

⑤④ Procédé et dispositif de conversion d'une tension avec commutation douce des interrupteurs.

②② Date de dépôt : 16.01.20.

③③ Priorité :

⑥⑥ Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

☐ Demande(s) d'extension :

⑦① Demandeur(s) : *CENTUM ADETEL  
TRANSPORTATION Société par actions simplifiée  
(SAS) — FR.*

④③ Date de mise à la disposition du public  
de la demande : 23.07.21 Bulletin 21/29.

④⑤ Date de la mise à disposition du public du  
brevet d'invention : 14.01.22 Bulletin 22/02.

⑤⑥ Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche :

*Se reporter à la fin du présent fascicule*

⑦② Inventeur(s) : PERON Benoît et BRUDER Arnaud.

⑦③ Titulaire(s) : *CENTUM ADETEL  
TRANSPORTATION Société par actions simplifiée  
(SAS).*

⑦④ Mandataire(s) : Cabinet GERMAIN & MAUREAU.



## Description

### **Titre de l'invention : Procédé et dispositif de conversion d'une tension avec commutation douce des interrupteurs.**

- [0001] La présente invention concerne le domaine des convertisseurs continu-continu, et en particulier des convertisseurs qui comportent un transformateur assurant l'isolation galvanique.
- [0002] Les convertisseurs continu-continu connus sont basés sur l'utilisation de cellules de commutation en pont complet, couplées avec un transformateur. Une cellule de commutation comprend habituellement un interrupteur et un condensateur. Les cellules de commutation sont configurées pour une commutation douce, i.e. avec une tension nulle aux bornes de l'interrupteur lors de la fermeture et de l'ouverture dudit interrupteur, autrement dit respectivement à la mise sur ON et à la mise sur OFF dudit interrupteur. Néanmoins, avec les convertisseurs de l'état de l'art, la commutation douce n'est effective que lors de la fermeture, autrement dit lors de la mise sur ON, de l'interrupteur, et n'est pas effective lors de l'ouverture, autrement dit lors de la mise sur OFF, de l'interrupteur. En outre, la plage de fonctionnement des convertisseurs continu-continu connus est limitée à des courants de sortie et des puissances transférées qui doivent être supérieures à un niveau minimum; ainsi, lorsqu'un convertisseur de l'état de l'art est couplé à une charge faible, qui nécessite une puissance et un courant de fonctionnement inférieures à ces niveaux minima, la commutation douce n'est plus possible. De ce fait, la décharge du condensateur de la cellule de commutation dans l'interrupteur dégrade l'interrupteur et altère la fiabilité du convertisseur ; de plus, la raideur des fronts de tension n'est pas aussi réduite qu'elle pourrait l'être, ce qui induit des perturbations électromagnétiques émises par le convertisseur ; enfin, des surtensions potentiellement destructrices apparaissent aux bornes des transistors de puissance des cellules de commutation.
- [0003] L'invention a donc pour but de proposer une solution à tout ou partie de ces problèmes.
- [0004] A cet effet, la présente invention concerne un procédé de conversion d'une tension d'entrée entre deux bornes d'entrée d'un circuit primaire d'un convertisseur en une tension de sortie entre deux bornes de sortie d'un circuit secondaire du convertisseur, le circuit primaire comprenant:
- un premier bras de pont formé par un premier interrupteur et un deuxième interrupteur, le premier et le deuxième interrupteur étant connectés en série entre les bornes d'entrée du circuit primaire, un premier point milieu du premier bras de pont désignant un point de connexion intermédiaire entre le premier interrupteur et le

deuxième interrupteur ;

- [0005] - un deuxième bras de pont formé par un troisième interrupteur et un quatrième interrupteur, le troisième et le quatrième interrupteur étant connectés en série entre les bornes d'entrée du circuit primaire, un deuxième point milieu du deuxième bras de pont désignant un point de connexion intermédiaire entre le troisième interrupteur et le quatrième interrupteur, le deuxième bras de pont étant connecté en parallèle du premier bras de pont entre les bornes d'entrée du circuit primaire;
- [0006] - une bobine primaire du circuit primaire, la bobine primaire comprenant une inductance de fuite, la bobine primaire étant couplée par induction mutuelle à une bobine secondaire du circuit secondaire, la bobine primaire étant connectée par un pôle au point milieu du premier bras de pont, et par un autre pôle au point milieu du deuxième bras de pont;
- [0007] le circuit primaire comprenant en outre :
  - un condensateur disposé en parallèle entre les bornes respectives de chacun des premier, deuxième, troisième, et quatrième interrupteurs;
- [0008] - un troisième bras de pont formé par un cinquième interrupteur et un sixième interrupteur, le cinquième et le sixième interrupteur étant connectés en série entre les bornes d'entrée du circuit primaire, un troisième point milieu du troisième bras de pont désignant un point de connexion intermédiaire entre le cinquième interrupteur et le sixième interrupteur, le troisième bras de pont étant connecté en parallèle des premier et deuxième bras de pont entre les bornes d'entrée du circuit primaire ;
- [0009] - chacun des premier, deuxième, troisième, quatrième, cinquième et sixième interrupteurs étant associé à une diode connectée aux bornes dudit premier, deuxième, troisième, quatrième, cinquième et sixième interrupteur;
- [0010] - une inductance d'injection connectée par un pôle au point milieu du premier bras de pont, et par un autre pôle au point milieu du troisième bras de pont ;
- [0011] - une unité de contrôle-commande configurée pour commander un état des interrupteurs, chaque interrupteur étant configuré pour être alternativement sur ON ou sur OFF, l'unité de contrôle-commande étant configurée pour mettre en œuvre un cycle de commande des interrupteurs comprenant les étapes suivantes :
  - [0012] - mettre sur ON le premier interrupteur, à un premier instant;
  - [0013] - mettre sur OFF le quatrième interrupteur, à un deuxième instant du cycle;
  - [0014] - mettre sur ON le troisième interrupteur, à un troisième instant du cycle;
  - [0015] - mettre sur OFF le premier interrupteur, à un quatrième instant du cycle;
  - [0016] - mettre sur ON le deuxième interrupteur, à cinquième instant du cycle;
  - [0017] - mettre sur OFF le troisième interrupteur, à un sixième instant du cycle;
  - [0018] - mettre sur ON le quatrième interrupteur, à un septième instant du cycle;
  - [0019] - mettre sur OFF le deuxième interrupteur, à un huitième instant du cycle;

- [0020] le cycle comprenant en outre les étapes suivantes:
- [0021] - mettre sur ON le sixième interrupteur à un premier instant d'injection compris entre le troisième instant et le quatrième instant de sorte qu'une tension d'injection s'applique entre les pôles de l'inductance d'injection pendant une durée d'injection, jusqu'au quatrième instant du cycle, et qu'au quatrième instant du cycle un courant d'injection circule dans l'inductance d'injection, ledit courant d'injection étant supérieur à un courant minimum prédéterminé;
- [0022] - mettre sur OFF le sixième interrupteur au quatrième instant;
- [0023] - mettre sur ON le cinquième interrupteur à un deuxième instant d'injection compris entre le septième instant et le huitième instant de sorte qu'une tension d'injection s'applique entre les pôles de l'inductance d'injection pendant la durée d'injection, jusqu'au huitième instant du cycle, et de sorte qu'au huitième instant du cycle un courant d'injection circule dans l'inductance d'injection, ledit courant d'injection étant supérieur à un courant d'injection minimum prédéterminé ;
- [0024] - mettre sur OFF le cinquième interrupteur au huitième instant;  
- répéter les étapes du cycle à partir d'un neuvième instant.
- [0025] Selon un mode de mise en œuvre, l'invention comprend une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, seules ou en combinaison techniquement acceptable.
- [0026] Selon un mode de mise en œuvre, le premier instant est déterminé en fonction d'un moment où la diode associée au premier interrupteur est en conduction, de sorte qu'une tension aux bornes du premier interrupteur soit nulle.
- [0027] Selon ces dispositions, le condensateur disposé en parallèle entre les bornes respectives de chacun des premier, deuxième, troisième, et quatrième interrupteurs permet une commutation douce à la mise sur OFF des interrupteurs et à la mise ON des interrupteurs du premier bras de pont.
- [0028] Ces commutations douces systématiques permettent de diminuer la raideur des fronts de tension, ce qui a deux conséquences avantageuses: la diminution des perturbations électromagnétiques émises par le convertisseur, et la diminution voire la suppression des surtensions potentiellement destructrices aux bornes des transistors de puissance.
- [0029] L'inductance d'injection permet une commutation douce des interrupteurs sur toute la plage de fonctionnement, en étendant notamment la plage de fonctionnement aux puissances de fonctionnement les plus faibles.
- [0030] Selon un mode de mise en œuvre, la durée d'injection  $t_{cmd\_inj}$  est déterminée par la relation :
- [0031]  $t_{cmd\_inj} = t_4 - t_{3inj} = t_8 - t_{8inj}$
- [0032] dans laquelle  $t_4$  est le quatrième instant,  $t_{3inj}$  est le premier instant d'injection,  $t_8$  est le neuvième instant, et  $t_{8inj}$  le deuxième instant d'injection.
- [0033] Selon un mode de mise en œuvre, la durée d'injection est déterminée en fonction du

courant d'injection minimum prédéterminé.

[0034] Selon un mode de mise en œuvre, la durée d'injection est déterminée par la relation :

[0035] [Math.2]

$$t_{cmd\_inj} = I_{L_{inj}} \cdot \frac{L_{inj}}{V_{in}}$$

[0036] dans laquelle  $I_{L_{inj}}$  représente le courant d'injection minimum prédéterminé, et  $L_{inj}$  représente une valeur de l'inductance de l'inductance d'injection, et  $V_{in}$  représente une valeur de la tension d'entrée du convertisseur.

[0037] Selon un mode de mise en œuvre, le courant d'injection minimum prédéterminé est déterminé en fonction d'un niveau de courant disponible  $I_{Lkdispo}$  dans la bobine primaire du circuit primaire et un niveau de courant critique  $I_{Lk.min}$  dans la bobine primaire du circuit primaire.

[0038] Selon un mode de mise en œuvre, le courant d'injection minimum prédéterminé est égal à  $I_{Lk.min} - I_{Lk.dispo}$ .

[0039] Selon un mode de mise en œuvre, le niveau de courant disponible  $I_{Lk.dispo}$  est fonction d'un rapport entre un nombre de spires  $N_p$  de la bobine primaire et un nombre de spires  $N_s$  de la bobine secondaire et d'une valeur moyenne d'un courant  $I_{L1.moy}$  dans une inductance  $L1, L2$  du circuit secondaire.

[0040] Selon un mode de mise en œuvre, le niveau de courant disponible  $I_{Lk.dispo}$  est déterminé par la relation :

[0041] [Math.3]

$$I_{Lk.dispo} = \frac{N_p}{N_s} \cdot I_{L1.moy}$$

[0042] Selon un mode de mise en œuvre, le niveau de courant critique  $I_{Lk.min}$  dans la bobine primaire du circuit primaire est fonction d'une capacité  $C_{res}$  du condensateur disposé en parallèle entre les bornes respectives de chacun des premier, deuxième, troisième, et quatrième interrupteurs et de l'inductance de fuite  $L_k$  de la bobine primaire du circuit primaire et de la tension d'entrée  $V_{in}$  entre les bornes d'entrée du circuit primaire du convertisseur.

