

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

11 N° de publication : 2 956 529

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

21 N° d'enregistrement national : 10 00671

51 Int Cl⁸ : H 02 J 7/00 (2006.01), H 01 L 31/00, H 01 M 10/42

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 17.02.10.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 19.08.11 Bulletin 11/33.

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

60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

71 Demandeur(s) : INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE — FR et CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Etablissement public — FR.

72 Inventeur(s) : CREBIER JEAN-CHRISTOPHE et CHUREAU ALEXANDRE.

73 Titulaire(s) : INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE Etablissement public.

74 Mandataire(s) : CABINET ORES.

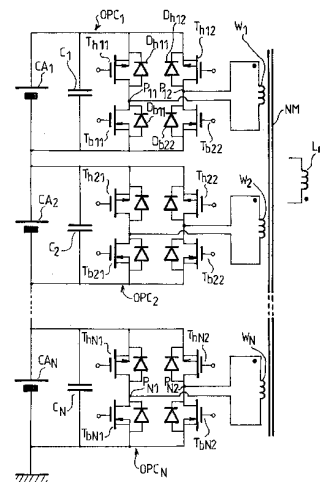
54 SYSTEME D'EQUILIBRAGE PAR COUPLAGE MAGNETIQUE D'UNE ASSOCIATION SERIE D'ELEMENTS DE GENERATION OU DE STOCKAGE D'ENERGIE ELECTRIQUE.

57 Système d'équilibrage d'une association série d'éléments de génération et/ou de stockage d'énergie électrique, caractérisé en ce qu'il comporte:

- une pluralité d'onduleurs en pont complet (OPC_1, OPC_2, OPC_N), chacun desquels est constitué par deux bras d'onduleur connectés en parallèle entre deux ports d'extrémité de l'onduleur, chaque bras d'onduleur étant à son tour constitué par deux interrupteurs ($T_{h1}, T_{b1}; T_{h2}, T_{b2}$) connectés en série par un point dit point milieu (P_{11}, P_{12}) du bras;
- une pluralité de connecteurs pour connecter les deux ports d'extrémité de chaque onduleur en pont complet à un élément respectif ($CA_1, CA_2, CA_N, PV_1, PV_2, PV_N$) de ladite association série; et
- un coupleur magnétique (NM) formé par un noyau magnétique sur lequel est réalisée une pluralité d'enroulements (W_1, W_2, W_N), chacun desdits enroulements étant relié aux points milieux des bras de l'un desdits onduleurs.

Association série d'éléments de stockage électrochimique d'énergie électrique (CA_1, CA_2, CA_N) pourvue d'un tel système d'équilibrage.

Association série de cellules photovoltaïques (PV_1, PV_2, PV_N) pourvue d'un tel système d'équilibrage.



FR 2 956 529 - A1



**SYSTEME D'EQUILIBRAGE PAR COUPLAGE MAGNETIQUE D'UNE
ASSOCIATION SERIE D'ELEMENTS DE GENERATION OU DE
STOCKAGE D'ENERGIE ELECTRIQUE**

L'invention porte sur un système d'équilibrage d'une
5 association série d'éléments de génération et/ou de stockage d'énergie
électrique, tels que des accumulateurs ou cellules d'accumulateurs
électrochimiques, ou des cellules photovoltaïques. L'invention porte
également sur une association série d'éléments de génération et/ou de
stockage d'énergie électrique pourvue d'un tel système d'équilibrage. Plus
10 précisément, le système d'équilibrage de l'invention est du type exploitant un
couplage magnétique entre les différents éléments.

Comme le montre la figure 1, les batteries électrochimiques
présentent généralement une structure modulaire. L'élément de base est
constitué par un accumulateur individuel A, constitué par une cellule
15 électrochimique unique. Plusieurs accumulateurs connectés en parallèle
forment une « cellule d'accumulateurs » CA ; une telle cellule fournit une
tension égale à celle d'un accumulateur individuel, mais un courant et une
capacité de stockage plus importants. Pour élever le niveau de tension fourni
par la batterie, on connecte en série plusieurs cellules d'accumulateurs,
20 formant ce qu'on appelle un « module » M. Plusieurs modules peuvent à leur
tour être connectés en série pour former ce qu'on appelle un « stack » S. Une
batterie complète BATT est formée par une pluralité de stacks connectés en
parallèle.

Le système de l'invention vise notamment à permettre
25 l'équilibrage en tension des différents éléments (cellules, modules) d'une
batterie qui sont connectés en série entre eux.

Le problème de l'équilibrage en tension est illustré par la
figure 2A qui montre une batterie formée par une association série de quatre
cellules, CA1, CA2, CA3 et CA4, qui est connectée à un générateur de
30 courant pour être chargée. Idéalement, les quatre cellules devraient être
chargées à une même tension égale à 4V pour une tension globale de 16V
aux bornes de la batterie. En réalité il existe des phénomènes de dispersion,

liés aux conditions de fabrication, d'utilisation et de vieillissement des éléments, qui font que certains d'entre eux se chargent ou déchargent plus rapidement que d'autres, ou à des niveaux de tension différents. Ainsi, dans le cas de la figure 2A, les éléments CA1 et CA4 sont chargés à une tension inférieure à la valeur nominale de 4V, tandis que l'élément CA2 est chargé à une valeur sensiblement supérieure (4,3V), susceptible de l'endommager. Inversement, l'élément CA4 n'est chargé qu'à une tension de 3,8 V ; cet élément est donc susceptible d'être amené, après une utilisation prolongée, dans un état de décharge profonde – tout aussi préjudiciable – qui ne pourrait pas être détecté par la mesure de la seule tension aux bornes de l'association série. Ces problèmes sont particulièrement aigus dans le cas des batteries au lithium, qui sont très sensibles aux sous-charges et aux surcharges.

Un problème similaire se présente lors de l'association en série de cellules photovoltaïques, nécessaire pour élever le niveau de tension fourni par une cellule individuelle. Si l'une des cellules de l'association présente un défaut, ou simplement se trouve exposée à un flux lumineux moins intense que les autres (car sa surface est sale, ou elle se trouve ombragée), une différence de potentiel négative peut apparaître à ses bornes, ce qui réduit fortement le niveau de puissance généré par l'ensemble.

La figure 2B montre une telle association série de cellules photovoltaïques $PV_1 \dots PV_N$, représentées par des diodes en polarisation inversée. Un module de poursuite du point de puissance maximale (MPPT, de l'anglais « maximum power-point tracker »), connecté en série aux cellules, détermine l'intensité du courant circulant dans l'association série de manière à maximiser la puissance générée par effet photovoltaïque. Sur la figure 2C, la courbe CIV1 montre la caractéristique courant (I) – tension (V) des cellules photovoltaïques, exposées à un même flux lumineux ; la courbe CIV2 montre la caractéristique d'une cellule qui, à compter d'un instant T, se trouve exposée à un flux lumineux moindre, par exemple à cause d'une salissure.

Pour $t < T$, lorsque toutes les cellules sont éclairées de la même façon et suivent donc une même caractéristique CIV1, le module MPPT impose un courant I_{OPT1} à travers l'association série, et cela induit une

différence de potentiel V_{OPTI} aux bornes de chaque cellule, tels que $P_{OPTI} = n \cdot V_{OPTI} \cdot I_{OPTI} = n \cdot \max(V \cdot I)$.

A partir de l'instant $t=T$, l'une des cellules, PV_i , reçoit un flux lumineux moindre, et sa caractéristique devient celle de la courbe CIV2.

5 Si le courant à travers l'association série reste égal à I_{OPTI} , la différence de potentiel aux bornes de la cellule PV_i , ombragée ou sale, devient négative et égale à $-V_B$ (tension de rupture par avalanche). La perte de puissance est donc égale à $\Delta P_1 = -I_{OPTI}(V_{OPTI} + V_B)$.

10 Le module MPTT peut réagir à cette situation en diminuant le courant au niveau $I' = I_{OPTI} - \Delta I$, de sorte que la cellule PV_i redevienne productrice d'énergie. Toutefois, la puissance totale est réduite au niveau $P' = I' \cdot [(n-1) \cdot V_2 + V']$, avec une perte de puissance $\Delta P_2 = P' - P_{OPTI}$, V_2 étant la tension aux bornes des cellules PV_j ($j \neq i$) pour $I = I'$ et V' étant la tension aux bornes de la cellule PV_i pour $I = I'$.

15 En tout cas, il est important de noter qu'une simple diminution d'éclairage d'une seule cellule photovoltaïque conduit à une réduction sensible de la puissance générée par l'association série.

Pour pallier ces inconvénients des associations série d'éléments de génération et/ou d'accumulation d'énergie électrique – dont les
20 accumulateurs électrochimiques et les cellules photovoltaïques ne sont que des exemples non limitatifs – il est nécessaire de prévoir des systèmes d'équilibrage.

L'état de la technique comprend plusieurs systèmes d'équilibrage en tension pour des éléments de stockage électrochimique
25 d'énergie électrique.

Les systèmes d'équilibrage les plus communs sont de type passif, ou dissipatif. En phase de charge, par exemple, ces systèmes mesurent constamment ou périodiquement la différence de potentiel aux bornes de chacun des éléments connectés en série et dérivent vers une
30 résistance de dissipation le courant qui ne peut plus être absorbé par les éléments de moindre capacité. On comprend que ces systèmes conduisent à

des pertes d'énergie difficilement acceptables ; en cas de dispersion importante des caractéristiques des différents éléments électrochimiques, la taille des dissipateurs thermiques peut devenir prohibitive. La décharge de la batterie doit être arrêtée lorsque les éléments de plus faible capacité ont
5 atteint leur limite inférieure admissible de tension ; cela signifie que la capacité de stockage de la batterie est limitée par celle de ses plus mauvais éléments.

Il existe également des systèmes d'équilibrage actifs, qui redistribuent les courants à l'intérieur de la batterie au lieu de les dissiper.
10 Ainsi, en phase de charge, ces systèmes dévient le courant qui ne peut plus être absorbé par les éléments « faibles » vers les éléments « forts », dont la capacité de stockage n'est pas épuisée. En phase de décharge, ils prélèvent un courant supplémentaire des éléments « forts » pour compenser le manque de courant provenant des éléments « faibles ». Les principaux inconvénients
15 de ces systèmes sont leur complexité et leur coût élevé.

L'article de N. Kutkut et D. Divan « Dynamic equalization techniques for series battery stacks », 18th International Telecommunication Energy Conference, 1996 (INTELEC '96), pages 514 – 521, décrit plusieurs systèmes d'équilibrage actif.

20 Le plus simple de ces systèmes réalise des parcours de contournement de chaque élément, chacun desdits parcours comportant un interrupteur normalement ouvert. Lorsqu'un élément atteint son niveau de charge maximale, l'interrupteur se ferme, déviant le courant de charge vers un inducteur de stockage d'énergie. Au bout d'un certain temps l'interrupteur
25 s'ouvre à nouveau, et l'énergie stockée dans l'inducteur est fournie à l'élément de batterie qui se trouve immédiatement en aval dans l'association série. Puis le cycle recommence. L'inconvénient de ce système est qu'il ne permet qu'un transfert unidirectionnel d'énergie, des éléments « en amont » (proches de la cathode de la batterie, situés donc à un potentiel électrique plus élevé) vers
30 ceux « en aval » (proches de l'anode, situés donc à un potentiel électrique plus bas). Pour réaliser un transfert bidirectionnel, il est nécessaire de prévoir une structure plus complexe, formant un convertisseur de tension continu-

continu de type à demi-pont avec une charge inductive connectée entre chaque paire d'éléments de batterie adjacents dans l'association série.

Le document US 6,150,795 décrit un système d'équilibrage actif bidirectionnel, dans lequel de l'énergie peut être transférée entre des éléments de batterie adjacents par l'intermédiaire de coupleurs magnétiques respectifs. Comme dans les cas précédents, le transfert d'énergie se réalise uniquement « de proche en proche ».

D'autres systèmes, de type centralisé, réalisent un équilibrage global des éléments de batterie par l'intermédiaire d'un coupleur magnétique multi-enroulements, auquel tous lesdits éléments sont connectés par l'intermédiaire de circuits de commutation respectifs. Un exemple d'un tel système est fourni par le document US 6,873,134 – voir en particulier sa figure 11 qui est considérée constituer l'état de la technique le plus proche. Un tel système est illustré de manière simplifiée sur la figure 3. Les références $CA_1, CA_2 \dots CA_i \dots$ représentent différentes cellules d'accumulateurs connectées en série. La référence NM indique un noyau magnétique commun à toutes les cellules et servant de coupleur. Plusieurs enroulements, $W_1, W_2 \dots W_i \dots$, associés à des cellules d'accumulateurs respectives, sont réalisés sur le noyau NM. Plus précisément, ces enroulements sont des enroulements doubles avec deux contacts d'extrémité P_1, P_3 et un point milieu P_2 . Le point milieu P_2 de chaque enroulement est connecté au terminal positif (cathode) de la cellule correspondante ; les deux contacts d'extrémité P_1 et P_3 sont connectés à son terminal négatif (anode) par l'intermédiaire de transistors respectifs T_1, T_2 formant un onduleur à demi-pont. Les transistors T_1 des différentes cellules sont commandés de manière synchrone ; il en va de même, de manière complémentaire, pour les transistors T_2 . On comprend que le flux magnétique induit dans le noyau magnétique NM change de signe selon que les transistors T_1 soient conducteurs et les transistors T_2 non conducteurs, ou vice-versa. En activant alternativement les interrupteurs T_1 et T_2 on obtient un équilibrage « naturel » de la tension de charge des éléments de batterie : les éléments les plus chargés fournissent de l'énergie aux éléments les moins chargés par l'intermédiaire du noyau magnétique NM.

