



- (51) Classification internationale des brevets :
H02J 7/00 (2006.01) *H02J 7/10* (2006.01)
H02J 7/35 (2006.01) *H01M 10/44* (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/IB2011/051390
- (22) Date de dépôt international :
31 mars 2011 (31.03.2011)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
10/01358 31 mars 2010 (31.03.2010) FR
- (71) Déposants (*pour tous les États désignés sauf US*) :
INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE [FR/FR]; 46 Avenue Félix Viallet, F-38000 Grenoble (FR). CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE [FR/FR]; 3, rue Michel Ange, F-75016 Paris (FR).
- (72) Inventeurs; et
- (75) Inventeurs/Déposants (*pour US seulement*) : CREBIER, Jean-Christophe [FR/FR]; 615 chemin des Sources, F-38690 Bevenais (FR). CHUREAU, Alexandre [FR/FR]; 2 Place Vaucanson, F-38000 Grenoble (FR).
- (74) Mandataires : CABINET ORES et al.; 36, rue de St Pétersbourg, F-75008 Paris (FR).
- (81) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible*) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : SYSTEM FOR MANAGING A SERIES ASSOCIATION OF ELEMENTS FOR GENERATING OR STORING ELECTRICAL ENERGY BASED ON A PLURALITY OF CURRENT-INVERTER ARMS

(54) Titre : SYSTÈME DE GESTION D'UNE ASSOCIATION SÉRIE D'ÉLÉMENTS DE GÉNÉRATION OU DE STOCKAGE D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE BASE SUR UNE PLURALITÉ DE BRAS D'ONDULEUR DE COURANT.

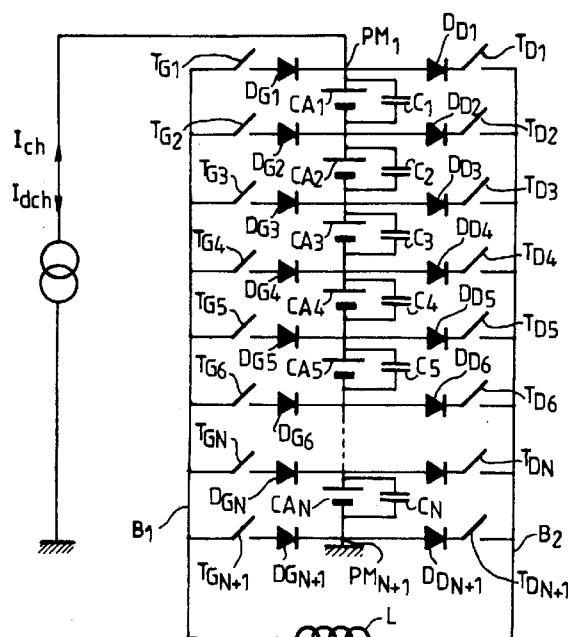


FIG. 3

(57) Abstract : System for managing a series association of elements for generating or storing electrical energy ($CA_1 - CA_N$), characterized in that it comprises: a first (B_1) and a second (B_2) power rail, which are connected together by way of an inductor (L) in series; a plurality of current-inverter arms connected between said first and second power rails, each of said arms being constituted by two bidirectional voltage switches (TG/DG ; T_D/D_D) linked together in series by a point termed a midpoint (PM) of the arm; and a plurality of connectors for connecting each element of said series association between the midpoints of two said arms.

(57) Abrégé : Système de gestion d'une association série d'éléments de génération ou de stockage d'énergie électrique ($CA_1 - CA_N$), caractérisé en ce qu'il comporte : une première (B_1) et une deuxième (B_2) barre de puissance, connectées entre elles par l'intermédiaire d'un inducteur (L) en série; une pluralité de bras

[Suite sur la page suivante]



ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— *sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport (règle 48.2.g)*

d'onduleur de courant connectés entre lesdites première et deuxième barres de puissance, chacun desdits bras étant constitué par deux interrupteurs bidirectionnels en tension (T_G/D_G ; T_D/D_D) reliés en série entre eux par un point dit point milieu (PM) du bras; et une pluralité de connecteurs pour connecter chaque élément de ladite association série entre les points milieux de deux desdits bras.

SYSTÈME DE GESTION D'UNE ASSOCIATION SÉRIE D'ÉLÉMENTS DE GÉNÉRATION OU DE STOCKAGE D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE BASÉ SUR UNE PLURALITÉ DE BRAS D'ONDULEUR DE COURANT

L'invention porte sur un système de gestion d'une association
5 série d'éléments de génération et/ou de stockage d'énergie électrique, tels que des accumulateurs, ou cellules d'accumulateurs électrochimiques, ou des supers condensateurs, ou des cellules photovoltaïques. L'invention porte également sur une association série d'éléments de génération et/ou de
10 stockage d'énergie électrique pourvue d'un tel système de gestion. Elle porte également sur l'utilisation d'un tel système pour équilibrer en tension et/ou en niveau de charge une association série d'éléments de stockage électrochimique d'énergie électrique, pour équilibrer et soutenir en courant, ou bien pour court-circuiter totalement ou partiellement un panneau solaire. Toutes ces opérations – équilibrage de charge et/ou de tension, équilibrage
15 et/ou soutien en courant, court-circuitage – sont désignés collectivement par le terme général de « gestion ».

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, comprenant une cellule
20 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 plus important. Pour élever le niveau de tension fourni par la batterie, on connecte en série plusieurs cellules d'accumulateurs, formant ce qu'on appelle un
25 « 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 l'équilibrage en tension et/ou en charge des différents éléments (cellules,
30 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 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. 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 apparaît à ses bornes, ce qui limite fortement le niveau de puissance généré par l'ensemble.

La figure 2B montre une telle association série de cellules photovoltaïques $PV_1...PV_N$, 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 tension (V) – courant (I) 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_{OPTI} à travers l'association série, et une différence de potentiel V_{OPTI} aux bornes de chaque cellule, tels que $P_{OPTI} = V_{OPTI} \cdot I_{OPTI} = \max(V \cdot I)$.

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.

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 $\Delta P_1 = -I_{OPTI}(V_{OPTI} + V_B)$.

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 $I' \cdot [(n-1) \cdot V_2 + V']$, 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 $I = I'$.

En tout cas, il est important de noter qu'une simple diminution d'éclairage d'une seule cellule photovoltaïque détermine 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 accumulateurs électrochimiques et les cellules photovoltaïques ne sont que des exemples non limitatifs – il est nécessaire de prévoir des systèmes de gestion.

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

Les systèmes d'équilibrage les plus communs sont de type passif, ou dissipatif. En phase de charge, ces systèmes mesurent

constamment ou périodiquement la différence de potentiel aux bornes de chacun des éléments connectés en série et dérivent vers une 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
5 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 atteint leur limite inférieure admissible de tension ; cela signifie que la capacité de
10 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. 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
15 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 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
20 Energy Conference, 1996 (INTELEC '96), pages 514 – 521, décrit plusieurs systèmes d'équilibrage actif.

Les systèmes d'équilibrage connus de l'art antérieur comprennent plusieurs éléments réactifs, en particulier des inducteurs et/ou
25 des coupleurs magnétiques. En outre, leurs composants actifs sont difficilement intégrables, particulièrement dans les applications de haute puissance, où des dispositifs à structure verticale doivent être utilisés. Par conséquent ces systèmes sont complexes et encombrants.

Le problème de l'équilibrage ou compensation dans les
30 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-étages, 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.

Un objet de l'invention, permettant d'atteindre ce but, est un système de gestion d'une association série d'éléments de génération ou de stockage d'énergie électrique selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comporte :

- une première et une deuxième barre de puissance, connectées entre elles par l'intermédiaire d'un inducteur en série ;
- une pluralité de bras d'onduleur de courant connectés entre lesdites première et deuxième barres de puissance, chacun desdits bras étant constitué par deux interrupteurs bidirectionnels en tension reliés en série entre eux par un point dit point milieu du bras ; et
- une pluralité de connecteurs pour connecter chaque élément de ladite association série entre les points milieux de deux desdits bras.

On remarquera qu'un tel système ne comporte qu'un seul inducteur ; il en résulte une architecture simple et une structure compacte et légère.

Différents modes de réalisation du système de gestion selon l'invention font l'objet des revendications dépendantes.

D'autres objets de l'invention sont :

5 - Une batterie électrochimique comportant une association série d'éléments de stockage électrochimique d'énergie électrique, connectée à un système de gestion tel que décrit ci-dessus.

10 - L'utilisation d'un système tel que décrit ci-dessus pour équilibrer en tension et/ou en niveau de charge une association série d'éléments de stockage d'énergie électrique en extrayant de l'énergie électrique d'une première série contigüe desdits éléments ; en stockant ladite énergie dans ledit inducteur ; puis en l'injectant dans une deuxième série contigüe desdits éléments.

15 - Un panneau photovoltaïque comportant une association série de cellules photovoltaïques, connectée à un système de gestion tel que décrit ci-dessus.

- L'utilisation d'un système tel que décrit ci-dessus pour équilibrer en courant une association série de cellules photovoltaïques dont au moins une est défaillante ou ombragée ou est utilisée en-dessous de son niveau maximal de puissance.

20 - L'utilisation d'un système tel que décrit ci-dessus pour court-circuiter au moins une cellule photovoltaïque défaillante dans une association série de telles cellules.

- L'utilisation d'un système tel que décrit ci-dessus pour court-circuiter une association série de cellules photovoltaïques.

25 - L'utilisation d'un système tel que décrit ci-dessus pour détecter une cellule photovoltaïque, ou un ensemble de cellules photovoltaïques, défaillantes ou ombragées ou bien utilisées en-dessous de son niveau maximal de puissance dans une association série de telles cellules.

30 D'autres caractéristiques, détails et avantages de l'invention ressortiront à la lecture de la description faite en référence aux dessins 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 d'énergie ;
- les figures 2B et 2C illustrent la nécessité d'un équilibrage dans une association série de cellules photovoltaïques ;
- La figure 3 montre un schéma général d'un système de gestion selon un mode de réalisation de l'invention ;
- Les figures 4A, 4B et 4C illustrent l'utilisation du système de gestion de la figure 3 pour réaliser un équilibrage en tension des éléments d'une batterie électrochimique ;
- Les figures 5A et 5B illustrent utilisation du système de gestion de la figure 3 pour mesurer la différence de potentiel aux bornes
- Les figures 6A, 6B, 17 et 18 illustrent l'utilisation d'un système de gestion selon la figure 3, 13, 14A ou 15A pour réaliser un équilibrage en courant des cellules photovoltaïques d'un panneau solaire ;
- La figure 7 illustre l'utilisation du système de gestion de la figure 3 pour îloter ou court-circuiter une cellule photovoltaïque défaillante dans un panneau solaire ;
- La figure 8 montre un schéma d'un bras d'onduleur de courant d'un mode de réalisation du système de gestion de l'invention ;
- Les figures 9 et 10 illustrent une réalisation partiellement intégrée dudit mode de réalisation de la figure 8 ;
- La figure 11 montre un schéma d'un bras d'onduleur de courant d'un autre mode de réalisation du système de gestion de l'invention ;
- La figure 12 illustre une réalisation partiellement intégrée dudit mode de réalisation de la figure 11 ;
- La figure 13 illustre une variante du système de gestion de la figure 3 ;

- Les figures 14A à 14C illustrent la structure et le fonctionnement d'un système de gestion selon un autre mode de réalisation de l'invention ;

5 - Les figures 15A à 15C illustrent la structure et le fonctionnement d'un système de gestion selon encore un autre mode de réalisation de l'invention ; et

- Les figures 16A à 16F illustrent la structure et le fonctionnement d'un système de gestion selon encore un autre mode de réalisation de l'invention.

10 La figure 3 montre un système selon un mode de réalisation de l'invention, appliqué à l'équilibrage de charge d'une association série de N éléments de stockage électrochimique d'énergie électrique (cellules d'accumulateurs) $CA_1 - CA_N$. Chaque élément est connecté en parallèle à un condensateur respectif $C_1 - C_N$ ayant une fonction de filtrage passe-bas.

15 Les éléments $CA_1 - CA_N$ sont traversés par un courant de charge I_{ch} ou de décharge I_{dch} .

Le système de gestion proprement dit est constitué par N+1 bras d'onduleurs de courant connectés entre deux barres de puissance B_1 et B_2 , reliées entre elles par l'intermédiaire d'un inducteur L.

20 Chaque bras d'onduleur de courant est constitué de deux interrupteurs bidirectionnels en tension connectés en série, reliés entre eux par un point dit « point milieu » du bras. Les interrupteurs bidirectionnels en tension sont généralement – mais pas nécessairement – unidirectionnels en courant. En particulier, ils peuvent permettre à un courant électrique de
25 circuler de la première barre de puissance B_1 (à gauche sur la figure) vers la deuxième barre de puissance B_2 , mais pas dans le sens opposé.

Sur la figure, chaque interrupteur bidirectionnel en tension et unidirectionnel en courant est représenté par un interrupteur commandé et une diode. On indique par T_{Gi} et D_{Gi} respectivement l'interrupteur commandé et la diode mise en série situés sur le côté gauche (c'est à dire entre la barre
30 B_1 et le point milieu PM_i) du i-ème bras d'onduleur, et par T_{Di} et D_{Di}

respectivement l'interrupteur commandé et la diode situés sur le côté droit (c'est à dire entre le point milieu PM_i et la barre B_2) de ce même bras.

