turn Off Thyristor », qu'ils
soient réalisés sur semi-conducteurs de type Silicium,
Carbure de Silicium, Nitrure de Gallium ou tout autre
5 élément semi-conducteur adapté aux applications de
commutation de puissance sous forte tension.

Ainsi, chaque inductance de fuite ainsi
définie comprend au moins l'inductance propre de la
sous-branche considérée lorsqu'elle est associée à la
10 branche principale ou à l'autre sous-branche. A cette
inductance propre, on peut associer une inductance
série supplémentaire dont le rôle sera de limiter la
dérivée du courant par rapport au temps notée di/dt
lorsque courant s'établira dans la sous-branche
15 suivante. D'ailleurs, les thyristors de puissance de
chaque sous-branche contribuent, de par les grandes
dimensions dues à leur pluralité, à la valeur de
l'inductance de fuite.

De même, chaque résistance distribuée
20 comprend au moins la résistance des conducteurs et des
composants constituant la sous-branche considérée,
cette résistance étant à considérer du point de vue des
hautes fréquences, c'est-à-dire compte tenu de l'effet
de peau. La valeur de résistance augmente avec la
25 fréquence. A cette résistance propre, on ajoute une
résistance, qui peut être répartie au sein des
multiples éléments constitutifs, et dont le rôle est,
en association avec l'inductance, de maîtriser le di/dt
du courant tout en assumant les conditions nécessaires
30 à une commutation rapide, c'est-à-dire une valeur

inférieure à celle conduisant à un régime amorti critique .

Selon une variante, chaque module d'aide à la commutation peut comprendre une inductance et une
5 résistance en série avec la pluralité de thyristors à laquelle ils sont connectés.

L'idée à la base de l'invention est donc de proposer une architecture de disjoncteur mécatronique multi-branches avec tout d'abord une branche principale
10 permettant le passage d'un courant permanent avec très peu de pertes en régime permanent et avec au moins un interrupteur-sectionneur mécanique pour tenir la tension de rétablissement aux bornes du dispositif dans sa position d'ouverture, un limiteur de surtension
15 principal permettant, en cas d'apparition d'une surintensité dans la branche principale, à la fois:

- permettre l'extinction totale du courant ;
- de stocker temporairement l'énergie
20 électromagnétique présente dans la ligne au moment de l'ouverture de la branche principale,
- d'évacuer cette énergie pour assurer la sécurité des personnes en cas d'intervention de maintenance, et de façon suffisamment rapide pour
25 autoriser des cycles rapides de fonctionnement lorsque nécessaire .

Le dimensionnement du limiteur de surtension est bien entendu adapté à la tension du moyen de transmission d'énergie électrique dans lequel
30 le disjoncteur mécatronique est inséré et à l'énergie devant être stockée puis dissipée. Il détermine la

valeur maximum de la tension transitoire de rétablissement aux bornes du dispositif. Il détermine aussi la vitesse d'élimination définitive du défaut, lequel sera éliminé d'autant plus rapidement que la
5 tension de seuil du limiteur sera élevée.

Selon l'invention, on prévoit une branche auxiliaire qui permet, soit en cas d'apparition d'une surintensité dans la branche principale, soit à la réception d'un ordre spécifique, à la fois de:

10 • permettre le transfert du courant de la branche principale vers le limiteur de surtension principal .

 • maîtriser la tension aux bornes du dispositif pour garantir que, pendant la phase de
15 coupure, elle reste inférieure à la tenue diélectrique de tous ses composants,

 • maîtriser l'évolution de la tension transitoire de rétablissement, en particulier sa vitesse de croissance.

20 Selon un mode de réalisation avantageux, afin de couper un courant qui peut venir dans un sens ou dans le sens opposé à travers le moyen de transmission de l'énergie, chaque sous-branche d'un module principal comprend au moins un interrupteur-
25 sectionneur mécanique monté en série entre deux cellules de coupure à semi-conducteur de puissance; chaque cellule de coupure étant en anti-série l'une avec l'autre.

 Selon une variante avantageuse, le
30 dispositif disjoncteur mécatronique selon l'invention comprend en outre un limiteur de vitesse de croissance

de tension, en parallèle électrique de chaque cellule de coupure d'un module principal; le limiteur de vitesse de croissance étant constitué d'une diode en série électrique avec un condensateur lui-même en
5 parallèle électrique avec sa résistance de décharge. On peut avantageusement prévoir en outre un limiteur de surtension en parallèle électrique de chaque cellule de coupure d'un module principal.

Selon une variante préférée, chaque cellule
10 de coupure d'une sous-branche d'un module principal est constituée d'au moins un élément semi-conducteur de puissance à taux de conduction contrôlée et chaque sous-branche d'un module principal comprend une diode en antiparallèle d'une cellule de coupure.

Selon une variante de réalisation,
15 l'élément semi-conducteur de puissance à taux de conduction contrôlée d'une cellule de coupure d'un module principal est un transistor bipolaire à porte isolée (IGBT) .

Selon une variante préférée, l'élément
20 semi-conducteur de puissance à taux de conduction contrôlée d'une cellule de coupure d'une sous-branche d'un module principal est constitué d'au moins un transistor à effet de champ et d'un transistor
25 bipolaire à porte isolée (IGBT) en série électrique avec le transistor à effet de champ par connexion du drain du transistor à effet de champ avec l'émetteur du transistor IGBT, leurs grilles G étant connectées à un circuit de commande assurant à l'ensemble un
30 comportement en commutation du type montage cascode. En fonction de la valeur du courant permanent à faire

transiter, la branche principale comprend plusieurs modules principaux en parallèle électrique les uns avec les autres, avec avantageusement chaque module principal qui comporte plusieurs sous-branches en parallèle électrique les unes avec les autres. Selon un mode de réalisation préféré, la branche auxiliaire comprend au moins deux sous-branches de temporisation en parallèle électrique l'une de l'autre, la deuxième sous-branche de temporisation comprenant au moins une troisième cellule de coupure constituée d'une pluralité de thyristors de puissance mis en cascade et au moins un troisième module d'aide à la commutation avec au moins un troisième condensateur, au moins une troisième inductance et au moins une troisième résistance en série électrique avec le troisième condensateur lui-même en parallèle électrique avec sa résistance de décharge et un limiteur de surtension lui-même en série avec une résistance.

Selon une variante préférée, chaque interrupteur-sectionneur mécanique de chaque sous-branche de chaque module principal est constitué de deux ampoules à vide en série électrique.

L'invention concerne également un ensemble d'appareillages électrique destiné à être implanté dans un moyen de transmission de l'énergie électrique haute tension, en courant alternatif ou en courant continu, comprenant un disjoncteur mécatronique décrit ci-dessus, et aux bornes duquel sont connectés en série de part et d'autre au moins un appareillage électrique de mise à la terre.

Cet ensemble d'appareillages comprend avantageusement un appareillage de pontage monté en parallèle électrique aux bornes du disjoncteur mécatronique et adapté pour faire transiter sur
5 commande et pendant un temps déterminé un courant transitoire, supérieur au pouvoir du disjoncteur mécatronique, d'une borne à l'autre du disjoncteur sans passer par ce dernier.

De préférence, il comprend en outre, de
10 part et d'autre des bornes du disjoncteur hybride, un appareillage de sectionnement monté en série électrique avec le disjoncteur mécatronique et à l'extérieur des bornes de connexions électriques des appareillages de mise à la terre. Avantageusement, l'ensemble
15 d'appareillages comprend en outre entre une borne de connexion électrique d'un appareillage de mise à la terre et un appareillage de sectionnement, un appareillage d'insertion de résistance électrique en série électrique avec ce dernier. De préférence, la
20 valeur de cette résistance à insérer est égale à l'impédance caractéristique de la ligne ou du câble auxquels le disjoncteur mécatronique selon l'invention est raccordé en série électrique. Ainsi, de préférence, la résistance électrique a une valeur comprise entre
25 100 Ω (Ohm) et 1 000 Ω .

Selon une variante préférée, l'ensemble d'appareillages comprend un disjoncteur supplémentaire en série électrique avec le dispositif disjoncteur mécatronique, le disjoncteur supplémentaire étant
30 adapté pour couper les faibles courants. Typiquement, les faibles courants à couper sont inférieurs à 100 A.

Un tel disjoncteur supplémentaire peut être un disjoncteur de transfert pour retour métallique (M.R.T.B). Il peut aussi s'agir d'un disjoncteur de type mécanique à soufflage d'arc.

5 Avantageusement, les appareillages et disjoncteur supplémentaire sont conçus sous forme modulaire seul ou associés à plusieurs.

 L'invention concerne également un procédé de déclenchement d'un dispositif disjoncteur
10 mécatronique décrit ci-dessus, selon lequel en présence uniquement d'un courant permanent dans la branche principale, et en l'absence d'ordre spécifique, on maintient chaque interrupteur-sectionneur en position fermée et l' (les) élément (s) semi-conducteur de
15 puissance à taux de conduction contrôlée à l'état passant et l'ensemble des thyristors de puissance de la branche auxiliaire à l'état non-passant et selon lequel soit en cas d'une surintensité de courant dans la branche principale du dispositif, soit à la réception
20 d'un ordre spécifique, il comporte les étapes suivantes :

 a/ basculement de l'état passant à un état non passant de l' (des) élément (s) semi-conducteur de puissance à taux de conduction contrôlée tout en
25 maintenant fermé chaque interrupteur-sectionneur de sorte à dévier la totalité du courant dans la au moins une sous-branche de temporisation pendant une durée nécessaire à l'ouverture de chaque interrupteur-sectionneur mécanique;

30 b/ de façon synchrone à l'étape a/ basculement de l'état non passant à un état passant des

thyristors de puissance d'au moins une sous-branche de temporisation pour atteindre un niveau de tension aux bornes de la branche principale et de celle auxiliaire permettant à la fois de ne faire circuler aucun courant
5 ni dans la branche principale, ni dans la branche d'armement et ni dans le limiteur de surtension, de permettre le basculement ultérieur de l'état non passant à un état passant des thyristors de puissance de la branche d'armement en position d'ouverture de
10 chaque interrupteur-sectionneur mécanique et de permettre le basculement ultérieur de l'état passant à l'état non passant des thyristors de puissance de la au moins une sous branche de temporisation en position d'ouverture de chaque interrupteur-sectionneur
15 mécanique;

c/ une fois l'étape b/ réalisée, ouverture de chaque interrupteur-sectionneur mécanique;

d/ une fois l'étape c/ réalisée et lorsque chaque interrupteur-sectionneur mécanique a atteint sa
20 position d'ouverture, basculement de l'état non passant à un état passant des thyristors de puissance de la sous-branche d'armement pour atteindre un niveau de tension à ses bornes permettant de dévier la totalité du courant vers le (s) limiteur (s) de surtension;

25 e/ extinction du courant par le (s) limiteur (s) de surtension principal (ux) .

Selon une variante avantageuse, on réalise en outre une étape f/, d'élimination des éventuels courants de fuite résiduels par ouverture d'au moins un
30 appareillage de sectionnement en série avec le disjoncteur mécatronique selon l'invention.

L'invention concerne enfin un système de contrôle commande de mise en œuvre du procédé décrit ci-dessus .

5 **BREVE DESCRIPTION DES DESSINS**

D'autres avantages et caractéristiques de l'invention ressortiront mieux à la lecture de la description détaillée faite en référence aux figures suivantes parmi lesquelles:

- 10 - la figure 1 est une vue schématique de l'architecture électrique globale d'un dispositif disjoncteur mécatronique selon l'invention ;
- la figure 2 est une vue du schéma électrique global d'un premier mode de réalisation du
- 15 dispositif -disjoncteur hybride selon l'invention;
- les figures 2A à 2H sont des vues des schémas électriques équivalents du disjoncteur mécatronique selon la figure 2 en fonction des
- différentes étapes de déclenchement à partir de
- 20 l'apparition d'un courant de défaut;
- la figure 21 une vue du schéma électrique global d'un premier mode de réalisation du dispositif-
- disjoncteur hybride selon l'invention ;
- la figure 3 représente les différentes
- 25 courbes de courant dans les différentes branches du disjoncteur mécatronique selon la figure 2 en fonction du temps corrélé aux différentes étapes des figures 2A à 2H;
- la figure 4 est une vue schématique d'une
- 30 architecture globale d'un ensemble d'appareillages

électrique comprenant un dispositif disjoncteur
mécatronique selon l'invention;

- la figure 5 est une vue du schéma
électrique d'un mode de réalisation d'une module
5 principal d'une branche principale de disjoncteur
mécatronique selon l'invention;

- la figure 5A est une vue du schéma
électrique d'une variante de réalisation d'une module
principal selon la figure 5 selon laquelle le module
10 est de structure modulaire;

- la figure 6 est une vue du schéma
électrique d'un mode de réalisation également de
structure modulaire d'une module principal selon la
figure 5;

- la figure 6A est une vue du schéma
électrique d'une variante de réalisation d'une module
principal selon la figure 6;

- la figure 7 est une vue du schéma
électrique d'une variante de réalisation d'une cellule
20 de coupure selon l'invention.

EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

Bien que décrite spécifiquement en relation
avec l'application de coupure de courant continu élevé
25 dans une ligne de distribution et/ou de transmission,
l'invention peut être envisagée pour d'autres
applications .

En particulier, on peut mettre en œuvre le
disjoncteur mécatronique selon l'invention pour couper
30 des courants alternatifs.

On peut également mettre en œuvre le disjoncteur mécatronique selon l'invention dans une ligne à isolation gazeuse (en anglais Gas Insulated Line, GIL en abrégé) .

5 On a représenté en **figure 1** une architecture électrique globale d'un dispositif disjoncteur mécatronique 1 selon l'invention destiné à couper des courants continus élevés dans des réseaux de transmission L dans une gamme de tension jusqu'à
10 320kVCC. Les inventeurs pensent d'ailleurs qu'à l'avenir un tel disjoncteur mécatronique pourra couper des courants continus dans une gamme jusqu'à 500kVCC voire au-delà.

Un tel dispositif 1 comprend tout d'abord
15 une branche principale 10 dans laquelle circule le courant primaire en régime permanent. Elle comprend une pluralité de modules principaux 10.1, 10.2, 10.n identiques et en parallèle électrique les uns avec les autres. Chacun des modules principaux 10.1, 10.2, 10.n
20 est lui-même constitué d'une pluralité de sous-branches fonctionnellement identiques et en parallèle électrique les unes avec les autres. On décrit les fonctions de chaque branche et sous-branche et de leurs composants électroniques associés pour une opération de coupure du
25 courant, i.e. à l'apparition d'un défaut sur le réseau L dans lequel est intégré le disjoncteur hybride selon l'invention, qui se traduit au moins par une surintensité.

Chaque module principal comprend au moins
30 un interrupteur-sectionneur mécanique 100 en série électrique avec deux sous-modules d'aide à la

commutation électronique. Plus la tension du réseau dans lequel est intégré un disjoncteur mécatronique selon l'invention est élevée, plus on augmente en conséquence le nombre d'interrupteurs-sectionneur 5 mécanique connectés en série. De préférence, un interrupteur-sectionneur mécanique est constitué de deux ampoules à vide en série, ayant typiquement un pouvoir de coupure pouvant atteindre quelques kA en courant alternatif. Un actionneur électromagnétique 10 développé spécifiquement pour les manœuvres des interrupteurs-sectionneurs mécaniques selon l'invention est décrit et revendiqué dans la demande de brevet déposé le même jour que la présente demande et intitulée « *Actionneur à aimants permanents et* 15 *interrupteur mécanique actionné par un tel actionneur* ».