Le principal inconvénient du système d'équilibrage de la figure 3 est constitué par son encombrement, notamment à cause de l'utilisation d'un double enroulement avec point milieu pour chaque élément de batterie (accumulateur, cellule ou module) à équilibrer. Un autre inconvénient est que le système n'est pas en mesure de faire face à la défaillance d'une cellule.

Le problème de l'équilibrage ou compensation dans les associations séries de cellules photovoltaïques est connu en particulier de l'article de T. Shimizu et al. « Generation Control Circuit for Photovoltaic Modules », IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 16, No. 3, mai 2001. Cet article propose un premier circuit, basé sur l'utilisation d'un coupleur magnétique et réalisant un équilibrage de type centralisé. Ce circuit présente un encombrement relativement important. L'article divulgue également un deuxième circuit d'équilibrage, basé sur un hacheur multi-étage, dont la commande est relativement complexe.

L'article de T. Mishima et T. Ohnishi « Power Compensation System for Partially Shaded PV Array using Electric Double Layer Capacitors » 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 02), 5-8 Nov. 2002, Vol. 4, pages 3262- 3267, divulgue un circuit d'équilibrage alternatif pour associations séries de cellules photovoltaïques, exploitant un stockage capacitif de l'énergie électrique. Ce circuit est à la fois encombrant, car il repose sur l'utilisation de plusieurs bancs de condensateurs de capacité relativement importante, et complexe à commander.

L'invention vise à remédier – en totalité ou en partie – aux inconvénients précités de l'art antérieur.

Conformément à l'invention, ce but est atteint par un système d'équilibrage d'une association série d'éléments de génération et/ou de stockage d'énergie électrique, caractérisé en ce qu'il comporte : une pluralité d'onduleurs en pont complet, chacun desquels est constitué par deux bras d'onduleur connectés en parallèle entre deux ports d'extrémité de l'onduleur, chaque bras d'onduleur étant à son tour constitué par deux interrupteurs connectés en série par un point dit point milieu du bras ; une pluralité de

connecteurs pour connecter les deux ports d'extrémité de chaque onduleur en pont complet à un élément respectif de ladite association série ; et un coupleur magnétique formé par un noyau magnétique sur lequel est réalisée une pluralité d'enroulements, chacun desdits enroulements étant relié aux
5 points milieux des bras de l'un desdits onduleurs.

Par rapport au système de la figure 3, celui selon l'invention présente l'avantage de ne comporter qu'un enroulement simple – au lieu d'un enroulement double – pour chaque élément à équilibrer (cellule électrochimique, par exemple). Certes, cette simplification de la partie passive
10 du système s'accompagne d'une augmentation de la complexité de sa partie active : en effet, l'onduleur en demi-pont de l'art antérieur est remplacé par un onduleur en pont complet, comportant quatre interrupteurs (transistors) au lieu de deux. En outre, le pilotage de l'onduleur en pont complet de l'invention est plus délicat : en effet, il est nécessaire de veiller à ce que les deux
15 interrupteurs d'un même bras ne soient jamais fermés en même temps, ce qui court-circuiterait l'élément de batterie correspondant. Cependant, les éléments actifs peuvent être intégrés de manière efficace. Par conséquent, le système d'équilibrage de l'invention s'avère être sensiblement plus simple, moins coûteux et de plus petites dimensions que celui du document
20 US 6,873,134 précité.

Selon des modes de réalisation particuliers de l'invention :

- Un interrupteur de protection peut être relié en série à un port d'extrémité de chaque onduleur.
- En variante, lorsque chacun desdits éléments de la
25 batterie électrochimique est constitué par une association parallèle de sous éléments, un interrupteur de protection peut être relié en série entre chacun desdits sous-éléments et un port d'extrémité de l'onduleur correspondant.
- Un condensateur de filtrage peut être connecté en parallèle à chaque élément de ladite association série, entre les deux ports
30 d'extrémité de l'onduleur correspondant.

- Le système peut comporter également un moyen de pilotage pour piloter lesdits onduleurs de manière à réaliser un équilibrage desdits éléments.

5 - Le système peut comporter également un moyen de mesure pour mesurer la tension aux bornes de chaque élément de ladite association série, ledit moyen de pilotage étant adapté pour piloter lesdits onduleurs lorsque la différence maximale de tension entre deux éléments dépasse un premier seuil, et jusqu'à ce que ladite différence redescende au-dessous d'un deuxième seuil.

10 - Ledit moyen de mesure peut comporter un capteur de courant connecté en parallèle à un interrupteur d'un onduleur, le moyen de pilotage étant adapté pour piloter chaque onduleur de manière individuelle pour stocker de l'énergie sous forme magnétique dans le noyau du coupleur magnétique; puis pour piloter l'onduleur équipé dudit capteur de courant de
15 manière à déstocker ladite énergie sous la forme d'un courant électrique dirigé à travers ledit capteur.

- Ledit moyen de pilotage peut être adapté pour piloter une pluralité desdits onduleurs de manière synchrone, avec un même rapport cyclique sensiblement égal à 0,5, pour réaliser un « équilibrage naturel »
20 comme dans le système de la figure 3. Dans ce cas ledit moyen de pilotage peut être agencé pour piloter un seul desdits onduleurs, dit onduleur maître ; tandis que les interrupteurs des autres onduleurs du système, dits onduleurs esclaves, peuvent être pilotés par les tensions qui apparaissent aux bornes des enroulements respectifs à la suite du fonctionnement dudit onduleur
25 maître.

- En variante, ledit moyen de pilotage peut être adapté pour :

• piloter sur un demi-cycle un ou plusieurs onduleurs connectés à un ou plusieurs éléments de ladite association série présentant
30 une tension supérieure à une valeur de référence, de manière à stocker de l'énergie sous forme magnétique dans le noyau du coupleur magnétique ; puis

- piloter sur un demi-cycle le ou les onduleurs connectés à un ou plusieurs éléments de ladite association série présentant une tension plus faible, de manière à déstocker ladite énergie magnétique ; et

- répéter cycliquement les opérations précédentes, pour
5 réaliser un « équilibrage forcé », dans lequel de l'énergie est extraite d'un ou plusieurs élément de ladite association série pour être injecté de manière spécifique dans un ou plusieurs autres par l'intermédiaire du coupleur magnétique.

Comme expliqué ci-dessus, chaque onduleur peut être
10 intégré de manière monolithique sur une puce distincte. Chacune desdites puces peut intégrer également des moyens de commande rapprochée desdits interrupteurs, lesquels sont réalisés sous la forme de transistors de puissance. Avantageusement, lesdites puces peuvent être réalisées en technologie CMOS.

15 Un autre objet de l'invention est une association série d'éléments de stockage électrochimique d'énergie électrique ou de cellules photovoltaïques pourvue d'un système d'équilibrage tel que décrit ci-dessus.

D'autres caractéristiques, détails et avantages de l'invention ressortiront à la lecture de la description faite en référence aux dessins
20 annexés donnés à titre d'exemple, dans lesquels :

- la figure 1 montre la structure modulaire d'une batterie électrochimique ;

- la figure 2A illustre le problème de l'équilibrage de tension dans une association série d'éléments de stockage électrochimique
25 d'énergie ;

- les figures 2B et 2C illustrent la nécessité d'un équilibrage dans une association série de cellules photovoltaïques ;

- la figure 3 illustre un système d'équilibrage actif connu de l'art antérieur ;

- la figure 4 montre un schéma général d'un système
30 d'équilibrage actif selon l'invention ;

- les figures 5A, 5B et 6A, 6B illustrent le fonctionnement du système de la figure 4 en mode d'équilibrage dit « naturel » ;
- la figure 7 montre l'équilibrage progressif des potentiels de charge de trois cellules électrochimiques au moyen du système de la figure 4 ;
- les figures 8A et 8B illustrent le fonctionnement du système de la figure 4 en mode d'équilibrage dit « forcé » ;
- les figures 9A et 9B montrent comment peut être réalisée une mesure de la tension aux bornes de chaque élément de batterie ;
- les figures 10A et 10B illustrent deux différents schémas de protection permettant de gérer le cas où un élément de batterie, ou un sous-élément de cet élément, serait défaillant ;
- la figure 11 montre un schéma de principe d'une puce de puissance utilisée dans un système d'équilibrage actif selon l'invention ;
- la figure 12 montre un schéma d'un circuit de commande rapproché d'un transistor de puissance ;
- la figure 13 illustre un mode de réalisation particulier de l'invention, dans lequel les commandes de commutation des onduleurs sont transmises par l'intermédiaire du coupleur magnétique ; et
- les figures 14 et 15 illustrent l'utilisation du système de l'invention pour l'équilibrage d'une association série de cellules photovoltaïques.

Comme le montre la figure 4, un système d'équilibrage selon l'invention associe à chaque élément de batterie CA_1, CA_2, \dots, CA_N un module formé par un onduleur en pont complet et un enroulement de coupleur magnétique.

Chaque onduleur en pont complet $OPC_1, OPC_2, \dots, OPC_N$ est constitué par l'association parallèle de deux bras de ponts, dont les ports d'extrémité sont reliés aux terminaux de l'élément de batterie correspondant par des connecteurs respectifs ; chaque bras de pont, à son tour, est constitué de deux interrupteurs en série. Dans le mode de réalisation considéré ici, les bras de pont sont réalisés en technologie C-MOS :

l'interrupteur « supérieur » (destiné à être connecté au terminal positif de l'élément de batterie) de chaque bras est un P-MOS, tandis que son interrupteur « inférieur » (destiné à être connecté au terminal négatif de l'élément de batterie) est un N-MOS. Sur la figure « T_{hnm} » et « T_{bnm} »
 5 signifient, respectivement transistor supérieur (« haut ») / inférieur (« bas ») du bras n ($n=1$ ou 2) de l'onduleur associé à l'élément de batterie m ($m=1$ à N). Les diodes de corps des transistors sont indiquées par « D_{hnm} ».

Les points milieux P_{1i} , P_{2i} des bras (« i » étant l'indice de l'onduleur) sont reliés à des enroulements respectifs W_i réalisés sur un noyau
 10 magnétique commun NM qui réalise un couplage magnétique entre tous les enroulements. Le noyau magnétique NM et les enroulements W_i forment un coupleur magnétique reliant entre eux tous les modules.

La référence L_m identifie l'inductance magnétisante du coupleur.

15 Un condensateur $C_1 \dots C_N$ est connecté en parallèle à chaque élément de batterie. Sa fonction est principalement de filtrer les composantes à hautes fréquence créées par les découpages des grandeurs électriques (tensions, courants) provoqués par la commutation des transistors. Comme cela sera discuté plus loin, il sert également à assurer la continuité de
 20 l'alimentation de l'onduleur et de l'électronique associée.

Les figures 5A et 5B illustrent le fonctionnement du système de la figure 4 en régime d'équilibrage « naturel ». Dans ce régime, tous les ondulateurs sont pilotés de manière synchrone, par un signal de commande à modulation de largeur d'impulsions avec un rapport cyclique égal à 0,5, ayant
 25 de préférence une fréquence supérieure à 20 kHz (c'est à dire supérieure au seuil de l'audible, pour ne pas engendrer des nuisances sonores).

Dans une première moitié du cycle (figure 5A) l'interrupteur inférieur du premier bras et l'interrupteur supérieur du deuxième bras de chaque ondulateur sont fermés ; dans la deuxième moitié du cycle (figure 5A),
 30 ce sont l'interrupteur supérieur du premier bras et l'interrupteur inférieur du deuxième qui sont fermés. Les figures 5A et 5B montrent seulement deux

éléments de batterie et les onduleurs respectifs : l'élément CA_i , qui est le plus chargé ; et l'élément CA_j , qui est chargé à un niveau inférieur de tension.

L'élément CA_i , qui est le plus chargé, tend à se décharger à travers l'enroulement W_i ; le courant qui parcourt l'enroulement engendre un flux magnétique variable dans le noyau magnétique NM, qui à son tour engendre un courant dans l'enroulement W_j . Comme le montre la figure 5A, ce courant circule dans un sens opposé à celui qui parcourt W_i , et tend à charger CA_j . Le transfert d'énergie est alors limité par les impédances séparant les deux éléments CA_i et CA_j : résistances série des enroulements, résistances à l'état passant des transistors. Les transistors sont dimensionnés sur la base du courant d'équilibrage maximal que l'on souhaite autoriser. En variante, il est possible de connecter une résistance discrète en série : l'avantage est que cela permet d'utiliser des puces « standard » pour des applications différentes, seules les résistances discrètes étant changées d'une application à l'autre.

