

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

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
26 août 2004 (26.08.2004)

PCT

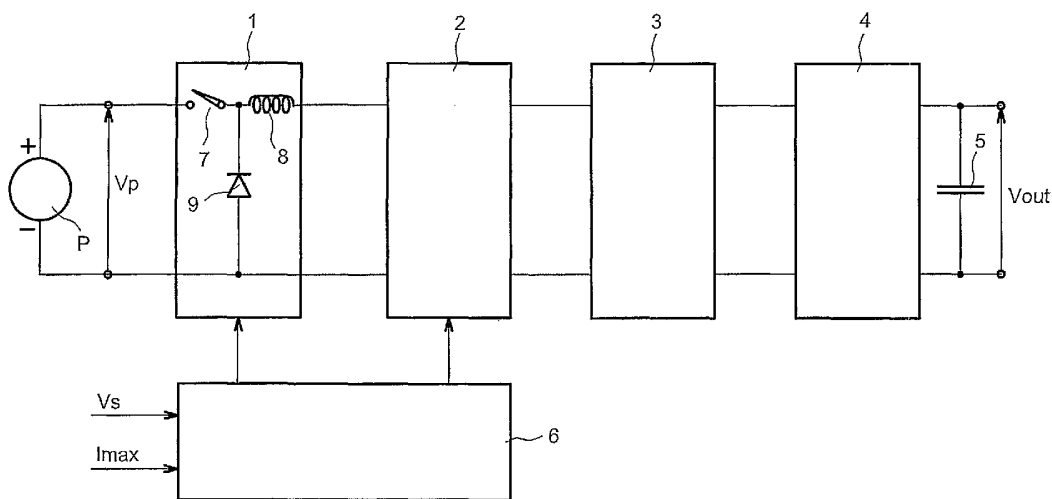
(10) Numéro de publication internationale
WO 2004/073147 A2

- (51) Classification internationale des brevets⁷ : **H02M** (72) Inventeurs; et
(21) Numéro de la demande internationale : PCT/FR2004/050042 (75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **CHATROUX, Daniel** [FR/FR]; Le Village, F-38470 Teche (FR). **MARC, Séverine** [FR/FR]; Chez Monsieur et Madame HUGUE René, "Le Pont Rouge", F-84820 VISAN (FR). **LAUSENAZ, Yvan** [FR/FR]; 28, avenue de Saint-Lazare, F-04100 MANOSQUE (FR).
(22) Date de dépôt international : 4 février 2004 (04.02.2004)
(25) Langue de dépôt : français
(26) Langue de publication : français
(30) Données relatives à la priorité : 03 01476 7 février 2003 (07.02.2003) FR
(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : **COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE** [FR/FR]; 31-33, rue de la Fédération, F-75752 PARIS 15ème (FR).
(74) Mandataire : **RICHARD, Patrick**; BREVATOME, 3, rue du Docteur Lancereaux, F-75008 PARIS (FR).
(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: ELECTRIC CONVERTER FOR FUEL CELL

(54) Titre : CONVERTISSEUR ELECTRIQUE POUR PILE A COMBUSTIBLE



(57) Abstract: The invention relates to an electric converter for a fuel cell (P) comprising current inverter means (2). The inventive electric converter comprises a voltage step-down chopper (1) which is mounted between the fuel cell (P) and the current inverter means (2). According to the invention, when a control signal is applied to the voltage step-down chopper (1), (i) the value of the average input voltage of the current inverter means is lowered to a threshold value (V_s) in the electrode activation zone of the cell, (ii) the value of the average input voltage of the current inverter means (2) is maintained at the voltage value at the cell terminals (V_p) in the resistance zone of the cell, and (iii) the output current from the converter is limited when the output current of the current inverter means (2) reaches a maximum reference value (I_{max}).

(57) Abrégé : L'invention concerne un convertisseur électrique pour pile à combustible (P) comprenant des moyens onduleur de courant (2). Le convertisseur électrique comprend un hacheur abaisseur de tension (1) monté entre la pile à combustible (P) et les moyens onduleur de courant (2). Sous l'action d'un signal de commande appliqué au hacheur abaisseur de tension (1) : la valeur

[Suite sur la page suivante]

WO 2004/073147 A2



MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

de la tension moyenne en entrée des moyens onduleur de courant est abaissée à une valeur de seuil (V_s) dans la zone d'activation des électrodes de la pile; la valeur de la tension moyenne en entrée des moyens onduleur de courant (2) est maintenue à la valeur de tension aux bornes de la pile (V_p) dans la zone de résistance de la pile et; le courant de sortie du convertisseur est limité lorsque le courant en sortie des moyens onduleur de courant (2) atteint une valeur maximale de consigne (I_{max}) .

**CONVERTISSEUR ELECTRIQUE
POUR PILE A COMBUSTIBLE**

Domaine technique et art antérieur

5 L'invention concerne un convertisseur électrique pour pile à combustible.

Les piles à combustible sont utilisées comme source d'énergie électrique dans de nombreuses applications.

10 Elles sont proposées, entre autres, comme sources d'énergie dans les véhicules automobiles électriques (voitures, autobus, bateaux à propulsion électrique, etc.) pour remplacer les moteurs à combustion interne. Il est alors possible de diminuer
15 la pollution locale générée par les véhicules automobiles.

Une pile à combustible est un générateur électrochimique dont les électrodes sont continûment alimentées en combustible et en comburant. Pour les
20 applications sur véhicules automobiles, la technologie retenue est principalement la technologie PEMFC des piles à combustible à membranes échangeuses de protons alimentées en hydrogène, d'une part, et avec l'oxygène de l'air, d'autre part (PEMFC pour « Proton Exchange
25 Membrane Fuel Cell »).

L'hydrogène utilisé peut être stocké dans un réservoir à bord du véhicule. C'est alors l'hydrogène qui est utilisé comme vecteur d'énergie sous forme chimique. La pile à combustible convertit cette énergie
30 chimique en énergie électrique nécessaire aux moteurs électriques du véhicule.

L'hydrogène utilisé peut aussi être produit à

bord du véhicule à partir d'hydrocarbures grâce à un circuit de reformage. Cette solution permet un meilleur rendement que le moteur à combustion interne dans les phases de roulage où le besoin en puissance est faible.

5 Une pile à combustible est un générateur électrique particulier du fait que chaque élément de pile fournit une très faible tension continue de l'ordre de 0,5 volt à 0,8 volt en charge. Selon les applications, pour atteindre une tension électrique
10 suffisante pour pouvoir utiliser ou convertir cette énergie, un grand nombre de cellules sont associées en série. Par exemple, un empilage d'une centaine de cellules en série permet une tension de fonctionnement en charge de l'ordre de 60 à 80 volts. Selon les
15 applications, plusieurs empilages de cellules en série sont utilisés. Ces empilages sont associés en série et/ou en parallèle.

Dans les applications pour véhicules ou pour générateurs stationnaires, l'énergie électrique
20 produite n'est pas directement adaptée à l'utilisation. D'une part, la pile à combustible ne fournit pas une tension constante, d'autre part, la tension fournie est faible.

Les moteurs électriques utilisent en interne
25 des tensions alternatives. Ce sont les variations de sens de ces tensions qui permettent la rotation du champ magnétique qui est produit par les courants électriques. Ce champ magnétique tournant entraîne le moteur en rotation.

30 Pour les moteurs à courant continu, la génération de tensions alternatives à partir d'une

tension continue a, dans le passé, été effectuée par des systèmes à balais et collecteurs segmentés. Aujourd'hui, pour des aspects de performance et de durée de vie, la commutation mécanique par les balais et collecteurs segmentés est le plus souvent remplacée par un onduleur à transistors. On génère alors pour les enroulements du moteur trois courants alternatifs sinusoïdaux de même amplitude et déphasés entre eux de $2\pi/3$, qui permettent de produire un champ magnétique tournant d'amplitude constante. Il est alors possible d'obtenir une rotation du moteur sans à-coup de couple.

L'inversion de tension nécessaire pour générer la tension alternative à partir de la tension continue est ralentie par l'inductance des bobinages et des câblages du moteur. Ce phénomène physique est d'autant plus gênant que la tension de fonctionnement du moteur est faible. Une tension faible correspond à un fort courant, donc une forte énergie stockée dans les inductances internes du moteur et dans le câblage. Une puissance électrique fournie sous la forme d'une faible tension et d'un fort courant est aussi une contrainte importante pour le dimensionnement et les pertes des collecteurs et balais ou du convertisseur électronique remplissant cette fonction.

En pratique, pour des moteurs de forte puissance (typiquement supérieure à 10 KW), la tension de fonctionnement du moteur est élevée (typiquement supérieure à 100 volts et, souvent, de l'ordre de 200 ou 400 volts alternatifs).

