



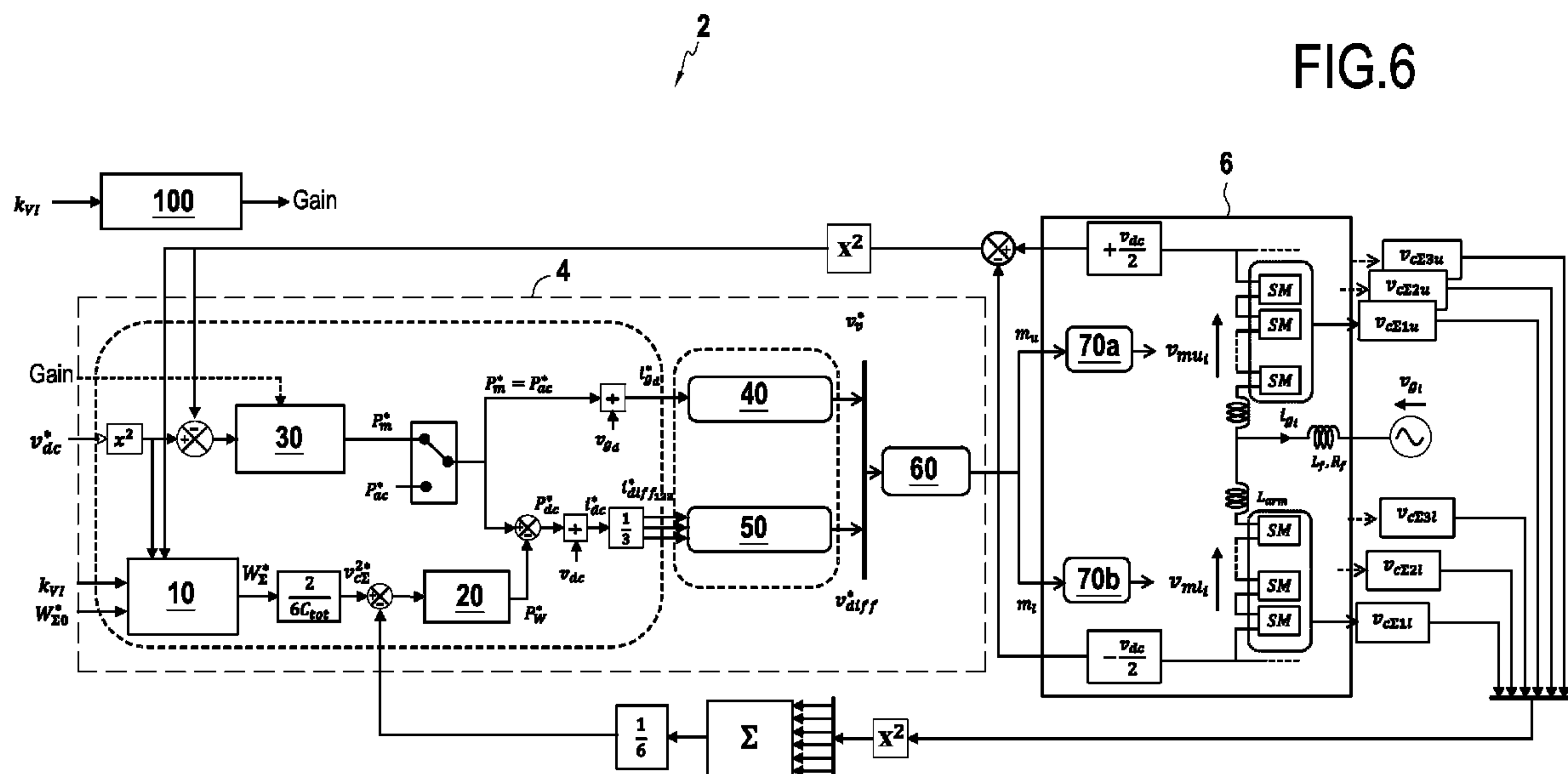
(12) **DEMANDE DE BREVET CANADIEN  
CANADIAN PATENT APPLICATION**

(13) **A1**

(86) Date de dépôt PCT/PCT Filing Date: 2016/07/29  
(87) Date publication PCT/PCT Publication Date: 2017/02/09  
(85) Entrée phase nationale/National Entry: 2018/01/31  
(86) N° demande PCT/PCT Application No.: FR 2016/051993  
(87) N° publication PCT/PCT Publication No.: 2017/021642  
(30) Priorité/Priority: 2015/08/03 (FR1557501)

(51) Cl.Int./Int.Cl. *H02M 7/483* (2007.01)  
(71) Demandeurs/Applicants:  
SUPERGRID INSTITUTE, FR;  
INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES  
DE LYON, FR;  
CENTRALESUPELEC, FR  
(72) Inventeurs/Inventors:  
SHINODA, KOSEI, FR;  
BENCHAI, ABDELKRIM, FR;  
GUILLAUD, XAVIER, FR;  
DAI, JING, FR  
(74) Agent: ROBIC

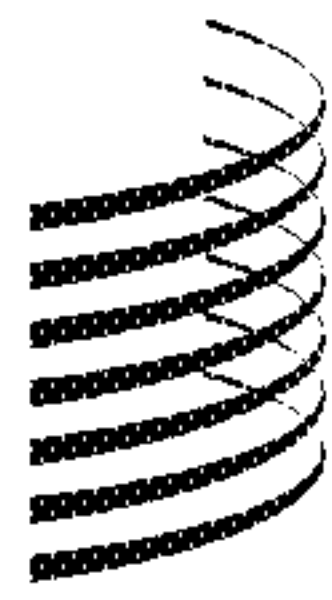
(54) Titre : VIRTUAL CAPACITANCE  
(54) Title: CAPACITE VIRTUELLE



(57) Abrégé/Abstract:

The invention relates to a modular multi-level converter (2) provided with a control module (4) and a calculator (10) for calculating a set value for the internal energy of the converter, stored in the capacitances of the sub-modules of the half-arms. The control module is designed to deduce, from said set value for the internal energy of the converter, a set value for the voltage at the terminals of each modelled capacitor used to regulate the voltage at the points of connection of the converter to the continuous power supply network and the voltage at the terminals of each modelled capacitor.

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

(19) Organisation Mondiale de la  
Propriété Intellectuelle  
Bureau international

WIPO | PCT



(10) Numéro de publication internationale

WO 2017/021642 A1

(51) Classification internationale des brevets :  
H02M 7/483 (2007.01)(21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/FR2016/051993(22) Date de dépôt international :  
29 juillet 2016 (29.07.2016)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :  
1557501 3 août 2015 (03.08.2015) FR

(71) Déposants : SUPERGRID INSTITUTE [FR/FR]; 130 rue Léon Blum, 69100 Villeurbanne (FR). INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON [FR/FR]; 20 avenue Albert Einstein, 69621 Villeurbanne Cedex (FR). CENTRALESUPELEC [FR/FR]; 3 rue Joliot-Curie, 91190 Gif-sur-Yvette (FR).

(72) Inventeurs : SHINODA, Kosei; 11 Place Croix Paquet, 69001 Lyon (FR). BENCHAI, Abdelkrim; 65 Boulevard Vauban, 78180 Montigny Le Bretonneux (FR). GUILLAUD, Xavier; 5 rue de la Fraternité, 59830 Bachy (FR). DAI, Jing; c/o Centralesupelec, Plateau de Moulon, 3 rue Joliot-Curie, 91190 Gif-sur-Yvette (FR).

(74) Mandataire : BALESTA, Pierre; Cabinet Beau De Lomenie, Immeuble Eurocentre, 179 Boulevard de Turin, 59777 Lille (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

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

Publiée :

