

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
—  
**INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE**  
—  
COURBEVOIE  
—

①1 N° de publication : **3 100 403**

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

②1 N° d'enregistrement national : **19 09589**

⑤1 Int Cl<sup>8</sup> : **H 02 M 7/483 (2019.01), H 02 M 7/493**

⑫

## BREVET D'INVENTION

**B1**

⑤4 Convertisseur modulaire multiniveaux pour application basse tension avec dimensionnement optimisé des condensateurs.

②2 Date de dépôt : 30.08.19.

③0 Priorité :

④3 Date de mise à la disposition du public  
de la demande : 05.03.21 Bulletin 21/09.

④5 Date de la mise à disposition du public du  
brevet d'invention : 17.09.21 Bulletin 21/37.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche :

*Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

Demande(s) d'extension :

⑦1 Demandeur(s) : *SOCOMEK Société anonyme* —FR  
et *UNIVERSITA DEGLI STUDI DI PADOVA* - — IT.

⑦2 Inventeur(s) : *CORRADIN Michele, TOIGO Igino,  
MATTAVELLI Paolo* et *YOUNIS Tarek Sayed Abdou*.

⑦3 Titulaire(s) : *SOCOMEK Société anonyme,  
UNIVERSITA DEGLI STUDI DI PADOVA* -.

⑦4 Mandataire(s) : *CABINET BEAU DE LOMENIE*.

**FR 3 100 403 - B1**



## Description

### **Titre de l'invention : Convertisseur modulaire multiniveaux pour application basse tension avec dimensionnement optimisé des condensateurs**

#### **Domaine technique**

[0001] L'invention concerne de manière générale les convertisseurs de source de tension, et plus particulièrement un convertisseur modulaire multiniveaux (MMC) pour une application à basse tension.

#### **Technique antérieure**

[0002] Les convertisseurs multiniveaux ont suscité un vif intérêt dans ce secteur. Ils présentent des avantages différents tels qu'une plus faible distorsion harmonique, une taille de filtre plus petite, des interférences électromagnétiques (EMI) réduites, et une efficacité supérieure. De plus, des dispositifs à semi-conducteurs à basse tension peuvent être utilisés pour synthétiser des niveaux de tension plus élevés.

[0003] Plusieurs topologies peuvent fournir une tension alternative (AC). Les points neutres clampés (NPC pour « neutral point clamped » en anglais), les condensateurs volants (FC pour « flying capacitor » en anglais), le pont en H en cascade et le convertisseur modulaire multiniveaux (MMC) sont les topologies de base des onduleurs à plusieurs niveaux. La topologie NPC et ses variantes sont les plus répandues et les plus utilisées dans les applications industrielles pour les applications à basse tension.

[0004] La topologie MMC, introduite au début des années 2000 pour le convertisseur haute tension à courant continu (HVDC), a fait l'objet d'une attention particulière en raison de ses nombreuses fonctionnalités. Les fonctionnalités les plus pertinentes sont: la modularité, l'évolutivité et la fiabilité.

[0005] Tout comme un convertisseur à deux niveaux ou un convertisseur à commutation de ligne à six impulsions, un MMC, c'est-à-dire un convertisseur modulaire multiniveaux, est composée de six modules, chacun connectant une borne alternative à une borne continue. Toutefois, là où chaque module du convertisseur à deux niveaux est un commutateur à haute tension composé d'un grand nombre de transistors bipolaires à grille isolée (IGBT), ou de semi-conducteurs équivalents tels que des transistors, des Mosfet SIC, etc., connectés en série, chaque module d'un MMC est une source de tension contrôlable distincte. Les IGBT ou autres semi-conducteurs sont connectés en série afin d'avoir un dispositif équivalent de tension supérieure. Chaque module MMC comprend un certain nombre de sous-modules de conversion indépendants, chacun contenant son propre condensateur de stockage. Dans la forme la plus courante du circuit, la variante en demi-pont, chaque sous-module contient deux IGBT connectés

en série aux bornes du condensateur, avec le nœud électrique couplé aux deux IGBT et une des deux bornes du condensateur sortis pour former deux connexions externes. Selon lequel des deux IGBT de chaque sous-module est activé, le condensateur est contourné ou connecté au circuit. Chaque sous-module agit donc comme un convertisseur à deux niveaux indépendant générant une tension nulle ou d'une valeur  $U_{sm}$  (où  $U_{sm}$  est la tension du condensateur du sous-module). Avec un nombre approprié de sous-modules connectés en série, le module peut synthétiser une forme d'onde de tension échelonnée se rapprochant de très près d'une onde sinusoïdale et contenant de très faibles niveaux de distorsion harmonique.

- [0006] Le MMC diffère des autres types de convertisseur en ce que le courant circule de manière continue dans les six modules du convertisseur tout au long du cycle de fréquence du secteur. Le courant continu se divise de manière égale dans les trois phases et le courant alternatif se divise également dans les modules supérieure et inférieure de chaque phase.
- [0007] Un MMC typique pour une application HVDC contient environ 300 sous-modules connectés en série dans chaque vanne et équivaut donc à un convertisseur de niveau 301. Par conséquent, les performances harmoniques sont excellentes et aucun filtre n'est généralement nécessaire.
- [0008] Un autre avantage du MMC réside dans le fait qu'il n'est pas nécessaire de recourir à une modulation de largeur d'impulsion (PWM), de sorte que les pertes de puissance sont bien inférieures à celles du convertisseur à deux niveaux, à environ 1% par extrémité.
- [0009] Enfin, étant donné que la connexion en série directe des IGBT n'est pas nécessaire, les commandes de grille IGBT n'ont pas besoin d'être aussi sophistiquées que celles d'un convertisseur à deux niveaux.
- [0010] Le MMC présente deux inconvénients principaux. Tout d'abord, le contrôle est beaucoup plus complexe que celui d'un convertisseur à deux niveaux. Équilibrer les tensions de chacun des condensateurs de sous-module est un défi de taille et nécessite une puissance de calcul considérable et des communications à haute vitesse entre l'unité de commande centrale et la vanne. Deuxièmement, les condensateurs de sous-module sont eux-mêmes grands et encombrants. Un MMC est considérablement plus grand qu'un convertisseur à niveau comparable, bien que cela puisse être compensé par le gain de place dû à l'absence de filtres.
- [0011] En raison des principales caractéristiques (modularité, évolutivité et fiabilité) offertes par la topologie MMC, les MMC sont utilisés dans les applications haute et moyenne tension. Pour les basses tensions, les MMC ne sont généralement pas utilisés dans les applications industrielles.
- [0012] La topologie MMC pourrait être arrangée avec un nombre élevé de modules afin de

partager la tension en utilisant des composants de qualité inférieure. Ce concept pourrait également être étendu aux applications basse tension, mais compte tenu de la complexité des composants disponibles (principalement des commutateurs à semi-conducteurs), la fiabilité et la puissance cible du convertisseur doivent être prises en compte.<sup>2</sup>

[0013] Sur la figure 1 est illustré un MMC 100 triphasé, connu dans l'état de la technique, conçu pour être couplé à une alimentation 101. Chaque branche 102 du MMC 100 comporte deux bras 104 (un bras supérieur et un bras inférieur) avec deux modules 106 par bras 104. Chaque module 106 comprend deux unités de commutation 108 couplées en série, et un condensateur 110 couplé en parallèle avec l'ensemble formé par les deux unités de commutation 108 en série. Chaque unité de commutation 108 est formée d'un transistor MOSFET couplé en parallèle avec une diode.

[0014] Les deux bras supérieur et inférieur 104 d'une même branche 102 sont couplés à une borne de sortie 112 de la jambe par l'intermédiaire de deux inductances 114 distinctes, une inductance supérieure 114 couplée entre le bras supérieur 104 et la borne de sortie 112 et une inductance inférieure 114 couplée entre le bras inférieur 104 et la borne de sortie 112.

[0015] Le MMC triphasé 100 illustré à la figure 1 représente l'installation minimale pour pouvoir utiliser une topologie MMC pour une application à basse tension.

[0016] Les deux bras 104 d'une branche 102 fonctionnent pratiquement parallèlement. Le courant supérieur  $i_u$  est défini par l'équation 1 suivante :

$$[\text{Math 1}] \quad i_u(t) = I_{dc} + \frac{I_{out}}{2} \sin(\omega t + \phi) + I_{2\omega} \cos(2\omega t + \phi) \quad \text{équation 1}$$

[0017] Avec  $I_{dc}$  le courant issu de l'alimentation 101,  $I_{out}$  le courant issu de la borne de sortie 112,  $\omega$  la fréquence du signal alimenté par l'alimentation 101 et  $\phi$  son déphasage.

