

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

①① N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

**3 107 625**

②① N° d'enregistrement national : **20 01803**

⑤① Int Cl<sup>8</sup> : **H 02 S 40/32** (2019.12), H 02 S 40/36, H 01 L 31/042

⑫

## BREVET D'INVENTION

**B1**

⑤④ Architecture d'installations photovoltaïques.

②② Date de dépôt : 24.02.20.

③⑦ Priorité :

④③ Date de mise à la disposition du public  
de la demande : 27.08.21 Bulletin 21/34.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du  
brevet d'invention : 18.02.22 Bulletin 22/07.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche :

*Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑥⑦ Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *ELECTRICITE DE FRANCE Société  
Anonyme — FR.*

⑦② Inventeur(s) : HADBI Djamel.

⑦③ Titulaire(s) : *ELECTRICITE DE FRANCE Société  
Anonyme.*

⑦④ Mandataire(s) : Plasseraud IP.

**FR 3 107 625 - B1**



## Description

### Titre de l'invention : Architecture d'installations photovoltaïques

#### Domaine technique

[0001] L'invention relève du domaine de la production d'énergie par un ensemble d'au moins un module photovoltaïque.

#### Technique antérieure

[0002] Un module (ou panneau) photovoltaïque comprend une pluralité de cellules photovoltaïques, par exemple 60 ou 72 cellules. Depuis peu, un nouveau type de cellules photovoltaïques est apparu : les cellules tandem. Les cellules tandem présentent un rendement théorique de plus de 30% à comparer aux 22% des cellules classiques PERC industrielles (PERC pour « *Passivated Emitter and Rear Cell* »).

[0003] Les cellules tandem sont composées d'un empilement de couches de matériaux semi-conducteurs différents, chaque jonction P-N formant une sous-cellule et présentant donc des propriétés différentes. Les conditions de fonctionnement optimales pour la conversion d'énergie sont différentes en fonction de la nature des dites couches. Autrement dit, les cellules tandem permettent à la cellule dans son ensemble d'être efficace sur une plus grande variété de conditions de fonctionnement, rendant les installations plus souples en termes de conditions météorologiques, notamment les gammes de spectre lumineux, l'intensité de l'éclairement et la température.

[0004] Lorsque plusieurs types de jonctions P-N sont présentes, chaque cellule peut présenter deux terminaux (ou bornes électriques). Les sous-cellules sont alors connectées en série. De telles cellules peuvent alors être raccordées de manière classique au reste de l'installation, à la place de cellules usuelles telles que les cellules PERC. Cependant, en pratique, le rendement de chaque cellule est limité par le plus faible courant de l'ensemble des jonctions. Dans d'autres cas, chaque cellule peut présenter un nombre de terminaux égal au double du nombre de types de jonctions. Par exemple, chaque cellule présente quatre terminaux (ou bornes) électriques indépendants (une paire par jonction). Comme cela est indiqué dans US 2017/0040557, et comme pour les autres éléments des installations photovoltaïques, il est théoriquement possible d'associer à chaque sous-cellule un convertisseur. Cela permet de découpler le fonctionnement des sous-cellules et donc de rendre leur rendement indépendant les unes des autres. En pratique, il reste nécessaire de (au moins) doubler les autres composants de l'installation (connecteurs, câblages, onduleurs, etc.), ce qui augmente significativement les risques de dysfonctionnements et les coûts. En outre, les convertisseurs sont encombrants et sensibles à la chaleur due au rayonnement solaire, ce qui réduit encore en pratique la pertinence d'un tel système.

## Résumé

- [0005] La présente divulgation vient améliorer la situation.
- [0006] Il est proposé un système photovoltaïque comprenant un onduleur de sortie pour une connexion à un réseau tiers, et au moins une chaîne, chaque chaîne incluant au moins un module de cellules photovoltaïques tandem, chaque module présentant une première paire de connecteurs et une seconde paire de connecteurs,  
 les modules d'une chaîne étant reliés en série les uns aux autres par l'intermédiaire de leur première paire de connecteurs, les chaînes étant quant à elles reliées à l'onduleur de sortie en parallèle les unes des autres par l'intermédiaire de connecteurs de chaque chaîne parmi les premières paires de connecteurs,  
 plusieurs modules étant en outre reliés en parallèle via leurs secondes paires de connecteurs de manière à former un premier groupe, ledit premier groupe étant en outre couplé, via lesdites secondes paires de connecteurs, en amont de l'onduleur de sortie, à un second groupe de module(s) constitué d'un module seul ou d'une série de modules reliés en série entre eux par leurs premières paires de connecteurs.
- [0007] Les caractéristiques exposées dans les paragraphes suivants peuvent, optionnellement, être mises en œuvre. Elles peuvent être mises en œuvre indépendamment les unes des autres ou en combinaison les unes avec les autres :
- [0008] Chaque module comprend un convertisseur. Chaque première paire de connecteurs d'un module est couplé à la seconde paire de connecteurs dudit module par l'intermédiaire dudit convertisseur. Le convertisseur est piloté au moyen d'un algorithme de suivi du point maximal de puissance SPMP de sorte que la puissance soustraite via la seconde paire de connecteurs soit rendue indépendante des conditions de fonctionnement de la première paire de connecteurs.
- [0009] Le convertisseur est monté sur une face du module opposée à la face opérationnelle des cellules photovoltaïques, de sorte que le convertisseur est protégé des rayonnements solaires.
- [0010] Le premier groupe et le second groupe comprennent chacun un nombre de modules différent l'un de l'autre, de sorte que le rapport entre ces deux nombres peut être choisi pour correspondre au moins approximativement au rapport de tension ou de courant de fonctionnement unitaire de chacune des deux sous-cellules constituant les cellules photovoltaïques tandem.
- [0011] Le premier groupe et le second groupe comprennent les mêmes modules. Les modules d'une chaîne sont assemblés en série via leur première paire de connecteurs d'une part et via leurs secondes paires de connecteurs d'autre part. Chaque chaîne inclut en outre un convertisseur disposé en série ou en parallèle entre la chaîne formée via les premières paires de connecteurs et la chaîne formée via les secondes paires de connecteurs. Chaque convertisseur est piloté au moyen d'un algorithme de suivi du

point maximal de puissance SPMP de sorte que la puissance soustraite via la seconde paire de connecteurs soit rendue indépendante des conditions de fonctionnement de la première paire de connecteurs.

[0012] Le convertisseur, disposé en série ou en parallèle entre la chaîne formée via les premières paires de connecteurs et la chaîne formée via les secondes paires de connecteurs, est constitué de deux interrupteurs de puissances.

[0013] L'onduleur de sortie inclut un onduleur modulaire à multiples entrées, ledit onduleur étant piloté au moyen d'algorithmes de suivi du point maximal de puissance MPP indépendants sur chaque entrée de sorte que la puissance soustraite via les secondes paires de connecteurs soit rendue indépendante des conditions de fonctionnement des premières paires de connecteurs.

### **Brève description des dessins**

[0014] D'autres caractéristiques, détails et avantages apparaîtront à la lecture de la description détaillée ci-après, et à l'analyse des dessins annexés, sur lesquels :

#### **Fig. 1**

[0015] [fig.1] illustre des caractéristiques courant ou puissance en fonction de la tension d'un module classique pour différentes conditions de fonctionnement.

#### **Fig. 2**

[0016] [fig.2] montre une chaîne de cellules photovoltaïques tandem à deux terminaux.

#### **Fig. 3**

[0017] [fig.3] montre un détail d'une cellule photovoltaïque tandem à deux terminaux.

#### **Fig. 4**

[0018] [fig.4] montre une chaîne de cellules photovoltaïques tandem à quatre terminaux.

#### **Fig. 5**

[0019] [fig.5] montre un détail d'une cellule photovoltaïque tandem à quatre terminaux.

#### **Fig. 6**

[0020] [fig.6] montre une chaîne de cellules photovoltaïques tandem à trois terminaux.

#### **Fig. 7**

[0021] [fig.7] montre un détail d'une cellule photovoltaïque tandem à trois terminaux.

#### **Fig. 8**

[0022] [fig.8] représente un module photovoltaïque à deux terminaux.

#### **Fig. 9**

[0023] [fig.9] illustre des caractéristiques de courant en fonction de la tension du module de la figure précédente.

#### **Fig. 10**

[0024] [fig.10] représente un module photovoltaïque à quatre terminaux.

#### **Fig. 11**

[0025] [fig.11] illustre des caractéristiques de courant en fonction de la tension du module de la figure précédente.

**Fig. 12**

[0026] [fig.12] représente un système photovoltaïque à modules à deux terminaux.

**Fig. 13**

[0027] [fig.13] représente un système photovoltaïque à modules à quatre terminaux (connectique, câbles et onduleur dédoublés).

**Fig. 14**

[0028] [fig.14] représente un module photovoltaïque à quatre terminaux dont les sorties sont mises en série.

**Fig. 15**

[0029] [fig.15] illustre des caractéristiques de courant en fonction de la tension du module de la figure précédente.

**Fig. 16**

[0030] [fig.16] représente un module photovoltaïque à quatre terminaux dont les sorties sont mises en parallèle.

**Fig. 17**

[0031] [fig.17] illustre des caractéristiques de courant en fonction de la tension du module de la figure précédente.

**Fig. 18**

[0032] [fig.18] représente un module photovoltaïque à quatre terminaux dont les sorties sont couplées selon un exemple d'un mode de réalisation A.

**Fig. 19**

[0033] [fig.19] illustre des caractéristiques de courant en fonction de la tension du module de la figure précédente.

