

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la  
Propriété Intellectuelle  
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale  
**WO 2013/041708 A2**

(43) Date de la publication internationale  
28 mars 2013 (28.03.2013)

(51) Classification internationale des brevets :  
H02M 7/49 (2007.01) H02M 3/335 (2006.01)  
H02M 1/08 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/EP2012/068705

(22) Date de dépôt international :  
21 septembre 2012 (21.09.2012)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :  
11/02879 22 septembre 2011 (22.09.2011) FR

(71) Déposant : GEO27 S.À.R.L [LU/LU]; 13-15 Avenue de  
la Liberté, L1934 Luxembourg (LU).

(72) Inventeur : CUBAINES, Fabrice; Lieu-dit Pech Rimat,  
F-46400 Saint-Jean Lagineste (FR).

(74) Mandataire : Cabinet BARRE LAFORGUE & associés  
n°132; 35 rue Lancefoc, F-31000 Toulouse (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre  
de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM,  
AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,  
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM,

DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,  
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP,  
KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD,  
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,  
NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU,  
RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ,  
TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA,  
ZM, ZW.

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

Déclarations en vertu de la règle 4.17 :

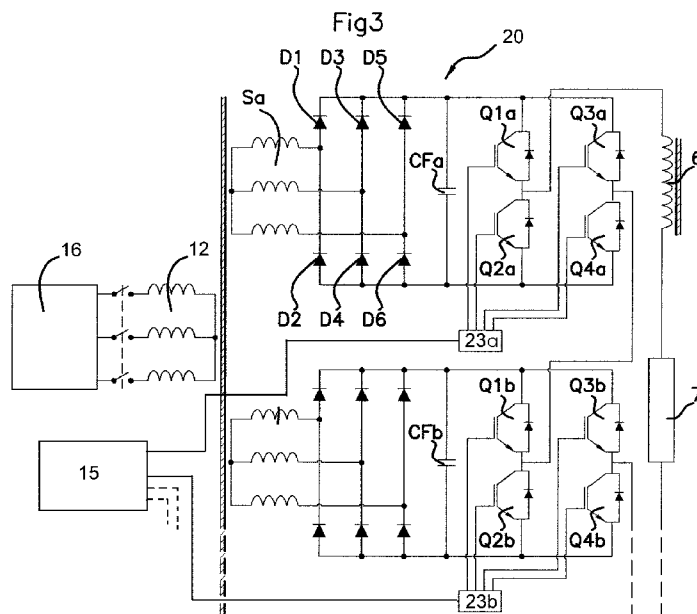
— relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv))

Publiée :

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

(54) Title : CURRENT SIGNAL GENERATOR AND METHOD OF IMPLEMENTING SUCH A GENERATOR

(54) Titre : GÉNÉRATEUR DE SIGNAUX DE COURANT ET PROCÉDÉ DE MISE EN ŒUVRE D'UN TEL GÉNÉRATEUR



(57) Abstract : The invention concerns a current slot generator, capable of providing regulated current signals, of alternating polarity and high voltage, to the terminals of a load (7), comprising: - a plurality of secondary stages (20), comprising at least a direct voltage source insulated from the voltage sources of the other stages, connected in series between the midpoint of the second (Q3, Q4) half-bridge of each secondary stage and the midpoint of the first (Q1, Q2) half-bridge of the next secondary stage, the terminals of the load (7) being respectively connected to the midpoint of the first half-bridge of a first secondary stage, and to the midpoint of the second half-bridge of a last secondary stage, and - a control circuit (15) capable of: • selecting a group of secondary stages (20), called active stages, and from said active stages at least one stage, called regulating stage, • simultaneously controlling each active stage, except the regulating stage, at the frequency of the current slots, • controlling the regulating stage according to a frequency higher than the previous one, with a duty ratio control capable of regulating the current flowing in the load at the setpoint value, • controlling the switches (Q1-Q4) of the non-selected secondary stages to insulate their voltage source.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]

WO 2013/041708 A2



---

L'invention concerne un générateur de créneaux de courant, adapté pour fournir aux bornes d'une charge (7) des signaux de courant régulé, de polarité alternée, sous haute tension, comprenant : - une pluralité d'étages secondaires (20), comportant au moins une source de tension continue isolée des sources de tension des autres étages, connectés en série entre le point milieu du second (Q3, Q4) demi-pont de chaque étage secondaire et le point milieu du premier (Q1, Q2) demi-pont de l'étage secondaire suivant, les bornes de la charge (7) étant respectivement reliées au point milieu du premier demi-pont d'un premier étage secondaire, et au point milieu du second demi-pont d'un dernier étage secondaire, et - un circuit de commande (15) adapté pour : ▪ sélectionner un groupe d'étages secondaires (20), dit étages actifs, et parmi lesdits étages actifs au moins un étage, dit étage de régulation, ▪ commander simultanément chaque étage actif, à l'exception de l'étage de régulation, à la fréquence des créneaux de courant, ▪ commander l'étage de régulation selon une fréquence supérieure à la précédente, avec un rapport cyclique de commande adapté pour réguler le courant circulant dans la charge à la valeur de consigne, ▪ commander les commutateurs (Q1-Q4) des étages secondaires non sélectionnés pour isoler leur source de tension.

## GÉNÉRATEUR DE SIGNAUX DE COURANT ET PROCÉDÉ DE MISE EN ŒUVRE D'UN TEL GÉNÉRATEUR

L'invention concerne un générateur de signaux de courant, et plus particulièrement un tel générateur capable de générer des créneaux de courant  
5 d'une intensité élevée (de l'ordre de quelques dizaines d'ampères) régulée avec une grande précision sous une tension très élevée, de l'ordre de plusieurs kilovolts. L'invention vise également un procédé de mise en œuvre d'un tel générateur.

Dans certaines applications telles que l'électrolyse, la stérilisation, l'obtention de plasmas sous vide ou pour l'exécution de tests visant à  
10 déterminer certaines constantes physiques de matériaux, homogènes ou non, comme par exemple leur conductivité ou leurs constantes diélectriques et/ou inductives, il est parfois nécessaire d'appliquer au travers desdits matériaux des tensions ou des courants calibrés, avec des périodes prédéterminées d'application de ces courants ou tensions.

Il peut ainsi être utile dans certains cas d'appliquer aux bornes  
15 d'une charge, constituée par exemple par deux électrodes insérées à distance l'une de l'autre dans le matériau à mesurer, des signaux de courant sous la forme de créneaux de polarité alternée séparés par des périodes dites de relaxation, pendant lesquelles aucune tension ni aucun courant n'est appliqué. Usuellement, on utilise  
20 une séquence temporelle simple, dans laquelle on applique aux bornes de la charge un créneau de tension positive de quelques secondes, puis une période de relaxation de même durée, suivie par un créneau de tension négative de même durée, lui-même suivi d'une seconde période de relaxation.