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

(54) Title : VIRTUAL CAPACITANCE

(54) Titre : CAPACITE VIRTUELLE

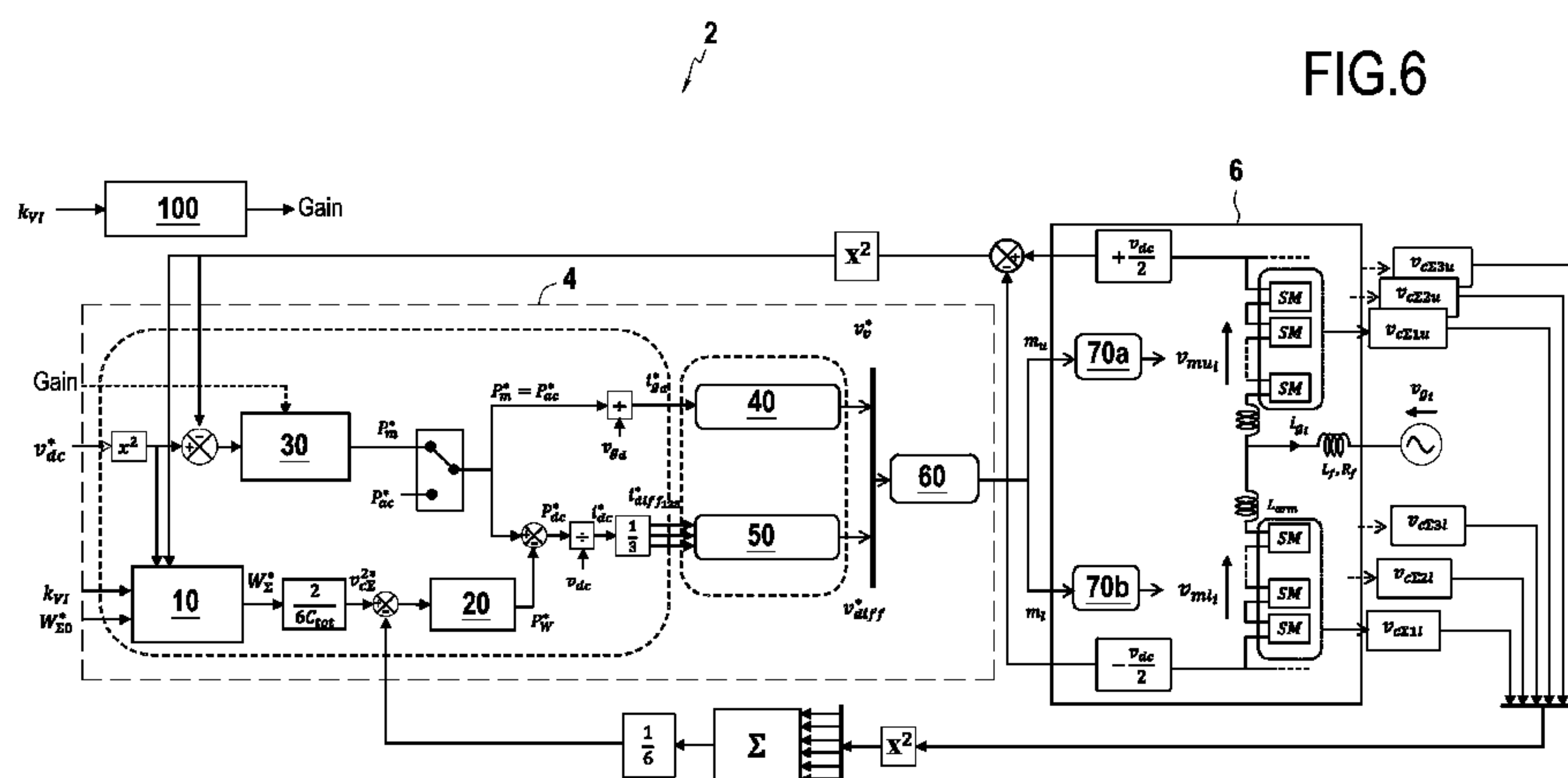


FIG.6

(57) Abstract : The invention relates to a modular multi-level converter (2) provided with a control module (4) and a calculator (10) for calculating a set value for the internal energy of the converter, stored in the capacitances of the sub-modules of the half-arms. The control module is designed to deduce, from said set value for the internal energy of the converter, a set value for the voltage at the terminals of each modelled capacitor used to regulate the voltage at the points of connection of the converter to the continuous power supply network and the voltage at the terminals of each modelled capacitor.

(57) Abrégé : L'invention concerne un convertisseur modulaire multi-niveaux (2) muni d'un module de contrôle (4) et d'un calculateur (10) d'une consigne d'énergie interne du convertisseur stockée dans les capacités des sous-modules des demi-bras. Le module de contrôle est configuré pour déduire de cette consigne d'énergie interne du convertisseur une consigne de tension aux bornes de chaque condensateur modélisé utilisée pour réguler la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu et la tension aux bornes de chaque condensateur modélisé.



WO 2017/021642 A1



## CAPACITE VIRTUELLE

### Arrière-plan de l'invention

La présente invention concerne le domaine technique des  
5 convertisseurs modulaires multi-niveaux (MMC) assurant la conversion d'un  
courant alternatif en un courant continu et inversement.

Elle concerne plus précisément les réseaux de transport haute tension  
à courant continu (HVDC) utilisant un courant continu pour la transmission  
de l'énergie électrique et dans lesquels des stations intègrent des  
10 convertisseurs modulaires multi-niveaux.

Sur la figure **1**, on a représenté de manière schématique un ensemble  
de sous-modules **6** d'un convertisseur modulaire multi-niveaux **2** selon la  
technique antérieure. Ce convertisseur **2** comporte, pour un courant triphasé  
d'entrée/sortie (comportant trois phases  $\varphi_a$ ,  $\varphi_b$ , et  $\varphi_c$ ), trois bras de  
15 conversion qui sont référencés par les indices a, b et c sur les différents  
composants de la figure **1**. Chaque bras de conversion comprend un demi-  
bras supérieur et un demi-bras inférieur (indiqués par les indices « u »  
supérieur et « l » pour inférieur), dont chacun relie une borne DC+ ou DC-  
du réseau d'alimentation électrique continu (DC) à une borne du réseau  
20 d'alimentation électrique alternatif (AC). En particulier, chacun des bras est  
connecté à une des trois lignes de phase  $\varphi_a$ ,  $\varphi_b$ , ou  $\varphi_c$  du réseau  
d'alimentation électrique alternatif. Il est à noter que les termes « bras » et  
« demi-bras » sont traduits en anglais respectivement par « leg » et « arm ».  
La figure **1** représente un ensemble de sous-module **6**, dans lequel chaque  
25 demi-bras comprend une pluralité de sous-modules  $SM_{xij}$  qui peuvent être  
commandés suivant une séquence souhaitée (avec x indiquant si le demi-  
bras est supérieur ou inférieur, i indiquant le bras, et j le numéro du sous-  
module dans les sous-modules en série dans le bras). Ici, seuls trois sous-  
modules ont été représentés par demi-bras. En pratique, chaque demi-bras  
30 inférieur ou supérieur peut comporter un nombre N de quelques dizaines à  
quelques centaines de sous-modules. Chaque sous-module  $SM_{xij}$  comporte

un système de stockage d'énergie tel qu'au moins un condensateur et un organe de commande pour connecter sélectivement ce condensateur en série entre les bornes du sous-module ou pour le contourner. Les sous-modules sont commandés selon une séquence choisie pour faire varier  
 5 progressivement le nombre d'éléments de stockage d'énergie qui sont connectés en série dans un demi-bras du convertisseur **2** de façon à fournir plusieurs niveaux de tension. En outre, sur la figure **1**,  $v_{dc}$  désigne la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu, ces points étant visés par l'expression anglo-saxonne « PCC : Point of  
 10 Common Coupling », bien connue de l'homme du métier.  $i_{dc}$  désigne le courant du réseau d'alimentation électrique continu, tandis que des courants  $i_{ga}$ ,  $i_{gb}$  et  $i_{gc}$  traversent les trois lignes de phase  $\varphi_a$ ,  $\varphi_b$ , et  $\varphi_c$ . De plus, chaque demi-bras possède une inductance  $L_{arm}$  et chaque ligne de phase comporte une inductance  $L_f$  et une résistance  $R_f$ .

15 La figure **2** illustre un sous-module  $SM_{xij}$  selon l'art antérieur appartenant au convertisseur de la figure **1**. Dans ce sous-module, chaque organe de commande comporte un premier élément de commutation électronique T1 tel qu'un transistor bipolaire à grille isolée (« IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor » en langue anglaise) connecté en série  
 20 avec un élément de stockage d'une énergie électrique, ici un condensateur  $C_{SM}$ . Ce premier élément de commutation T1 et ce condensateur  $C_{SM}$  sont montés en parallèle d'un deuxième élément de commutation électronique T2, également un transistor bipolaire à grille isolée (IGBT). Ce deuxième élément de commutation T2 est couplé entre les bornes d'entrée et de sortie du sous-  
 25 module  $SM_{xij}$ . Les premier et deuxième éléments de commutation T1 et T2 ont chacun une diode antiparallèle représentée sur la figure **2**.

En fonctionnement, le sous-module peut être commandé dans deux états de commande.

Dans un premier état dit état « on » ou commandé, le premier  
 30 élément de commutation T1 est ouvert, et le deuxième élément de commutation T2 est fermé, pour connecter l'élément de stockage d'énergie



$C_{SM}$  en série avec les autres sous-modules. Dans un deuxième état dit état « off » ou non-commandé, le premier élément de commutation T1 est fermé, et le deuxième élément de commutation T2 est ouvert de sorte à court-circuiter l'élément de stockage d'énergie.

5 Il est connu que chaque demi-bras, ayant une tension  $v_m$  à ses bornes, peut être modélisé par une source de tension modélisée, ayant une tension  $v_m$  à ses bornes, dont le rapport cyclique dépend du nombre de sous-modules commandés et par un condensateur  $C_{tot}$  modélisé connecté à la source de tension. Cette modélisation a été schématisée en figure **3**, sur  
10 laquelle on voit un demi-bras et la modélisation obtenue. L'inverse de la valeur de la capacité du condensateur modélisé  $C_{tot}$  est égale à la somme des inverses des capacités des sous-modules commandés, de sorte que :

$$\frac{1}{C_{tot}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}$$

où  $C_1, C_2, \dots, C_N$  sont les capacités du  $j^{\text{ème}}$  condensateur.

Ainsi, la tension  $v_{c\Sigma}$  aux bornes du condensateur  $C_{tot}$  modélisé est  
15 égale à la somme des tensions  $v_{cj}$  aux bornes des condensateurs des sous-modules dans le demi-bras (avec j allant de 1 à N et indiquant le numéro du condensateur et donc du sous-module). Dans la présente demande, par abus de langage,  $C_{tot}$  désigne à la fois le condensateur et sa valeur de capacité. En contrôlant la séquence de commande des sous-modules pour faire varier  
20 progressivement le nombre d'éléments de stockage d'énergie connectés en série, l'énergie du condensateur  $C_{tot}$  modélisé et donc la tension aux bornes de chaque source de tension modélisée peuvent être diminuées ou augmentées.