**Fig. 20**

[0034] [fig.20] représente un système photovoltaïque à modules à quatre terminaux dont les sorties sont couplées selon un exemple d'un mode de réalisation B.

**Fig. 21**

[0035] [fig.21] représente un système photovoltaïque à modules à quatre terminaux dont les sorties sont couplées selon un exemple d'un mode de réalisation C1.

**Fig. 22**

[0036] [fig.22] représente un système photovoltaïque à modules à quatre terminaux dont les sorties sont couplées selon un exemple d'un mode de réalisation C2.

**Fig. 25**

[0037] [fig.23] représente un système photovoltaïque à modules à quatre terminaux dont les sorties sont couplées selon un exemple d'un mode de réalisation D.

[0038] Les dessins et la description ci-après contiennent, pour l'essentiel, des éléments de caractère certain. Ils pourront donc non seulement servir à mieux faire comprendre la présente divulgation, mais aussi contribuer à sa définition, le cas échéant.

[0039] Dans la suite, il est considéré que :

- un « système » désigne une installation photovoltaïque dans son ensemble, tel une usine de production d'énergie électrique incluant une pluralité de « modules » photovoltaïques ;
- un « module » désigne ce qu'on appelle couramment un panneau photovoltaïque et incluant une pluralité de « cellules » photovoltaïques (ici des cellules tandem ; usuellement 60 ou 72 cellules par module) ;
- une « cellule » tandem désigne la réunion de plusieurs « sous-cellules », généralement sous la forme d'un empilement de couches ;
- une « sous-cellule » désigne la combinaison de deux couches de matériaux différents formant une jonction P-N et à l'origine du phénomène physique de génération d'électricité sous l'effet d'un éclairage.

### **Principes physiques**

[0040] Pour une bonne performance d'un système photovoltaïque (typiquement une usine de production, ou « ferme photovoltaïque »), le rendement des composants élémentaires est une des clés. Les cellules tandem présentent en théorie un bon rendement.

[0041] En particulier, comme pour les cellules photovoltaïques classiques (non tandem), les caractéristiques (tension et courant) des sous-cellules sont différentes les unes des autres. Chaque sous-cellule, chaque cellule, chaque module photovoltaïque, chaque chaîne et chaque système présente un point de production maximum théorique (ou MPP pour « *Maximum Power Point* ») défini par des conditions de courant et de tension de fonctionnement. Ce MPP varie d'un élément à l'autre. Le MPP dépend notamment :

- des propriétés intrinsèques des éléments, qui peuvent être différentes en fonction des conditions de fabrication, même entre deux modèles théoriquement identiques, et qui sont volontairement différentes entre deux sous-cellules d'une cellule tandem,
- du vieillissement,
- de la salissure,
- de l'éclairage (exposé au soleil ou à l'ombre),
- de la température.

[0042] Il est maintenant fait référence à la [fig.1]. À titre d'exemple, il y est représenté la dépendance des caractéristiques de courant, tension, puissance, température et éclairage d'un module à base de cellules non tandem (une unique jonction P-N par cellule). De manière grossière, on peut considérer que l'irradiation lumineuse influence majoritairement le courant produit alors que la tension varie peu en comparaison. Au

contraire, la température influence davantage la tension, les écarts de courant étant plus faibles.

- [0043] Dans les installations classiques, les caractéristiques de certains éléments sont maîtrisées via des onduleurs pilotés au moyen d'un algorithme MPPT (« *Maximum Power Point Tracker* ») qui permet de se placer au plus près d'un point de puissance maximale en imposant le courant ou la tension.
- [0044] Remplacer les cellules classiques par des cellules tandem dans des systèmes existants conduit à limiter le rendement de chaque cellule tandem au plus faible rendement des sous-cellules qui la compose. De même, cela conduit à limiter le rendement de chaque module de cellules tandem au plus faible rendement des cellules qui le compose. Le rendement global réel du système s'en trouve limité. La différence entre le rendement réel et le rendement théorique est d'autant plus dégradée que la puissance du spectre lumineux est réduite ou que l'énergie photon moyenne (ou APE pour « *Average Photon Energy* ») est faible, par exemple inférieure à 1,78eV, ce qui correspond à des conditions d'ensoleillement hivernales fréquentes en France métropolitaine.
- [0045] En combinaison de l'utilisation de cellules tandem, il est donc préférable d'exploiter l'énergie disponible dans chaque sous-cellule quelles que soient les conditions météorologiques en découplant les sous-cellules hétérogènes entre elles. L'optimisation de l'environnement immédiat des cellules est donc aussi une des clés d'une bonne performance énergétique : l'intégralité de la chaîne de conversion doit être adaptée pour préserver le gain de rendement permis par les cellules tandem, depuis les couches P-N des sous-cellules jusqu'au nœud de connexion au réseau de transport ou de distribution.
- [0046] Chaque élément du système présente un MPP qui lui est propre à chaque instant. Il est donc possible de prévoir des convertisseurs pilotés qui permettent de faire varier les conditions de fonctionnement (courant et tension) des éléments auxquels ils sont associés.
- [0047] En théorie, il est possible de faire fonctionner chacun des éléments dans des conditions de courant et de tension contrôlées individuellement en équipant chaque élément d'un onduleur piloté au moyen d'un algorithme MPPT. Cependant, le nombre d'optimiseurs et les propriétés des optimiseurs adaptés aux grandes puissances rendent les coûts d'installation et de maintenance prohibitifs, en particulier pour les installations de forte puissance.

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

- [0048] Dans la suite, les cellules photovoltaïques sont des cellules tandem, c'est-à-dire comprenant une pluralité de sous-cellules (deux sous-cellules dans les exemples représentés). Au sein d'une cellule tandem, référencée 1 dans la suite, les deux sous-

cellules sont de natures physiques différentes l'une de l'autre, ce qui leur confère des comportements et propriétés différentes sous l'effet d'un éclairage. Par conséquent, en fonctionnement sous un éclairage similaire, la tension et le courant aux bornes de chacune des sous-cellules sont généralement différents pour chacune des sous-cellules.

- [0049] Il est maintenant fait référence aux [fig.2] et [Fig. 3]. Une chaîne 101 de cellules 1 reliées en série les unes aux autres y est représentée. Dans cet exemple, les sous-cellules sont connectées en série l'une avec l'autre. Ainsi, la cellule 1 présente seulement deux terminaux T1 et T2 (ou bornes de connexion). Dans cet exemple simplifié, la chaîne 101 unique peut être vue comme un module à elle seule. Un tel module présente alors lui-même seulement deux terminaux T1 et T2 (en haut sur la [Fig. 2]). De telles cellules sont alors compatibles avec des infrastructures existantes de modules accueillant des cellules à deux connecteurs. De tels modules sont alors compatibles avec des infrastructures existantes de systèmes accueillant des modules à deux connecteurs. La simplification et la rétrocompatibilité est améliorée au détriment du rendement énergétique qui est limité par le plus faible courant des deux sous-cellules (ou des deux jonctions P-N).
- [0050] Chaque chaîne et/ou module peut comprendre en outre une diode disposée entre les deux terminaux T1 et T2. Cela permet d'empêcher l'inversion du courant et donc que la chaîne et/ou le module consomment l'électricité du réseau externe auquel il/elle est connecté.
- [0051] Il est maintenant fait référence aux [fig.4] et [Fig. 5]. Les sous-cellules sont similaires à celles des [Fig. 2] et [Fig. 3]. En revanche, les sous-cellules ne sont pas connectées l'une à l'autre en série mais restent indépendantes l'une de l'autre. Ainsi, la cellule 1 présente quatre terminaux, soit deux paires : T1 et T2 d'une part et T3 et T4 d'autre part. Dans cet exemple simplifié, une première chaîne 101 similaire à celle des [Fig. 2] et [Fig. 3] correspond à la mise en série des cellules 1 via leur première paire de terminaux T1 et T2. La chaîne 101 présente alors aussi deux terminaux T1 et T2 (en haut sur la [Fig. 4]). En outre, une deuxième chaîne 102 similaire à la première correspond à la mise en série des cellules 1 via leur deuxième paire de terminaux T3 et T4. La chaîne 102 présente alors, aussi, deux terminaux T3 et T4 (en bas sur la [Fig. 4]). Bien que les deux sous-cellules soient physiquement solidaires l'une de l'autre au sein de chaque cellule 1, les courants issus de chacun des deux types de sous-cellules sont dissociés en sortie de la cellule 1. Deux jeux de connectiques propres à chacun des deux types de sous-cellules sont mis en œuvre.
- [0052] Électriquement, chacune des deux sorties T1-T2 et T3-T4 de l'assemblage représenté en [fig.4] peut être vue comme un sous-module photovoltaïque indépendant l'un de l'autre. Il devient donc possible, au moins en théorie, d'extraire un maximum de puissance pour chaque sous cellule (chaque jonction) en fonction de sa nature et

notamment du matériau semi-conducteur utilisé. Pour cela, des réseaux indépendants (isolés électriquement les uns des autres) peuvent être prévus en aval. Cela implique, pour les cas de cellules tandem à deux sous-cellules, de doubler les câbles, de doubler les contacts, de doubler les onduleurs et de doubler les composants de pilotage par rapport aux installations existantes à cellules classiques (non tandem). Cela augmente d'autant les risques de dysfonctionnement et les coûts tant à l'installation qu'à l'entretien. En outre, de telles cellules sont souvent incompatibles avec les infrastructures existantes de modules et systèmes à deux connecteurs. Le rendement théorique, qui n'est plus limité par le plus faible courant des deux sous-cellules (ou des deux jonctions P-N), est amélioré au détriment de la rétrocompatibilité et de la fiabilité.