Aujourd'hui, on observe que les applications se standardisent selon les deux cas suivants :

- des moteurs utilisant des tensions de l'ordre de 200 volts alternatifs générées par un onduleur à transistors IGBT (IGBT pour « Insulated Gated Bipolar Transistor ») de tension maximale 600 volts, cet onduleur étant alimenté par une tension de l'ordre de 300 volts,
- des moteurs utilisant des tensions de l'ordre de 400 volts alternatifs générées par un onduleur à transistors IGBT de tension maximale 1200 volts, cet onduleur étant alimenté par une tension de l'ordre de 600 volts.

La standardisation des applications selon les deux cas ci-dessus est due aux limitations physiques exposées précédemment qui se traduisent par de médiocres performances pour les moteurs de fortes puissances alimentés sous basses tensions (typiquement inférieures à 100 volts) et à l'existence de solutions industrielles performantes pour les moteurs et les onduleurs alimentés par les réseaux électriques.

La tension aux bornes d'une pile à combustible varie très fortement en fonction du courant fourni. La figure 1 illustre la variation de tension V_p présente aux bornes d'une pile à combustible en fonction du courant I fourni par la pile.

La tension à vide de l'élément (cas où $I=0$) est la tension U_0 , par exemple égale à 1,23 volts pour une pile PEMFC fonctionnant à pression et à température ambiante. Au-delà de la tension U_0 , il est possible de distinguer trois zones de variation de la tension V_p . Une première zone (I) est une zone d'activation des électrodes de la pile dans laquelle la tension V_p chute

rapidement lors de l'augmentation du courant. Il apparaît alors sur les électrodes une chute de tension par rapport à la tension U_0 . Une deuxième zone (II), appelée zone de résistance, apparaît ensuite dans laquelle la pile se comporte comme un générateur de faible résistance interne. Au-delà de la deuxième zone (II), une troisième zone (III) apparaît, appelée zone de diffusion, dans laquelle la pile à combustible est limitée en courant par la vitesse de diffusion des combustibles et comburants à l'intérieur de la pile. Dans la zone de diffusion, la tension diminue fortement alors que le courant augmente peu.

Un empilage de cent cellules en série a une tension à vide de $100 \times U_0$, soit sensiblement 120 volts. En charge, la tension d'utilisation peut alors chuter à des tensions de l'ordre de 80 volts ou 60 volts. Une tension plus élevée correspond à un meilleur rendement, mais à une puissance fournie plus faible. Selon l'application, le rendement ou la puissance volumique (donc le coût) sera privilégié.

L'architecture électrique d'un véhicule doit tenir compte des deux contraintes liées à la pile à combustible, à savoir la faible tension continue de l'élément unitaire de pile et la forte variation de tension. Les applications usuelles nécessitent souvent un ou plusieurs convertisseurs d'énergie électrique, ainsi que des moyens de stockage tampons de cette énergie électrique.

Dans un véhicule, il est nécessaire de disposer d'énergie électrique pour démarrer les annexes de la pile à combustible avant que celle-ci ne puisse fournir

de l'énergie. Ensuite, les moteurs utilisent des tensions alternatives de quelques centaines de volts, à fréquences variables que l'on doit générer à partir d'une tension continue. De plus, un stockage électrique tampon peut s'avérer nécessaire pour fournir le surcroît d'énergie en accélération sans surdimensionner la pile et pour récupérer l'énergie au freinage.

En fait, l'utilisation d'une pile à combustible impose de tenir compte d'une approche système en fonction des besoins de chaque application. Selon les échelles de temps du stockage d'énergie, les condensateurs, les super condensateurs ou différentes technologies de batteries sont bien adaptés. Entre la pile à combustible, les stockages d'énergie éventuels et les utilisations de cette énergie, des convertisseurs électriques/électriques sont nécessaires. Ils permettent d'effectuer et de contrôler les transferts d'énergie.

Le convertisseur augmente la tension issue de la pile. En effet, la plupart des alimentations électriques pour véhicules nécessitent une tension opérationnelle qui doit être plus élevée que la tension d'alimentation fournie par une pile à combustible. Il en résulte qu'un convertisseur élévateur continu/continu (DC/DC) est nécessaire pour élever la tension délivrée par une pile à combustible au niveau de tension requis.

Différentes techniques sont connues pour l'utilisation de piles à combustible dans les véhicules automobiles.

Selon une première technique, la tension

fournie en sortie d'une pile à combustible est utilisée directement. Divers systèmes existent, plus ou moins similaires, qui utilisent directement un bus de tension fortement variable issu des piles à combustible. C'est
5 le cas, par exemple, du système décrit dans le brevet US 4 407 903 ou encore du système décrit dans l'article intitulé « *A 3kW isolates bidirectional DC/DC converter for fuel cell electric vehicle application* » (Power Conversion and Intelligent Motion Conference PCIM 2001
10 (Lizhi Zhu and al.)). Dans ce dernier cas, la pile à combustible fournit une tension de l'ordre de 200-400 volts pour alimenter, notamment, la traction du véhicule, l'air conditionné, ainsi qu'une batterie de 12 volts via un convertisseur bidirectionnel. La
15 tension de 12 volts est utilisée pour alimenter les charges traditionnelles telles que les lampes et les contrôles électroniques.

Selon une deuxième technique, la tension fournie en sortie d'une pile à combustible est
20 convertie en une tension parfaitement régulée ou faiblement variable (tension d'une batterie tampon par exemple).

La figure 2 illustre le cas de la tension parfaitement régulée. Un convertisseur C est placé en
25 sortie de la pile à combustible P et un convertisseur bidirectionnel Cb est placé en amont d'une batterie B. Le convertisseur C et le convertisseur bidirectionnel Cb sont montés sur un bus de tension T. Le convertisseur bidirectionnel Cb a un effet régulateur
30 puisqu'il peut fournir ou absorber de l'énergie. On obtient de cette façon une tension parfaitement

régulée, tant que les limites en puissance des convertisseurs et les limites de stockage ne sont pas atteintes

La figure 3 illustre le cas de la tension faiblement variable. La batterie B est ici reliée directement au bus de tension T. La batterie ayant une tension faiblement variable, c'est elle qui impose la tension du bus. Cette variante est décrite, par exemple, dans le brevet EP 1 091 437.

Les véhicules électriques actuels nécessitent deux sources de tension, l'une étant une haute tension (par exemple 400V continu) et l'autre une basse tension (par exemple 12V continu). Le brevet US 6 177 736 divulgue un exemple de convertisseur générant ces deux tensions. A l'aide d'un montage hacheur élévateur, la tension délivrée par une pile à combustible est transformée en deux tensions, respectivement de 400V et 12V.

En résumé, selon l'art antérieur décrit ci-dessus, il apparaît trois utilisations principales de la tension fournie par une pile à combustible dans un véhicule électrique :

- 1) une utilisation directe de la tension de la pile à combustible,
- 2) une conversion de la tension de la pile à combustible en une tension parfaitement régulée,
- 3) une conversion de la tension de la pile à combustible en une tension faiblement variable.

Dans le cadre de la première utilisation (utilisation directe), on observe qu'une variation de tension de l'ordre d'un facteur deux aux bornes de la

pile oblige à un surdimensionnement des moteurs, des onduleurs associés et des convertisseurs électriques utilisés. Dans une application où, par exemple, la tension délivrée par une pile à combustible varie de
5 200 à 400V, l'utilisation directe de cette tension implique un surdimensionnement des onduleurs de traction et des auxiliaires, comme le compresseur d'air. Ces équipements doivent supporter de fonctionner sous 400V et donc être dimensionnés en tension en
10 conséquence. D'autre part, ils doivent fournir leur pleine puissance sous une tension de 200V. Ils sont alors soumis à de forts courants, ce qui implique des interrupteurs de commutation de plus fort calibre en courants.

15 Dans le cadre des deux autres utilisations (tension continue parfaitement régulée et tension continue faiblement variable), la pile à combustible doit être associée à un convertisseur continu/continu (DC/DC) qui est également surdimensionné du fait de la
20 variation de tension de la pile à combustible. L'objet de la présente demande de brevet est de limiter les implications de cette contrainte sur la taille, le poids et le coût du convertisseur.

25 La figure 4 représente un hacheur élévateur selon l'art antérieur.

Le hacheur élévateur comprend au moins un interrupteur K, une diode D, une inductance L et un condensateur de sortie Cd.

30 Un tel hacheur est dit à accumulation. Lorsque l'interrupteur est fermé, le courant croît dans l'inductance qui stocke alors de l'énergie sous forme

électromagnétique. Lorsque l'interrupteur s'ouvre, la tension monte à ses bornes jusqu'à la mise en conduction de la diode. L'inductance cède alors à la sortie une partie de l'énergie qu'elle a stockée sous
5 la forme d'une plus haute tension.