En appliquant un tel signal entre deux électrodes d'injection  
25 de courant fixées dans le matériau dont on veut mesurer certaines caractéristiques, et en mesurant un signal résultant entre deux autres électrodes de mesure placées par exemple entre les deux électrodes d'injection, on peut déterminer la résistivité et la constante diélectrique du matériau en comparant les formes du signal injecté et du signal mesuré.

Pour la précision des mesures, il est nécessaire de réguler le  
30 courant appliqué pendant les créneaux positifs ou négatifs, voire même d'injecter ce

signal sous forme de créneaux de courant, la tension s'adaptant alors en permanence en fonction du courant à obtenir. Il est en outre indispensable que les créneaux de courant présentent des caractéristiques temporelles (par exemple concernant le temps de montée des fronts des signaux) aussi performantes que possible pour  
5 permettre une comparaison sans biais entre le signal injecté et le signal mesuré.

On connaît des générateurs utilisés par exemple dans les applications citées plus haut ou encore pour l'étude des sols dans le cadre de la construction de bâtiments ou d'ouvrages d'art ou encore pour la mesure du taux d'humidité dans les sols ou dans des silos de stockage de matériaux pulvérulents.  
10 Cependant, les générateurs connus sont adaptés à des mesures dans un rayon d'action réduit et développent des tensions limitées à quelques centaines de volts et quelques centaines de milliampères.

Il subsiste donc un besoin pour un générateur permettant de fournir des signaux de forte tension, de l'ordre de quelques kilovolts, capables de  
15 faire circuler un courant de quelques dizaines d'ampères avec une précision inférieure au pourcent, afin d'améliorer les performances des générateurs connus et de permettre d'effectuer des mesures sur des matériaux présentant des impédances élevées et/ou très variables.

L'invention vise un tel générateur qui soit simple et  
20 économique à réaliser, et présentant une fiabilité élevée.

L'invention vise en outre un tel générateur qui puisse être transporté relativement facilement afin de réaliser des mesures dans de nombreux endroits.

L'invention vise encore un tel générateur qui puisse  
25 fonctionner dans une très large gamme d'impédances de sortie, et qui présente des temps de montée, par exemple pour des créneaux de courant, inférieurs à la milliseconde.

Pour ce faire, l'invention concerne un générateur de signaux de courant, adapté pour fournir aux bornes d'une charge des créneaux de courant  
30 régulé, de polarité alternée, sous haute tension, comprenant une pluralité de circuits, dits étages secondaires, chaque étage secondaire comportant au moins une source de

tension continue isolée des sources de tension des autres étages secondaires, et un circuit de commutation comprenant quatre commutateurs organisés en un premier et un second demi-ponts formés chacun de deux commutateurs montés en série entre le pôle positif et le pôle négatif de la source de tension, les étages secondaires étant interconnectés entre eux de telle sorte que le point milieu du second demi-pont de chaque étage secondaire est relié au point milieu du premier demi-pont de l'étage secondaire suivant, les bornes de la charge étant respectivement reliées au point milieu du premier demi-pont d'un premier étage secondaire, et au point milieu du second demi pont d'un dernier étage secondaire, et un circuit de commande, caractérisé en ce que ledit circuit de commande est adapté pour :

- sélectionner un groupe d'étages secondaires, dit étages actifs, en fonction d'une valeur de consigne d'un courant circulant dans la charge,
- commander les commutateurs des étages secondaires non sélectionnés pour isoler leur source de tension.
- sélectionner parmi lesdits étages actifs au moins un étage, dit étage de régulation,
- commander simultanément les commutateurs de chaque étage actif, à l'exception de l'étage de régulation, à la fréquence des signaux de courant, de manière à mettre en série les sources de tension de ces étages,
- commander les commutateurs dudit étage de régulation selon une fréquence supérieure à la précédente, avec un rapport cyclique de commande adapté pour réguler le courant circulant dans la charge à la valeur de consigne.

Grâce au montage des commutateurs des étages secondaires, il est possible, en fonction de la commande appliquée aux commutateurs de chaque étage de disposer celui-ci en série ou en opposition avec les étages voisins, ou encore d'isoler la source de tension de l'étage considéré par rapport aux étages voisins sans pour autant interrompre le passage du courant dans la charge. Dès lors, il est possible de sélectionner certains étages secondaires et, en les commutant

simultanément, de manière synchrone avec les fronts du signal à obtenir et à la fréquence de celui-ci, de les monter en série afin d'obtenir quasi-instantanément une tension adaptée pour faire circuler le courant voulu dans la charge, en fonction de l'impédance de celle-ci. De ce fait, les temps de montée des créneaux de courant  
5 peuvent être réduits. Afin d'obtenir les performances désirées en précision de la régulation du courant traversant la charge, un seul des étages secondaires mis en série est piloté à une fréquence élevée (plusieurs kHz) selon une commande à modulation de largeur d'impulsion présentant un rapport cyclique dépendant de l'écart entre la valeur du courant traversant la charge et une valeur de consigne, ce  
10 qui permet d'éviter de commuter l'ensemble des étages à fréquence élevée et donc de limiter la puissance dissipée dans les commutateurs.

Avantageusement et selon l'invention, la source de tension de chaque étage secondaire comporte un enroulement secondaire d'un transformateur alimenté par un étage primaire, un pont redresseur à diodes et un condensateur de  
15 filtrage. En utilisant un enroulement secondaire d'un transformateur, la source de tension de chaque étage secondaire est galvaniquement isolée des sources de tension des autres étages. En outre, la valeur du rapport de transformation permet de fixer la valeur de la tension à vide de l'étage secondaire sans influencer sur celle des autres étages.

20 Dans une première variante du générateur selon l'invention, le transformateur est un transformateur monophasé et le pont redresseur de chaque étage secondaire comporte 4 diodes. Un tel transformateur s'avère moins volumineux, à courant ou puissance équivalente, et comporte moins de cuivre qu'un transformateur triphasé et est donc moins coûteux.

25 Avantageusement et selon l'invention, l'étage primaire du générateur comporte un circuit de commutation adapté pour alimenter un enroulement primaire du transformateur monophasé avec un courant monophasé haché. De cette manière, en employant une fréquence de hachage du courant primaire de l'ordre de quelques centaines ou milliers de Hz, il est possible de  
30 réduire encore le volume (et la masse) des noyaux magnétiques du transformateur

ce qui permet d'obtenir un générateur plus léger et moins volumineux, donc plus facilement transportable.

Dans une seconde variante du générateur selon l'invention, le transformateur est un transformateur triphasé et le pont redresseur de chaque étage secondaire comporte 6 diodes. En répartissant la puissance sur trois enroulements primaires, les commutations à fort courant dans le primaire sont limitées.

Avantageusement et selon l'invention, les enroulements primaires du transformateur sont directement couplés à une source de courant triphasé. On évite ainsi la complexité d'un étage primaire à découpage, l'étage primaire étant dans ce cas purement passif et la fiabilité de l'ensemble est améliorée.