- [0053] Il est maintenant fait référence aux [fig.6] et [Fig. 7]. Cet exemple peut être vu comme une solution hybride des deux précédentes. Par comparaison avec l'exemple des [Fig. 4] et [Fig. 5], un potentiel commun est créé entre les deux sous-cellules. Une ligne d'extraction de courant sur l'une des deux sous-cellules est créée afin d'empêcher l'égalisation du courant traversant les deux sous-cellules (les deux jonctions). Cela permet théoriquement d'atteindre des rendements similaires à ceux de l'architecture précédentes ([Fig. 6] et [Fig. 7]) en réduisant la sortie à seulement trois connectiques au lieu de quatre. Une telle architecture est particulièrement adaptée aux cellules à base de silicium ayant une structure à contact arrière interdigité (ou IBC pour « interdigitated back contact »), notamment car leurs contacts sont intégralement reportés sur une de leur face. De tels cellules restent néanmoins complexes (et donc coûteuses) à fabriquer.
- [0054] Dans ce qui suit, des modes de réalisation qui permettent d'améliorer la situation par rapport aux exemples du mode de réalisation de la [fig.2]. Ces modes de réalisation, en particulier combinés aux architectures à quatre terminaux (ou 4T) de la [Fig. 4] et/ou à trois terminaux (ou 3T) de la [Fig. 6] permettent à la fois un découplage des sous-cellules des cellules tandem, en aval des cellules elles-mêmes, de manière à profiter en pratique du bon rendement théorique des cellules tandem tout en évitant la multiplication des raccordements, câblages et composants électriques.
- [0055] Dans un module tandem, les performances de chaque jonction sont différentes à cause des caractéristiques différentes des matériaux semi-conducteurs. De plus, ces caractéristiques physiques (tels que l'énergie de bande interdite ou les coefficients de température) évoluent différemment par rapport à l'irradiation solaire et à la température.
- [0056] Il est maintenant fait référence aux [fig.8], [Fig. 9], [Fig. 10] et [Fig. 11]. La [Fig. 8] illustre un module à deux terminaux T1 et T2 tandis que la [Fig. 9] illustre les caractéristiques du module à deux terminaux T1 et T2. Plus la courbe est « large » (courant

constant pour une large gamme de tensions), plus la puissance développée par un module est grande. La [Fig. 10] illustre un module à quatre terminaux T1 à T4 tandis que la [Fig. 11] illustre les caractéristiques du module à quatre terminaux T1 à T4. La caractéristique courant-tension du module à deux terminaux T1-T2 est unique tandis que chaque paire T1-T2 et T3-T4 du module à quatre terminaux présente une caractéristique courant-tension qui lui est propre et fonction de l'architecture des modules (énergie de bande interdite et transmission intermédiaire) mais également des conditions climatiques subies par le module (température et irradiation lumineuse).

- [0057] Il est maintenant fait référence à la [fig.12]. La [Fig. 12] représente un système 10 photovoltaïque. Le système 10 comprend un onduleur de sortie 11. Le système 10 est relié en sortie à un réseau tiers 1000 par l'intermédiaire de l'onduleur de sortie 11. Le système 10 comprend en outre une pluralité de chaînes portant chacune un indice  $i$ ,  $i$  étant un entier positif allant de 1 à  $I$  où  $I$  est le nombre de chaînes. Chaque chaîne inclut une pluralité de modules 1 de cellules photovoltaïques tandem. Chaque module  $1_{i,j}$  porte l'indice  $i$  de la chaîne à laquelle il appartient et un indice  $j$  l'identifiant au sein de la chaîne,  $j$  étant un entier positif allant de 1 à  $J$  où  $J$  est le nombre de modules 1 de la chaîne.
- [0058] Dans une installation avec des modules 1 à une seule paire de connecteurs T1-T2 (par exemple tels que représenté aux [fig.2], [Fig. 3], [Fig. 8] et [Fig. 9]) les modules sont raccordés en série afin d'atteindre un niveau de tension exploitable par des convertisseurs de puissance moyenne, par exemple entre 800 V et 1 500 V. Les chaînes sont connectées en parallèle les unes des autres afin d'additionner leurs courants et d'atteindre un niveau de puissance élevé. L'architecture la plus simple comprend un unique onduleur de sortie 11 sur lequel est raccordé l'ensemble des chaînes de modules. L'onduleur de sortie 11 est relié, en sortie, au réseau tiers 1000. Une telle architecture est particulièrement adaptée aux centrales de très fortes puissance car elle est particulièrement fiable et économique : un unique convertisseur est suffisant et peu coûteux rapporté à la quantité d'énergie fournie sur le réseau tiers 1000. Un jeu de capteurs et un sous-système de contrôle-commande et de surveillance est suffisant.
- [0059] Il est maintenant fait référence à la [fig.13]. Chaque module  $1_{i,j}$  présente une première paire de connecteurs  $T1_{i,j}, T2_{i,j}$  et une seconde paire de connecteurs  $T3_{i,j}, T4_{i,j}$ , les indices correspondant à ceux du module  $1_{i,j}$ . Les modules  $1_{i,j}$  sont reliés par l'intermédiaire de leur première paire de connecteurs  $T1_{i,j}, T2_{i,j}$  de manière identique à ce qui a été décrit ci-avant pour la [Fig. 12]. Les modules  $1_{i,j}$  sont en outre reliés par l'intermédiaire de leur seconde paire de connecteurs  $T3_{i,j}, T4_{i,j}$  de manière identique à ce qui a été décrit ci-avant pour la [Fig. 12] mais au moyen de câblages distincts de ceux utilisés pour les premières paires de connecteurs  $T1_{i,j}, T2_{i,j}$ . De même, un second onduleur de sortie 11 est disposé entre le second câblage et le réseau

tiers 1000.

[0060] Une telle architecture s'obtient donc en doublant les équipements de raccordement et de conversion. Bien que les modules soient à base de cellules tandem, chaque paire de terminaux se comporte comme un module indépendant : les terminaux de même type sont raccordés en série afin d'atteindre un niveau de tension exploitable (par exemple entre 800 V et 1 500 V), notamment si on souhaite utiliser le même type d'onduleurs pour les deux réseaux. En variante, les deux types de terminaux peuvent correspondre à des tensions différentes l'une de l'autre. Des onduleurs de sortie différents peuvent alors être mis en œuvre.

[0061] Dans une telle architecture, les deux réseaux sont dédoublés ce qui double la complexité, le risque de défaillance, le coût en équipement, en installation et en entretien par rapport à l'architecture de la [fig.12].

### **Modes de réalisation A**

[0062] Il est maintenant fait référence aux [fig.14] et [Fig. 15]. Les bornes T2 et T3 sont reliées l'une à l'autre de sorte que le module passe de quatre bornes à deux bornes (mise en série). Comme le montre la [Fig. 15], la mise en série des sorties impose que le courant qui traverse les deux sorties soit limité par le courant le plus faible. La caractéristique résultante est inférieure à la somme des caractéristiques des deux sorties indépendantes (T1-T2 et T3-T4). De plus, dès que la caractéristique T3-T4 descendra en courant (pour cause de sous-performance notamment en raison d'une baisse de l'éclairage), elle tira la caractéristique résultante T1-T4 vers le bas également.

[0063] Il est maintenant fait référence aux [fig.16] et [Fig. 17]. Les bornes T2 et T4 sont reliées l'une à l'autre de sorte à être mis à équipotentiel, les bornes T1 et T3 étant aussi reliées l'une à l'autre pour la même raison, le module passant de quatre bornes à deux bornes (mise en parallèle). Comme le montre la [Fig. 17], la mise en parallèle impose que la caractéristique résultante est inférieure à la somme des caractéristiques des deux sorties indépendantes. De plus, dès que la caractéristique T3-T4 sera tirée vers le gauche, c'est-à-dire un courant maintenu pour une plage de tension plus réduite (pour cause de sous-performance, notamment en raison d'une augmentation de la température), la caractéristique résultante sera également tirée vers la gauche.

[0064] Il est maintenant fait référence aux [fig.18] et [Fig. 19]. Un convertisseur 12 DC-DC (courant continu-courant continu) est disposé entre la première paire de connecteurs T1-T2 et la deuxième paire de connecteurs T3-T4. Le convertisseur 12 peut être, par exemple, un simple convertisseur « boost » (ou hacheur parallèle). Il peut être composé notamment de deux interrupteurs semi-conducteurs : un transistor et une diode. Le contrôle du convertisseur 12 peut comprendre la mise en œuvre d'un un algorithme MPPT pour optimiser la puissance soustraite à la deuxième paire de connecteurs T3-T4 indépendamment du point de fonctionnement de la première paire de connecteurs

T1-T2. Ainsi, grâce au convertisseur 12, le découplage électrique des deux sorties tandem est assuré et la caractéristique de sortie du module tandem est plus large.

[0065] Structurellement, le convertisseur 12 peut être intégré au module tandem, de sorte que la sortie du module en aval du convertisseur 12 est équivalente à un module à deux connecteurs, ce qui permet d'adapter un tel module aux architectures classiques existantes.

[0066] Une telle solution permet une optimisation permanente de la puissance produite quelles que soient les conditions de fonctionnement (irradiation solaire et température). Elle nécessite un unique convertisseur 12 par module (et non un par cellule). Par comparaison aux modules dont chaque cellule est équipée d'un convertisseur, le coût et les risques de défaillance sont drastiquement réduits : un convertisseur par module suffit au lieu de 60 ou 72 dans les modules connus.