[0018] Le courant inférieur  $i_l$  est défini par l'équation 2 :

$$[\text{Math 2}] \quad i_l(t) = I_{dc} - \frac{I_{out}}{2} \sin(\omega t + \phi) + I_{2\omega} \cos(2\omega t + \phi) \quad \text{équation 2}$$

[0019] A partir des équations 1 et 2 on peut obtenir les équations 3 et 4 suivantes:

$$[\text{Math 3}] \quad i_u(t) - i_l(t) = I_{out} \sin(\omega t + \phi) \quad \text{équation 3}$$

$$[\text{Math 4}] \quad \frac{i_u(t) + i_l(t)}{2} = I_{dc} + I_{2\omega} \cos(2\omega t + \phi) \quad \text{équation 4}$$

[0020] Comme on peut le voir, le courant supérieur  $i_u(t)$  et le courant inférieur  $i_l(t)$  ont un terme représentant le courant de sortie  $i_{out}$  défini dans l'équation 3, et deux termes de mode commun représentant le courant en circulation défini par l'équation 4.

[0021] Tel que défini par l'équation 5 suivante, le terme  $I_{dc}$  dépend uniquement de la puissance gérée par l'onduleur, qui, dans un onduleur triphasé, correspond à la puissance de sortie totale  $P_{out}$ .

$$[\text{Math 5}] \quad I_{dc} = \frac{P_{out}}{3V_{dc}} \quad \text{équation 5}$$

- [0022] Le terme  $I_{2\omega} \cos(2\omega t + \phi)$  dépend de la stratégie de contrôle actuelle utilisée. En règle générale, plus le courant de deuxième harmonique circulant est élevé, plus la valeur requise pour la capacité de chaque module pour la même ondulation de tension est basse. Même la valeur des inductances et des condensateurs influence la circulation du courant des deuxièmes harmoniques.
- [0023] La basse tension a été définie internationalement comme allant jusqu'à 1000 V<sub>AC</sub> et 1500 V<sub>DC</sub>. En effet, dans les applications industrielles à basse tension, il existe deux principaux bus à courant continu (bus DC) utilisés pour faire fonctionner un onduleur:
- 800 V<sub>nom</sub> 1000 V<sub>max</sub>
  - 1200 V<sub>nom</sub> 1500 V<sub>max</sub>
- [0024] Les semi-conducteurs potentiellement utilisables sont :
- des IGBT de 650 V et 1200 V
  - des MOSFET SIC de 650V, 900V, ou 1200V,
  - des MOSFET GAN.
- [0025] Mais les MOSFETS silicium qui ont une tension de polarisation V<sub>dd</sub> supérieure à 200 V ne conviennent pas à cause de la faible capacité de recouvrement de la diode.
- [0026] En conséquence, pour les applications à basse tension, le choix optimal consiste à utiliser des composants de 650 V ou 1200 V.
- [0027] La tension de maintien minimale de chaque commutateur V<sub>sw</sub> dans le MMC pourrait être évaluée comme suit par l'équation 6 :
- [Math 6]  $V_{sw} = 1,5 * \frac{V_{nom}}{N}$  équation 6
- [0028] Où N est le nombre de modules 106 par bras 104, V<sub>nom</sub> est la tension nominale du bus DC et 1,5 est une marge de sécurité tenant compte de toute augmentation de tension possible pendant le fonctionnement, telle que pics de surtension, tension supérieure à la tension nominale, etc.
- [0029] Le nombre optimal N de modules 106 par bras 104 à utiliser est défini par l'équation 7 :
- [Math 7]  $N > 1,5 * \frac{V_{nom}}{V_{sw}}$  équation 7
- [0030] Le nombre N de modules 106 par branche 104 dans un MMC basse tension est calculé avec :
- V<sub>nom</sub> = 1200 V pour N > 1,5
  - V<sub>nom</sub> = 650 V pour N > 1,85
- [0031] Par conséquent, pour la basse tension, le nombre minimal et optimal N de modules 106 par branche 104 est de deux modules 106.
- [0032] Les solutions actuelles pour les onduleurs ou les redresseurs multiniveaux pour la basse tension dans le secteur industriel sont l'inverseur à point neutre clampé (NPC) ou une solution dérivée avec un agencement similaire (TNPC ou NPC2).

- [0033] Une topologie comportant un nombre de niveaux supérieur à trois est possible et s'applique également aux applications à moyenne ou haute tension, mais sa complexité et son coût sont si élevés que son utilisation ne pourrait être justifiée que dans des conditions spécifiques et non pour des applications industrielles à basse tension.
- [0034] La topologie des NPC souffre d'un inconvénient majeur en raison de l'inductance parasite qui peut limiter le fonctionnement lorsqu'un courant élevé ou une variation importante de courant ( $dI/dt$ ), due à des dispositifs à grande vitesse, sont utilisés notamment lorsque le fonctionnement à quatre quadrants est requis.
- [0035] En raison de la connexion géométrique des différents commutateurs, l'inductance de fuite dans les boucles de commutation limite le courant maximal et la variation temporelle du courant ( $DI/dt$ ).
- [0036] Les principales situations critiques apparaissent lorsque l'onduleur gère un courant de signe opposé à la tension ou lorsqu'il est utilisé en tant que redresseur.
- [0037] La connexion géométrique et la minimisation des boucles de commutation obligent à utiliser des modules de puissance spécialement dédiés pour les applications de moyenne puissance, dans lesquelles un segment est intégré dans un seul boîtier, tandis que pour les applications de forte puissance, cette solution est applicable, du fait des dimensions des composants, mais seulement avec des dispositions spécifiques ou en contrôlant activement le chemin de circulation du courant.
- [0038] Ce problème a peu d'impact dans les applications utilisant des onduleurs pour énergies renouvelables fonctionnant avec un facteur de puissance assez élevé ( $\cos\phi \sim 1$  à 0,9), mais il est particulièrement pertinent dans les applications relatives aux onduleurs ou aux redresseurs.
- [0039] Un autre inconvénient du NPC est que les commutateurs ne sont pas tous utilisés de la même manière, car les commutateurs externe et interne ne présentent pas la même dissipation de puissance en raison de la stratégie de modulation. De plus, les transactions entre les sections supérieure et inférieure (passage par zéro de la tension) doivent être soigneusement synchronisées, en particulier lorsque le courant est déphasé par rapport à la tension.
- [0040] La topologie MMC standard pourrait résoudre les trois problèmes précédents, à savoir l'inductance parasite, le fait que les commutateurs ne sont pas utilisés de la même manière et la synchronisation au passage par zéro.
- [0041] En effet, chaque module pouvant être réalisé avec deux commutateurs et un condensateur, l'inductance parasite peut être minimisée assez facilement même en utilisant un assemblage de module standard et peu coûteux.
- [0042] De plus, dans une topologie MMC, les commutateurs sont toujours modulés et pas seulement en demi-onde. La quantité de courant qui circule dépend de la puissance mais également de la stratégie de modulation (contrôle du courant circulant) et des

rapports  $V_{dc}$  et  $V_{out}$ . En conséquence, les commutateurs dissipent la même quantité de pertes, ce qui permet un fonctionnement plus uniforme de la température.