Dans l'art antérieur, on trouve donc une configuration équivalente de  
25 l'ensemble **6** des sous-modules du convertisseur MMC illustrée en figure **4**. Sur cette figure, le convertisseur est un convertisseur analogue à celui décrit en référence à la figure **1**, et dans lequel chaque demi-bras a été remplacé par sa modélisation. En outre, chaque ligne de phase est associée à un courant  $i_{gi}$  et une tension  $v_{gi}$  (i indiquant le numéro du bras).

Ici, chacune des sources de tension modélisées comporte en ses bornes une tension  $v_{mxi}$  et chaque condensateur modélisé  $C_{tot}$  comporte en ses bornes une tension  $v_{c\Sigma xi}$  (avec x indiquant si le demi-bras est supérieur ou inférieur et i indiquant le numéro du bras). On peut par ailleurs noter qu'il est possible de décomposer le convertisseur MMC en une partie alternative  
5 imaginaire et une partie continue imaginaire (en entrée ou en sortie, suivant que le convertisseur est configuré pour convertir une énergie alternative en énergie continue ou l'inverse), où l'évolution de l'énergie totale stockée dans les condensateurs des sous-modules est égale à la différence entre la  
10 puissance entrant dans le convertisseur et la puissance sortante.

Il est connu des convertisseurs de type « Voltage Source Converter » (bien connus de l'homme du métier sous l'acronyme « VSC »), possédant un condensateur de station connecté en parallèle du réseau d'alimentation électrique continu. L'inconvénient d'un tel condensateur en parallèle est qu'il  
15 ne permet pas un découplage du convertisseur avec la tension du réseau d'alimentation électrique continu. De plus ce type de convertisseur nécessite l'utilisation de nombreux filtres pour obtenir des signaux convertis convenables.

En outre, l'inertie du réseau d'alimentation électrique continu dépend  
20 de sa capacité, de sorte qu'une grande capacité augmente l'inertie du réseau d'alimentation électrique continu. Ainsi, une grande capacité du réseau et donc une grande inertie lui permet de mieux résister aux perturbations. Inversement, une faible capacité de réseau, et donc une faible inertie permet de réguler plus facilement et plus précisément la tension aux points de  
25 connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu.

Or, contrairement aux convertisseurs de type Voltage Source Converter, les convertisseurs MMC ne comportent pas de condensateur de station connecté en parallèle et pouvant influencer sur la stabilité du réseau d'alimentation électrique continu. Les convertisseurs modulaires multiniveaux  
30 présentent donc l'avantage d'offrir un découplage entre la tension totale des condensateurs des sous-modules et la tension du réseau d'alimentation



électrique continu. Néanmoins, une simple variation de puissance pourrait mener à une grande variation de tension du réseau d'alimentation électrique continu.

On connaît des convertisseurs MMC dont le contrôle n'est pas basé sur l'énergie (« Non Energy Based Control » en langue anglaise). Dans ces convertisseurs, lorsqu'un éventuel écart de tension apparaît entre la tension des condensateurs des demi-bras et la tension du réseau d'alimentation électrique continu, la puissance du réseau d'alimentation électrique continu entrante varie automatiquement pour corriger ledit écart de tension. Ce contrôle s'effectue sans régulateur supplémentaire puisque les échanges d'énergies avec les condensateurs des demi-bras suivent les variations de tension sur le réseau d'alimentation électrique continu.

Toutefois, toutes les variables de ce type de convertisseurs ne sont pas contrôlées, ce qui se traduit par un manque de robustesse du convertisseur.

Il est également connu des convertisseurs dont le contrôle est basé sur l'énergie. On connaît notamment le document intitulé « Control of DC bus voltage with a Modular Multilevel Converter » (Samimi et al., conférence PowerTech, 2015), qui présente un convertisseur modulaire multi-niveaux comportant un système de contrôle des transferts de puissance au niveau de la partie alternative, des transferts de puissance au niveau de la partie continue et de l'énergie interne du convertisseur. Un tel convertisseur utilise un contrôle basé sur l'énergie (« Energy Based Control » en langue anglaise) : un contrôle des variables de courant des réseaux d'alimentation électrique continu et alternatif permet de contrôler les puissances de ces deux réseaux respectifs. Une différence entre les puissances des réseaux d'alimentation électrique continu et alternatif entraîne une diminution ou une augmentation de l'énergie stockée dans les condensateurs des sous-modules. Ce type de convertisseurs nuit toutefois au découplage entre les tensions aux bornes des condensateurs des sous-modules et la tension du réseau d'alimentation électrique continu. De plus, il ne permet pas de

s'adapter efficacement et en temps réel aux fluctuations de tensions sur le réseau d'alimentation électrique continu.

De plus, les convertisseurs connus ne sont pas suffisamment robustes, en particulier en ce qui concerne la contribution à la la stabilité du réseau d'alimentation électrique continu.

En particulier, le contrôle de l'énergie interne est un degré de liberté supplémentaire, or aucune technique existante ne propose de solution pour réguler efficacement l'énergie interne du convertisseur.

Les solutions existantes ne permettent pas d'exploiter pleinement les capacités des convertisseurs MMC en termes de contrôle de l'énergie interne du convertisseur conjointement au contrôle de la stabilité du réseau DC.

#### Objet et résumé de l'invention

Un but de la présente invention est de proposer un convertisseur modulaire multi-niveaux (MMC) muni d'un module de contrôle du convertisseur qui permette d'exploiter pleinement le potentiel du convertisseur MMC en offrant une meilleure interaction entre l'énergie interne du convertisseur, stockée dans les capacités des sous-modules, et la tension du réseau d'alimentation électrique continu. Un autre intérêt du convertisseur est de permettre au convertisseur d'agir plus efficacement sur l'inertie du réseau d'alimentation électrique continu.

Pour ce faire, l'invention porte sur un convertisseur de tension modulaire multi-niveaux, permettant de convertir une tension alternative en une tension continue et inversement, comportant une partie dite continue destinée à être reliée à un réseau d'alimentation électrique continu et une partie dite alternative destinée à être reliée à un réseau d'alimentation électrique alternatif, le convertisseur comportant une pluralité de bras, chaque bras comportant un demi-bras supérieur et un demi-bras inférieur, chaque demi-bras comprenant une pluralité de sous-modules commandables individuellement par un organe de commande propre à chaque sous-module et chaque sous-module comprend un condensateur connectable en série



dans le demi-bras lorsque l'organe de commande du sous-module est dans un état commandé, chaque demi-bras pouvant être modélisé par une source de tension modélisée associée à un rapport cyclique dépendant d'un nombre de condensateurs mis en série dans le demi-bras, chaque source de tension  
5 modélisée étant associée en parallèle à un condensateur modélisé (correspondant à une capacité totale du demi-bras).

Le convertisseur comprend en outre un module de contrôle du convertisseur configuré pour réguler la tension aux bornes de chaque condensateur modélisé de chaque bras et pour réguler la tension aux points  
10 de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu en commandant lesdits organes de commande des sous-modules du convertisseur.

Selon une caractéristique générale du convertisseur, le module de contrôle du convertisseur comprend un calculateur d'une consigne d'énergie  
15 interne du convertisseur stockée dans les capacités des sous-modules des demi-bras par application d'une fonction ayant un paramètre d'entrée réglable, le module de contrôle étant configuré pour déduire de cette consigne d'énergie une consigne de tension aux bornes de chaque condensateur modélisé utilisée pour réguler la tension aux points de  
20 connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu et la tension aux bornes de chaque condensateur modélisé.

Le paramètre d'entrée du calculateur peut être réglé à tout moment et de manière aisée par l'utilisateur. La consigne d'énergie interne du convertisseur dépendant du paramètre d'entrée, il est possible pour  
25 l'utilisateur d'agir directement sur le degré de contribution de l'énergie interne à la stabilité du réseau d'alimentation électrique continu.

L'utilisateur peut donc ajuster le paramètre d'entrée en fonction des perturbations du réseau d'alimentation électrique continu et augmenter ou diminuer l'inertie du réseau en fonction des besoins.

30 De manière non limitative, la contribution sur le réseau d'alimentation électrique du convertisseur modulaire multi-niveaux, dont le module de

contrôle est muni d'un tel calculateur, est équivalente à celle d'un condensateur virtuel disposé en parallèle du réseau d'alimentation électrique continu. En réglant le paramètre d'entrée réglable du calculateur on fait virtuellement varier la capacité du condensateur virtuel. L'intérêt est de  
5 pouvoir agir sur le réseau d'alimentation électrique continu tout en maintenant le découplage entre la tension totale des condensateurs des sous-modules et la tension du réseau d'alimentation électrique continu.

Contrairement à un condensateur réellement placé en parallèle du réseau d'alimentation électrique continu, le condensateur virtuel permet de  
10 stabiliser le réseau, n'a pas de coût et ne peut pas être dégradé. En particulier, un condensateur virtuel réglable peut prendre des valeurs de capacités très élevées, ce qui n'est pas matériellement possible pour un condensateur réel.