[0067] De préférence, le convertisseur 12 est disposé au dos du module (du côté du module non exposé au soleil). En étant protégé des rayonnements directs du soleil et de la haute température, les risques d'échauffements du convertisseur sont limités.

### **Modes de réalisation B**

[0068] Il est maintenant fait référence à la [fig.20] correspondant au mode de réalisation B.

[0069] Dans le mode de réalisation B, une pluralité de modules 1 sont mis en parallèle via leur deuxième paire T3-T4 pour atteindre une gamme de courant équivalente à celle d'un unique module 1 via sa première paire T1-T2. Pour éviter de surcharger la figure, une unique mise en parallèle est représentée en [fig.20]. En pratique, plusieurs mises en parallèle sont appliquées sur le système 10. Pour déterminer le nombre de modules à mettre en parallèle via la seconde paire de connecteurs T3-T4, le rapport  $b$  des courants entre les deux paires est calculé ( $I_{T1-T2}/I_{T3-T4}=b$ ).  $b$  étant le nombre entier (arrondi) de modules 1 à mettre en parallèle. Sur la [Fig. 20], un exemple avec  $b=3$  est représenté.

[0070] Le mode de réalisation B et ses variantes permettent, avec un coût relativement faible (connexion et câbles), de raccorder des paires de connecteurs présentant des caractéristiques différentes. Le point de fonctionnement reste limité par la tension la plus basse ce qui limite la production de chaque paire notamment lorsque le point de fonctionnement change en raison d'un changement d'irradiation solaire ou de température.

### **Modes de réalisation C**

[0071] Il est maintenant fait référence aux [fig.21] et [Fig. 22] correspondant respectivement aux modes de réalisation C1 et C2. Dans ces deux modes de réalisation, les convertisseurs 12 sont mutualisés par comparaison avec le mode de réalisation A. Les deuxièmes paires de connecteurs T3-T4 sont reliés en groupes chacune à une première paire de connecteurs T1-T2 par l'intermédiaire d'un convertisseur 12 commun. Cela

est pertinent car les sorties tandem d'une même chaîne subissent généralement les mêmes conditions de fonctionnement. Pour des modules de même type, les caractéristiques en sortie d'usine sont très semblables et le restent pendant leur durée de vie utile. Il est donc raisonnable de considérer que leur MPP soit semblable en fonctionnement.

[0072] Dans le mode de réalisation C1 ([fig.21]), les deuxièmes connecteurs T3-T4 sont raccordés en parallèle des premiers connecteurs T1-T2 sur le bus principal par l'intermédiaire du convertisseur 12. Les deuxièmes connecteurs T3-T4 forment un bus secondaire tandis que les premiers connecteurs T1-T2 forment le bus principal. Les deux bus sont reliés l'un à l'autre en parallèle, chacun via un convertisseur 11, 12. Dans le mode de réalisation C2 ([Fig. 22]), les deuxièmes connecteurs T3-T4 sont raccordés en série des premiers connecteurs T1-T2 sur le bus principal par l'intermédiaire du convertisseur 12. Les deux bus sont reliés l'un à l'autre en série, chacun via l'onduleur de sortie 11 et le convertisseur 12.

[0073] Une combinaison des modes de réalisation B et C peut permettre d'atteindre un bon compromis coût-complexité. Par exemple, les modes C1 ou C2 (convertisseurs mutualisés sur plusieurs modules) permettent de lisser, en sortie, les éventuelles différences restantes.

### **Modes de réalisation D**

[0074] Il est maintenant fait référence à la [fig.23] correspondant au mode de réalisation D. Dans ce mode de réalisation, le convertisseur 13 est particulier. Le convertisseur 13 inclut un onduleur central modulaire de type CHB ou MMC (CHB pour « Cascaded H Bridge » et MMC pour « Convertisseur Modulaire Multiniveaux »). Le convertisseur 13 permet de raccorder des deuxièmes paires T3-T4 (mises en série et/ou en parallèle) directement au niveau d'un ou plusieurs sous-modules. La fonction d'optimisation des deuxièmes paires T3-T4 peut alors être intégrée au contrôleur du convertisseur 13, formant ici onduleur central. L'onduleur centrale modulaire réalise assure alors en outre la fonction de découplage entre les premières et deuxièmes paires T1-T2 et T3-T4 qui présentent des caractéristiques différentes. Aucun convertisseur DC-DC supplémentaire n'est nécessaire.

### **Applications industrielles**

[0075] Les modes de réalisation A sont applicables à l'ensemble des installations photovoltaïques. Un module à quatre connecteurs selon le mode de réalisation A se comporte comme un module classique avec un meilleur rendement. Il peut donc être utilisé dans de petites installations domestiques, en toiture de bâtiments et en centrales photovoltaïques. Cette solution peut donc être appliquée aux nouvelles installations comme à la rénovation d'installations existantes.

- [0076] Les modes de réalisation B et C sont applicables à l'ensemble des installations photovoltaïques disposant d'au moins une chaîne de modules.
- [0077] Le mode de réalisation D est particulièrement adapté aux installations de grande dimension et peut remplacer avantageusement les solutions existantes à base d'onduleur de type « string » ou de type « central ».
- [0078] La présente divulgation ne se limite pas aux exemples de systèmes décrits ci-avant, seulement à titre d'exemple, mais elle englobe toutes les variantes que pourra envisager l'homme de l'art dans le cadre de la protection recherchée. En particulier, les différents modes de réalisation sont combinables les uns avec les autres, notamment à différents niveaux des systèmes (cellules, sous-modules, modules, chaînes, bus, système).

### **Liste des signes de référence**

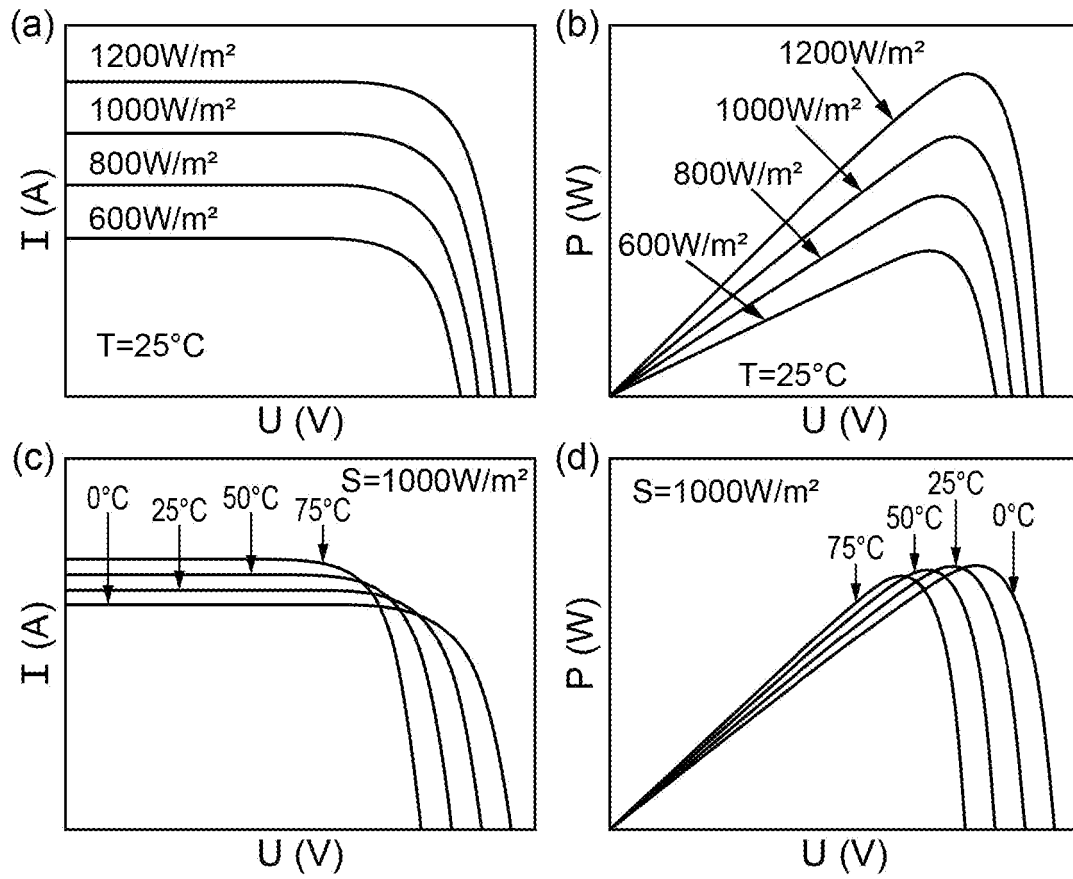
- [0079] - 1 : Module ;  
- 10 : Système ;  
- 11 : Onduleur de sortie ;  
- 12 : Convertisseur ;  
- 13 : Convertisseur + Onduleur de sortie ;  
- 101, 102 : Chaîne ;  
- 1000 : Réseau tiers.