Si l'interrupteur ne commute pas, la tension de sortie est égale à la tension d'entrée du fait de la conduction de la diode. Si l'interrupteur commute, le stockage et le transfert de l'énergie de l'inductance permet de fournir l'énergie en sortie sous la forme
10 d'une plus haute tension. Plus la tension de sortie est élevée par rapport à la tension d'entrée, plus les contraintes sur le convertisseur sont importantes. En effet, l'interrupteur doit tenir la tension de sortie
15 lorsqu'il est ouvert. D'autre part, il est traversé par un courant d'autant plus important que la puissance électrique est fournie sous une basse tension. En pratique, les contraintes techniques en tension, courant et pertes dans l'interrupteur limitent
20 l'utilisation du montage hacheur élévateur à des coefficients d'élévation de l'ordre de deux ou trois.

Par principe, avec un hacheur élévateur, la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée. Ceci implique que la tension de sortie de la
25 pile à combustible est, à tout instant, inférieure à la tension de la batterie déchargée ou à la tension régulée.

Un étage hacheur élévateur ne peut pas assurer la protection en court-circuit de la pile à
30 combustible. Un court-circuit en sortie du hacheur élévateur se traduit par une mise en court-circuit de

la pile, qui peut ne pas le supporter. Un interrupteur annexe est requis pour ouvrir rapidement en cas de court-circuit. Il faut alors intégrer une protection telle qu'un disjoncteur, un relais ou un transistor
5 auxiliaire.

La diminution de la taille d'un hacheur élévateur conduit à augmenter la fréquence d'utilisation du fait de la diminution de la taille des composants. Il est par ailleurs nécessaire d'améliorer
10 le refroidissement du circuit pour extraire la chaleur produite dans un volume diminué.

L'augmentation en fréquence d'un hacheur élévateur est limitée par les fortes contraintes sur l'interrupteur et la diode qui sont dimensionnés à la
15 fois pour la tension la plus élevée et le courant le plus élevé, et par les difficultés technologiques de réalisation des inductances de fort courant fonctionnant à haute fréquence.

Du fait des contraintes en tension et courant
20 des interrupteurs et diodes, l'augmentation de fréquence se traduit rapidement par une augmentation sensible des pertes de commutation de ces composants.

L'inductance a pour fonction de stocker de l'énergie sous forme électromagnétique. Une partie de
25 cette énergie se situe dans le bobinage de l'élément et donne lieu à des pertes par courant de Foucault dans le cuivre. Les inductances de fortes puissances et de forts courants sont de réalisations techniques délicates du fait de ces pertes par courant de
30 Foucault. Ces difficultés s'accroissent rapidement avec la montée en fréquence du montage.

La figure 5 représente un deuxième exemple de convertisseur continu/continu selon l'art antérieur.

Le convertisseur continu/continu comprend un onduleur W suivi d'un transformateur Z, d'un pont de diodes Pt, d'une inductance de lissage Ls et d'un condensateur de sortie Cs. L'onduleur W transforme la tension continue issue de la pile en une tension alternative appliquée au transformateur Z. En sortie du transformateur, le pont de diodes redresse la tension alternative pour en faire une tension continue. L'inductance de lissage Ls lisse la tension continue.

L'avantage de ce convertisseur est l'utilisation d'un transformateur qui permet, sans surdimensionnement, de réaliser de forts coefficients d'élévation entre la tension d'entrée et la tension de sortie.

Le transformateur transfère l'énergie directement entre son primaire et son secondaire. Contrairement à l'inductance, il ne doit pas stocker une forte énergie électromagnétique. De ce fait, les transformateurs de fortes puissances fonctionnant à haute fréquence sont plus faciles à réaliser que les inductances. Les bobinages peuvent être conçus pour avoir des pertes par courants de Foucault faibles même à haute fréquence (> 50 KHz).

D'autre part, le montage utilisant un onduleur et un transformateur supporte les courts-circuits et limite le courant à sa sortie. En cas de court-circuit, la pile est protégée.

Ce montage est alimenté par la pile à combustible dont la tension est fortement variable. Les

composants de l'onduleur, les diodes et le transformateur doivent être surdimensionnés en conséquence.

Ce surdimensionnement est une contrainte forte pour le convertisseur, laquelle se traduit par une augmentation de ses poids et volume et donc de ses coûts, et une augmentation de ses pertes et donc une chute de son rendement.

L'invention ne présente pas les inconvénients mentionnés ci-dessus.

Exposé de l'invention

En effet, l'invention concerne un convertisseur électrique pour pile à combustible comprenant des moyens onduleur de courant. Le convertisseur comprend un hacheur abaisseur de tension monté entre la pile à combustible et les moyens onduleur de courant et des moyens de commande pour délivrer un signal de commande appliqué à des moyens de commutation du hacheur abaisseur de tension de sorte que, sous l'action du signal de commande :

- la valeur de la tension moyenne en entrée des moyens onduleur de courant soit abaissée à une valeur de seuil dans une première zone de fonctionnement de la pile dite zone d'activation des électrodes de la pile,
- la valeur de la tension moyenne en entrée des moyens onduleur de courant soit maintenue à la valeur de tension aux bornes de la pile dans une deuxième zone de fonctionnement dite zone de résistance de la pile, et
- le courant de sortie du convertisseur soit limité

lorsque le courant en sortie des moyens onduleur de courant atteint une valeur maximale de consigne.

Selon une caractéristique supplémentaire, dans la zone de résistance de la pile, les moyens onduleur de courant sont commandés de façon que la valeur de la tension crête délivrée par l'onduleur soit sensiblement égale à la valeur de seuil.

Selon encore une caractéristique supplémentaire, le convertisseur comprend au moins un transformateur en sortie des moyens onduleur de courant.

Selon encore une caractéristique supplémentaire, le transformateur est un transformateur élévateur de tension.

Selon encore une caractéristique supplémentaire, les moyens onduleur de courant comprennent un pont de quatre interrupteurs.

Selon encore une caractéristique supplémentaire, les moyens onduleur de courant sont du type push-pull à deux interrupteurs.

Selon encore une caractéristique supplémentaire, le convertisseur comprend un premier et un deuxième transformateurs et les moyens onduleur de courant comprennent un premier et un deuxième interrupteurs, de sorte que le premier interrupteur est monté en série avec le bobinage primaire du premier transformateur et le deuxième interrupteur est monté en série avec le bobinage primaire du deuxième transformateur, les bobinages secondaires des premier et deuxième transformateurs étant connectés en parallèle.

Selon encore une caractéristique supplémentaire,

les premier et deuxième transformateurs sont en technologie planar.

Selon encore une caractéristique supplémentaire, le convertisseur comprend un redresseur.

5 Selon encore une caractéristique supplémentaire, le redresseur comprend des ensembles de diodes montées en série ou en matrice de diodes.

Selon encore une caractéristique supplémentaire, le hacheur abaisseur comprend au moins un interrupteur
10 en technologie IGBT.

Selon encore une caractéristique supplémentaire, les moyens onduleur de courant comprennent des transistors MOSFET.

Selon encore une caractéristique supplémentaire,
15 le convertisseur comprend des moyens de filtrage.

Le convertisseur électrique pour pile à combustible selon l'invention présente de nombreux avantages.

Les moyens de commutation du hacheur abaisseur
20 de tension comprennent au moins un interrupteur. Avantageusement, seul l'interrupteur du hacheur abaisseur de tension supporte la tension maximale issue de la pile à combustible. Les moyens onduleur de courant peuvent alors être dimensionnés pour la valeur
25 de la tension de seuil qui est plus faible que la tension maximale. Si les moyens onduleur utilisent un pont complet à quatre interrupteurs, la tension à prendre en compte pour le dimensionnement est la tension de seuil. Si les moyens onduleur sont de type
30 push-pull à deux interrupteurs, la contrainte est le double de la tension de seuil mais, par contre, la

contrainte en courant moyen peut être diminué de moitié.

Par ailleurs, l'interrupteur du hacheur abaisseur est à l'état passant durant la plus grande
5 plage de fonctionnement du convertisseur. Il peut alors être choisi dans une technologie qui minimise les pertes en conduction, par exemple selon la technologie de type IGBT à faible chute de tension. Dans ce cas, lors du fonctionnement de la pile à combustible dans la
10 zone (I), le faible niveau de courant lors des phases de commutation permet de maintenir les pertes de commutation à un niveau très faible.

Le fonctionnement des moyens onduleur de courant sous une contrainte de tension constante (la
15 tension de seuil) permettent d'utiliser des transistors à effet de champ de type MOSFET (MOSFET pour « Métal-Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor ») dimensionnés de façon appropriés. L'absence d'un fort surdimensionnement des composants qui constituent le
20 convertisseur selon l'invention (contrairement à ce qui est le cas selon l'art antérieur) est un point important pour la minimisation des pertes. Les transistors MOSFET sont bien adaptés pour réaliser des convertisseurs fonctionnant à haute fréquence. Par
25 contre, leur résistance parasite à l'état passant croît très vite avec la tension. Dans la pratique, cette résistance parasite conduit à l'utilisation de plusieurs transistors en parallèle pour commuter de forts courants.