- [0043] De plus, la synchronisation au passage par zéro n'est plus demandée grâce à la modulation continue qui améliore également le THD de la forme d'onde de sortie.
- [0044] Malheureusement, l'énorme valeur de la capacité et, à son tour, de l'énergie stockée dans les condensateurs des modules, limite l'utilisation de la topologie classique MMC dans les applications à basse tension.
- [0045] Comme il est illustré sur les figures 2 et 3, qui représentent deux schémas électriques de deux branches MMC standard 102 avec deux modules 106 par bras (figure 2 sans point neutre et figure 3 avec point neutre), le nombre de niveaux de tension appliqués à une charge ou à un filtre de sortie pour un convertisseur triphasé est de trois ( $N + 1$ ) si l'on considère phase à neutre, alors qu'il est de cinq ( $2N + 1$ ) si l'on considère phase à phase.
- [0046] D'après les schémas présentés aux figures 2 et 3, on peut immédiatement se rendre compte que chaque condensateur 110 dans le circuit fonctionne indépendamment l'un de l'autre et qu'il n'y a pas de compensation d'ondulation dans un système triphasé ni de compensation entre les bras supérieur et inférieur. Du fait de l'indépendance des modules 106, la modulation demandée pour la synthèse de la tension de sortie pourrait être appliquée avec une certaine liberté entre les modules 106.
- [0047] Cependant, il a été prouvé que l'utilisation d'une «porteuse à décalage de phase», ou « phase sift carrier » en anglais, est recommandée pour un MMC. Cette stratégie de modulation pourrait être de deux types : porteuse déphasée avec  $N$  porteuses ou porteuse déphasée avec  $2N$  porteuses,  $N$  étant le nombre de modules.
- [0048] Dans une porteuse déphasée à  $N$  porteuse, les modules d'un même bras sont pilotés par un PWM généré à partir du même signal à l'aide de porteuses décalées de  $2\pi/N$ . Les bras supérieurs et inférieurs sont entraînés avec le même PWM.
- [0049] Dans une porteuse déphasée avec une porteuse  $2N$ , les modules du bras supérieur sont pilotés avec un PWM généré à l'aide de porteuses décalées de  $2\pi/N$ . Les modules situés dans le bras inférieur sont entraînés par un PWM généré à l'aide de porteuses décalées de  $2\pi/N$  entre elles mais synchronisées avec un décalage de  $\pi/N$  par rapport au bras supérieur.
- [0050] Dans l'état de la technique, certaines solutions matérielles et de contrôle ont été développées pour réduire le dimensionnement des condensateurs. Différentes idées ont déjà été proposées pour réduire ce problème en introduisant des modifications de la topologie, comme indiqué dans l'article de la revue IEEE publiée en octobre 2015 et intitulé « A modified modular multilevel converter with reduced capacitor voltage fluctuation », ou en contrôlant le courant traversant les bras du convertisseur, tels que décrits dans l'article de la revue IEEE publiée en 2018 et intitulé « An enhanced

steady-state model and capacitor sizing method for modular multilevel converters for HVDC applications ».

[0051] En particulier du point de vue matériel, le schéma électrique représenté à la figure 4 montre la solution équivalente à cinq niveaux proposée dans l'article de la revue IEEE publiée en octobre 2015 et intitulé « A modified modular multilevel converter with reduced capacitor voltage fluctuation ». Dans cette solution illustrée à la figure 4, les deux condensateurs externes de chaque branche, c'est-à-dire le condensateur externe de chaque bras, sont en commun en vue de la somme des trois courants qui, grâce à la caractéristique triphasée, a pour effet d'annuler presque le courant pulsé de chaque branche. Les inducteurs de branche sont décalés et les deux cellules internes sont réduites en une seule.

[0052] Néanmoins, les réductions de capacité obtenues ne sont pas telles qu'elles présentent des avantages économiques et en termes de taille par rapport aux solutions actuelles. De plus, aucune recherche ou solution n'est proposée dans les applications à basse tension où la quantité de condensateurs est plus élevée en raison d'un rapport I/V plus élevé pour l'unité de puissance.

### **Exposé de l'invention**

[0053] A cet effet, la présente invention propose une topologie MMC qui peut être utilisée aussi bien pour des applications à moyenne et haute tension que pour des applications à basse tension et qui présente une dimension optimisée.

[0054] Dans un premier objet de l'invention, il est proposé un convertisseur modulaire multiniveaux comprenant au moins une branche destinée à être connectée à une phase, ladite au moins une branche comprenant un premier et un second modules externes et un unique module interne, chaque module externe et chaque module interne comprenant:

- une première et une deuxième unités de commutation comprenant chacune une diode, un transistor semi-conducteur, un premier connecteur électriquement connecté à un premier pôle de la diode et un premier pôle du transistor, et un deuxième connecteur électriquement connecté à un deuxième pôle de la diode et un deuxième pôle du transistor,
- une première borne électriquement connectée au premier connecteur de la première unité de commutation,
- une deuxième borne connectée électriquement au deuxième connecteur de la deuxième unité de commutation, et
- une troisième borne connectée électriquement au deuxième connecteur de la première unité de commutation et au premier connecteur de la deuxième unité de commutation.

- [0055] La troisième borne du premier module externe est couplée électriquement à la première borne du module interne par l'intermédiaire d'un premier inducteur, tandis que la troisième borne du deuxième module externe est couplée électriquement à la seconde borne du module interne par l'intermédiaire d'un second inducteur, et la troisième borne du module interne est configurée pour être connectée à une phase d'une charge ou à une grille à laquelle le convertisseur est conçu pour être connectée.
- [0056] Le module interne comprend en outre une capacité comprenant un premier pôle connecté électriquement à la première borne du module interne et un second pôle connecté électriquement à la seconde borne du module interne.
- [0057] Le convertisseur comprend une première capacité externe comportant un premier pôle connecté électriquement à la première borne du premier module externe de ladite au moins une branche et un second pôle connecté électriquement à la seconde borne du premier module externe de ladite au moins une branche, et une seconde capacité externe comprenant un premier pôle connecté électriquement à la première borne du second module externe de ladite au moins une branche et un second pôle connecté électriquement à la seconde borne du second module externe de ladite au moins une branche.
- [0058] La combinaison des deux modules internes d'une topologie MMC classique en un unique module interne telle que dans la topologie de la présente invention avec une troisième borne connectée à la charge permet de compenser l'ondulation de tension.
- [0059] Toutes ces caractéristiques du MMC selon l'invention permettent au MMC non seulement d'être utilisé pour une application à basse tension, mais également d'avoir une taille globale réduite avec un nombre réduit de capacités et sans traitement complexe.
- [0060] Dans un premier aspect du convertisseur modulaire multiniveaux, la seconde borne du premier module externe peut être connectée électriquement à la première borne du second module externe.
- [0061] En connectant la seconde borne du premier module externe à la première borne du second module externe, les première et seconde capacités externes sont couplées ensemble. De cette façon, les deux capacités peuvent partager la tension totale, agir de manière dynamique avec une valeur de capacité double et être communes aux trois branches lorsque le convertisseur est dans une configuration de convertisseur triphasé.
- [0062] Dans un deuxième aspect du convertisseur modulaire multiniveaux, la deuxième borne du premier module externe et la première borne du second module externe peuvent être connectées au point de référence dans un système de distribution de tension (masse, neutre, etc.).
- [0063] Pour toute application du convertisseur modulaire multiniveaux, lorsque le neutre doit être fourni à la charge, généralement pour une utilisation dans une alimentation

sans interruption (ASI), il n'est pas nécessaire d'ajouter les deux condensateurs classiquement requis pour créer le point milieu étant donné qu'ils sont déjà intégrés à la structure de la présente invention, ces deux condensateurs étant formés par les deux capacités externes.

- [0064] C'est un gros avantage, car une batterie de condensateurs DC est toujours nécessaire pour gérer le flux d'énergie, le déséquilibre de l'alimentation des phases et des ondules et les condensateurs externes des bras font naturellement partie de cette batterie de condensateurs.
- [0065] Dans un troisième aspect du convertisseur modulaire multiniveaux, le convertisseur comprend trois branches, chacune configurée pour être connectée à une phase différente, et dans laquelle la première capacité externe est couplée électriquement en parallèle au premier module externe des trois branches, et la seconde capacité externe est couplée électriquement en parallèle au second module externe des trois branches.
- [0066] Dans un quatrième aspect du convertisseur modulaire multiniveaux, le convertisseur comprend en outre une unité de commande configurée pour piloter les premier et second modules externes avec un motif de modulation calculé par une porteuse déphasée avec N porteuses, N étant une valeur entière, et pour piloter la module interne avec un signal de modulation de largeur d'impulsion (PWM) calculé par une porteuse avec n phase, n étant une valeur entière, et le même signal d'erreur.
- [0067] Dans un cinquième aspect du convertisseur modulaire multiniveaux, le courant de sortie de chaque branche sur la troisième borne du module interne est limité par les valeurs des différents éléments électriques du convertisseur, telles que les capacités.
- [0068] Dans un sixième aspect du convertisseur modulaire multiniveaux, l'unité de commande est configurée pour contrôler le courant dans ladite au moins une branche en surveillant le courant dans le premier module externe et dans le deuxième module externe.
- [0069] Une réduction de la composante de courant  $I_{2\omega}$  entraîne une ondulation plus importante de la capacité du module interne avec la demande d'une valeur de capacité plus élevée, mais permet d'optimiser le courant et la dissipation dans les modules et les commutateurs.