Le point milieu PM_1 du premier bras d'onduleur de courant est connecté – par l'intermédiaire de connecteurs non représentés – à la borne positive de la première cellule d'accumulateur CA_1 . Le point milieu PM_{N+1} du (N+1)-ème bras d'onduleur de courant est connecté à la borne négative de la dernière (N-ème) cellule CA_N . Le point milieu du i-ème bras d'onduleur de courant PM_i , avec $2 \leq i \leq N$ est connecté entre la borne négative de la (i-1)-ème cellule d'accumulateur CA_{i-1} et la borne positive de la (i)-ème cellule CA_i .

Les interrupteurs sont pilotés par un module de commande, analogique ou, de préférence, numérique, qui n'est pas représenté sur la figure.

Les figures 4A, 4B, 4C illustrent le fonctionnement du système de la figure 3 dans son application à l'équilibrage de charge de la batterie électrochimique formée par les éléments $CA_1 - CA_N$.

On suppose que les éléments CA_i et CA_{i+1} sont chargés à une valeur de tension supérieure au niveau nominal, tandis que l'élément CA_j ($j \neq i, i+1$) est chargé à une valeur de tension inférieure audit niveau nominal.

Lors d'une première phase d'équilibrage (figure 4A), les interrupteurs D_{Di}/T_{Di} et D_{Gi+2}/T_{Gi+2} sont fermés, tandis que tous les autres interrupteurs sont ouverts (dans un souci de clarté, seuls les interrupteurs fermés sont représentés sur la figure). Cela permet aux cellules surchargées CA_i et CA_{i+1} de se décharger partiellement à travers l'inducteur L , qui est parcouru par un courant $I_L(t)$ qui augmente linéairement dans le temps (voir la figure 4C, où l'allure de $I_L(t)$ n'est pas parfaitement linéaire à cause des inductances parasites en série avec l'inductance). Ainsi, de l'énergie extraite des cellules CA_i et CA_{i+1} est stockée sous forme magnétique dans l'inducteur L .

La première phase d'équilibrage se termine lorsque le courant $I_L(t)$ atteint un seuil supérieur (ce qui est illustré sur la figure 4C par la commutation du signal SS_2).

Dans une deuxième phase d'équilibrage (figure 4B), seuls les interrupteurs D_{Gj}/T_{Gj} et D_{Dj+1}/T_{Dj+1} sont fermés. Ainsi, l'énergie stockée dans l'inducteur L lors de la première phase peut se décharger dans la cellule CA_j . Comme le montre la figure 4C, au cours de cette phase le courant $I_L(t)$ diminue linéairement. La deuxième phase d'équilibrage est déclenchée lorsque le courant $I_L(t)$ atteint un seuil inférieur (ce qui est illustré sur la figure 4C par la commutation du signal SS_1). Le processus peut donc recommencer de manière cyclique.

L'exemple de fonctionnement décrit ci-dessus n'est pas limitatif.

Ainsi, lors de la première phase d'équilibrage, un nombre quelconque de cellules contigües entre elles (à la limite, l'entière association de N cellules) peut se décharger partiellement à travers l'inducteur L. De même, l'énergie stockée dans ledit inducteur peut être injectée dans plusieurs cellules contigües.

Les deux phases d'équilibrage peuvent présenter une durée fixe, déterminée à l'avance, au lieu d'être déclenchées et arrêtées par des détections de seuils de courant. Cependant, dans ce cas il faudra dimensionner l'inducteur L de manière à assurer qu'il ne puisse en aucun cas entrer en saturation.

L'« ouverture » des interrupteurs ne nécessite pas toujours l'envoi d'une commande aux interrupteurs commandés T_G, T_D : dans certaines configurations de fonctionnement, la polarisation inverse des diodes D_G, D_D de certains bras d'onduleur de courant peut suffire. Ainsi, dans la configuration de la figure 4A toutes les diodes « de droite » D_{Dk} avec $k > i$ sont polarisées inversement, et découplent les points milieux correspondants PM_k de la barre de puissance B_2 quel que soit l'état des interrupteurs commandés T_{Dk} . Il s'ensuit que l'interrupteur commandé de gauche du premier bras, T_{G1} peut être remplacé par un simple circuit fermé, tout comme l'interrupteur commandé de droite du dernier bras, T_{DN+1} , comme représenté sur la figure 13. Ce mode de réalisation est même particulièrement avantageux, non tant parce qu'il permet de faire l'économie de deux interrupteurs, mais parce que

les diodes D_{G1} et D_{DN+1} assurent la fonction de « roue libre » de l'inducteur L même en cas de dysfonctionnement du système de pilotage des interrupteurs commandés. Dans le cas de la figure 3, au contraire, la non-fermeture d'un interrupteur commandé peut entraîner l'apparition d'une surtension aux bornes de l'inducteur, conduisant éventuellement à la destruction du système de gestion.

Dans l'exemple considéré, de l'énergie a été extraite des cellules CA_i et CA_{i+1} pour être injectée dans une cellule CA_j située à un potentiel inférieur (c'est à dire occupant une position « plus basse » dans l'association série); en d'autres termes, il a été réalisé un « transfert descendant ». Cela n'est nullement essentiel, et le système de l'invention permet également un « transfert ascendant ».

Les condensateurs $C_1 - C_N$ (qui ne sont pas illustrés sur les figures 4A – 4B pour ne pas les alourdir) servent essentiellement à filtrer les variations de courant à l'intérieur des cellules $CA_1 - CA_N$. Ils servent aussi à limiter l'impédance parasite des mailles de commutation lorsque les connexions entre lesdites cellules et les bras d'onduleur de courant présentent une longueur excédant quelques millimètres.

L'équilibrage de tension ainsi réalisé est de type « forcé » : il nécessite que les cellules d'accumulateurs sous- ou surchargées soient détectées, et que les interrupteurs des bras d'onduleur de courant soient pilotés en conséquence. Il s'ensuit qu'un équilibrage efficace nécessite des mesures fréquentes des différences de potentiel aux bornes desdites cellules. L'un des avantages du système de gestion de l'invention est de permettre d'effectuer ces mesures sans besoin de composants dédiés.

Comme le montrent les figures 5A et 5B, pour mesurer la différence de potentiel V_i aux bornes de l'élément CA_i , il suffit de fermer l'interrupteur « de droite » connecté à sa borne positive (D_{Di} , T_{Di}) et l'interrupteur « de gauche » connecté à sa borne négative (D_{Gi+1} , T_{G+1i}). Le courant I_L qui parcourt l'inducteur L augmente linéairement dans le temps, avec un taux de croissance constant, proportionnel à V_i . Il est donc possible

de déterminer V_i en mesurant le temps Δt_i nécessaire pour que $I(t)$ passe d'une valeur de seuil inférieure I_{sb} à une valeur de seuil supérieure I_{sh} .

On remarquera que les éléments ne doivent pas nécessairement présenter tous un même niveau de tension nominale. Ainsi, il est possible de réaliser un équilibrage à tensions nominales variables prenant en compte les températures de différents éléments, voire de gérer une association d'éléments réalisés en technologies différentes. Dans ce cas on parlera d'« équilibrage en niveau de charge » plutôt que d'équilibrage en tension.

La figure 14A illustre un système de gestion selon un autre mode de réalisation de l'invention. Ce système se différencie de celui de la figure 3 en ce que les interrupteurs commandés T_D et T_G sont bidirectionnels en tension et en courant (pas de diodes en série) et en ce qu'un condensateur C est connecté en série à l'inducteur L de manière à former un circuit résonant. La figure 14B montre l'évolution du courant I_L dans l'inducteur L et de la tension V_C aux bornes de la capacité C après qu'un interrupteur T_{Di} et un interrupteur T_{Gj} avec $j > i$ aient été fermés ; comme dans le cas de la figure 4C, le courant I_L commence à croître, d'abord linéairement puis de plus en plus lentement au fur et à mesure que V_C , qui s'y oppose, augmente à son tour ; au temps $t = \tau/4$, I_L atteint un maximum à partir duquel il décroît pour s'annuler pour $t = \tau/2$. A ce point, toute l'énergie est stockée dans le condensateur C et la phase de décharge peut commencer : un interrupteur T_{Dk} et un interrupteur T_{Gl} , avec $k > l$, sont fermés de manière à permettre au courant I_L de circuler dans le sens contraire des aiguilles d'une montre (signe négatif) pour recharger les cellules comprises entre CA_k et CA_{l+1} ; ce demi-cycle de décharge est illustré sur la figure 14C. On comprend que si le demi-cycle de décharge suit immédiatement le demi-cycle de charge, I_L et V_C présentent une allure sinusoïdale. Il ne faut surtout pas que la phase de décharge commence avant la fin de la phase de charge, sous peine de court-circuiter des cellules à travers les interrupteurs à quatre quadrants ; en revanche, il peut y avoir un intervalle (de préférence court) entre la fin de la charge et le début de la décharge. Les interrupteurs commandés peuvent avantageusement être des

triacs, ou des paires de thyristors antiparallèles (c'est-à-dire connectés en parallèle avec une orientation tête-bêche) ; ainsi, l'ouverture des interrupteurs se fait de manière automatique (sans commande d'ouverture) lors du passage par zéro du courant I_L .

5 Dans le mode de réalisation de la figure 14A il est possible de remplacer les interrupteurs T_{G1} et T_{DN+1} par des diodes, comme dans le cas de la figure 13. Mais cela est moins intéressant car le fonctionnement « en roue libre » n'est alors assuré que pour un sens de circulation du courant, et car en tout cas $I_L=0$ au moment de la commutation.

10 Le mode de réalisation de la figure 14A présente un certain nombre d'avantages par rapport à celui de la figure 1. Premièrement, les commutations se font à courant nul, ce qui réduit les pertes ; cette réduction des pertes améliore l'efficacité énergétique et permet d'augmenter la fréquence de fonctionnement, ce qui à son tour autorise une réduction de la
15 taille des composants passifs. Deuxièmement, l'utilisation d'interrupteurs commandés auto-entretenus et à ouverture naturelle (triacs, thyristors) simplifie la commande, qui peut être impulsionnelle ; en effet, un triac devient conducteur par simple application d'une impulsion de tension sur sa gâchette, contrairement au cas d'un MOSFET dans lequel la tension de grille doit être
20 maintenue continuellement. Une commande optique, par l'intermédiaire d'optocoupleurs devient aussi envisageable.

Il y a aussi quelques inconvénients. Premièrement, le fonctionnement résonant induit des valeurs maximales plus élevées des tensions et des courants, dont il faut tenir compte pour le dimensionnement
25 des interrupteurs. Deuxièmement, il est nécessaire d'utiliser des composants bidirectionnels en tension et en courant (« à quatre quadrants »), plus complexes que les composants bidirectionnels en tension et unidirectionnels en courant (« à deux quadrants ») du mode de réalisation des figures 3 et 13.

Ce deuxième inconvénient du système de gestion résonant
30 peut être évité grâce à la variante de réalisation illustrée sur la figure 15A, dans laquelle le condensateur C est connecté à l'inductance L par l'intermédiaire de quatre interrupteurs commandés unidirectionnels en courant

(thyristors) $TH_1 - TH_4$ montés en pont. Ces quatre interrupteurs permettent le passage du courant à travers le condensateur dans les deux sens, sans cependant inverser le courant dans l'inducteur. La figure 15B illustre la phase de charge, avec les interrupteurs TH_1 et TH_3 fermés et les interrupteurs TH_2 et TH_4 ouverts ; la figure 15C, la phase de décharge, avec les interrupteurs TH_1 et TH_3 ouverts et les interrupteurs TH_2 et TH_4 fermés. A l'extérieur du montage en pont, le courant circule toujours de la deuxième vers la première barre de puissance ; ainsi, les interrupteurs formant les bras d'onduleur peuvent être « à deux quadrants », par exemple des thyristors.

10 Dans le mode de réalisation de la figure 3 (ou 13), le courant qui traverse les cellules $CA_1 - CA_N$ est fortement découpé, ce qui rend opportune l'utilisation de condensateurs de filtrage $C_1 - C_N$ connectés en parallèle auxdites cellules. Un tel filtrage est encore plus important dans le cas des applications photovoltaïques qui seront décrites plus loin. Le mode de

15 réalisation de la figure 16A permet de réduire ou même de supprimer ces nécessités de filtrage. Cette figure illustre un système de gestion complexe constitué par quatre systèmes de gestion élémentaires $S1 - S4$ du type de la figure 3 (ou 13) identiques entre eux et entrelacés, dont les points milieux des bras d'onduleur correspondants sont reliés ensemble. Les signaux de

20 commande des interrupteurs correspondants (par exemple : $T_{G1}^1 - T_{G1}^4$) sont décalés d'un quart de cycle, comme illustré sur la figure 16B, de manière à moyenner dans le temps les appels en courant au niveau des cellules. Cet effet de moyenne est parfait dans le cas idéal à condition que le rapport cyclique des signaux de commande des interrupteurs soit de $1/4$, $1/2$ (cas

25 illustré sur la figure) ou de $3/4$. Ces trois valeurs du rapport cyclique sont suffisantes pour assurer la gestion de quatre cellules (ou groupes de cellules traitées comme une seule entité, par exemple des modules). Si les rapports cycliques sont légèrement différents, ce qui est le plus souvent le cas en pratique, les besoins de filtrage sont tout de même fortement réduits. Plus

30 généralement, pour assurer une gestion efficace dans toutes les circonstances, N cellules ou modules nécessiteront idéalement de N systèmes élémentaires avec des signaux de commande décalés de $1/N$

cycle ; le nombre de systèmes élémentaires peut aussi être un sous-multiple de N, mais dans ce cas la réduction des nécessités de filtrage sera moins prononcée. Le mode de réalisation de la figure 16A convient donc particulièrement à la gestion des modules d'une batterie, qui sont en nombre
5 relativement restreint, la gestion des cellules à l'intérieur du module étant assurée, par exemple, par un système du type de la figure 3.