30 L'inductance de lissage du montage a avantageusement très peu d'énergie à stocker et

échanger. En effet, lorsque l'interrupteur du hacheur abaisseur commute, le courant est faible et, partant, l'énergie gérée par l'inductance est faible. De même, lorsque les moyens onduleur de courant assurent l'élévation de tension par la phase de conduction simultanée des interrupteurs, le coefficient d'élévation (rapport entre la tension de seuil V_s et la tension V_p aux bornes de la pile) est très faible et l'énergie gérée par l'inductance est en conséquence également très faible.

Du fait du très faible coefficient d'élévation en tension, les diodes de sortie conduisent avec un temps de conduction proche de 50% ce qui limite leur courant crête, le niveau du courant de recouvrement inverse lors de leur blocage et les pertes associées.

Le fonctionnement du transformateur sous tension définie, avec très peu de variation des durées des phases des moyens onduleur, permet de dimensionner le transformateur avec une excursion en induction magnétique proche de l'excursion maximale des matériaux magnétiques et ceci sans risque de saturation dans des phases transitoires de fonctionnement du convertisseur.

Les contraintes des moyens onduleur, du transformateur et de l'inductance étant moindres que dans l'art antérieur permettent la réalisation d'un convertisseur de volume moindre qui conduit à une augmentation de la fréquence de fonctionnement.

La présence du transformateur permet de fournir une tension de sortie beaucoup plus élevée que la tension d'entrée sans contrainte particulière. Il est possible d'utiliser un transformateur de technologie

planar qui est bien adapté aux hautes fréquences de fonctionnement et qui peut être facilement refroidi.

Egalement, le convertisseur selon l'invention supporte avantageusement le court-circuit et protège la
5 pile à combustible.

Pour les applications à forte puissance et à haute fréquence, les contraintes des différents composants (interrupteurs, diodes, inductances, transformateurs, condensateurs) sont telles qu'il est
10 nécessaire d'utiliser une association de composants élémentaires en parallèle et/ou en série pour remplir les différentes fonctions désirées. Par exemple, l'interrupteur à base de transistors MOSFET doit pouvoir commuter très vite, avoir une inductance
15 parasite de câblage négligeable (pour ne pas ralentir la vitesse de croissance des courants et pour ne pas dissiper l'énergie stockée dans cette inductance parasite), avoir une résistance à l'état passant très faible et être capable de transférer ces pertes
20 thermiques à un dissipateur sans surchauffe. A haute fréquence, cette fonction est alors nécessairement réalisée par la mise en parallèle de plusieurs composants pour pouvoir atteindre une inductance parasite et de câblage suffisamment faible.

25 De manière préférée, il est également possible d'utiliser un grand nombre de composants de petites tailles adaptés aux standards industriels. Les avantages qu'il y a à utiliser des composants standards sont, entre autres :

30 - un coût inférieur à celui de l'utilisation de composants moins répandus ;

- l'avantage de nombreux fournisseurs pour l'obtention des composants ;

- une grande fiabilité des composants due à leur production en très grande quantité ;

5 - l'obtention d'inductance interne et de câblage très réduite par la facilité de mise en parallèle des composants ;

- la facilité et la rapidité de pilotage de ces composants du fait de la petite taille de ceux-ci.

10 Le convertisseur électrique selon l'invention comprend également des moyens redresseurs à diodes. Les diodes des moyens redresseurs sont montées en série ou sous forme de matrice de diodes. Cela permet d'utiliser des composants industriels standards pouvant offrir une
15 très grande rapidité. La vitesse d'une diode est caractérisée par le temps de recouvrement inverse, c'est-à-dire le temps pendant lequel la diode laisse passer le courant en inverse et n'est pas encore capable de bloquer celui-ci. Cette phase donne lieu à
20 beaucoup de pertes. Le temps de recouvrement inverse est d'autant plus important que la tenue en tension de la diode est élevée. La mise en série ou en matrice de diodes ayant une faible tenue en tension à la place, par exemple, d'une diode unique ayant une tenue en
25 tension plus élevée permet d'obtenir un temps de recouvrement inverse relativement faible qui est celui des diodes à faible tenue en tension. Ceci est un avantage pour la diminution des pertes et permet un fonctionnement à plus haute fréquence pour augmenter la
30 compacité.

Brève description des figures

- D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture d'un mode de réalisation préférentiel de l'invention fait en référence aux figures jointes parmi lesquelles :
- la figure 1 représente la variation de tension aux bornes d'une pile à combustible en fonction du courant fourni par la pile ;
 - 10 - la figure 2 représente un premier exemple de circuit de régulation de tension de pile à combustible selon l'art antérieur ;
 - la figure 3 représente un deuxième exemple de circuit de régulation de tension de pile à combustible selon l'art antérieur ;
 - 15 - la figure 4 représente un premier exemple de convertisseur utilisé en association avec un circuit de régulation de tension selon l'art antérieur ;
 - la figure 5 représente un deuxième exemple de convertisseur utilisé en association avec un circuit de régulation de tension selon l'art antérieur ;
 - 20 - la figure 6 représente un schéma de principe de convertisseur électrique pour piles à combustible selon l'invention ;
 - 25 - la figure 7 représente la variation de la tension de sortie du convertisseur électrique selon l'invention en fonction du courant fourni par la pile à combustible;
 - la figure 8 représente un premier exemple de convertisseur électrique pour pile à combustible selon un premier mode de réalisation de
 - 30

- l'invention ;
- la figure 9 représente un deuxième exemple de convertisseur électrique pour pile à combustible selon le premier mode de réalisation de l'invention ;
 - la figure 10 représente un convertisseur électrique pour pile à combustible selon un deuxième mode de réalisation de l'invention ;
 - la figure 11 représente un convertisseur électrique pour pile à combustible selon un troisième mode de réalisation de l'invention.

Description détaillée de modes de réalisation de l'invention

Les figures 1 à 5 ont été décrites précédemment, il est donc inutile d'y revenir.

La figure 6 représente un schéma de principe de convertisseur électrique pour pile à combustible selon l'invention et la figure 7 représente la tension de sortie V_{out} d'un convertisseur électrique pour pile à combustible selon l'invention en fonction du courant I délivré en sortie des moyens onduleur de courant.

Le convertisseur comprend un hacheur abaisseur de tension 1, un onduleur de courant 2, un transformateur 3, un redresseur 4, un condensateur de filtrage 5 et un circuit de commande 6. Le hacheur abaisseur de tension 1 comprend, par exemple, un interrupteur 7, une self-induction 8 et une diode 9. Le circuit de commande 6 pilote l'interrupteur du hacheur élévateur et les interrupteurs (non représentés sur la figure 6) de l'onduleur de courant 2. Une consigne de

tension de seuil V_s et une consigne de courant maximum I_{max} sont appliquées au circuit de commande 6.

Comme cela a été mentionné précédemment (cf. figure 1), trois zones de variation de la tension V_p de la pile à combustible peuvent être distinguées, à savoir, une zone d'activation des électrodes de la pile (I), une zone de résistance (II) et une zone de diffusion (III) (cf. figure 7).

Dans la zone d'activation des électrodes de la pile (I), l'interrupteur 7 du hacheur abaisseur de tension est régulièrement commuté, de l'état passant à l'état bloqué et réciproquement, pour laisser passer de façon hachée le courant débité et, ainsi, abaisser la tension en entrée de l'onduleur. Durant cette phase, les temps de conduction des interrupteurs de l'onduleur peuvent être fixes. Les commutations de l'interrupteur 7 durent jusqu'à ce que la tension V_p atteigne la tension de seuil $n \times V_s$ (n étant le rapport de transformation du transformateur) qui correspond alors au passage de la zone d'activation (I) à la zone de résistance (II). Comme cela apparaît clairement à l'homme du métier, il faut ici noter que la tension qui correspond au passage de la zone d'activation (I) à la zone de résistance (II) ne saurait se définir pour une valeur précise de tension mais sur une plage de valeurs de tension.

Dans la zone de résistance (II), l'interrupteur 7 du hacheur abaisseur de tension est maintenu constamment fermé. La tension moyenne à l'entrée de l'onduleur de courant est alors égale à la tension V_p aux bornes de la pile à combustible.

Préférentiellement, dans la zone de résistance (II), l'onduleur de courant est commandé de façon que la tension crête qu'il délivre soit sensiblement égale à la tension de seuil V_s . Les phases de conduction des interrupteurs de l'onduleur de courant sont alors pilotées à cette fin par le circuit de commande.

La tension de sortie du convertisseur V_{out} est ainsi sensiblement égale à la tension V_s multipliée par le rapport de transformation n du transformateur.