Avantageusement et selon l'invention, l'étage primaire comprend un groupe électrogène fournissant l'alimentation en courant de l'étage. L'utilisation d'un groupe électrogène pour alimenter l'étage primaire du générateur permet, quelle que soit la variante considérée, d'obtenir un générateur autonome, facile à déplacer et utilisable sans contrainte de raccordement à un réseau électrique.

Avantageusement et selon l'invention, les sources de tension des étages secondaires présentent un étagement de leur tension de sortie en circuit ouvert permettant un ajustement précis de la tension de sortie du générateur. En choisissant judicieusement les tensions des étages secondaires, il est possible d'ajuster la tension aux bornes de sortie du générateur avec une grande précision, par exemple inférieure à 5% de la tension maximale, en mettant en série une sélection appropriée de ces étages secondaires, tout en faisant fonctionner chaque étage secondaire utilisé à son rendement maximum.

Avantageusement et selon l'invention, les commutateurs sont des transistors bipolaires à grille isolée. Les transistors bipolaires à grille isolée (IGBT) permettent de commuter de fortes tensions et/ou de forts courants sans exiger une énergie de commande élevée, ce qui permet de les commander au moyen d'un étage de commande simple et peu consommateur d'énergie. En outre, les commutateurs utilisés comportent une diode anti parallèle entre collecteur et émetteur permettant un passage du courant en inverse sans qu'il soit nécessaire de

commander le transistor, ce qui limite encore la dissipation d'énergie dans les transistors et donc l'élévation de température de ceux-ci.

Avantageusement et selon l'invention, lesdits transistors sont montés sur des radiateurs à huile. De cette manière, la surveillance de la température de l'huile de refroidissement permet d'éviter une éventuelle surchauffe des commutateurs et le cas échéant, d'en informer le circuit de commande afin de désactiver l'étage secondaire concerné ou d'arrêter le générateur.

Avantageusement et selon l'invention, le circuit de commande est relié aux commutateurs par une liaison à fibre optique. La commutation de forts courants et/ou de fortes tensions étant susceptible de parasiter les lignes de commande électriques, l'utilisation d'une distribution des commandes par fibre optique permet de garantir une bonne fiabilité du générateur ainsi qu'un câblage simplifié, la même fibre pouvant transporter des informations de commande multiplexées à destination d'une pluralité d'étages secondaires. En outre, l'utilisation de liaisons en fibre optique, isolante, permet d'améliorer l'isolement galvanique des étages secondaires entre eux et avec la terre.

L'invention s'étend également à un procédé de génération de signaux de courant, adapté pour fournir aux bornes d'une charge des créneaux de courant régulé, de polarité alternée, sous haute tension, dans lequel :

- on utilise un générateur comportant une pluralité d'étages secondaires comportant chacun une source de tension continue isolée des sources de tension des autres étages secondaires, et un circuit de commutation comprenant quatre commutateurs organisés en un premier et un second demi-ponts formés chacun de deux commutateurs montés en série entre le pôle positif et le pôle négatif de la source de tension, les étages secondaires étant interconnectés entre eux de telle sorte que le point milieu du second demi-pont de chaque étage secondaire est relié au point milieu du premier demi-pont de l'étage secondaire suivant, les bornes de la charge étant respectivement reliées au point milieu du premier demi-pont d'un premier étage secondaire, et au point milieu du second demi pont d'un dernier étage secondaire,

- on sélectionne un groupe d'étages secondaires, dit étages actifs, en fonction d'une valeur de consigne d'un courant circulant dans la charge,
- on commande les commutateurs des étages secondaires non sélectionnés pour isoler leur source de tension,
- 5 - on sélectionne parmi lesdits étages actifs au moins un étage, dit étage de régulation,
- on commande simultanément les commutateurs de chaque étage actif, à l'exception de l'étage de régulation, à la fréquence des créneaux de courant, de manière à mettre en série les sources de tension de ces étages,
- 10 - on commande les commutateurs dudit étage de régulation selon une fréquence supérieure à la précédente, avec un rapport cyclique de commande adapté pour réguler le courant circulant dans la charge à la valeur de consigne.

L'invention concerne également un générateur et un procédé de mise en œuvre dudit générateur caractérisés en combinaison par tout ou partie  
15 des caractéristiques mentionnées ci-dessus ou ci-après.

D'autres buts, caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront au vu de la description qui va suivre et des dessins annexés dans  
lesquels :

- la figure 1 représente un schéma des étages secondaires d'un  
20 générateur selon l'invention selon une première variante monophasée,
- la figure 2 est un schéma d'un étage primaire d'un générateur selon l'invention selon une première variante monophasée,
- la figure 3 est un schéma du générateur dans une seconde variante triphasée,
- 25 - les figures 4A et 4B représentent des diagrammes temporels utiles à la compréhension du fonctionnement du générateur selon l'invention.

Le générateur 1 de signaux de courant selon l'invention comporte une pluralité d'étages secondaires 20 (20a - 20n) comprenant chacun une  
source 21 de tension continue et un circuit de commutation 22.

30 Dans le texte qui va suivre, on identifie par un indice alphabétique identique les éléments d'un même étage secondaire lorsque celui-ci

doit être distingué d'un étage voisin ; par contre on utilise la référence générique (sans indice) lorsqu'on désigne un élément en général, sans qu'il soit nécessaire de distinguer l'étage auquel il appartient. Ainsi, on désignera par exemple le circuit de commutation 22a du premier étage secondaire 20a (respectivement le circuit de commutation 22b de l'étage secondaire 20b, etc.) ou bien de manière générale, le circuit de commutation 22 d'un étage secondaire 20 quelconque.

Le circuit de commutation 22 comprend quatre commutateurs Q1 – Q4 disposés selon un montage en deux demi-ponts, les commutateurs Q1 et Q2 (respectivement Q3 et Q4) étant montés en série entre le pôle positif et le pôle négatif de la source 21 de tension. Chaque commutateur est de préférence réalisé au moyen d'un transistor (ou d'un groupe de transistors) bipolaire à grille isolée (IGBT selon la terminologie anglo-saxonne couramment employée), choisi dans une gamme adaptée aux performances attendues du générateur. A titre d'exemple d'application non limitatif, un générateur selon l'invention, d'une puissance de l'ordre de 100 kW, est prévu pour fournir des créneaux de courant d'une intensité de l'ordre de 60 A sur une charge d'impédance variable entre 10  $\Omega$  et 10 k $\Omega$  et présente dix étages secondaires dont les tensions à vide s'étagent de 160 V à 1800 V pour une tension totale maximale de l'ordre de 11 kV. Ainsi, par exemple, chaque commutateur sera choisi pour être apte à laisser circuler un courant d'une intensité de l'ordre de 60 A à l'état passant et pour tenir une tension de 2000 V au moins à l'état bloqué.

Chaque commutateur comporte une diode antiparallèle adaptée pour permettre la circulation d'un courant inverse dans le commutateur. Une telle diode est en général inhérente à la construction d'un IGBT, mais compte tenu des forts courants circulant dans le générateur de l'invention, il peut être utile de doubler la diode inhérente par une diode externe. La diode 26 est connectée par sa cathode à la borne positive du commutateur auquel elle est associée et par son anode à la borne négative de celui-ci.