## Revendications

- [Revendication 1] Système photovoltaïque comprenant un onduleur de sortie (11, 13) pour une connexion à un réseau tiers (1000), et au moins une chaîne (i), chaque chaîne incluant au moins un module ( $1_{i,j}$ ) de cellules photovoltaïques tandem, chaque module présentant une première paire de connecteurs ( $T1_{i,j}, T2_{i,j}$ ) et une seconde paire de connecteurs ( $T3_{i,j}, T4_{i,j}$ ), les modules d'une chaîne étant reliés en série les uns aux autres par l'intermédiaire de leur première paire de connecteurs, les chaînes étant quant à elles reliées à l'onduleur de sortie en parallèle les unes des autres par l'intermédiaire de connecteurs ( $T1_{i,1}, T2_{i,j}$ ) de chaque chaîne parmi les premières paires de connecteurs, plusieurs modules étant en outre reliés en parallèle via leurs secondes paires de connecteurs de manière à former un premier groupe, ledit premier groupe étant en outre couplé, via lesdites secondes paires de connecteurs, en amont de l'onduleur de sortie, à un second groupe de module(s) constitué d'un module seul ou d'une série de modules reliés en série entre eux par leurs premières paires de connecteurs.
- [Revendication 2] Système selon la revendication précédente, dans lequel chaque module comprend un convertisseur, chaque première paire de connecteurs ( $T1_{i,j}, T2_{i,j}$ ) d'un module est couplé à la seconde paire de connecteurs ( $T3_{i,j}, T4_{i,j}$ ) dudit module par l'intermédiaire dudit convertisseur, ledit convertisseur étant piloté au moyen d'un algorithme de suivi du point maximal de puissance SPMP de sorte que la puissance soustraite via la seconde paire de connecteurs ( $T3_{i,j}, T4_{i,j}$ ) soit rendue indépendante des conditions de fonctionnement de la première paire de connecteurs ( $T1_{i,j}, T2_{i,j}$ ).
- [Revendication 3] Système selon la revendication précédente, dans lequel le convertisseur est monté sur une face du module opposée à la face opérationnelle des cellules photovoltaïques, de sorte que le convertisseur est protégé des rayonnements solaires.
- [Revendication 4] Système selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le premier groupe et le second groupe comprennent chacun un nombre de modules différent l'un de l'autre, de sorte que le rapport entre ces deux nombres peut être choisi pour correspondre au moins approximativement au rapport de tension ou de courant de fonctionnement unitaire de chacune des deux sous-cellules constituant les cellules photovoltaïques tandem.

- [Revendication 5] Système selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le premier groupe et le second groupe comprennent les mêmes modules, les modules d'une chaîne étant assemblés en série via leur première paire de connecteurs ( $T_{1,i,j}, T_{2,i,j}$ ) d'une part et via leurs secondes paires de connecteurs ( $T_{3,i,j}, T_{4,i,j}$ ) d'autre part, chaque chaîne incluant en outre un convertisseur disposé en série ou en parallèle entre la chaîne formée via les premières paires de connecteurs ( $T_{1,i,j}, T_{2,i,j}$ ) et la chaîne formée via les secondes paires de connecteurs ( $T_{3,i,j}, T_{4,i,j}$ ), chaque convertisseur étant piloté au moyen d'un algorithme de suivi du point maximal de puissance SPMP de sorte que la puissance soustraite via la seconde paire de connecteurs ( $T_{3,i,j}, T_{4,i,j}$ ) soit rendue indépendante des conditions de fonctionnement de la première paire de connecteurs ( $T_{1,i,j}, T_{2,i,j}$ ).
- [Revendication 6] Système selon la revendication précédente, dans lequel ledit convertisseur, disposé en série ou en parallèle entre la chaîne formée via les premières paires de connecteurs ( $T_{1,i,j}, T_{2,i,j}$ ) et la chaîne formée via les secondes paires de connecteurs ( $T_{3,i,j}, T_{4,i,j}$ ), est constitué de deux interrupteurs de puissances.
- [Revendication 7] Système selon l'une des revendications précédentes, dans lequel l'onduleur de sortie inclut un onduleur modulaire à multiples entrées, ledit onduleur étant piloté au moyen d'algorithmes de suivi du point maximal de puissance MPP indépendants sur chaque entrée de sorte que la puissance soustraite via les secondes paires de connecteurs ( $T_{3,i,j}, T_{4,i,j}$ ) soit rendue indépendante des conditions de fonctionnement des premières paires de connecteurs ( $T_{1,i,j}, T_{2,i,j}$ ).

[Fig. 1]

**FIG. 1**

[Fig. 2]

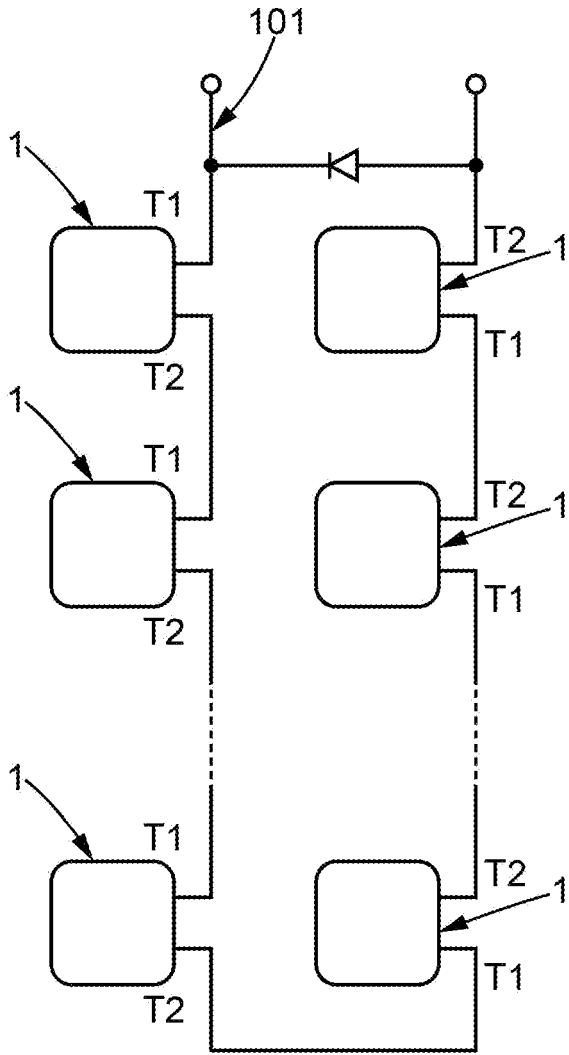
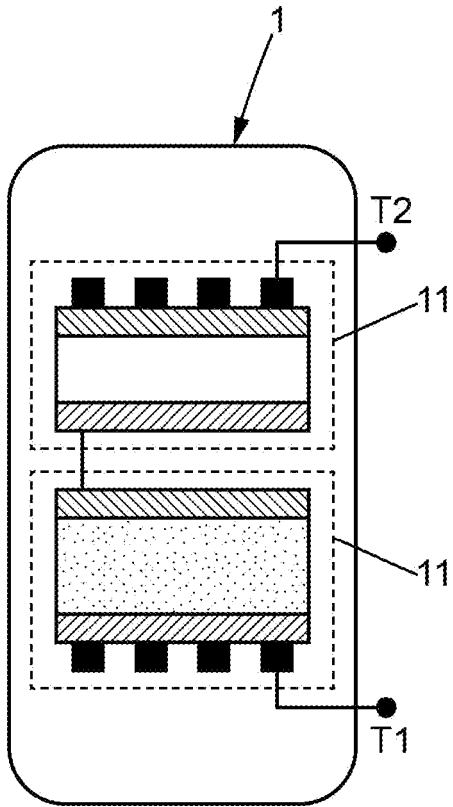


FIG. 2

[Fig. 3]



**FIG. 3**

[Fig. 4]