L'interrupteur 7 est maintenu fermé tant que la tension délivrée par la pile à combustible évolue dans la zone de résistance (II). Lorsque le courant en sortie de l'onduleur de courant atteint la valeur maximale de consigne I_{max} , l'interrupteur du hacheur abaisseur 7 commute pour limiter le courant de sortie du convertisseur et, ainsi, permettre la tenue au court-circuit et protéger la pile. Préférentiellement, la valeur de consigne I_{max} est choisie de façon que le courant maximal que peut fournir la pile avant que la tension de celle-ci ne s'effondre ne soit pas atteint.

La figure 8 représente un premier exemple de convertisseur électrique selon un premier mode de réalisation de l'invention.

Comme mentionné ci-dessus, le convertisseur comprend un hacheur abaisseur de tension 1, un onduleur de courant 2, un transformateur 3, un redresseur 4, un condensateur de filtrage 5 et un circuit de commande 6. Le hacheur abaisseur de tension 1 est constitué d'un interrupteur 7, d'une inductance 8 et d'une diode de roue libre 9.

L'onduleur de courant 2 est monté en sortie du

hacheur abaisseur de tension 1. Il comprend un pont de quatre interrupteurs 10, 11, 12, 13. Le courant alternatif haute fréquence fourni par l'onduleur de courant 2 est appliqué au bobinage primaire 14 du transformateur 3. Le transformateur 3 est préférentiellement un transformateur élévateur destiné à porter la tension issue de la pile à un niveau adapté à l'application. Le bobinage secondaire du transformateur 15 est connecté au redresseur 4 qui redresse le courant parcourant le bobinage secondaire pour le fournir au condensateur de filtrage 5.

La tension prise aux bornes de l'onduleur de courant 2 est nulle dans la phase de conduction simultanée des interrupteurs qui permettent d'effectuer l'élévation de tension. Le circuit de commande 6 pilote cette phase de conduction simultanée de telle manière que la tension aux bornes de l'onduleur soit égale à V_s lorsque l'une ou l'autre diagonale de l'onduleur de courant conduit.

Lorsque le courant en sortie du convertisseur atteint la valeur I_{max} , l'interrupteur 7 commute pour limiter le courant.

La figure 9 représente un deuxième exemple de convertisseur électrique pour pile à combustible selon le premier mode de réalisation de l'invention

Le transformateur 3 présente deux enroulements secondaires 17 et 18 qui ont des nombres de spires identiques et qui sont connectés en série. Le redresseur 4 est constitué de deux diodes 19 et 20. Les deux bobinages en série associés aux deux diodes constituent un système redresseur avec transformateur à

point milieu connu en soi.

La figure 10 représente un convertisseur électrique pour pile à combustible selon un deuxième mode de réalisation de l'invention.

5 Le transformateur 3 comprend deux bobinages primaires 23, 24 connectés en série et ayant le même nombre de spires. Les extrémités des bobinages 23 et 24 sont connectées aux bornes positives des interrupteurs respectifs 21 et 22 pilotés par le circuit de commande
10 6. La tension du point milieu des bobines 23, 24 est nulle lorsque les deux interrupteurs 21 et 22 conduisent. Elle est égale à V_s lorsqu'un seul des deux interrupteurs conduit. Lorsqu'un interrupteur conduit, la tension aux bornes de l'interrupteur qui conduit est
15 nulle, la tension au point milieu est égale à V_s et la tension aux bornes de l'autre interrupteur qui est alors ouvert est égale à $2V_s$, du fait du couplage du transformateur.

Le secondaire du transformateur peut être
20 unique, associé à un redresseur à quatre diodes, ou constitué de deux bobinages de même nombre de spires associés à deux diodes.

La figure 11 représente un convertisseur électrique pour pile à combustible selon un troisième
25 mode de réalisation de l'invention.

Le convertisseur comprend deux transformateurs dont les secondaires sont connectés en parallèle.

De façon générale, selon l'art connu, en basse
30 tension, les onduleurs utilisant quatre interrupteurs sont peu utilisés car les connexions des quatre interrupteurs entre eux et avec le bobinage du

transformateur doivent toutes présenter de très faibles inductances de câblage. Cette contrainte physique est de réalisation technique délicate.

L'onduleur utilisant seulement deux interrupteurs simplifie la réalisation peu inductive des connexions de câblage. Par contre les deux enroulements primaires du transformateur doivent être très bien couplés entre eux. De même, ces deux enroulements doivent avoir un très bon couplage avec le ou les bobinages secondaires.

Le schéma de la figure 11 présente les avantages d'utiliser seulement deux interrupteurs et de ne pas nécessiter de transformateurs ayant deux bobinages primaires devant être très bien couplés entre eux. Les deux transformateurs 26 et 27 ont un enroulement primaire unique et un ou plusieurs secondaires très bien couplés à ce primaire unique. Ces deux transformateurs sont de réalisation technique beaucoup plus simple. De ce fait, les transformateurs planar qui utilisent des bobinages constitués de feuillets de cuivre découpés ou des circuits imprimés sont utilisables. Ces transformateurs peuvent être très bien refroidis et sont donc bien adaptés à des fonctionnements à haute fréquence. Ceci permet un gain en compacité des convertisseurs. L'utilisation de la technologie planar rendue possible par ce montage permet d'autre part un gain en coût lors des productions en volume.

REVENDICATIONS

1. Convertisseur électrique pour pile à
combustible (P) comprenant des moyens onduleur de
5 courant (2), caractérisé en ce qu'il comprend un
hacheur abaisseur de tension (1) monté entre la pile à
combustible (P) et les moyens onduleur de courant (2)
et des moyens de commande (6) pour délivrer un signal
de commande appliqué à des moyens de commutation (7) du
10 hacheur abaisseur de tension (1) de sorte que, sous
l'action du signal de commande :

- la valeur de la tension moyenne en entrée des moyens
onduleur de courant soit abaissée à une valeur de
seuil (V_s) dans une première zone de fonctionnement
15 (I) de la pile dite zone d'activation des électrodes
de la pile,
- la valeur de la tension moyenne en entrée des moyens
onduleur de courant (2) soit maintenue à la valeur de
tension aux bornes de la pile (V_p) dans une deuxième
20 zone de fonctionnement (II) dite zone de résistance
de la pile, et
- le courant de sortie du convertisseur soit limité
lorsque le courant en sortie des moyens onduleur de
courant (2) atteint une valeur maximale de consigne
25 (I_{max}).

2. Convertisseur selon la revendication 1,
caractérisé en ce que, dans la zone de résistance de la
pile (II), les moyens onduleur de courant (2) sont
30 commandés de façon que la valeur de la tension crête
délivrée par l'onduleur soit sensiblement égale à la

valeur de seuil (V_s).

3. Convertisseur selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce qu'il comprend au moins un transformateur (3) en sortie des moyens onduleur de courant.

4. Convertisseur selon la revendication 3, caractérisé en ce que le transformateur (3) est un transformateur élévateur de tension.

5. Convertisseur selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les moyens onduleur de courant comprennent un pont à quatre interrupteurs (10, 11, 12, 13).

6. Convertisseur selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que les moyens onduleur de courant sont du type push-pull à deux interrupteurs (21, 22).

7. Convertisseur selon la revendication 3 ou 4, caractérisé en ce qu'il comprend un premier (26) et un deuxième (27) transformateurs et en ce que les moyens onduleur de courant comprennent un premier (28) et un deuxième (29) interrupteurs, de sorte que le premier interrupteur (28) est monté en série avec le bobinage primaire (30) du premier transformateur (26) et le deuxième interrupteur (29) est monté en série avec le bobinage primaire (32) du deuxième transformateur (27),

les bobinages secondaires (31, 33) des premier et deuxième transformateurs étant connectés en parallèle.

8. Convertisseur selon la revendication 7, caractérisé en ce que les premier (26) et deuxième (27) transformateurs sont en technologie planar.

9. Convertisseur selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend un redresseur (4).

10. Convertisseur selon la revendication 9, caractérisé en ce que le redresseur comprend des ensembles de diodes (9) montées en série ou en matrice de diodes.

11. Convertisseur selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le hacheur abaisseur (2) comprend au moins un interrupteur (7) en technologie IGBT.

12. Convertisseur selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que les moyens onduleur de courant (2) comprennent des transistors MOSFET.