### **Brève description des dessins**

- [0070] L'invention sera mieux comprise à la lecture faite ci-après, à titre indicatif mais non limitatif, en référence aux dessins annexés sur lesquels :
- [0071] [fig.1] La figure 1, précédemment décrite, est une topologie MMC à trois phases telle que connue dans l'état de la technique.
- [0072] [fig.2] La figure 2, précédemment décrite, est un schéma électrique d'une branche d'un MMC standard avec deux modules par bras avec  $N = 2$  et sans point neutre,

comme cela est connu dans l'état de la technique.

[0073] [fig.3] La figure 3, précédemment décrite, est un schéma électrique d'une branche d'un MMC standard à deux modules par bras avec  $N = 2$  et un point neutre, tels qu'ils sont connus dans l'état de la technique.

[0074] [fig.4] La figure 4, précédemment décrite, est un schéma électrique d'une topologie MMC à 5 niveaux telle que connue dans l'état de la technique.

[0075] [fig.5] La figure 5 représente schématiquement un convertisseur modulaire multiniveaux monophasé selon un mode de réalisation de l'invention.

[0076] [fig.6] La figure 6 représente schématiquement un convertisseur modulaire multiniveaux triphasé selon un autre mode de réalisation de l'invention.

### **Description des modes de réalisation**

[0077] La présente invention sera décrite en relation avec des modes de réalisation particuliers et en référence à certains dessins, mais l'invention n'est pas limitée à cela, mais uniquement par les revendications. Les dessins décrits ne sont que schématiques et ne sont pas limitatifs. Dans les dessins, la taille de certains des éléments peut être exagérée et non dessinée à l'échelle à des fins d'illustration. Lorsque le terme "comprenant" est utilisé dans la présente description et les revendications, il n'exclut pas d'autres éléments ou étapes. Lorsqu'un article indéfini ou défini est utilisé pour désigner un nom singulier, par ex. "un", "le", cela inclut un pluriel de ce nom, sauf indication contraire.

[0078] Le terme "comprenant", utilisé dans les revendications, ne doit pas être interprété comme étant limité aux moyens énumérés ci-après; il n'exclut pas d'autres éléments ou étapes. Ainsi, la portée de l'expression "un dispositif comprenant les moyens A et B" ne devrait pas être limitée aux dispositifs constitués uniquement des composants A et B. Cela signifie que, par rapport à la présente invention, les seuls composants pertinents du dispositif sont A et B.

[0079] En outre, les termes premier, deuxième, troisième et similaires dans la description et les revendications sont utilisés pour distinguer des éléments similaires et pas nécessairement pour décrire un ordre séquentiel ou chronologique. Il faut comprendre que les termes ainsi utilisés sont interchangeables dans des circonstances appropriées et que les modes de réalisation de l'invention décrits ici sont capables de fonctionner dans d'autres séquences que celles décrites ou illustrées ici.

[0080] La figure 5 représente schématiquement un convertisseur modulaire multiniveaux (MMC) selon un mode de réalisation de l'invention.

[0081] Le MMC 1 comprend trois modules : un premier module externe 2, un second module externe 3 et un module interne 4.

[0082] Chaque module externe et interne 2 à 4 comprend une première unité de com-

mutation 7, une seconde unité de commutation 8, une première borne 9, une seconde borne 10 et une troisième borne 11.

- [0083] Chaque première et seconde unité de commutation 7 et 8 comprend une diode 12, un transistor bipolaire à grille isolée (IGBT) 13, un premier connecteur 14 connecté électriquement à un premier pôle de la diode 12 et à un premier pôle de l'IGBT 13, et un second connecteur 15 connecté électriquement à un deuxième pôle de la diode 12 et à un deuxième pôle de l'IGBT 13.
- [0084] La première borne 9 d'un module 2 à 4 est connectée électriquement au premier connecteur 14 de sa première unité de commutation 7. La deuxième borne 10 d'un module 2 à 4 est connectée électriquement au deuxième connecteur 15 de sa deuxième unité de commutation 8. Et la troisième borne 11 d'un module 2 à 4 est connectée électriquement au deuxième connecteur 15 de sa première unité de commutation 7 et au premier connecteur 14 de sa deuxième unité de commutation 8.
- [0085] La troisième borne 11 du premier module externe 2 est couplée électriquement à la première borne 9 du module intérieur 4 par l'intermédiaire d'un premier inducteur 16.
- [0086] La troisième borne 11 du second module externe 3 est couplée électriquement à la deuxième borne 10 du module intérieur 4 par l'intermédiaire d'un deuxième inducteur 17.
- [0087] La troisième borne 11 du module interne 4 est configurée pour être connectée à une phase d'une charge ou d'un réseau auquel le MMC 1 est configuré pour être connecté.
- [0088] La deuxième borne 10 du premier module externe 2 est connectée électriquement à la première borne 9 du second module externe 3.
- [0089] Le module interne 4 comprend un condensateur interne 18, ayant une valeur de capacité interne  $C_m$  et comprenant un premier pôle 180 connecté électriquement à la première borne 9 du module interne 4 et un second pôle 185 connecté électriquement à la seconde borne 10 du module interne 4.
- [0090] Le MMC 1 comprend également un premier condensateur externe 19 ayant une première valeur de capacité externe  $C_{top}$  et comprenant un premier pôle 190 connecté électriquement à la première borne 9 du premier module externe 2 et un second pôle 195 connecté électriquement à la seconde borne 10 du premier module externe 2, et un deuxième condensateur externe 20 ayant une deuxième valeur de capacité externe  $C_{bottom}$  et comprenant un premier pôle 200 connecté électriquement à la première borne 9 du second module externe 3 et un deuxième pôle 205 relié électriquement à la deuxième borne 10 du second module externe 3.
- [0091] Le deuxième pôle 195 du premier condensateur externe 19, qui correspond à la deuxième borne 10 du premier module externe 2, et le premier pôle 200 du deuxième condensateur externe 20, qui correspond à la première borne 9 du second module externe 3, sont électriquement ensemble. De cette façon, les deux capacités peuvent

partager la tension totale, agir de manière dynamique avec une valeur de capacité double et être communes aux trois branches lorsque le convertisseur est dans une configuration de convertisseur triphasé.

- [0092] Les lignes en pointillés représentent une configuration avec le point neutre, comme par exemple dans un commutateur d'alimentation sans interruption. Dans cette configuration, le deuxième pôle 195 du premier condensateur externe 19 et le premier pôle 200 du deuxième condensateur externe 20 sont couplés électriquement à la terre. De cette façon, il n'est pas nécessaire d'ajouter les deux condensateurs demandés pour créer le point milieu car ils sont déjà intégrés dans la structure, ces deux condensateurs étant les deux condensateurs externes 19 et 20.
- [0093] Le MMC 1 est couplé à une tension d'entrée  $V_{DC}$  par l'intermédiaire de la première borne 9 du premier module externe 2 et de la seconde borne 10 du second module externe 3.
- [0094] Le MMC 1 illustré sur la figure 5 comprend en outre une capacité de filtrage 22 couplée entre le point de référence dans un système de distribution de tension (masse, neutre ..) et une borne de sortie du MMC 1 qui correspond à la troisième borne 11 du module interne 4. Cette capacité de filtrage 22 permet de compenser l'ondulation du courant de starter de sortie afin de filtrer la fréquence de commutation et de ne conserver que le fondamental de la tension de sortie (50 ou 60Hz).
- [0095] La figure 6 illustre schématiquement un MMC 31 triphasée selon un autre mode de réalisation de l'invention.
- [0096] Le MMC 31 comprend trois branches 30 comprenant chacune trois modules : un premier module externe 32, un second module externe 33 et un module interne 34.
- [0097] Chaque branche 30 du MMC 31 triphasé est composée de ses trois modules 32 à 34 de la même manière que le MMC monophasé 1 illustré sur la figure 5. Ainsi, chaque module externe et interne 32 à 34 comprend une première unité de commutation 37, une seconde unité de commutation 38, une première borne 39, une seconde borne 40 et une troisième borne 41.
- [0098] Chaque première et seconde unité de commutation 37 et 38 d'une branche 30 comprend une diode 42, un transistor bipolaire à grille isolée (IGBT) 43, un premier connecteur 44 connecté électriquement à un premier pôle de la diode 42 et un premier pôle de l'IGBT 43 et un deuxième connecteur 45 connecté électriquement à un deuxième pôle de la diode 42 et à un deuxième pôle de l'IGBT 43.
- [0099] La première borne 39 d'un module 32 à 34 d'une branche 30 est connectée électriquement au premier connecteur 44 de sa première unité de commutation 37. La seconde borne 40 d'un module 32 à 34 est connectée électriquement au second connecteur 35 de sa seconde unité de commutation 38. Et la troisième borne 41 d'un module 32 à 34 est connectée électriquement au deuxième connecteur 45 de sa

première unité de commutation 37 et au premier connecteur 44 de sa deuxième unité de commutation 38.