Le problème est qu'une partie du courant qui parcourt l'enroulement W_i charge l'inductance magnétisante L_m du coupleur magnétique formé par le noyau magnétique et les différents enroulements (ce courant n'a pas été représenté sur les figures 5a et 5B pour ne pas les surcharger). Pour éviter que cette inductance parvienne à saturation, au bout d'un certain temps (quelques dizaines de microsecondes) il est nécessaire d'inverser la polarisation des enroulements afin d'assurer que la tension moyenne à leurs bornes soit nulle : on ouvre les interrupteurs qui étaient fermés lors de la première moitié du cycle et on ferme ceux qui étaient ouverts. Le sens des courants s'inverse, comme illustré sur la figure 5B, mais l'élément CA_j continue à se charger aux dépens de CA_i . En outre, l'énergie stockée dans l'inductance magnétisante L_m du coupleur est libérée, puis stockée à nouveau sous la forme d'un courant en sens inverse.

Ce qui a été dit pour CA_j vaut également pour tous les éléments chargés à une tension inférieure à celle de CA_i .

Sur la figure 6A, les lignes I_{W_i} , I_{W_j} et I_{L_m} montrent l'évolution dans le temps (échelle en millisecondes ms) des courants qui parcourent les

deux enroulements W_i , W_j et l'inductance magnétisante L_m , respectivement. On peut voir sur cette figure une atténuation progressive des oscillations de courant, traduisant l'établissement d'un équilibre entre les deux éléments de stockage CA_i et CA_j .

5 Sur la figure 6B, les lignes I_{CA_i} , I_{CA_j} montrent l'évolution dans le temps (échelle en millisecondes ms) des courants qui parcourent les deux éléments de batterie, CA_i , CA_j (signe négatif pour un courant de décharge, positif pour un courant de chargement). Ces courants convergent lentement vers zéro, ce qui traduit également l'établissement d'un équilibre de charge.

10 La figure 7 montre l'équilibrage naturel de trois cellules d'accumulateurs : CA_1 , initialement chargée à 4,1 V ; CA_2 , initialement chargée à 3,8V et CA_3 , initialement chargée à 3,7V. On peut voir que les tensions des trois cellules convergent à une même valeur d'environ 3,85V en moins de 7 ms.

15 L'équilibrage « naturel » ne concerne pas nécessairement l'ensemble des éléments de batterie : il est possible de piloter seulement un sous-ensemble d'onduleurs, laissant les autres en configuration ouverte, de manière à ce qu'ils découplent les éléments de batterie correspondant du système d'équilibrage. Dans ce cas, l'équilibrage ne se produit qu'entre les
20 éléments de batterie associés aux onduleurs actifs.

Il existe aussi un autre mode de fonctionnement, que l'on peut appeler « forcé », qui réalise un transfert indirect d'énergie avec stockage temporaire par l'inductance magnétisante L_m . Dans ce mode de fonctionnement on opère en deux temps. Dans le premier demi-cycle, seul un
25 onduleur (ou plusieurs onduleurs associés à des éléments chargés à des niveaux de tensions proches entre eux, avec des écarts de quelques millivolts au plus) est piloté, tandis que les autres sont inactifs et isolent les éléments de batterie respectifs du coupleur magnétique. L'onduleur qui est piloté est associé à un élément de batterie qui doit être déchargé partiellement pour
30 transférer son excès de charge à d'autres éléments. Deux interrupteurs de l'onduleur sont fermés, de manière à permettre le passage d'un courant électrique à travers l'enroulement (par exemple : l'interrupteur supérieur du

deuxième bras et l'interrupteur inférieur du premier bras). Comme les autres enroulements du coupleur magnétique sont en circuit ouvert, ce courant sert entièrement à charger l'inductance magnétisante L_m .

Dans le deuxième demi-cycle, les interrupteurs de l'onduleur
5 qui était piloté en précédence sont ouverts, tandis que les onduleurs associés à des éléments de batterie destinés à recevoir un supplément de charge sont pilotés de manière à permettre le déstockage de l'énergie accumulée par l'inductance magnétisante lors du premier demi-cycle.

Les figures 8A et 8B montrent très schématiquement un
10 transfert forcé d'énergie de l'élément CA_1 vers l'élément CA_3 en passant par un stockage temporaire d'énergie dans l'inductance magnétisante L_m .

Comme expliqué plus haut, dans le premier demi-cycle (figure 8A), seuls les interrupteurs T_{h11} et T_{b12} du premier onduleur OPC_1 sont fermés ; l'élément CA_1 se décharge alors partiellement à travers
15 l'enroulement W_1 . Cela induit un courant I_{Lm} dans l'inductance magnétisante L_m , qui croit linéairement dans le temps. Pendant ce premier demi-cycle, tous les autres interrupteurs des autres onduleurs sont ouverts. Ainsi, aucun courant ne peut circuler dans les enroulements $W_2, W_3...$ malgré la différence de potentiel (égale à V_{CA1}) qui apparaît à leurs bornes par couplage
20 magnétique.

Puis, dans le deuxième demi-cycle (figure 8B) les interrupteurs T_{h11} et T_{b12} de OPC_1 s'ouvrent, tandis que les interrupteurs T_{h32} et T_{b32} de l'onduleur OPC_3 se ferment. Le courant qui parcourt l'inductance magnétisante L_m commence à décroître linéairement, ce qui induit une
25 inversion de la différence de potentiel aux bornes des enroulements $W_1, W_2, W_3...$ Etant donné que les interrupteurs T_{h32} et T_{b32} sont fermés, un courant peut parcourir l'enroulement W_3 ; on peut vérifier que ce courant tend à charger l'élément CA_3 . Ainsi, une partie de l'énergie stockée dans CA_1 a été transférée à L_m pendant le premier demi-cycle, puis à CA_3 lors du deuxième
30 demi-cycle.

Puis le cycle recommence.

L'équilibrage forcé est plus complexe à mettre en œuvre que l'équilibrage naturel. En outre, si la commande n'est pas effectuée correctement, il est susceptible de provoquer un « sur-équilibrage », c'est à dire une surcharge du ou des éléments qui étaient initialement sous-chargés.

5 Son point de force est représenté par sa flexibilité : en effet, il permet de transférer de l'énergie d'un élément de batterie déterminé vers un ou plusieurs autres, d'une manière contrôlée. En outre, dans des cas particuliers un « sur-équilibrage » peut être intentionnel, par exemple si on souhaite « anticiper » sur la faiblesse d'un élément en phase de décharge (en
10 la surchargeant – sans excéder les limites de sécurité – pour compenser le fait que sa décharge sera plus rapide de celle des autres éléments).

En revanche, l'équilibrage forcé ne peut pas fonctionner si la différence de potentiel entre les éléments les plus chargés et les moins chargés est trop élevée, typiquement supérieure à 1,4 V environ. En effet, il
15 ne faut pas oublier que les onduleurs ne sont pas constitués par des interrupteurs idéaux, mais par des transistors de puissance pourvus d'une diode de corps antiparallèle. Si $V_{CA1} - V_{CA3}$ est supérieure à 1,4V environ (deux fois la tension d'activation de ces diodes), elles deviennent passantes de manière intempestive, ce qui est incompatible avec le schéma de
20 fonctionnement décrit ci-dessus.

L'équilibrage forcé a été décrit en référence à un exemple mettant en œuvre seulement un élément donneur (CA_1) et un élément récepteur (CA_2) d'énergie. Cependant, il est également possible d'utiliser plusieurs éléments donneurs – à conditions qu'ils soient tous chargés au
25 même niveau de tension – et plusieurs éléments récepteurs – même chargés à des niveaux de tension différents. L'équilibrage en tension des éléments connectés en série d'une batterie nécessite d'effectuer, en continu ou périodiquement, des mesures de la tension aux bornes des différents éléments. Cela est clairement indispensable dans le cas de l'équilibrage
30 forcé, mais est aussi pratiquement nécessaire dans le cas de l'équilibrage naturel. En effet, l'équilibrage naturel introduit inévitablement des pertes d'énergie : par conséquent, il est préférable que les onduleurs soient pilotés

seulement lorsque cela est nécessaire. Concrètement, l'équilibrage naturel est activé lorsque la différence de potentiel entre l'élément le plus chargé et l'élément le moins chargé dépasse un premier seuil ; une fois que cette différence est descendue au-dessous d'un deuxième seuil (inférieur au premier : hystérésis) l'équilibrage s'arrête.

Conformément à l'art antérieur, ces mesures sont effectuées en utilisant un capteur de tension pour chaque élément de batterie. Une telle solution augmente la complexité et le coût du système. Se pose en outre le problème de la dispersion des erreurs de mesure introduites par les différents capteurs.

L'utilisation, en tant que moyen d'équilibrage, d'un onduleur en pont complet permet de pallier ces inconvénients. Comme illustré sur les figures 9A et 9B, afin d'effectuer une mesure de tension sur tous les éléments de la batterie il suffit de prévoir que l'un des onduleurs soit pourvu d'un capteur de courant CC connecté en parallèle à l'un de ses interrupteurs ; dans l'exemple de la figure, il s'agit de l'interrupteur T_{bN2} , c'est à dire de l'interrupteur bas du deuxième bras du N-ème onduleur, associé à la cellule CA_N dont le terminal négatif est connecté à la terre (la cellule « inférieure » de la batterie). On suppose de vouloir mesurer la tension de chargement de la cellule CA_i . Pour ce faire (figure 9A), on ferme les interrupteurs T_{hi2} et T_{bi1} de l'onduleur associé à cette cellule : un courant I_L circule alors à travers cet onduleur et charge l'inductance magnétisante L_m (tous les autres interrupteurs du système sont ouverts). La quantité d'énergie stockée dans cette inductance dépend de la tension aux bornes de CA_i . Ensuite, on ouvre les interrupteurs T_{hi2} et T_{bi1} et on ferme l'interrupteur T_{bN1} du N-ème onduleur. Comme illustré sur la figure 9B, l'énergie stockée dans l'inductance magnétisante L_m se décharge à travers cet interrupteur et le capteur de courant CC. Le courant mesuré par le capteur est proportionnel à l'énergie stockée par l'inductance magnétisante, et donc à la tension aux bornes de CA_i . L'opération est répétée pour toutes les cellules (y comprise CA_N) : comme toutes les mesures sont effectuées par un même capteur, la détermination des différences de niveau de charge des cellules est beaucoup

plus fiable. En outre, le seul composant spécifiquement dédié à la mesure est le capteur CC, qui peut être facilement intégré avec l'onduleur correspondant.

L'inconvénient de cette technique est que les mesures sont effectuées de façon sérielle, et pas en même temps. Mais comme chaque
5 mesure individuelle peut ne prendre que quelques microsecondes, cela n'est pas rédhibitoire pour l'application considérée.

Il peut arriver qu'un élément de batterie soit défaillant : dans ce cas, son potentiel reste bas ; tout courant injecté dans un tel élément est dissipé au lieu de servir pour le charger. Une telle défaillance peut être
10 catastrophique en présence d'un équilibrage en tension, en particulier « naturel » : en effet, l'élément défaillant absorbe toute l'énergie mise en jeu par l'équilibrage. Il est donc nécessaire de prévoir des moyens d'ilotage des éléments, au cas où ils deviendraient défaillants.

La figure 10A montre un premier schéma d'ilotage, dans
15 lequel un interrupteur T_{pi} (transistor N-MOS) est relié en série à un port d'extrémité de chaque onduleur. L'ouverture de cet interrupteur isole la cellule CA_i du coupleur magnétique.

Dans le schéma de la figure 10B, l'élément de batterie (cellule) est composé par une pluralité de sous-éléments (accumulateurs) en
20 parallèle : CA_i^1 , CA_i^2 , CA_i^3 , chacun desquels est connecté en série à un interrupteur de protection respectif : T_{pi}^1 , T_{pi}^2 , T_{pi}^3 . De cette manière, la défaillance d'un seul accumulateur ne provoque pas la perte de toute la cellule.

Les interrupteurs de protection sont avantageusement des
25 transistors de type N, préférés aux transistors de type P en raison de leur moindre résistance à l'état passant.

Comme cela a été mentionné plus haut, la partie active (constituée par des transistors) d'un système selon l'invention peut être intégrée en un nombre limité de puces. Si on utilise une technologie C-MOS
30 conventionnelle, chaque onduleur peut être intégré de manière monolithique, avec son électronique de pilotage et le ou les interrupteurs de protections associés. Comme les tensions de référence de chaque onduleur sont

différentes, si on souhaite réaliser une intégration monolithique de plusieurs onduleurs il est nécessaire d'avoir recours à une technologie de type SOI (silicium sur isolant, en anglais « Silicon On Insulator »).

L'article de O. Deleage, J.C. Crébier, Y. Lembeye et R. Rolland, « Conception d'un onduleur CMOS avec commande intégrée pour micro-convertisseur DC/DC », Colloque EPF'2008, Tours, juillet 2008 décrit un onduleur à pont complet, intégré de manière monolithique en technologie C-MOS, qui peut convenir à la mise en œuvre de l'invention. Comme l'explique cet article, la commutation des bras de pont C-MOS est critique dans les applications de puissance. En effet, si aucune précaution n'est prise, pendant la commutation, les deux transistors MOSFET de puissance deviennent conducteurs en même temps et court-circuitent l'élément de batterie auquel ils sont connectés. Pour éviter ce problème, il est nécessaire : d'une part, d'augmenter la vitesse de commutation des transistors de puissance ; d'autre part, de décaler dans le temps leurs commutations. Cela est obtenu à l'aide d'un circuit de commande rapprochée qui peut être intégré sur la même puce que l'onduleur.