13. Convertisseur de courant selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens de filtrage (5).

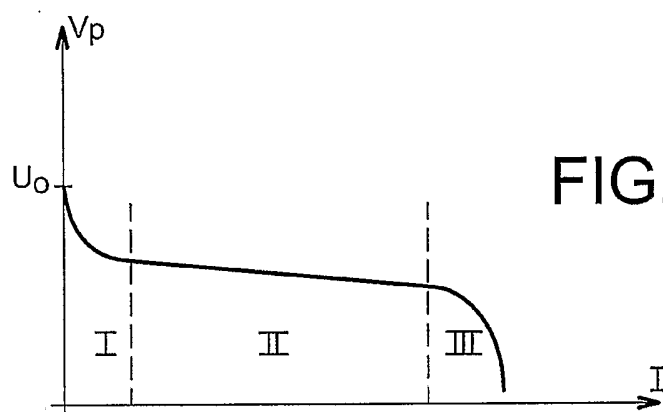


FIG. 1

FIG. 2

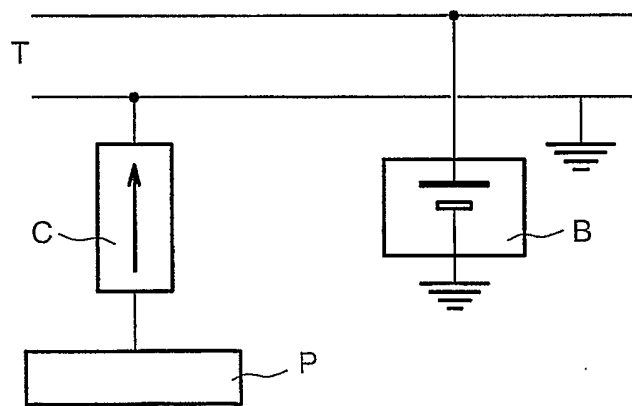
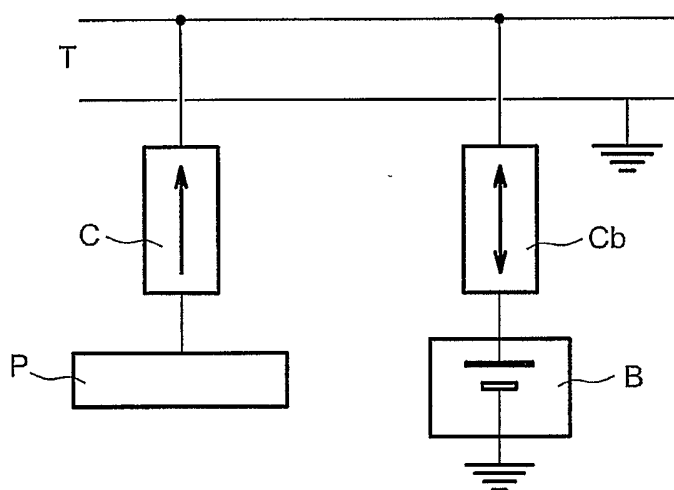