Chaque sous module d'aide à la commutation électronique de part et d'autre de(s) 1'interrupteur-sectionneur mécanique comprend un ou plusieurs éléments 20 à semi-conducteur de puissance à taux de conduction contrôlée. De préférence, il s'agit de transistors à base de Silicium, de type IGBT (acronyme anglais de Insulated Gate Bipolar Transistors). Il peut également s'agir de composants à base de Carbure de Silicium, 25 actuellement en cours de développement, comme des transistors hybrides JFET/BJT, ou même de Thyristors de type GTO. Chaque sous-module doit réaliser les fonctions suivantes:

- effectuer la mise en parallèle de 30 plusieurs sous-branches d'une pluralité d'interrupteurs sectionneurs mécanique ;

- mesurer le courant circulant dans chacune de ces sous branches ;

- assurer l'équilibrage dynamique des courants dans chacune de ces sous branches, de façon à ce que les échauffements dans les divers composants des sous branches soient maîtrisés.

Les éléments à semi-conducteur de puissance à taux de conduction contrôlée doivent réaliser les fonctions suivantes :

- en régime de conduction, ils permettent, soit via le contrôle de leur conductivité, soit via le contrôle de leur taux de conduction défini comme le rapport entre leur durée de conduction et la somme de leur durée de conduction et de leur durée de non-conduction, d'assurer le réglage des courants dans chacune des sous-branches d'un même module principal 10.1, 10.2, ..10.n en vue d'assurer l'équilibrage thermique des constituants des sous-branches de ce module, et aussi le réglage des courants dans chacun des modules principaux 10.1, 10.2, ..10.n en vue d'assurer leur équilibrage thermique;

- permettre la commutation rapide du courant de la branche principale 10 vers la branche auxiliaire 11, comme expliqué par la suite ;

- permettre le retour à la conduction de la branche principale.

- désactiver une ou plusieurs sous-branches d'un même module principal 10.1, 10.2, ..10.n lorsque le courant d'une sous branche est anormalement différent de la moyenne des courants transitant dans les autres sous branches, cette désactivation donnant

lieu à la télésignalisation d'un défaut, et permettant la mise en sécurité des composants impliqués dans le défaut.

A l'état passant, compte tenu du courant
5 relativement élevé qui les traverse, et de la chute de tension développée à leurs bornes, chacun des composants électronique d'un sous module d'aide à la commutation électronique dissipe une puissance thermique importante. On veille donc à ce que le
10 montage de ces composants assure la dissipation correcte de cette puissance thermique.

De préférence, cette dissipation est effectuée de façon passive, par convection naturelle de l'air ou du gaz entourant les sous modules d'aide à la
15 commutation électronique, et grâce à une orientation géométrique de ceux-ci optimisant cette convection.

Dans un mode préféré de réalisation, les transistors IGBT sont équipés de diodes montées en antiparallèle.

20 En parallèle de la branche principale 10 est prévue une branche auxiliaire 11 avec trois sous-branches de temporisation 11.1, 11.2, 11.3 et une sous-
branche d'armement 11.4.

Chacune des sous-branches 11.1, 11.2, 11.3,
25 11.4 comprend une pluralité de thyristors de puissance en cascade. Pour certaines applications, le sens du courant primaire peut s'inverser. C'est le cas évidemment en courant alternatif, mais aussi le cas en courant continu lorsque l'emplacement du disjoncteur 1
30 est tel que le sens du flux de puissance le traversant peut s'inverser. Typiquement, cela est le cas pour des

réseaux en courant continu à tension élevée (HDVC) qui sont interconnectés. Alors, dans ces cas là, on duplique dans chaque sous-branche la pluralité de thyristors de puissance de façon à ce que chaque
5 pluralité soit dédiée à un sens de passage du courant, et on connecte donc les pluralités de thyristors en parallèle tête bêche entre eux.

On peut envisager qu'une pluralité de thyristors de puissance soit formée par la mise en
10 série de plusieurs groupes, le nombre de groupes dépendant de la tension d'utilisation à laquelle est soumise le disjoncteur mécatronique selon l'invention. Cela peut être fait pour des raisons de commodités industrielles, telles que la masse limite des objets à
15 manipuler, la hauteur maximum raisonnable au delà de laquelle il est impossible de garantir la mise en compression correcte de chaque pluralité de thyristors.... De préférence, un groupe est constitué d'un nombre égal à dix thyristors de puissance mis en
20 cascade et identiques.

Chaque thyristor de puissance haute tension est associé à son module de commande de gâchette, son ou ses condensateurs de transfert, ainsi qu'un certain nombre d'autres éléments destinés à contribuer à sa
25 commande, sa surveillance et sa mise en sécurité pour former une pluralité de thyristors en cascade.

Un module de commande de gâchette assure le pilotage d'un thyristor de puissance auquel il est associé. Il doit donc réaliser les fonctions suivantes:

30 · recevoir une demande de signalisation d'état, délivrée par un autre module de commande de

gâchette précédent ou par un système de contrôle commande, selon sa position dans la sous-branche considérée ;

5 • recopier et transmettre cette signalisation au module de commande de gâchette suivant, ou au système de contrôle commande, selon sa position dans la branche considérée, la réception par le système de contrôle commande de cette recopie signifiant que tous les modules de commande de
10 gâchettes impliqués sont dans un état de fonctionnement correct, la non réception signifiant qu'une partie au moins des modules de commandes impliqués ne sont pas dans un état de fonctionnement correct, cet information permettant au système de contrôle commande
15 d'émettre si nécessaire une télésignalisation de défaut et d'appliquer une stratégie de sécurisation du disjoncteur mécatronique empêchant par exemple toute opération qui ne pourrait se dérouler entièrement;

 • recevoir un ordre de mise en conduction,
20 délivré par un autre module de commande de gâchette précédent ou par un système de contrôle commande, selon sa position dans la sous-branche considérée ;

 • recopier et transmettre cet ordre au module de commande de gâchette suivant, ou au système
25 de contrôle commande, selon sa position dans la branche considérée ;

 • exécuter cet ordre en délivrant au thyristor de puissance l'impulsion de commande dont il a besoin pour passer de l'état non conducteur (passant)
30 à l'état conducteur (non passant) ;

- stocker l'énergie nécessaire à la mise en conduction du thyristor.

- protéger contre les surtensions le thyristor de puissance auquel il est associé, via un ou plusieurs limiteurs de surtension de type ZnO ou de type diode Zener de puissance, lesquelles sont connues sous le nom de diodes Transils.

Chaque module de commande de gâchette d'un thyristor de puissance donné tire son énergie du courant qui le traverse lorsqu'une tension apparaît aux bornes des condensateurs de transfert auxquels il est associé. Ces condensateurs ont donc pour fonction de transférer de l'énergie dans les modules de commande de gâchette. Ils forment une chaîne dont chaque maillon est constitué d'un condensateur de transfert et de modules de commande de gâchettes, et le cas échéant d'autres composants tels que des résistances d'amortissement. L'ensemble (modules de commande et condensateurs de transfert) est en parallèle électrique avec une pluralité de thyristors de puissance.

La première sous-branche de temporisation 11.1 a pour fonction d'assurer l'essentiel de la tenue diélectrique des branches de temporisation particulièrement lors de l'apparition de la tension de rétablissement à ses bornes.

La deuxième sous-branche de temporisation 11.2 doit réaliser les fonctions suivantes :

- dériver le courant pendant une durée suffisante pour que chaque interrupteur-sectionneur mécanique commence à s'ouvrir et qu'il soit capable de tenir un premier niveau de tension.

• assurer une chute de tension suffisamment basse pour ne pas entraîner la mise en conduction des limiteurs de surtension connectés en parallèle sur les éléments à semi-conducteurs de puissance de la branche principale 10;

• assurer une chute de tension suffisamment élevée pour faciliter, le moment venu, la commutation du courant vers la troisième sous-branche de temporisation 11.3

• stocker une tension suffisante pour assurer le blocage de ses propres thyristors de puissance lors de la mise en conduction de la troisième sous-branche de temporisation 11.3.

On précise ici que le nombre nécessaire de deux sous-branches de temporisation 11.2, 11.3 est rendu nécessaire principalement par les limitations de tenue en di/dt et du/dt des thyristors de puissance mais également par les tensions de tenue des éléments à semi-conducteur de puissance à taux de conduction contrôlée (IGBT), des limiteurs de surtension, et aussi des valeurs de tension et de surtension du réseau. Au moment d'actionner la mise en conduction de la sous-branche d'armement 11.4, la troisième sous-branche de temporisation 11.3 doit développer une tension de l'ordre de 10 % à 20% de la tension de rétablissement aux bornes du disjoncteur mécatronique 1, afin de limiter les contraintes en di/dt des thyristors de puissance grâce à l'insertion d'inductances série, lesquelles augmentent le niveau de tension requis pour assurer la commutation d'une branche vers la suivante.

La troisième sous-branche de temporisation 11.3 doit réaliser les fonctions suivantes :

- dériver le courant depuis la deuxième sous-branche de temporisation 11.2 vers elle-même une fois que les interrupteur-sectionneurs mécanique ont atteint un premier niveau d'ouverture, et pendant la durée nécessaire à chaque interrupteur-mécanique pour être capable de tenir diélectriquement la tension de rétablissement aux bornes ;
- assurer une chute de tension suffisamment basse pour ne pas entraîner le claquage diélectrique de chaque interrupteur-mécanique ;
- assurer une chute de tension suffisamment élevée pour faciliter, le moment venu, la commutation du courant présent dans ladite sous-branche 11.3 vers la sous-branche d'armement 11.4 ;
- stocker une tension et une énergie suffisantes pour assurer le blocage de ses propres thyristors de puissance lors de la mise en conduction la sous-branche d'armement 11.4.

La sous-branche d'armement 11.4 a pour fonction essentielle d'insérer une impédance instantanée variable dans le circuit. L'impédance instantanée peut être définie comme le rapport entre la tension instantanée à ses bornes et le courant instantané qui la traverse. Autrement dit, la sous-branche d'armement 11.4 doit donc présenter:

- à l'instant de sa mise en conduction, une très basse impédance instantané, de façon à ce que la totalité du courant primaire soit dévié vers elle-même ;

- pendant sa conduction, une impédance instantanée croissante de façon à ce que la tension à ses bornes induise la mise en conduction du limiteur de surtension principal 12.

5 • après sa période de conduction, une très haute impédance de façon à ce que le courant de fuite résiduel éventuel qui la traverse soit négligeable.

Dans chacune des deuxième 11.2 et troisième 11.3 sous-branche de temporisation et sous-branche d'armement 11.4, il est prévu au moins un module d'aide à la commutation électronique qui doit réaliser les fonctions suivantes dans sa propre sous-branche :

- limiter la dérivée du courant par rapport au temps notée di/dt ;

15 • maintenir une tension constante aux bornes du disjoncteur mécatronique pour le module de la deuxième sous-branche de temporisation 11.2 ;

- développer une tension croissante de façon à permettre la commutation vers la sous-branche d'armement 11.4, pour le module de la troisième sous-branch

20 de temporisation 11.3 ;

- développer une tension suffisamment élevée pour permettre la commutation vers le limiteur de surtension principale 12 pour le module de la sous-branch

25 d'armement 11.4.

Un module d'aide à la commutation électronique est constitué de la mise en parallèle d'au moins un condensateur, d'une résistance de décharge de ce condensateur, et pour les deux sous-branches de

30 temporisation 11.2, 11.3 d'un limiteur de surtension

auxiliaire (parafoudre) . On peut lui associer une ou plusieurs inductances en série, ainsi qu'une ou plusieurs résistances en série.

Le disjoncteur mécatronique selon
5 l'invention comprend enfin un limiteur de surtension principal 12 en parallèle électrique de la branche principale 10, et doit réaliser les fonctions suivantes :

- assurer l'extinction totale du courant ;
- 10 • stocker temporairement l'énergie électromagnétique présente dans la ligne au moment de l'ouverture de la branche principale 10 ;
- si nécessaire évacuer cette énergie de façon suffisamment rapide pour autoriser des cycles de
15 fonctionnement également rapides.

Dans un mode de réalisation préféré, le limiteur de surtension 12 est constitué d'un ensemble de parafoudres de type ZnO.

On décrit maintenant un mode de réalisation
20 d'un disjoncteur mécatronique 1 selon l'invention en référence aux **figures 2 à 2H**.

On précise ici que les indices « L » sont relatifs à la ligne L de transmission d'électricité dans laquelle le disjoncteur mécatronique selon
25 l'invention est inséré : ainsi U_L , R_L , L_L désignent respectivement le niveau de haute tension, la résistance, l'inductance de la ligne L.

On précise ici que les indices a sont relatifs aux composants électroniques du disjoncteur
30 mécatronique qui sont dédiés à un sens de passage du courant (de la droite vers la gauche sur les figures

concernées) . Les indices b sont relatifs aux composants électroniques qui sont dédiés au sens de passage de courant opposé à a . Par souci de clarté, du fait que les composants concernés a sont identiques et montés électriquement tête-bêche à ceux b dédiés au sens opposé du courant on ne décrit que ceux-ci. On comprend aisément que la disposition est symétrique, à l'exception des diodes de roue libre des transistors IGBT, l'une notée 1011a fonctionnant avec le transistor IGBT 1010a avec lequel elle n'est pas en anti-parallèle, l'autre diode notée 1011b fonctionnant avec le transistor 1010b avec lequel elle n'est pas non plus en antiparallèle. On précise d'ailleurs que sur la figure 21, les diodes 1011a et 1011b sont représentées en antiparallèle sur leur cellule de coupure respective 101b, 101a et non sur l'élément semi-conducteur de puissance à taux de conduction contrôlée respectivement 1010b, 1010a comme montré sur la **figure 3** . En effet, les diodes 1011a et 1011b sont de préférence des éléments à part entière des cellules de coupure 101b, 101a.

On précise également que l'on a représenté, sur les figures 2 à 21, qu'une seule sous-branche d'un seul module principal dans la branche principale 10 et que donc seule celle-ci est décrite ici.

On précise également que l'on a représenté sur les figures 2 à 21, qu'un seul interrupteur-sectionneur mécanique 100, mais que de fait, il peut s'agir d'une pluralité d'interrupteur-sectionneur mécaniques connectés en série, et que les composants linéaires et non linéaires destinés à assurer la

coordination de l'isolement et la répartition des tensions aux bornes des interrupteurs-sectionneurs mécaniques de chacune des sous-branches ne sont pas non plus représentés. Un module principal 10.1 avec une pluralité de sous-branches, d'interrupteur-sectionneur en série et les composants linéaires et non linéaires associés est décrit ci-après en référence aux figures 5 à 6c.

On précise également que l'on a représenté sur les figures 2 à 21, qu'un seul thyristor de puissance à chaque endroit concerné mais que de fait il s'agit d'une pluralité de thyristors en cascade. Seul un de ceux-ci est donc décrit.

On précise enfin que l'on a seulement symbolisé sur les figures 2 à 2H, un thyristor de puissance en tant que tel sans montrer son (ses) condensateur (s) de transfert et le dispositif de commande de sa gâchette associés. En figure 21, on a représenté en parallèle aux bornes de chaque thyristor de puissance 111a, 111b; 112a, 112b ; 113a, 113b ; 114a, 114b, un limiteur de surtension (parafoudre) respectivement 1116a, 1116b; 1126a, 1126b ; 1136a, 1136b ; 1146a, 1146b. De fait, lorsqu'il s'agit d'une pluralité de thyristors de puissance en cascade, il est prévu une pluralité de limiteurs de surtension en série électrique entre eux, ladite pluralité de limiteurs de surtension étant en parallèle électrique de la pluralité de thyristors de puissance concernée. Chaque un limiteur de surtension (parafoudre) 1116a, 1116b; 1126a, 1126b ; 1136a, 1136b ; 1146a, 1146b a ainsi pour

fonction de répartir la tension de rétablissement sur chaque thyristor de puissance.

La branche principale 10 comprend un interrupteur-sectionneur mécanique 100 en série
5 électrique avec une cellule de coupure 101a. Cette cellule de coupure 101a est constituée d'un transistor bipolaire à porte isolée (IGBT) 1010a en antiparallèle avec une diode 1011b. De préférence, les cellules de coupure 101a, 101b sont montées en extrémité de branche
10 principale 10 de part et d'autre de l' (des) interrupteur-sectionneur (s) mécanique 100.