[0043] Selon un mode de mise en œuvre, le niveau de courant critique  $I_{Lk.min}$  dans la bobine primaire du circuit primaire est déterminé par la relation :

[0044] [Math.3]

$$I_{Lk.min} = V_{in} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot C_{res}}{L_k}} \cdot K_{marge}$$

[0045] dans laquelle  $K_{marge}$  est un coefficient de marge à ajuster de manière à ce que la diode de roue libre de l'un des interrupteurs du premier bras de pont conduise suf-

fisamment longtemps pour que la tension de grille du transistor dudit interrupteur puisse être appliquée pour garantir une commutation douce à la mise ON du deuxième interrupteur B, entre un instant  $t_5$ , défini en fonction du quatrième instant  $t_4$ , et le cinquième instant  $t_6$ , et pour garantir une commutation douce à la mise ON du premier interrupteur A entre un instant  $t_{10}$ , défini en fonction du huitième instant  $t_9$  et le premier instant  $t_0$  ;

[0046] Selon un mode de mise en œuvre, le coefficient  $K_{\text{marge}}$  est égal à 1.2.

[0047] Selon un mode de mise en œuvre :

- le deuxième instant du cycle est décalé du premier instant d'un premier décalage temporel, fonction d'un déphasage entre les premier et deuxième bras de ponts, et d'une durée d'un cycle complet;

- le troisième instant du cycle est décalé du premier instant d'un deuxième décalage temporel fonction du premier décalage temporel et d'un premier temps mort;

- le quatrième instant du cycle est décalé du premier instant d'un troisième décalage temporel fonction de la durée d'un demi-cycle et d'un deuxième temps mort;

- le cinquième instant du cycle est décalé du premier instant d'un quatrième décalage temporel fonction de la durée d'un demi-cycle complet;

- le sixième instant du cycle est décalé du premier instant d'un cinquième décalage temporel fonction du déphasage et de la durée d'un demi-cycle complet;

- le septième instant du cycle est décalé du premier instant d'un sixième décalage temporel fonction du déphasage et de la durée d'un demi-cycle complet et du premier temps mort;

- le huitième instant du cycle est décalé du premier instant d'un septième décalage temporel fonction de la durée d'un cycle complet et du deuxième temps mort.

[0048] Selon un mode de mise en œuvre, le déphasage  $Ph$  entre les premier et deuxième bras de ponts est déterminé en fonction du rapport entre le nombre de spires  $N_p$  de la bobine primaire et le nombre de spires  $N_s$  de la bobine secondaire et du rapport entre la tension de sortie  $V_{\text{out}}$  entre les bornes de sortie du circuit secondaire et la tension d'entrée  $V_{\text{in}}$ , entre les bornes d'entrée du circuit primaire.

[0049] Selon un mode de mise en œuvre, le déphasage est défini par la relation :

[0050] [Math.4]

$$Ph = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \cdot \frac{N_p}{N_s}$$

[0051] Selon un mode de mise en œuvre, la durée  $T$  d'un cycle complet est une constante prédéterminée.

[0052] Selon un mode de mise en œuvre, ledit premier temps-mort correspondant à la fois à un intervalle de temps compris entre le deuxième instant  $t_2$  et un moment où la diode de

l'interrupteur C devient conductrice, et à un intervalle de temps compris entre le sixième instant  $t_7$  et un moment où la diode de l'interrupteur D devient conductrice.

[0053] Selon un mode de mise en œuvre, le premier temps mort  $t_{\text{mort\_C\_D}}$  est ajusté pour garantir une commutation douce des interrupteurs du deuxième bras de pont, à partir du moment où le courant d'injection a atteint le courant d'injection minimum pré-déterminé.

[0054] Selon un mode de mise en œuvre, ledit deuxième temps mort correspond à l'intervalle de temps compris entre les instants  $t_4$  et  $t_5$ , et également à l'intervalle de temps compris entre  $t_9$  et  $t_{10}$ .

[0055] Selon un mode de mise en œuvre, le deuxième temps mort  $t_{\text{mort\_A\_B}}$  est déterminé en fonction de la capacité  $C_{\text{res}}$  du condensateur disposé en parallèle entre les bornes respectives de chacun des premier, deuxième, troisième, et quatrième interrupteurs et de l'inductance de fuite  $L_k$  de la bobine primaire du circuit primaire.

[0056] Selon un mode de mise en œuvre, le deuxième temps mort  $t_{\text{mort\_A\_B}}$  est déterminé par la relation :

[0057] [Math.5]

$$t_{\text{mort\_A\_B}} = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{L_k \cdot 2 \cdot C_{\text{res}}}$$

[0058] Selon un mode de mise en œuvre, le premier temps mort  $t_{\text{mort\_A\_B}}$  est déterminé par la relation :

$$T_{\text{mort\_C\_D}} = [C_{\text{res}} \cdot V_{\text{in}}] / (I_{\text{Lcom}}) \cdot (N_s / N_p)$$

[0060] où le courant  $I_{\text{Lcom}}$  est déterminé par la relation :

$$I_{\text{Lcom}} = (I_{L1} + I_{L2}) / 2$$

[0062] où  $I_{L1}$  est le courant dans l'induction L1 à l'instant  $t_2$  et  $I_{L2}$  est le courant dans l'induction L2 à l'instant  $t_7$

[0063] Selon un mode de mise en œuvre, le premier décalage temporel entre  $t_0$  et  $t_2$  est déterminé par la relation :

[0064] [Math.8]

$$t_2 = Ph \cdot T$$

.

[0065] Selon un mode de mise en œuvre, le deuxième décalage temporel entre  $t_0$  et  $t_3$  est déterminé par la relation :

[0066] [Math.9]

$$t_3 \geq Ph \cdot T + t_{\text{mort\_C\_D}}$$

[0067] Selon un mode de mise en œuvre, le troisième décalage temporel entre  $t_0$  et  $t_4$  est déterminé par la relation :

[0068]

[Math.10]

$$t_4 \leq \frac{T}{2} - t_{\text{mort\_A\_B}}$$

[0069] Selon un mode de mise en œuvre, le quatrième décalage temporel entre  $t_0$  et  $t_6$  est déterminé par la relation :

[0070] [Math.11]

$$t_6 \leq \frac{T}{2}$$

[0071] Selon un mode de mise en œuvre, le cinquième décalage temporel entre  $t_0$  et  $t_7$  est déterminé par la relation :

[0072] [Math.12]

$$t_7 = \frac{T}{2} + Ph \cdot T$$

[0073] Selon un mode de mise en œuvre, le sixième décalage temporel entre  $t_0$  et  $t_8$  est déterminé par la relation :

[0074] [Math.13]

$$t_8 \geq \frac{T}{2} + Ph \cdot T + t_{\text{mort\_C\_D}}$$

[0075] Selon un mode de mise en œuvre, le septième décalage temporel entre  $t_0$  et  $t_9$  est déterminé par la relation :

[0076] [Math.14]

$$t_9 \leq T - t_{\text{mort\_A\_B}}$$

[0077] L'invention concerne également un convertisseur comprenant un circuit primaire et un circuit secondaire, le convertisseur étant configuré pour convertir une tension d'entrée entre deux bornes d'entrée du circuit primaire en une tension de sortie entre les bornes de sortie du circuit secondaire, le circuit primaire comprenant :

- un premier bras de pont formé par un premier interrupteur et un deuxième interrupteur, le premier et le deuxième interrupteur étant connectés en série entre les bornes d'entrée du circuit primaire, un premier point milieu du premier bras de pont désignant un point de connexion intermédiaire entre le premier interrupteur et le deuxième interrupteur;

[0078] - un deuxième bras de pont formé par un troisième interrupteur et un quatrième interrupteur, le troisième et le quatrième interrupteur étant connectés en série entre les bornes d'entrée du circuit primaire, un deuxième point milieu du deuxième bras de pont désignant un point de connexion intermédiaire entre le troisième interrupteur et le quatrième interrupteur, le deuxième bras de pont étant connecté en parallèle du premier bras de pont entre les bornes d'entrée du circuit primaire;

- [0079] - une bobine primaire du circuit primaire, la bobine primaire comprenant une inductance de fuite, la bobine primaire étant couplée par induction mutuelle à une bobine secondaire du circuit secondaire, la bobine primaire étant connectée par un pôle au point milieu du premier bras de pont, et par un autre pôle au point milieu du deuxième bras de pont;
- le circuit primaire comprenant en outre :
- un condensateur disposé en parallèle entre les bornes respectives de chacun des premier, deuxième, troisième, et quatrième interrupteurs;
- [0080] - un troisième bras de pont formé par un cinquième interrupteur et un sixième interrupteur, le cinquième et le sixième interrupteur étant connectés en série entre les bornes d'entrée du circuit primaire, un troisième point milieu du troisième bras de pont désignant un point de connexion intermédiaire entre le cinquième interrupteur et le sixième interrupteur, le troisième bras de pont étant connecté en parallèle des premier et deuxième bras de pont entre les bornes d'entrée du circuit primaire ;
- [0081] - chacun des premier, deuxième, troisième, quatrième, cinquième et sixième interrupteurs étant associé à une diode connectée aux bornes dudit premier, deuxième, troisième, quatrième, cinquième et sixième interrupteur;
- [0082] - une inductance d'injection connectée par un pôle au point milieu du premier bras de pont, et par un autre pôle au point milieu du troisième bras de pont;
- [0083] - une unité de contrôle-commande configurée pour commander un état des interrupteurs, chaque interrupteur étant configuré pour être alternativement sur ON ou sur OFF, l'unité de contrôle-commande étant configurée pour mettre en œuvre un cycle de commande des interrupteurs comprenant les étapes d'un procédé selon l'un des modes de mise en œuvre décrits ci-avant.
- [0084] Selon un mode de réalisation, l'invention comprend une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, seules ou en combinaison techniquement acceptable.
- [0085] Selon un mode de réalisation, le circuit secondaire comprend :
- un quatrième bras de pont formé par un septième interrupteur et un huitième interrupteur, le septième et le huitième interrupteur étant connectés en série entre les bornes de la bobine secondaire du circuit secondaire, un quatrième point milieu du quatrième bras de pont désignant un point de connexion intermédiaire entre le septième interrupteur et le huitième interrupteur;
- un cinquième bras de pont formé par une première inductance et une deuxième inductance, la première et la deuxième inductance étant connectées en série entre les bornes de la bobine secondaire du circuit secondaire, un cinquième point milieu du cinquième bras de pont désignant un point de connexion intermédiaire entre la première inductance et la deuxième inductance, le cinquième bras de pont étant connecté en parallèle du quatrième bras de pont entre les bornes de la bobine se-

condaire ;

le quatrième point milieu étant raccordé à une borne de sortie du circuit secondaire, et le cinquième point milieu étant raccordé à l'autre borne de sortie du circuit secondaire.

- [0086] Selon un mode de réalisation, le circuit secondaire comprend en outre un condensateur disposé entre les bornes de sortie du circuit secondaire.
- [0087] Pour sa bonne compréhension, un mode de réalisation et/ou de mise en oeuvre de l'invention est décrit en référence aux dessins ci-annexés représentant, à titre d'exemple non limitatif, une forme de réalisation ou de mise en œuvre respectivement d'un dispositif et/ou d'un procédé selon l'invention. Les mêmes références sur les dessins désignent des éléments similaires ou des éléments dont les fonctions sont similaires.
- [0088] [fig.1] est une représentation schématique d'un circuit électrique selon un mode de réalisation de l'invention.
- [0089] [fig.2] est un chronogramme représentant l'évolution de l'état des composants du circuit représenté sur la figure 1, et l'évolution des courants et tensions entre différents points du circuit.
- [0090] [fig.31] est une représentation schématique d'une partie du circuit électrique de la figure 1, active pendant une portion du cycle de fonctionnement du circuit, ladite portion du cycle étant comprise entre les temps  $t_3$  et  $t_{3inj}$  de l'axe temporel du chronogramme de la figure 2.
- [0091] [fig.32] est une représentation schématique d'une partie du circuit électrique de la figure 1, active pendant une portion du cycle de fonctionnement du circuit, ladite portion du cycle étant comprise entre les temps  $t_{3inj}$  et  $t_4$  de l'axe temporel du chronogramme de la figure 2.
- [0092] [fig.33] est une représentation schématique d'une partie du circuit électrique de la figure 2, active pendant une portion du cycle de fonctionnement du circuit, ladite portion du cycle étant comprise entre les temps  $t_4$  et  $t_5$  de l'axe temporel du chronogramme de la figure 2.
- [0093] [fig.34] est une représentation schématique d'une partie du circuit électrique de la figure 1, active pendant une portion du cycle de fonctionnement du circuit, ladite portion du cycle étant comprise entre les temps  $t_8$  et  $t_{8inj}$  de l'axe temporel du chronogramme de la figure 2.
- [0094] [fig.35] est une représentation schématique d'une partie du circuit électrique de la figure 1, active pendant une portion du cycle de fonctionnement du circuit, ladite portion du cycle étant comprise entre les temps  $t_{8inj}$  et  $t_9$  de l'axe temporel du chronogramme de la figure 2.
- [0095] [fig.36] est une représentation schématique d'une partie du circuit électrique de la figure 2, active pendant une portion du cycle de fonctionnement du circuit, ladite

portion du cycle étant comprise entre les temps  $t_9$  et  $t_{10}$  de l'axe temporel du chronogramme de la figure 2.