- [0100] Pour chaque branche 30, la troisième borne 41 du premier module externe 32 de la branche 30 est couplée électriquement à la première borne 39 du module interne 34 de la même branche 30 par l'intermédiaire d'un premier inducteur 46.
- [0101] Pour chaque branche 30, la troisième borne 41 du deuxième module extérieur 33 de la branche 30 est couplée électriquement à la deuxième borne 40 du module intérieur 34 de la même branche 30 par l'intermédiaire d'un deuxième inducteur 47.
- [0102] Pour chaque branche 30, la troisième borne 41 du module interne 34 de la branche 30 est destinée à être connectée à une phase d'une charge ou d'un réseau auquel le MMC 31 est destiné à être connecté.
- [0103] Pour chaque branche 30, la deuxième borne 40 du premier module extérieur 32 de la branche 30 est connectée électriquement à la première borne 39 du second module externe 33 de la même branche 30.
- [0104] Le module interne 34 de chaque branche 30 comprend un condensateur interne 48, ayant une valeur de capacité interne  $C_m$  et comprenant un premier pôle 480 connecté électriquement à la première borne 39 du module interne 34 de sa branche 30 et un second pôle 185 relié électriquement à la deuxième borne 40 du module interne 34 de sa branche 30.
- [0105] Le MMC 1 comprend également un premier condensateur externe 49 et un second condensateur externe 50. Le premier condensateur externe 49 est couplé en parallèle au premier module externe 32 des trois branches 30, et le second condensateur externe 50 est couplé en parallèle au second module externe 33 des trois branches 30. En d'autres termes, il existe un premier condensateur externe 49 couplé en parallèle à trois premiers modules externes 32 et un second condensateur externe 50 couplé en parallèle à trois seconds modules externes 33.
- [0106] Le premier condensateur externe 49 a une première valeur de capacité externe  $C_{top}$  et comprend un premier pôle 490 connecté électriquement à la première borne 39 du premier module externe 32 de chaque branche 30 et un second pôle 495 connecté électriquement à la seconde borne 40 du premier module externe 32 de chaque branche 30. Le deuxième condensateur extérieur 50 a une deuxième valeur de capacité extérieure  $C_{bottom}$  et comprend un premier pôle 500 connecté électriquement à la première borne 39 du second module externe 33 de chaque branche 30 et un deuxième pôle 505 relié électriquement au deuxième terminal 40 du second module externe 33 de chaque branche 30.
- [0107] Le MMC 31 est couplé à une tension d'entrée  $V_{DC}$  par l'intermédiaire de la première borne 39 du premier module externe 32 de chaque branche 30 et de la seconde borne 40 du second module externe 33 de chaque branche 30.

[0108] Pour contrôler le MMC 1 monophasé ou 1 MMC 31 triphasé, une configuration de modulation calculée par une porteuse déphasée avec N porteuse est appliquée. Les modules externes sont pilotés en utilisant un signal de modulation de largeur d'impulsion calculé en utilisant une porteuse en phase nulle. Le module interne est piloté en utilisant un signal PWM calculé par une porteuse à n phase et le même signal d'erreur.

[0109] Ensuite, un contrôle approprié du courant est fourni aux branches et/ou à la sortie. Lorsque seul le courant de sortie est contrôlé, le courant de circulation n'est pas mesuré et ne peut pas être contrôlé par la boucle de courant. Par conséquent, il n'est limité que par les valeurs des paramètres de circuit, données par l'équation 8 suivante :

$$[\text{Math 8}] I_{2\omega} = \left( \frac{1}{\frac{M^2 C_m}{4} + 8C_m L\omega^2 - 1} \right) \frac{MI_m}{4} \text{ équation 8}$$

[0110] De cette manière, la valeur  $C_m$  du condensateur interne 18 ou 48 dans le module interne 4 ou 34 est optimisée et minimisée.

[0111] Lorsque le courant dans les branches est contrôlé, la valeur du courant dans les branches peut être optimisée. Une réduction du terme  $I_{2\omega}$  provoque une ondulation plus importante sur le condensateur interne 18 ou 48 du module interne 4 ou 34 avec la demande d'une valeur de capacité supérieure, mais permet d'optimiser le courant et la dissipation dans les modules 2 à 4 ou 32 à 34 et les commutateurs 7 et 8 ou 37 et 38.

[0112] L'invention s'applique à tous les types de convertisseurs de puissance pour convertisseurs de moyenne à grande puissance (onduleur ou redresseur) ainsi que pour les applications à basse tension avec des semi-conducteurs de calibres appropriés.

[0113] Le MMC pourrait être réalisé sous forme de solution de circuit imprimé pour des applications à faible puissance, par exemple, ou sous forme de solution câblée pour des applications de moyenne ou grande puissance.

## Revendications

[Revendication 1]

Convertisseur modulaire multiniveaux (1, 31) comprenant au moins une branche (30) destinée à être connectée à une phase, ladite au moins une branche comprenant un premier et un second modules externes (2, 3, 32, 33) et un unique module interne (4, 34), chaque module externe et chaque module interne (1-4, 32-34) comprenant:

- une première et une deuxième unités de commutation (7, 8, 37, 38) comprenant chacune une diode (12, 42), un transistor semi-conducteur (13, 43), un premier connecteur (14, 44) électriquement connecté à un premier pôle de la diode (12, 42) et un premier pôle du transistor (13, 43), et un deuxième connecteur (15, 45) électriquement connecté à un deuxième pôle de la diode (12, 42) et un deuxième pôle du transistor (13, 43),

- une première borne (9, 39) électriquement connectée au premier connecteur (14, 44) de la première unité de commutation (7, 37),

- une deuxième borne (10, 40) connectée électriquement au deuxième connecteur (15, 45) de la deuxième unité de commutation (8, 38), et

- une troisième borne (11, 41) connectée électriquement au deuxième connecteur (15, 45) de la première unité de commutation (7, 37) et au premier connecteur (14, 44) de la deuxième unité de commutation (8, 38),

la troisième borne (11, 41) du premier module externe (2, 32) étant électriquement couplée à la première borne (9, 39) du module interne (4, 34) par l'intermédiaire d'un premier inducteur (16, 46), la troisième borne (11, 41) du deuxième module externe (3, 33) étant couplée électriquement à la seconde borne (10, 40) du module interne (4, 34) par l'intermédiaire d'un second inducteur (17, 47), et la troisième borne (11, 41) du module interne (4, 34) étant configurée pour être connectée à une phase d'une charge ou à une grille à laquelle le convertisseur est configuré pour être connecté,

le module interne (4, 34) comprenant en outre une capacité (18, 48) comportant un premier pôle (180, 480) connecté électriquement à la première borne (9, 39) du module interne (4, 34) et un second pôle (185, 485) connecté électriquement à la seconde borne (10, 40) du module interne (4, 34), et

le convertisseur (1, 31) comprenant une première capacité externe (19, 49) comportant un premier pôle (190, 490) connecté électriquement à la

première borne (9, 39) du premier module externe (2, 32) de ladite au moins une branche (30) et un second pôle (195, 495) connecté électriquement à la seconde borne (10, 40) du premier module externe (2, 32) de ladite au moins une branche (30), une seconde capacité externe (20, 50) comportant un premier pôle (200, 500) connecté électriquement à la première borne (9, 39) du second module externe (3, 33) de ladite au moins une branche (30) et un second pôle (205, 505) connecté électriquement à la seconde borne (10, 40) du second module externe (3, 33) de ladite au moins une branche (30),  
 et une capacité de filtrage (22) couplée à la troisième borne (11) du module interne (4).