Contrairement au convertisseur MMC du document intitulé « Control of  
15 DC bus voltage with a Modular Multilevel Converter », la capacité du condensateur virtuel est réglable au moyen du paramètre réglable. En effet, dans ce document de l'art antérieur, le convertisseur se comporte comme si six condensateurs étaient disposés en parallèle du réseau d'alimentation électrique continu et la valeur de la capacité de ces condensateurs ne peut  
20 pas être réglée. Le convertisseur selon l'invention offre donc un meilleur découplage entre les tensions aux bornes des condensateurs des sous-modules et la tension du réseau d'alimentation électrique continu. De plus, il permet de s'adapter en temps réel aux fluctuations de tensions sur le réseau d'alimentation électrique continu.

25 De préférence, les sous-modules sont commandés aux moyens de deux transistors bipolaires à grille isolée (IGBT) permettant de placer ou non en série le condensateur dudit sous-module dans le demi-bras associé suivant que l'on souhaite commander le sous-module dans l'état commandé « on » ou dans l'état non-commandé « off ».

30 Chaque demi-bras peut être modélisé par une source de tension modélisée associée en parallèle à un condensateur modélisé de capacité  $C_{tot}$ .



On notera  $v_{c\Sigma}$  la somme des tensions des condensateurs des sous-modules d'un demi-bras, de sorte que la tension aux bornes du condensateur modélisé associé en parallèle à la source de tension modélisée vaut  $v_{c\Sigma}$ .

De préférence, le rapport cyclique  $\alpha$ , associé à la source de tension modélisée, est calculé d'après l'expression :

$$\alpha = \frac{n}{N}$$

où  $n$  est le nombre de sous-modules connectés à l'état « on » dans le demi-bras associé et  $N$  est le nombre de sous-modules dans le demi-bras.

En régulant conjointement la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu et la tension aux bornes de chaque condensateur modélisé, et donc l'énergie interne du convertisseur, on peut agir sur la stabilité du réseau d'alimentation électrique continu.

Ceci permet de contenir d'éventuelles perturbations en puissance apparaissant soudainement sur le réseau d'alimentation électrique continu et qui pourraient entraîner d'importantes variations de tension sur ledit réseau.

De manière non limitative, la régulation conjointe de la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu et de la tension aux bornes de chaque condensateur modélisé peut se faire par asservissement en boucle fermée de ces grandeurs au moyen de valeurs de consignes, notamment une consigne de tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu. Le module de contrôle est dit « lent » par opposition avec d'autres organes de commande qu'il permet de commander et dont les temps de commutation sont très courts.

En outre, la consigne de tension  $v_{c\Sigma}^*$  aux bornes de chaque condensateur modélisé, élevée au carré, est proportionnelle à la consigne d'énergie interne  $W_{\Sigma}^*$  délivrée par le calculateur d'après l'expression :

$$v_{c\Sigma}^{2*} = \frac{2W_{\Sigma}^*}{6C_{tot}}$$

Ladite consigne d'énergie interne du convertisseur et donc ladite consigne de tension aux bornes de chaque condensateur, élevée au carré, permettent d'asservir la tension du réseau d'alimentation électrique continu et la tension aux bornes de chaque condensateur modélisé.

5 De manière avantageuse, le paramètre d'entrée réglable est un coefficient d'inertie virtuelle réglable  $k_{VI}$ . Modifier  $k_{VI}$  revient ainsi à modifier virtuellement la taille de la capacité du condensateur virtuel et ainsi contribuer à la stabilité du réseau d'alimentation électrique continu. L'avantage est de proposer un degré de liberté supplémentaire dans le  
10 contrôle de l'énergie interne du convertisseur MMC. La capacité du condensateur virtuel peut notamment prendre des valeurs très élevées et ce sans contraintes matérielles supplémentaires.

Préférentiellement, le calculateur est configuré pour calculer la consigne d'énergie interne  $W_{\Sigma}^*$  du convertisseur selon la fonction:

$$15 \quad W_{\Sigma}^* = \frac{1}{2} 6C_{tot} k_{VI} (v_{dc}^2 - v_{dc0}^2) + W_{\Sigma 0}^*$$

où  $C_{tot}$  est une capacité totale du condensateur modélisé,  $v_{dc}$  est une tension mesurée du réseau d'alimentation électrique continu,  $v_{dc0}$  est une valeur nominale de la tension du réseau d'alimentation électrique continu et  $W_{\Sigma 0}^*$  est une consigne nominale de la valeur de l'énergie stockée dans les  
20 condensateurs du convertisseur.

On comprend que la capacité  $C_{VI}$  du condensateur virtuel s'exprime :

$$C_{VI} = 6C_{tot} k_{VI}$$

En outre, le terme  $(v_{dc}^2 - v_{dc0}^2)$  représente un écart de tension sur le réseau d'alimentation électrique continu, traduisant une perturbation en tension. On remarque donc qu'en agissant sur le coefficient d'inertie virtuelle  
25 réglable  $k_{VI}$ , on parvient à agir sur la variation de la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu.

De préférence, le module de contrôle comporte un régulateur de l'énergie interne du convertisseur ayant en entrée le résultat d'une comparaison entre ladite consigne de tension aux bornes de chaque



condensateur modélisé, élevée au carré, et une moyenne du carré des tensions aux bornes des condensateurs modélisés, et délivrant une consigne de puissance pour les condensateurs dudit convertisseur.

Grâce au régulateur de l'énergie interne on peut donc asservir la tension aux bornes de chaque condensateur modélisé, élevée au carré, à partir d'une valeur de consigne de cette tension. La tension aux bornes de chaque condensateur modélisé, élevée au carré, étant proportionnelle à l'énergie interne du convertisseur stockée dans les condensateurs des sous-modules des demi-bras, on asservit donc la tension aux bornes de chaque condensateur modélisé à partir de la consigne d'énergie interne du convertisseur stockée dans les condensateurs des sous-modules des demi-bras fournie par le calculateur.

Avantageusement, le module de contrôle est configuré pour effectuer un changement de variable afin de contrôler des variables intermédiaires de courant  $i_{diff}$  et  $i_{gd}$  et de tension  $v_{diff}$  et  $v_{gd}$ , où  $i_{diff}$  et  $v_{diff}$  sont associées au réseau d'alimentation électrique continu et  $i_{gd}$  et  $v_{gd}$  sont associées au réseau d'alimentation électrique alternatif.

Les variables intermédiaires de courant  $i_{diff}$  et  $i_{gd}$  peuvent être contrôlée indépendamment.

De manière non limitative, dans le cas d'un convertisseur d'énergie continue en énergie alternative, ces variables permettent d'exprimer la variation d'énergie interne du convertisseur sous la forme :

$$\frac{dW_{\Sigma}}{dt} = \sum_{i=1}^3 2i_{diff_i} v_{diff} - i_{gd} v_{gd}$$

Cette expression traduit notamment la décomposition du convertisseur MMC en une partie imaginaire continue en entrée, reliée au réseau continu et associée au terme  $\sum_{i=1}^3 2i_{diff_i} v_{diff}$  qui correspond à la puissance de la partie continue et une partie imaginaire alternative en sortie, reliée au réseau alternatif et associée au terme  $i_{gd} v_{gd}$  qui correspond à la puissance de la partie alternative.

De préférence, le module de contrôle comporte un régulateur du courant  $i_{gd}$  ayant en entrée une consigne  $i_{gd}^*$  correspondant au courant  $i_{gd}$ .

Le régulateur asservit le courant  $i_{gd}$  en le faisant tendre vers sa consigne  $i_{gd}^*$ .

La régulation de la variable  $i_{gd}$  revient à réguler les transferts de puissance

5 alternative en entrée ou en sortie suivant la configuration du convertisseur.

Préférentiellement, le module de contrôle comporte un régulateur du courant  $i_{diff}$  ayant en entrée une consigne  $i_{diff}^*$  correspondant au courant  $i_{diff}$ .

Le régulateur asservit le courant  $i_{diff}$  en le faisant tendre vers sa consigne  $i_{diff}^*$ . La régulation de la variable  $i_{diff}$  revient à réguler les transferts de

10 puissance continue en entrée ou en sortie suivant la configuration du convertisseur.

De manière non limitative, les variables  $i_{gd}$  et  $i_{diff}$  peuvent être contrôlées indépendamment. On comprend alors que réguler  $i_{gd}$  et  $i_{diff}$  permet

de réguler les transferts de puissances entrante et sortante, et ainsi contrôler

15 l'énergie interne du convertisseur stockée dans les condensateurs des sous-modules.

Selon un aspect particulièrement avantageux de l'invention, le module

de contrôle comporte un régulateur de la tension aux points de connexion du

convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu ayant en entrée le

20 résultat d'une comparaison entre une consigne de tension aux points de

connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu,

élevée au carré, et une valeur prélevée sur le réseau d'alimentation

électrique continu également élevée au carré, et délivrant une consigne de

puissance de fonctionnement dudit convertisseur.

25 Grâce à ce régulateur, on peut donc asservir la tension aux points de

connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu  $V_{dc}$

en faisant tendre sa valeur, élevée au carré, vers la consigne de tension aux

points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique

continu  $v_{dc}^*$ , élevée au carré.

30 De préférence, le module de contrôle comporte un organe pour

ajuster le gain du régulateur de la tension aux points de connexion du



convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu, en fonction de la  
 valeur du coefficient d'inertie virtuelle  $k_{VI}$ . En effet, lorsque l'on règle le  
 coefficient d'inertie virtuelle  $k_{VI}$ , afin de modifier le degré de contribution de  
 l'énergie interne du convertisseur sur la stabilité du réseau d'alimentation  
 5 électrique continu, on modifie l'inertie globale du convertisseur MMC. Ceci a  
 pour conséquence de dérégler le fonctionnement du régulateur de la tension  
 aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique  
 continu.