Le mode de réalisation de la figure 16A est particulièrement avantageux si les inducteurs L^1 - L^4 des différents systèmes élémentaires sont réalisées sur un même noyau ferromagnétique simple (figure 16C), torique
10 (figure 16D) ou multi jambes (figure 16E), les sens d'enroulement desdits inducteurs étant opposés deux à deux. Dans le cas d'un enroulement torique, les enroulements sont couplés en série. Dans le cas d'un noyau multi jambes, chaque enroulement est associé à une jambe et toutes les jambes sont en parallèles, fermées par des culasses communes, réalisant un couplage en
15 parallèle. Un couplage en cascade cyclique, illustré sur la figure 16F, est également possible, bien que légèrement plus complexe ; dans ce cas l'inducteur de chaque système est couplé de proches en proches avec les inducteurs voisins via des noyaux magnétiques simples à deux enroulements. Dans les modes de réalisations des figures 16C – 16F les flux magnétiques
20 induits par les différents inducteurs se compensent, et la section du noyau peut être fortement réduite sans risque de saturation. Ces modes de réalisation minimisent ainsi la taille des éléments réactifs du circuit, au prix d'une complexification des éléments actifs à semi-conducteur – complexification qui est peu pénalisante, car lesdits éléments actifs sont
25 intégrables, comme cela sera expliqué plus loin.

Les modes de réalisation des figures 16C – 16E présupposent un nombre pair d'enroulements. Par conséquent, si le nombre N de cellules ou modules à équilibrer est impair, il est nécessaire d'utiliser 2N systèmes élémentaires. Le couplage en cascade cyclique (figure 16F) n'impose pas
30 cette contrainte.

Le système de l'invention est aussi adapté à l'équilibrage (ou compensation) en courant d'une association série d'éléments de génération

d'énergie électrique, en particulier de panneaux solaires constitués d'une (ou plusieurs) séries de cellules photovoltaïques $PV_1...PV_N$. La nécessité d'un tel équilibrage ou compensation a été expliquée plus haut, en référence aux figures 2B et 2C.

5 Les figures 6A et 6B illustrent l'équilibrage en courant d'un panneau solaire dont une cellule (ou un groupe de cellules contiguës) PV_i est ombragée ou partiellement défaillante. Un module MPPT fixe une valeur optimale I_{OPTi} du courant traversant les différentes cellules en série ; comme expliquée plus haut, dans ces conditions, la cellule ombragée PV_i consomme
10 de l'énergie, au lieu d'en générer.

Dans une première phase d'équilibrage (figure 6A), de l'énergie magnétique est extraite de l'ensemble du panneau et stockée dans l'inducteur L, qui est ainsi parcouru par un courant I_L croissant linéairement dans le temps. Cela est réalisé en fermant les interrupteurs D_{D1}/T_{D1} et
15 D_{GN+1}/T_{GN+1} . En variante, il aurait été possible d'extraire l'énergie seulement d'un sous-ensemble des cellules du panneau solaire.

Dans une deuxième phase d'équilibrage, les interrupteurs D_{Gi}/T_{Gi} et D_{Di+1}/T_{Gi+1} sont fermés. L'inducteur L se comporte alors comme un générateur de courant connecté en parallèle à la cellule photovoltaïque
20 ombragée ou défaillante PV_i ; cette dernière ne doit donc fournir qu'un courant $I_{OPTi}-I_L$, qui lui permet de se comporter en générateur de puissance.

Le cycle doit recommencer avant que le courant I_L ne soit redescendu à une valeur trop faible.

On comprendra que pour un fonctionnement correct du
25 système de gestion il est nécessaire de prévoir un condensateur C_i (non représenté) connecté en parallèle à PV_i , afin d'éviter toute variation brusque de la tension aux bornes de cette cellule photovoltaïque.

Si la cellule PV_i est ombragée ou défaillante au point qu'il n'est pas possible d'en extraire de l'énergie électrique, il suffit de la court-circuiter en laissant en position fermée les interrupteurs D_{Gi}/T_{Gi} et D_{Di+1}/T_{Gi+1} ,
30 comme illustré sur la figure 7.

De la même manière, il est possible de court-circuiter plusieurs cellules contiguës ou le panneau entier en fermant – et en maintenant en position fermée – les interrupteurs D_{G1}/T_{G1} et D_{DN+1}/T_{GN+1} . Cela peut être utile dans la situation suivante. On considère un panneau
5 solaire sur le toit d'une maison, qui prend feu. Avant d'arroser d'eau le toit, les pompiers débranchent le circuit électrique de la maison du réseau de distribution, mais le panneau solaire continue à fonctionner engendrant un risque d'électrocution. Le court-circuitage du panneau grâce au système de l'invention permet d'éviter toute situation dangereuse.

10 Le système de l'invention permet aussi de détecter des cellules (ou groupes de cellules) défaillantes ou ombragées. Pour tester l'état de fonctionnement de la cellule PV_i , il suffit de fermer les interrupteurs T_{Gi} et $T_{D(i+1)}$, ce qui conduit à la même configuration que celle illustrée sur la figure 6B. Si la cellule fonctionne en tant que générateur, les diodes D_{Gi} et $D_{D(i+1)}$
15 sont polarisées inversement et aucun courant ne circule dans l'inductance L ; par contre, si la cellule est défaillante ou ombragée et se comporte comme un consommateur de puissance électrique, les diodes D_{Gi} et $D_{D(i+1)}$ sont polarisées directement et un courant I_L circule dans l'inductance L . Ce courant I_L augmente dans le temps jusqu'à se stabiliser à une valeur telle que la chute
20 de tension aux bornes de la cellule PV_i soit égale à celle aux bornes des deux diodes D_{Gi} et $D_{D(i+1)}$. En supposant connue la caractéristique tension-courant de la cellule, la mesure de la valeur stationnaire de I_L permet de déterminer son niveau d'ombrage.

L'opération peut être répétée pour toutes les cellules (ou
25 groupes de cellules) du panneau.

Il est intéressant de noter que la détection des cellules ombragées ou défaillantes ne nécessite d'aucun composant supplémentaire. Certes, un capteur du courant I_L doit être prévu, mais en général un tel capteur est nécessaire en tout cas pour l'asservissement du système de
30 gestion.

En variante ou en complément, au lieu de détecter et « soutenir » une cellule ombragée ou défaillante, le système selon l'invention

peut être utilisé pour détecter une cellule qui serait « sous-utilisée », c'est-à-dire pouvant générer un courant – et donc une puissance – plus important que celui imposé par le module MPPT. Une telle situation peut se vérifier, par exemple, si certaines des cellules d'un panneau solaire sont sales ou
 5 partiellement ombragées ; dans ces conditions, le courant I_{OPT} maximisant la puissance générée par le panneau sera inférieur au courant qui serait optimal pour les cellules propres et/ou bien éclairées.

Comme le montre la figure 17, pour tester si la cellule PV_i est sous-utilisée, on ferme les interrupteurs T_{Di} et T_{Gi+1} . Si la cellule était
 10 effectivement sous-utilisée, un courant I_L commence à circuler dans l'inductance L et croît linéairement jusqu'à ce que $I_L = I_{MAXi} - I_{MPPT}$, où I_{MAXi} est le courant maximal pouvant être généré par la cellule PV_i lorsque la tension à ses bornes s'annule, et I_{MPPT} est le courant imposé par le module MPPT qui doit rester inchangé durant la phase de test. Ensuite, le courant stocké dans
 15 l'inductance est injecté dans l'ensemble de l'association série en fermant T_1 et T_{DN+1} de manière à « soutenir » toutes les cellules autres que PV_i . Si la cellule PV_i n'était pas sous-utilisée, au contraire, I_L reste nul. Il s'agit en quelque sorte de l'approche duale de celle décrite en référence à la figure 6B.

Une fois que une cellule PV_i sous-utilisée a été détectée, il est
 20 possible de stocker le courant $\Delta I_L = I_{MAXi} - I_{MPPT}$ dans l'inducteur L et le réinjecter en parallèle à l'ensemble de l'association série de cellules. Le courant réinjecté va charger les condensateurs C_i connectés en parallèle aux cellules ; ainsi, la tension aux bornes de ladite association augmente, et le module MPPT réagit en augmentant I_{MPPT} .

25 Les deux approches décrites en référence aux figures 6B et 17 peuvent être utilisées conjointement : d'abord on cherche – et on soutient – d'éventuelles cellules ombragées ou défaillantes, puis d'éventuelles cellules sous-utilisées sont détectées et on modifie le point de fonctionnement de la structure d'équilibrage pour profiter de cela et ainsi de suite. Les deux
 30 approches peuvent également être mises en œuvre de manière simultanée avec des interrupteurs à quatre quadrants. Dans la configuration illustrée sur la figure 18 et en supposant des interrupteurs bidirectionnels tant en tension

qu'en courant, si la cellule PV_i est sous-utilisée, la tension V_{PV_i} sera positive et le courant I_L également ; si la cellule est ombragée ou défaillante, V_{PV_i} et I_L seront négatifs ; dans les deux cas, la valeur absolue de I_L constitue une mesure de la non-optimalité des conditions de fonctionnement de la cellule PV_i . Un fonctionnement optimal correspond au cas I_L proche de zéro (légèrement positif, la valeur exacte dépendant de la caractéristique tension-courant de la cellule).

Si, au lieu de fermer les interrupteurs T_{D_i} et $T_{G_{i+1}}$ on avait fermé les interrupteurs $T_{D_{i+1}}$ et T_{G_i} , la condition $V_{PV_i}, I_L > 0$ correspondrait à une cellule ombragée ou défaillante et la condition $V_{PV_i}, I_L < 0$ correspondrait à une cellule sous-utilisée.

Les applications photovoltaïques ont été illustrées principalement sur la base du système de gestion de la figure 3. Il faut comprendre, cependant, que les systèmes des figures 13, 14A, 15A et 16A sont également adaptés à ces applications.

Les interrupteurs des bras d'onduleur de courant sont généralement réalisés au moyen de transistors, de type MOSFET ou IGBT, connectés en série à une diode, qui peut être de type Schottky (sauf dans les modes de réalisation qui nécessitent d'interrupteurs à quatre quadrants) ; comme expliqué plus haut, l'utilisation de thyristors ou triacs peut être préférée dans certains modes de réalisation. Si les niveaux de puissance et de tension en jeu sont élevés, des composants à structure verticale peuvent être utilisés. A ce propos, il est intéressant de noter que l'utilisation du système de l'invention est particulièrement avantageuse lorsque la différence de potentiel aux bornes de chaque élément CA_i est suffisamment élevée, c'est à dire supérieure à quelques volts. Dans le cas contraire, les chutes de tension provoquées par les diodes D_G/D_D imposent une pénalité qui peut être significative, en particulier si le courant qui traverse ces diodes n'est pas négligeable par rapport au courant nominal.

La figure 8 montre le schéma d'un bras d'onduleur de courant d'un système de gestion selon un mode de réalisation de l'invention. Ce bras d'onduleur comporte, de gauche vers la droite :

- un MOSFET de puissance de type P, T_G , dont la source S est connectée à la première barre de puissance B_1 ;
- une première diode D_G , de préférence de type Schottky pour minimiser la chute de tension, dont l'anode est connectée au drain du MOSFET T_G et la cathode au point milieu du bras d'onduleur de courant ;
- une deuxième diode D_D , elle aussi de préférence de type Schottky, dont l'anode est connectée au point milieu PM ;
- un MOSFET de puissance de type N, T_D , dont le drain D est connecté à la cathode de la deuxième diode D_D et la source S à la deuxième barre de puissance B_2 .

Un avantage de ce mode de réalisation est que les signaux de commande appliqués aux grilles G de tous les transistors d'un même type (N ou P) sont référencés à une même tension (celle des sources communes, c'est à dire celle de la première ou de la deuxième barre de puissance, respectivement). Les circuits de commande rapprochée, qui convertissent les commandes provenant du module de commande en signaux de tension capable de provoquer une commutation rapide et fiable des transistors, peuvent donc être mutualisés.

Tous (ou une partie de) les transistors d'un même type – ainsi que les diodes Schottky associées – peuvent être réalisés sur une même puce ; de cette manière le système, ou au moins sa partie active de puissance, peut prendre la forme d'un module bi-puces. La réalisation d'un ensemble de bras d'onduleurs de courant sous la forme d'un module bi-puces est décrite en détail dans le document WO 2011004081 ; elle sera décrite plus synthétiquement ci-après à l'aide de la figure 9.

La figure 9 montre une vue en section d'une puce microélectronique dans laquelle des MOSFETs à structure verticale sont intégrés dans un substrat S' homogène, ayant une épaisseur de l'ordre de 50 – 500 μm , et de préférence de l'ordre de 50 – 300 μm , obtenu par amincissement d'un substrat plus épais, que l'on supposera de type P. D'une manière connue en soi, chaque transistor peut comporter plusieurs cellules élémentaires, mais une seule a été représentée dans un souci de

simplification de la figure. Pour réaliser les MOSFETs, des régions « de corps » RC à dopage N et des régions de contact CO à dopage P+ sont réalisées à la surface du substrat aminci S'. Les régions de corps et de contact délimitent les régions de canal CH, au-dessus desquelles sont
5 réalisées des électrodes de grille CG en polysilicium isolées par des couches d'oxyde isolant. Au-dessous des régions de canal s'étendent les zones de diffusion ZD, qui assurent la tenue en tension des dispositifs.