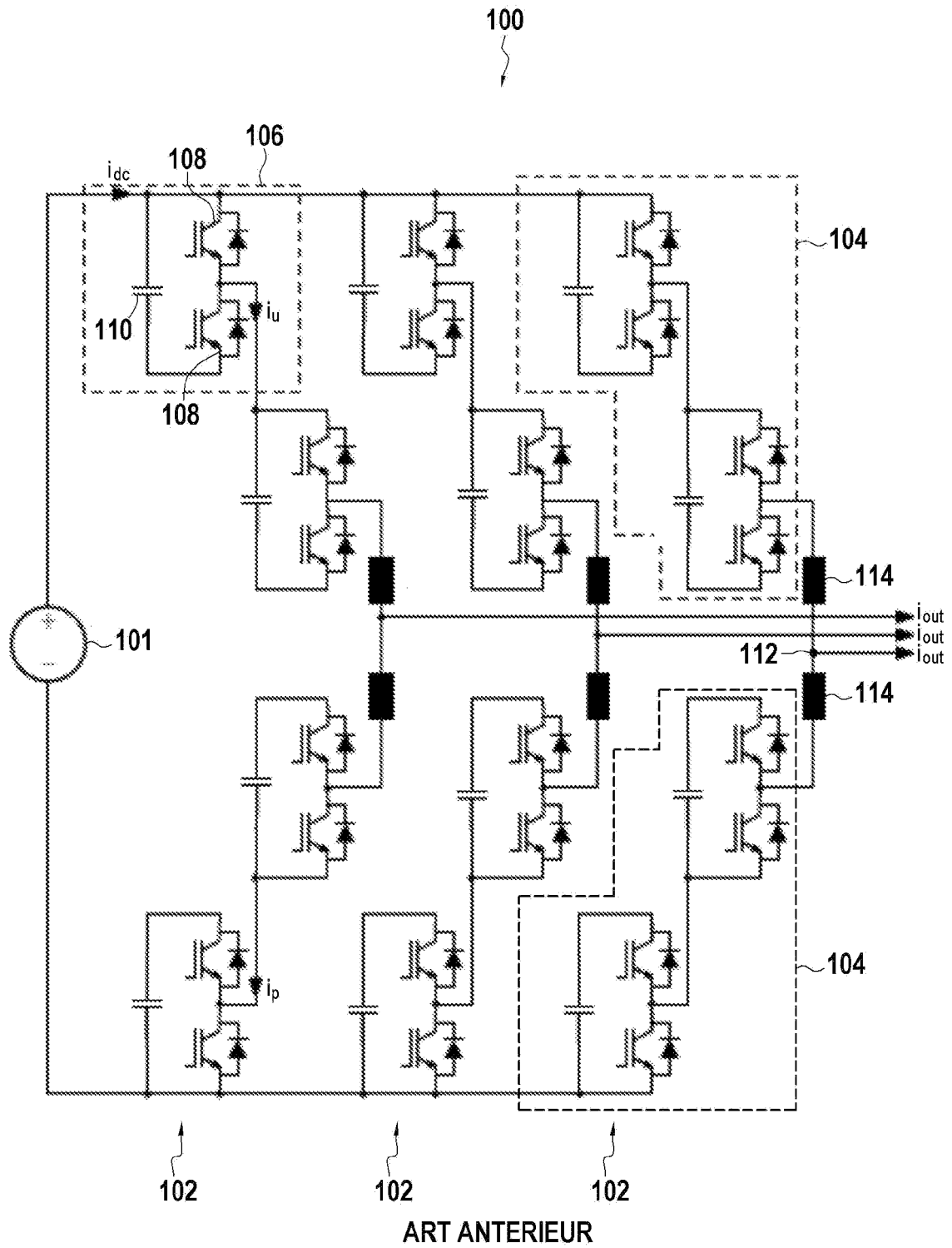
[Revendication 2] Convertisseur modulaire multiniveaux (1, 31) selon la revendication 1, dans lequel la seconde borne (10, 40) du premier module externe (2, 32) est connectée électriquement à la première borne (9, 39) du second module externe (3, 33).

[Revendication 3] Convertisseur modulaire multiniveaux (1, 31) selon la revendication 2, dans lequel la deuxième borne (10, 40) du premier module externe (2, 32) et la première borne (9, 39) du second module externe (3, 33) sont connectées à la masse.

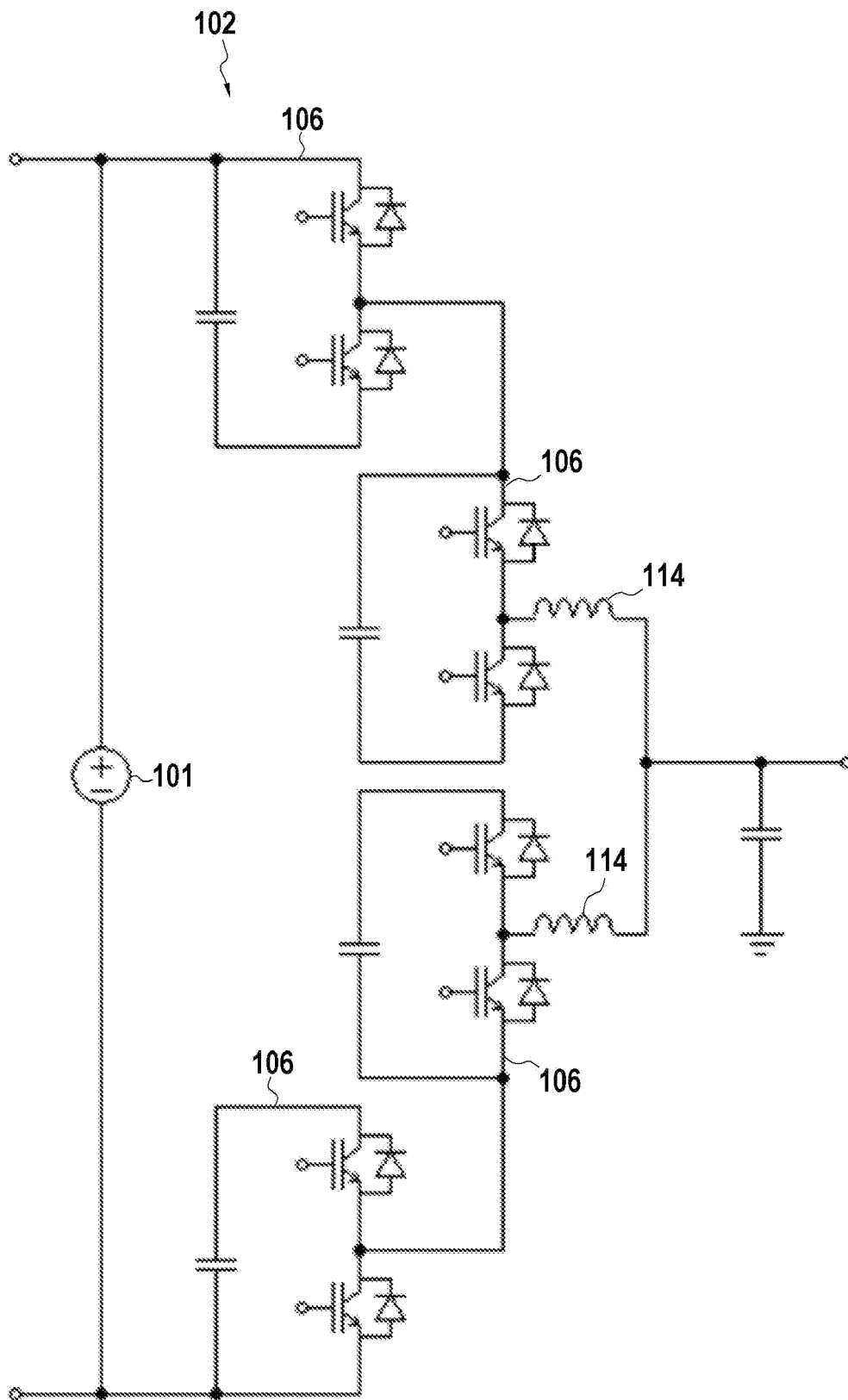
[Revendication 4] Convertisseur modulaire multiniveaux (1, 31) selon l'une des revendications 1 à 3, comprenant trois branches (30), chacune configurée pour être connectée à une phase différente, et dans laquelle la première capacité externe (49) est couplée électriquement en parallèle au premier module externe (2, 32) des trois branches (30), et la seconde capacité externe (50) est couplée électriquement en parallèle au second module externe (3, 33) des trois branches (30).