En particulier, le réglage du coefficient d'inertie virtuelle a pour  
 10 conséquence de modifier une constante de temps  $\tau$  associée audit régulateur  
 de la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau  
 d'alimentation électrique continu. L'organe pour ajuster le gain du régulateur  
 de la tension permet donc de corriger les écarts sur la constante de temps et  
 sur le gain du régulateur de tension, introduits par la modification du  
 15 coefficient d'inertie virtuelle  $k_{VI}$ , de manière à calibrer ledit régulateur de  
 tension.

En outre, l'organe pour ajuster le gain du régulateur de tension aux  
 points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique  
 continu reçoit en entrée le coefficient d'inertie virtuelle  $k_{VI}$  de manière à  
 20 ajuster le gain en temps réel, en fonction des modifications faites sur le  $k_{VI}$ .

De manière avantageuse, le module de contrôle comporte un limiteur  
 de l'énergie interne du convertisseur ayant en entrée l'énergie interne du  
 convertisseur, une consigne d'énergie interne maximale du convertisseur et  
 une consigne d'énergie interne minimale du convertisseur, et délivrant une  
 25 consigne de puissance de limitation.

L'intérêt est de pouvoir contenir l'énergie interne du convertisseur  
 entre les valeurs de consigne d'énergie interne maximale du convertisseur  
 $W_{\Sigma lim}^+$  et de consigne d'énergie interne minimale du convertisseur  $W_{\Sigma lim}^-$ ,  
 définies par l'opérateur. En maintenant l'énergie interne du convertisseur  
 30 entre ces valeurs de consignes maximales et minimale, on protège  
 notamment les éléments de commutation électronique, tels que les

transistors. Sans cette protection, les éléments de commutation peuvent être menacés par une trop forte tension aux bornes des condensateurs des sous-modules, tandis que de trop faibles tensions aux bornes des condensateurs des sous-modules pourraient nuire au fonctionnement du convertisseur MMC.

5           En particulier, la consigne de puissance de limitation délivrée par le limiteur s'ajoute à la consigne de puissance de fonctionnement du convertisseur pour donner la consigne de puissance du réseau d'alimentation électrique alternatif et ainsi réguler le niveau d'énergie interne du convertisseur. Toutefois, la puissance de limitation apparaît comme une  
10           perturbation sur le contrôle de l'énergie. C'est pourquoi il est nécessaire de corriger la consigne nominale de la valeur de l'énergie stockée dans les condensateurs du convertisseur qui est fournie au calculateur de la consigne d'énergie interne  $W_{\Sigma}^*$ , par exemple à l'aide d'un correcteur intégral.

          L'invention porte également sur un procédé de contrôle d'un  
15           convertisseur de tension modulaire multi-niveaux, le convertisseur permettant de convertir une tension alternative en une tension continue et inversement, et comportant une partie dite continue destinée à être reliée à un réseau d'alimentation électrique continu et une partie dite alternative destinée à être reliée à un réseau d'alimentation électrique alternatif, le  
20           convertisseur comportant une pluralité de bras, chaque bras comportant un demi-bras supérieur et un demi-bras inférieur, chaque demi-bras comprenant une pluralité de sous-modules commandables individuellement par un organe de commande du sous-module et comprenant un condensateur connecté en série dans le demi-bras dans un état commandé de l'organe de commande  
25           du sous-module, chaque demi-bras pouvant être modélisé par une source de tension modélisée associée à un rapport cyclique dépendant d'un nombre de condensateurs mis en série dans le demi-bras, chaque source de tension modélisée étant associée en parallèle à un condensateur modélisé correspondant à une capacité totale du demi-bras, le procédé comprenant en  
30           outre un contrôle lent du convertisseur dans lequel on régule la tension aux bornes de chaque condensateur modélisé de chaque bras et on régule la



tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu en commandant lesdits organes de commande des sous-modules du convertisseur.

De manière caractéristique le procédé comprend un calcul d'une  
 5 consigne d'énergie interne du convertisseur stockée dans les capacités des sous-modules des demi-bras en utilisant une fonction ayant un paramètre d'entrée réglable, et un calcul d'une consigne de tension aux bornes de chaque condensateur modélisé à partir de ladite consigne d'énergie interne du convertisseur, la consigne de tension aux bornes de chaque  
 10 convertisseurs modélisé étant utilisée pour réguler la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu et la tension aux bornes de chaque condensateur modélisé.

Selon une variante, le paramètre d'entrée réglable est un coefficient d'inertie virtuelle réglable  $k_{VI}$ .

15 Selon une variante, le calcul de la consigne d'énergie interne  $W_{\Sigma}^*$  du convertisseur est réalisé d'après la fonction:

$$W_{\Sigma}^* = \frac{1}{2} 6 C_{tot} k_{VI} (v_{dc}^2 - v_{dc0}^2) + W_{\Sigma 0}^*$$

où  $C_{tot}$  est la capacité totale du condensateur modélisé dans un demi bras,  $v_{dc}$  est la tension mesurée du réseau d'alimentation électrique continu,  
 20  $v_{dc0}$  est la valeur nominale de la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu et  $W_{\Sigma 0}^*$  est une consigne nominale de la valeur de l'énergie stockée dans les condensateurs du convertisseur.

Selon une variante, le procédé de contrôle comporte une régulation de  
 25 la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu en utilisant en entrée le résultat d'une comparaison entre une consigne de tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu, élevée au carré, et une valeur prélevée sur le réseau d'alimentation électrique continu également élevée au carré, et  
 30 délivre une consigne de puissance de fonctionnement dudit convertisseur.

Selon une variante, le procédé de contrôle comporte un ajustement du gain de régulation de la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu, en fonction de la valeur du coefficient d'inertie virtuelle.

- 5 Ce procédé peut mettre en œuvre les différents modes de réalisation du convertisseur tels que décrits ci-avant.

L'invention porte également sur un module de contrôle pour un convertisseur modulaire multi-niveaux tel que défini ci-avant, et comprenant un calculateur d'une consigne d'énergie interne du convertisseur stockée  
10 dans les capacités des sous-modules des demi-bras par application d'une fonction ayant un paramètre d'entrée réglable. En outre, le module de contrôle est configuré pour déduire de cette consigne d'énergie une consigne de tension aux bornes de chaque condensateur modélisé utilisée pour réguler la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau  
15 d'alimentation électrique continu et la tension aux bornes de chaque condensateur modélisé.

#### Brève description des dessins

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui suit  
20 d'un mode de réalisation de l'invention donné à titre d'exemple non limitatif, en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

- la figure **1**, déjà décrite, illustre un convertisseur modulaire multi-niveaux à trois phases selon la technique antérieure;
- la figure **2**, déjà décrite, illustre un sous-module d'un convertisseur  
25 modulaire multi-niveaux selon la technique antérieure ;
- la figure **3**, déjà décrite, illustre un circuit équivalent à un demi-bras d'un convertisseur MMC selon la technique antérieure ;
- la figure **4**, déjà décrite, montre une configuration équivalente d'un  
30 convertisseur modulaire multi-niveaux selon la technique antérieure;



- la figure **5** illustre une représentation équivalente et schématique d'un convertisseur modulaire multi-niveaux selon l'invention ;
- la figure **6** illustre un convertisseur modulaire multi-niveaux muni d'un module de contrôle selon l'invention ;
- 5 - la figure **7** montre un exemple d'implémentation de l'ajustement du régulateur de la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu ;
- la figure **8** montre une boucle simplifiée d'ajustement du régulateur de la tension aux points de connexion du convertisseur  
10 au réseau d'alimentation électrique continu ;
- la figure **9A** montre un échelon de puissance imposé sur un réseau alternatif pour la simulation du fonctionnement du convertisseur selon l'invention ;
- la figure **9B** illustre la réponse en tension d'un réseau continu à un  
15 échelon de puissance sur un réseau alternatif en fonction du temps pour différentes valeurs de  $k_{VI}$  ;
- la figure **9C** illustre la variation de l'énergie totale d'un convertisseur en réponse à un échelon de puissance sur un réseau alternatif, en fonction du temps, pour différentes valeurs de  $k_{VI}$  ;
- 20 - la figure **9D** illustre la réponse de la puissance d'un réseau continu à un échelon de puissance sur un réseau alternatif en fonction du temps pour différentes valeurs de  $k_{VI}$  ;
- la figure **10A** illustre la réponse en tension d'un réseau continu pour un premier système de simulation consistant en un  
25 convertisseur MMC comportant une capacité virtuelle selon l'invention et pour un second système de simulation consistant en un convertisseur selon la technique antérieure muni d'un condensateur réel en parallèle du réseau continu ;
- la figure **10B** montre les variations de l'énergie totale du  
30 convertisseur pour les deux systèmes de simulation ;

- la figure **10C** montre la réponse en puissance sur le réseau alternatif des deux systèmes de simulation ;
- la figure **10D** montre la réponse en puissance sur le réseau continu des deux systèmes de simulation ; et
- 5        - la figure **11** montre un convertisseur MMC selon l'invention dans lequel le module de contrôle est muni d'un limiteur de l'énergie interne du convertisseur.