Après la réalisation desdits MOSFETs, une couche de métallisation épaisse M' est déposée sur la face arrière ou sur la face avant
10 du substrat. Cette couche de métallisation a une double fonction, électrique (connecter entre eux les dispositifs d'une même puce) et mécanique (assurer la tenue de la puce, malgré l'amincissement du substrat semi-conducteur). Si la couche de métallisation M' est déposée face avant – cas représenté sur la figure – on obtient une structure à sources communes et drains « libres » :
15 précisément ce qu'il faut pour réaliser des bras d'onduleur de courant du type de la figure 8. Dans ce cas, il est nécessaire de prévoir des dégagements de la couche de métallisation M' pour permettre un accès indépendant aux électrodes de grille CG.

Sur la face arrière de la puce, les métallisations MD assurent
20 le contact électrique des drains. Les jonctions entre ces métallisations et le substrat semi-conducteur peuvent être de type Schottky, ce qui permet de réaliser les diodes des bras d'onduleur de courant.

Ensuite, les différents MOSFETs sont îlotés grâce à des sillons en « V » (référence SI), réalisés par gravure humide et dont les parois
25 sont recouvertes d'un diélectrique de passivation DP tel que du SIPOS (silicium polycristallin semi-isolant). Le résultat est une structure de type « mesa », conventionnelle dans les dispositifs discrets (voir l'article de Ph. Leturcq, « Tenue en tension des semi-conducteurs de puissance », D 3 104-1, Techniques de l'ingénieur, traité génie électrique). Une telle structure
30 permet d'obtenir une tenue en tension symétrique, ce qui est essentiel pour l'application considérée ici. Avantageusement, au moment de l'encapsulation, les sillons peuvent être remplis d'un gel diélectrique, par exemple siliconé. En

variante, il aurait été possible d'avoir recours à un îlotage par tranchées verticales remplies de diélectrique (voir le cas de la figure 12). En tout cas, les tranchées ou sillons d'îlotage peuvent avantageusement être réalisés après les opérations de diffusion et métallisation nécessaires à la fabrication des dispositifs proprement dits.

Une puce du type représenté sur la figure 9 comportant un substrat aminci S' de type P permet la réalisation de tous les interrupteurs « de gauche » T_G des bras d'onduleur de courant d'un système de gestion de l'invention. Une puce ayant la même structure peut être réalisée à partir d'un substrat N. En reliant ces deux puces par leurs métallisations épaisses M' on obtient un module bi-puces intégrant d'une manière extrêmement compacte toute la partie active d'un tel système.

Une telle structure bi-puces est illustrée sur la figure 10, où la puce PG intègre tous les interrupteurs « de gauche » et la puce PD les interrupteurs « de droite ». La commande rapprochée des interrupteurs est assurée par les circuits de commande PC_1 , PC_2 qui peuvent être réalisés sous la forme de puces indépendantes, ou être co-intégrés dans les puces de puissance PG, PD. Comme expliqué plus haut, les signaux de pilotage des interrupteurs de gauches présentent une même tension de référence (la tension des sources communes), et il en va de même pour ceux des interrupteurs de droite. Cela est essentiel pour permettre la réalisation d'un circuit de commande unique pour chaque puce de puissance.

Les signaux de commande sont acheminés jusqu'aux grilles des transistors par les lignes LC_1 , LC_2 .

La référence CC indique un capteur de courant qui permet de mesurer le courant I_C qui parcourt l'inductance L. Cela permet, notamment, de déterminer les instants de commutation des transistors (voir la figure 5B, décrite plus haut).

Les condensateurs C_1 , C_2 et les interrupteurs SW_1 , SW_2 (avantageusement intégrés dans les puces PD, PG respectivement) permettent d'alimenter d'une manière particulièrement simple les circuits de commande PC_1 , PC_2 .

Pour charger les condensateurs C_1 et C_2 on commence par extraire de l'énergie de l'ensemble des éléments de stockage ou génération en fermant les transistors T_{D1} et T_{GN+1} , pour la stocker dans l'inducteur. Puis on ouvre tous les interrupteurs, et on ferme SW_1 et SW_2 . L'énergie stockée dans l'inducteur est donc transférée aux condensateurs C_1 et C_2 . On peut vérifier que la différence de potentiel qui se développe aux bornes de ces condensateurs (positive pour C_1 , négative pour C_2) présente la bonne polarité pour permettre l'alimentation des circuits de commande respectifs.

La structure bi-puces de la figure 10 peut être adaptée à la topologie de la figure 13 simplement en éliminant un interrupteur commandé sur chaque puce. Le système de la figure 16A peut être réalisé grâce à une pluralité de structures bi-puces du type de la figure 10, ou alors avec une structure unique et avec un schéma d'interconnexion approprié. Les systèmes résonants des figures 14A et 15A peuvent, eux aussi, être réalisés en technologie bi-puces.

La figure 11 montre le schéma d'un bras d'onduleur de courant d'un système de gestion selon un autre mode de réalisation de l'invention. Ce bras d'onduleur comporte, de la gauche vers la droite :

- une diode D_G , de préférence de type Schottky, dont l'anode est connectée à la première barre de puissance B_1 ;
- un MOSFET de puissance de type N, T_G , dont le drain D est connecté à la cathode de la diode D_G et la source S au point milieu PM ;
- un MOSFET de puissance de type P, T_D , dont la source S est connectée au point milieu PM et fait donc face à celle du transistor T_G ;
- une diode D_D , elle aussi de préférence de type Schottky, dont l'anode est connectée au drain D du transistor T_D et la cathode à la deuxième barre de puissance B_2 .

Un système de gestion basé sur des bras d'onduleur de courant du type illustré sur la figure 11 peut, lui aussi, être réalisé sous la forme d'un module bi-puces. La figure 12 montre une vue partielle en section d'une puce intégrant tous les interrupteurs « de gauche » d'un tel système.

Cette puce comporte un premier substrat S_1 réalisé en matériau semiconducteur (typiquement silicium) dégénéré, c'est à dire présentant une concentration élevée de dopants – en l'espèce, donneurs d'électrons – qui lui confèrent une conductivité quasi-métallique. L'épaisseur
5 du premier substrat S_1 est typiquement de l'ordre de 500 μm , de manière à lui conférer une résistance mécanique suffisante lors de la fabrication. Une couche de métallisation MD est réalisée sur une face, dite « face arrière » de ce substrat.

Sur la « face avant » du substrat S_1 , opposée à ladite face
10 arrière, est déposée une couche épitaxiale S_2 de matériau semiconducteur, à l'intérieur de laquelle seront réalisés les dispositifs électroniques de puissance. Cette couche présente un dopage du même type que celui du premier substrat, mais de concentration moindre (n-). L'épaisseur de cette couche S_2 est typiquement d'environ 50 μm ou moins.

15 Par des procédés de photolithographie tout à fait classiques en « face avant », des dispositifs électroniques tels que des MOSFETs à canal N (symbole sur la droite de la figure) sont réalisés à l'intérieur de la couche épitaxiale S_2 . Par exemple, dans le cas illustré sur la figure 12, des régions « de corps » RC à dopage p et des régions de contact CO à dopage
20 n+ sont réalisées à la surface de ladite couche. Les régions de corps et de contact délimitent les régions de canal CH, au-dessus desquelles sont réalisées des électrodes de grille CG en polysilicium isolées par des couches d'oxyde isolant. Des métallisations MS sont déposées au-dessus des régions de contact CO. D'une manière connue, les métallisations MS réalisent des
25 prises de contact de source des différentes cellules MOSFET, tandis que la couche de métallisation en face arrière MD réalise un contact de drain commun. Contrairement au cas des solutions à substrat aminci, les diodes doivent être réalisées séparément.

Les régions de canal CH et les régions « de corps » RC
30 forment les zones « actives » des dispositifs. La partie plus profonde de la couche S_2 , s'étendant jusqu'à l'interface avec le substrat S_1 , constitue la zone de diffusion ou de tenue en tension ZD. D'une manière conventionnelle en

électronique de puissance, chaque transistor peut être formé de plusieurs « cellules élémentaires », dont chacune comporte une région « de corps » RC à dopage p et une ou deux régions de contact CO à dopage n+.

Les régions actives et de tenue en tension des dispositifs ainsi réalisés sont isolées les unes des autres par des tranchées TP, réalisées par gravure profonde au moyen de faisceaux d'ions réactifs, remplies de diélectrique (généralement, mais pas obligatoirement, du SiO₂). Ces tranchées ne s'étendent pas à l'intérieur du substrat S₁, ou alors seulement pour une fraction de sa profondeur : par conséquent, les drains de tous les transistors de la puce sont reliés électriquement entre eux et maintenus à un même potentiel.

Les tranchées TP ont une double fonction. D'une part, comme cela a été discuté plus haut, elles permettent l'îlotage des différents dispositifs qui doivent pouvoir commuter indépendamment les uns des autres ; d'autre part, elles assurent la terminaison des équipotentiels aux bords de la région de tenue en tension. Cette deuxième fonction est importante, et mérite que l'on s'y attarde. La zone de tenue en tension ZD est la partie du dispositif dans laquelle se produit l'essentiel de la tenue en tension entre le drain et la source (dans le cas d'un transistor à effet de champ). Dans cette région, les surfaces équipotentiels sont approximativement planes. Le dispositif est dimensionné de manière à éviter que des claquages ne se produisent à l'intérieur de la zone de tenue en tension ; cependant, des claquages risquent de se produire sur les bords latéraux du dispositif, au niveau de défauts de surface. Pour cette raison il est nécessaire de délimiter la zone de tenue en tension par des tranchées présentant des surfaces latérales lisses, remplies d'un diélectrique suffisamment rigide (notamment du SiO₂ par dépôt chimique en phase vapeur). Voir à ce propos l'article précité de Philippe Leturcq.

Des simulations montrent que la tenue en tension des dispositifs est maximisée lorsque les tranchées sont légèrement évasées, de telle sorte que la surface latérale de la zone ZD forme un angle d'environ 100° avec l'interface S₁/S₂. Dans ces conditions, les équipotentiels sortant de la

zone ZD s'infléchissent vers le bas (vers ladite interface S_1/S_2) avant de remonter vers la surface avant de la puce.

Comme dans le cas des figures 8 à 10, une puce de type complémentaire, présentant une même structure, intègre les interrupteurs
5 « de droite » du système d'équilibrage.

Dans ce cas, cependant, les circuits de commande ne peuvent pas être mutualisés : chaque interrupteur doit être pourvu d'une commande rapprochée propre, qui peut être alimentée par un élément de stockage ou génération d'énergie électrique relié au point milieu du bras
10 d'onduleur de courant correspondant.

Seuls des modes de réalisation de l'invention utilisant des MOSFETs complémentaires ont été décrits en détail. Il ne s'agit pas d'une limitation essentielle : en effet, les bras d'onduleurs peuvent aussi être réalisés au moyen de dispositifs d'un même type (généralement N), par
15 exemple des IGBT.

REVENDICATIONS

1. Système de gestion d'une association série d'éléments de génération ou de stockage d'énergie électrique ($CA_1 - CA_N$; $PV_1 - PV_N$), caractérisé en ce qu'il comporte :
 - 5 - une première (B_1) et une deuxième (B_2) barres de puissance, connectées entre elles par l'intermédiaire d'un inducteur (L) en série ;
 - une pluralité de bras d'onduleur de courant connectés entre lesdites première et deuxième barres de puissance, chacun desdits bras
 - 10 étant constitué par deux interrupteurs bidirectionnels en tension (T_G/D_G ; T_D/D_D) reliés en série entre eux par un point dit point milieu (PM) du bras ; et
 - une pluralité de connecteurs pour connecter chaque élément de ladite association série entre les points milieux de deux desdits bras.
- 15 2. Système de gestion selon la revendication 1 dans lequel les interrupteurs des bras d'onduleur de courant sont des interrupteurs bidirectionnels en tension et unidirectionnels en courant, adaptés pour permettre un passage de courant de la première vers la deuxième barre de puissance.
- 20 3. Système de gestion selon la revendication 2 dans lequel chacun desdits bras d'onduleur de courant est formé par deux MOSFETs de puissance complémentaires (T_G ; T_D), connectés auxdites première et deuxième barres de puissance par leurs sources (S), et par deux diodes (D_G ; D_D) connectées entre le point milieu (PM) du bras et les drains (D) desdits
- 25 MOSFETs.
4. Système de gestion selon la revendication 3 comportant un premier circuit (PC_1) de commande rapprochée des MOSFETs connectés à la première barre de puissance, et un deuxième circuit (PC_2) de commande rapprochée des MOSFETs connectés à la deuxième barre de puissance.
- 30 5. Système de gestion selon la revendication 4 comportant également :

- un premier condensateur (C_1) connecté directement à ladite deuxième barre de puissance (B_2) et par l'intermédiaire d'un interrupteur (SW_2) à la première barre de puissance (B_1), ledit premier condensateur assurant l'alimentation dudit premier circuit de commande rapprochée (PC_1) ;

5 et

- un deuxième condensateur (C_2) connecté directement à ladite première barre de puissance (B_1) et par l'intermédiaire d'un interrupteur (SW_1) à la deuxième barre de puissance (B_2), ledit deuxième condensateur assurant l'alimentation dudit deuxième circuit de commande rapprochée (PC_2).