[0096] [fig.4] est une représentation schématique des étapes du procédé selon l'invention.

[0097] [fig.5] est une représentation schématique d'un deuxième mode de réalisation du circuit secondaire selon l'invention.

[0098] [fig.6] présente un troisième mode de réalisation du circuit secondaire selon l'invention, avec en figure 6a une première représentation schématique dudit troisième mode de réalisation, et en figure 6b une deuxième représentation schématique équivalente dudit troisième mode de réalisation.

[0099] [fig.7] est une représentation schématique d'un quatrième mode de réalisation du circuit secondaire selon l'invention.

[0100] La figure 1 est un schéma électrique équivalent d'un convertisseur 1 selon un mode de réalisation de l'invention. Le schéma de la figure 1 présente deux parties 2, 3.

[0101] La première partie 2 comprend une première portion 2' de circuit primaire et un circuit secondaire 2''.

[0102] La première portion de circuit primaire 2', comprend deux bornes d'entrées E1, E2 configurées pour recevoir une tension d'entrée  $V_{in}$ . Elle comprend également une première paire d'interrupteurs A, B connectés en série, autrement dit en bras de pont entre les deux bornes d'entrées E1, E2, ainsi qu'une deuxième paire d'interrupteurs C, D connectés en série, autrement dit en bras de pont entre les deux bornes d'entrées E1, E2. La première paire d'interrupteurs A, B, et la deuxième paire d'interrupteurs C, D forment ainsi deux bras de ponts, tous deux connectés en parallèle entre les deux bornes d'entrées E1, E2.

[0103] Chaque bras de pont comprend un point milieu  $P_{AB}$ ,  $P_{CD}$  en un point de raccordement situé entre les deux interrupteurs dudit bras de pont.

[0104] Les points milieu  $P_{AB}$ ,  $P_{CD}$  de chaque bras de pont sont reliés par une bobine primaire couplée à une bobine secondaire du circuit secondaire 2''. Ladite bobine primaire est caractérisée par une inductance de fuite  $L_k$ ; elle reçoit entre ses bornes, raccordées aux points milieu  $P_{AB}$ ,  $P_{CD}$ , une tension primaire  $V_p$  déterminée notamment par l'état ouvert ou fermé des interrupteurs A, B, C et D.

[0105] Aux bornes de chacun des interrupteurs A, B, C, D, un condensateur parallèle est disposé de manière à relier les bornes respectives de chacun desdits interrupteurs A, B, C, D. La capacité dudit condensateur parallèle est supérieure à la capacité intrinsèque, liée à la composition des transistors, de chaque interrupteur A, B, C, D.

[0106] La deuxième partie 3 du schéma décrit la deuxième portion 3 de circuit primaire, complémentaire de la première portion 2' de circuit primaire, de sorte que, selon le mode de réalisation de l'invention décrit ici, le circuit primaire comprend la deuxième portion 3 qui va maintenant être décrite, couplée à la première portion 2' décrite ci-

avant.

- [0107] Ladite deuxième portion 3 du circuit primaire comprend une paire d'interrupteurs d'injection E, F en série, autrement dit en bras de pont, entre les deux bornes d'entrées E1, E2. La paire d'interrupteurs d'injection E, F forme ainsi un troisième bras de pont, connecté en parallèle entre les deux bornes d'entrées E1, E2. Ledit troisième bras de pont comprend un point milieu  $P_{EF}$  en un point de raccordement situé entre les deux interrupteurs d'injection E, F dudit troisième bras de pont. Ce point milieu  $P_{EF}$  et le point de milieu  $P_{AB}$  d'un des deux bras de ponts précédemment décrit, sont connectés électriquement par un circuit d'injection caractérisé par son inductance d'injection  $L_{inj}$ .
- [0108] Par ailleurs, une diode inhérente à la construction de l'interrupteur, est présente en parallèle avec les interrupteurs A, B, C, D, E, F, dans lesquels, la cathode de la diode est connectée électriquement au drain, ou au collecteur de l'interrupteur et l'anode de la diode est connectée électriquement à la source, ou à l'émetteur de l'interrupteur. Cette diode est intrinsèque aux transistors à effet de champs à grille métal-oxyde, autrement appelés MOSFET selon l'acronyme anglo-saxon ; une diode est rajoutée dans le cas d'utilisation de transistors bipolaire à grille isolée, autrement appelés IGBT selon l'acronyme anglo-saxon.
- [0109] Pour garantir une efficacité maximale, selon l'invention, les charges de recombinaison de la diode doivent être négligeables devant les charges correspondantes aux capacités dudit condensateur parallèle.
- [0110] Les diodes en carbure de silicium (SiC) ou en nitride de gallium (GaN) sont appropriées pour cette invention, selon l'homme de l'art.
- [0111] Plus généralement, un transistor MOSFET SiC, ou un transistor GaN à électron à haute mobilité, autrement appelés HEMT selon l'acronyme anglo-saxon, ou un transistor IGBT rapide avec une diode SiC en parallèle, selon la description précédente, se caractérisant par une grande vitesse de recombinaison des porteurs minoritaires, sont adaptés pour les interrupteurs A, B, C, D, E, F.
- [0112] La diode en parallèle des interrupteurs, conduit spontanément, c'est-à-dire lorsque le potentiel électrique de son anode devient supérieur (typiquement de +0,5 Volt), à sa cathode. La commande des interrupteurs A, B, C, D, E, F est utilisée pour court-circuiter cette diode.
- [0113] Ainsi, l'homme du métier comprendra que chaque interrupteur A, B, C, D, E, F comprend, selon un schéma électrique équivalent dudit interrupteur, un interrupteur « parfait » A, B, C, D, E, F et une diode, intrinsèque ou ajoutée. Dans la suite du texte, le terme interrupteur désignera l'interrupteur parfait, formant ledit interrupteur avec la diode, intrinsèque ou ajoutée, selon les modes de réalisation. En particulier, l'homme du métier comprend que la mise sur ON d'un interrupteur correspond à la mise sur ON de l'interrupteur parfait correspondant, ladite mise sur ON de l'interrupteur parfait

pouvant intervenir alors que la diode correspondante est déjà conductrice, de sorte que l'interrupteur, formé par l'interrupteur parfait et la diode correspondante, est déjà en partie fermé.

- [0114] L'ensemble formé par la première portion 2' de circuit primaire, couplée comme indiquée ci-avant à la deuxième portion 3 de circuit primaire, constitue le circuit primaire 3' du convertisseur 1.
- [0115] Ledit circuit primaire ainsi constitué reçoit entre ces bornes d'entrées E1, E2 une tension d'entrée  $V_{in}$ , transformée en une tension primaire  $V_p$ , déterminée notamment par l'état des interrupteurs A, B, C et D, aux bornes de la bobine primaire. Ladite bobine primaire est couplée magnétiquement à une bobine secondaire du circuit secondaire 2'' qui va maintenant être décrit.
- [0116] Les bornes de ladite bobine secondaire sont reliées en parallèle, d'une part par un quatrième bras de pont formé par une quatrième paire d'interrupteurs SR1, SR2, à sources commune ou à anode commune dans le cas d'utilisation de deux diodes uniquement, disposés en série entre les bornes de la bobine secondaire, d'autre part par un cinquième bras de pont, formé par une paire d'inductances L1, L2 disposées en série entre les bornes de la bobine secondaire. Un point milieu  $P_{L1L2}$  du cinquième bras de pont, situé au point de raccordement entre les deux inductances L1, L2, et un point milieu  $P_{SR1SR2}$  du quatrième bras de pont, situé au point de raccordement entre les deux interrupteurs SR1, SR2, sont directement et respectivement reliées électriquement aux bornes de sortie S1, S2 du convertisseur 1. Un condensateur est placé entre lesdites bornes de sortie S1, S2.
- [0117] La fonction du circuit secondaire 2'', peut être réalisée selon au moins un autre mode de réalisation, tel qu'illustré sur les figures 5, 6 et 7, comme suit :
- [0118] – deux enroulements secondaires du transformateur connectés en série et couplés avec l'enroulement primaire, de deux diodes et de deux transistors MOSFET et d'une inductance L1, selon le circuit équivalent 2'' représenté sur la figure 5 ;
- un enroulement secondaire du transformateur couplé avec l'enroulement primaire, de deux diodes et de deux transistors MOSFET, selon l'un des circuits équivalents 2'' représentés sur la figure 6a ou sur la figure 6b ;
- un enroulement secondaire du transformateur couplé avec l'enroulement primaire, quatre diodes et quatre MOSFETs et une inductance, selon le circuit équivalent 2'' représenté sur la figure 7.
- [0119] Ces différentes configurations électriques concernant la réalisation du circuit secondaire 2'' ne changent pas les séquences de fonctionnement du circuit de puissance primaire 2' et 3' selon les séquençements temporels de la figure 2.
- [0120] Les interrupteurs A, B, C, D, E, F sont configurés pour être contrôlés par une unité

de contrôle non représentée sur la figure 1. Selon un mode de réalisation, chaque interrupteur A, B, C, D, E, F est configuré pour recevoir un signal de l'unité de contrôle ; en fonction du signal reçu, l'interrupteur est soit passant, i.e. laisse passer le courant, autrement dit est fermé, ou bien l'interrupteur est bloquant, i.e. ne laisse pas passer le courant, autrement dit est ouvert. Dans la suite de cette description, pour simplifier, lorsque l'interrupteur est passant, il sera décrit comme étant sur ON, et lorsque l'interrupteur est bloquant, il sera décrit comme étant sur OFF.

[0121] Le convertisseur 1 est configuré pour transformer une tension d'entrée  $V_{in}$  entre les bornes d'entrée E1, E2 du circuit primaire 3', en une tension de sortie  $V_{out}$  entre les bornes de sortie S1 S2 du circuit secondaire, selon un procédé qui va maintenant être décrit, en référence au chronogramme de la figure 2, qui représente l'évolution en fonction du temps de l'état des interrupteurs A, B, C, D, E, F du circuit primaire du convertisseur 1, et l'évolution en fonction du temps des courants et tensions entre les bornes des différents composants des circuits primaires et secondaires.

[0122] Les interrupteurs, courants et tensions considérés sont représentés le long de l'axe vertical du chronogramme de la figure 2, et les différents instants  $t_0$ ,  $t_{0end}$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_{3inj}$ ,  $t_4$ ,  $t_5$ ,  $t_6$ ,  $t_{6end}$ ,  $t_7$ ,  $t_8$ ,  $t_{8inj}$ ,  $t_9$ ,  $t_{10}$ , d'un cycle de fonctionnement du convertisseur 1 sont représentés sur l'axe horizontal.