### Description détaillée de l'invention

10        L'invention porte sur un convertisseur modulaire multi-niveaux muni d'un module de contrôle, dont un circuit du comportement équivalent est illustré en figure **5**. Sur cette figure, de manière non limitative, on a représenté un convertisseur MMC **2** d'énergie continue en énergie alternative. Dans cet exemple, on remarque que ce convertisseur **2** comporte

15        une partie alternative **2A**, reliée au réseau d'alimentation électrique alternatif **110**, en partie gauche du schéma. En partie droite du schéma, on voit que le convertisseur **2** comporte une partie continue **2C** reliée au réseau d'alimentation électrique continu **120**.

On peut voir qu'un condensateur virtuel  $C_{VI}$  de capacité réglable  $C_{VI}$

20        (par abus de langage et pour des raisons de simplicité, on utilise la même notation pour désigner le condensateur et sa capacité) est associé en parallèle avec le réseau d'alimentation électrique continu **2C**. Par virtuel, on entend que ce condensateur n'est pas réellement présent dans le convertisseur. Par contre, le module de contrôle selon l'invention permet

25        d'obtenir un fonctionnement de convertisseur analogue à celui d'un convertisseur équipé de ce condensateur virtuel : ce condensateur virtuel  $C_{VI}$  traduit le comportement du convertisseur **2** et de son module de contrôle **4** selon l'invention. En effet, en réglant un coefficient d'inertie virtuelle  $k_{VI}$ , on améliore la stabilité du réseau d'alimentation électrique continu **120** et le

30        comportement du convertisseur est analogue à celui d'un convertisseur dans



lequel un condensateur virtuel  $C_{VI}$  de capacité réglable  $C_{VI}$  est placé en parallèle du réseau d'alimentation électrique continu **120**.

Le schéma de la figure **5** illustre également les transferts de puissances entre le convertisseur **2** et les réseaux d'alimentation électrique continu et alternatif **120** et **110**. Ainsi,  $P_l$  est la puissance provenant d'autres stations du réseau d'alimentation électrique continu et symbolise une soudaine perturbation en puissance sur le réseau continu,  $P_{dc}$  est la puissance extraite du réseau d'alimentation électrique continu **120**,  $P_{ac}$  est la puissance transmise au réseau d'alimentation électrique alternatif **110**,  $P_c$  est la puissance absorbée par la capacité  $C_{dc}$  du réseau d'alimentation électrique continu **120**,  $P_m$  est la puissance de fonctionnement du convertisseur **2** et  $P_w$  peut être considérée comme la puissance absorbée par le condensateur virtuel  $C_{VI}$  de capacité réglable  $C_{VI}$ . En outre  $v_{dc}$  est la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu.

Dans le convertisseur MMC **2** selon l'invention, et contrairement à un convertisseur MMC de l'art antérieur, un surplus de la puissance du réseau d'alimentation électrique continu **120**, notée  $P_w$ , est absorbée par le condensateur virtuel  $C_{VI}$  et permet au convertisseur de stocker de l'énergie interne  $W_\Sigma$ .

L'exemple de la figure **6** illustre un convertisseur modulaire multi-niveaux **2** muni d'un module de contrôle **4** selon l'invention. Le convertisseur MMC est configuré pour réguler, par asservissement en boucle fermée, la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu **120**  $v_{dc}$  et la tension  $v_{c\Sigma}$  aux bornes de chaque condensateur modélisé.

Le module de contrôle **4** comporte un calculateur **10** qui calcule une consigne d'énergie interne  $W_\Sigma^*$  du convertisseur **2** stockée dans les capacités des sous-modules des demi-bras à partir d'un coefficient d'inertie virtuelle réglable  $k_{VI}$ , d'une consigne nominale de la valeur de l'énergie stockée dans les condensateurs du convertisseur  $W_{\Sigma 0}^*$ , d'une tension mesurée du réseau

d'alimentation électrique continu  $v_{dc}$  et d'une valeur nominale de la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu  $v_{dc0}$ .

D'après le schéma de la figure **5**, on constate que :

$$5 \quad P_l - P_{dc} = P_c = \frac{dW_{dc}}{dt} = \frac{1}{2} C_{dc} \frac{dv_{dc}^2}{dt}$$

où  $W_{dc}$  est l'énergie du réseau d'alimentation électrique continu.

Toujours sur la figure **5**, en supposant que  $P_m$  est égal à  $P_{ac}$ , on constate également que :

$$P_{dc} - P_{ac} = P_W = P_{dc} - P_m = \frac{dW_{\Sigma}}{dt} = \frac{1}{2} 6C_{tot} \frac{dv_{c\Sigma}^2}{dt}$$

10 où  $C_{tot}$  est la capacité du condensateur modélisé dans un demi bras.

En combinant les deux équations précédentes on parvient à l'expression suivante :

$$P_l - P_m = P_c + P_W = \frac{1}{2} C_{dc} \frac{dv_{dc}^2}{dt} + \frac{dW_{\Sigma}}{dt}$$

Cette expression montre notamment qu'en contrôlant l'énergie interne  
15  $W_{\Sigma}$  du convertisseur MMC, on peut distribuer la puissance  $P_l - P_m$  entre la capacité  $C_{dc}$  du réseau d'alimentation électrique continu et les capacités des sous-modules des demis-bras.

Le calculateur permet de calculer la consigne d'énergie interne  $W_{\Sigma}^*$  appropriée d'après la fonction :

$$20 \quad W_{\Sigma}^* = \frac{1}{2} 6C_{tot} k_{VI} (v_{dc}^2 - v_{dc0}^2) + W_{\Sigma0}^*$$

Ladite consigne d'énergie interne  $W_{\Sigma}^*$  du convertisseur permet de fournir une consigne de tension  $v_{c\Sigma}^*$  aux bornes de chaque condensateur modélisé. Cette consigne de tension  $v_{c\Sigma}^*$  aux bornes de chaque condensateur modélisé, élevée au carré, est elle-même comparée à une moyenne du carré  
25 des tensions aux bornes des condensateurs modélisés.

Sans sortir du cadre de l'invention, la moyenne peut être calculée de n'importe quelle manière. Dans l'exemple non limitatif illustré en figure **6**, la moyenne est calculée comme étant la somme des carrés des tensions des condensateurs modélisés dans chaque demi-bras, divisée par six (le



convertisseur comportant six demi-bras). Ladite comparaison est fournie à un régulateur de l'énergie interne du convertisseur **20** qui délivre une consigne de puissance  $P_w^*$  pour les condensateurs dudit convertisseur **2**.

En outre, en considérant que la régulation de l'énergie est  
5 suffisamment rapide, on obtient :

$$P_l - P_m = P_c + P_w = \frac{1}{2} C_{dc} \frac{dv_{dc}^2}{dt} + \frac{1}{2} 6C_{tot} k_{VI} \frac{dv_{dc}^2}{dt}$$

ou encore :

$$P_l - P_m = \frac{1}{2} (C_{dc} + C_{VI}) \frac{dv_{dc}^2}{dt}$$

On peut donc exprimer le coefficient d'inertie virtuelle  $k_{VI}$  sous la  
10 forme :

$$C_{VI} = 6C_{tot} k_{VI}$$

Cette expression montre qu'en réglant le coefficient d'inertie virtuelle  $k_{VI}$  on parvient à modifier la valeur de la capacité virtuelle  $C_{VI}$ .

Sur la figure **6**, on remarque également que le module de contrôle **4**  
15 comprend un régulateur **30** de la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu **120**, ayant en entrée le résultat d'une comparaison entre une consigne de tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu  $v_{dc}^*$ , élevée au carré, et une valeur prélevée sur le réseau  
20 d'alimentation électrique continu  $v_{dc}$ , également élevée au carré. Le régulateur **30** de la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu **120** délivre une consigne de puissance de fonctionnement  $P_m^*$  dudit convertisseur **2**.

En outre, le module de contrôle **4** comporte un régulateur du courant  
25 alternatif  $i_{gd}$  **40** ayant en entrée une consigne  $i_{gd}^*$ , et un régulateur du courant  $i_{diff}$  **50** ayant en entrée une consigne  $i_{diff}^*$ .

D'après la figure **3**, on sait qu'il est possible de modéliser les sous-  
modules d'un demi-bras par une source de tension modélisée associées en  
parallèle à un condensateur modélisé de sorte que les sources de tensions  
30 modélisées ont à leurs bornes une tension  $v_{mxi}$  (avec x indiquant si le demi-

bras est supérieur ou inférieur et  $i$  indiquant le bras). Les régulateurs de courant **40** et **50** délivrent des consignes de tension  $v_{diff}^*$  et  $v_v^*$  utilisés suite à un changement de variable, par un organe de modulation **60** et deux organes d'équilibrage **70a** et **70b** au moyen d'un algorithme de contrôle  
 5 (« BCA : Balancing Control Algorithm » en langue anglaise), pour délivrer les tensions  $v_{mxi}$  aux bornes des sources de tensions modélisées. Ceci permet de commander ou non les sous-modules des demi-bras. On contrôle ainsi la tension aux bornes des condensateurs modélisés  $v_{c\sum i}$  ainsi que la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique  
 10 continu  $v_{dc}$ .

En faisant varier le coefficient d'inertie virtuelle  $k_{VI}$  en entrée du calculateur on peut donc influencer directement sur la tension du réseau d'alimentation électrique continu  $v_{dc}$  et sur l'inertie de ce réseau continu.

Dans cet exemple non limitatif, le module de contrôle **4** comporte  
 15 également un organe **100** pour ajuster le gain du régulateur de la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu **120**, en fonction de la valeur du coefficient d'inertie virtuelle  $k_{VI}$ . Cet organe a, pour des raisons de simplicité, été représenté à l'extérieur du module de contrôle **4**, bien qu'il soit compris dans ce module de contrôle **4**.