La figure 11 montre le schéma de principe d'une telle puce. Le cœur de la puce est constitué par les quatre transistors de puissance T_{h1} , T_{h2} , T_{b1} , T_{b2} formant les deux bras de pont de l'onduleur. Comme expliqué ci-dessus, chaque bras de pont est associé à un circuit de commande rapprochée, CR1, CR2, dont la structure est montrée sur la figure 12. Les transistors $T_1 - T_{11}$ forment trois étages d'amplifications du signal de commande v_c ; ces transistors présentent des dimensions croissantes en se rapprochant de l'élément de puissance, et leur caractéristiques sont déterminées de manière à fournir le meilleur compromis entre perte par commutation et surface de silicium utilisée. Les transistors $T_{12} - T_{17}$ forment le circuit de décalage de commande : la résistance à l'état passant de T_{18} est beaucoup plus grande (par exemple d'un facteur 10) de celle de T_{20} ; de même, la résistance à l'état passant de T_{19} est beaucoup plus grande que celle de T_{17} . Dans ces conditions, lorsque v_c passe d'une valeur basse à une valeur haute, v_2 suit plus rapidement que v_1 : par conséquent, le P-MOS

formant l'interrupteur « supérieur » du bras de pont cesse de conduire avant que le N-MOS formant l'interrupteur « inférieur » ne devienne conducteur. Inversement, lorsque v_c retourne à une valeur basse, v_1 suit plus rapidement que v_2 : par conséquent le N-MOS cesse de conduire avant que le P-MOS ne devienne conducteur. On garantit ainsi un « temps mort » à chaque commutation, au cours duquel aucun transistor du bras de pont ne conduit.

L'interrupteur de protection T_p est également pourvu d'un circuit de commande rapprochée CTP, beaucoup plus simple.

Le bloc MRC constitue un module de réception de signaux de commande ou de configuration, qui reçoit des signaux de commande « de haut niveau » d'un module de commande extérieur MC et les convertit en signaux de pilotage des circuits CTP, CR1, CR2. Il faut tenir compte du fait que le module de commande MC doit piloter plusieurs puces qui se trouvent à des potentiels de référence différents (en fonction de leur position dans l'association série d'éléments de batterie). Le module MRC peut donc être réalisé sous la forme d'un classique translateur de niveau, ou d'un coupleur optique.

La puce dans son ensemble est alimentée par l'élément de batterie CA qu'elle gère, le condensateur C assurant la continuité de cette alimentation (en plus de sa fonction de filtrage). Sur la figure 11, les lignes épaisses représentent les conducteurs transmettant de la puissance électrique, les lignes fines ceux qui ne transmettent que des signaux.

Le module de commande MC peut être réalisé sous la forme d'une puce dédiée, ou être co-intégré avec l'une des puces réalisant les onduleurs.

Dans un mode de réalisation particulièrement avantageux, un seul onduleur (« onduleur maître ») est piloté directement par un module de commande ; les autres onduleurs (« esclaves ») reçoivent les commandes de commutation par l'intermédiaire du coupleur magnétique qui transfère la puissance. Ce principe est illustré par la figure 13, où l'on peut voir que les grilles des transistors T_{h1} , T_{b1} du premier bras d'un onduleur « esclave » sont connectées à une première borne de l'enroulement W et les grilles des

transistors T_{h2} , T_{b2} du deuxième bras sont connectées à une deuxième borne de ce même enroulement W .

On suppose que l'onduleur « maître » du système soit piloté de telle manière que la deuxième borne de l'enroulement W de l'onduleur esclave se trouve à un potentiel positif (sur la figure, les potentiels positifs sont représentés par un point). Ce potentiel positif est transmis aux grilles de T_{h1} et T_{b1} . Par conséquent T_{h1} devient conducteur alors que T_{b1} ne conduit pas. De même, le potentiel négatif de la première borne de l'onduleur est transmis aux grilles de T_{h2} , qui ne conduit pas, et de T_{b12} , qui conduit. Sur la figure, les transistors qui conduisent sont entourés par un cercle. L'onduleur « esclave » se trouve donc dans la même configuration que l'onduleur « maître ».

Lorsque l'onduleur « maître » commute, l'onduleur « esclave » suit, avec un léger retard.

On peut observer que l'onduleur « esclave » se comporte essentiellement comme un redresseur synchrone.

Ce mode de réalisation est avantageux en ce qu'il élimine la nécessité d'un circuit de transmission de commande dédié. Par contre, il ne permet que le fonctionnement en régime naturel.

Il faut comprendre que la figure 13 n'est qu'un schéma de principe : en réalité les grilles des transistors de puissance seront connectés aux bornes de l'enroulement W seulement par l'intermédiaire de circuits de commande rapprochés respectifs, et cela pour les raisons expliquées plus haut.

Jusqu'ici seul a été considéré le cas de l'équilibrage en tension d'une association série d'accumulateurs, ou cellules d'accumulateurs. La figure 14 montre un système d'équilibrage selon l'invention, associé à une connexion série de cellules photovoltaïques $PV_1...PV_N$, présentant chacune un condensateur $C_1...C_N$ en parallèle. Plus généralement, les éléments $PV_1...PV_N$ peuvent être des cellules photovoltaïques individuelles ou des associations série et/ou parallèle de telles cellules. A la limite, il peut s'agir de

panneaux photovoltaïques dans un système de génération photovoltaïque de grandes dimensions.

Comme dans l'exemple de la figure 2B, un module MPPT fixe la valeur I_{OPTI} du courant circulant dans les cellules, de manière à maximiser la puissance générée. On suppose que la cellule PV_2 soit ombragée ou défectueuse, de telle manière que sa caractéristique tension-courant corresponde à la courbe CIV2 sur la figure 2C.

Les onduleurs en pont complet OPC_1 et OPC_2 - OPC_N fonctionnent en mode « naturel » pour transférer de l'énergie vers l'onduleur OPC_2 ; ce dernier « soutient » la cellule ombragée ou défectueuse PV_2 fournissant un courant ΔI . Ainsi, cette cellule n'a plus qu'à fournir un courant $I_2 = I_{OPTI} - \Delta I$, qui lui permet de se comporter en générateur, avec une tension $V_2 < V_{OPTI}$ à ses bornes. De cette manière, la puissance générée par l'ensemble de N cellules vaut (en supposant un rendement idéal de l'équilibre) : $[(N-1)V_{OPTI} \cdot I_{OPTI}] + V_2 \cdot (I_2 - \Delta I)$. Autrement dit, la présence d'une cellule défectueuse ou ombragée n'affecte plus la performance des autres cellules, qui peuvent continuer à fournir leur puissance maximale $V_{OPTI} \cdot I_{OPTI}$.

Comme dans le cas de l'équilibrage en tension des éléments de stockage d'énergie électrique, l'équilibrage des éléments de génération $PV_1 - PV_N$ peut être « forcé », et non naturel.

Il est également possible d'appliquer aux associations série d'éléments de génération d'énergie électrique la méthode de mesure de tension décrite ci-dessus à l'aide des figures 9A et 9B. La mesure de la différence de potentiel aux bornes des éléments $PV_1 - PV_N$ peut servir pour déterminer quand il est nécessaire de déclencher un équilibrage naturel ou pour piloter un équilibrage forcé.

En cas de défaillance grave, une cellule PV_2 peut se comporter comme un circuit ouvert. En l'absence de circuit d'équilibrage, toute l'association de cellules photovoltaïque devient alors inutilisable. Comme le montre la figure 15, la simple présence d'un circuit d'équilibrage selon l'invention – même inactif – permet d'éviter cette perte totale de

puissance : en effet, les diodes de corps D_{h21} , D_{b21} , D_{h22} , D_{b22} des transistors de l'onduleur OPC_2 fournissent des voies de contournement de la cellule défailante. Ainsi, la perte de puissance générée sera limitée à : $\Delta P = (V_{OPTI} \cdot I_{OPTI}) - (2V_d \cdot I_{OPTI})$, V_d étant la chute de tension aux bornes de chacune des deux diodes de corps en série. Cette perte de puissance peut être réduite ultérieurement en prévoyant une diode D connectée entre les ports de chaque onduleur (en trait pointillé sur la figure). Cette diode peut, elle aussi, être intégrée.

L'utilisation d'interrupteurs d'îlotage, tels que les transistors T_{pi} et T_{pi}^1 , T_{pi}^2 , T_{pi}^3 des figures 10A et 10B est également opportune pour faire face au cas où un ou plusieurs des éléments $PV_1 - PV_N$ seraient court-circuités.

REVENDEICATIONS

1. Système d'équilibrage d'une association série d'éléments de génération et/ou de stockage d'énergie électrique, caractérisé en ce qu'il comporte:

- 5 - une pluralité d'onduleurs en pont complet (OPC_1, OPC_2, OPC_N), chacun desquels est constitué par deux bras d'onduleur connectés en parallèle entre deux ports d'extrémité de l'onduleur, chaque bras d'onduleur étant à son tour constitué par deux interrupteurs ($T_{h1}, T_{b1}; T_{h2}, T_{b2}$) connectés en série par un point dit point milieu (P_{11}, P_{12}) du bras;
- 10 - une pluralité de connecteurs pour connecter les deux ports d'extrémité de chaque onduleur en pont complet à un élément respectif ($CA_1, CA_2, CA_N, PV_1, PV_2, PV_N$) de ladite association série; et
- un coupleur magnétique (NM) formé par un noyau magnétique sur lequel est réalisée une pluralité d'enroulements (W_1, W_2, W_N),
- 15 chacun desdits enroulements étant relié aux points milieux des bras de l'un desdits onduleurs.

2. Système d'équilibrage selon la revendication 1 dans lequel un interrupteur de protection (T_{pi}) est relié en série à un port d'extrémité de chaque onduleur.

20 3. Système d'équilibrage selon la revendication 1 dans lequel chacun desdits éléments de ladite association série est constitué par une association parallèle de sous-éléments, et dans lequel un interrupteur de protection ($T_{pi}^1, T_{pi}^2, T_{pi}^3$) est relié en série entre chacun desdits sous-éléments et un port d'extrémité de l'onduleur correspondant.

25 4. Système d'équilibrage selon l'une des revendications précédentes, dans lequel un condensateur de filtrage (C_1, C_2, C_N) est connecté en parallèle à chaque élément de ladite association série, entre les deux ports d'extrémité de l'onduleur correspondant.

30 5. Système d'équilibrage selon l'une des revendications précédentes comportant également un moyen de pilotage (MP) pour piloter lesdits onduleurs de manière à réaliser un équilibrage desdits éléments.

6. Système d'équilibrage selon la revendication 5, comportant également un moyen de mesure (CC) pour mesurer la tension aux bornes de chaque élément de ladite association série, ledit moyen de pilotage étant adapté pour piloter lesdits onduleurs lorsque la différence maximale de tension entre deux éléments dépasse un premier seuil, et jusqu'à ce que ladite différence redescende au-dessous d'un deuxième seuil.

7. Système d'équilibrage selon la revendication 6 dans lequel ledit moyen de mesure comporte un capteur de courant (CC) connecté en parallèle à un interrupteur d'un onduleur, le moyen de pilotage étant adapté pour piloter chaque onduleur de manière individuelle pour stocker de l'énergie sous forme magnétique dans le noyau du coupleur magnétique; puis pour piloter l'onduleur équipé dudit capteur de courant de manière à déstocker ladite énergie sous la forme d'un courant électrique dirigé à travers ledit capteur.

8. Système d'équilibrage selon l'une des revendications 5 à 7, dans lequel ledit moyen de pilotage est adapté pour piloter une pluralité desdits onduleurs de manière synchrone, avec un même rapport cyclique sensiblement égal à 0,5.

9. Système d'équilibrage selon la revendication 8 dans lequel :

- ledit moyen de pilotage est agencé pour piloter un seul desdits onduleurs, dit onduleur maître ;
- les interrupteurs des autres onduleurs du système, dits onduleurs esclaves, sont pilotés par les tensions qui apparaissent aux bornes des enroulements respectifs à la suite du fonctionnement dudit onduleur maître.

10. Système d'équilibrage selon l'une des revendications 5 à 7, dans lequel ledit moyen de pilotage est adapté pour:

- piloter sur un demi-cycle un ou plusieurs onduleurs connectés à un ou plusieurs éléments de ladite association série présentant une tension supérieure à une valeur de référence, de manière à stocker de l'énergie sous forme magnétique dans le noyau du coupleur magnétique; puis

- piloter sur un demi-cycle le ou les onduleurs connectés à un ou plusieurs éléments de ladite association série présentant une tension plus faible, de manière à déstocker ladite énergie magnétique; et

- répéter cycliquement les opérations précédentes.

5 11. Système d'équilibrage selon l'une des revendications précédentes, dans lequel chaque onduleur est intégré de manière monolithique sur une puce distincte.