Dans le premier étage secondaire 20a, le point milieu du premier demi-pont constitué par les commutateurs Q1a et Q2a est relié par une ligne et une inductance 6 de lissage à une première borne de la charge 7. Le point

milieu du second demi-pont constitué par les commutateurs Q3a et Q4a est connecté par une ligne 25a au point commun des commutateurs Q1b et Q2b, point milieu du premier demi-pont de l'étage secondaire suivant. Les circuits de commutation des étages secondaires sont ainsi reliés en série, du point milieu du second demi-pont d'un étage au point milieu du premier demi-pont de l'étage  
5 suivant, jusqu'au dernier étage secondaire 20n dans lequel le point milieu du second demi-pont constitué par les commutateurs Q3n et Q4n est relié par une ligne 8 à la seconde borne de la charge 7.

Les grilles des commutateurs Q1 à Q4 sont reliées à un  
10 convertisseur optique 23 adapté pour transformer une commande reçue sous forme optique par l'intermédiaire d'une fibre optique 24 en une commande électrique appropriée. Les fibres optiques 24a – 24n véhiculant les commandes respectives des circuits de commutation 22a – 22n des étages secondaires sont reliée à l'extrémité opposée aux convertisseurs optiques 23 à un circuit de commande 15 (figure 2)  
15 adapté pour générer les signaux de commande de commutation des différents étages. Le circuit de commande 15 peut être réalisé de toute manière connue de l'homme du métier, en logique câblée, programmable à microprocesseur(s) ou encore au moyen d'un ordinateur programmé selon le procédé de fonctionnement qui sera décrit plus loin.

20 Chaque étage secondaire 20 comporte également une source 21 de tension continue, isolée galvaniquement des sources de tension des autres étages secondaires. Dans l'exemple représenté à la figure 1, la source 21 de tension continue comprend un enroulement secondaire S d'un transformateur 11 monophasé dont l'enroulement primaire 12 est alimenté par un étage primaire 10 représenté en  
25 figure 2. Le courant alternatif monophasé fourni par l'enroulement secondaire S est alors redressé en double alternance par un pont de diodes D1 à D4 et filtré dans un condensateur CF de filtrage. Dans l'exemple d'application cité précédemment, les dix étages secondaires sont prévus pour fournir une tension maximale totale à vide de l'ordre de 11 kV avec cinq étages fournissant chacun une tension de 1800 V, et  
30 les cinq étages restants fournissant respectivement des tensions de 900 V, 500 V, 280 V, 200 V et 160 V.

L'étage primaire 10, dans une première variante monophasée représentée à la figure 2, et correspondant aux sources 21 de tension décrites ci-dessus, comprend une source de tension alternative, par exemple sous la forme d'un groupe électrogène 16 à sortie triphasée. Ce groupe électrogène 16, d'une puissance de l'ordre de 200 kVA, pourrait également être remplacé par une liaison à un réseau de distribution électrique, mono ou triphasé, capable de fournir une puissance équivalente. L'utilisation d'un groupe électrogène est préférable dans le cas où le générateur de l'invention doit être mobile.

Le courant électrique fourni par le groupe électrogène 16 est redressé dans un redresseur triphasé comportant trois diodes Dp1 à Dp3 et trois redresseurs commandés tels que des thyristors Rc1 à Rc3. Le courant ainsi redressé est filtré par deux condensateurs de filtrage CF1 et CF2 en série entre les pôles positif et négatif et une inductance de filtrage Lf en série dans le pôle positif. Un condensateur Cs, branché entre les pôles positif et négatif en aval de l'inductance de filtrage Lf, assure un lissage de l'alimentation continue ainsi obtenue. Quatre commutateurs Qp1 à Qp4 sont connectés selon un montage en pont en H entre les pôles positif et négatif de l'alimentation. L'enroulement primaire 12 du transformateur 11 est placé dans la branche horizontale du H, entre le point commun des commutateurs Qp1 et Qp2 et le point commun de Qp3 et Qp4. Une inductance de compensation 17 est placée en série avec l'enroulement primaire 12. Afin de faire circuler un courant alternatif dans l'enroulement primaire, les commutateurs sont commandés deux par deux, en diagonale et en opposition afin de faire circuler le courant alternativement dans un sens ou dans l'autre dans l'enroulement primaire 12. Ainsi, lorsque Qp1 et Qp3 sont passants et Qp2 et Qp4 sont bloqués, le courant traverse l'enroulement primaire dans un sens et à l'inverse, quand Qp1 et Qp3 sont bloqués et Qp2 et Qp4 passants, le courant circule dans le sens opposé. Les commutateurs Qp1 à Qp4 sont également réalisés chacun au moyen d'un transistor (ou d'un groupe de transistors) bipolaire à grille isolée (IGBT) commandé par un convertisseur optique 14 connecté au circuit de commande 15 par une fibre optique 13. Le convertisseur optique 14 est également adapté, le cas échéant, pour commander les thyristors Rc1 à Rc3.

Avantageusement, l'onduleur ainsi réalisé est adapté pour fonctionner à une fréquence de découpage élevée (par rapport aux fréquences usuelles des réseaux de distribution électrique), de l'ordre de quelques kHz. De cette manière, la saturation des noyaux magnétiques du transformateur 11 est  
5 réduite ce qui permet de minimiser leur volume, et donc leur masse et leur coût, dans un rapport correspondant au rapport des fréquences entre la fréquence de découpage et la fréquence usuelle du réseau de distribution électrique. La fréquence employée est également suffisamment basse pour ne pas entraîner des pertes de commutation excessives, surtout en présence des puissances considérables  
10 commutées.

Comme on le verra par la suite en relation avec le fonctionnement du générateur, tous les étages secondaires ne sont pas utilisés simultanément, et dans ce cas l'inductance des enroulements secondaires S ramenée au primaire peut être réduite. L'inductance de compensation 17 permet alors de  
15 limiter le courant dans l'enroulement primaire 12 du transformateur.

Dans une seconde variante du générateur selon l'invention, illustrée à la figure 3, l'étage primaire 10 est simplement constitué du groupe électrogène 16 fonctionnant en générateur triphasé, qui est relié directement (aux interrupteurs de sécurité près) aux enroulements primaires 12 d'un transformateur  
20 11 triphasé. L'étage primaire 10 est alors grandement simplifié et ne comprend plus que des éléments passifs. Sa fiabilité en est donc largement augmentée. Cependant, comme vu précédemment, la fréquence du courant électrique alimentant le transformateur 11 est alors du même ordre de grandeur que les fréquences usuelles des réseaux de distribution au détriment du volume des noyaux magnétiques du  
25 transformateur.