10

6. Système de gestion selon la revendication 2 dans lequel chacun desdits bras d'onduleur est formé par deux MOSFETs de puissance complémentaires (T_G ; T_D), reliés entre eux par leurs sources (S), et par deux diodes (D_G ; D_D) connectées entre le drain (D) de chaque transistor et la barre de puissance correspondante.

15

7. Système de gestion selon la revendication 6 comportant un circuit de commande rapprochée pour chacun desdits MOSFETs, chacun desdits circuit de commande étant alimenté par l'un des éléments connectés au point milieu du bras d'onduleur de courant correspondant.

20

8. Système de gestion selon l'une des revendications 1 ou 2 dans lequel chacun desdits bras d'onduleur comprend un premier et un deuxième interrupteurs commandés, connectés respectivement à ladite première et ladite deuxième barre de puissance, une première diode connectée en série entre ladite première barre de puissance et ledit point milieu, et une deuxième diode connectée en série entre ledit point milieu et ladite deuxième barre de puissance, à l'exception :

25

- d'un bras, dit premier, dont le point milieu est destiné à être connecté à l'élément à plus haute tension de ladite association, et dans lequel ledit premier interrupteur commandé est remplacé par un circuit fermé ;

30 et

- d'un autre bras, dit dernier, dont le point milieu est destiné à être connecté à l'élément à plus basse tension de ladite association, et dans

lequel ledit deuxième interrupteur commandé est remplacé par un circuit fermé.

9. Système de gestion selon la revendication 1 comprenant également un condensateur connecté en série audit inducteur.

5 10. Système de gestion selon la revendication 9 dans lequel les interrupteurs des bras d'onduleur de courant sont des interrupteurs bidirectionnels en tension et en courant, tels que des triacs ou des paires de thyristors antiparallèles.

10 11. Système de gestion selon la revendication 9 dans lequel ledit condensateur est connecté entre deux nœuds opposés d'un pont formé par quatre interrupteurs commandés bidirectionnels en tension et unidirectionnels en courant, orientés de manière à permettre un passage du courant bidirectionnel à travers ledit condensateur et un passage du courant unidirectionnel, uniquement dans le sens allant de ladite deuxième barre de
15 puissance vers ladite première barre de puissance, à travers l'inducteur.

12. Système de gestion d'une association série d'éléments de génération ou de stockage d'énergie électrique ($CA_1 - CA_N$; $PV_1 - PV_N$), constitué par un nombre paire de systèmes de gestion individuels selon l'une des revendications 1 à 8, identiques entre eux et dont les points milieux des
20 bras d'onduleur sont reliés ensemble.

13. Système de gestion selon la revendication 12 dans lequel les inducteurs des systèmes de gestion individuels sont couplés magnétiquement entre eux de telle manière que les flux magnétiques dans leurs noyaux ferromagnétiques respectifs, ou dans un noyau magnétique
25 commun, se compensent mutuellement au moins en partie.

14. Système de gestion selon l'une des revendications précédentes dans lequel :

- lesdits interrupteurs sont réalisés sous la forme de dispositifs semi-conducteurs à structure verticale ; et
- 30 - au moins une pluralité desdits bras d'onduleur de courant sont réalisés sous la forme de modules bi-puces comportant une première puce (PG) intégrant de manière monolithique les interrupteurs connectés

entre la première barre de puissance et les points milieux respectifs, et une deuxième puce (PD) intégrant de manière monolithique les interrupteurs connectés entre lesdits points milieux respectifs et la deuxième barre de puissance.

5 15. Système de gestion selon la revendication 10 dans lequel les puces d'un dit module sont de types complémentaires.

16. Système de gestion selon l'une des revendications précédentes comportant également une pluralité de condensateurs ($C_1 - C_N$) connectés entre les points milieux desdits bras d'onduleur de courant.

10 17. Système de gestion selon l'une des revendications précédentes comportant également un module de commande pour piloter les interrupteurs desdits bras d'onduleur de courant de manière à :

- dans une première phase d'équilibrage, extraire de l'énergie électrique d'au moins un élément de ladite association série et la
15 stocker sous forme magnétique dans ledit inducteur ;

- dans une deuxième phase d'équilibrage, déstocker ladite énergie magnétique et la réinjecter dans ledit ou au moins un autre élément de l'association série.

20 18. Système de gestion selon la revendication 17 dans lequel ledit module de commande est adapté pour :

- dans ladite première phase d'équilibrage, ordonner la fermeture de l'interrupteur (D_{Gi+2} ; T_{Gi+2}) connecté entre ladite première barre de puissance (B_1) et le point milieu (PM_{i+2}) d'un premier bras d'onduleur de courant, et de l'interrupteur (D_{Gi} ; T_{Gi}) connecté entre le point milieu (PM_i) d'un
25 deuxième bras d'onduleur de courant et ladite deuxième barre de puissance (B_2), le point milieu dudit deuxième bras d'onduleur étant situé à un niveau de tension supérieur à celui dudit premier bras, de manière à injecter un courant dans ledit inducteur ; et

- dans ladite deuxième phase d'équilibrage, ordonner la
30 fermeture de l'interrupteur (D_{Gj} ; T_{Gj}) connecté entre ladite première barre de puissance (B_1) et le point milieu (PM_j) d'un troisième bras d'onduleur de courant, et de l'interrupteur (D_{Gi+1} ; T_{Gi+1}) connecté entre le point milieu (PM_j)

d'un quatrième bras d'onduleur de courant et ladite deuxième barre de puissance (B_2), le point milieu dudit quatrième bras d'onduleur étant situé à un niveau de tension inférieur à celui dudit troisième bras, de manière à permettre à un courant de décharge dudit inducteur de circuler à travers un sous-ensemble desdits éléments de génération et/ou de stockage d'énergie électrique.

19. Système de gestion selon l'une des revendications 17 ou 18 dans lequel ledit module de commande est aussi adapté pour piloter les interrupteurs desdits bras d'onduleur de courant de manière à court-circuiter un sous-ensemble contigu d'éléments défaillants.

20. Système de gestion selon l'une des revendications 17 à 19 dans lequel ledit module de commande est adapté pour :

- piloter les interrupteurs desdits bras d'onduleur de courant de manière à connecter ledit inducteur en série avec l'un desdits éléments de génération et/ou de stockage d'énergie électrique ;
- déterminer un niveau de tension aux bornes dudit élément à partir de la mesure d'une variation de courant à travers ledit inducteur ; puis
- piloter les interrupteurs desdits bras d'onduleur de courant de manière à décharger ledit inducteur.

21. Batterie électrochimique comportant une association série d'éléments de stockage électrochimique d'énergie électrique ($CA_1 - CA_N$), connectée à un système de gestion selon l'une des revendications précédentes.

22. Utilisation d'un système selon l'une des revendications 1 à 20 pour équilibrer en tension et/ou en niveau de charge une association série d'éléments de stockage d'énergie électrique en extrayant de l'énergie électrique d'une première série contigüe desdits éléments ; en stockant ladite énergie dans ledit inducteur ; puis en l'injectant dans une deuxième série contigüe desdits éléments.

23. Panneau photovoltaïque comportant une association série de cellules photovoltaïques ($PV_1 - PV_N$), connectée à un système de gestion selon l'une des revendications 1 à 20.

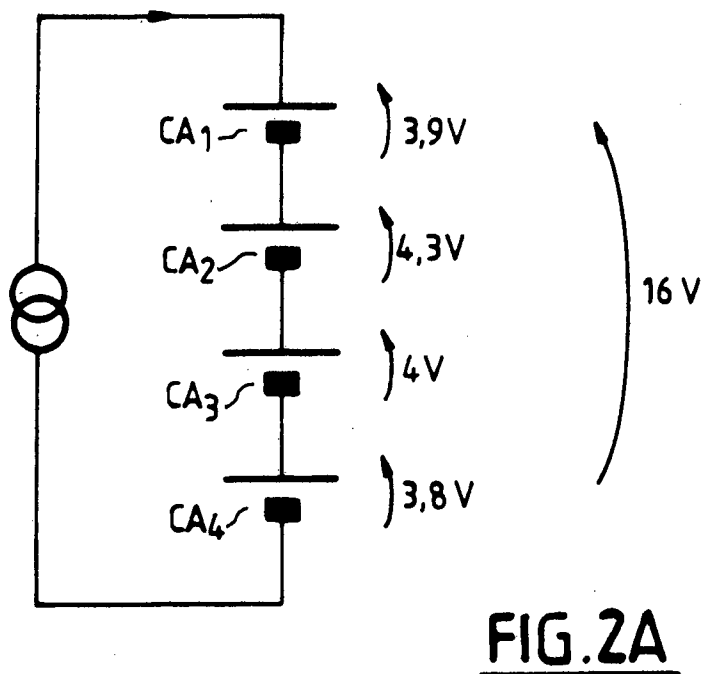
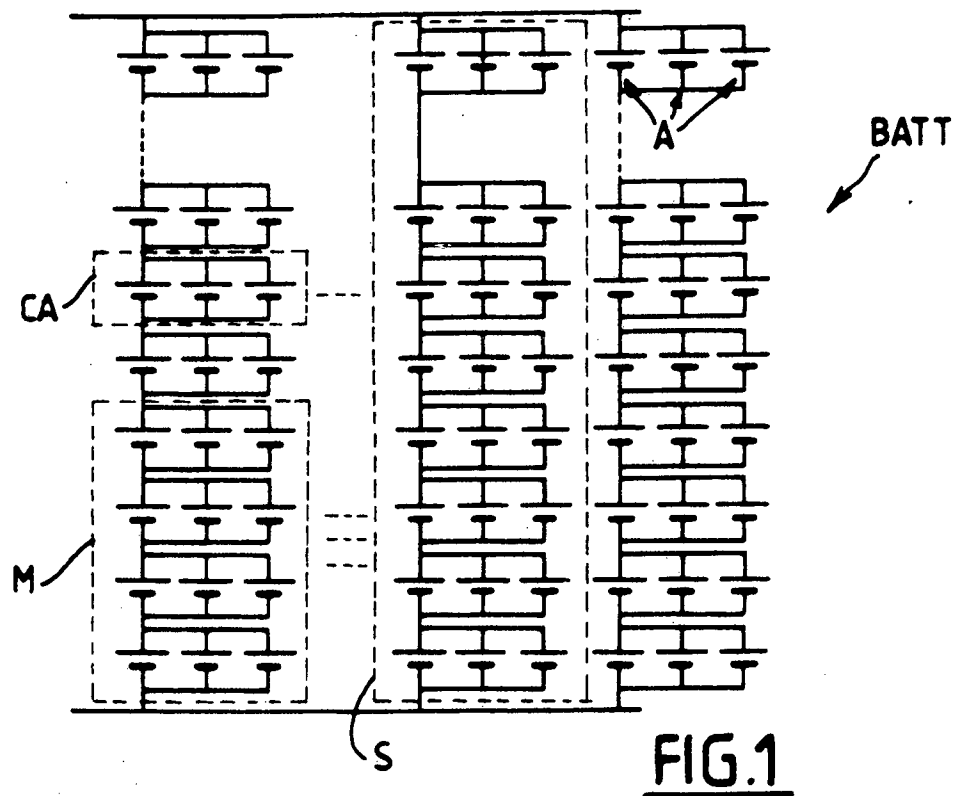
24. Utilisation d'un système selon l'une des revendications 1 à 20, pour équilibrer en courant une association série de cellules photovoltaïques dont au moins une est défaillante ou ombragée, ou est utilisée en-dessous de son niveau maximal de puissance.

5 25. Utilisation d'un système selon l'une des revendications 1 à 20, pour court-circuiter au moins une cellule photovoltaïque défaillante dans une association série de telles cellules.

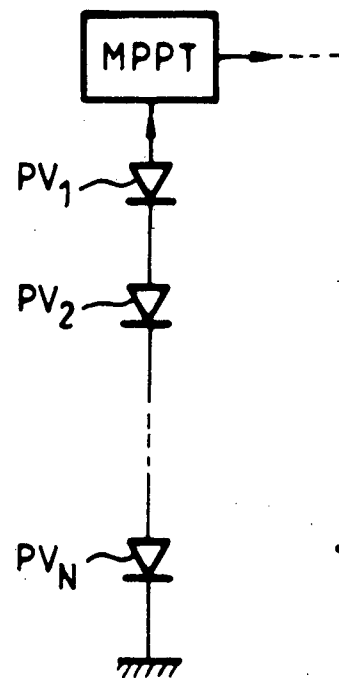
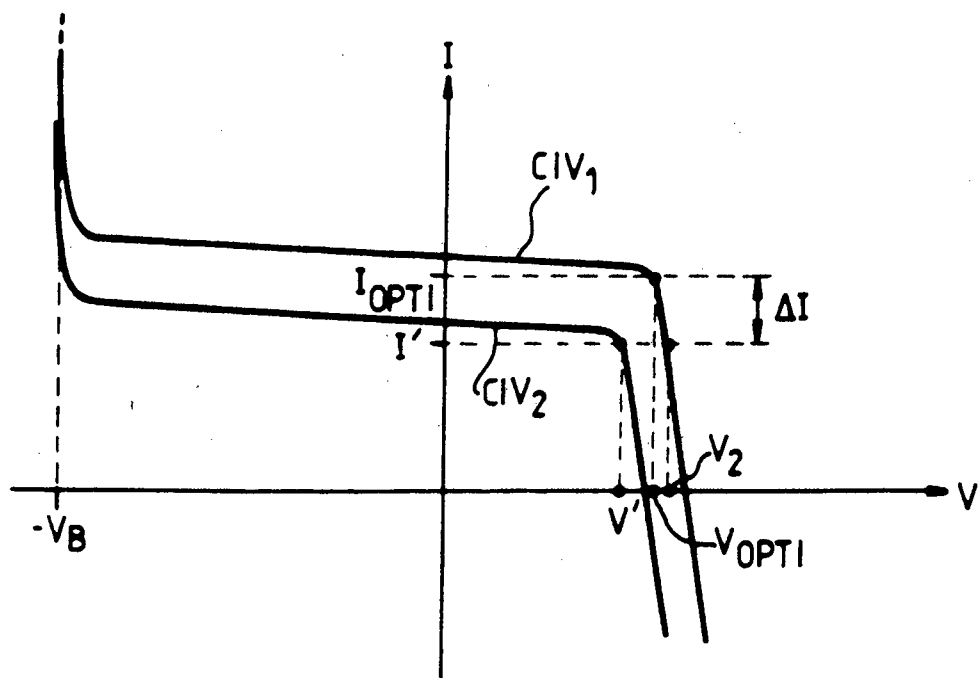
26. Utilisation d'un système selon l'une des revendications 1 à 20, pour court-circuiter une association série de cellules photovoltaïques.