[0123] Selon un mode de réalisation du procédé, l'unité de contrôle est configurée pour que, au cours d'un cycle de fonctionnement du convertisseur 1, l'unité de contrôle du convertisseur 1 commande successivement la réalisation des étapes suivantes 101 à 113 du procédé 100, schématiquement représenté sur la figure 4:

[0124]

- 101 : mettre sur ON le premier interrupteur A, à un premier instant  $t_0$ ;
- 102 : mettre sur OFF le quatrième interrupteur D, à un deuxième instant  $t_2$  du cycle;
- 103 : mettre sur ON le troisième interrupteur C, à un troisième instant  $t_3$  du cycle;
- 104 : mettre sur OFF le premier interrupteur A, à un quatrième instant  $t_4$  du cycle;
- 105 : mettre sur ON le deuxième interrupteur B, à cinquième instant  $t_6$  du cycle;
- 106 : mettre sur OFF le troisième interrupteur C, à un sixième instant  $t_7$  du cycle;
- 107 : mettre sur ON le quatrième interrupteur D, à un septième instant  $t_8$  du cycle;
- 108 : mettre sur OFF le deuxième interrupteur B, à un huitième instant  $t_9$  du cycle;
- 109 : mettre sur ON le sixième interrupteur F à un premier instant d'injection  $t_{3inj}$  compris entre le troisième instant  $t_3$  et le quatrième instant  $t_4$  de sorte qu'une tension d'injection s'applique entre les pôles de l'inductance d'injection  $L_{inj}$  pendant une durée  $t_{cmd\_inj}$ , jusqu'au quatrième instant  $t_4$  du cycle, et qu'au quatrième instant  $t_4$  du cycle un courant d'injection  $I_{L\_inj}$  circule dans l'inductance d'injection  $L_{inj}$ , ledit courant d'injection  $I_{L\_inj}$  étant supérieur à un courant minimum prédéterminé ;
- 110 : mettre sur OFF le sixième interrupteur F au quatrième instant  $t_4$  ;
- 111 : mettre sur ON le cinquième interrupteur E à un deuxième instant d'injection  $t$

$i_{inj}$  compris entre le septième instant  $t_8$  et le huitième instant  $t_9$  de sorte qu'une tension d'injection s'applique entre les pôles de l'inductance d'injection  $L_{inj}$  pendant la durée  $t_{cmd\_inj}$ , jusqu'au huitième instant  $t_9$  du cycle, et de sorte qu'au huitième instant  $t_9$  du cycle un courant d'injection  $I_{L_{inj}}$  circule dans l'inductance d'injection  $L_{inj}$ , ledit courant d'injection  $I_{L_{inj}}$  étant supérieur à un courant d'injection minimum prédéterminé ;

- 112 : mettre sur OFF le cinquième interrupteur E au huitième instant  $t_9$ ;
- 113 : répéter les étapes 101 à 112 du cycle à partir d'un neuvième instant  $t_{10}$ .

[0125] L'instant  $t_0$  est ainsi à la fois la fin d'un cycle précédent, et le début du cycle suivant du fonctionnement du convertisseur 1. L'ordre de présentation des étapes 101 à 113 des étapes ne correspond pas à l'ordre selon lequel lesdites étapes se succèdent dans le temps. L'ordre de succession temporel des étapes est déterminé par les instants qui définissent chaque étape et selon la chronologie illustrée sur la figure 2.

[0126] Pour définir les instants  $t_0$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$ ,  $t_6$ ,  $t_7$ ,  $t_8$ , on utilise un déphasage  $Ph$  entre les bras de ponts A,B et C,D, et un premier temps mort  $t_{mort\_A\_B}$ , ledit premier temps mort correspondant à l'intervalle de temps compris entre les instants  $t_4$  et  $t_5$ , et également à l'intervalle de temps compris entre  $t_9$  et  $t_{10}$ , ledit déphasage et ledit premier temps mort étant calculés par les relations ci-dessous ; on utilise également une période de découpage  $T$ , ou durée  $T$  d'un cycle complet, ladite durée  $T$  étant une constante prédéterminée, et un deuxième temps mort  $t_{mort\_C\_D}$ , ledit deuxième temps-mort correspondant à la fois à un intervalle de temps compris entre  $t_2$  et un moment où la diode de l'interrupteur C devient conductrice, et à un intervalle de temps compris entre  $t_7$  et un moment où la diode de l'interrupteur D devient conductrice, le deuxième temps mort étant ajusté pour garantir les commutations douces du bras de pont C,D, à partir du moment où le courant injecté  $I_{inj}$ , circulant dans  $L_k$  lors de cette phase, est suffisant pour assurer une commutation douce.

[0127] Le déphasage entre les bras de ponts A, B et C, D est défini par la relation :

[0128] [Math.15]

$$Ph = \frac{V_{out}}{V_{in}} \cdot \frac{N_p}{N_s}$$

[0129] Et le premier temps mort, par la relation :

[0130] [Math.16]

$$t_{mort\_A\_B} = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{L_k \cdot 2 \cdot C_{res}}$$

[0131] Et le deuxième temps mort, par la relation :

[0132]  $T_{mort\_C\_D} = [C_{res} \cdot V_{in}] / (I_{Lcom}) \cdot (N_s / N_p)$

[0133] avec le courant  $I_{Lcom}$  défini par :

[0134]  $I_{Lcom} = (I_{L1} + I_{L2}) / 2$

[0135] où  $I_{L1}$  est le courant dans l'induction L1 à l'instant  $t_2$  et  $I_{L2}$  est le courant dans l'induction L2 à l'instant  $t_7$

[0136] On peut alors déterminer les instants de commande par les relations ci-dessous :

[0137] [Math.19]

$$t_0 \approx 0$$

[0138] [Math.20]

$$t_2 \approx Ph \cdot T$$

[0139] [Math.21]

$$t_3 \geq Ph \cdot T + t_{\text{mort\_C\_D}}$$

[0140] [Math.22]

$$t_4 \leq \frac{T}{2} - t_{\text{mort\_A\_B}}$$

[0141] [Math.23]

$$t_6 \leq \frac{T}{2}$$

[0142] [Math.24]

$$t_7 \approx \frac{T}{2} + Ph \cdot T$$

[0143] [Math.25]

$$t_8 \geq \frac{T}{2} + Ph \cdot T + t_{\text{mort\_C\_D}}$$

[0144] [Math.26]

$$t_9 \leq T - t_{\text{mort\_A\_B}}$$

[0145] Les interrupteurs d'injection sont E et F.

[0146] Les instants de commutation sur ON des interrupteurs d'injection E, F sont respectivement les deuxième instant et premier instant d'injection  $t_{8\text{inj}}$ ,  $t_{3\text{inj}}$  ; la durée pendant laquelle ces interrupteurs d'injection E, F sont sur ON doit permettre la précharge de l'inductance d'injection  $L_{\text{inj}}$  au niveau de courant d'injection  $I_{L\text{inj}}$  souhaité.

[0147] Le niveau de courant d'injection  $I_{L\text{inj}}$  doit permettre de compenser le manque d'énergie inductive disponible avec l'inductance de fuite  $L_K$ .

[0148] Le niveau du courant critique  $I_{Lk}$  dans l'inductance de fuite  $L_K$  est celui défini pour le critère d'activation de l'injection, multiplié par un coefficient de marge à ajuster si nécessaire pour garantir la commutation douce. Le coefficient de marge  $K_{\text{marge}}$  est dimensionné pour que la diode B, en parallèle du transistor B, conduise pendant l'intervalle de temps entre les instants  $t_5$  à  $t_6$ , garantissant ainsi la commutation douce. Ainsi la tension de grille du transistor B peut être appliquée convenablement en  $t_6$ ,

c'est-à-dire que le transistor B se ferme alors que la tension entre le drain et la source est négative correspondante à la tension de seuil de conduction de la diode B, en parallèle du transistor B. Typiquement la tension avant la fermeture du transistor est de -0.5 Volt, c'est dire très proche de 0. C'est la commutation douce à la mise ON d'un transistor B.

[0149]   Avantageusement, on choisira  $K_{marge}=1.2$ .

[0150]   Le niveau du courant critique  $I_{Lk}$  dans l'inductance de fuite  $L_k$  est défini de manière à annuler la tension aux bornes de l'interrupteur B (respectivement A), donc aux bornes du condensateur parallèle disposé entre les bornes de l'interrupteur B (respectivement A), entre  $t_5$  et  $t_6$  où l'interrupteur B peut être mis sur ON favorablement (respectivement en début de cycle, entre la fin d'un cycle précédent et le début du cycle suivant où l'interrupteur A peut être mis sur ON favorablement).

[0151]   L'annulation est naturellement atteinte lorsque l'énergie inductive du circuit est suffisante pour transférer intégralement l'énergie capacitive, i.e. annuler la tension aux bornes de l'interrupteur B (respectivement A) et établir la tension aux bornes de l'interrupteur A (respectivement B).

[0152]   Cette énergie inductive diminue avec la diminution du courant de sortie et donc du niveau de puissance transféré, tandis que l'énergie capacitive ne dépend que de la tension d'entrée, qui est indépendante de la puissance transférée.

[0153]   Lorsque l'énergie inductive devient inférieure à l'énergie capacitive, l'annulation de tension permettant la commutation douce des transistors ne se fait plus.

[0154]   L'inductance d'injection  $L_{inj}$ , préalablement préchargée à un certain niveau de courant d'injection  $I_{L_{inj}}$  lors de la phase, dite de roue libre, qui précède le quatrième instant  $t_4$  (respectivement, le huitième instant  $t_9$ ).

[0155]   Une fois l'inductance d'injection  $L_{inj}$  préchargée, l'énergie inductive emmagasinée dans l'inductance d'injection  $L_{inj}$  s'ajoute à l'énergie inductive de l'inductance de fuite  $L_k$  à l'ouverture, i.e. à la mise sur OFF, de l'interrupteur A (respectivement de l'interrupteur B) pour décharger le condensateur parallèle de l'interrupteur B (respectivement le condensateur parallèle de l'interrupteur A) et charger le condensateur parallèle de l'interrupteur A (respectivement le condensateur parallèle de l'interrupteur B).

[0156]   La condition d'activation de l'injection de courant découle de la comparaison entre énergie inductive et énergie capacitive, définies ci-dessous.

[0157]   Les condensateurs parallèles implantés en parallèle des interrupteurs A, B, C et D ont chacun une capacité  $C_{res}$  de valeur très supérieure aux capacités parasites des composants. On peut donc négliger les énergies capacitatives des composants.

[0158]   L'énergie capacitive à considérer est ainsi définie par la formule:

[0159]

[Math.27]

$$C_{res} \cdot V_{in}^2$$

[0160] De façon analogue, la valeur de l'inductance de fuite  $L_k$  du convertisseur 1, volontairement élevée pour réduire les surtensions liées aux courants de recouvrements des diodes de redressement SR1, SR2 de l'étage secondaire, rend négligeable la contribution de l'énergie de l'inductance magnétisante du convertisseur 1 à l'énergie inductive du circuit.

[0161] Le courant dans l'inductance de fuite  $L_k$  du convertisseur 1, à l'instant  $t_4$  (respectivement  $t_9$ ) est compris entre l'image du courant maximal et l'image du courant moyen dans  $L_1$  (respectivement  $L_2$ ,  $L_1$  et  $L_2$  étant identiques). On considère l'image du courant moyen, qui est le minorant.