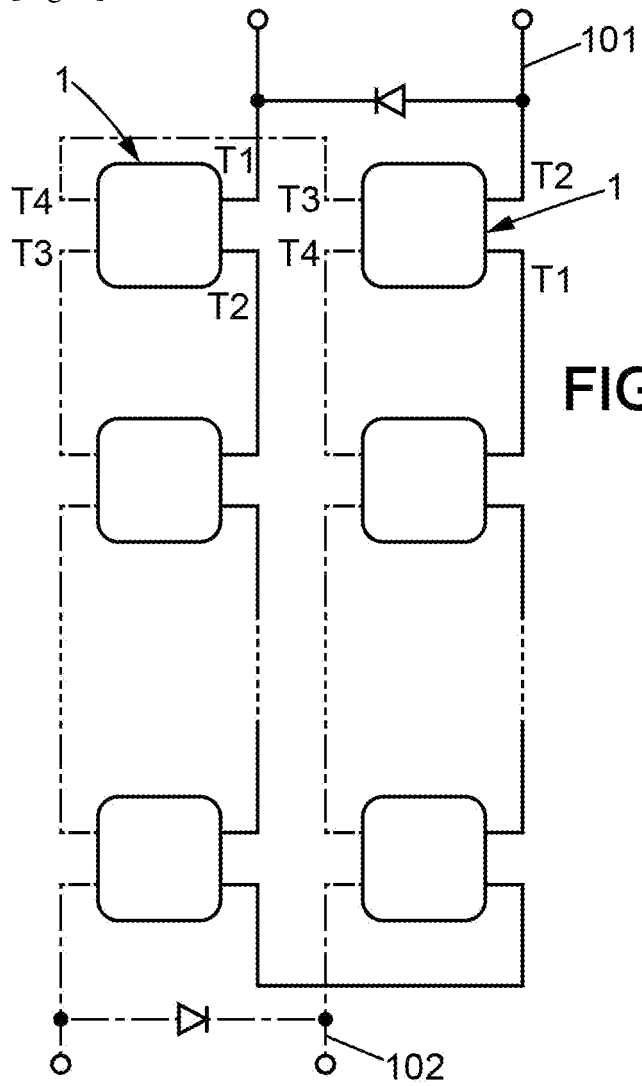
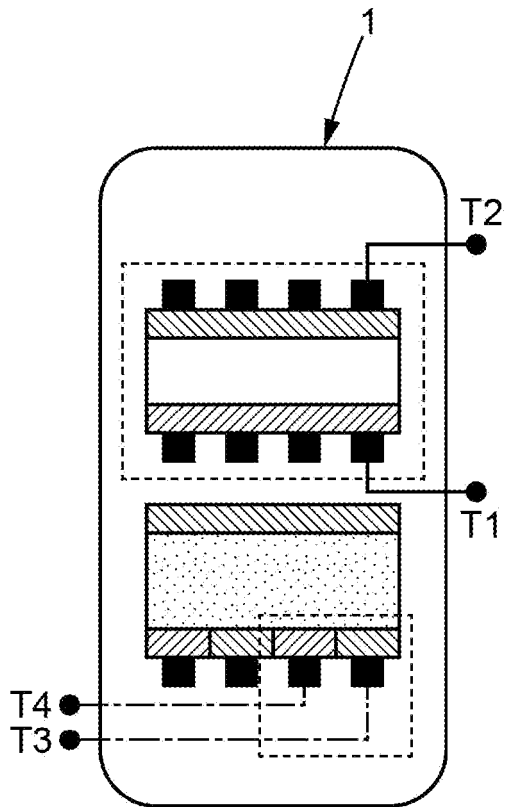
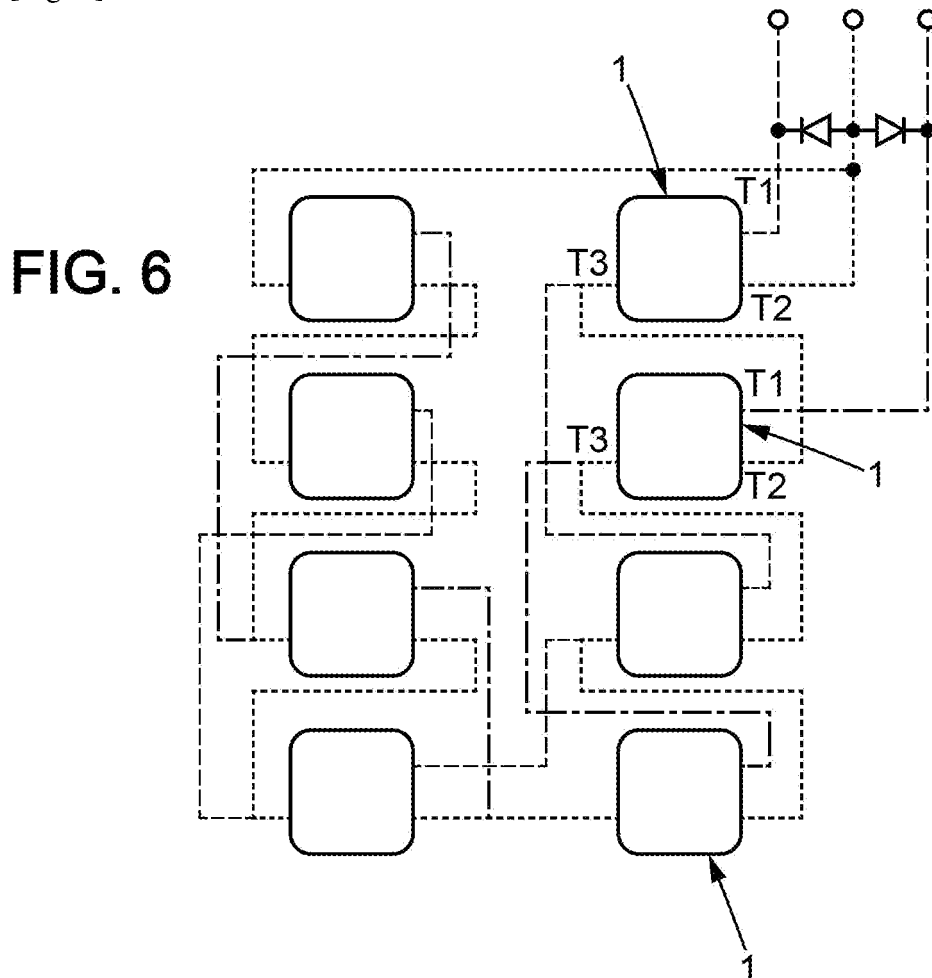


FIG. 4

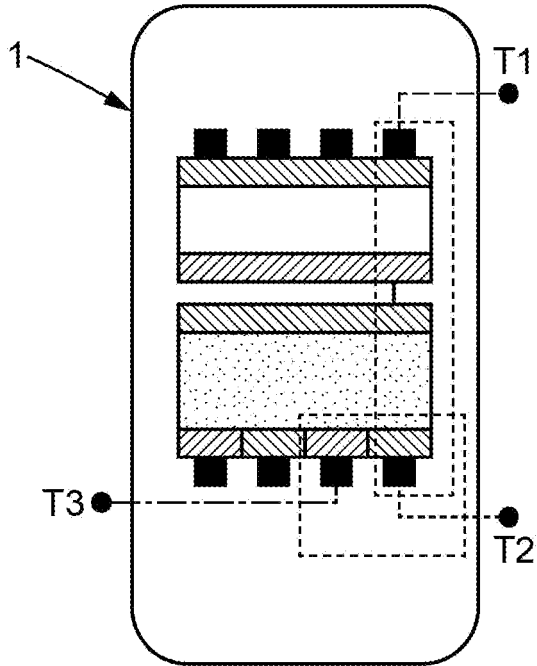
[Fig. 5]

**FIG. 5**

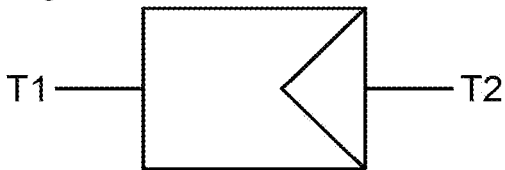
[Fig. 6]

**FIG. 6**

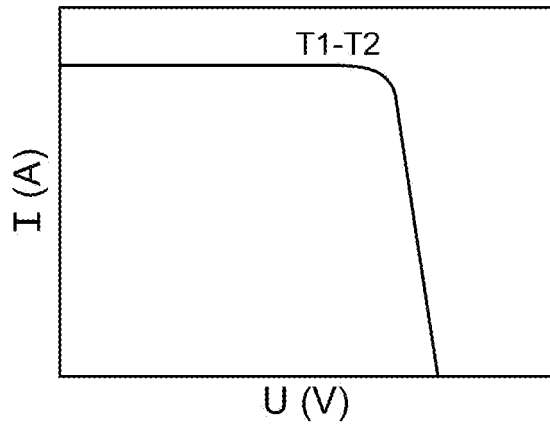
[Fig. 7]

**FIG. 7**

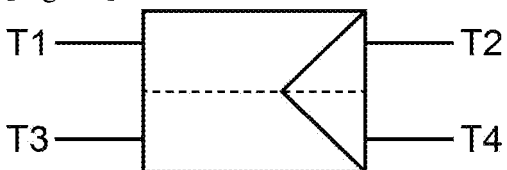
[Fig. 8]

**FIG. 8**

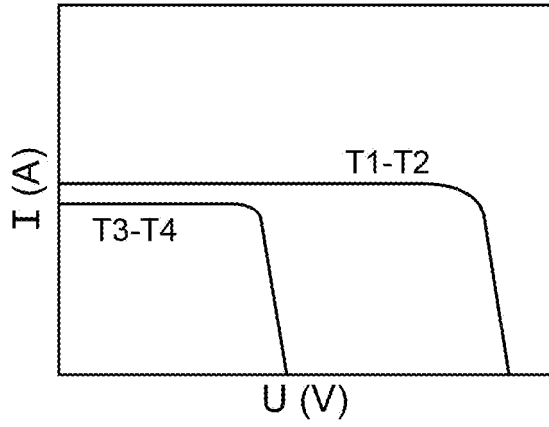
[Fig. 9]

**FIG. 9**

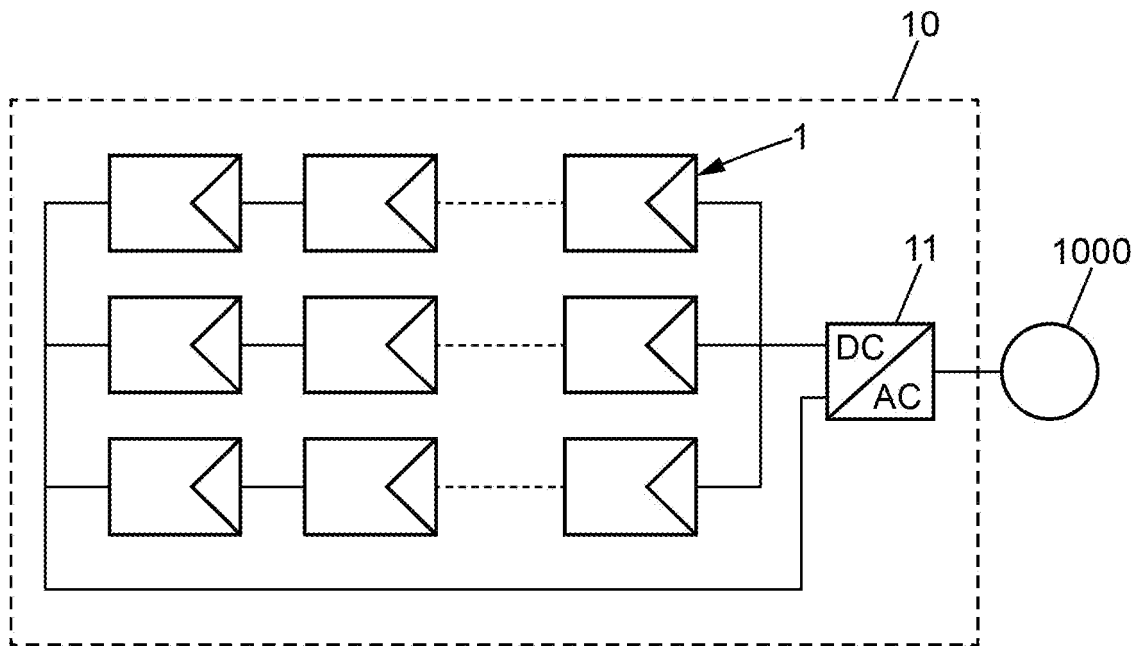
[Fig. 10]