[Revendication 5] Convertisseur modulaire multiniveaux (1, 31) selon l'une des revendications 1 à 4, comprenant en outre une unité de commande configurée pour piloter les premier et second modules externes avec un motif de modulation calculé par une porteuse déphasée avec N porteuses, N étant une valeur entière, et pour piloter la module interne avec un signal de modulation de largeur d'impulsion (PWM) calculé par une porteuse avec n phase, n étant une valeur entière, et le même signal d'erreur.

[Fig. 1]

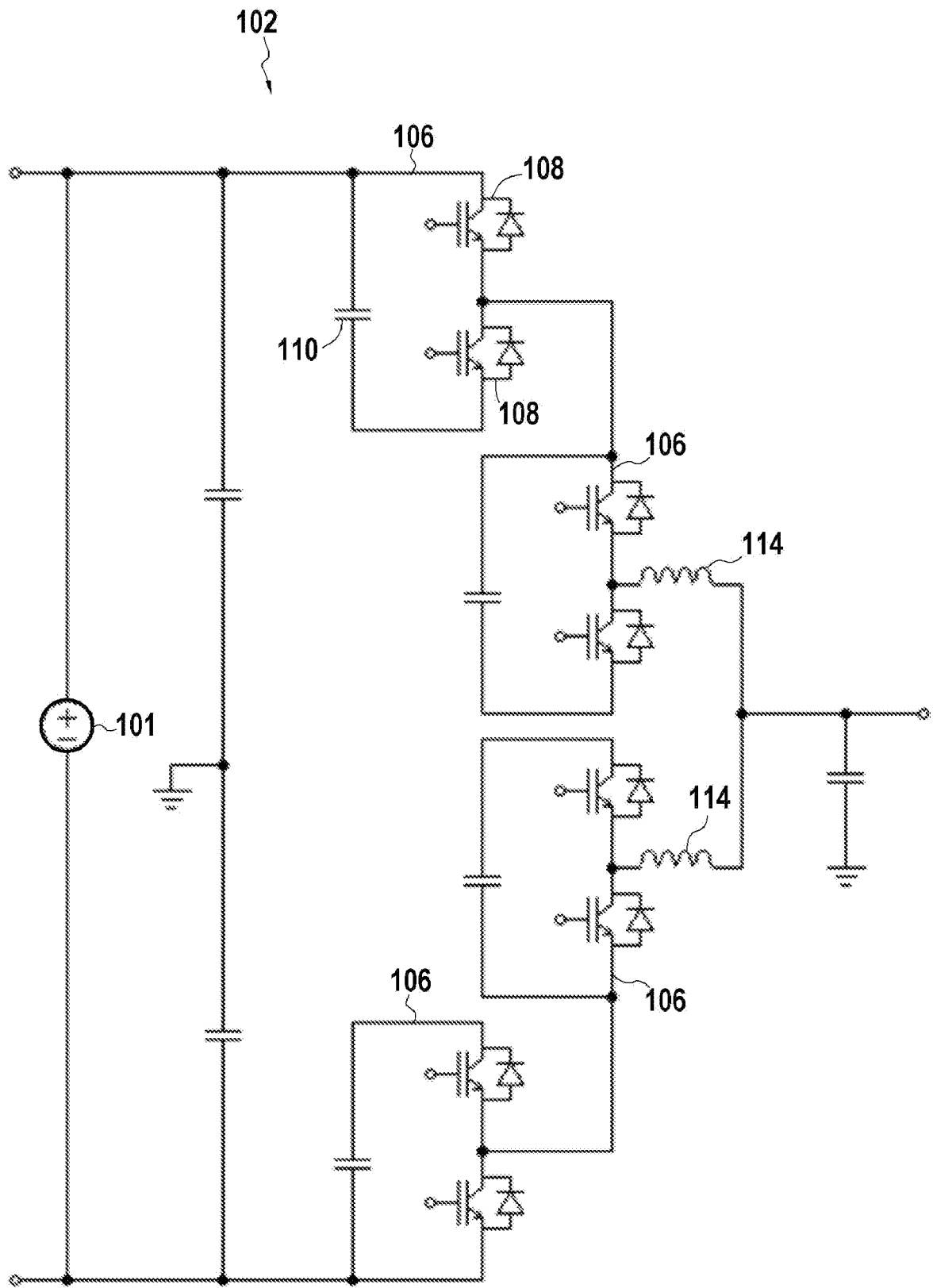


[Fig. 2]



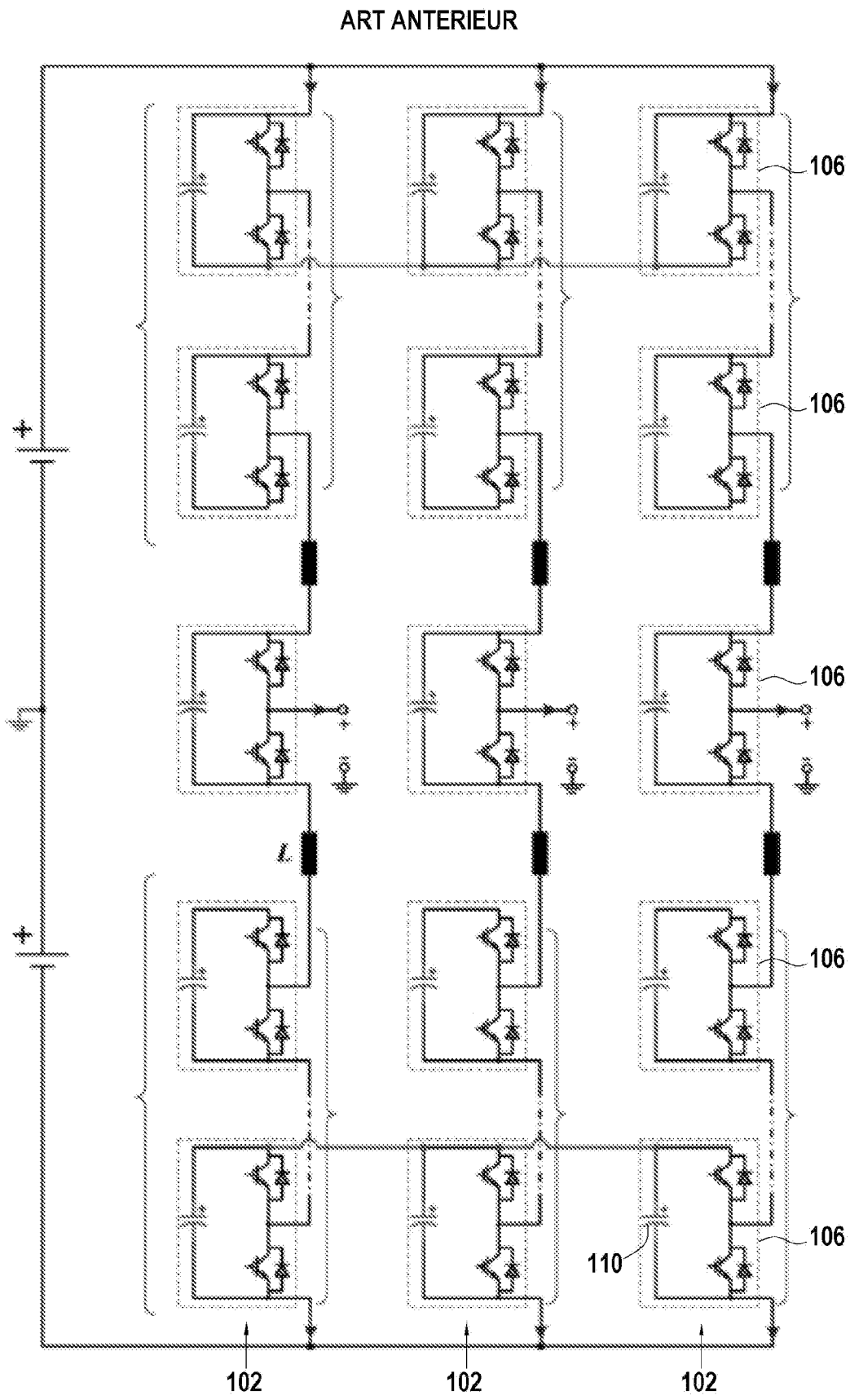
ART ANTERIEUR

[Fig. 3]