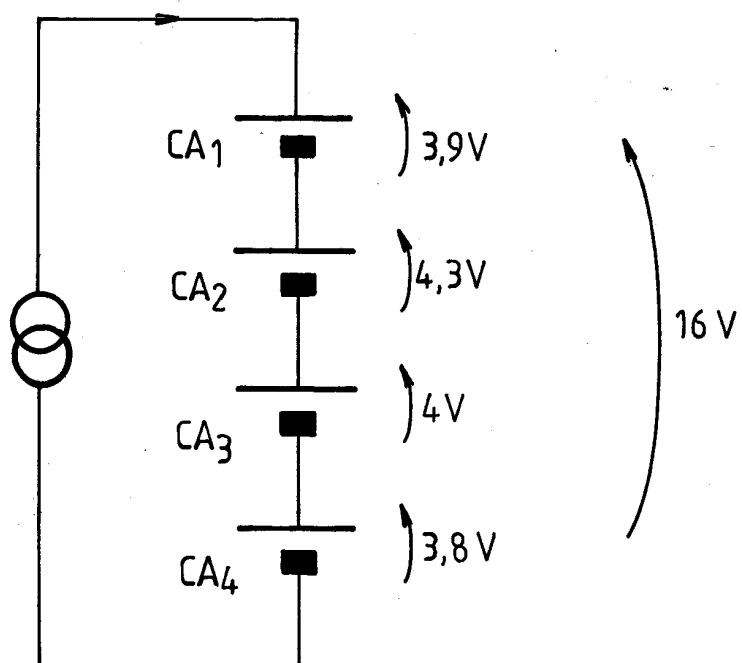
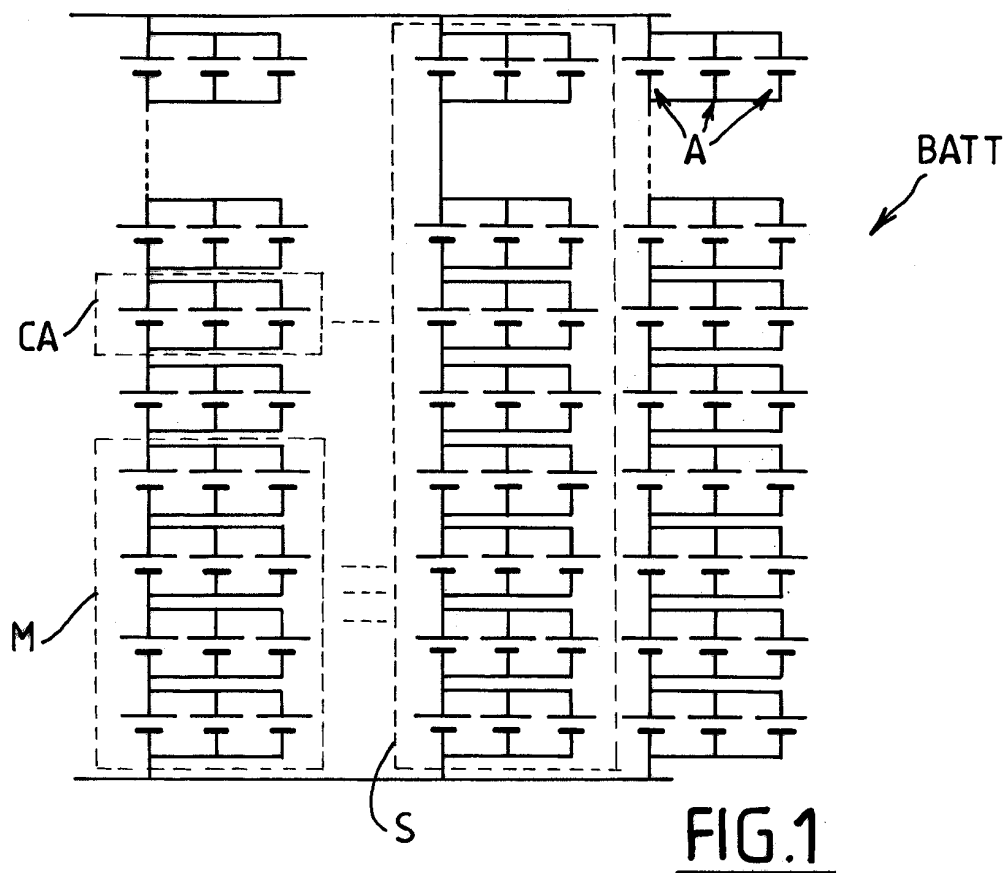
10 12. Système d'équilibrage selon la revendication 11 dans lequel chacune desdites puces intègre également des moyens de commande rapprochée (CR1, CR2, CTP) desdits interrupteurs, qui sont réalisés sous la forme de transistors de puissance.

13. Système d'équilibrage selon l'une des revendications 11 ou 12, dans lequel lesdites puces sont réalisées en technologie CMOS.

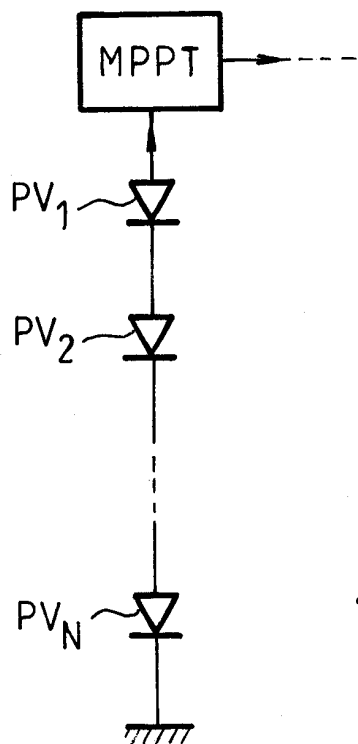
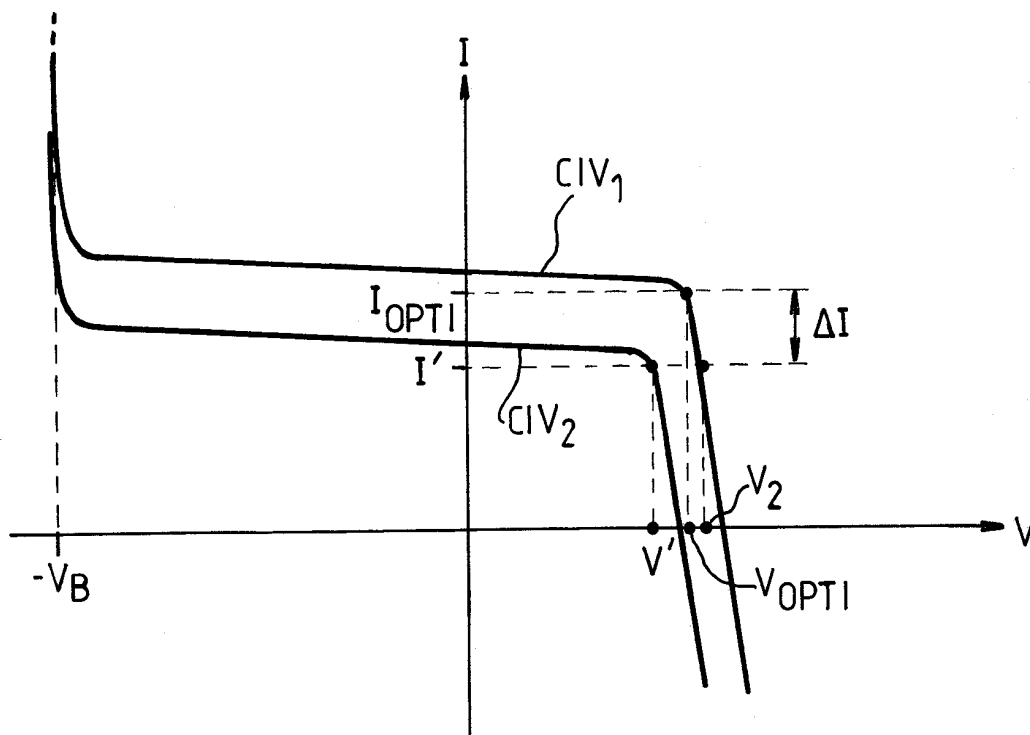
15 14. Association série d'éléments de stockage électrochimique d'énergie électrique (CA_1 , CA_2 , CA_N) comportant un système d'équilibrage en tension selon l'une des revendications précédentes.

15 15. Association série de cellules photovoltaïques (PV_1 , PV_2 , PV_N) comportant un système d'équilibrage selon l'une des revendications 1 à 13.