**FIG. 10**

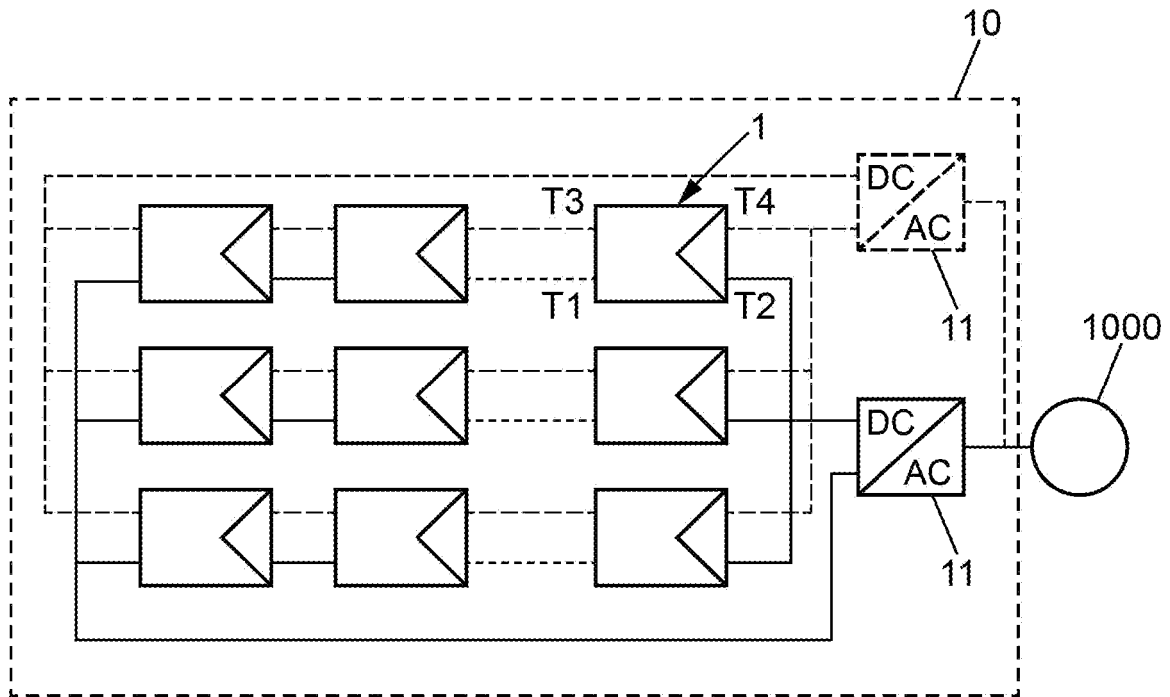
[Fig. 11]

**FIG. 11**

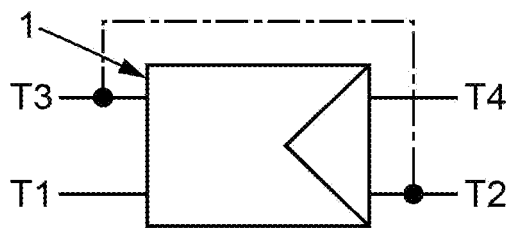
[Fig. 12]

**FIG. 12**

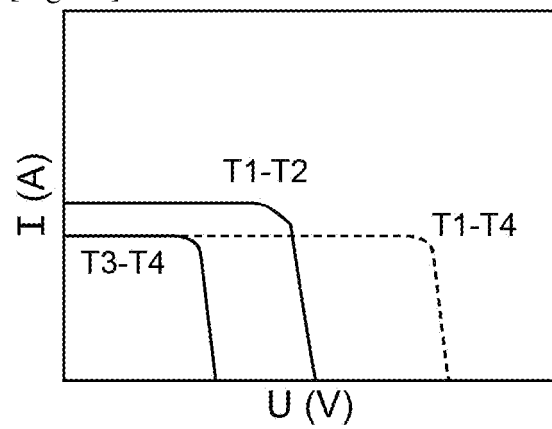
[Fig. 13]

**FIG. 13**

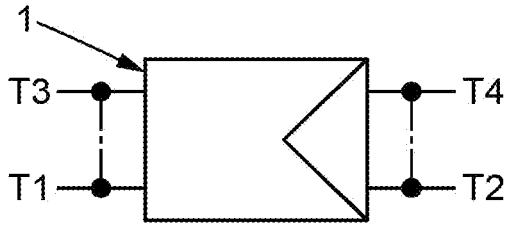
[Fig. 14]

**FIG. 14**

[Fig. 15]

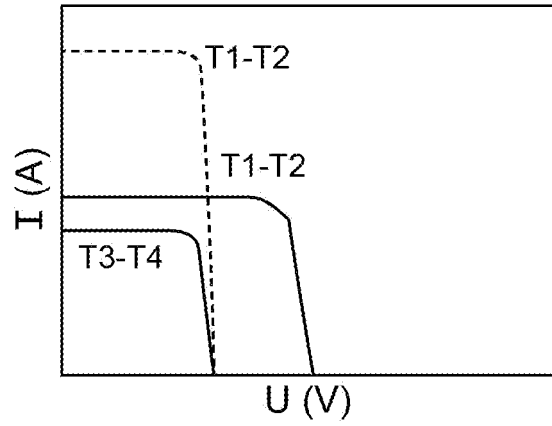
**FIG. 15**

[Fig. 16]



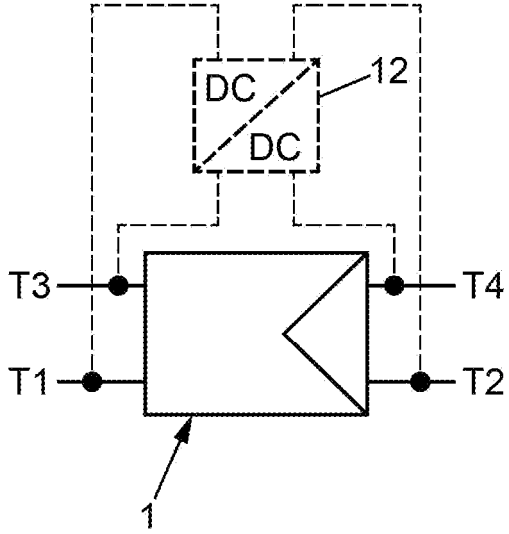
**FIG. 16**

[Fig. 17]



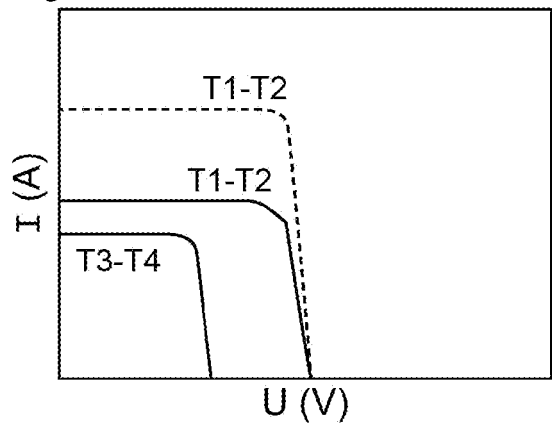
**FIG. 17**

[Fig. 18]



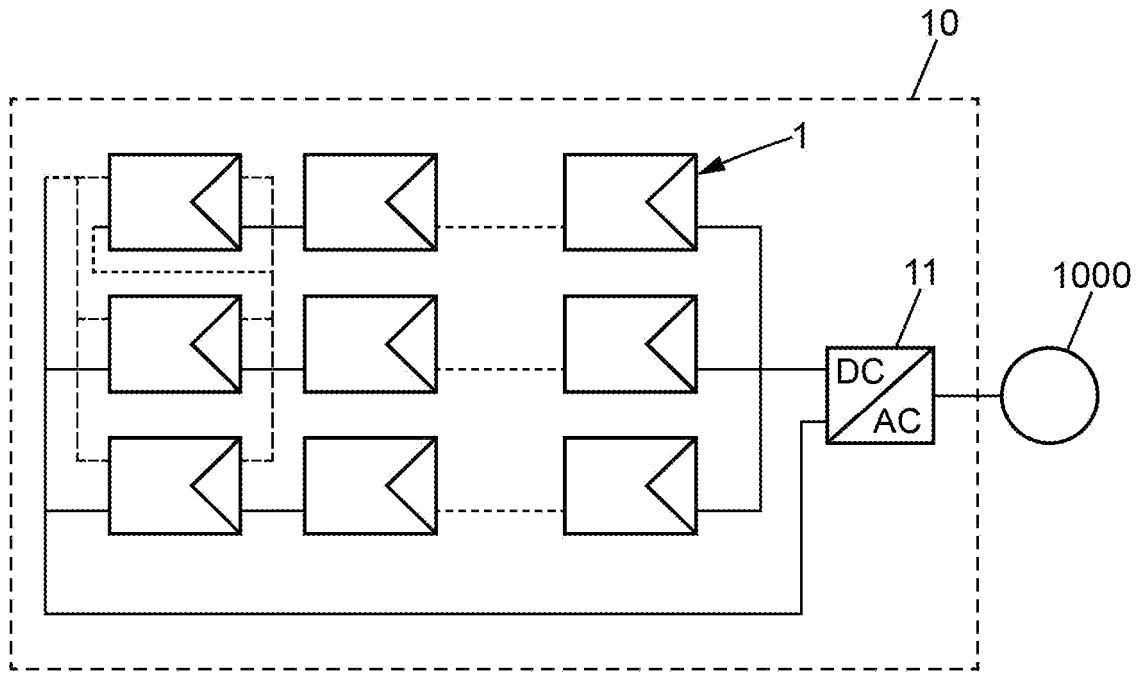
**FIG. 18**

[Fig. 19]