10 27. Utilisation d'un système selon l'une des revendications 1 à 20 pour détecter une cellule photovoltaïque, ou un ensemble de cellules photovoltaïques, défaillantes ou ombragées, ou bien utilisées en-dessous de leur niveau maximal de puissance, dans une association série de telles cellules.

1 / 13



2 / 13

FIG. 2BFIG. 2C

3/13

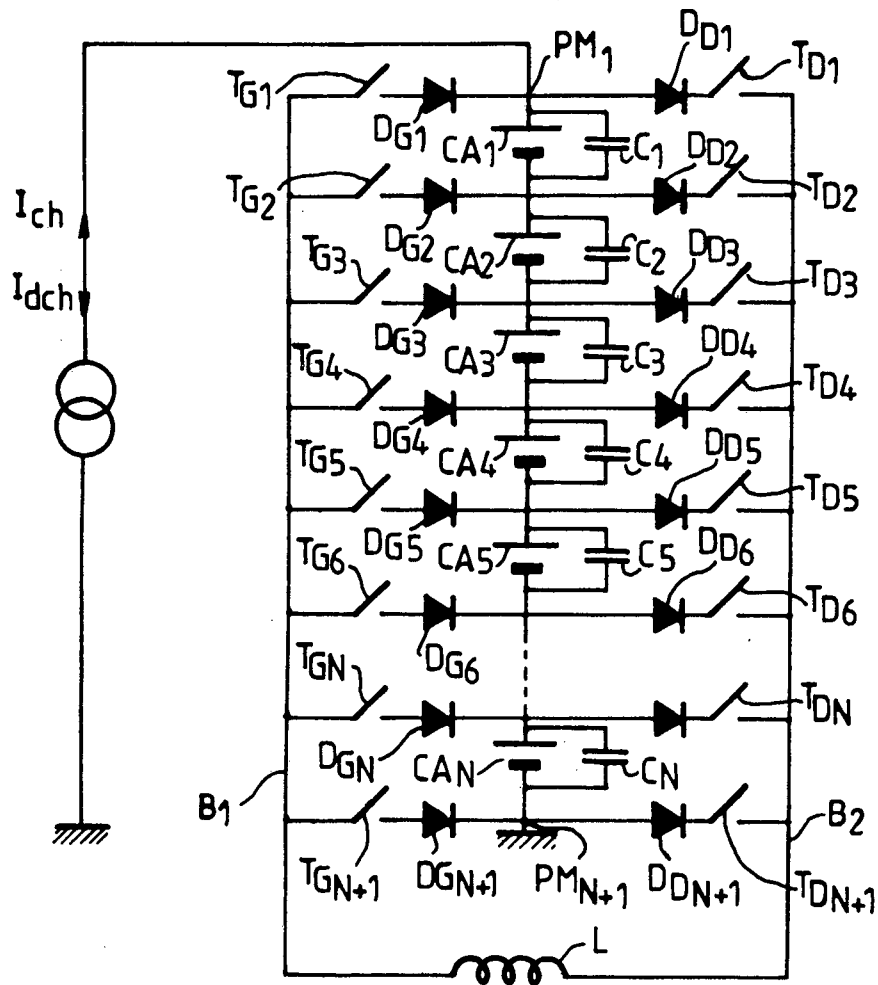


FIG. 3

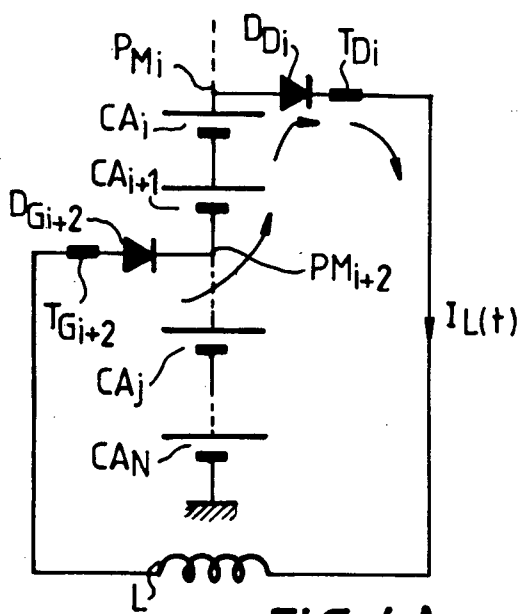


FIG. 4A

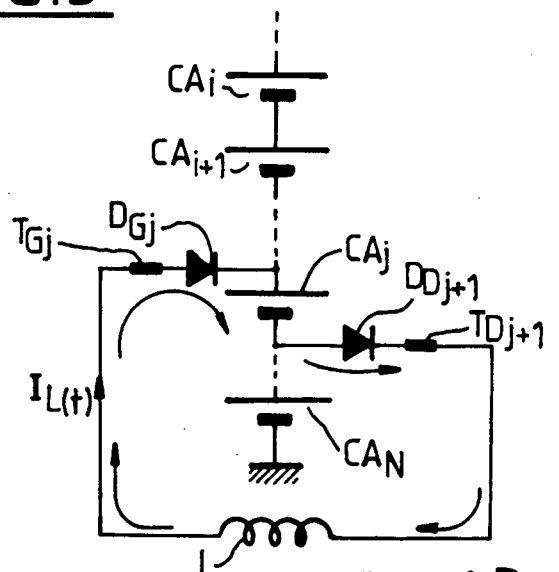


FIG. 4B

4 / 13

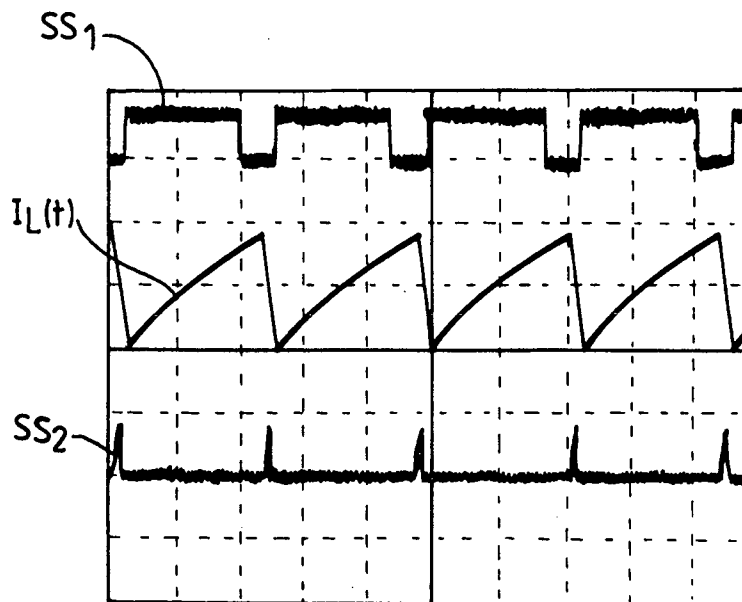


FIG. 4C

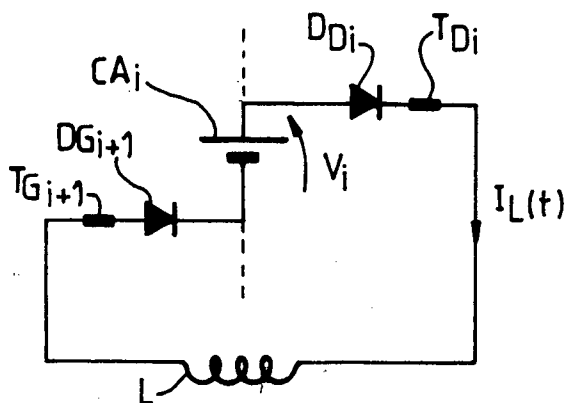


FIG. 5A

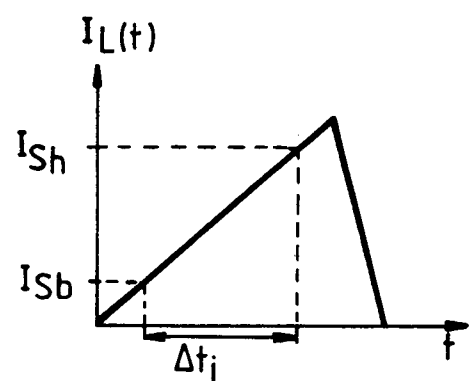
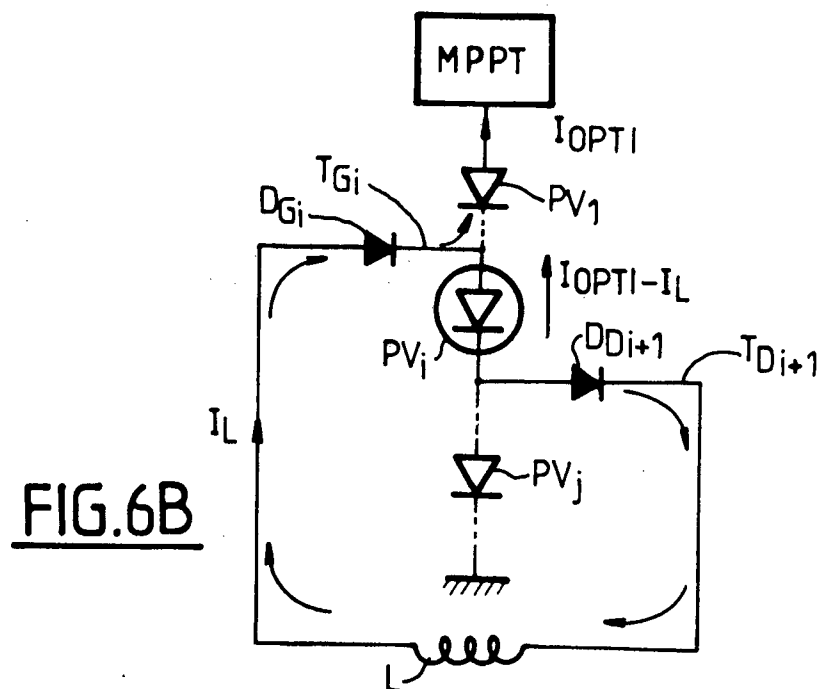
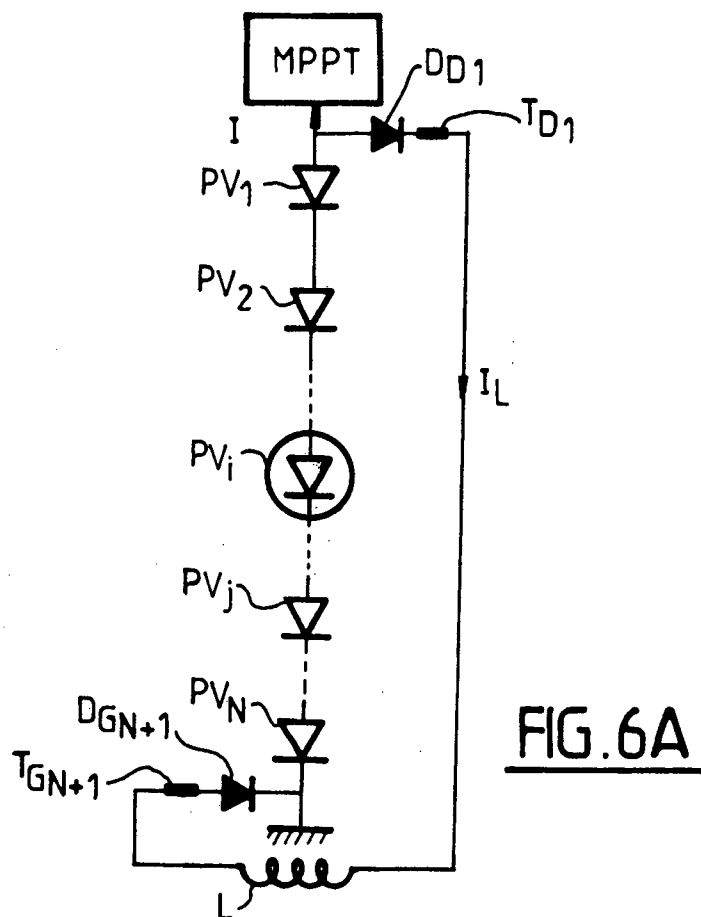