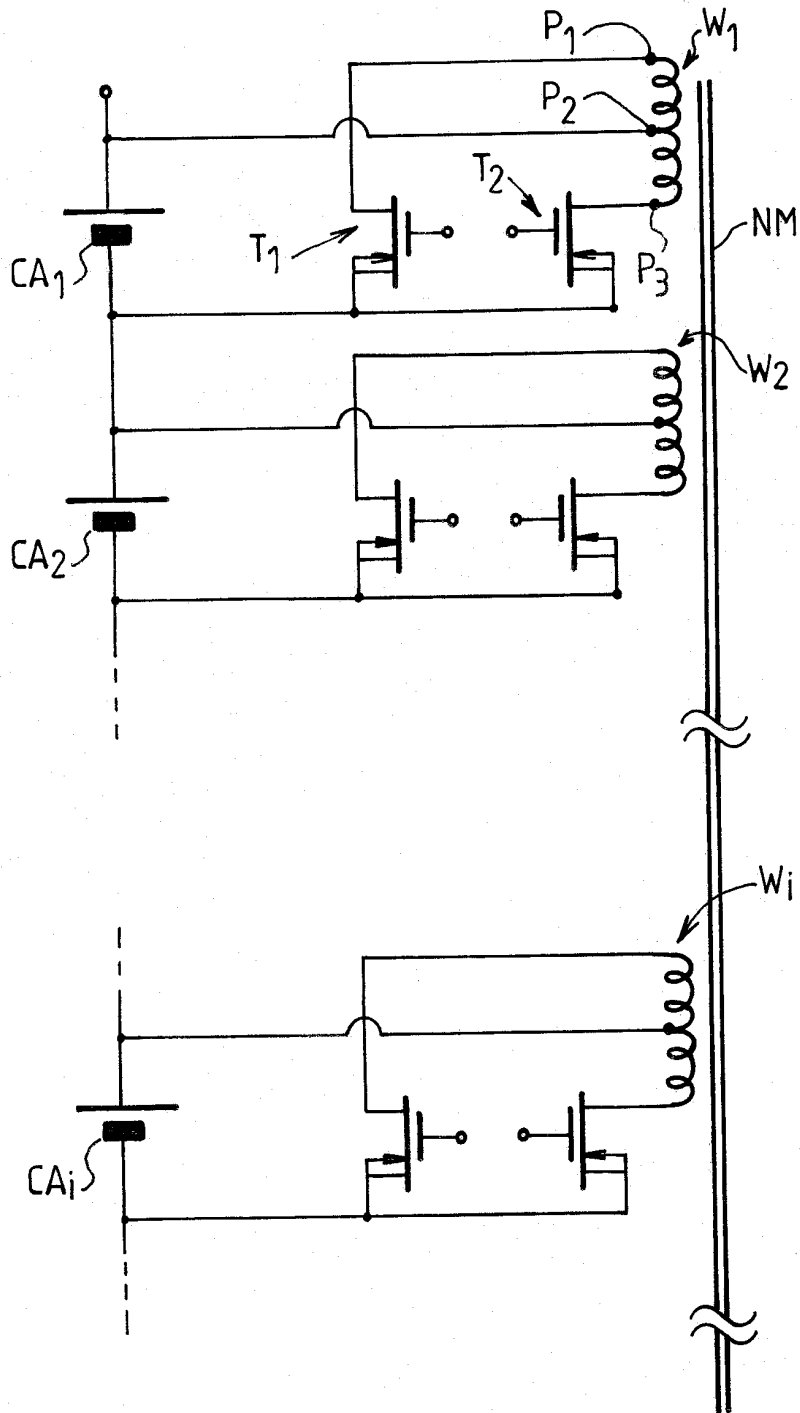
1 / 11



2/11

FIG. 2BFIG. 2C

3 / 11

FIG. 3

4/11

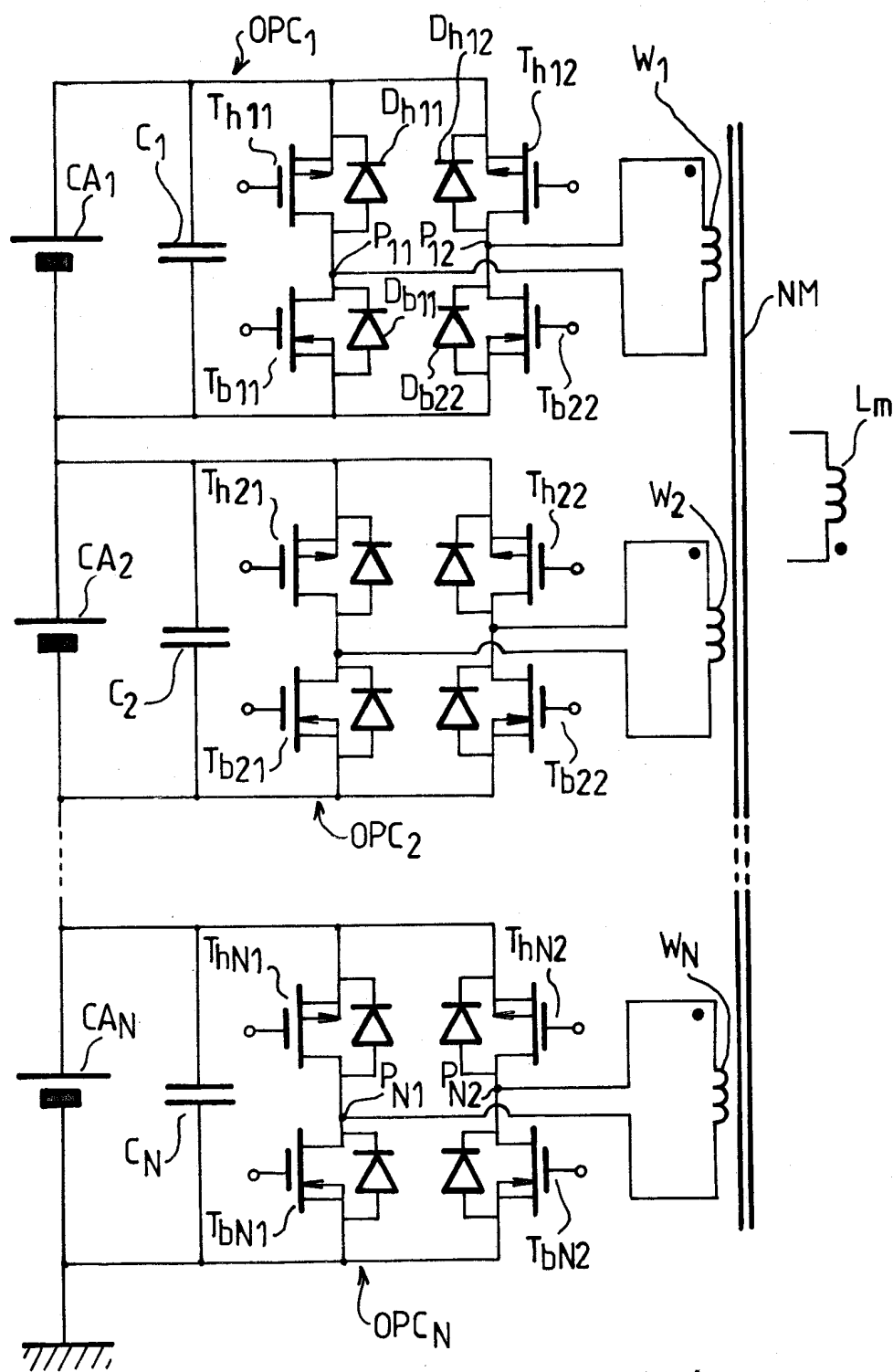
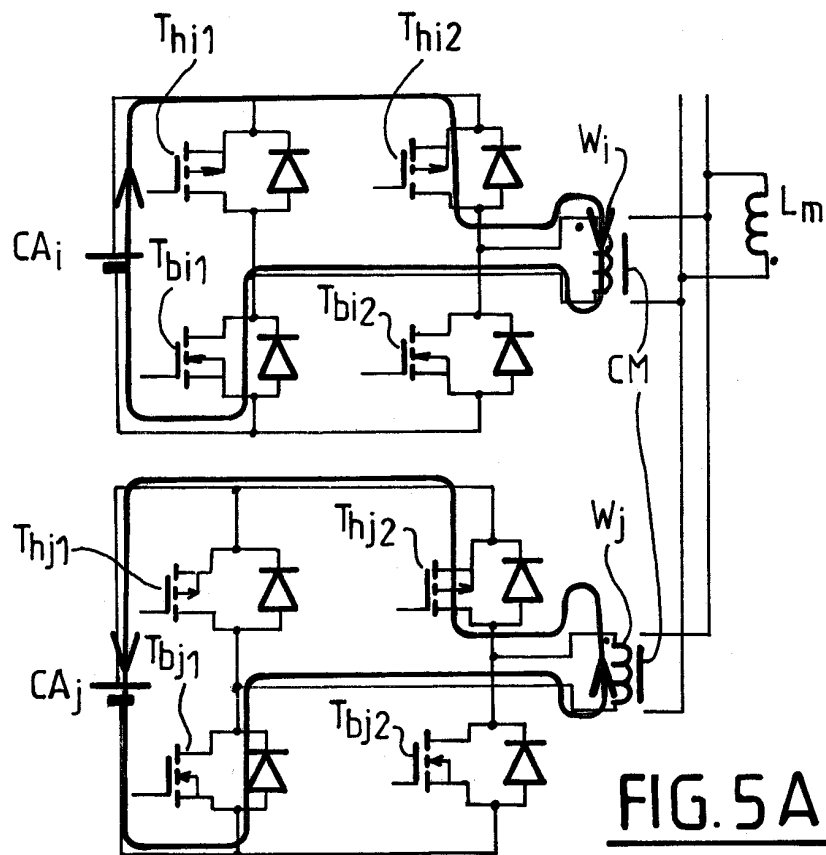
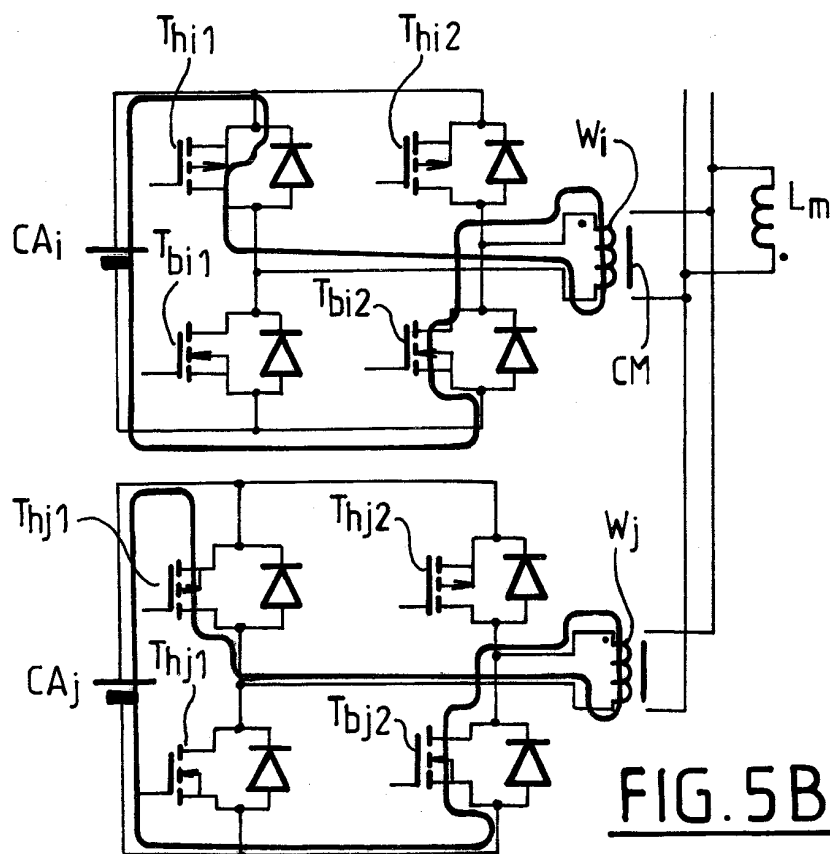
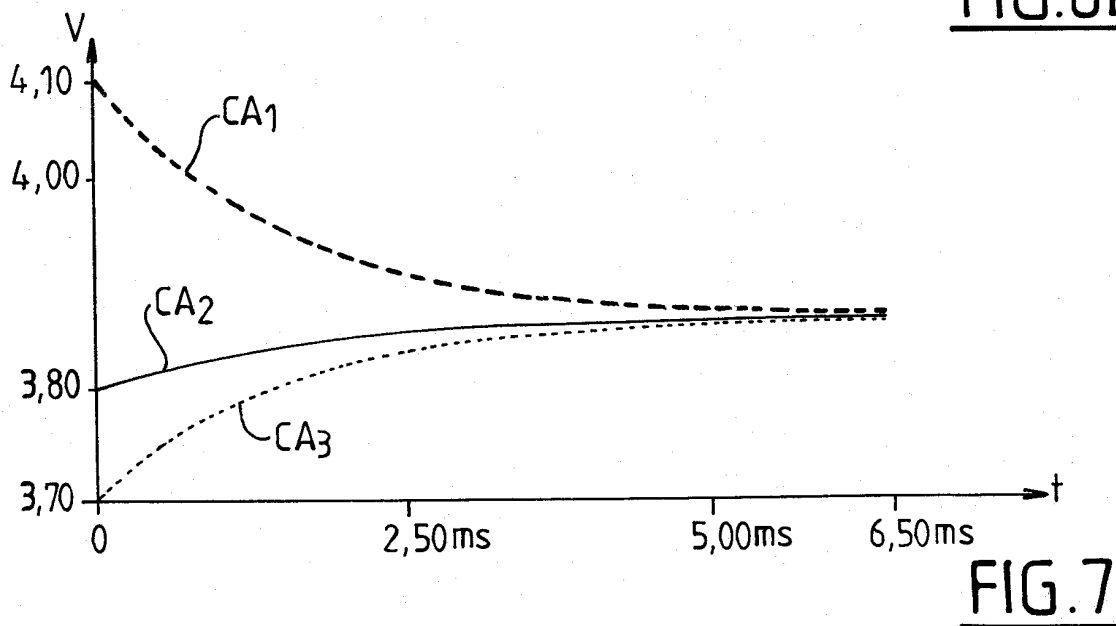
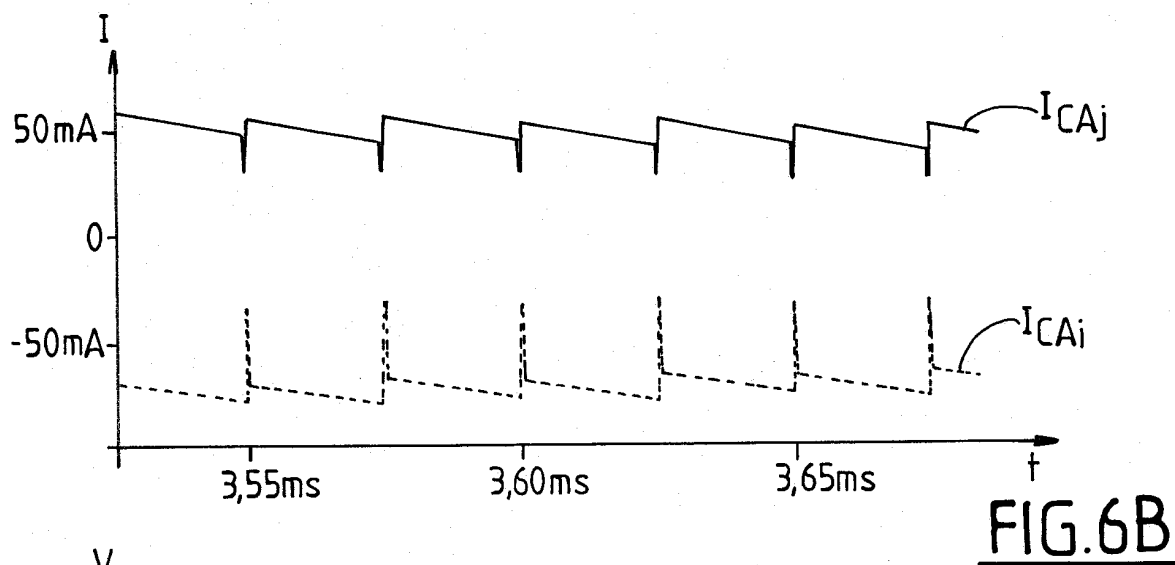
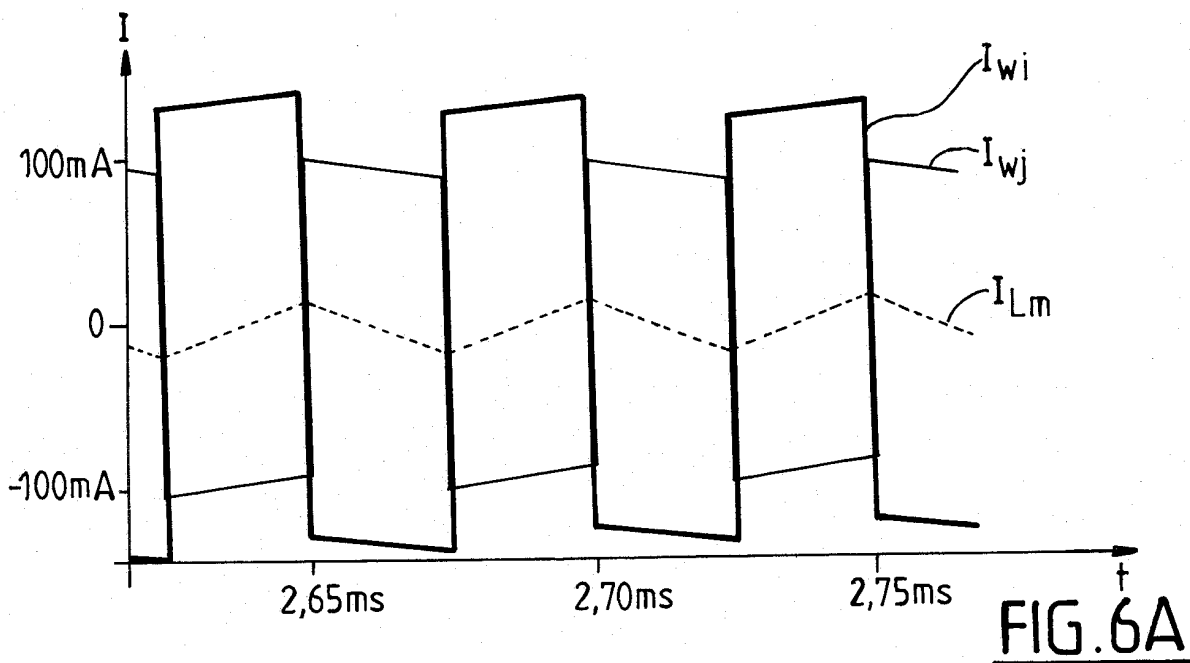