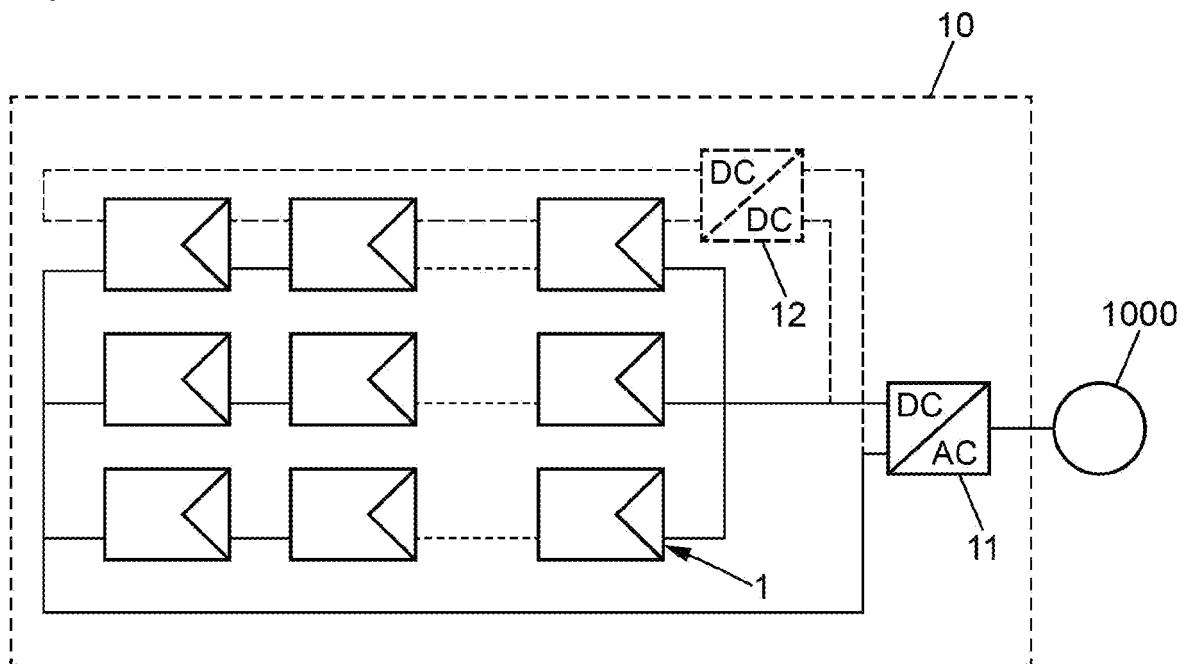


**FIG. 19**

[Fig. 20]

**FIG. 20**

[Fig. 21]

**FIG. 21**

[Fig. 22]

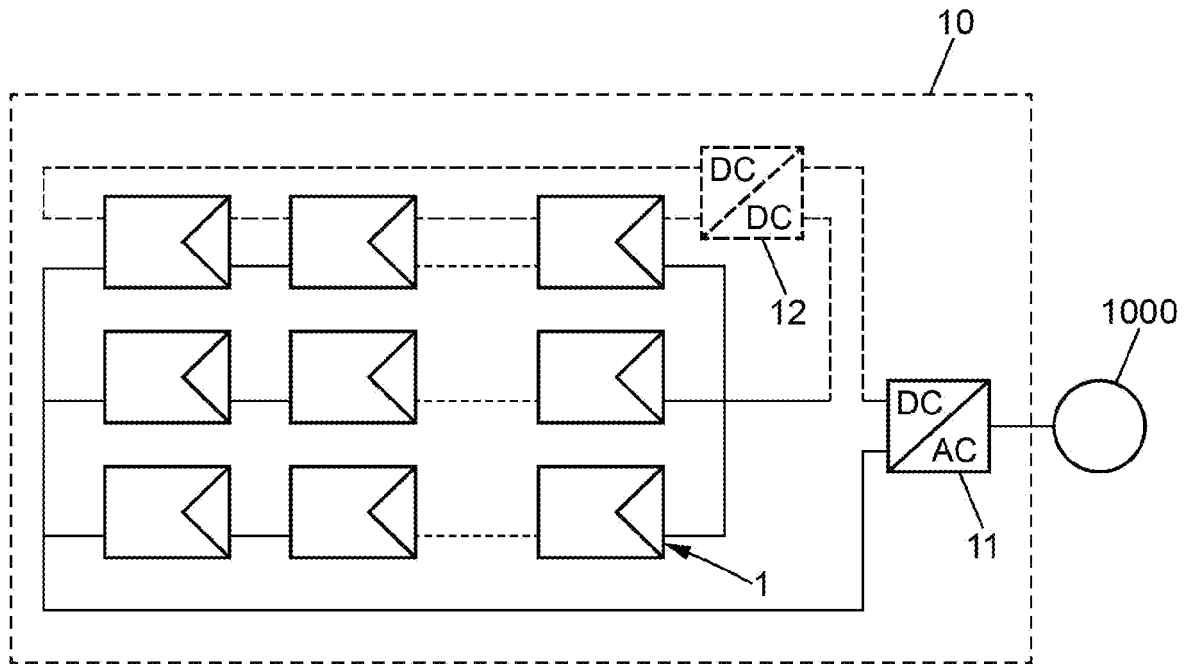


FIG. 22

[Fig. 23]

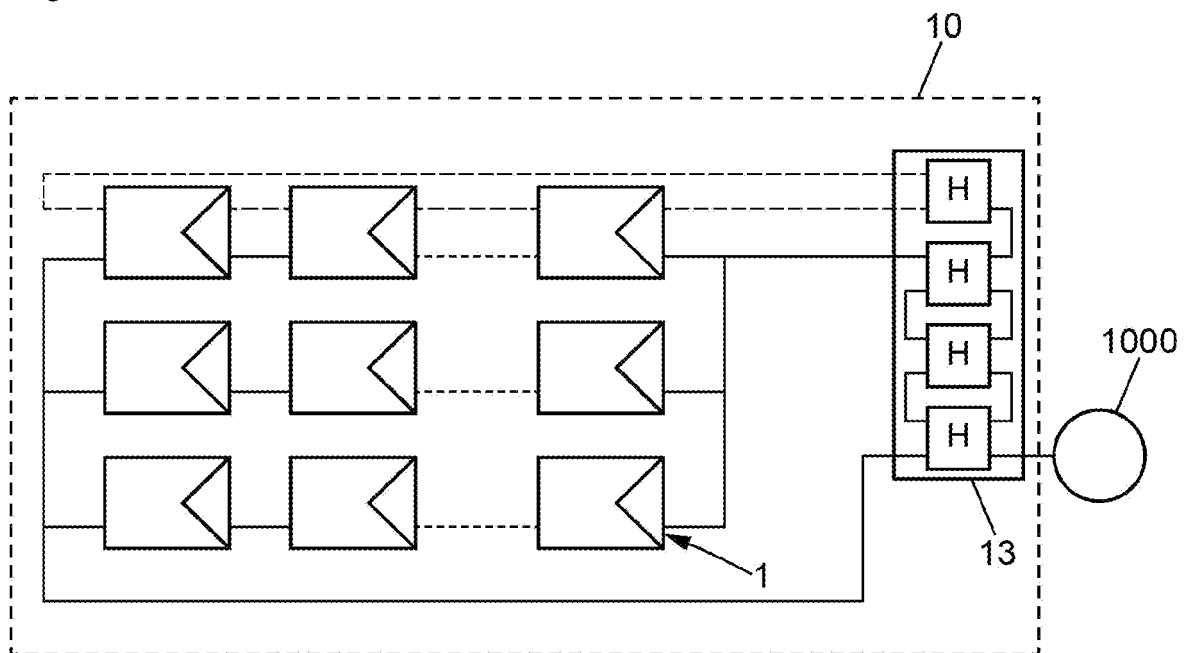


FIG. 23

# RAPPORT DE RECHERCHE

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

## OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

---

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

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

## CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

---

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

Le demandeur a maintenu les revendications.

Le demandeur a modifié les revendications.

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

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

Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

## DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

---

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

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

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

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

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

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

US 8 569 613 B1 (BROWN ALBERT S [US])  
29 octobre 2013 (2013-10-29)

US 2017/040557 A1 (BAILIE COLIN [US] ET  
AL) 9 février 2017 (2017-02-09)

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

NEANT

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

NEANT