Dans cette variante, les étages secondaires 20 présentent une source 21 de tension continue adaptée au fonctionnement avec un transformateur triphasé, c'est-à-dire que l'enroulement secondaire S du transformateur se présente sous la forme de trois enroulements reliés chacun d'une part à un point commun et  
30 d'autre part au point milieu d'une branche respective d'un pont redresseur comportant six diodes D1 à D6. Les cathodes des diodes D1, D3 et D5 sont reliées à

une borne positive d'un condensateur de filtrage CF dont l'autre borne, négative, est reliée aux anodes des diodes D2, D4 et D6. Le circuit de commutation 22 de l'étage secondaire et son schéma d'interconnexion avec les autres étages secondaires sont inchangés par rapport à la première variante.

5                    On va maintenant détailler le fonctionnement du générateur selon l'invention en décrivant succinctement les différents états dans lesquels un étage secondaire peut se trouver en fonction de la commande appliquée aux commutateurs du circuit de commutation 22. Pour la suite, on définit arbitrairement un sens de circulation du courant comme positif lorsque le courant entre dans la charge 7 par la ligne 5 et en ressort par la ligne 8.

                  Lorsque le circuit de commande 15, par l'intermédiaire de la fibre optique 24 et du convertisseur optique 23, impose un état passant (ON) aux commutateurs Q1 et Q4, il commande un état bloqué (OFF) aux commutateurs Q2 et Q3 afin de ne pas court-circuiter la source 21 de tension. Dans le cas du premier  
15    étage secondaire 20a, la borne positive de la source 21a est connectée par l'intermédiaire du commutateur Q1a à la ligne 5 de la charge. La borne négative de la source 21a est reliée par l'intermédiaire du commutateur Q4a et de la ligne 25a au point commun des commutateurs Q1b et Q2b de l'étage secondaire suivant. En supposant que l'étage secondaire 20b est commandé de façon similaire, le  
20    commutateur Q1b connecte alors la borne négative de la source 21a à la borne positive de la source 21b. En raisonnant par analogie sur tous les étages, il apparaît que la source 21a fait circuler un courant de sens positif dans la charge 7.

                  Lorsque le circuit de commande 15 impose à l'opposé un état passant aux commutateurs Q2a et Q3a et un état bloqué à Q1a et Q4a, c'est la borne  
25    négative de la source 21a qui est connectée à la ligne 5 de la charge, et la borne positive de la source 21a est reliée via Q3a et la ligne 25a au point commun des commutateurs Q1b et Q2b de l'étage secondaire suivant. En supposant que l'étage secondaire 20b est commandé de façon similaire, le commutateur Q2b connecte alors la borne positive de la source 21a à la borne négative de la source 21b. En  
30    raisonnant par analogie sur tous les étages, il apparaît alors que la source 21a fait circuler un courant de sens négatif dans la charge 7.

Il est possible également de commander l'état des commutateurs de façon à isoler la source 21 d'un ou plusieurs étages secondaires du circuit de la charge sans pour autant interrompre la continuité de la série des étages secondaires. Pour cette démonstration, on suppose que la plupart des étages secondaires ont été commandés pour faire passer un courant positif dans la charge et que l'on désire isoler la source 21b de tension de l'étage secondaire 20b. En commandant les commutateurs Q1b et Q3b à l'état bloqué et le commutateur Q4b à l'état passant, on constate que le courant circule dans l'étage 20b en entrant par la ligne 25b au point commun de Q3b et Q4b, traverse Q4b et la diode antiparallèle 26 de Q2b pour sortir de l'étage 20b par la ligne 25a. On constate ainsi que la source 21b est restée isolée du circuit de passage du courant. On note également que l'état du commutateur Q2b n'est pas déterminant pour le passage du courant.

Bien entendu, lorsque le courant dans la charge 7 circule dans le sens négatif, le rôle des commutateurs Q2b et Q4b est inversé, le courant entrant par la ligne 25a, traversant Q2b alors nécessairement à l'état passant et la diode antiparallèle de Q4b pour repartir par la ligne 25b.

On remarque également que compte tenu de la symétrie du circuit de commutation, il est également possible d'isoler la source de tension d'un étage en commandant les commutateurs Q2 et Q4 à l'état bloqué et les commutateurs Q1 et Q3 à l'état passant en fonction du sens du courant dans la charge.

Le tableau ci-après résume les commandes à appliquer aux commutateurs pour insérer la source 21 respectivement en série dans le sens positif, en série dans le sens négatif ou pour isoler la source de tension en fonction du sens du courant dans la charge.

Q1	ON	OFF	OFF	ON	OFF	X
Q2	OFF	ON	X	OFF	ON	OFF
Q3	OFF	ON	OFF	X	OFF	ON
Q4	ON	OFF	ON	OFF	X	OFF
Source 21	Sens +	Sens -	Isolée (sens +)		Isolée (sens -)	

On se réfère à la figure 4 dans laquelle on a représenté deux graphes permettant de mieux comprendre le fonctionnement du générateur selon l'invention.

Comme évoqué précédemment, pour effectuer certaines  
5 mesures visant à déterminer des caractéristiques électriques d'un matériau, on est amené à appliquer à une charge 7, par exemple une paire d'électrodes insérées dans le matériau à mesurer, un signal de courant périodique en forme de créneaux comportant une première durée T1 d'application d'un créneau de courant régulé positif, une durée T2 de relaxation suivie d'une durée T3 d'application d'un créneau  
10 de courant régulé négatif, elle-même suivie d'une autre durée de relaxation. De manière préférentielle, on définit une séquence temporelle telle que les quatre durées soient égales et réglables entre 2 et 4 secondes par exemple, ce qui se traduit par une séquence temporelle d'une durée totale de 8 à 16 secondes représentant la période du signal de courant.

15 En fonction du matériau à mesurer, on définit un courant de consigne pour chaque créneau de courant (figure 4b). De préférence on définit une même valeur de consigne, en valeur absolue, pour les créneaux positifs et négatifs. La valeur de consigne  $I_c$  est réglable entre 0 et 60 A par pas de 0,1 A par exemple.

Le circuit de commande 15 est adapté pour commander les  
20 commutateurs Q1 à Q4 des étages secondaires pour mettre en série au moins un étage secondaire et établir un courant dans la charge 7. Un moyen de mesure du courant circulant dans la charge, par exemple un capteur de courant à effet Hall ou à boucle de Rogowski (non représenté) placé autour de l'une des lignes 5 ou 8 d'alimentation de la charge permet de fournir une valeur réelle du courant circulant  
25 dans celle-ci. En fonction de l'écart entre cette valeur réelle et la valeur de consigne, le circuit de commande est programmé pour mettre en œuvre deux stratégies de réglage distinctes et complémentaires.

Dans un premier temps, pour opérer un réglage grossier de l'intensité du courant dans la charge, le circuit de commande 15 sélectionne, en  
30 fonction de l'impédance estimée de la charge, un groupe d'étages secondaires, dits étages actifs, dont la somme des tensions permet de faire circuler dans la charge un

courant au moins égal à la valeur de consigne  $I_c$ . Les commutateurs des étages actifs sont alors commandés pour que ces étages soient connectés en série en même temps, par exemple en commandant simultanément leurs commutateurs Q1 et Q4 à l'état passant et Q2 et Q3 à l'état bloqué. Corollairement, on commande les  
5 commutateurs des étages non sélectionnés de manière à isoler leur source de tension du circuit d'alimentation de la charge.