En parallèle électrique de la cellule de coupure 101a est monté un limiteur de vitesse de croissance de tension 102a. Le limiteur de vitesse de
15 croissance est constitué d'une diode 1020a en série électrique avec un condensateur 1021a lui-même en parallèle électrique avec sa résistance de décharge 1022a. Le condensateur 1020a permet la maîtrise de la vitesse de croissance de la tension à ses bornes
20 lorsque le transistor IGBT 101a est basculé à l'état non passant. La diode 102a empêche la décharge violente du condensateur 1021a lors de la mise en conduction de du transistor IGBT 101a. Enfin, la résistance 1022a permet la décharge lente du condensateur 102a.
25 Autrement dit, ce limiteur de tension 102a associé au transistor IGBT 1010a protège ce dernier par la maîtrise de la vitesse de croissance de la tension à ses bornes lors de sa commutation de l'état conducteur (passant) vers l'état non conducteur (non passant) .
30 Cette limitation de la vitesse de croissance de la tension a en outre un effet bénéfique pour la

commutation du courant de la branche principale vers la branche auxiliaire en ce sens qu'elle contribue à la maîtrise du di/dt du courant dans cette dernière.

Egalement en parallèle électrique de la
5 cellule de coupure 101a est monté un limiteur de surtension 103a. Celui-ci est déterminé de sorte qu'il limite la tension à une valeur inférieure à la tenue en tension du transistor IGBT 101a. Typiquement, pour un transistor IGBT 101a de 3300V de tenue en tension, on
10 détermine une valeur maximale de tension égale à 2800V limitée par le limiteur 103a.

La branche auxiliaire 11 comprend une première sous-branche de temporisation 11.1 comprenant une pluralité de thyristors de puissance 111a mis en
15 cascade.

Une deuxième sous-branche de temporisation 11.2, dans le prolongement de la première sous-branche de temporisation 11.1, comprend un premier module M1 d'aide à la commutation avec un premier condensateur
20 1120, une première inductance 1121 et une première résistance 1122 en série électrique avec le premier condensateur lui-même en parallèle électrique avec sa résistance de décharge 1125. Un limiteur de surtension auxiliaire 1124 est en parallèle électrique avec le
25 condensateur 1120 et permet à la fois de le protéger et de protéger sa résistance de décharge 1125 et aussi de définir et limiter la tension qui apparaîtra aux bornes de la branche auxiliaire lorsque la deuxième sous-
branche de temporisation 11.2 sera traversée par le
30 courant primaire.

On précise ici que l'inductance 1121 et la
résistance 1122 ne sont pas impératives: en effet,
leurs valeurs dépendent des valeurs globales des
constantes distribuées de la première sous-branche de
5 temporisation 11.1 et de la sous-branche de
temporisation 11.2, définies au moins par les
résistances intrinsèques et inductances de fuite.

Une troisième sous-branche de temporisation
11.3, en parallèle électrique de la deuxième sous-
10 branche de temporisation 11.2, comprend de manière
analogue à la deuxième sous-branche de temporisation,
deuxième module M2 d'aide à la commutation avec un
deuxième condensateur 1130, une deuxième inductance
1131 et une deuxième résistance 1132 en série
15 électrique avec le deuxième condensateur lui-même en
parallèle électrique avec sa résistance de décharge
1135. Un limiteur de surtension auxiliaire 1134 est en
parallèle électrique avec le condensateur 1130 et
permet à la fois de le protéger et de protéger sa
20 résistance de décharge 1135 et aussi de définir et
limiter la tension qui apparaîtra aux bornes de la
branche auxiliaire lorsque la troisième sous-branche de
temporisation 11.3 sera traversée par le courant
primaire. En outre, il est prévu une résistance
25 supplémentaire 1136 en série électrique avec le
deuxième limiteur de surtension auxiliaire 1134, cette
résistance permettant d'ajuster, en fonction des
caractéristiques du limiteur de surtension auxiliaire
1134, l'évolution de la tension qui apparaîtra aux
30 bornes de la branche auxiliaire lorsque la troisième

sous-branche de temporisation 11.3 sera traversée par le courant primaire.

On précise ici que la résistance 1136 peut être omise si les caractéristiques du limiteur de surtension auxiliaire 1134 sont intrinsèquement adaptées au besoin.

On précise également ici que l'inductance 1131 et la résistance 1132 ne sont pas impératives: en effet, leurs valeurs dépendent des valeurs globales des constantes distribuées de la première sous-branche de temporisation 11.1 et de la sous-branche de temporisation 11.3, définies au moins par les résistances intrinsèques et inductances de fuite.

La branche auxiliaire 11 comprend enfin une sous-branche d'armement 11.4 comprenant également une pluralité de thyristors de puissance 114a mis en cascade et un troisième module d'aide à la commutation M3 analogue aux deux premiers modules d'aide à la commutation M1 et M2. Plus exactement, ce troisième module d'aide à la commutation M3 comprend un troisième condensateur 1140, une troisième inductance 1141 et une troisième résistance 1142 en série électrique avec le troisième condensateur lui-même en parallèle électrique avec sa résistance de décharge 1145. Un limiteur de surtension auxiliaire 1144 est en parallèle électrique avec le condensateur 1140 et permet à la fois de le protéger et de protéger sa résistance de décharge 1145 lorsque le limiteur de surtension principal 12 sera traversée par le courant primaire.

On précise que ce limiteur de surtension auxiliaire 1144 n'est pas indispensable au

fonctionnement du disjoncteur mécatronique, et que sa tension d'amorçage est choisie supérieure à celle du limiteur de surtension principal 12. Cependant, il est préférable d'en avoir un, car pour des dimensions importantes d'un appareillage électrique haute tension, il peut apparaître des surtensions locales à haute fréquence même si la tension aux bornes du système est limitée par ailleurs, comme c'est le cas ici avec le limiteur de surtension principal 12.

On précise également ici que la résistance 1142 et l'inductance 1141 ne sont pas impératives: en effet, leurs valeurs dépendent des valeurs globales des constantes distribuées de la sous-branche d'armement 11.4, définies au moins par les résistances intrinsèques et inductances de fuite.

Enfin, en parallèle électrique des branches principale 10 et auxiliaire 11, est monté un limiteur de surtension principal 12. Ce limiteur de surtension est dimensionné pour la tension du réseau L dans lequel le disjoncteur mécatronique 1 est inséré et à l'énergie nécessaire à absorber et à dissiper lors de l'extinction du courant lors d'un défaut comme expliqué maintenant. Bien entendu, il est tenu compte de la coordination d'isolement.

On décrit donc le fonctionnement du dispositif disjoncteur mécatronique 1 en relation avec les figures 2A à 2H illustrant les différentes séquences avec les schémas électriques équivalents qui en résultent, dans le cas particulier de l'apparition d'un défaut, étant précisé que les mêmes séquences se succèdent dans le cas d'une ouverture résultant d'un

ordre spécifique. En figure 3, les courbes représentatives des valeurs de courant dans les différentes sous-branches en fonction du temps sont montrées .

5 En régime permanent, c'est-à-dire en fonctionnement normal du réseau L, avant l'instant t_1 en figure 3, tous les transistors IGBT 1010a de la branche principale sont à l'état passant (conducteur), tout le courant passe alors à travers ceux-ci (courant
10 i_{io} de la figure 2A) .

En cas d'apparition d'un défaut sur le réseau L qui se traduit par une surintensité de courant (de droite vers la gauche en figure 2), à l'instant t_1 en figure 3, alors on fait basculer, par
15 l'intermédiaire du système de contrôle commande, les transistors IGBT 1010a de leur état passant à non passant. Il y a alors commutation du courant des transistors IGBT 1010a, vers leurs limiteurs de surtension 103a. Cette commutation est effectuée de
20 façon progressive du fait la présence de limiteur de vitesse de croissance de tension 102a. Il se produit alors une élévation rapide de tension aux bornes des branches principale 10 et auxiliaire 11. De façon synchrone, on délivre de manière automatique une
25 énergie de commande aux modules de commandes de gâchette des thyristors de puissance 111a, 112a et 113a. Cette énergie prélevée sur le réseau L, permettra le moment venu la mise en conduction des thyristors de puissance 111a, 112a. Toujours de façon synchrone, et à
30 un instant très légèrement supérieur à t_2 en figure 3, le système de contrôle commande transmet, de préférence

par fibre optique, à l'ensemble des modules de commande de gâchette des thyristors de puissance 111a, 112a et 113a une demande de signalisation d'état.

Si le système de contrôle commande reçoit
5 en retour, toujours de préférence par fibre optique, la confirmation que l'ensemble des modules de commande de gâchette des thyristors de puissance 111a, 112a et 113a ont bien reçu un niveau d'énergie suffisant et qu'ils sont en état d'assurer leur fonction, alors il émet,
10 toujours de préférence par fibre optique, l'ordre de mise en conduction des thyristors de puissance 111a, 112a et, simultanément, il transmet à l'interrupteur-sectionneur mécanique 100, toujours de préférence par fibre optique, l'ordre de s'ouvrir. Cette ouverture ne
15 commencera à se produire qu'après un délai nettement supérieur à l'écart de temps $t_2 - t_1$ en figure 3, compte tenu des inerties mécaniques de l'interrupteur-sectionneur mécanique 100. C'est pourquoi son ordre d'ouverture lui est donné de manière anticipée par le
20 système de contrôle commande, afin de réduire le temps de fonctionnement global du disjoncteur mécatronique .

Si le système de contrôle commande, au delà d'un temps de latence spécifié, ne reçoit pas en retour la confirmation que l'ensemble des modules de commande
25 de gâchette des thyristors de puissance 111a, 112a et 113a ont bien reçu un niveau d'énergie suffisant et qu'ils sont en état d'assurer leur fonction, il émet alors une télésignalisation de défaut et n'envoie dans ce cas aucun ordre de conduction, ni aux thyristors de
30 puissance ni à l'interrupteur-sectionneur mécanique

100, et il exécute alors une stratégie de mise en sécurité du disjoncteur mécatronique 1.

Après cet instant t_1 , le courant est donc dévié de la branche principale 10 et passe donc dans
5 les sous-branches de temporisation 11.1 et 11.2 (figure 2B). Pendant une période transitoire, c'est-à-dire jusqu'à l'instant t_2 en figure 3, le courant passe d'une valeur nulle à la valeur du courant du réseau L . La déviation complète est assurée par les valeurs du
10 système RLC constitué par l'inductance 1121, les résistances 1122 et 1125 et le condensateur 1120 déterminées d'une part pour avoir un régime transitoire oscillant entre la branche principale 10 et dans les branches de sous-temporisation concernées 11.1 et 11.2.
15 Ce régime transitoire oscillant est une condition nécessaire d'une part à la commutation rapide du courant de la branche principale 10 vers les sous-branches de temporisation 11.1 et 11.2, et d'autre part pour limiter le di/dt du courant à un niveau inférieur
20 à celui que peuvent accepter les thyristors de puissance 111a et 112a.

A l'instant t_2 en figure 3, tout le courant a donc été dévié dans ces sous-branches 11.1 et 11.2 (figure 2c). Cette topologie subsiste, grâce au
25 dimensionnement des composants électroniques des sous-branches de temporisation 11.1, 11.2, pendant une période de temps déterminée t_d nécessaire à l'actionnement pour ouvrir l'interrupteur-sectionneur mécanique 100 et pour lui permettre de tenir un premier
30 niveau de tension aux bornes. De manière préférée, les inventeurs ont dimensionné une période de temps t_d très

courte entre 200ys et 2000ys suffisante à un actionneur pour ouvrir suffisamment un interrupteur-sectionneur mécanique 100 constitué de deux ampoules à vide en série électrique, cet actionneur étant celui décrit et
5 revendiqué dans la demande de brevet déposée ce jour au nom de la demanderesse et intitulée « *Actionneur électromagnétique à aimants permanents et interrupteur-sectionneur mécanique actionné par un tel actionneur* ».

Le limiteur de surtension 103a et le
10 limiteur de surtension auxiliaire 1124 sont respectivement dimensionnés pour que, lorsque le courant primaire est bien établi dans les sous-branches de temporisation 11.1 et 11.2, c'est-à-dire au bout d'un temps légèrement supérieur à t_2 mais bien
15 inférieur à t_3 en figure 3, l'amplitude du courant résiduel dans la branche principale 10 soit sensiblement nulle, typiquement nettement inférieure à 1 Ampère, de façon à permettre aux ampoules à vide de l'interrupteur-sectionneur mécanique 100 de s'ouvrir
20 sans érosion électrique significative, du fait de la quasi absence d'arc électrique.

A l'instant t_3 égal à t_2 augmenté de la période t_d , en figure 3, on fait basculer, par l'intermédiaire au système de contrôle commande, les
25 thyristors de puissance 113a de la troisième sous-branche de temporisation 11.3 de leur état non passant à leur état passant. Le courant est alors dévié dans cette sous-branche (figure 2D). Le courant i_2 dans cette sous-branche 11.3 va alors passer d'une valeur
30 nulle à la valeur du courant de la ligne L dans cette sous-branche (figure 2E) à l'instant t_4 de la figure 3.

La déviation complète du courant est assurée par les valeurs du système RLC constitué par l'inductance 1131, les résistances 1132 et 1135 et le condensateur 1130 déterminés pour avoir un régime oscillant entre la sous-branche de temporisation 11.2 et cette sous-
5 branche de sous-temporisation concernée 11.3. Ce régime transitoire oscillant est une condition nécessaire d'une part à la commutation rapide du courant de la sous-branche de temporisation 11.2 vers les sous-
10 branches de temporisation 11.3, et d'autre part pour limiter le di/dt du courant à un niveau inférieur à celui que peuvent accepter les thyristors de puissance 113a. A cet instant t_4 , les thyristors de puissance 112a se bloquent d'eux-mêmes (basculement à l'état non
15 passant), du fait de la contre-polarisation transitoire effectuée par le condensateur 1120, et il n'y a plus de courant dans la sous-branche 11.2.

Cette contre-polarisation étant de courte durée, les thyristors de puissance 112a sont adaptés
20 pour avoir un temps de blocage très court et être capables de supporter leur pleine tension de rétablissement directe en un temps compris entre quelques microsecondes et quelques dizaines de microsecondes. La même remarque s'applique, et pour les
25 mêmes raisons, aux thyristors de puissance 111a et 113a.

Pendant cette durée comprise entre les temps t_4 et t_5 en figure 3, la tension aux bornes de la
branche auxiliaire 11 va augmenter de la valeur
30 initiale définie par le limiteur de surtension auxiliaire 1124 à une valeur essentiellement définie

par limiteur de surtension auxiliaire 1134 et sa résistance associée 1136, lorsqu'elle est présente.

Selon les niveaux de tension du réseau L dans lequel le disjoncteur mécatronique selon l'invention 1 est implanté, le rapport entre ces tensions finales et initiales peut varier typiquement de 5 à 20.

Pour qu'une telle élévation de tension aux bornes de la branche auxiliaire 11 soit possible, l'instant t_3 en figure 5 est déterminé de façon à ce que l'ouverture de l'interrupteur-sectionneur mécanique 100 soit suffisante pour lui permettre de résister à cette tension.

Une telle élévation de tension aux bornes de la branche auxiliaire 11 est nécessaire d'une part pour faciliter la commutation future du courant vers la branche d'armement 11.4, dont les grandes dimensions, en très haute tension, impliquent des inductances de fuite élevées et donc requièrent des tensions de commutation importantes, compte tenu de la valeur élevée que peut atteindre le courant de défaut primaire, lorsque sa vitesse de croissance atteint ou dépasse typiquement les 10 Ampères par microseconde.

Elle est nécessaire d'autre part pour délivrer de manière automatique une énergie suffisante aux modules de commandes de gâchette des thyristors de puissance 114a de la branche d'armement 11.4. Cette énergie prélevée sur le réseau L, permettra le moment venu la mise en conduction des thyristors de puissance 114a.

A un instant très légèrement inférieur à t_5 en figure 3, le système de contrôle commande transmet, de préférence par fibre optique, à l'ensemble des modules de commande de gâchette des thyristors de puissance 114a une demande de signalisation d'état.