[0162] L'énergie inductive à considérer est définie par la formule :

[0163] [Math.28]

$$\frac{1}{2} \cdot L_k \cdot \left( I_{L_1, moy} \cdot \frac{N_s}{N_p} \right)^2$$

[0164] A noter que la tension  $V_s$  aux bornes de la bobine secondaire du circuit secondaire est nulle pendant cette phase car la bobine secondaire est court-circuitée par les 2 transistors SR1 et SR2 conducteurs (entre les instants  $t_3$  et  $t_4$ , de même qu'entre les instants  $t_8$  et  $t_9$ ). Seule l'énergie de l'inductance de fuite  $L_k$ , chargée avec un courant correspondant à l'image du courant secondaire, est ramenée dans la bobine primaire selon le rapport  $N_s/N_p$  entre le nombre de spires  $N_s$  de la bobine secondaire et le nombre de spires  $N_p$  de la bobine primaire.

[0165] L'injection de courant d'injection  $I_{L_{inj}}$  est nécessaire lorsque l'énergie inductive est inférieure à l'énergie capacitive définie par la formule :

[0166] [Math.29]

$$\frac{1}{2} \cdot L_k \cdot \left( I_{L_1, moy} \cdot \frac{N_s}{N_p} \right)^2 < C_{res} \cdot V_{in}^2$$

[0167] Dans cette relation,  $L_k$ ,  $N_s$ ,  $N_p$  et  $C_{res}$  sont des grandeurs fixes et connues du circuit,  $V_{in}$  est mesurée et ne dépend pas de la puissance de sortie. Seul  $I_{L_1}$ , mesurée par l'unité de contrôle-commande du convertisseur 1, dépend de la puissance de sortie.

[0168] Les relations ci-dessous permettent donc d'établir le critère d'activation sur la mesure du courant  $I_{L_1}$  :

[0169] [Math.30]

$$I_{L_1, moy} < \frac{N_p}{N_s} \cdot V_{in} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot C_{res}}{L_k}}$$

[0170]

[Math.31]

$$I_{Lk, \text{max}} = V_{\text{in}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot C_{\text{RS}}}{L_k}} \cdot K_{\text{marge}}$$

[0171] La valeur du courant disponible  $I_{Lk, \text{dispo}}$  avec l'inductance de fuite  $L_k$  lors de la phase de commutation douce est l'image de la valeur moyenne  $I_{L1, \text{moy}}$  du courant dans l'inductance  $L1$  (identique à celui dans  $L2$ ) ; elle est définie par la relation :

[0172] [Math.32]

$$I_{Lk, \text{dispo}} = \frac{N_P}{N_S} \cdot I_{L1, \text{moy}}$$

[0173] Le courant d'injection  $I_{\text{Linj}}$  nécessaire est donc défini par la relation:

[0174] [Math.33]

$$I_{\text{Linj}} = I_{Lk, \text{dispo}} - I_{Lk, \text{dispo}}$$

[0175] Pendant que les interrupteurs d'injection E, F sont sur ON, la tension appliquée aux bornes de l'inductance d'injection est constante, et égale à  $\pm V_{\text{in}}$ .

[0176] En connaissant le niveau de courant d'injection  $I_{\text{Linj}}$  souhaité, il est possible de calculer la durée d'injection  $t_{\text{cmd\_inj}}$  pendant laquelle les interrupteurs d'injection E, F sont sur ON, par la relation :

[0177] [Math.34]

$$t_{\text{cmd\_inj}} = I_{\text{Linj}} \cdot \frac{L_{\text{inj}}}{V_{\text{in}}}$$

[0178] Il est donc possible de définir les premier et deuxième instants d'injection des interrupteurs d'injection par les relations ci-dessous :

[0179] [Math.35]

$$t_{\text{inj}} = t_4 - t_{\text{cmd\_inj}}$$

[0180] [Math.36]

$$t_{\text{finj}} = t_9 - t_{\text{cmd\_inj}}$$

[0181] La phase préalable à l'activation de l'injection du courant d'injection commence après l'instant  $t_3$  où l'interrupteur C est mis sur ON. La figure 3.1 présente le schéma du circuit équivalent avec les composants du circuit qui sont traversés par un courant pendant cette phase préalable. Pendant cette phase préalable à l'injection du courant d'injection, un courant  $I_{Lk}$  circule en roue-libre à travers les interrupteurs A et C, la tension  $V_p$  est nulle et la tension  $V_s$  aux bornes de la bobine secondaire est nulle, le courant de l'inductance  $L_1$  traverse l'interrupteur SR2 et le courant de l'inductance  $L_2$  traverse l'interrupteur SR1.

[0182] La préparation de l'injection du courant commence avec la mise sur ON de l'interrupteur F à un premier instant d'injection  $t_{3\text{inj}}$ , comme cela est illustré sur le

schéma du circuit équivalent correspondant représenté sur la figure 3.2, l'objectif étant de précharger l'inductance d'injection  $L_{inj}$  avec un courant d'injection  $I_{L_{inj}}$  de même signe que le courant  $I_{L_k}$  vu du point milieu  $P_{AB}$  du bras de pont A, B, courants tous deux positifs selon les conventions de signe adoptées.

- [0183] Pour ce faire, on tire profit de l'état de roue libre du courant à travers les interrupteurs A et C. Le point milieu  $P_{AB}$  du bras de pont A, B étant au potentiel  $+V_{in}$  du fait de l'état passant de l'interrupteur A, en mettant l'interrupteur F sur ON, l'inductance  $L_{inj}$  voit à ses bornes la tension  $V_{in}$ , ce qui fait croître linéairement le courant  $I_{L_{inj}}$ .
- [0184] Le calcul du temps de précharge, définissant l'instant  $t_{3inj}$  par rapport à  $t_4$  a été décrit ci-avant.
- [0185] A l'instant  $t_4$ , on ouvre, i.e. on met sur OFF, l'interrupteur A, et on ouvre également, i.e. on met sur OFF, l'interrupteur d'injection F, comme cela est illustré par le schéma du circuit équivalent présenté en figure 3.3.a, première partie. Le courant  $I_{L_{inj}}$  qui circulait à travers F se reboucle désormais via la diode de roue libre de l'interrupteur E. Tous les composants du bras de pont A, B sont bloqués. Ainsi, le courant des deux inductances  $L_{inj}$  et  $L_k$  circule à travers les condensateurs, chargeant le condensateur parallèle de l'interrupteur A et déchargeant le condensateur parallèle de l'interrupteur B.
- [0186] Lorsque la tension aux bornes du condensateur parallèle de l'interrupteur B, et donc aux bornes de la diode de roue libre de l'interrupteur B, est complètement annulée en  $t_5$ , le courant circule à travers la diode de roue libre de l'interrupteur B, comme cela est illustré par le schéma du circuit équivalent présenté en figure 3.3.b. La tension aux bornes de l'interrupteur B est donc maintenue nulle (à la tension de seuil de la diode de roue libre près de -0.5 Volt), ce qui permet une commutation douce à la mise ON de l'interrupteur B entre  $t_5$  et  $t_6$ . Le coefficient  $K_{marge}$  est ajusté pour que le transistor de l'interrupteur B ait le temps de se fermer lorsque la diode de roue libre de l'interrupteur B conduit.
- [0187] Etant donné que le courant dans l'inductance  $L_2$  est faible, la durée de perte de rapport cyclique, i.e. la durée pendant laquelle l'inductance de fuite  $L_k$  rattrape l'image du courant dans  $L_2$  avant le transfert d'énergie, peut être quasi inexistante, et donc  $t_5$  et  $t_6$  peuvent sembler confondus, comme représenté sur le chronogramme de la figure 2.
- [0188] Pour l'inductance d'injection  $L_{inj}$ , la période temporelle entre l'instant  $t_5$  et un instant  $t_{6end}$  constitue une phase de retour à l'état de repos, ledit instant  $t_{6end}$  étant le moment où le courant s'annule dans l'induction d'injection. En effet, la diode de roue libre de l'interrupteur E et l'interrupteur B étant tous deux passants, la tension aux bornes de l'inductance d'injection  $L_{inj}$  vaut  $-V_{in}$ , ce qui fait décroître linéairement son courant jusqu'à son annulation, conduisant au blocage de la diode de roue libre de

l'interrupteur E. La diode de roue libre de l'interrupteur E s'arrête de conduire avec une faible pente de courant (i.e caractérisant le mode discontinu) engendrant ainsi des pertes joules presque nulles dans les composants E et F.

- [0189] De manière analogue à ce qui a été décrit précédemment, en référence aux figures 3.1, 3.2, et 3.3 concernant le fonctionnement du convertisseur 1 pour obtenir une commutation douce à la mise sur ON de l'interrupteur B, le fonctionnement du convertisseur 1 pour obtenir une commutation douce à la mise sur ON de l'interrupteur A, va être décrit ci-après en référence aux figures 3.4, 3.5, et 3.6.
- [0190] La phase préalable à l'activation de l'injection du courant d'injection commence après l'instant  $t_8$  où l'interrupteur D est mis sur ON. La figure 3.4 présente le schéma du circuit équivalent avec les composants du circuit qui sont traversés par un courant pendant cette phase préalable. Pendant cette phase préalable à l'injection du courant d'injection, un courant  $I_{Lk}$  circule en roue-libre à travers les interrupteurs B et D, la tension  $V_s$  aux bornes de la bobine secondaire est nulle, le courant de l'inductance  $L_1$  traverse l'interrupteur SR2 et le courant de l'inductance  $L_2$  traverse l'interrupteur SR1.
- [0191] La préparation à l'injection du courant commence avec la mise sur ON de l'interrupteur E à un premier instant d'injection  $t_{8inj}$ , comme cela est illustré sur le schéma du circuit équivalent correspondant représenté sur la figure 3.5, l'objectif étant de précharger l'inductance d'injection  $L_{inj}$  avec un courant d'injection  $I_{Linj}$  de même signe que le courant  $I_{Lk}$  vu du point milieu  $P_{AB}$  du bras de pont A, B, courants tous deux positifs selon les conventions de signe adoptées.
- [0192] Pour ce faire, on tire profit de l'état de roue libre du courant à travers les interrupteurs B et D. Le point milieu  $P_{AB}$  du bras de pont A, B étant au potentiel  $+V_{in}$  du fait de l'état passant de l'interrupteur B, en mettant l'interrupteur E sur ON, l'inductance  $L_{inj}$  voit à ses bornes la tension  $V_{in}$ , ce qui fait croître linéairement le courant  $I_{Linj}$ .
- [0193] Le calcul du temps de précharge, définissant l'instant  $t_{8inj}$  par rapport à  $t_9$  a été décrit ci-avant.
- [0194] A l'instant  $t_9$ , on ouvre, i.e. on met sur OFF, l'interrupteur B, et on ouvre également, i.e. on met sur OFF, l'interrupteur d'injection E, comme cela est illustré par le schéma du circuit équivalent présenté en figure 3.6.a, première partie. Le courant  $I_{Linj}$  qui circulait à travers E se reboucle désormais via la diode de roue libre de l'interrupteur F. Tous les composants du bras de pont A, B sont bloqués (ouverts). Ainsi, le courant des deux inductances  $L_{inj}$  et  $L_k$  circule à travers les condensateurs, chargeant le condensateur parallèle de l'interrupteur B et déchargeant le condensateur parallèle de l'interrupteur A.
- [0195] Lorsque la tension aux bornes du condensateur parallèle de l'interrupteur A, et donc la tension aux bornes de la diode de roue libre de l'interrupteur A, est complètement annulée, le courant circule à travers la diode de roue libre de l'interrupteur A, comme

cela est illustré par le schéma du circuit équivalent présenté en figure 3.6.b. La tension aux bornes de l'interrupteur A est donc maintenue nulle (à la tension de seuil de la diode de roue libre près), ce qui permet une commutation douce à la mise ON de l'interrupteur A entre  $t_{10}$  et  $t_0$ .