En commandant simultanément les commutateurs Q1 et Q4 (respectivement Q2 et Q3) des différents étages secondaires sélectionnés, la mise en série de leurs sources de tension et leur application aux bornes de la charge 7  
10 s'opère au même instant, permettant ainsi de réduire le temps de montée du créneau de courant au travers de la charge. En outre, le circuit de commande 15 peut être simplifié.

Dans un second temps, mais préférentiellement quasi simultanément, on sélectionne parmi les étages actifs au moins un étage secondaire, dit étage de régulation, dont les commutateurs sont actionnés à une fréquence  
15 beaucoup plus élevée que la fréquence du signal de courant. Par exemple, alors que la durée  $T_1$  est de l'ordre de la seconde, la période  $T_{REG}$  de commande de l'étage de régulation est de l'ordre de 50  $\mu s$ . Le circuit de commande 15 commande les commutateurs de l'étage de régulation de manière à mettre en série puis isoler sa  
20 source de tension selon la période  $T_{REG}$  en modulant le rapport cyclique de la commande de manière à asservir le courant réel circulant dans la charge 7 à la valeur de consigne  $I_c$ .

De manière avantageuse, le circuit de commande 15 est adapté pour choisir l'étage de régulation parmi les étages actifs dont la tension est la  
25 plus faible. Par exemple, on choisit comme étage de régulation l'étage actif présentant une tension à vide de l'ordre de 200 V préférentiellement aux étages actifs présentant des tensions de 500 V à 1800 V.

Comme on le constate sur la figure 4a, les étages actifs, par exemple les étages secondaires 20a et 20b fournissant les tensions  $U_a$  et  $U_b$  sont  
30 commandés simultanément et en continu pendant la durée  $T_1$  alors que l'étage de régulation, par exemple l'étage secondaire 20n est commandé selon la période  $T_{REG}$ .

Grâce à l'inductance de lissage 6, en série avec la charge 7, la commande en tout ou rien de l'étage de régulation permet de régler le courant dans la charge 7, avec une grande précision, inférieure à 1% de la valeur de consigne. De plus, comme seul l'étage de régulation est commuté à haute fréquence, le noyau magnétique de l'inductance de lissage 6 ne sature pas, les courants générés par les autres étages actifs se comportant comme des courants continus sur la durée T1.

A noter que si l'asservissement en courant réalisé par l'étage de régulation s'avère insuffisant, par exemple si le rapport cyclique de commande de l'étage tend vers 1 ou 0, le circuit de commande 15 est adapté pour commander l'insertion en série d'un étage actif supplémentaire ou bien la suppression ou le remplacement d'un des étages actifs par un étage de tension moindre.

A l'issue de la durée T1, le circuit de commande 15 isole simultanément tous les étages secondaires du circuit d'alimentation de la charge, la tension appliquée aux bornes de celle-ci s'annule ainsi que le courant qui la traverse, pour une durée T2 de relaxation. Pendant cette période, la puissance délivrée par le groupe électrogène peut être dérivée sur une résistance de charge externe (non représentée) pour éviter les à-coups de puissance.

A l'issue de la durée T2, le circuit de commande 15 inverse les polarités des étages actifs pendant la période T1, en commandant simultanément les commutateurs Q1 et Q4 à l'état bloqué et Q2 et Q3 à l'état passant pendant la durée T3. De manière analogue, l'étage de régulation est commandé en modulation de largeur d'impulsion à la période  $T_{REG}$  en inversant sa polarité. A l'issue de la durée T3, le circuit de commande 15 isole toutes les sources de tension des étages actifs pour une nouvelle période de relaxation à l'issue de laquelle la séquence reprend au début de T1.

Ainsi, le générateur selon l'invention et son procédé de mise en œuvre, en mettant simultanément en série des étages secondaires indépendants, de tensions variées, fonctionnant en continu pendant la durée de chaque créneau, permettent de fournir des créneaux de courant régulé avec une grande précision, présentant un taux d'ondulation résiduelle minimum et un temps de montée réduit.

Bien entendu, cette description est donnée à titre d'exemple illustratif uniquement et l'homme du métier pourra y apporter de nombreuses modifications sans sortir de la portée de l'invention, comme par exemple utiliser une alimentation électrique du générateur à partir d'un réseau de distribution électrique plutôt qu'un groupe électrogène si le réseau adapté est disponible ou si la  
5 mobilité du générateur n'est pas recherchée. En outre, la commande des circuits de commutation des étages secondaires pourrait être opérée par des moyens uniquement électriques ou, en utilisant des commutateurs adaptés pour être directement commandés de manière optique.

## REVENDICATIONS

1/ - Générateur de signaux de courant, adapté pour fournir aux bornes d'une charge (7) des créneaux de courant régulé, de polarité alternée, sous haute tension, comprenant :

- 5           - une pluralité de circuits, dits étages secondaires (20),
- chaque étage secondaire (20) comportant au moins une source (21) de tension continue isolée des sources (21) de tension des autres étages secondaires, et un circuit de commutation (22) comprenant quatre commutateurs (Q1 – Q4) organisés en un premier (Q1, Q2) et un
- 10           second (Q3, Q4) demi-ponts formés chacun de deux commutateurs montés en série entre le pôle positif et le pôle négatif de la source de tension,
- les étages secondaires (20) étant interconnectés entre eux de telle sorte que le point milieu du second (Q3, Q4) demi-pont de chaque étage
- 15           secondaire est relié au point milieu du premier (Q1, Q2) demi-pont de l'étage secondaire suivant, les bornes (5,8) de la charge (7) étant respectivement reliées au point milieu du premier demi-pont d'un premier étage secondaire, et au point milieu du second demi pont d'un dernier étage secondaire, et
- 20           - un circuit de commande (15), caractérisé en ce que ledit circuit de commande (15) est adapté pour :
- sélectionner un groupe d'étages secondaires (20), dit étages actifs, en fonction d'une valeur de consigne ( $I_c$ ) d'un courant circulant dans la charge (7),
- 25           ▪ commander les commutateurs (Q1-Q4) des étages secondaires non sélectionnés pour isoler leur source (21) de tension,
- sélectionner parmi lesdits étages actifs au moins un étage, dit étage de régulation,
  - commander les simultanément commutateurs (Q1-Q4) de chaque étage
- 30           actif, à l'exception de l'étage de régulation, à la fréquence (T1, T3) des

créneaux de courant, de manière à mettre en série les sources de tension de ces étages,

- commander les commutateurs (Q1-Q4) dudit étage de régulation selon une fréquence ( $T_{REG}$ ) supérieure à la précédente, avec un rapport cyclique de commande adapté pour réguler le courant circulant dans la charge à la valeur de consigne ( $I_c$ ).