FIG. 5B

5 / 13



6 / 13

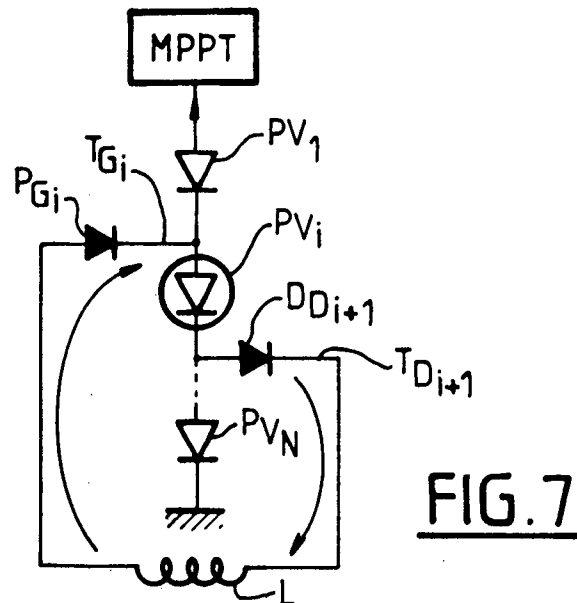


FIG. 7

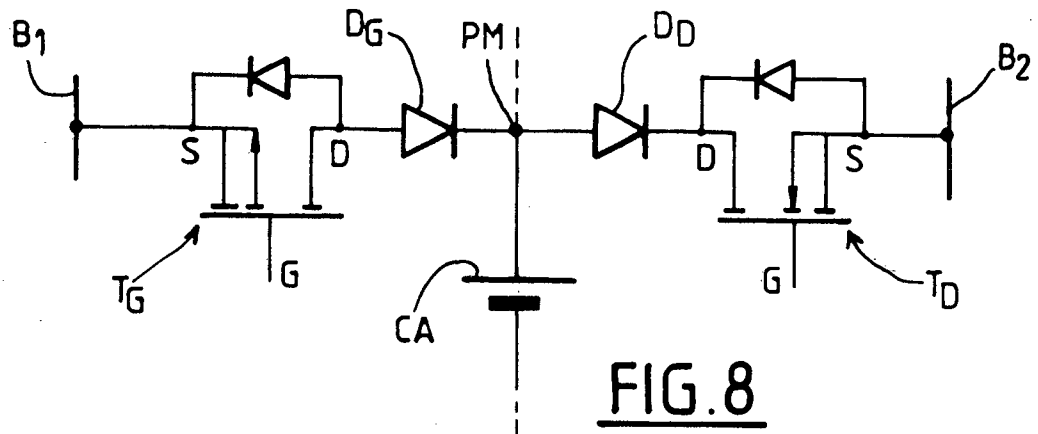


FIG. 8

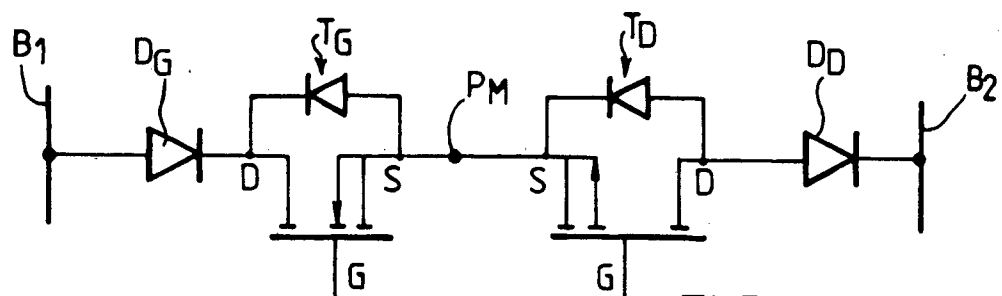
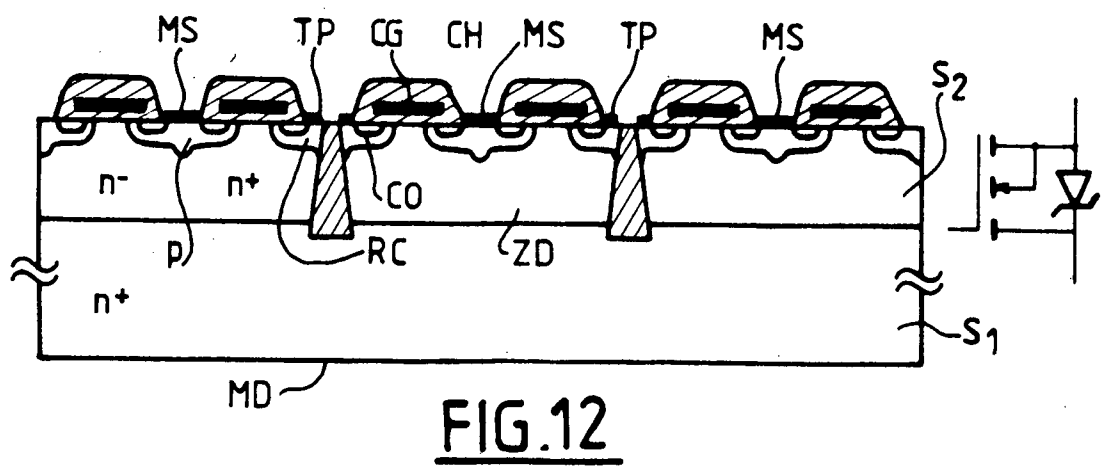
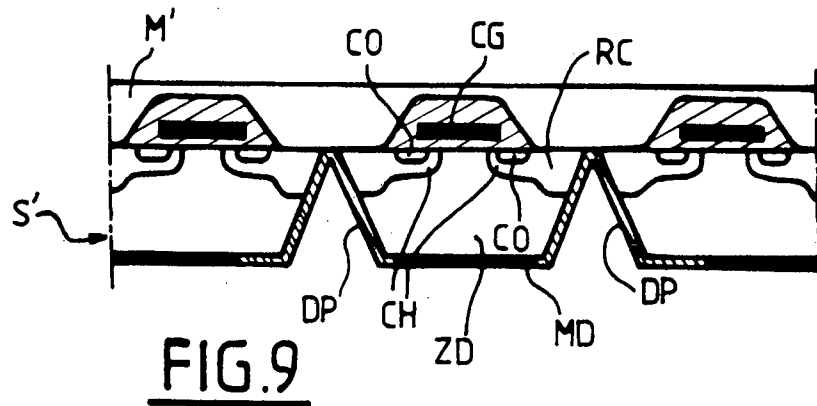
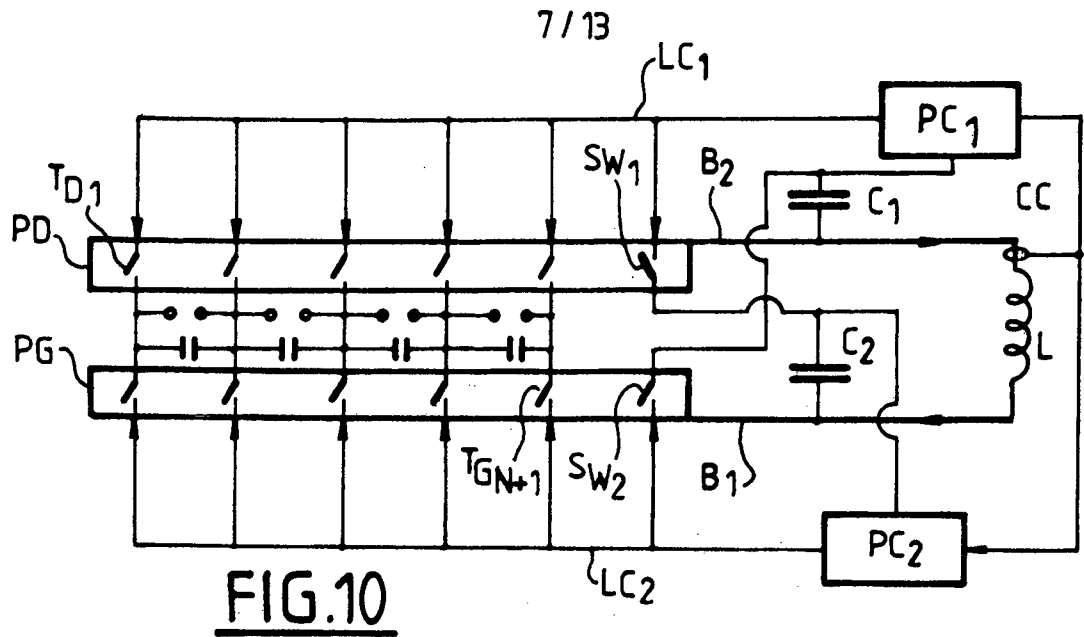


FIG. 11



8 / 13

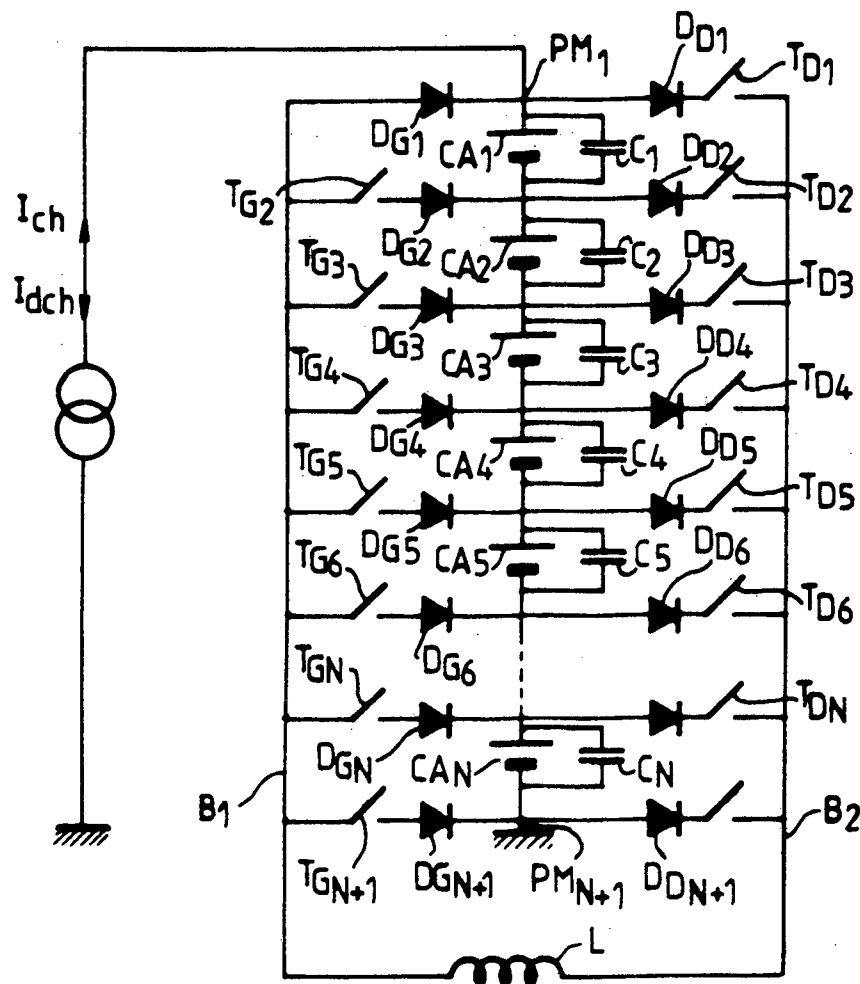


FIG. 13

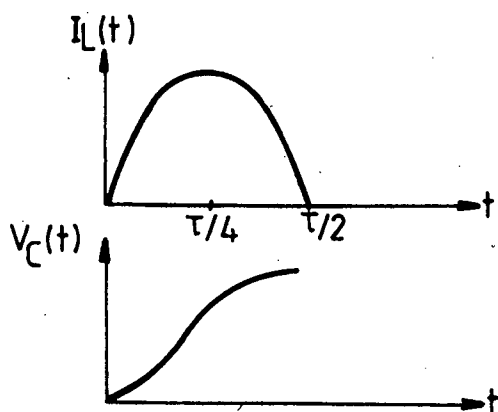
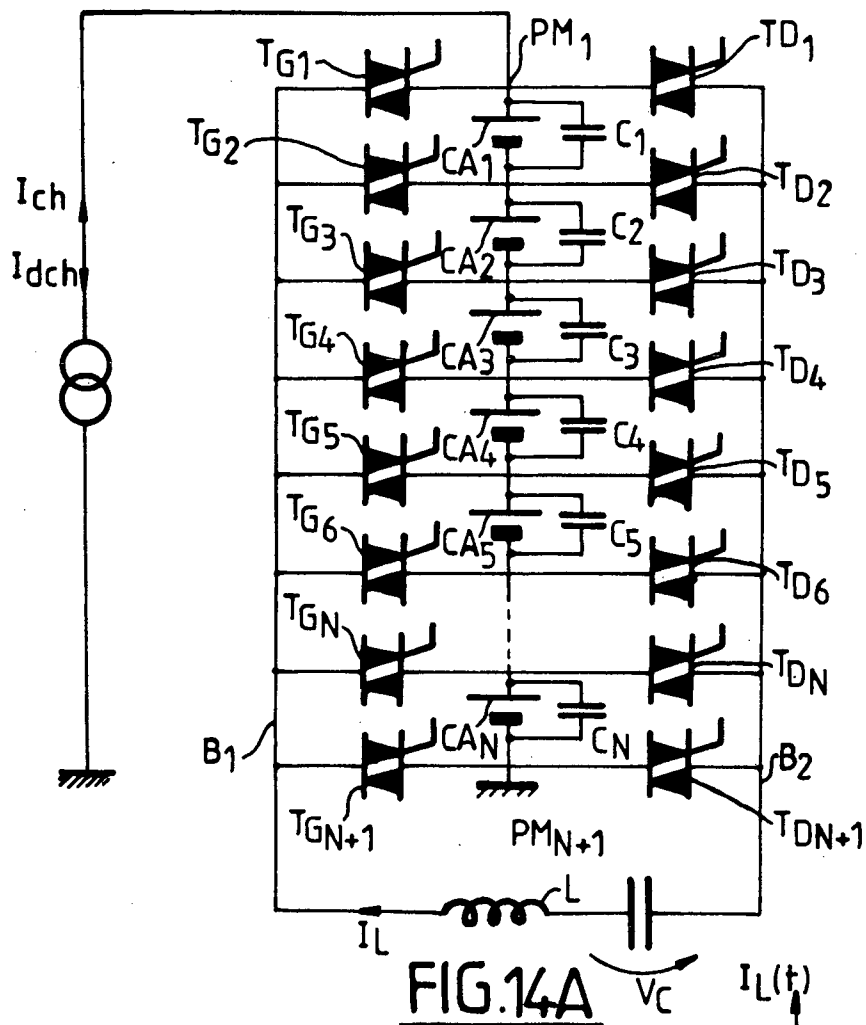