FIG. 4

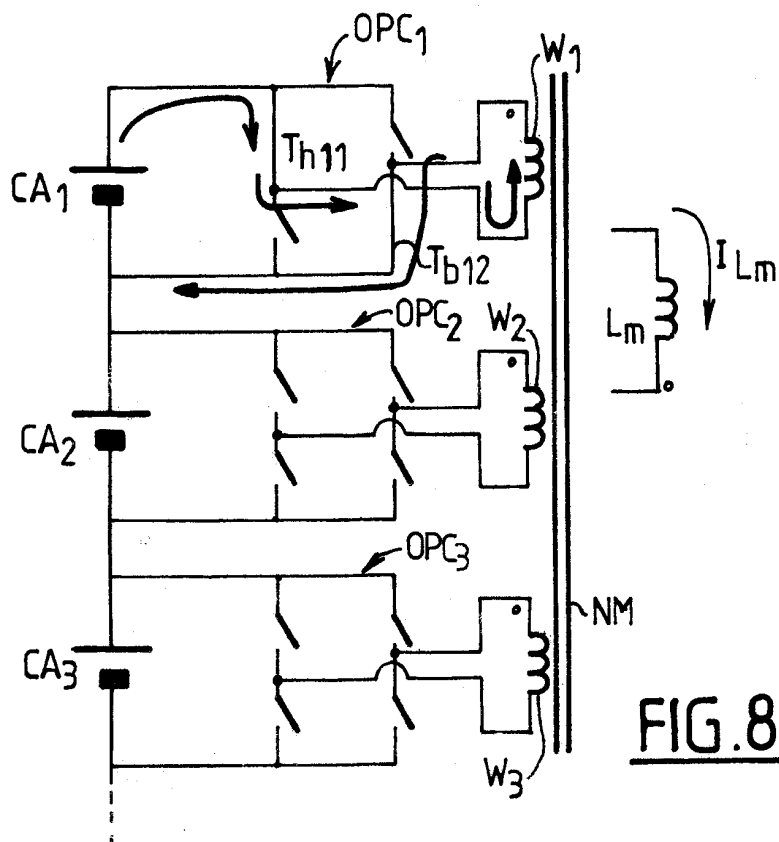
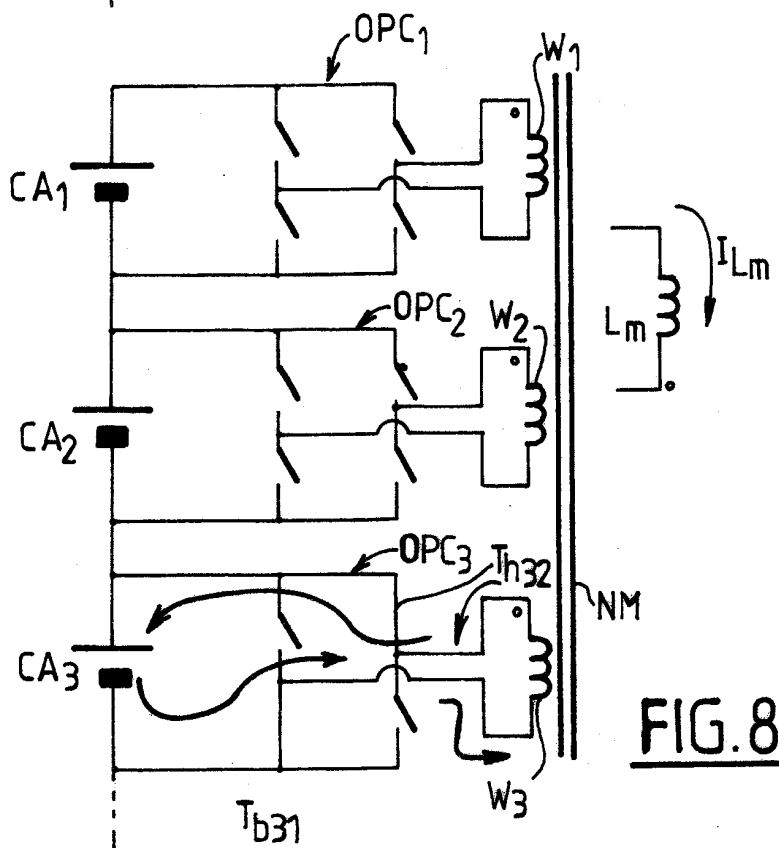
5/11

FIG. 5AFIG. 5B

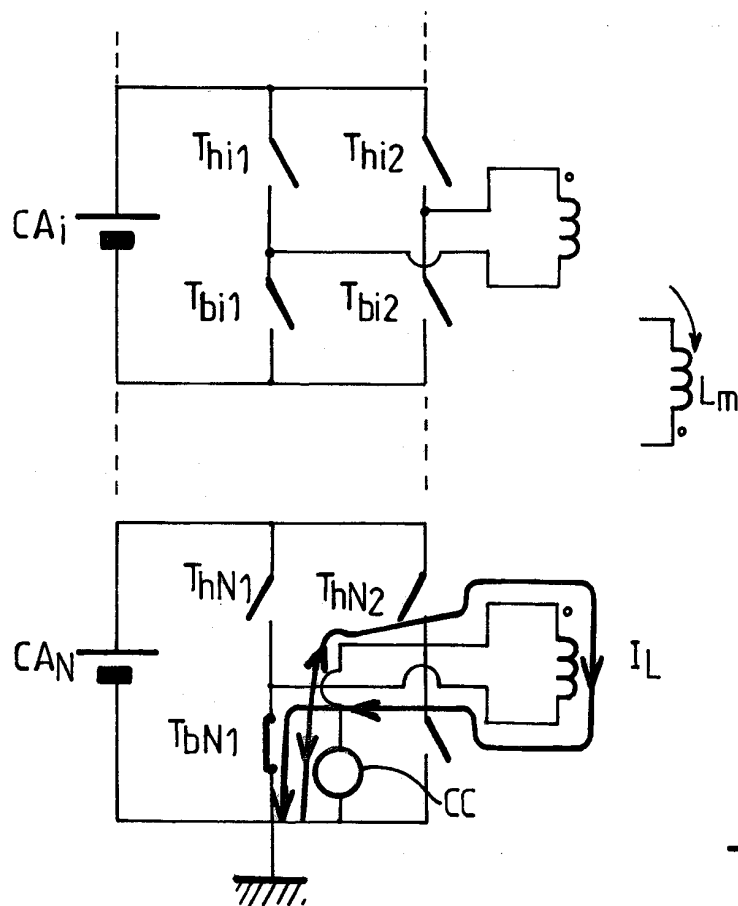
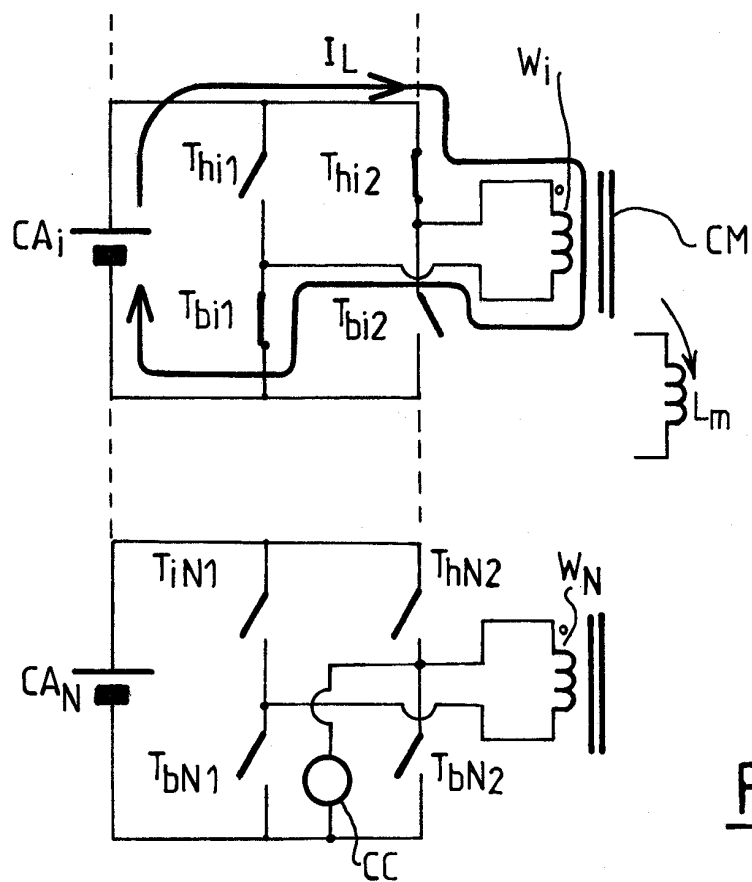
6/11



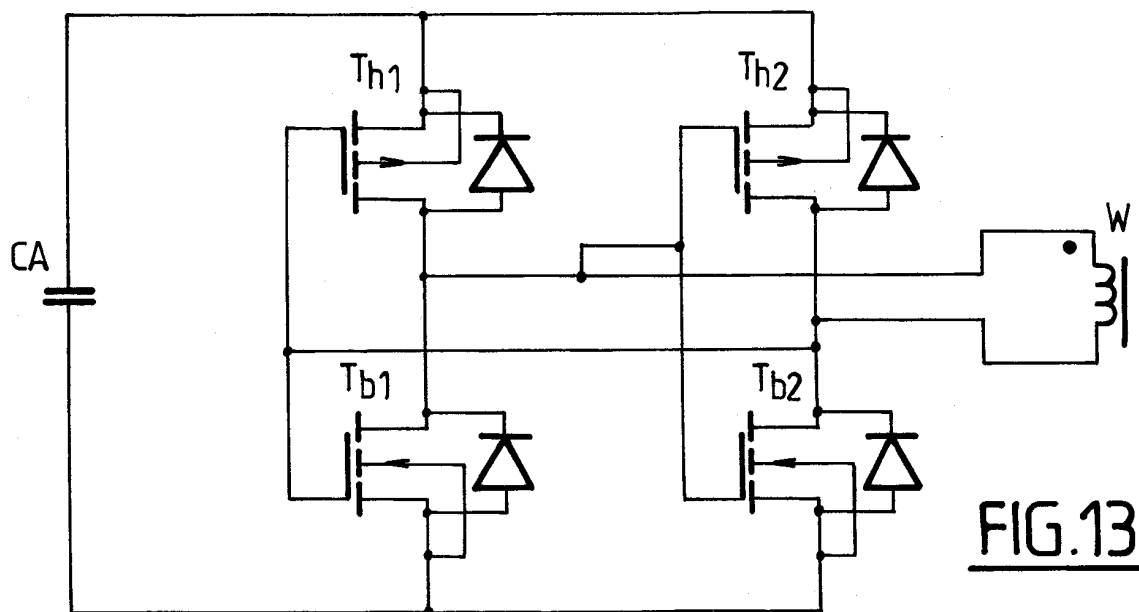
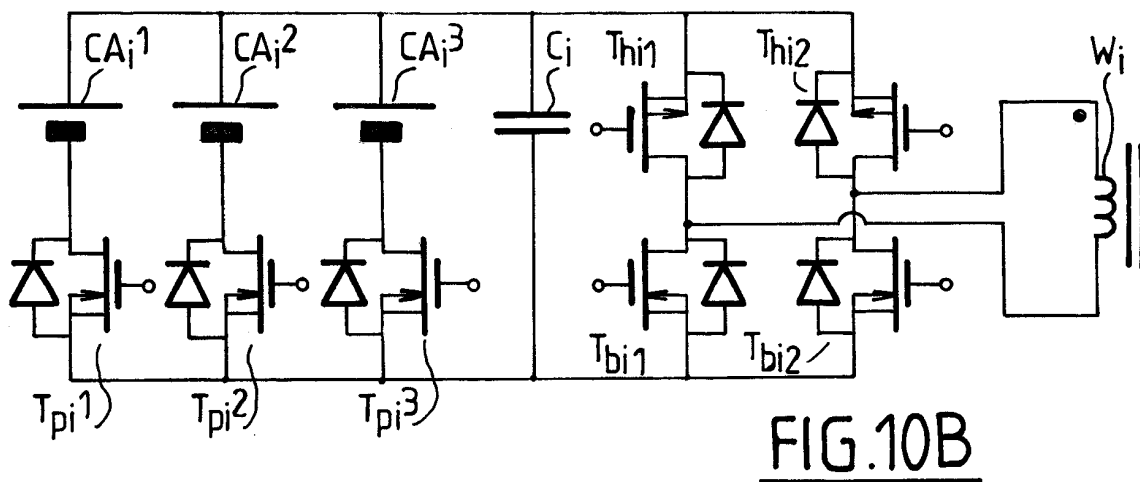
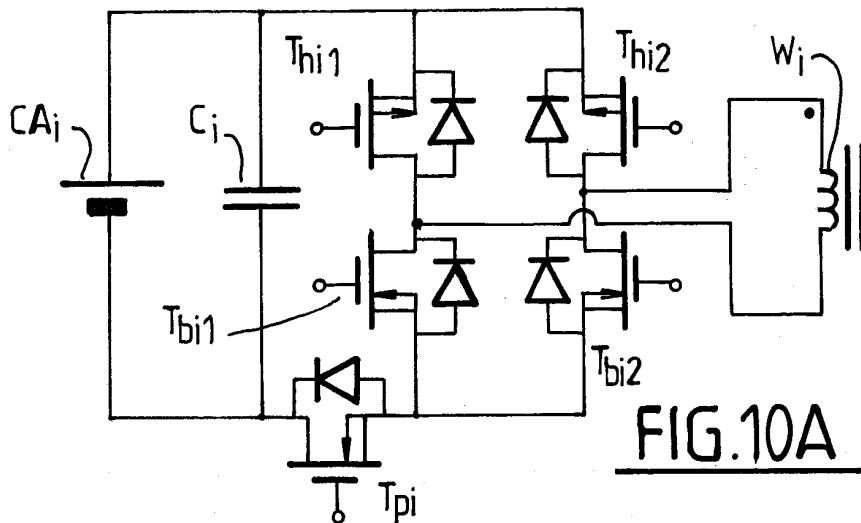
7/11