FIG. 3

2 / 8

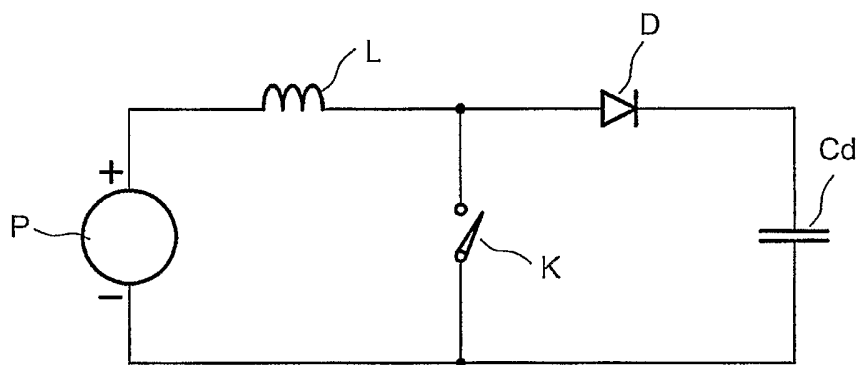


FIG. 4

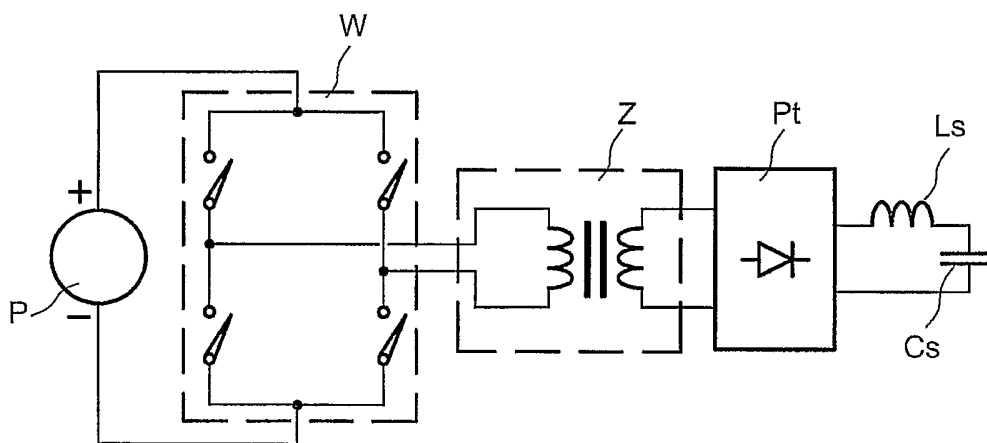


FIG. 5

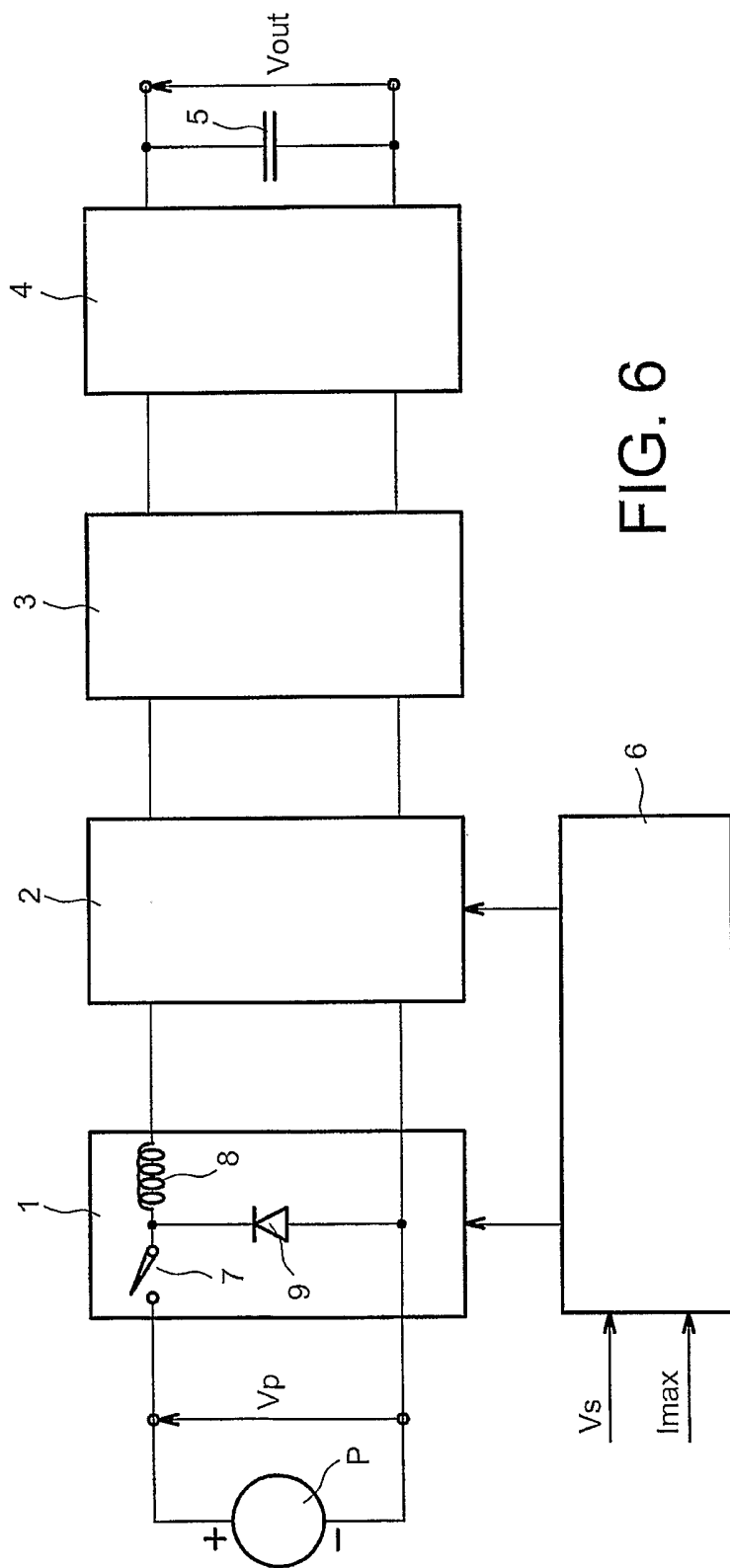


FIG. 6

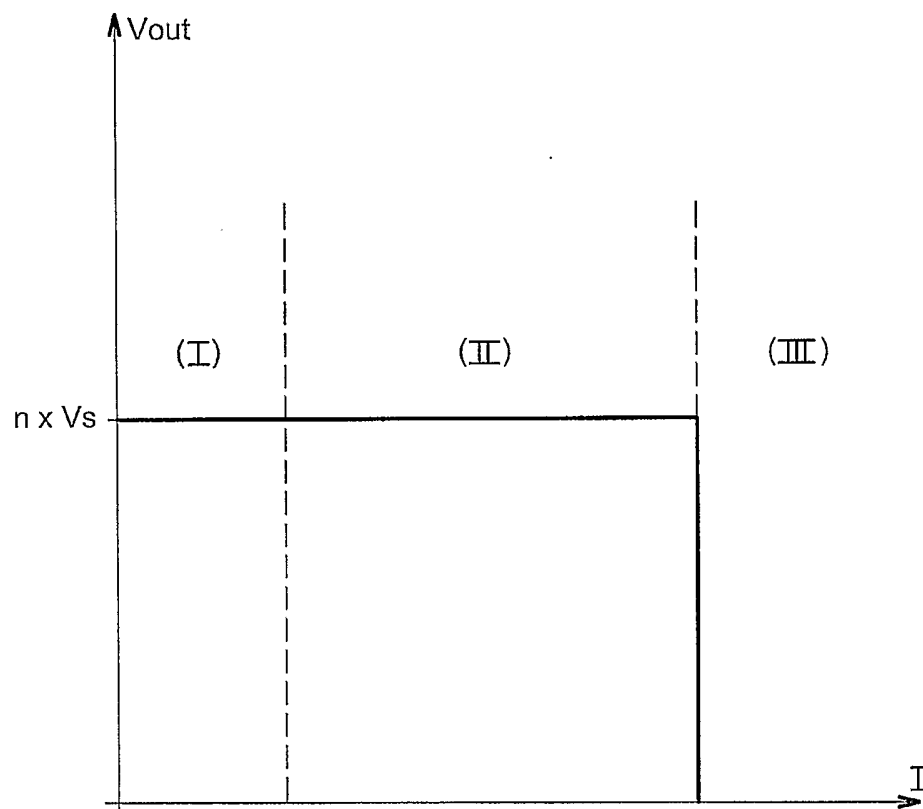