FIG. 14B

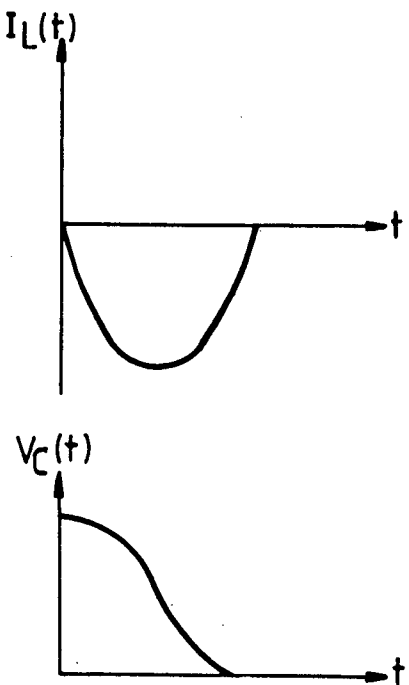


FIG.14C

10 / 13

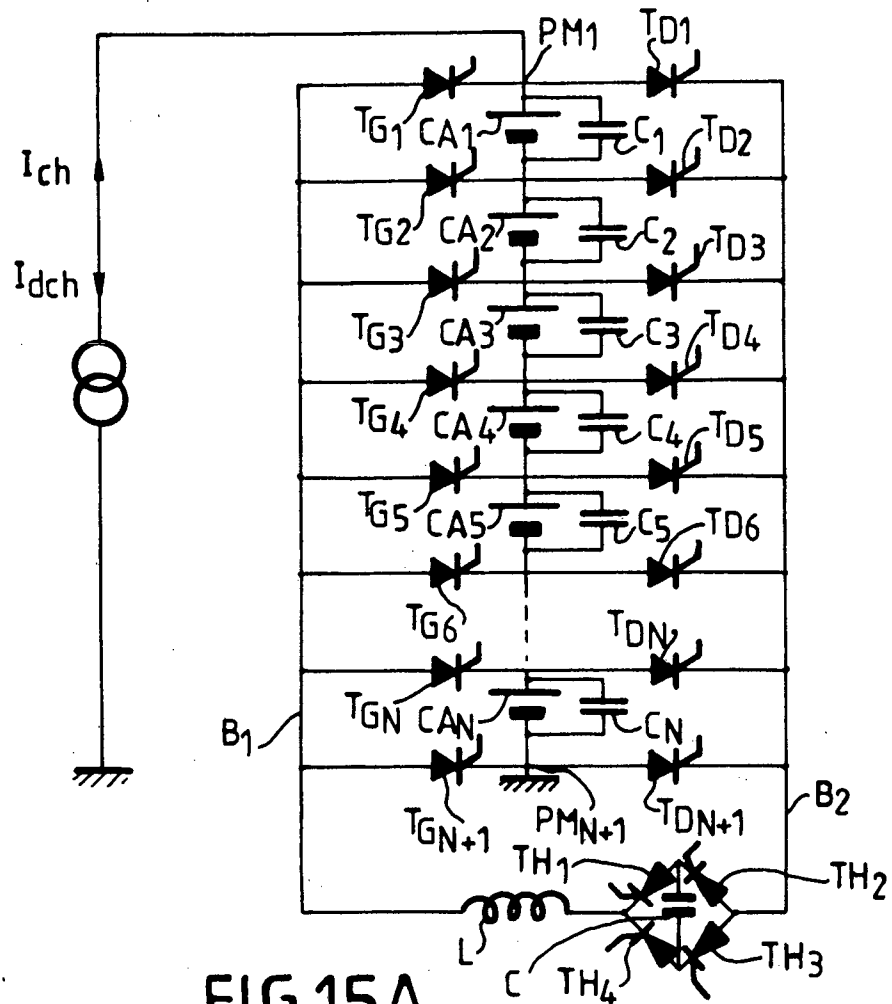


FIG.15A

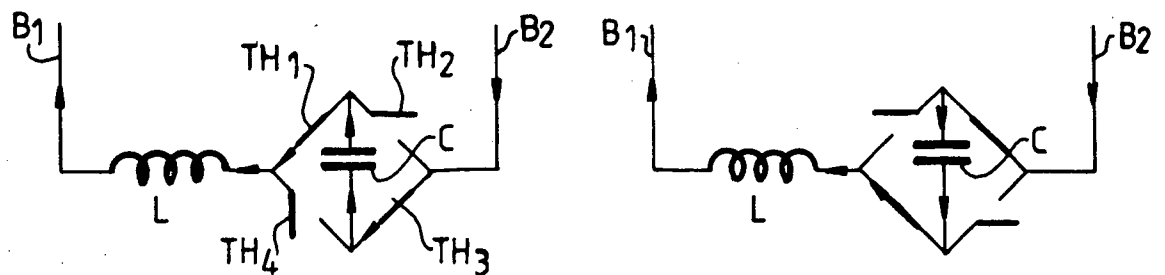
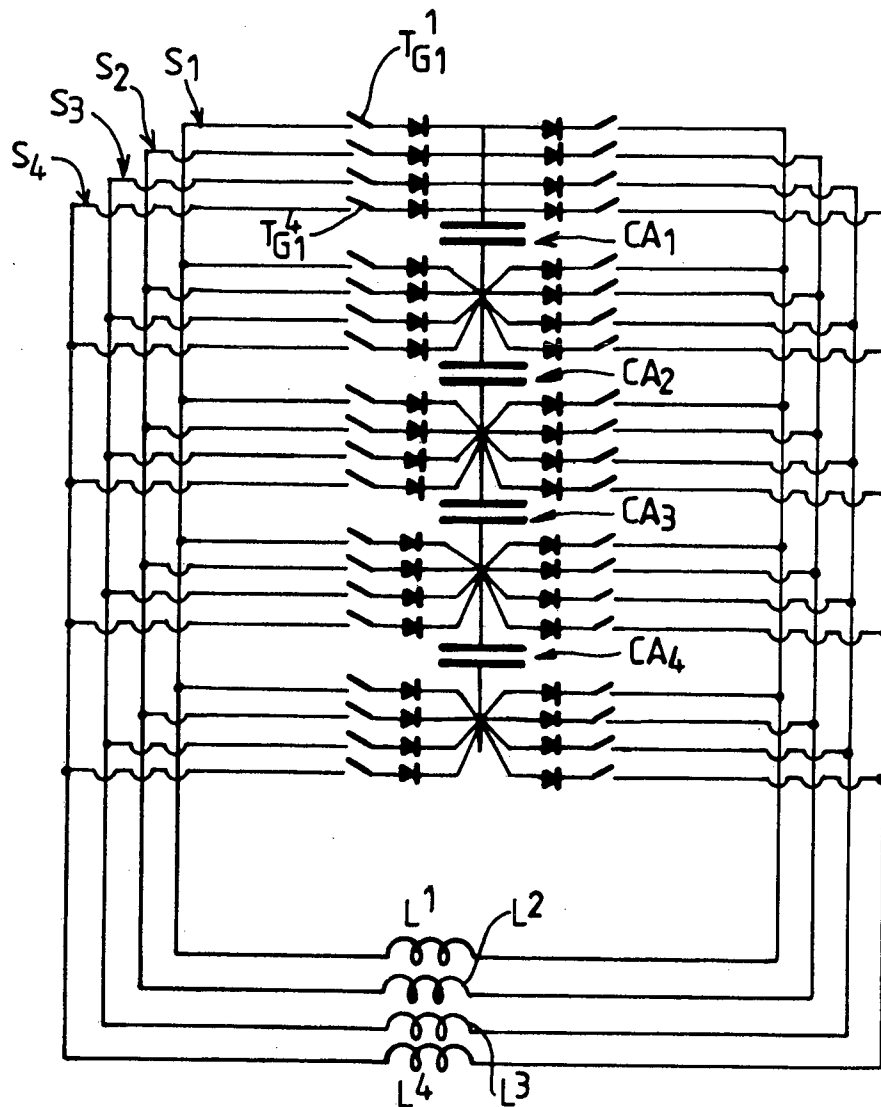


FIG.15B

FIG. 15C

11 / 13

FIG.16A

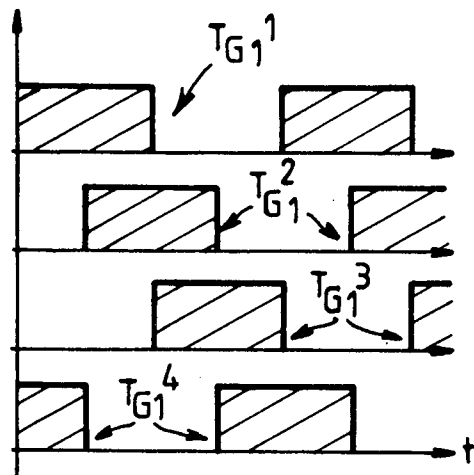


FIG. 16B

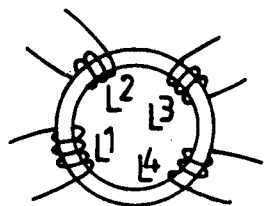


FIG. 16D

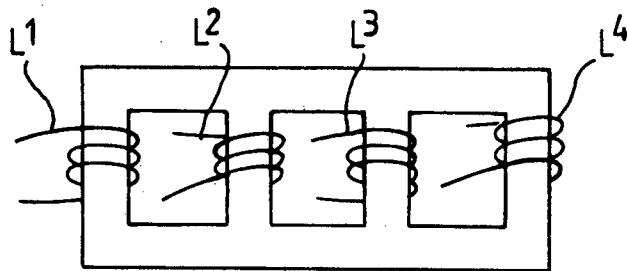


FIG. 16E

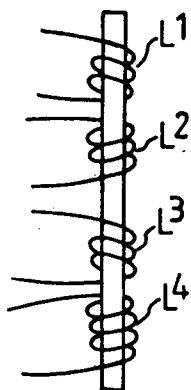


FIG. 16C

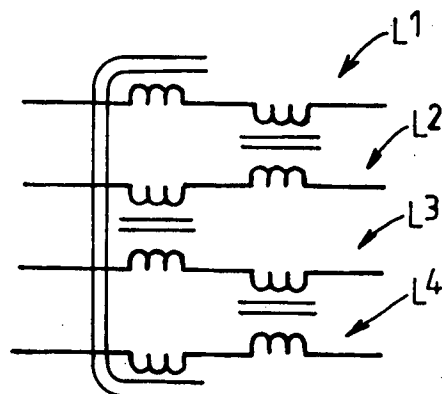
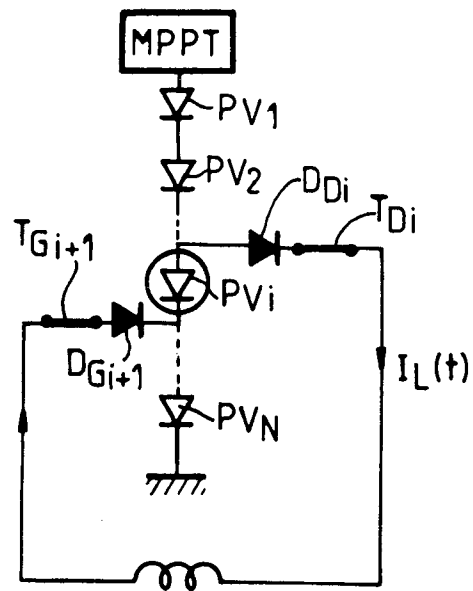
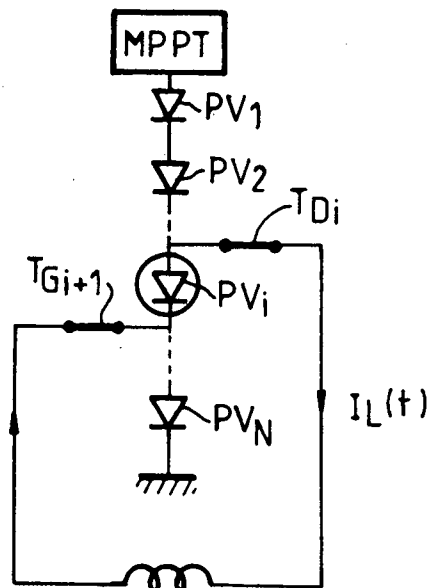


FIG. 16F

13 / 13

FIG.17FIG.18