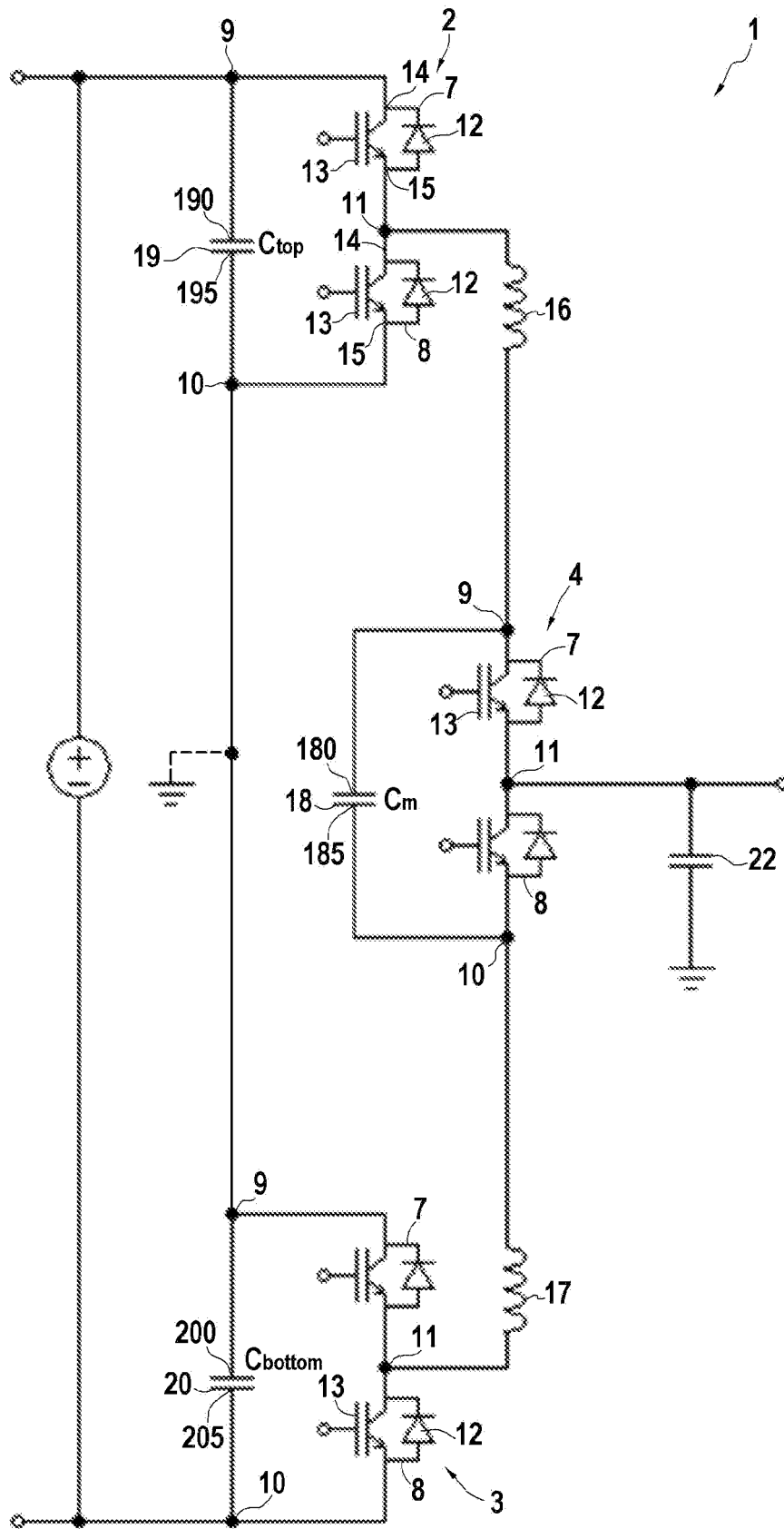


ART ANTERIEUR

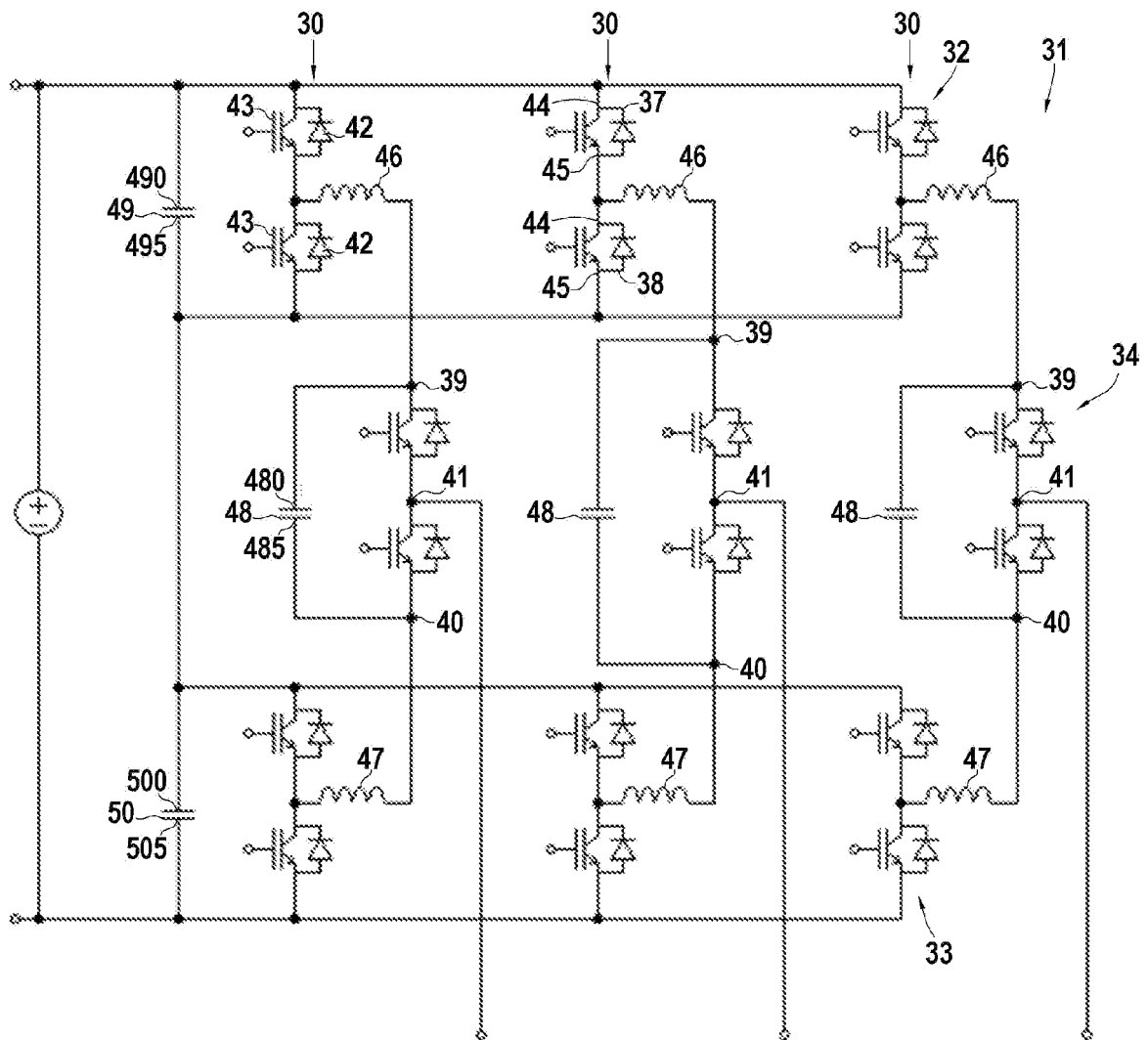
[Fig. 4]



[Fig. 5]



[Fig. 6]



# RAPPORT DE RECHERCHE

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

## OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

---

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

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

## CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

---

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

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

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

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

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

## DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

---

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

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

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

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

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

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

JP 2014 100015 A (NTT FACILITIES INC)  
29 mai 2014 (2014-05-29)

JP 2012 253981 A (FUJI ELECTRIC CO LTD)  
20 décembre 2012 (2012-12-20)

EP 2 306 629 A2 (FUJI ELECTRIC HOLDINGS  
[JP]) 6 avril 2011 (2011-04-06)

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

US 2015/288284 A1 (LAVIEVILLE JEAN-PAUL  
[FR]) 8 octobre 2015 (2015-10-08)

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

NEANT