FIG. 7

5 / 8

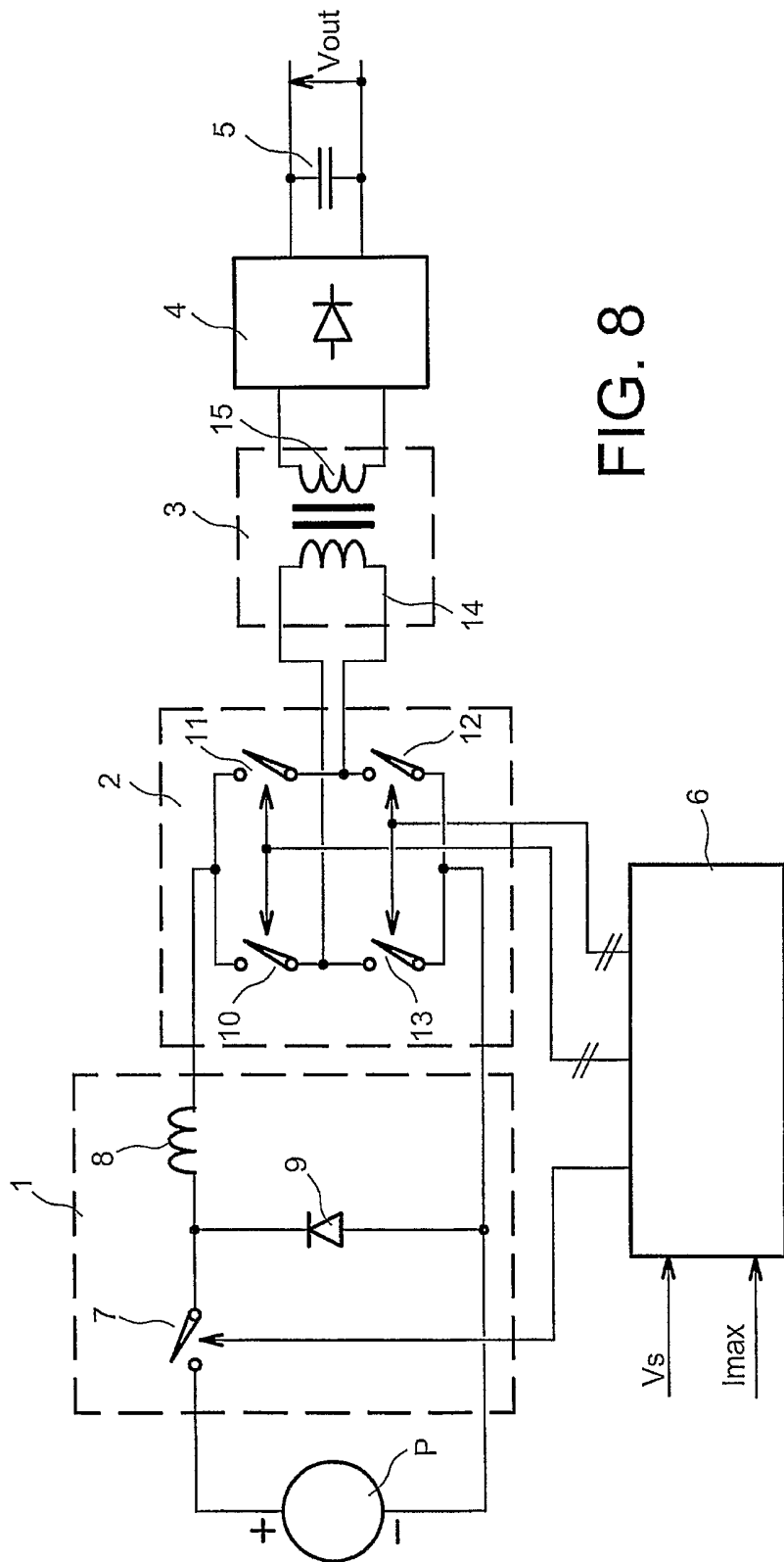


FIG. 8

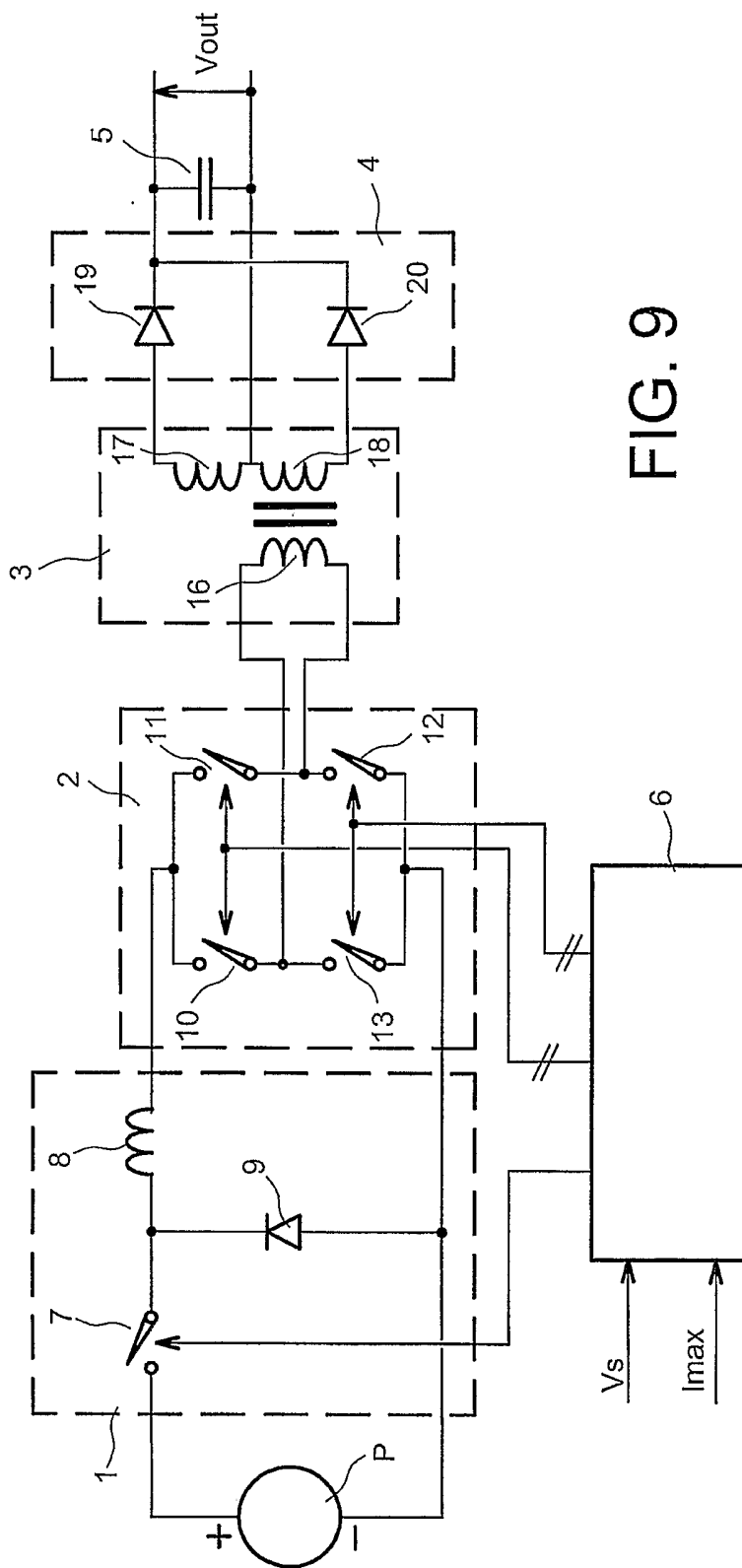


FIG. 9

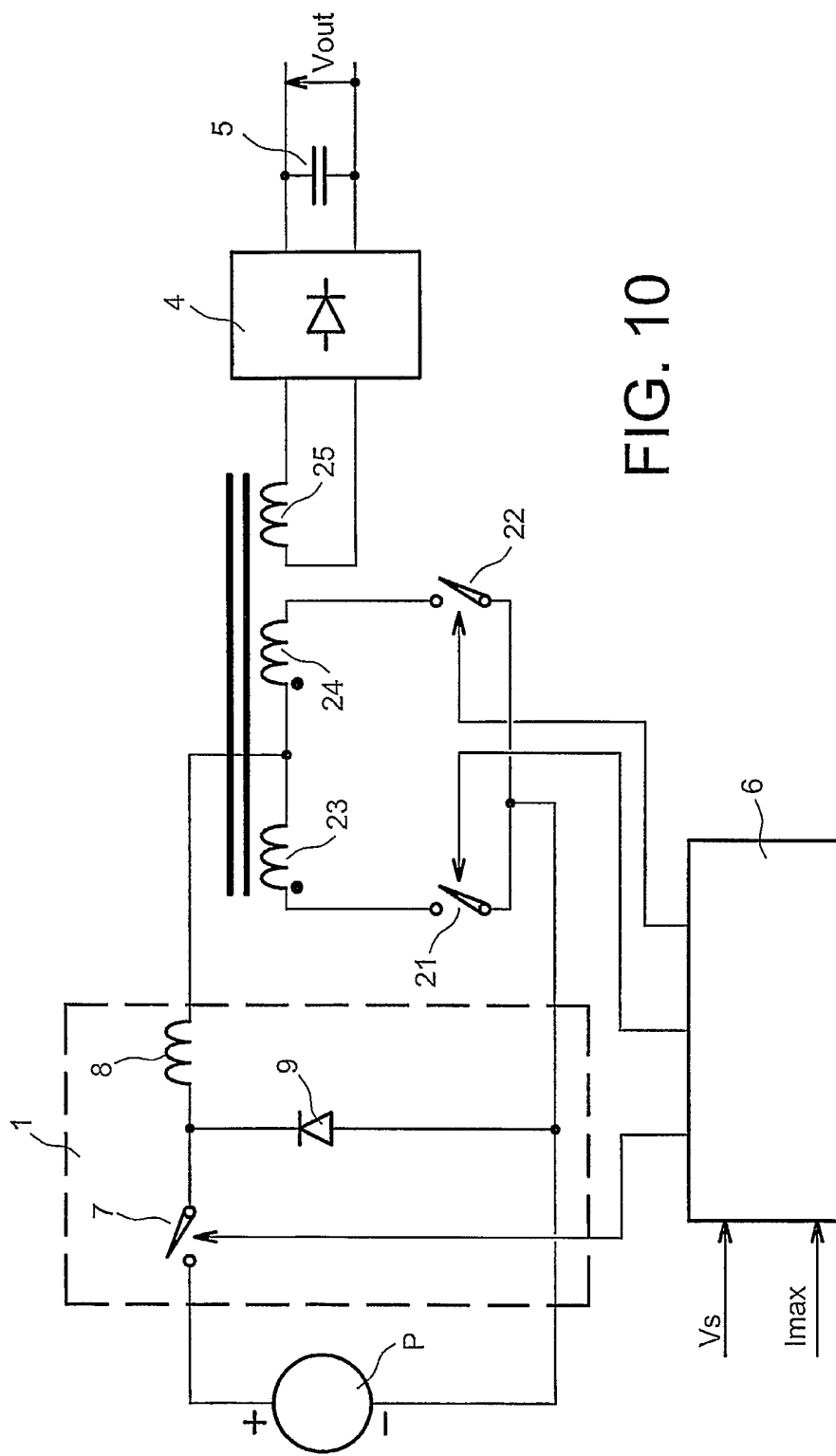


FIG. 10

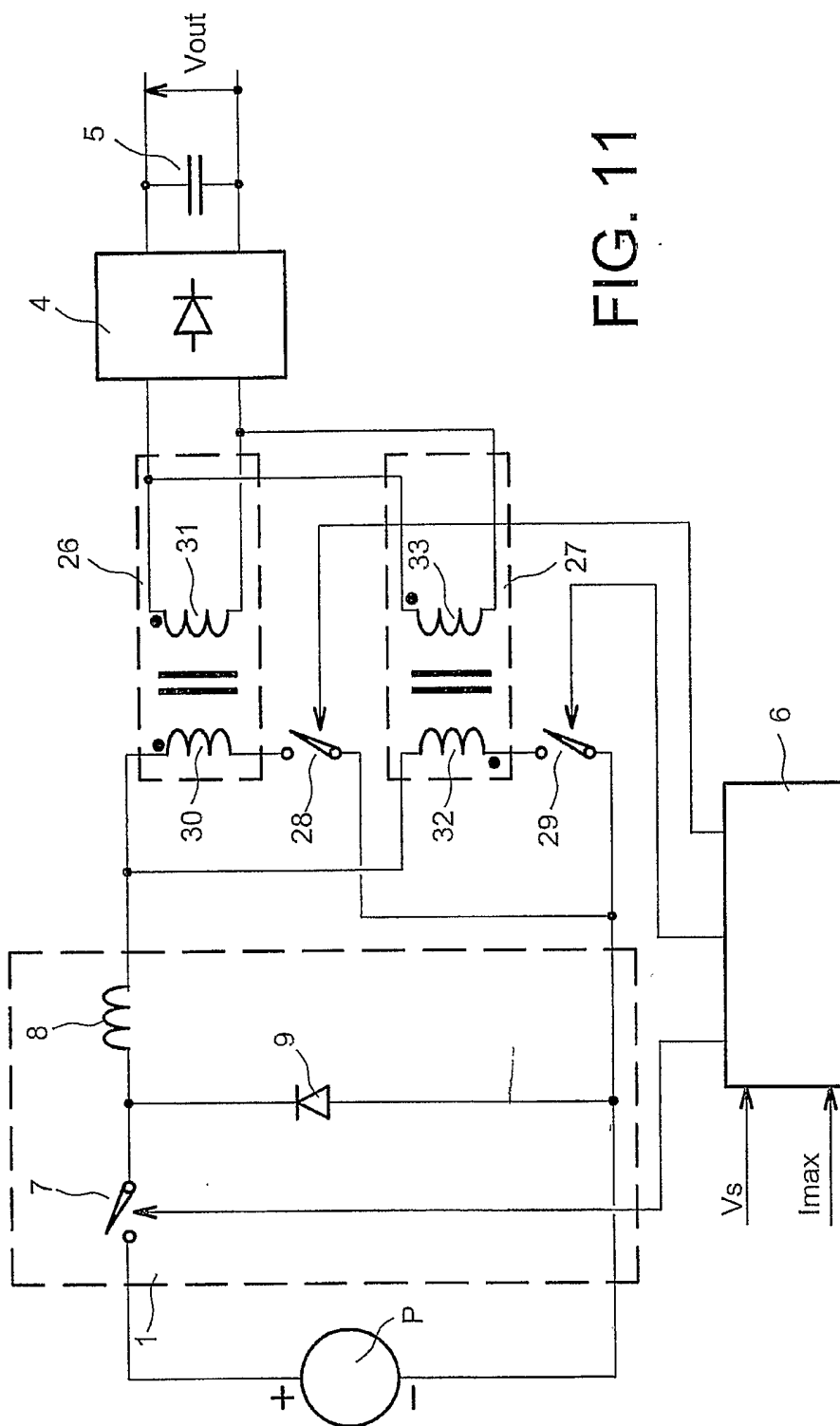


FIG. 11