Si le système de contrôle commande reçoit en retour, de préférence toujours par fibre optique, la confirmation que l'ensemble des modules de commande de gâchette des thyristors de puissance 114a a bien reçu un niveau d'énergie suffisant et qu'ils sont en état d'assurer leur fonction, alors il émet, à l'instant t_5 en figure 3, et de préférence toujours par fibre optique, l'ordre de mise en conduction des thyristors de puissance 114a.

Si le système de contrôle commande, au delà d'un temps de latence spécifié, ne reçoit pas en retour la confirmation que l'ensemble des modules de commande de gâchette des thyristors de puissance 114a a bien reçu un niveau d'énergie suffisant et qu'ils sont en état d'assurer leur fonction, il émet alors une télésignalisation de défaut et n'enverra pas d'ordre de conduction aux thyristors de puissance 114a et il exécute alors une stratégie de mise en sécurité du disjoncteur mécatronique .

Après l'instant t_4 , soit à l'instant t_5 en figure 3, on fait basculer, par l'intermédiaire au système de contrôle commande, les thyristors de puissance 114a de la sous-branche d'armement 11.4 de leur état non passant à leur état passant résultant en la charge rapide du condensateur 1140. Le courant est alors dévié dans cette sous branche 11.4 (figure 2F) .

Le courant i_3 dans cette sous-branche 11.4 va alors passer d'une valeur nulle à la valeur du courant de la ligne L dans cette sous-branche (figure 2G) à l'instant t_6 de la figure 3. La déviation complète du courant est assurée par les valeurs du système RLC constitué par l'inductance 1141, les résistances 1142 et 1145 et le condensateur 1140 et celles du système RLC des sous-branches de temporisation 11.1, 11.3 déterminées pour avoir un régime transitoire oscillant entre ces dernières 11.1, 11.3 et cette sous-branche d'armement 11.4 concernée. Ce régime transitoire oscillant est une condition nécessaire d'une part à la commutation rapide du courant des sous-branches de temporisation 11.1, 11.3 vers la sous-branche d'armement 11.4, et d'autre part pour limiter le di/dt du courant à un niveau inférieur à celui que peuvent accepter les thyristors de puissance 114a. A cet instant t_6 , les thyristors de puissance 111a et 113a se bloquent d'eux-mêmes (basculement à l'état non passant) du fait de la contre-polarisation transitoire effectuée par le condensateur 1130, et il n'y a plus de courant dans leur sous-branche respective 11.1 et 11.3.

Cette contre-polarisation étant de courte durée, les thyristors de puissance 111a et 113a sont adaptés pour avoir un temps de blocage très court et être capables de supporter leur pleine tension de rétablissement directe en un temps compris entre quelques microsecondes et quelques dizaines de microsecondes .

A partir de cet instant t_6 , le condensateur 1140 de la sous-branche d'armement 11.4 continue sa

charge jusqu'à atteindre la tension d'amorçage du limiteur de surtension principal 12. Alors, et sous l'effet de l'énergie réactive du réseau L, cette tension va continuer à augmenter faiblement selon une loi déterminée par la caractéristique du limiteur de surtension principal 12. Simultanément, le courant primaire est transféré de la sous-branche d'armement 11.4 vers le limiteur de surtension principal 12, qui va absorber l'énergie réactive du réseau L.

Cette insertion en série dans le réseau L d'un élément absorbeur d'énergie 12 et de haute tension va induire une décroissance du courant primaire d'autant plus rapide que la tension d'amorçage du limiteur de surtension principal 12 est grande devant la tension nominale du réseau L. Typiquement, le rapport entre la tension d'amorçage du limiteur de surtension principal 12 et la tension nominale du réseau L peut être choisie entre 1 et 4, par exemple 2, selon la tension nominale du réseau L.

A un instant t_6 en figure 3, l'énergie réactive du réseau L n'est plus suffisante pour entretenir le haut niveau de surtension imposé par le limiteur de surtension principal 12, et la tension aux bornes de ce dernier va diminuer rapidement. Dans le même temps, la tension aux bornes du condensateur 1140, qui aura atteint un maximum proche de celui du limiteur de surtension principal 12, va diminuer plus lentement, à un rythme imposé par sa résistance de décharge 1145, laquelle est précisément dimensionnée pour que ces deux vitesses de décroissance soient nettement différentes. Il en résulte qu'à un moment donné, la tension aux

bornes du condensateur 1140 va être supérieure à celle présente aux bornes du limiteur de surtension principal 12. Le condensateur 1140 va ainsi effectuer une contre-polarisation transitoire des thyristors 114a.

5 On rappellera ici que le limiteur de surtension auxiliaire 1144, ayant une tension d'amorçage supérieure à celle du limiteur de surtension principal 12, ne joue aucun rôle dans la séquence qui vient d'être décrite.

10 A l'instant t_7 de la figure 3, les thyristors de puissance 114a se bloquent d'eux-mêmes (basculement à l'état non passant) du fait de la contre-polarisation transitoire effectuée par le condensateur 1140, et il n'y a plus de courant dans la
15 sous-branche d'armement 11.4.

Au delà de cet instant t_7 de la figure 3, plus aucun courant ne circule ni dans la branche principale 10 ni dans la branche auxiliaire 11, en dehors des courants de fuite résiduels dus aux
20 imperfections des composants, et présents sur tout appareillage inséré en série dans un réseau à haute tension. Ces courants seront éliminés si nécessaire par des moyens d'isolement conventionnels placés en série électrique avec le disjoncteur mécatronique, comme
25 précisé ci-après en relation avec la **figure 4**. Le courant primaire est alors entièrement dévié dans le limiteur de surtension principal 12, et le schéma équivalent du système est celui de la figure 2H. Au
bout d'une durée d'autant plus courte que le rapport
30 entre la tension d'amorçage du limiteur principal 12 et la tension nominale du réseau sera élevé, le courant

primaire est réduit aux courants de fuite du disjoncteur mécatronique : la coupure est effective (figure 2H) .

Le condensateur 1140 quant à lui chargé
5 initialement à un niveau de tension élevé, se décharge dans sa résistance de décharge 1145.

En figure 4, on a représenté un ensemble d'appareillage électrique intégré dans un réseau de transport d'électricité haute tension à courant continu
10 de grande puissance et comprenant un disjoncteur mécatronique 1 qui vient d'être décrit.

Les appareillages électriques supplémentaires 2, 3, 4, 5 complètent les performances du disjoncteur 1 par des fonctions auxiliaires adaptées
15 pour respectivement:

- permettre sa maintenance en toute sécurité ;
- accroître sa sûreté de fonctionnement, en ne le soumettant pas à des contraintes électriques
20 lorsque qu'il a réalisé une coupure de courant;
- limiter les courants d'enclenchement;
- permettre la coupure de petits courants;
- autoriser, sur ordre, le passage de courants supérieurs à son pouvoir de coupure.

25 Ainsi, il est prévu tout d'abord de part et d'autre des bornes du disjoncteur un appareillage de mise à la terre 2 qui dans sa position de fermeture permet la mise à la terre des bornes de connexion de la branche principale 10 et de la branche auxiliaire 11,
30 en vue d'opérations de maintenance. En fonctionnement normal, l'appareillage de mise à la terre 2 est bien

évidemment ouvert et doit permettre la tenue diélectrique entre bornes et terre.

Il est également prévu un appareillage de pontage 3 monté en parallèle électrique aux bornes du disjoncteur mécatronique et adapté pour faire transiter sur commande et pendant un temps déterminé, d'une borne à l'autre du disjoncteur mécatronique 1 et sans passer par ce dernier, un courant transitoire supérieur au pouvoir de coupure du disjoncteur mécatronique 1.

Un appareillage de sectionnement 4 est monté en série électrique avec le disjoncteur mécatronique 1 et à l'extérieur des bornes de connexions électriques des appareillages de mise à la terre 2. Il est destiné à permettre la tenue diélectrique entre bornes et entre bornes et terre, dans sa position d'ouverture. Dans sa position fermée, il permet la continuité électrique de la branche principale 10. Associé à un appareillage de mise à la terre 2, il permet ainsi la mise en sécurité du disjoncteur mécatronique 1 en vue de sa maintenance. Ainsi, toute intervention humaine sur le disjoncteur hybride 1 nécessite l'ouverture des appareillages de sectionnement 4 et la mise à la terre.

Un appareillage d'insertion de résistance 5 est monté en série électrique entre chaque appareillage de sectionnement 4 et le disjoncteur mécatronique 1 : cet appareillage 5 est destiné à limiter le courant d'enclenchement lors de la fermeture s'il y a une différence de potentiel aux bornes à l'instant de la fermeture.

Enfin, il est prévu un disjoncteur supplémentaire 6 en série électrique avec le disjoncteur mécatronique selon l'invention 1 est destiné à réaliser la coupure des petits courants.

5 Selon les applications courant alternatif ou courant continu, la technologie utilisée pour réaliser un tel disjoncteur supplémentaire est différente. Dans des applications en en courant continu, le disjoncteur 6 peut être réalisé selon une technologie comparable à

10 celle des disjoncteurs dits M.R.T.B (acronyme anglais de « Métal Return Transfer Breaker ») ou autrement dit en français, de type « disjoncteur de transfert pour retour métallique ». Ces disjoncteurs sont actuellement utilisés dans des stations de conversion AC/DC et DC/AC

15 à très haute tension. Dans des applications en courant alternatif, le disjoncteur 6 peut être réalisé selon une technologie comparable à celle des disjoncteurs à courant alternatif utilisés dans les stations à très haute tension. Il peut ainsi s'agir d'un disjoncteur à

20 soufflage d'arc par gaz isolant, tel que du SF6.

En **figure 5**, on a représenté un mode de réalisation d'une branche principale 10 d'un disjoncteur mécatronique selon l'invention. La branche 10 comprend un seul module principal 10.1 constitué

25 d'une pluralité de sous-branches 10.11, 10.12, 10. In en parallèle électrique les unes avec les autres et identiques entre elles. Le nombre de modules principaux est à prévoir en fonction du courant primaire transitant dans le réseau L. Typiquement, les

30 inventeurs mettent en œuvre un dispositif disjoncteur mécatronique 1 avec un module parallèle 10.1

comportant un nombre égal à douze sous-branches en parallèle 10.11, 10.12, 10. In afin de faire transiter un courant permanent de 1500 A. La mise en parallèle de deux ou trois de tels modules principaux 10.1 permet de
5 transiter respectivement 3000 ou 4500 A permanents.

Chaque sous-branche comprend une pluralité d'interrupteur-sectionneurs mécanique 100 en série électrique les uns avec les autres et deux cellules de coupure 101a, 101b identiques également en série
10 électrique avec les interrupteurs 100 mais montées tête-bêche l'une avec l'autre de façon à dédier chacune d'entre elles à un sens du courant. Un tel montage parallèle entre la pluralité de sous-branches 10.11, 10.12, 10. In présente plusieurs avantages importants.

Les cellules de coupure 101a, 101b situées d'un même côté d'une sous-branche 10.11, 10.12 peuvent être regroupées en une seule entité physique pour constituer un sous module M4.1, M4.2 d'aide à la commutation électronique, comme illustré en pointillés
15 en figure 5A.

Chacun des deux sous modules M4.1, M4.2 d'aide à la commutation électronique rassemble alors en un seul conducteur les courants des différentes sous-branches parallèles.

Chacun des deux sous modules M4.1, M4.2 d'aide à la commutation électronique peut assurer l'équilibrage des courants de chacune des sous-branches parallèles selon la méthode décrite précédemment, la proximité des cellules de coupure, réunies dans une
20 seule entité, facilitant la télémessure et la comparaison de ces courants.

Chacun des sous modules M4.1, M4.2 d'aide à la commutation électronique étant susceptible de n'être sollicité pour une manœuvre que de façon très ponctuelle, il peut être prévu des moyens de stockage de l'énergie nécessaire à l'activation ou la désactivation rapides de ses cellules de coupure. Par ailleurs, les équipements embarqués dans les sous modules M4.1, M4.2 d'aide à la commutation électronique sont conçus à partir de composants électroniques à faible consommation, minimisant ainsi la puissance électrique nécessaire à son fonctionnement en l'absence de sollicitations. Cela rend possible avantageusement leur alimentation en énergie via la transmission d'ondes électromagnétiques depuis un équipement situé au sol, et non soumis à la haute tension, la liaison étant alors réalisée soit via des guides d'onde, soit en faisceau libre. Ces ondes peuvent être soit des ondes dites millimétriques, dans le cas d'ondes hyperfréquences, soit lumineuses dans le spectre infrarouge, dans une fenêtre de longueur d'onde comprise entre 750nm et 1600nm. De préférence, on guide ces ondes par des fibres optiques en silice dopées et enveloppées dans des gaines isolantes.

De façon similaire, les interrupteur-sectionneurs mécaniques 100 des différentes sous-branches peuvent être regroupés en modules M5.1, M5.2, M5.3, M5.4, M5.5 comme symbolisé en pointillées par les figures 5A, 6 et 6A. Ces regroupements permettent de conférer avantageusement au disjoncteur mécatronique selon l'invention une structure modulaire, chaque module d'actionneur électromagnétique selon l'invention

étant décrit et revendiqué dans la demande de brevet déposé le même jour que la présente demande et intitulée « *Actionneur à aimants permanents et interrupteur mécanique actionné par un tel actionneur* ». Ainsi, le disjoncteur mécatronique peut être utilisé à des niveaux de tensions plus ou moins élevés selon le nombre de modules en modules M5.1, M5.2, M5.3, M5.4, M5.5 d'interrupteur-sectionneurs mécanique 100 mis en série électrique.

La **figure 6** montre un mode de réalisation préféré des interrupteur-sectionneurs mécanique 100 constituée par une ampoule à vide (non représentée) et selon lequel chaque ampoule à vide est équipée en parallèle électrique d'un limiteur de surtension 1000 adapté pour répartir la tension de façon suffisamment homogène entre toutes les ampoules connectées en série dans une même sous-branches lorsque celles-ci sont en position ouverte, et/ou pour limiter les tensions maximales subies par chacune des ampoules. De préférence, le nombre total d'ampoules en série dans une même sous branche est surdimensionné par rapport aux besoins de façon à ce que la défaillance d'une ou de deux ampoules, c'est-à-dire leur incapacité à tenir la tension en position ouverte, soit sans conséquence sur le fonctionnement du disjoncteur mécatronique selon l'invention. Autrement dit, il s'agit ici d'une fonction de coordination qui a pour but de prendre aussi en compte les risques de non tenue en tension d'une ou de plusieurs ampoules à vide. Les systèmes non linéaires que sont les limiteurs de surtension 1000 peuvent être remplacés individuellement par une

résistance de valeur importante, de telle manière à ne laisser passer par exemple qu'un courant résiduel négligeable de l'ordre de quelques mA. Il peut aussi d'agir d'une capacité ou d'une combinaison entre
5 limiteur de surtension 1000, résistance de grande valeur et le cas échéant une capacité.

La figure 6A montre une variante avantageuse de ce mode préférentiel qui vient d'être décrit. Selon cette variante les points milieux de deux
10 ampoules 100 de chaque sous branches d'un même module interrupteur-sectionneurs mécanique M5.1, M5.2, M5.3, M5.4, M5.5 sont reliés à un point commun de ce module par l'intermédiaire d'une résistance, linéaire ou non linéaire 1001, adaptée pour limiter les écarts de
15 potentiel électrique entre ces points milieux d'un même module interrupteur-sectionneurs mécanique.