- [0196] Etant donné que le courant dans l'inductance  $L_1$  est faible, la durée de perte de rapport cyclique, i.e. la durée pendant laquelle l'inductance de fuite  $L_k$  rattrape l'image du courant dans  $L_1$  avant le transfert d'énergie, peut être quasi inexistante, et donc  $t_0$  et  $t_1$  peuvent sembler confondus, comme représenté sur le chronogramme de la figure 2.
- [0197] Pour l'inductance d'injection  $L_{inj}$ , la période temporelle entre un instant  $t_{10}$  et l'instant  $t_{0end}$  constitue une phase de retour à l'état de repos, ledit instant  $t_{0end}$  étant le moment où le courant s'annule dans l'induction d'injection. En effet, la diode de roue libre de l'interrupteur F et l'interrupteur A étant tous deux passants, la tension aux bornes de l'inductance d'injection  $L_{inj}$  vaut  $V_{in}$ , ce qui fait croître linéairement son courant jusqu'à son annulation, conduisant au blocage de la diode de roue libre de l'interrupteur F.
- [0198] Selon ces dispositions, le convertisseur 1 mis en œuvre par exemple sur un chargeur de batterie de 10kW, 700Vin / 110VDCout, a fonctionné avec une plage de puissance comprise entre 100% et 0.4% de sa puissance nominale. Les dispositions décrites ci-avant permettent ainsi de fonctionner à très faible charge sans occasionner des contraintes thermiques et électriques sur les semiconducteurs de puissance A et B.
- [0199] Entre les instants  $t_2$  et  $t_3$ , respectivement entre les instants  $t_7$  et  $t_8$ , la commutation douce de l'interrupteur C, respectivement de l'interrupteur D, s'effectue sans circuit d'injection. En effet, c'est l'image du courant de  $I_{L1}$  ou  $I_{L2}$ , ramenée au primaire qui assure la charge de  $C_{res}$  à courant constant même à faible charge. L'amplitude de  $I_{L1}$  ou  $I_{L2}$ , fonctionnant alors en mode discontinu engendre des courants crêtes à l'instant  $t_2$  ( $I_{L1}$ ) et à l'instant  $t_7$  ( $I_{L2}$ ) suffisamment forts pour charger  $C_{res}$ .
- [0200] Les courant crêtes de  $I_{L1}$  et  $I_{L2}$  ont été dimensionnés par la valeur de  $L_1$  et  $L_2$ , pour que les énergies  $\frac{1}{2}.L_1.[I_{L1}.(N_s/N_p)]^2$  et  $\frac{1}{2}.L_2.[I_{L2}.(N_s/N_p)]^2$  respectivement en  $t_2$  et  $t_7$  soient très supérieures à  $V_{in}^2.C_{res}$ .
- [0201] Par ailleurs, l'énergie dans l'inductance  $L_k$  définie par  $\frac{1}{2}.L_k.[I_{Lk}]^2$  en  $t_2$  et en  $t_7$  est très inférieure à  $\frac{1}{2}.L_1.[I_{L1}.(N_s/N_p)]^2$  en  $t_2$  et très inférieure à  $\frac{1}{2}.L_2.[I_{L2}.(N_s/N_p)]^2$  en  $t_7$ .
- [0202] Si les conditions décrites ne sont pas respectées, un quatrième bras de pont peut être alors rajouté avec une deuxième inductance  $L_{inj}$  en  $P_{CD}$ , pour assurer la commutation douce des interrupteurs C et D.
- [0203] Ce bras de pont sera alors constitué de deux interrupteurs G et H connectés, comme pour 3' entre E1 et E2 ; ils ne sont pas représentés sur la figure 1.
- [0204] Les commutations douces à la mise ON de l'interrupteur C en  $t_2$  et de l'interrupteur

D en  $t_7$  seront alors respectées.

- [0205] La technique de l'injection de courant peut aussi être utilisée dans les applications Dual Active Bridge (DAB) pour assurer la commutation douce des interrupteurs de puissance à faible charge selon le même séquençement décrit par la figure 2.

## Revendications

[Revendication 1]

Procédé (100) de conversion d'une tension d'entrée ( $V_{in}$ ) entre deux bornes d'entrée ( $E_1, E_2$ ) d'un circuit primaire d'un convertisseur (1) en une tension de sortie ( $V_{out}$ ) entre deux bornes de sortie ( $S_1, S_2$ ) d'un circuit secondaire du convertisseur (1), le circuit primaire comprenant:

- un premier bras de pont formé par un premier interrupteur (A) et un deuxième interrupteur (B), le premier et le deuxième interrupteur (A, B) étant connectés en série entre les bornes d'entrée du circuit primaire, un premier point milieu ( $P_{AB}$ ) du premier bras de pont désignant un point de connexion intermédiaire entre le premier interrupteur (A) et le deuxième interrupteur (B);
- un deuxième bras de pont formé par un troisième interrupteur (C) et un quatrième interrupteur (D), le troisième et le quatrième interrupteur (C, D) étant connectés en série entre les bornes d'entrée du circuit primaire, un deuxième point milieu ( $P_{CD}$ ) du deuxième bras de pont désignant un point de connexion intermédiaire entre le troisième interrupteur (C) et le quatrième interrupteur (D), le deuxième bras de pont étant connecté en parallèle du premier bras de pont entre les bornes d'entrée du circuit primaire;
- une bobine primaire du circuit primaire, la bobine primaire comprenant une inductance de fuite ( $L_k$ ), la bobine primaire étant couplée par induction mutuelle à une bobine secondaire du circuit secondaire, la bobine primaire étant connectée par un pôle au point milieu ( $P_{AB}$ ) du premier bras de pont, et par un autre pôle au point milieu ( $P_{CD}$ ) du deuxième bras de pont. ;

le circuit primaire comprenant en outre :

- un condensateur disposé en parallèle entre les bornes respectives de chacun des premier, deuxième, troisième, et quatrième interrupteurs (A, B, C, D) ;
- un troisième bras de pont formé par un cinquième interrupteur (E) et un sixième interrupteur (F), le cinquième et le sixième interrupteur (E, F) étant connectés en série entre les bornes d'entrée du circuit primaire, un troisième point milieu ( $P_{EF}$ ) du troisième bras de pont désignant un point de connexion intermédiaire entre le cinquième interrupteur (E) et le sixième interrupteur (F), le troisième bras de pont étant connecté en parallèle des premier et deuxième bras de pont entre les bornes d'entrée du circuit primaire ;

- chacun des premier, deuxième, troisième, quatrième, cinquième et sixième interrupteurs (A, B, C, D, E, F) étant associé à une diode connectée aux bornes dudit premier, deuxième, troisième, quatrième, cinquième et sixième interrupteur (A, B, C, D, E, F) ;
- une inductance d'injection ( $L_{inj}$ ) connectée par un pôle au point milieu ( $P_{AB}$ ) du premier bras de pont, et par un autre pôle au point milieu ( $P_{EF}$ ) du troisième bras de pont ;
- une unité de contrôle-commande configurée pour commander un état des interrupteurs (A, B, C, D, E, F), chaque interrupteur étant configuré pour être alternativement sur ON ou sur OFF, l'unité de contrôle-commande étant configurée pour mettre en œuvre un cycle de commande des interrupteurs (A, B, C, D, E, F) comprenant les étapes suivantes :
  - (101) mettre sur ON le premier interrupteur (A), à un premier instant ( $t_0$ );
  - (102) mettre sur OFF le quatrième interrupteur (D), à un deuxième instant ( $t_2$ ) du cycle;
  - (103) mettre sur ON le troisième interrupteur (C), à un troisième instant ( $t_3$ ) du cycle;
  - (104) mettre sur OFF le premier interrupteur (A), à un quatrième instant ( $t_4$ ) du cycle;
  - (105) mettre sur ON le deuxième interrupteur (B), à cinquième instant ( $t_6$ ) du cycle;
  - (106) mettre sur OFF le troisième interrupteur (C), à un sixième instant ( $t_7$ ) du cycle;
  - (107) mettre sur ON le quatrième interrupteur (D), à un septième instant ( $t_8$ ) du cycle;
  - (108) mettre sur OFF le deuxième interrupteur (B), à un huitième instant ( $t_9$ ) du cycle;
- le cycle comprenant en outre les étapes suivantes :
  - (109) mettre sur ON le sixième interrupteur (F) à un premier instant d'injection ( $t_{3inj}$ ) compris entre le troisième instant ( $t_3$ ) et le quatrième instant ( $t_4$ ) de sorte qu'une tension d'injection s'applique entre les pôles de l'inductance d'injection ( $L_{inj}$ ) pendant une durée d'injection ( $t_{cmd\_inj}$ ), jusqu'au quatrième instant ( $t_4$ ) du cycle, et qu'au quatrième instant ( $t_4$ ) du cycle un courant d'injection ( $I_{Linj}$ ) circule dans l'inductance d'injection ( $L_{inj}$ ), ledit courant d'injection ( $I_{Linj}$ ) étant supérieur à un courant minimum prédéterminé ;

- (110) mettre sur OFF le sixième interrupteur (F) au quatrième instant ( $t_4$ ) ;
- (111) mettre sur ON le cinquième interrupteur (E) à un deuxième instant d'injection ( $t_{8inj}$ ) compris entre le septième instant ( $t_8$ ) et le huitième instant ( $t_9$ ) de sorte qu'une tension d'injection s'applique entre les pôles de l'inductance d'injection ( $L_{inj}$ ) pendant la durée d'injection ( $t_{cmd\_inj}$ ), jusqu'au huitième instant ( $t_9$ ) du cycle, et de sorte qu'au huitième instant ( $t_9$ ) du cycle un courant d'injection ( $I_{Linj}$ ) circule dans l'inductance d'injection ( $L_{inj}$ ), ledit courant d'injection ( $I_{Linj}$ ) étant supérieur à un courant d'injection minimum prédéterminé ;
- (112) mettre sur OFF le cinquième interrupteur (E) au huitième instant ( $t_9$ );
- (113) répéter les étapes (101 à 112) du cycle à partir d'un neuvième instant ( $t_{10}$ ).

[Revendication 2]

Procédé selon la revendication 1, dans lequel le premier instant ( $t_0$ ) est déterminé en fonction d'un moment où la diode associée au premier interrupteur (A) est en conduction, de sorte qu'une tension aux bornes du premier interrupteur (A) soit nulle.

[Revendication 3]

Procédé selon la revendication précédente dans lequel :

- le deuxième instant ( $t_2$ ) du cycle est décalé du premier instant ( $t_0$ ) d'un premier décalage temporel, fonction d'un déphasage (Ph) entre les premier et deuxième bras de ponts, et d'une durée (T) d'un cycle complet;
- le troisième instant ( $t_3$ ) du cycle est décalé du premier instant ( $t_0$ ) d'un deuxième décalage temporel fonction du premier décalage temporel et d'un premier temps mort ( $t_{mort\_C\_D}$ );
- le quatrième instant ( $t_4$ ) du cycle est décalé du premier instant ( $t_0$ ) d'un troisième décalage temporel fonction de la durée (T/2) d'un demi-cycle complet et d'un deuxième temps mort ( $t_{mort\_A\_B}$ );
- le cinquième instant ( $t_6$ ) du cycle est décalé du premier instant ( $t_0$ ) d'un quatrième décalage temporel fonction de la durée (T/2) d'un demi-cycle complet;
- le sixième instant ( $t_7$ ) du cycle est décalé du premier instant ( $t_0$ ) d'un cinquième décalage temporel fonction du déphasage Ph et de la durée T/2 d'un demi-cycle complet;
- le septième instant ( $t_8$ ) du cycle est décalé du premier instant ( $t_0$ ) d'un sixième décalage temporel fonction du déphasage Ph et de la durée T/2 d'un demi-cycle complet et du premier temps mort ( $t_{mort\_C\_D}$ );

- le huitième instant ( $t_9$ ) du cycle est décalé du premier instant ( $t_0$ ) d'un septième décalage temporel fonction de la durée (T) d'un cycle complet et du deuxième temps mort ( $t_{mort\_A\_B}$ ).