20 La figure **7** présente un exemple d'ajustement du régulateur de la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu  $v_{dc}$  à l'aide d'un correcteur Proportionnel Intégral (**PI**) sur les boucles d'asservissement de  $v_{dc}$  et de  $W_\Sigma$ . Dans cet exemple non limitatif, le correcteur PI est ajusté par une méthode classique de placement des  
 25 pôles.

Ce circuit comporte notamment des boucles **42** et **52** de régulation des courants  $i_{diff}$  et  $i_{gd}$  vers leurs consignes respectives  $i_{diff}^*$  et  $i_{gd}^*$ .

Par simplification, on peut obtenir une représentation équivalente de la boucle de régulation de la tension aux points de connexion du  
 30 convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu **120** avec ajustement du régulateur de ladite tension aux points de connexion du



convertisseur au réseau continu à l'aide d'un correcteur PI. Une telle représentation est donnée en figure **8**.

Les figures **9A** à **9D** montrent les résultats d'une simulation du comportement d'un convertisseur modulaire multi-niveaux **2** muni d'un module de contrôle **4** selon l'invention et en particulier une simulation par contrôle de la puissance. Dans cette simulation, on a créé un système de test dans lequel la partie continue du convertisseur est connectée à une source de puissance continue idéale, simulant un réseau d'alimentation électrique continu **120**, tandis que la partie alternative du convertisseur est reliée à une source de puissance alternative, simulant un réseau d'alimentation électrique alternatif **110**. On impose alors un échelon de puissance sur le réseau alternatif simulé, on fait varier le coefficient d'inertie virtuel  $k_{VI}$  et on observe les résultats sur les autres grandeurs du système.

Comme on peut le voir sur la figure **9A**, la courbe  $I$  représente un échelon de puissance de 0.03 pu, imposé au niveau du réseau alternatif simulé pendant 0.1 seconde, avant de ramener la puissance alternative à sa valeur nulle initiale. Ce comportement simule un transfert d'une puissance active depuis le convertisseur MMC **2** jusqu'au réseau d'alimentation électrique alternatif **110**.

La réponse en tension du réseau continu simulé pour différentes valeurs de  $k_{VI}$  est illustré en figure **9B**. Chacune des courbes correspond à une valeur de  $k_{VI}$  de sorte que les courbes  $a, b, c, d$  et  $e$  correspondent à des valeurs respectives de  $k_{VI}$  égales à 0, 0.5, 1, 2 et 3. On remarque que plus  $k_{VI}$  est élevé plus les variations sur le réseau continu simulé sont faibles. Ceci est en accord avec le principe de l'invention, puisque qu'en augmentant le  $k_{VI}$  on augmente l'inertie du convertisseur, ce qui permet au réseau continu de contenir davantage les perturbations et stabiliser la tension du réseau continu.

La figure **9C** illustre la variation de l'énergie totale du convertisseur pour plusieurs valeurs de  $k_{VI}$ . Les courbes  $g, h, i, j$  et  $k$  correspondent à des valeurs respectives de  $k_{VI}$  égales à 0, 0.5, 1, 2 et 3. En augmentant le coefficient

d'inertie virtuel  $k_{VI}$  on augmente la valeur de la capacité virtuelle ce qui implique que la contribution de l'énergie du convertisseur est plus importante et que davantage d'énergie est extraite du condensateur virtuel. Cette augmentation de la contribution de l'énergie du convertisseur se traduit donc par une baisse de l'énergie totale du convertisseur lorsque l'on augmente le coefficient d'inertie virtuelle. La conséquence est visible sur la figure **9D**, représentant l'évolution de la puissance sur le réseau continu simulé en fonction des valeurs du coefficient d'inertie virtuelle  $k_{VI}$ . Ici, les courbes  $m$ ,  $n$ ,  $o$ ,  $p$  et  $q$  correspondent à des valeurs respectives de  $k_{VI}$  égales à 0, 0.5, 1, 2 et 3. On constate que lorsque le coefficient d'inertie virtuel  $k_{VI}$  augmente, l'impact, sur la puissance du réseau continu simulé, de la variation de puissance du réseau alternatif simulé est moindre. En particulier, moins d'énergie est extraite des condensateurs du réseau d'alimentation électrique continu. Ceci est dû au fait que davantage d'énergie est extraite du condensateur virtuel. La capacité virtuelle permet de stabiliser et d'améliorer l'inertie du réseau continu.

Les figures **10A** à **10D**, illustrent une simulation par contrôle de la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau continu, dans laquelle on compare le comportement de deux systèmes. Le premier système consiste en un convertisseur modulaire multi-niveaux selon l'invention, configuré comme dans la simulation précédente. Le coefficient d'inertie virtuelle est réglé et fixé de sorte que  $k_{VI} = 1$ . Le second système consiste en un convertisseur MMC, selon la technique antérieure, dont la partie continue est également connectée à une source de puissance continue idéale, tandis que la partie alternative du convertisseur est reliée à une source de tension alternative. Dans ce second système, un condensateur réel est disposé en parallèle du réseau continu simulé. La valeur de la capacité de ce condensateur réel est choisie égale à la capacité du condensateur virtuel  $C_{VI}$  du premier système. Il s'agit donc de comparer l'influence d'un condensateur virtuel  $C_{VI}$  et d'un condensateur réel associés à un convertisseur MMC, en parallèle d'un réseau continu simulé.



Un échelon de perturbation en puissance est imposé par la source de puissance continue sur les deux systèmes comme on peut le voir sur la courbe en pointillé  $z$  de la figure **10D**.

Sur la figure **10A**, les courbes  $r$  et  $s$  représentent respectivement  
5 l'évolution de la tension du réseau continu simulé pour les premier et second systèmes. On constate que l'évolution de la tension du réseau continu simulé est la même pour les deux systèmes.

Puisque les deux systèmes sont configurés pour que les valeurs des capacités réelle et virtuelle soient égales, la réponse de la puissance du  
10 réseau alternatif simulé est la même pour les deux systèmes. Cette réponse est représentée, en figure **10C**, par la courbe  $v$ , tandis que la courbe  $w$  représente l'échelon de perturbation en puissance sur le réseau continu simulé.

La figure **10B** illustre, à travers la courbe  $t$ , une augmentation de  
15 l'énergie totale dans le cas du premier système, muni d'une capacité virtuelle, traduisant l'énergie stockée dans le condensateur virtuel. En revanche, sur le second système représenté par la courbe  $u$ , on n'observe aucune variation de l'énergie totale étant donné que, pour ce convertisseur, il n'y a pas de contribution de l'énergie interne sur le réseau continu simulé.

Sur la figure **10D**, d'après les courbes  $y$  et  $x$ , représentant  
20 respectivement la puissance du réseau continu simulé pour le premier et le second système, on constate que la présence d'une capacité virtuelle améliore la réponse en puissance à une perturbation de puissance sur le réseau continu simulé, représentée par la courbe  $z$ . La perturbation a donc  
25 moins d'impact sur le réseau continu simulé et la puissance dudit réseau continu est mieux contrôlée.

Une variante du convertisseur selon l'invention est illustrée en figure  
**11**, dans laquelle le module de contrôle comporte un limiteur d'énergie **80** recevant en entrée l'énergie interne  $W_{\Sigma}$  du convertisseur, une consigne  
30 d'énergie interne maximale du convertisseur  $W_{\Sigma lim}^+$  et une consigne d'énergie interne minimale du convertisseur  $W_{\Sigma lim}^-$ . Le limiteur d'énergie **80**



délivre une consigne puissance de limitation  $P_{EL}^*$  associée à une puissance de limitation  $P_{EL}$ . Ce limiteur d'énergie permet de borner l'énergie interne  $W_{\Sigma}$  entre les valeurs de consigne d'énergie interne maximale et minimale du convertisseur.

- 5 La puissance de limitation  $P_{EL}$  apparait comme une perturbation sur le contrôle de l'énergie. La consigne nominale  $W_{\Sigma 0}^*$  de la valeur de l'énergie stockée dans les condensateurs du convertisseur est donc corrigée afin de fournir au calculateur **10** de la consigne d'énergie interne, une consigne nominale corrigée  $W_{\Sigma 0}'^*$  de la valeur de l'énergie stockée dans les  
10 condensateurs.