La **figure 7** montre une variante avantageuse de réalisation des cellules de coupure 101a, 101b et leur intégration dans une sous-branche 10.11 d'une
20 branche principale 10 selon l'invention. Dans cette variante, l'élément semi-conducteur de puissance à taux de conduction contrôlée d'une cellule de coupure 101a, 101b est constitué d'au moins un transistor à effet de champ 1012a, 1012b et d'un transistor bipolaire à porte isolée (IGBT) 1010a, 1010b en série électrique avec le
25 transistor à effet de champ. Ainsi, il y a une connexion du drain D du transistor à effet de champ 1012a, 1012b avec l'émetteur E du transistor IGBT 1010a, 1010b tandis que leurs grilles G sont connectées
30 à un circuit de commande assurant à l'ensemble un comportement en commutation similaire à celui du

circuit usuellement connu sous l'appellation de montage cascode. Outre, l'avantage de neutraliser l'effet Miller du à la capacité parasite collecteur - grille de l'IGBT, un tel montage cascode présente, dans le cadre
5 de l'invention, l'avantage de fiabiliser le circuit de commande en ne le soumettant pas aux effets des perturbations parasites à haute fréquence pouvant être injectées sur la branche principale par le réseau primaire .

10 De nombreuses améliorations peuvent être prévues sans pour autant sortir du cadre de l'invention .

Ainsi, comme déjà expliqué ci-dessus, l'architecture selon l'invention représentée en figure
15 2 est prévue pour couper un courant qui peut venir dans un sens ou dans le sens opposé à travers la ligne haute tension L. Dans une application où le courant à couper reste toujours orienté dans le même sens, l'architecture peut être simplifiée en supprimant toutes
20 les composants électroniques dupliqués en figure 2, c'est-à-dire tous ceux désignés avec le même indice a ou b .

REVENDICATIONS

1. Dispositif disjoncteur mécatronique (1)
destiné à couper un courant électrique circulant à
5 travers un moyen de transmission de l'énergie
électrique (L) comportant :
- une branche principale (10) comprenant au
moins un module principal (10.1, 10.2, 10.n) comprenant
au moins une sous-branche (10.11, 10.12, 10.In)
10 comprenant au moins un interrupteur-sectionneur
mécanique (100) monté en série avec au moins une
cellule de coupure (101a ; 101b) constituée d'au moins
un élément semi-conducteur de puissance à taux de
conduction contrôlée (1010a ; 1010b);
 - 15 - une branche auxiliaire (11) montée en
parallèle électrique de la branche principale et
comportant :
 - au moins une première sous-branche
(11.1, 11.2, 11.3), dite sous-branche de temporisation,
20 et comprenant au moins une première cellule de coupure
constituée d'une pluralité de thyristors de puissance
mis en cascade (111a, 112a, 113a ; 111b, 112b, 113b),
au moins une des sous-branches de temporisation
comportant en outre au moins un premier module (M1)
25 d'aide à la commutation avec au moins un premier
condensateur (1120), au moins une première inductance
(1121) et au moins une première résistance (1122) en
série électrique avec le premier condensateur lui-même
en parallèle électrique avec sa résistance de décharge
30 (1125) et un limiteur de surtension (1124);

• une deuxième sous-branche (11.4), dite sous-branche d'armement, montée en parallèle électrique de la sous-branche de temporisation et comprenant au moins une deuxième cellule de coupure
5 constituée d'une pluralité de thyristors de puissance mis en cascade (114a; 114b) et au moins un deuxième module (M3) d'aide à la commutation avec au moins un deuxième condensateur (1140), au moins une deuxième inductance (1141) et au moins une deuxième résistance
10 (1142) en série électrique avec le deuxième condensateur lui-même en parallèle électrique avec sa résistance de décharge (1145) et un limiteur de surtension (1144);
- au moins un limiteur de surtension
15 principal (12) en parallèle électrique de la branche principale .

2. Disjoncteur mécatronique selon la revendication 1, dans lequel chaque sous-branche d'un
20 module principal comprend au moins un interrupteur-sectionneur mécanique (100) monté en série entre deux cellules de coupure (101a, 101b) à semi-conducteur de puissance; chaque cellule de coupure étant en anti-série l'une avec l'autre.

25
3. Disjoncteur mécatronique selon la revendication 1 ou 2, comprenant en outre un limiteur de vitesse de croissance de tension (102a, 102b), en parallèle électrique de chaque cellule de coupure d'un
30 module principal; le limiteur de vitesse de croissance étant constitué d'une diode (1020a, 1020b) en série

électrique avec un condensateur (1021a, 1021b) lui-même en parallèle électrique avec sa résistance de décharge (1022a, 1022b) .

5 4 . Disjoncteur mécatronique selon l'une des revendications précédentes, comprenant en outre un limiteur de surtension (103a) en parallèle électrique de chaque cellule de coupure d'un module principal.

10 5 . Disjoncteur mécatronique selon l'une des revendications précédentes, dans lequel chaque cellule de coupure d'une sous-branche d'un module principal est constituée d'au moins un élément semi-conducteur de puissance à taux de conduction contrôlée (1010a, 1010b)
15 et dans lequel chaque sous-branche d'un module principal comprend une diode (1011b, 1011a) en antiparallèle d'une cellule de coupure.

20 6 . Disjoncteur mécatronique selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'élément semi-conducteur de puissance à taux de conduction contrôlée d'une cellule de coupure d'un module principal est un transistor bipolaire à porte isolée (IGBT) (1010a, 1010b) .

25 7 . Disjoncteur mécatronique selon l'une des revendications 1 à 5, dans lequel l'élément semi-conducteur de puissance à taux de conduction contrôlée d'une cellule de coupure (101a, 101b) d'une sous-
30 branche (10.11, 10.12, 10. In) d'un module principal (10.1, 10.2, 10. n) est constitué d'au moins un

transistor à effet de champ (1012a, 1012b) et d'un transistor bipolaire à porte isolée (IGBT) (1010a, 1010b) en série électrique avec le transistor à effet de champ par connexion du drain du transistor à effet de champ avec l'émetteur du transistor IGBT, leurs grilles G étant connectées à un circuit de commande assurant à l'ensemble un comportement en commutation de type montage cascode.

10 8. Disjoncteur mécatronique selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la branche principale comprend plusieurs modules principaux (10.1, 10.2, ...10.n) en parallèle électrique les uns avec les autres .

15 9. Disjoncteur mécatronique selon l'une des revendications précédentes, dans lequel chaque module principal (10.1, 10.2, ...10.n) comporte plusieurs sous-branches (10.11, 10.12, ...10. In) en parallèle électrique
20 les unes avec les autres.

10. Disjoncteur mécatronique selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la branche auxiliaire (11) comprend au moins deux sous-branches de temporisation (11.2, 11.3) en parallèle électrique l'une de l'autre, la deuxième sous-branche de temporisation comprenant au moins une troisième cellule de coupure constituée d'une pluralité de thyristors de puissance mis en cascade (111a, 113a; 111b, 113b) et au moins un troisième module (M2) d'aide
30 à la commutation avec au moins un troisième

condensateur (1130), au moins une troisième inductance (1131) et au moins une troisième résistance (1132, 1136) en série électrique avec le troisième condensateur lui-même en parallèle électrique avec sa
5 résistance de décharge (1135) et un limiteur de surtension (1134) lui-même en série avec une résistance (1136) .

11. Disjoncteur mécatronique selon
10 l'une des revendications précédentes, dans lequel chaque interrupteur-sectionneur mécanique (100) de chaque sous-branche (10.11, 10.12, ...10. In) de chaque module principal (10.1, 10.2, ... 10. n) est constitué de deux ampoules à vide en série électrique.

15
12. Ensemble d'appareillages électrique destiné à être implanté dans un moyen de transmission de l'énergie électrique haute tension, en courant alternatif ou en courant continu, comprenant un
20 disjoncteur mécatronique selon l'une des revendications précédentes et aux bornes duquel sont connectés en série de part et d'autre au moins un appareillage électrique de mise à la terre (2) .

25
13. Ensemble d'appareillages électrique selon la revendication 12, comprenant un appareillage de pontage (3) monté en parallèle électrique aux bornes du disjoncteur mécatronique et adapté pour faire
30 transiter sur commande et pendant un temps déterminé un courant transitoire, supérieur au pouvoir du

disjoncteur mécatronique, d'une borne à l'autre du disjoncteur sans passer par ce dernier.

14. Ensemble d'appareillages électrique
5 selon la revendication 12 ou 13, comprenant de part et d'autre des bornes du disjoncteur hybride, un appareillage de sectionnement (4) monté en série électrique avec le disjoncteur mécatronique et à l'extérieur des bornes de connexions électriques des
10 appareillages de mise à la terre.

15. Ensemble d'appareillages électrique selon la revendication 14, comprenant entre une borne de connexion électrique d'un appareillage de mise à la
15 terre et un appareillage de sectionnement, un appareillage d'insertion de résistance électrique (5) en série électrique avec ce dernier.

16. Ensemble d'appareillages électrique
20 selon l'une des revendications 12 à 15, comprenant un disjoncteur supplémentaire en série électrique avec le dispositif disjoncteur mécatronique, le disjoncteur supplémentaire étant adapté pour couper les faibles courants .

25

17. Ensemble d'appareillages électrique selon la revendication 16, dans lequel le disjoncteur supplémentaire est un disjoncteur de transfert pour retour métallique (M.R.T.B).

30

18. Ensemble d'appareillages électrique selon la revendication 16, dans lequel le disjoncteur supplémentaire est de type mécanique à soufflage d'arc.

5 19. Ensemble d'appareillages électrique selon l'une des revendications 12 à 18, dans lequel les appareillages et disjoncteur supplémentaire sont conçus sous forme modulaire seul ou associés à plusieurs.

10 20. Procédé de déclenchement d'un dispositif disjoncteur mécatronique selon l'une des revendications 1 à 11, selon lequel en présence uniquement d'un courant permanent dans la branche principale, et en l'absence d'ordre spécifique, on
15 maintient chaque interrupteur-sectionneur en position fermée et l'(les) élément(s) semi-conducteur de puissance à taux de conduction contrôlée à l'état passant et l'ensemble des thyristors de puissance de la branche auxiliaire à l'état non-passant et selon lequel
20 soit en cas d'une surintensité de courant dans la branche principale du dispositif, soit à la réception d'un ordre spécifique, il comporte les étapes suivantes :

a/ basculement de l'état passant à un état
25 non passant de l'(des) élément(s) semi-conducteur de puissance à taux de conduction contrôlée tout en maintenant fermé chaque interrupteur-sectionneur de sorte à dévier la totalité du courant dans la au moins une sous-branche de temporisation pendant une durée
30 nécessaire à l'ouverture de chaque interrupteur-sectionneur mécanique;

b/ de façon synchrone à l'étape a/ basculement de l'état non passant à un état passant des thyristors de puissance d'au moins une sous-branche de temporisation pour atteindre un niveau de tension aux bornes de la branche principale et de celle auxiliaire permettant à la fois de ne faire circuler aucun courant ni dans la branche principale, ni dans la branche d'armement et ni dans le limiteur de surtension, de permettre le basculement ultérieur de l'état non passant à un état passant des thyristors de puissance de la branche d'armement en position d'ouverture de chaque interrupteur-sectionneur mécanique et de permettre le basculement ultérieur de l'état passant à l'état non passant des thyristors de puissance de la au moins une sous branche de temporisation en position d'ouverture de chaque interrupteur-sectionneur mécanique ;

c/ une fois l'étape b/ réalisée, ouverture de chaque interrupteur-sectionneur mécanique;

d/ une fois l'étape c/ réalisée et lorsque chaque interrupteur-sectionneur mécanique a atteint sa position d'ouverture, basculement de l'état non passant à un état passant des thyristors de puissance de la sous-branche d'armement pour atteindre un niveau de tension à ses bornes permettant de dévier la totalité du courant vers le (s) limiteur (s) de surtension;

e/ extinction du courant par le (s) limiteur (s) de surtension principal (ux) .

21. Procédé de déclenchement selon la revendication 20, selon lequel on réalise en outre une étape f) d'élimination des éventuels courants de fuite résiduels par ouverture d'au moins un appareillage de sectionnement (4) .