2/ - Générateur selon la revendication 1, caractérisé en ce que la source (21) de tension de chaque étage secondaire comporte un enroulement secondaire (S) d'un transformateur (11) alimenté par un étage primaire (10), un pont redresseur à diodes (D1 – D6) et un condensateur de filtrage (CF).

3/ - Générateur selon la revendication 2, caractérisé en ce que le transformateur (11) est un transformateur monophasé et en ce que le pont de diode de chaque étage secondaire comporte 4 diodes (D1-D4).

4/ - Générateur selon la revendication 3, caractérisé en ce que le transformateur est un transformateur monophasé alimenté par un courant monophasé haché.

5/ - Générateur selon la revendication 2, caractérisé en ce que le transformateur (11) est un transformateur triphasé et en ce que le pont de diode de chaque étage secondaire comporte 6 diodes (D1-D6).

6/ - Générateur selon la revendication 5, caractérisé en ce que le transformateur (11) est directement couplé à une source de courant triphasé (16).

7/ - Générateur selon la revendication 6, caractérisé en ce que la source de courant triphasé (16) est un groupe électrogène.

8/ - Générateur selon la revendication 1, caractérisé en ce que les sources (21) de tension des étages secondaires présentent un étagement de leur tension de sortie en circuit ouvert permettant un réglage de la tension de sortie du générateur.

9/ - Générateur selon la revendication 1, caractérisé en ce que les commutateurs (Q1-Q4) sont des transistors bipolaires à grille isolée.

10/ - Générateur selon la revendication 9, caractérisé en ce que lesdits transistors sont montés sur des radiateurs à huile.

11/ - Générateur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le circuit de commande (15) est relié aux commutateurs (Q1-Q4) par une liaison  
5 à fibre optique (23 ; 24).

12/ - Procédé de génération de signaux de courant, adapté pour fournir aux bornes (5,8) d'une charge (7) des créneaux de courant régulé, de polarité alternée, sous haute tension, dans lequel on utilise un générateur comprenant une pluralité d'étages secondaires (20) comportant chacun une source  
10 (21) de tension continue isolée des sources de tension des autres étages secondaires, et un circuit de commutation (22) comprenant quatre commutateurs (Q1-Q4) organisés en un premier (Q1,Q2) et un second (Q3,Q4) demi-ponts formés chacun de deux commutateurs montés en série entre le pôle positif et le pôle négatif de la source de tension, les étages secondaires étant interconnectés entre eux de telle sorte  
15 que le point milieu du second demi-pont de chaque étage secondaire est relié au point milieu du premier demi-pont de l'étage secondaire suivant, les bornes (5,8) de la charge (7) étant respectivement reliées au point milieu du premier demi-pont d'un premier étage secondaire, et au point milieu du second demi pont d'un dernier étage secondaire caractérisé en ce que :

20 - on sélectionne un groupe d'étages secondaires (20), dit étages actifs, en fonction d'une valeur de consigne ( $I_c$ ) d'un courant circulant dans la charge (7),

- on commande les commutateurs (Q1-Q4) des étages secondaires non sélectionnés pour isoler leur source (21) de tension,

25 - on sélectionne parmi lesdits étages actifs au moins un étage, dit étage de régulation,

- on commande simultanément les commutateurs (Q1-Q4) de chaque étage actif, à l'exception de l'étage de régulation, à la fréquence ( $T_1$ ,  $T_3$ ) des créneaux de courant, de manière à mettre en série les sources de tension de ces  
30 étages,

- on commande les commutateurs (Q1-Q4) dudit étage de régulation selon une fréquence ( $T_{REG}$ ) supérieure à la précédente, avec un rapport cyclique de commande adapté pour réguler le courant circulant dans la charge à la valeur de consigne ( $I_c$ ).



Fig2

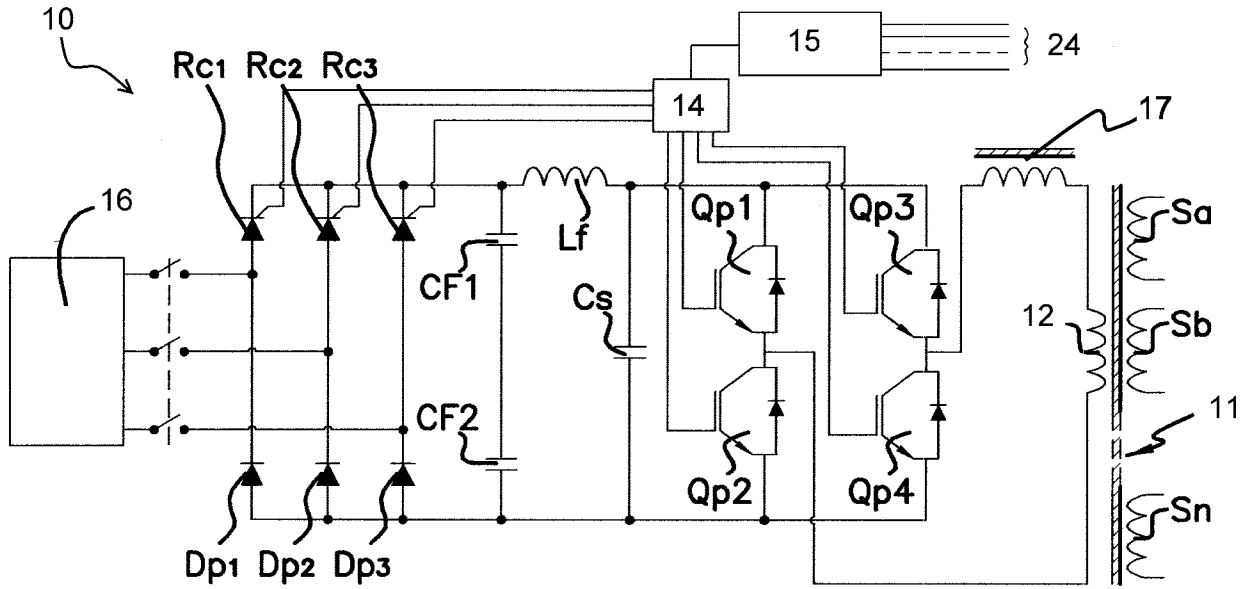
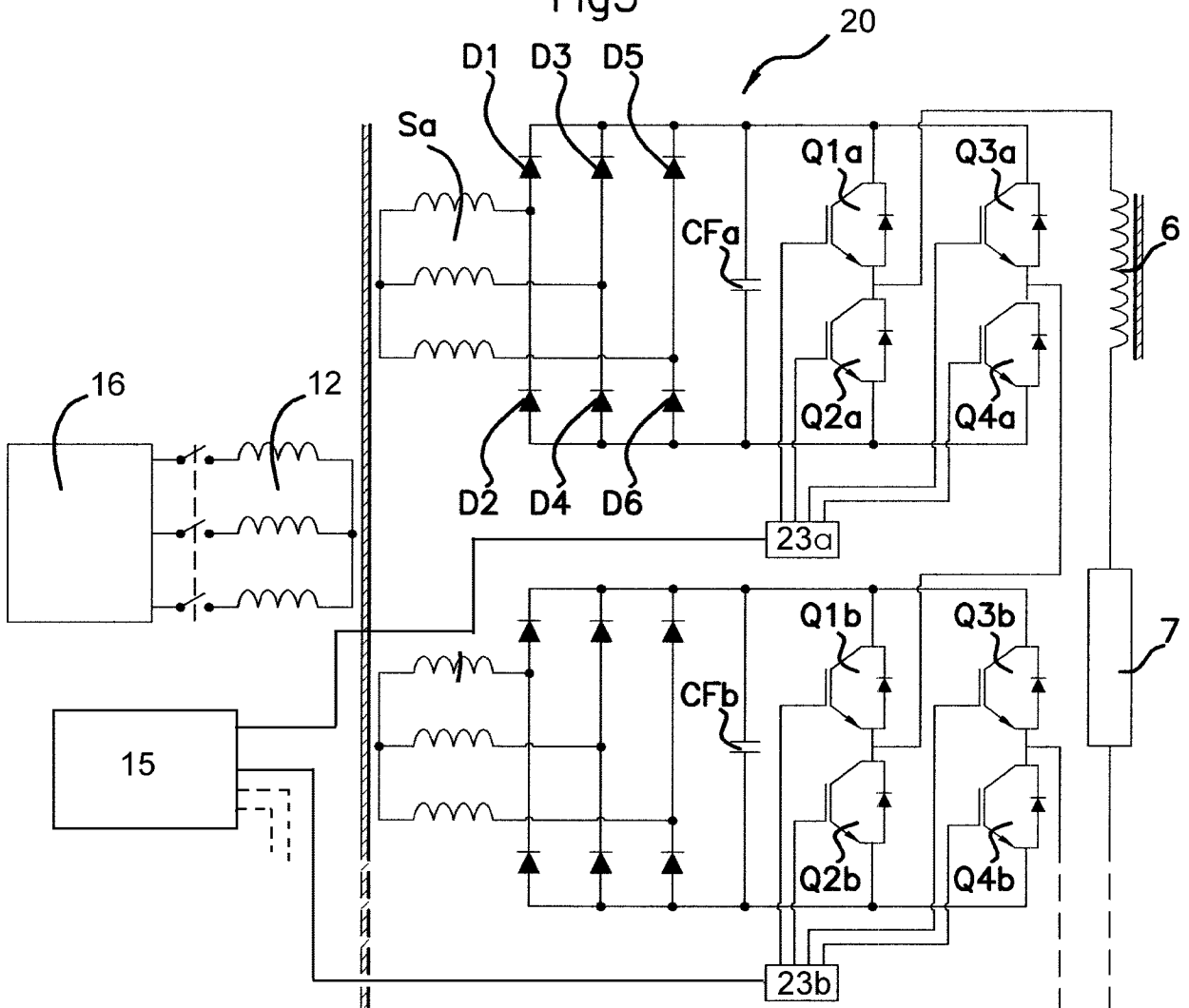