[Revendication 4]

Convertisseur (1) comprenant un circuit primaire et un circuit secondaire, le convertisseur (1) étant configuré pour convertir une tension d'entrée ( $V_{in}$ ) entre deux bornes d'entrée ( $E_1, E_2$ ) du circuit primaire en une tension de sortie ( $V_{out}$ ) entre les bornes de sortie ( $S_1, S_2$ ) du circuit secondaire, le circuit primaire comprenant :

- un premier bras de pont formé par un premier interrupteur (A) et un deuxième interrupteur (B), le premier et le deuxième interrupteur (A, B) étant connectés en série entre les bornes d'entrée du circuit primaire, un premier point milieu ( $P_{AB}$ ) du premier bras de pont désignant un point de connexion intermédiaire entre le premier interrupteur (A) et le deuxième interrupteur (B);
- un deuxième bras de pont formé par un troisième interrupteur (C) et un quatrième interrupteur (D), le troisième et le quatrième interrupteur (C, D) étant connectés en série entre les bornes d'entrée du circuit primaire, un deuxième point milieu ( $P_{CD}$ ) du deuxième bras de pont désignant un point de connexion intermédiaire entre le troisième interrupteur (C) et le quatrième interrupteur (D), le deuxième bras de pont étant connecté en parallèle du premier bras de pont entre les bornes d'entrée du circuit primaire;
- une bobine primaire du circuit primaire, la bobine primaire comprenant une inductance de fuite ( $L_k$ ), la bobine primaire étant couplée par induction mutuelle à une bobine secondaire du circuit secondaire, la bobine primaire étant connectée par un pôle au point milieu ( $P_{AB}$ ) du premier bras de pont, et par un autre pôle au point milieu ( $P_{CD}$ ) du deuxième bras de pont. ;

le circuit primaire comprenant en outre :

- un condensateur disposé en parallèle entre les bornes respectives de chacun des premier, deuxième, troisième, et quatrième interrupteurs (A, B, C, D) ;
- un troisième bras de pont formé par un cinquième interrupteur (E) et un sixième interrupteur (F), le cinquième et le sixième interrupteur (A, B) étant connectés en série entre les bornes d'entrée du circuit primaire, un troisième point milieu ( $P_{EF}$ ) du troisième bras de pont désignant un point de connexion intermédiaire entre le cinquième interrupteur (E) et le sixième interrupteur (F), le troisième bras de pont étant connecté en

parallèle des premier et deuxième bras de pont entre les bornes d'entrée du circuit primaire ;

- chacun des premier, deuxième, troisième, quatrième, cinquième et sixième interrupteurs (A, B, C, D, E, F) étant associé à une diode connectée aux bornes dudit premier, deuxième, troisième, quatrième, cinquième et sixième interrupteur (A, B, C, D, E, F) ;

- une inductance d'injection ( $L_{inj}$ ) connectée par un pôle au point milieu ( $P_{AB}$ ) du premier bras de pont, et par un autre pôle au point milieu ( $P_{EF}$ ) du troisième bras de pont ;

- une unité de contrôle-commande configurée pour commander un état des interrupteurs (A, B, C, D, E, F), chaque interrupteur étant configuré pour être alternativement sur ON ou sur OFF, l'unité de contrôle-commande étant configurée pour mettre en œuvre un cycle de commande des interrupteurs (A, B, C, D, E, F) comprenant les étapes d'un procédé selon l'une des revendications précédentes.

[Revendication 5]

Convertisseur (1) selon la revendication précédente dans lequel le circuit secondaire comprend :

- un quatrième bras de pont formé par un septième interrupteur (SR1) et un huitième interrupteur (SR2), le septième et le huitième interrupteur (SR1, SR2) étant connectés en série entre les bornes de la bobine secondaire du circuit secondaire, un quatrième point milieu ( $P_{SR1SR2}$ ) du quatrième bras de pont désignant un point de connexion intermédiaire entre le septième interrupteur (SR1) et le huitième interrupteur (SR2);

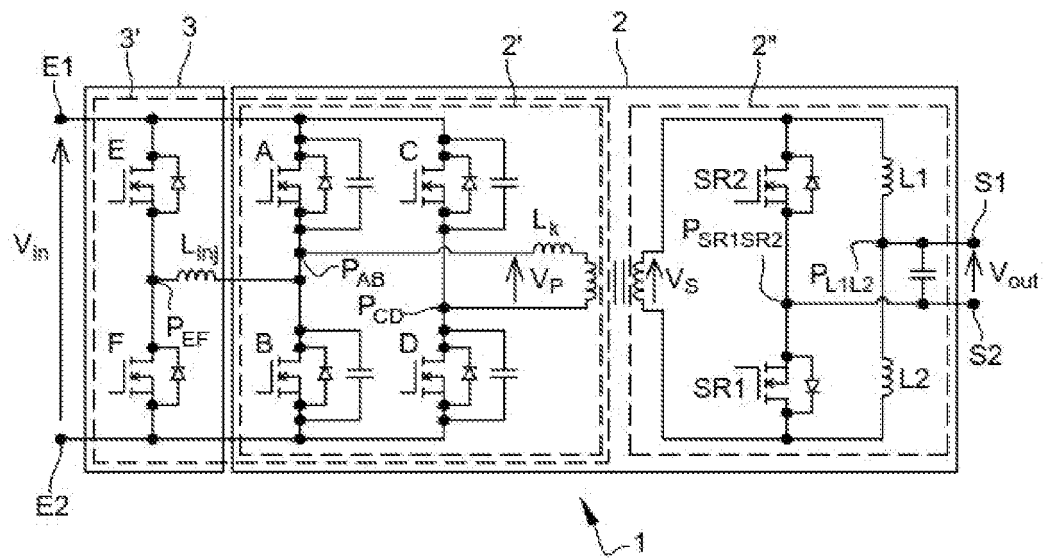
- un cinquième bras de pont formé par une première inductance ( $L_1$ ) et une deuxième inductance ( $L_2$ ), la première et la deuxième inductance ( $L_1, L_2$ ) étant connectées en série entre les bornes de la bobine secondaire du circuit secondaire, un cinquième point milieu ( $P_{L1L2}$ ) du cinquième bras de pont désignant un point de connexion intermédiaire entre la première inductance ( $L_1$ ) et la deuxième inductance ( $L_2$ ), le cinquième bras de pont étant connecté en parallèle du quatrième bras de pont entre les bornes de la bobine secondaire ;

le quatrième point milieu étant raccordé à une borne de sortie du circuit secondaire, et le cinquième point milieu étant raccordé à l'autre borne de sortie du circuit secondaire.

[Revendication 6]

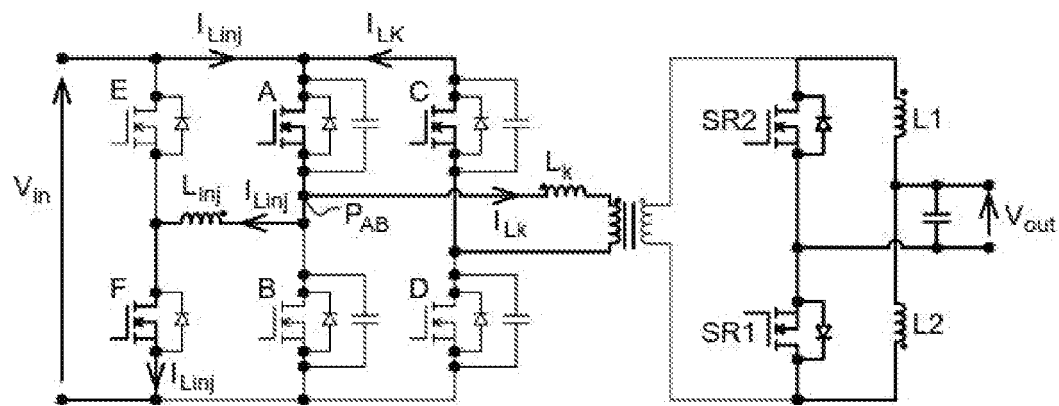
Convertisseur (1) selon la revendication 5, dans lequel le circuit secondaire comprend en outre un condensateur disposé entre les bornes de sortie du circuit secondaire.

[Fig. 1]

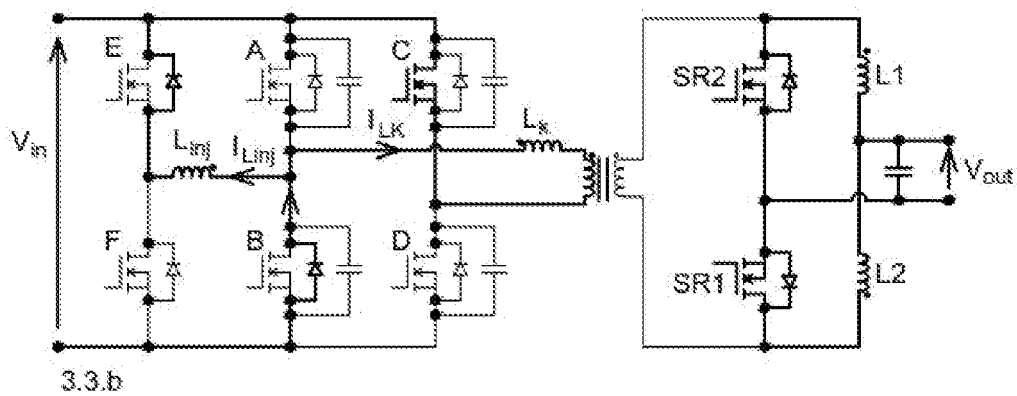
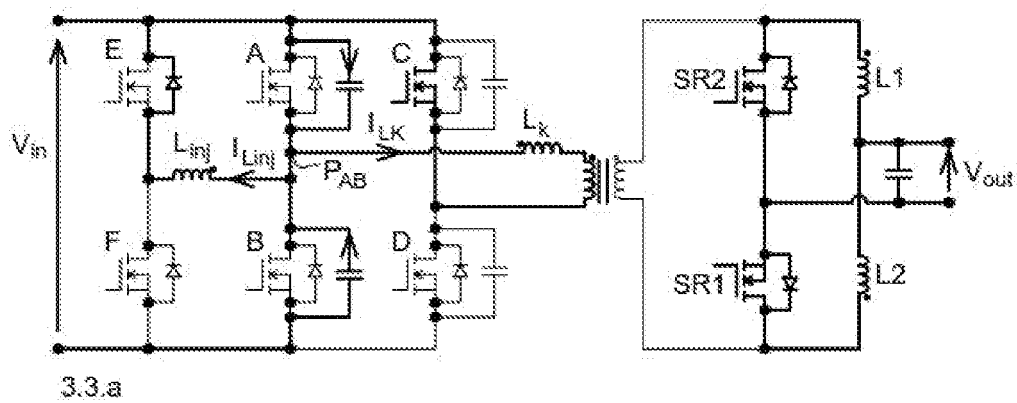




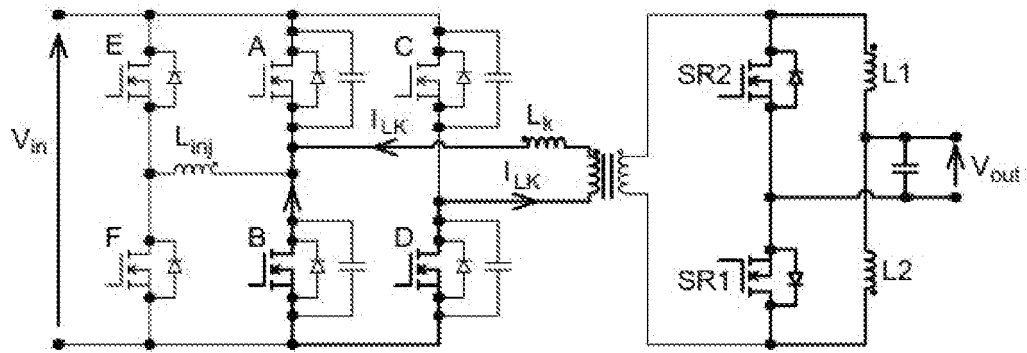
[Fig. 32]