22. Système de contrôle commande de mise en œuvre du procédé selon la revendication 20 ou 21.

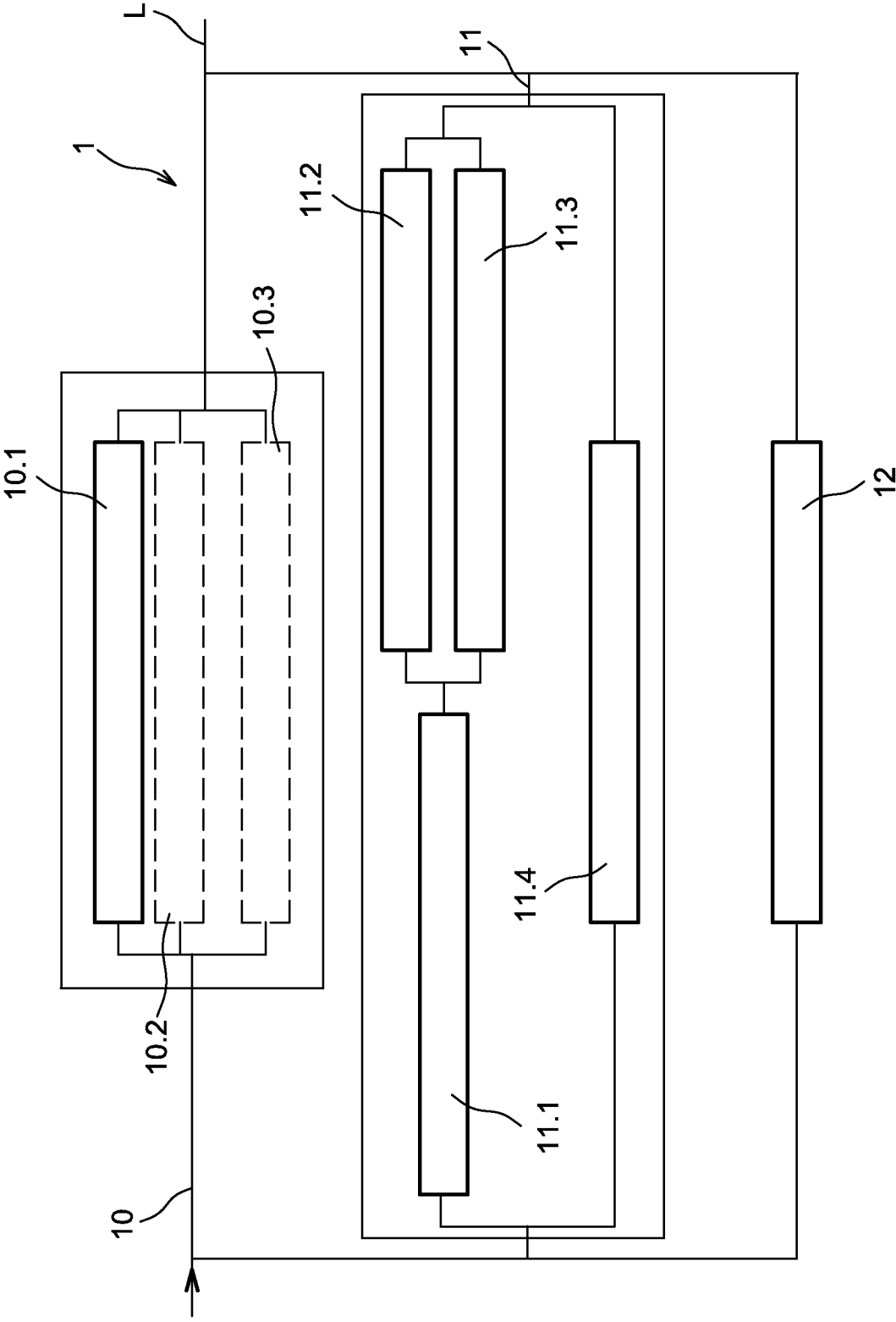


FIG. 1

2 / 14

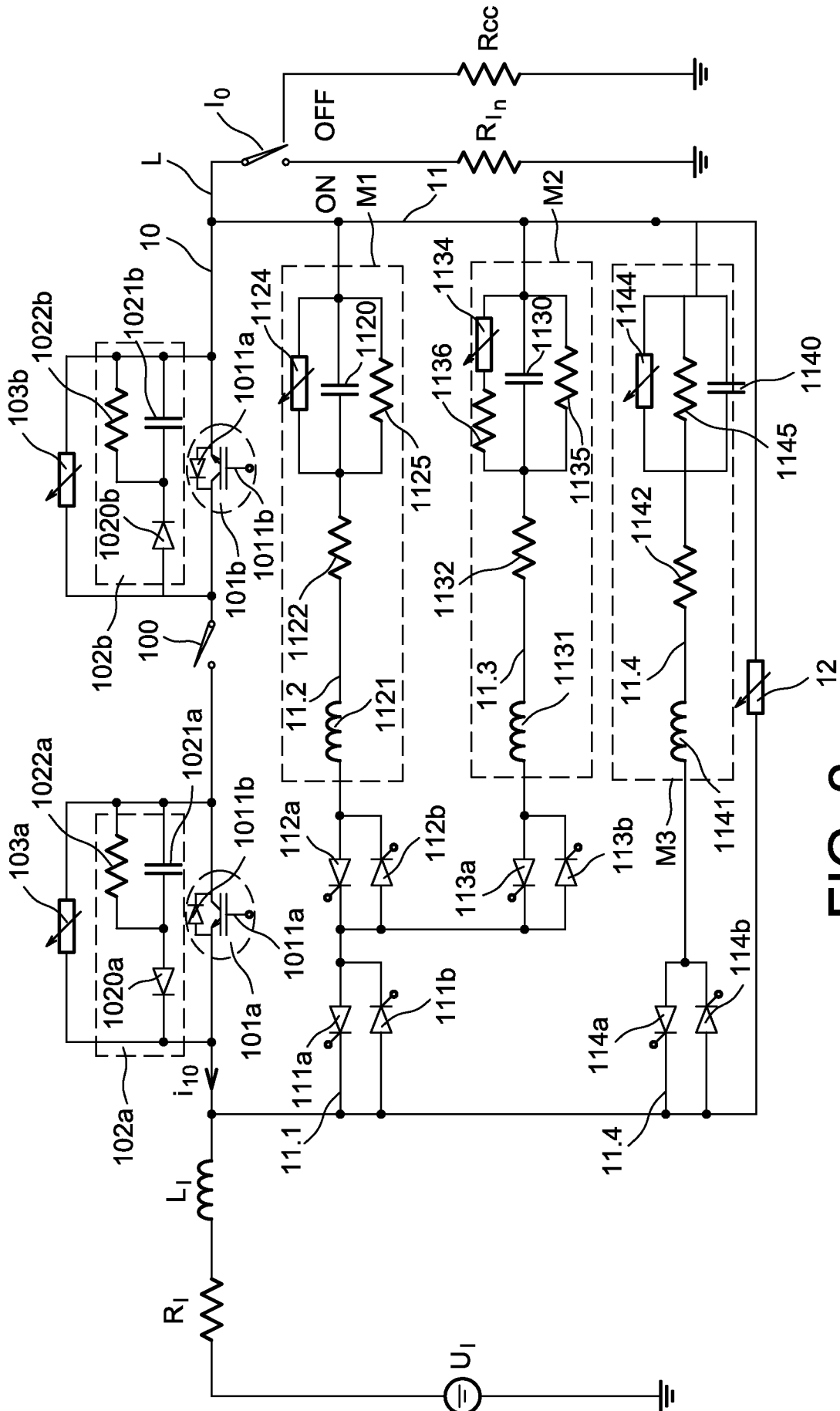


FIG. 2

3 / 14

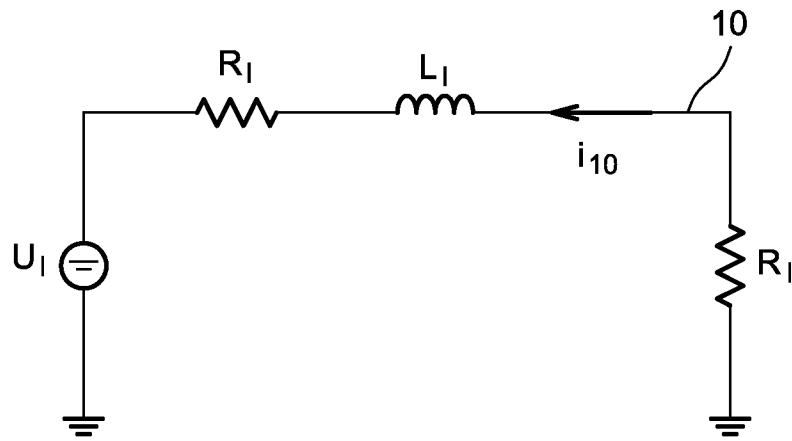


FIG. 2A

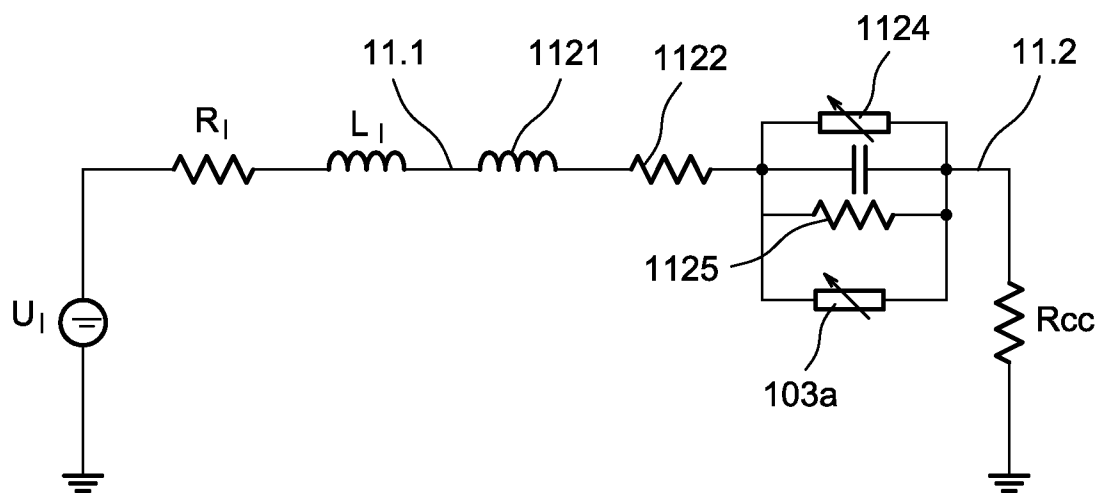


FIG. 2B

4 / 14

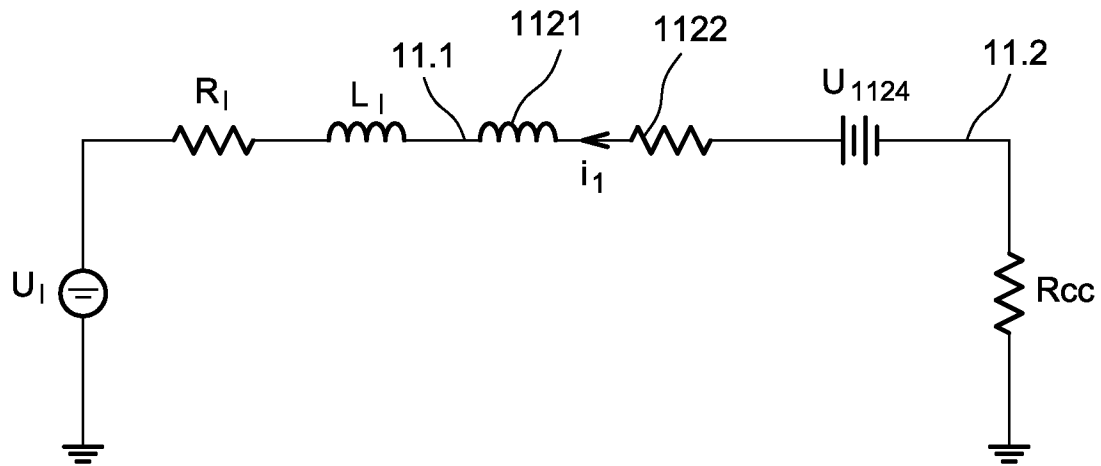


FIG. 2C

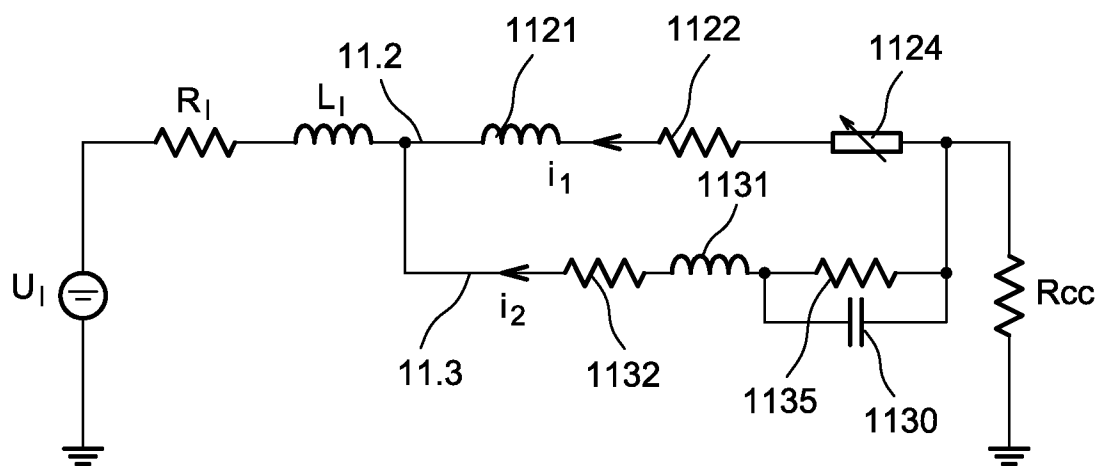


FIG. 2D

5 / 14

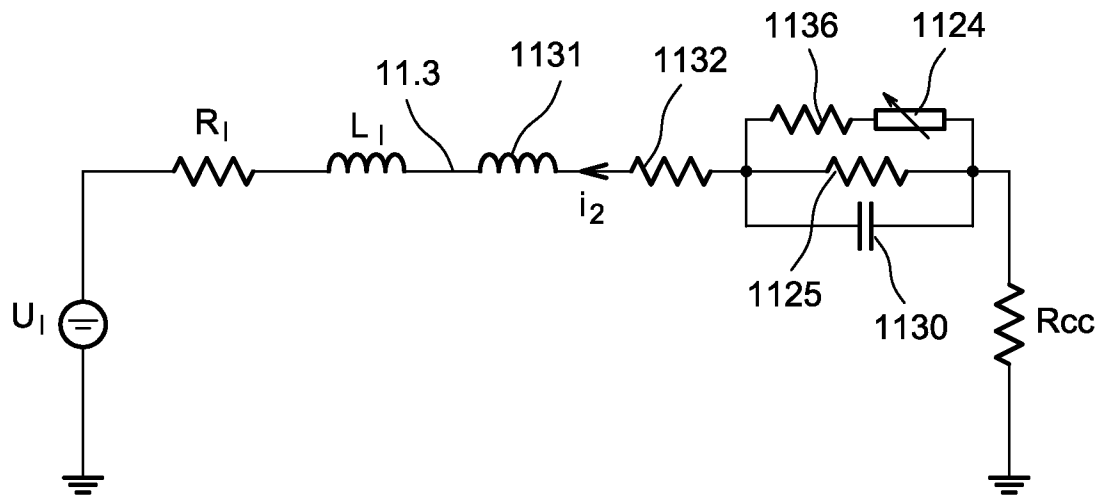


FIG. 2E

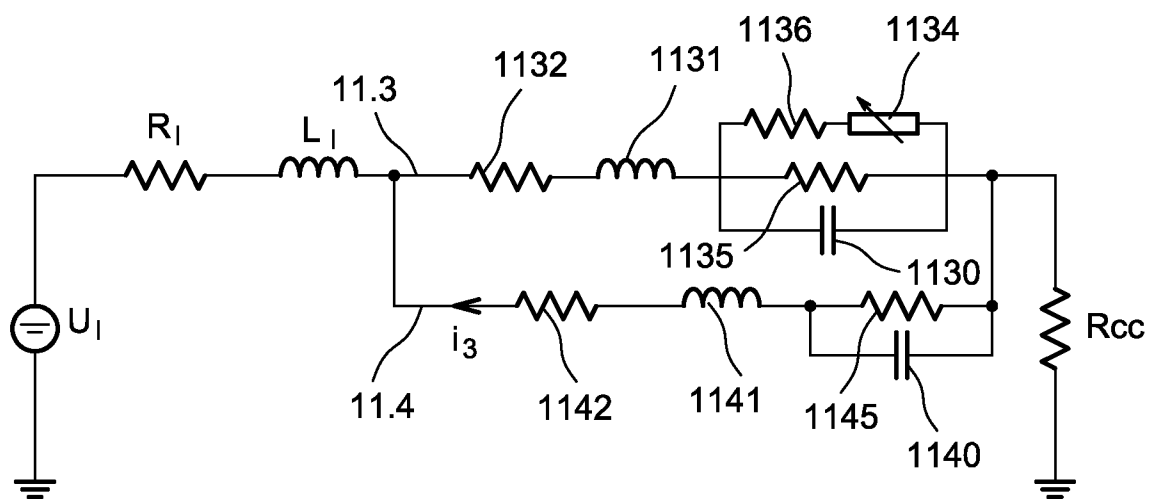


FIG. 2F

6 / 14

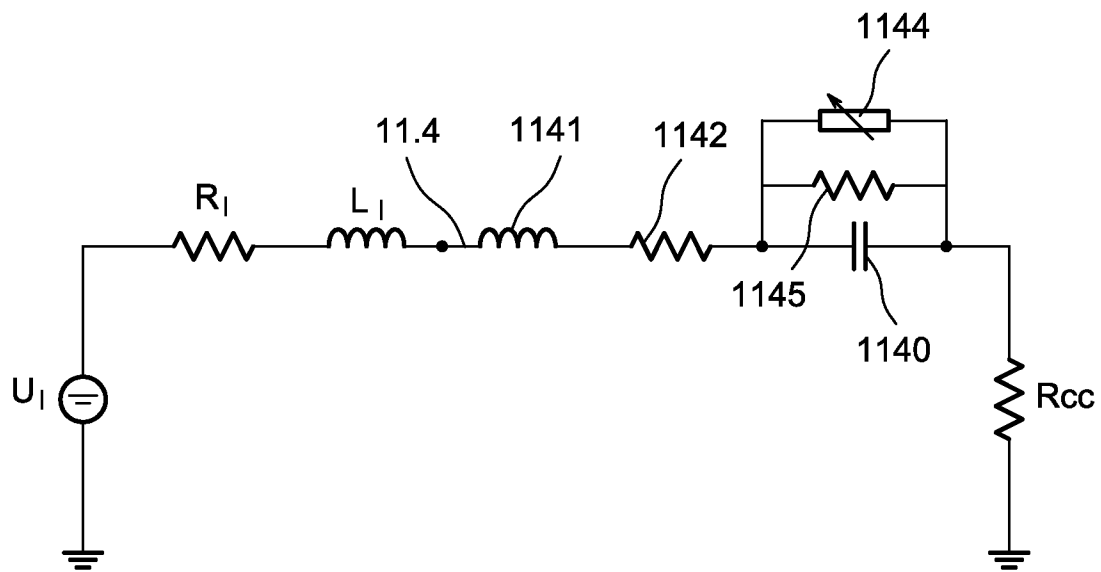


FIG. 2G

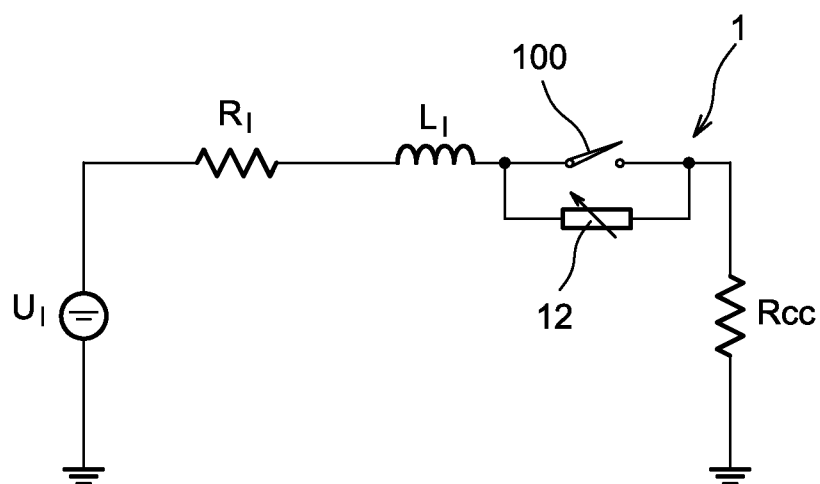


FIG. 2H

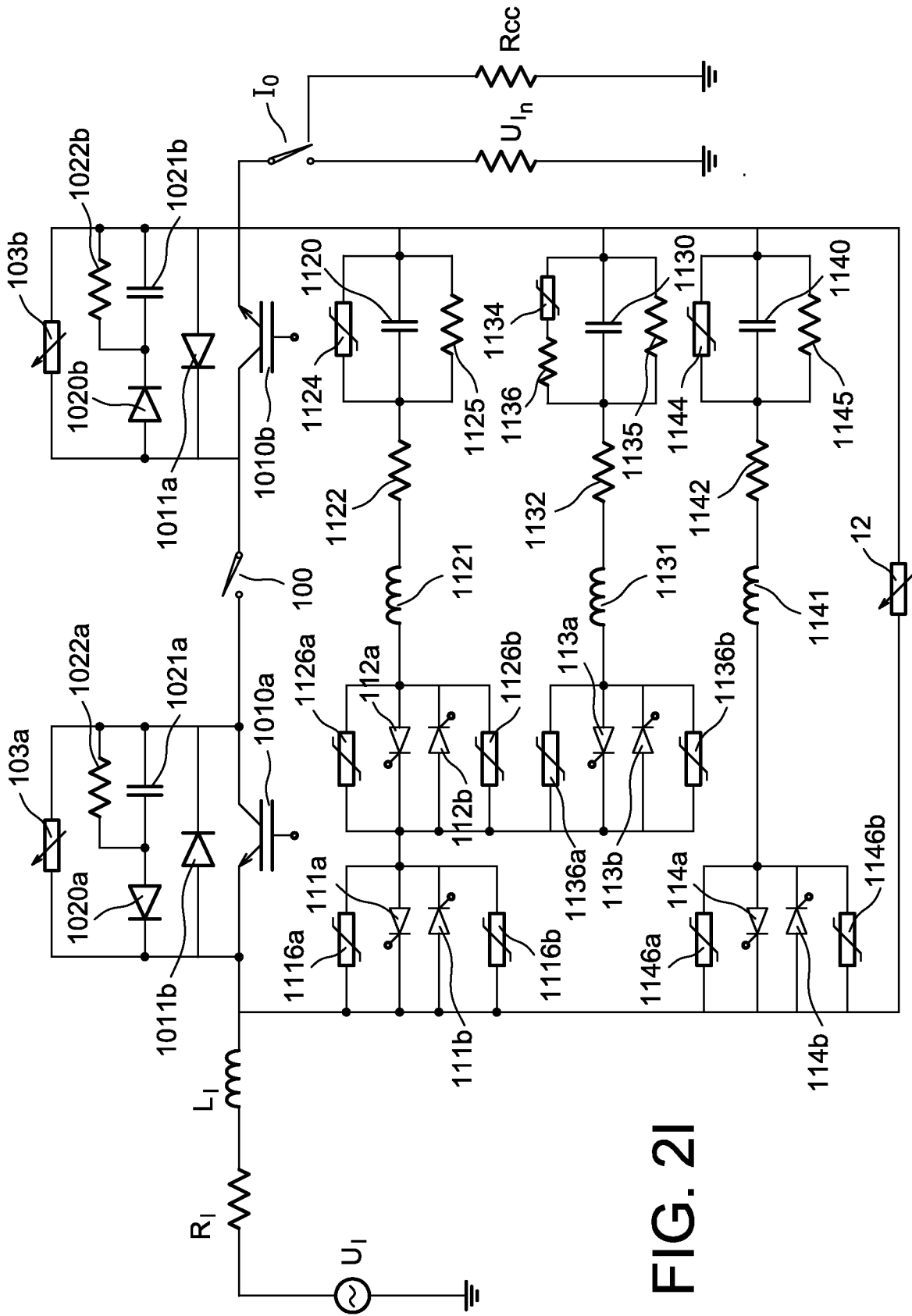


FIG. 2I

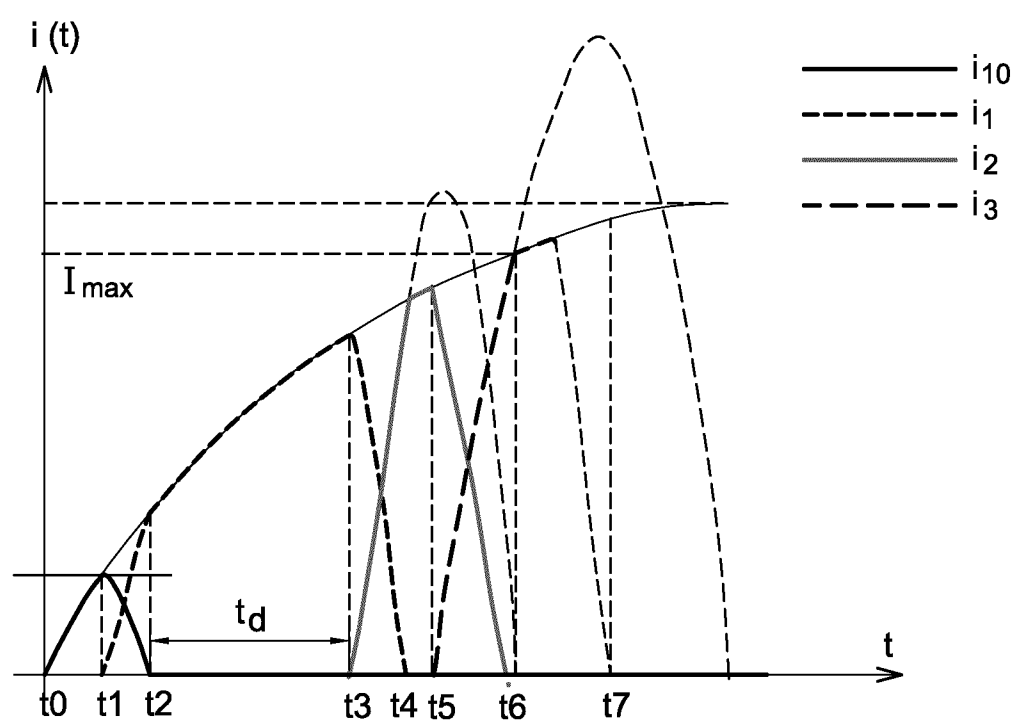


FIG. 3

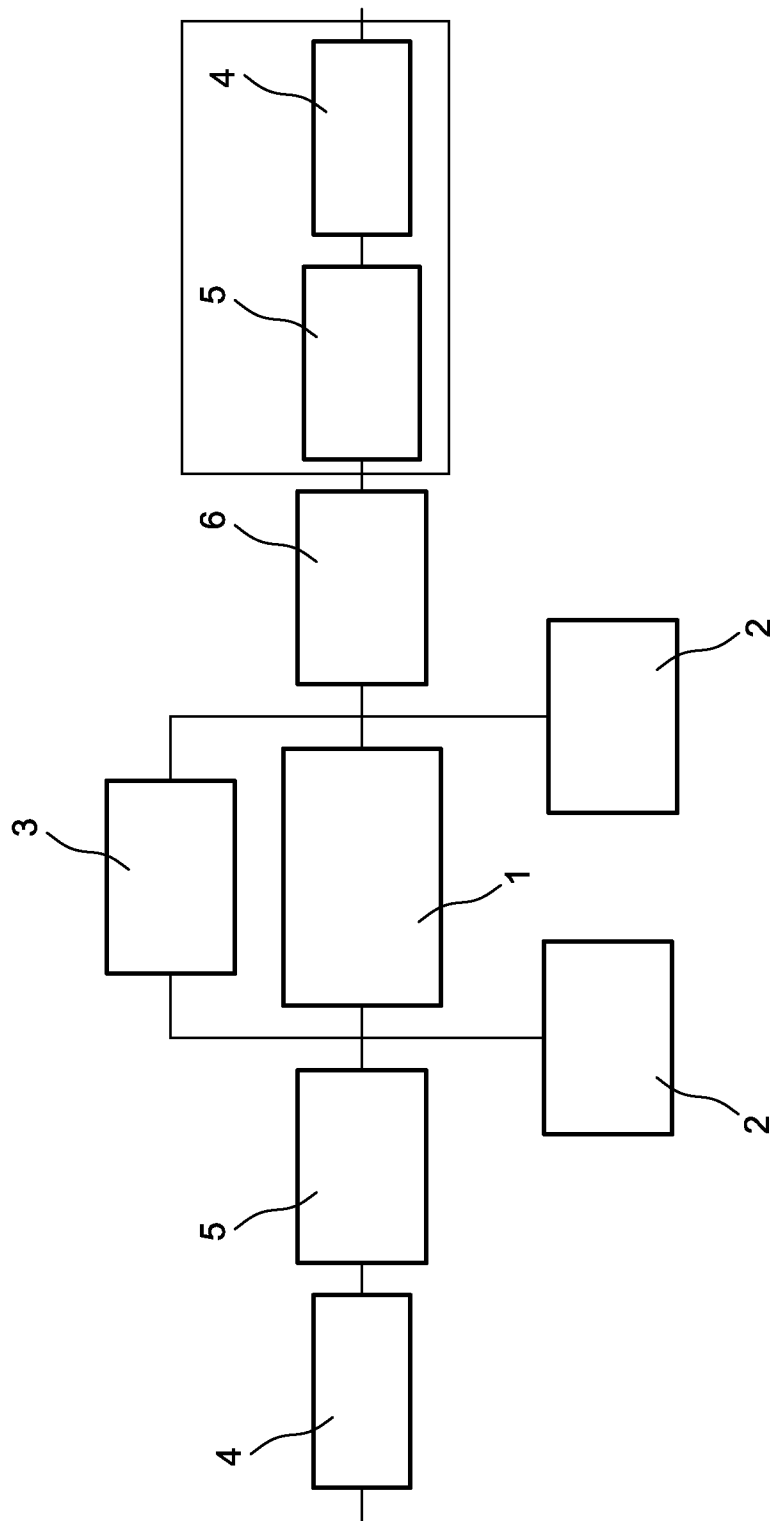


FIG. 4

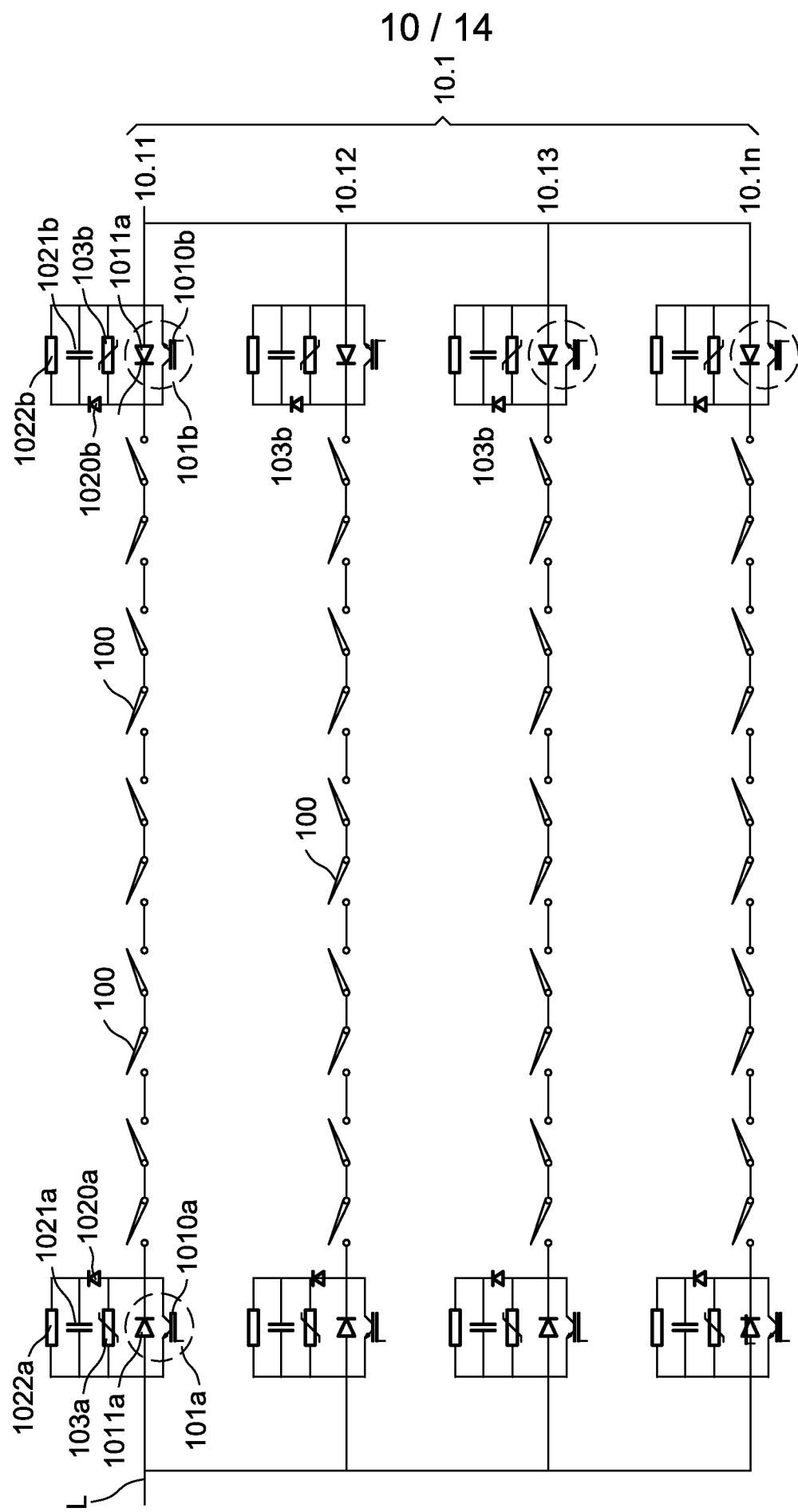


FIG. 5

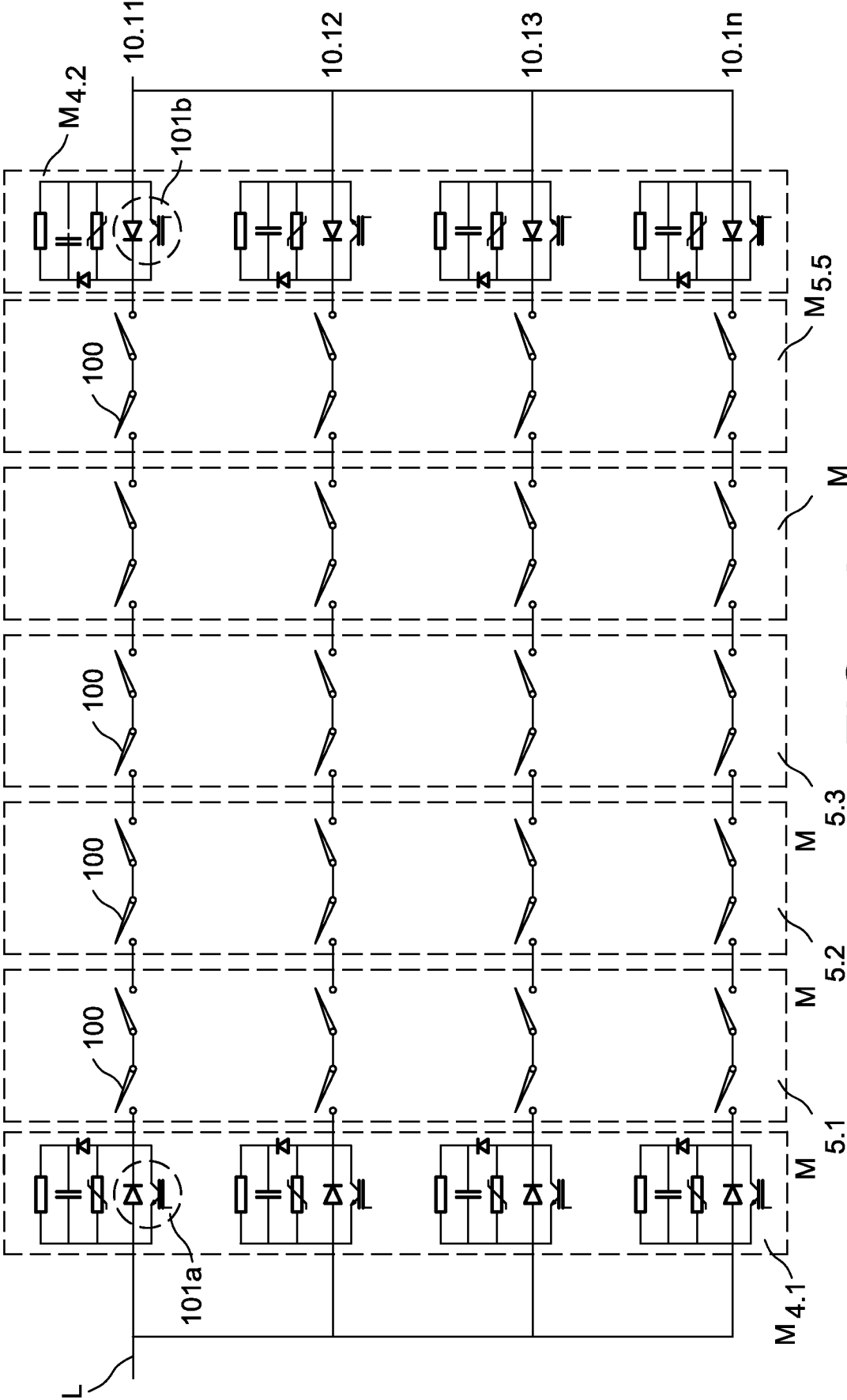


FIG. 5A

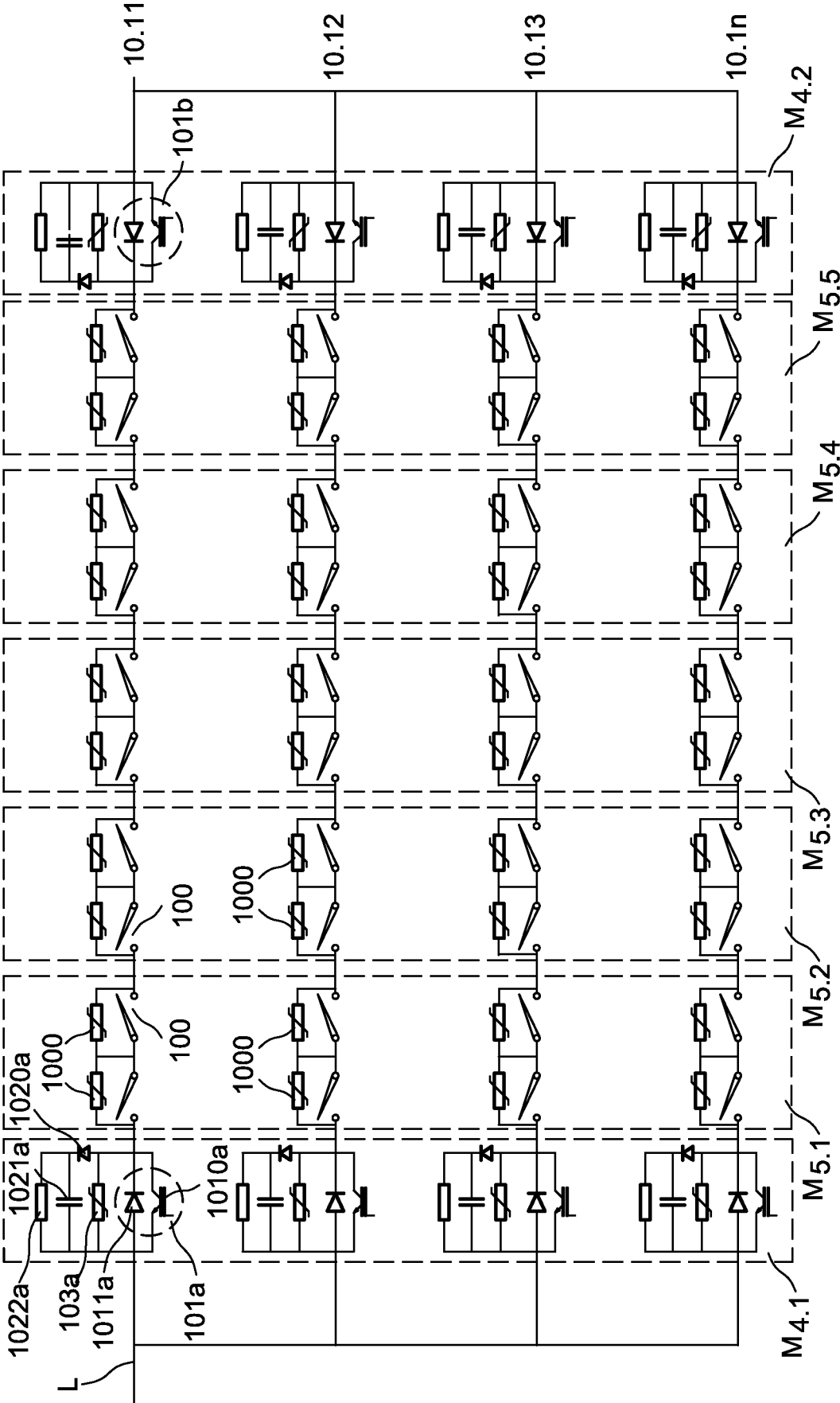


FIG. 6

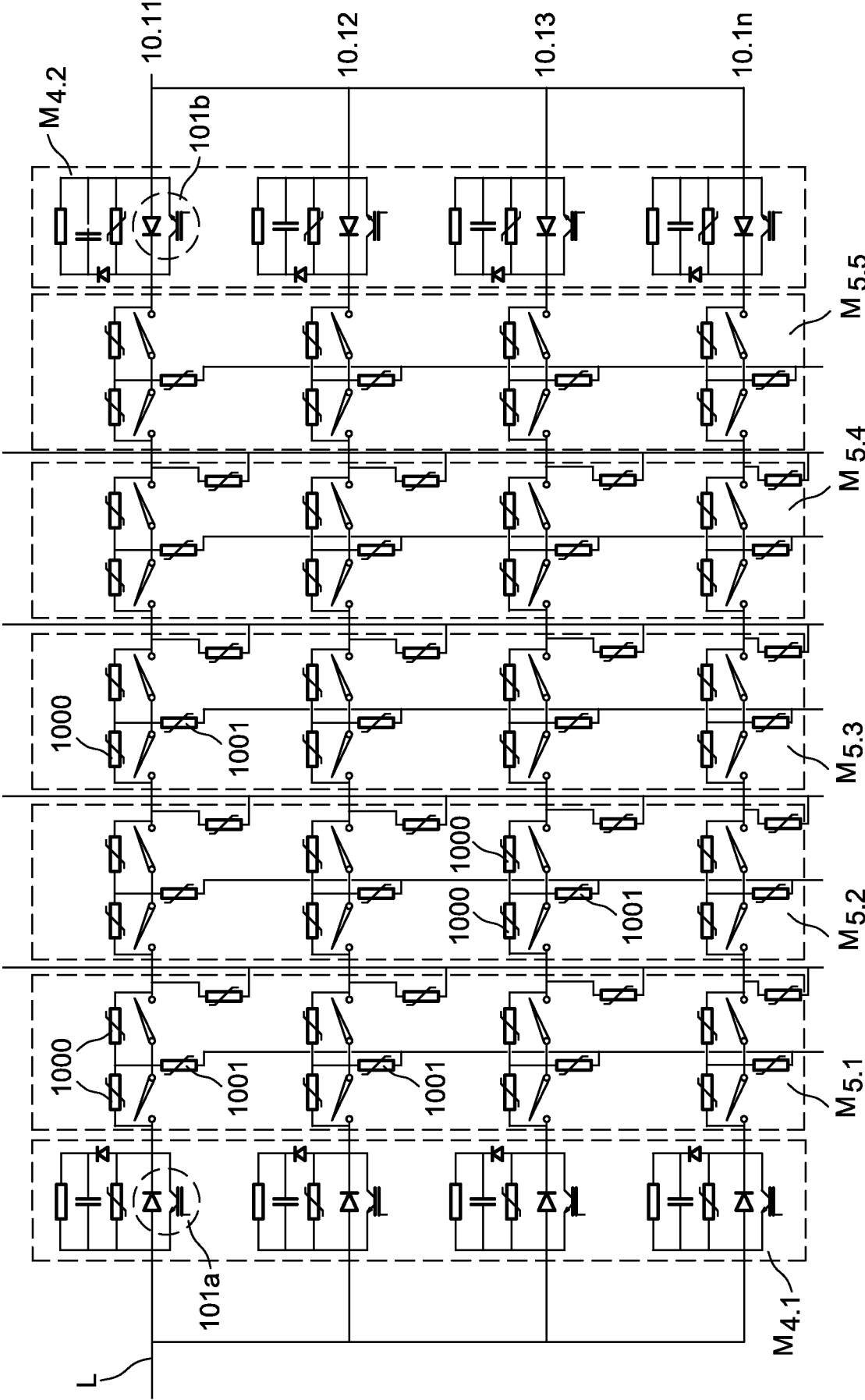
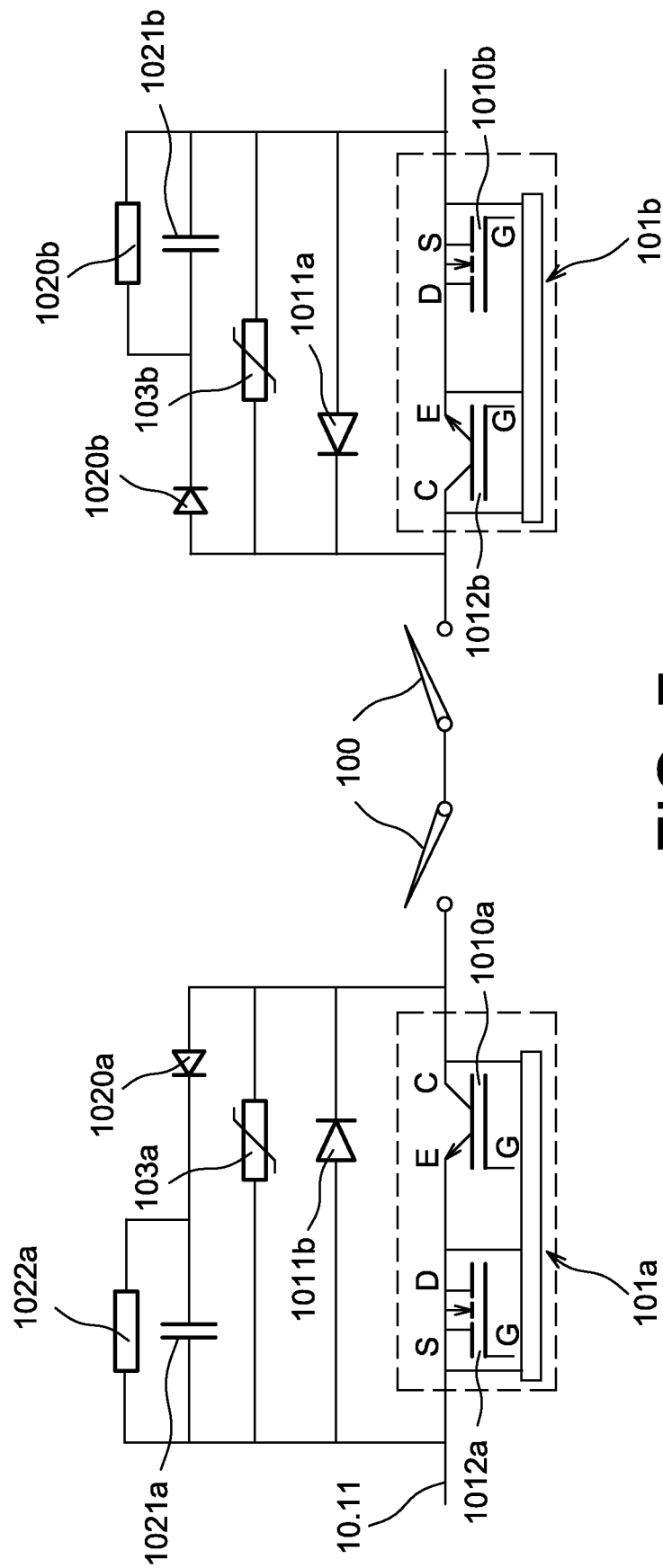


FIG. 6A



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2012/076399

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. H01H9/54
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
H01H