Fig3



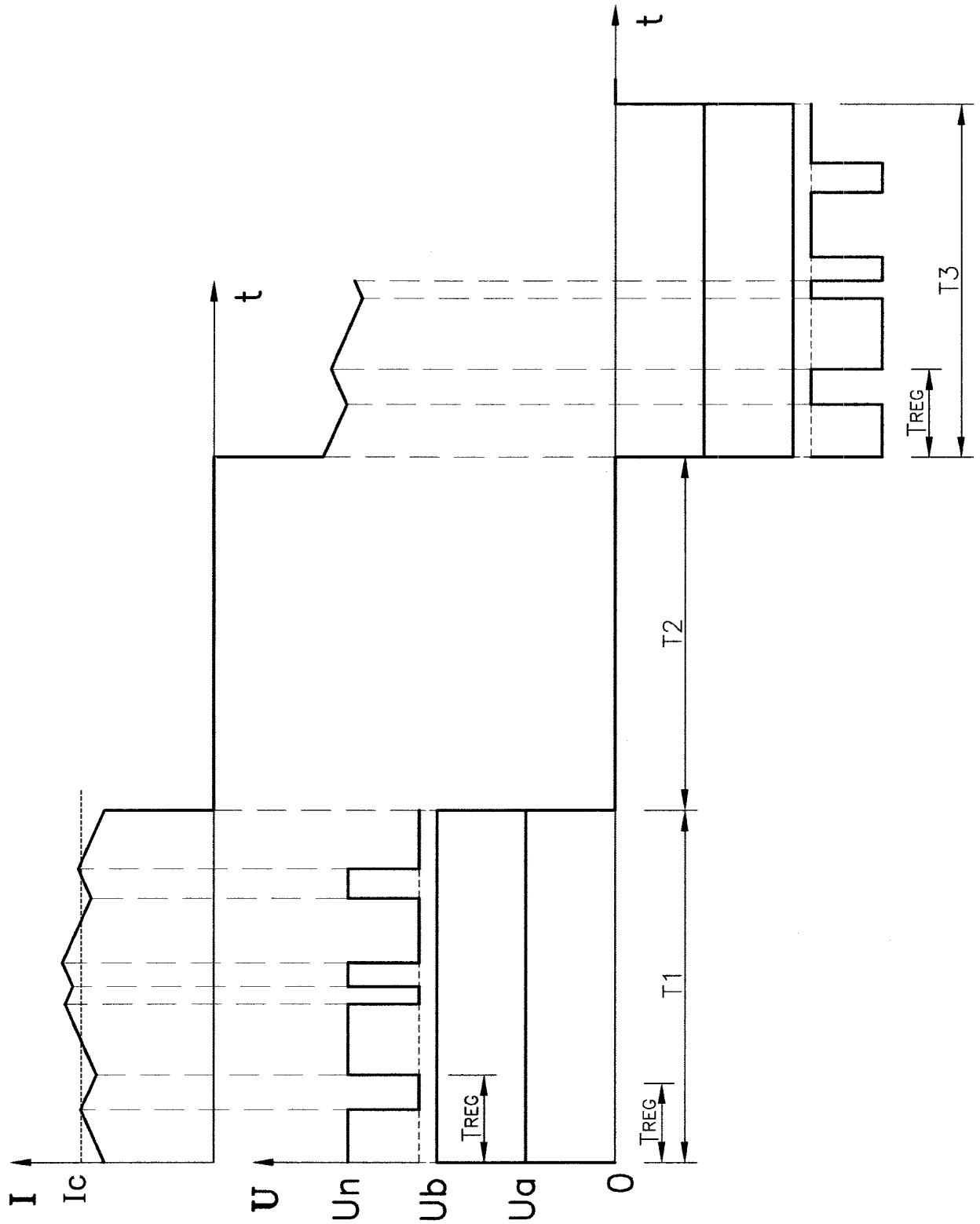


Fig4b

Fig4a