FIG. 8AFIG. 8B

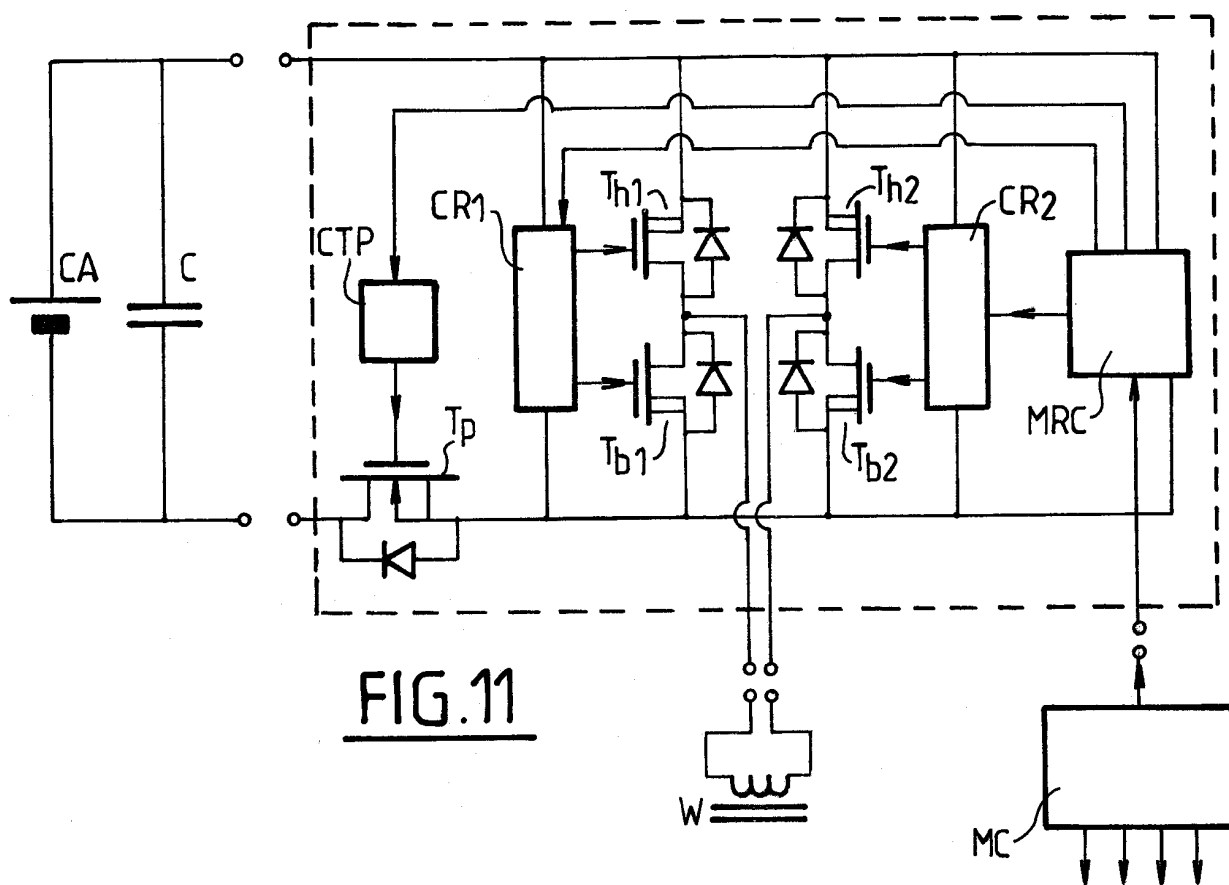
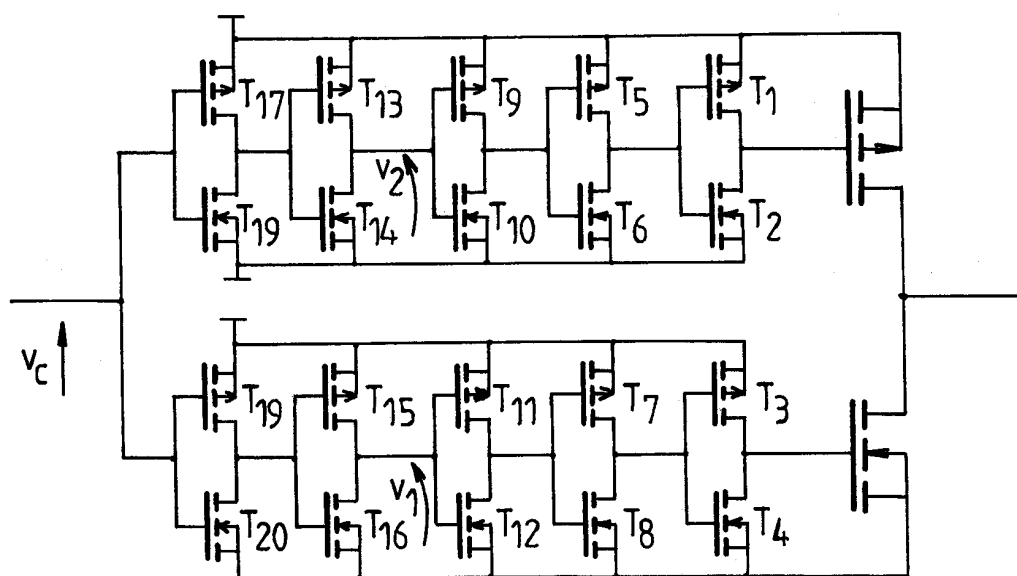
8/11



9/11



10/11

FIG. 11FIG. 12

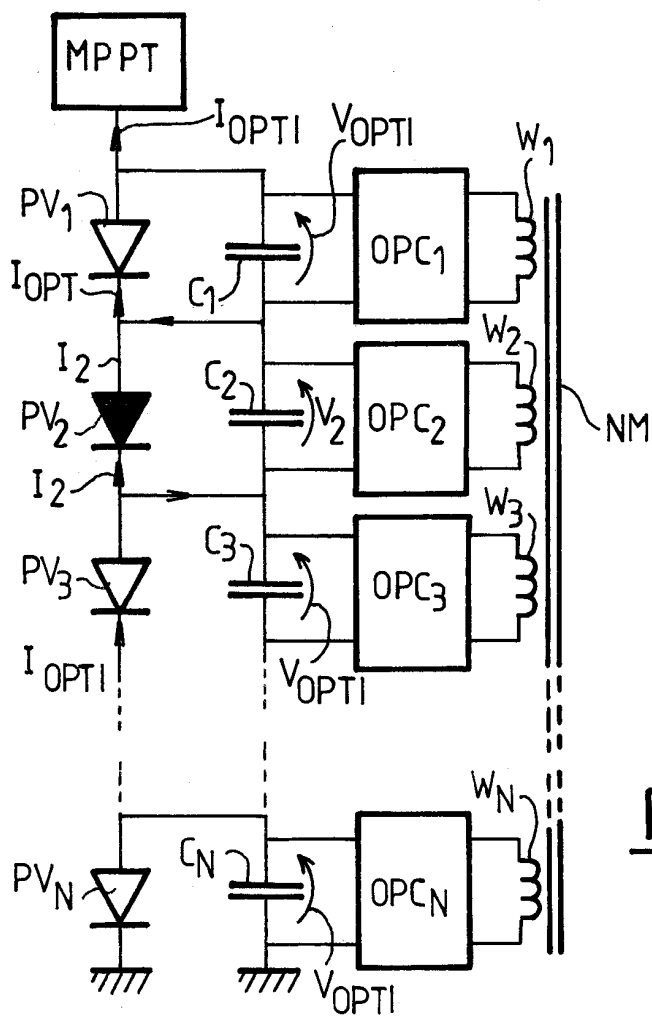


FIG.14

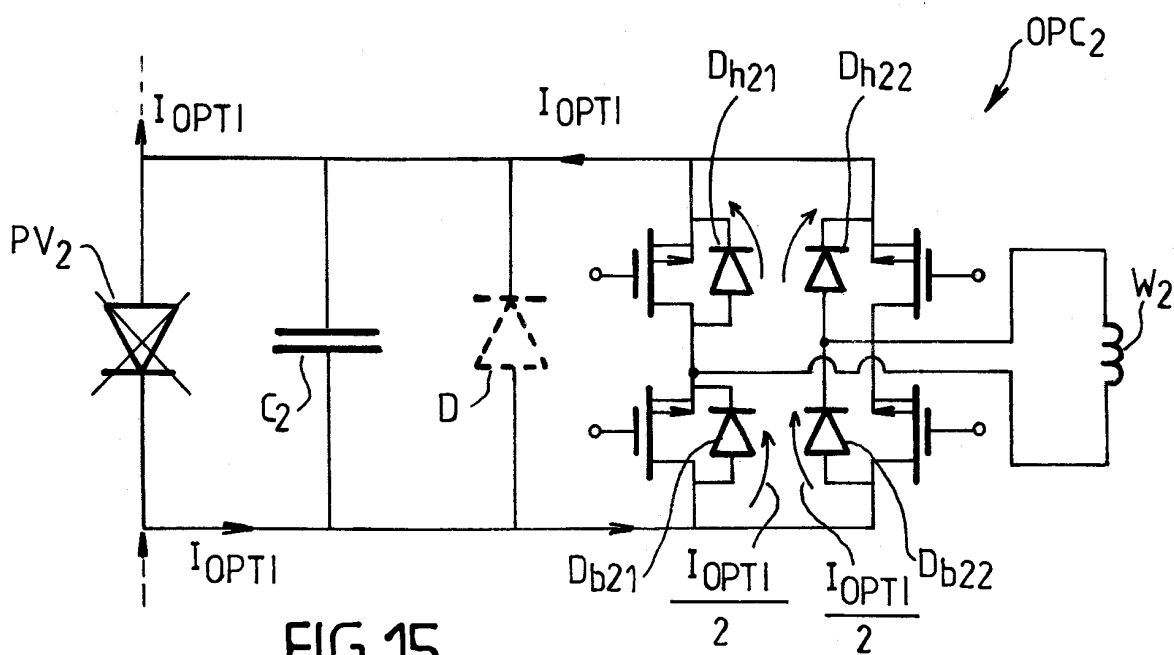


FIG.15



**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

N° d'enregistrement
national

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

FA 732775
FR 1000671

| DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS | | Revendication(s) concernée(s) | Classement attribué à l'invention par l'INPI |
|---|---|--|---|
| Catégorie | Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes | | |
| Y,D | US 6 873 134 B2 (CANTER STANLEY [US] ET AL) 29 mars 2005 (2005-03-29) * colonne 14, ligne 31 - colonne 15, ligne 20; figure 11 * | 1,4,5,8, 10,14,15 | H02J7/00 H01L31/00 H01M10/42 |
| Y | RAY RIDLEY: "THE NINE MOST USEFUL POWER TOPOLOGIES", INTERNET CITATION, 1 octobre 2007 (2007-10-01), pages 15-18, XP002486528, Extrait de l'Internet: URL:http://www.powersystemsdesign.com/design_tips_oct07.pdf * page 17; figures 5,6 * | 1,4,5,8, 10,14,15 | |
| Y,D | TOSHIHISA SHIMIZU ET AL: "Generation Control Circuit for Photovoltaic Modules", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 16, no. 3, 1 mai 2001 (2001-05-01), XP011043562, ISSN: 0885-8993 * abrégé; figure 8 * | 4,15 | |
| | | | DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) |
| | | | H02J H01M H01L |
| | | Date d'achèvement de la recherche | Examineur |
| | | 6 décembre 2010 | Braccini, Roberto |
| CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS | | T : théorie ou principe à la base de l'invention | |
| X : particulièrement pertinent à lui seul | | E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. | |
| Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie | | D : cité dans la demande | |
| A : arrière-plan technologique | | L : cité pour d'autres raisons | |
| O : divulgation non-écrite | | | |
| P : document intercalaire | | & : membre de la même famille, document correspondant | |

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 1000671 FA 732775**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.

Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du **06-12-2010**

Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

| Document brevet cité au rapport de recherche | | Date de publication | Membre(s) de la famille de brevet(s) | Date de publication |
|---|----|------------------------|---|------------------------|
| US 6873134 | B2 | 29-03-2005 | US 2005017682 A1 | 27-01-2005 |
| ----- | | | | |