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal , WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Wo 2011/057675 AI (ABB TECHNOLOGY AG [CH] ; HAEFNER JUERGEN [SE] ; JACOBSON BJOERN [SE]) 19 May 2011 (2011-05-19) cited in the application page 16, line 24 - page 26, line 22; figures 1-12 -----	1-22
A	DE 34 16 914 AI (ASEA AB [SE]) 15 November 1984 (1984-11-15) page 5, line 16 - page 10, line 26; figures 1-4 -----	1-22



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Spécial catégories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

11 March 2013

Date of mailing of the international search report

15/03/2013

Name and mailing address of the ISA/

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

Authorized officer

Drabko, Jacek

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2012/076399

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
Wo 2011057675	AI	19-05-2011	
		AU 2009355281 AI	05-07-2012
		CA 2780946 AI	19-05-2011
		CN 102687221 A	19-09-2012
		EP 2502248 AI	26-09-2012
		KR 20120089751 A	13-08-2012
		US 2012299393 AI	29-11-2012
		Wo 2011057675 AI	19-05-2011

DE 3416914	AI	15-11-1984	
		DE 3416914 AI	15-11-1984
		SE 436530 B	17-12-1984
		SE 8302692 A	11-11-1984

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2012/076399

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
INV. H01H9/54
ADD.

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

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)
H01H

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

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

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	Wo 2011/057675 AI (ABB TECHNOLOGY AG [CH] ; HAEFNER JUERGEN [SE] ; JACOBSON BJOERN [SE]) 19 mai 2011 (2011-05-19) cité dans la demande page 16, ligne 24 - page 26, ligne 22 ; figures 1-12 -----	1-22
A	DE 34 16 914 AI (ASEA AB [SE]) 15 novembre 1984 (1984-11-15) page 5, ligne 16 - page 10, ligne 26 ; figures 1-4 -----	1-22



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



Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

*** Catégories spéciales de documents cités:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

11 mars 2013

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

15/03/2013

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

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

Fonctionnaire autorisé

Drabko, Jacek

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2012/076399

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
Wo 2011057675 AI	19-05-2011	AU 2009355281 AI	05-07-2012
		CA 2780946 AI	19-05-2011
		CN 102687221 A	19-09-2012
		EP 2502248 AI	26-09-2012
		KR 20120089751 A	13-08-2012
		US 2012299393 AI	29-11-2012
		Wo 2011057675 AI	19-05-2011

DE 3416914 AI	15-11-1984	DE 3416914 AI	15-11-1984
		SE 436530 B	17-12-1984
		SE 8302692 A	11-11-1984