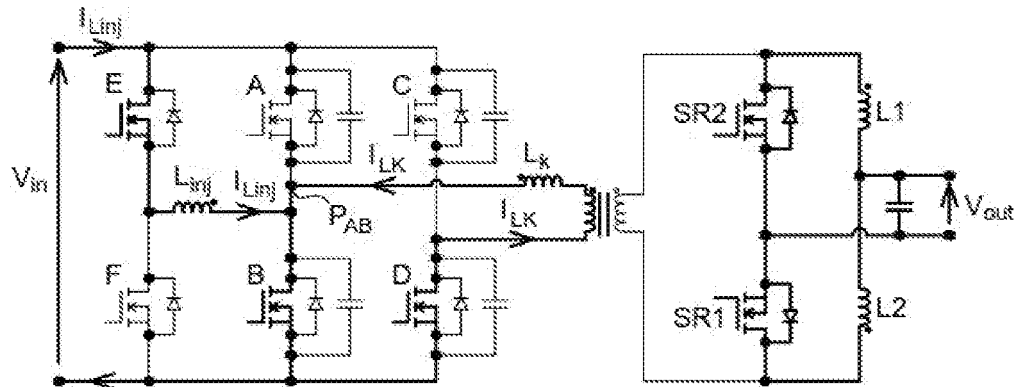
[Fig. 33]



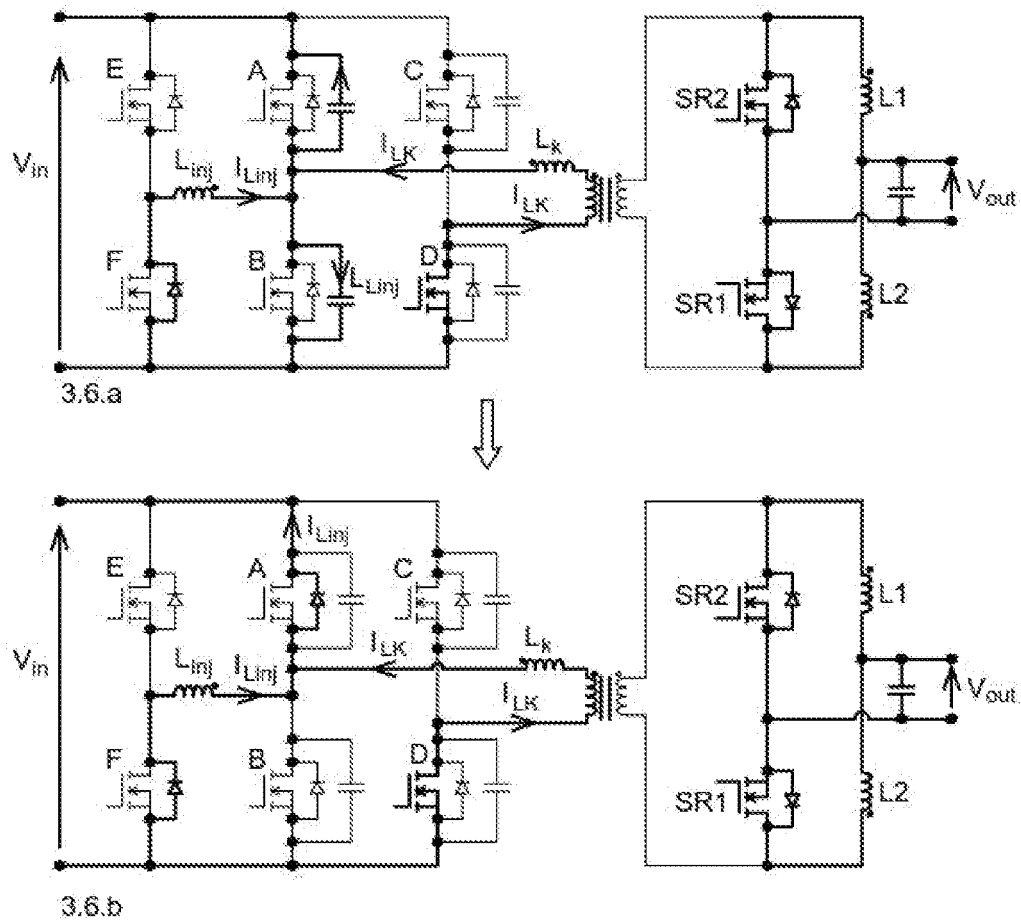
[Fig. 34]



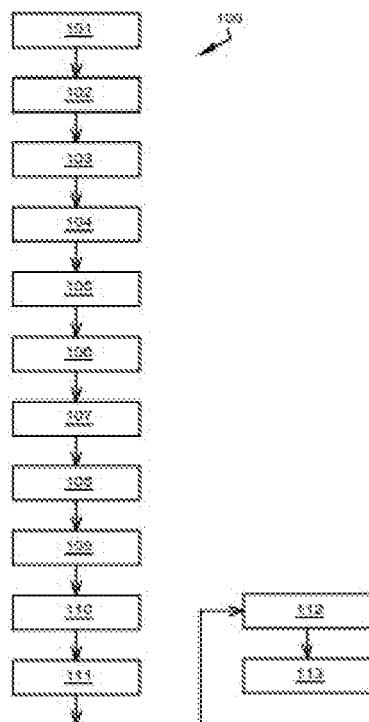
[Fig. 35]



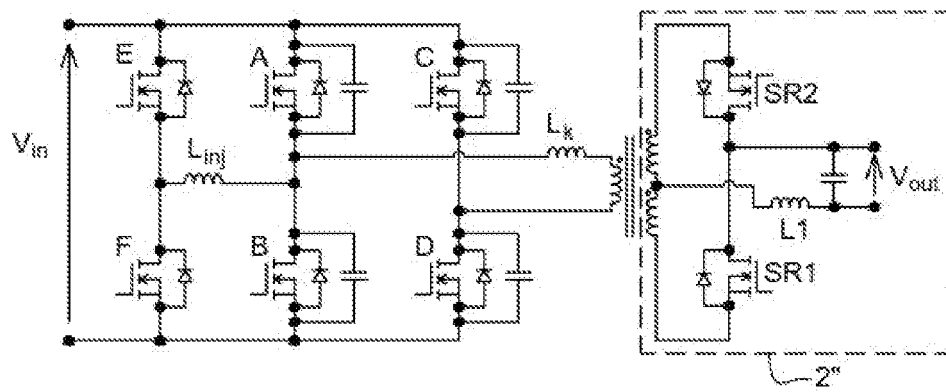
[Fig. 36]



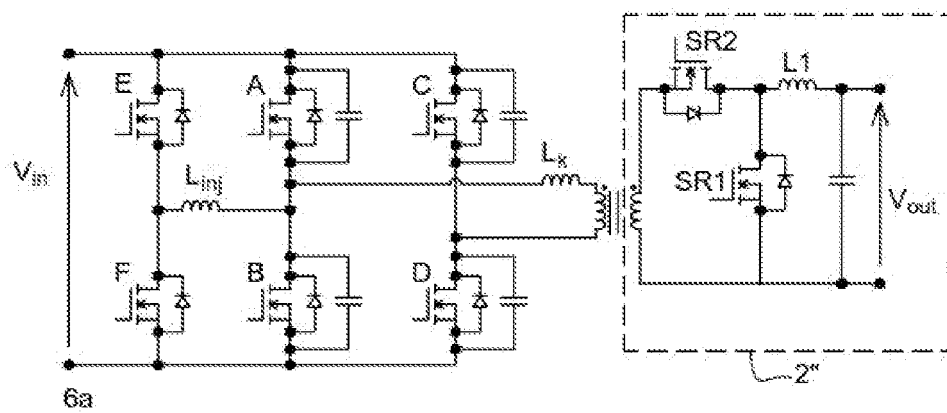
[Fig. 4]



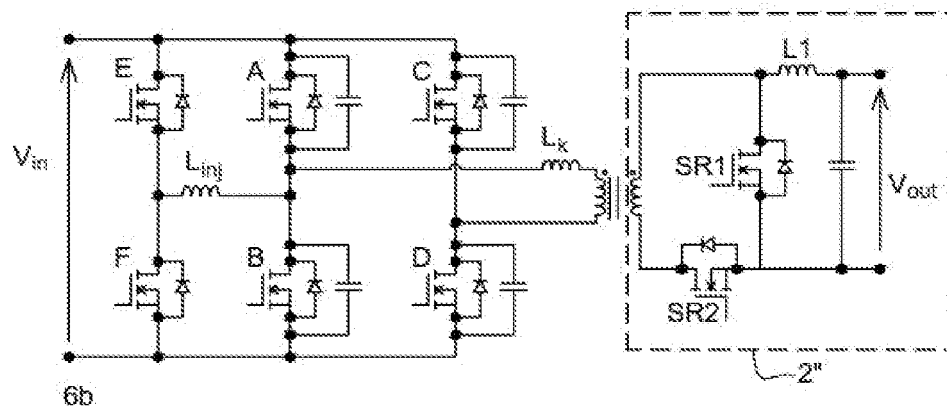
[Fig. 5]



[Fig. 6]

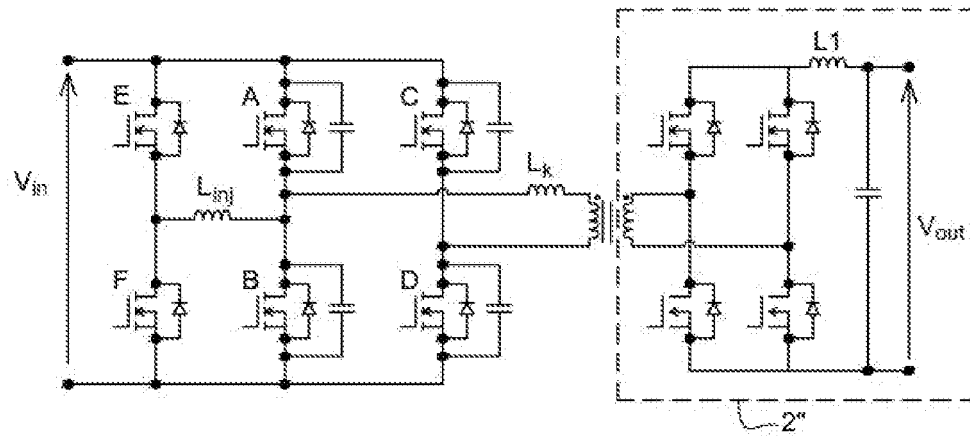


6a



6b

[Fig. 7]



# RAPPORT DE RECHERCHE

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

## OBJET DU RAPPORT DE RECHERCHE

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

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

## CONDITIONS D'ETABLISSEMENT DU PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

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

☒ Le demandeur a maintenu les revendications.

☐ Le demandeur a modifié les revendications.

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

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

☐ Un rapport de recherche préliminaire complémentaire a été établi.

## DOCUMENTS CITES DANS LE PRESENT RAPPORT DE RECHERCHE

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

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

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

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

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

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

NEANT

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

US 2009/251927 A1 (POPESCU LUCIAN [US] ET  
AL) 8 octobre 2009 (2009-10-08)

DE 10 2012 215293 A1 (SCHMIDHAUSER AG  
[CH]) 3 avril 2014 (2014-04-03)

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

NEANT