On a désormais :

$$P_{ac} = P_m + P_{EL}$$

de sorte que :

$$P_l - P_m - P_{EL} = P_c + P_W = \frac{1}{2} C_{dc} \frac{dv_{dc}^2}{dt} + \frac{dW_{\Sigma}}{dt}$$

- 15 En outre la consigne nominale corrigée  $W_{\Sigma 0}'^*$  de la valeur de l'énergie stockée dans les condensateurs s'exprime :

$$W_{\Sigma}'^* = \frac{1}{2} 6C_{tot} k_{VI} (v_{dc}^2 - v_{dc0}^2) + W_{\Sigma 0}'^*$$

En substituant dans les équations précédentes on obtient :

$$P_l - P_m - P_{EL} = \frac{1}{2} C_{dc} \frac{dv_{dc}^2}{dt} + \frac{1}{2} 6C_{tot} k_{VI} \frac{dv_{dc}^2}{dt} - P_{EL}$$

Soit :

$$P_l - P_m = \frac{1}{2} (C_{dc} + C_{VI}) \frac{dv_{dc}^2}{dt}$$

- 20 On constate donc que le limiteur d'énergie **80** ne modifie pas le comportement du convertisseur au sein des limites d'énergie interne maximale et minimale. Le comportement du convertisseur est analogue à celui d'un convertisseur dans lequel un condensateur virtuel  $C_{VI}$  de capacité réglable  $C_{VI}$  est placé en parallèle du réseau d'alimentation électrique continu  
25 **120.**

**REVENDICATIONS**

1. Convertisseur de tension modulaire multi-niveaux (2), permettant de convertir une tension alternative en une tension continue et inversement, comportant une partie dite continue (2C) destinée à être reliée à un réseau d'alimentation électrique continu (120) et une partie dite alternative (2A) destinée à être reliée à un réseau d'alimentation électrique alternatif (110), le convertisseur comportant une pluralité de bras, chaque bras comportant un demi-bras supérieur et un demi-bras inférieur, chaque demi-bras comprenant une pluralité de sous-modules commandables individuellement par un organe de commande propre à chaque sous-module et chaque sous-module comprend un condensateur connectable en série dans le demi-bras lorsque l'organe de commande du sous-module est dans un état commandé, chaque demi-bras pouvant être modélisé par une source de tension modélisée associée à un rapport cyclique dépendant d'un nombre de condensateurs mis en série dans le demi-bras, chaque source de tension modélisée étant associée en parallèle à un condensateur modélisé correspondant à une capacité totale du demi-bras, le convertisseur comprenant en outre un module de contrôle du convertisseur configuré pour réguler la tension aux bornes de chaque condensateur modélisé de chaque bras et pour réguler la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu en commandant lesdits organes de commande des sous-modules du convertisseur,
- caractérisé en ce que le module de contrôle du convertisseur comprend un calculateur (10) d'une consigne d'énergie interne du convertisseur stockée dans les capacités des sous-modules des demi-bras par application d'une fonction ayant un paramètre d'entrée réglable, le module de contrôle étant configuré pour déduire de cette consigne d'énergie une consigne de tension aux bornes de chaque condensateur modélisé utilisée pour réguler la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu et la tension aux bornes de chaque condensateur modélisé.

2. Convertisseur selon la revendication **1**, dans lequel le paramètre d'entrée réglable est un coefficient d'inertie virtuelle réglable  $k_{VI}$ .

5 3. Convertisseur selon la revendication **2**, dans lequel le calculateur (10) est configuré pour calculer la consigne d'énergie interne  $W_{\Sigma}^*$  du convertisseur selon la fonction:

$$W_{\Sigma}^* = \frac{1}{2} 6C_{tot} k_{VI} (v_{dc}^2 - v_{dc0}^2) + W_{\Sigma 0}^*$$

10 où  $C_{tot}$  est la capacité totale du condensateur modélisé dans un demi bras,  $v_{dc}$  est la tension mesurée du réseau d'alimentation électrique continu,  $v_{dc0}$  est la valeur nominale de la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu et  $W_{\Sigma 0}^*$  est une consigne nominale de la valeur de l'énergie stockée dans les condensateurs du convertisseur.

15 4. Convertisseur selon l'une quelconque des revendications **1** à **3**, dans lequel le module de contrôle comporte un régulateur (20) de l'énergie interne du convertisseur ayant en entrée le résultat d'une comparaison entre ladite consigne de tension aux bornes de chaque condensateur modélisé, élevée au carré, et une moyenne du carré des tensions aux  
20 bornes des condensateurs modélisés, et délivrant une consigne de puissance pour les condensateurs dudit convertisseur.

25 5. Convertisseur selon l'une quelconque des revendications **1** à **4**, dans lequel le module de contrôle est configuré pour effectuer un changement de variable afin de contrôler des variables intermédiaires de courant  $i_{diff}$  et  $i_{gd}$  et de tension  $v_{diff}$  et  $v_{gd}$ , où  $i_{diff}$  et  $v_{diff}$  sont associées au réseau d'alimentation électrique continu et  $i_{gd}$  et  $v_{gd}$  sont associées au réseau d'alimentation électrique alternatif.

30 6. Convertisseur selon la revendication **5**, dans lequel le module de contrôle comporte un régulateur (40) du courant  $i_{gd}$  ayant en entrée une consigne  $i_{gd}^*$  correspondant au courant  $i_{gd}$ .

35 7. Convertisseur selon l'une quelconque des revendications **5** ou **6**, dans lequel le module de contrôle comporte un régulateur (50) du courant  $i_{diff}$  ayant en entrée une consigne  $i_{diff}^*$  correspondant courant  $i_{diff}$ .



8. Convertisseur selon l'une quelconque des revendications **1** à **7**, dans lequel le module de contrôle comporte un régulateur (30) de la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu ayant en entrée le résultat d'une comparaison entre une consigne de tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu, élevée au carré, et une valeur prélevée sur le réseau d'alimentation électrique continu également élevée au carré, et délivrant une consigne de puissance de fonctionnement dudit convertisseur.
9. Convertisseur selon les revendications **2** et **8**, dans lequel le module de contrôle comporte un organe (100) pour ajuster le gain du régulateur (30) de la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu, en fonction de la valeur du coefficient d'inertie virtuelle  $k_{VI}$ .
10. Convertisseur selon l'une quelconque des revendications **1** à **9**, dans lequel le module de contrôle comporte un limiteur de l'énergie interne du convertisseur ayant en entrée l'énergie interne du convertisseur, une consigne d'énergie interne maximale du convertisseur et une consigne d'énergie interne minimale du convertisseur, et délivrant une consigne de puissance de limitation.
11. Procédé de contrôle d'un convertisseur de tension modulaire multi-niveaux, le convertisseur permettant de convertir une tension alternative en une tension continue et inversement, et comportant une partie dite continue destinée à être reliée à un réseau d'alimentation électrique continu et une partie dite alternative destinée à être reliée à un réseau d'alimentation électrique alternatif, le convertisseur comportant une pluralité de bras, chaque bras comportant un demi-bras supérieur et un demi-bras inférieur, chaque demi-bras comprenant une pluralité de sous-modules commandables individuellement par un organe de commande du sous-module et comprenant un condensateur connecté en série dans le demi-bras dans un état commandé de l'organe de commande du sous-module, chaque demi-bras pouvant être modélisé par une source de tension modélisée associée à un rapport cyclique dépendant d'un nombre de

- condensateurs mis en série dans le demi-bras, chaque source de tension modélisée étant associée en parallèle à un condensateur modélisé correspondant à une capacité totale du demi-bras, le procédé comprenant en outre un contrôle lent du convertisseur dans lequel on régule la tension aux bornes de chaque condensateur modélisé de chaque bras et on régule la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu en commandant lesdits organes de commande des sous-modules du convertisseur,
- caractérisé en ce qu'il comprend un calcul d'une consigne d'énergie interne du convertisseur stockée dans les capacités des sous-modules des demi-bras en utilisant une fonction ayant un paramètre d'entrée réglable, et un calcul d'une consigne de tension aux bornes de chaque condensateur modélisé à partir de ladite consigne d'énergie interne du convertisseur, la consigne de tension aux bornes de chaque convertisseur modélisé étant utilisée pour réguler la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu et la tension aux bornes de chaque condensateur modélisé.
12. Procédé de contrôle d'un convertisseur selon la revendication **11**, dans lequel le paramètre d'entrée réglable est un coefficient d'inertie virtuelle réglable  $k_{VI}$ .
13. Procédé de contrôle d'un convertisseur selon la revendication **12**, dans lequel le calcul de la consigne d'énergie interne  $W_{\Sigma}^*$  du convertisseur est réalisé d'après la fonction:
- $$W_{\Sigma}^* = \frac{1}{2} 6C_{tot} k_{VI} (v_{dc}^2 - v_{dc0}^2) + W_{\Sigma 0}^*$$
- où  $C_{tot}$  est la capacité totale du condensateur modélisé dans un demi bras,  $v_{dc}$  est la tension mesurée du réseau d'alimentation électrique continu,  $v_{dc0}$  est la valeur nominale de la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu et  $W_{\Sigma 0}^*$  est une consigne nominale de la valeur de l'énergie stockée dans les condensateurs du convertisseur.

- 5 14. Procédé de contrôle d'un convertisseur selon l'une quelconque des revendications **11** à **13**, comportant une régulation de la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu en utilisant en entrée le résultat d'une comparaison entre une consigne de tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu, élevée au carré, et une valeur prélevée sur le réseau d'alimentation électrique continu également élevée au carré, et délivrant une consigne de puissance de fonctionnement dudit convertisseur.
- 10
- 15 15. Procédé de contrôle d'un convertisseur selon l'une quelconque des revendications **11** à **14**, comportant un ajustement du gain de régulation de la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu, en fonction de la valeur du coefficient d'inertie virtuelle.
- 20
- 25 16. Module de contrôle pour un convertisseur modulaire multi-niveaux selon l'une quelconque des revendications **1** à **10**, caractérisé en ce qu'il comprend ledit calculateur (10) d'une consigne d'énergie interne du convertisseur stockée dans les capacités des sous-modules des demi-bras par application d'une fonction ayant un paramètre d'entrée réglable, et en ce qu'il est configuré pour déduire de cette consigne d'énergie une consigne de tension aux bornes de chaque condensateur modélisé utilisée pour réguler la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu et la tension aux bornes de chaque condensateur modélisé.



1/11

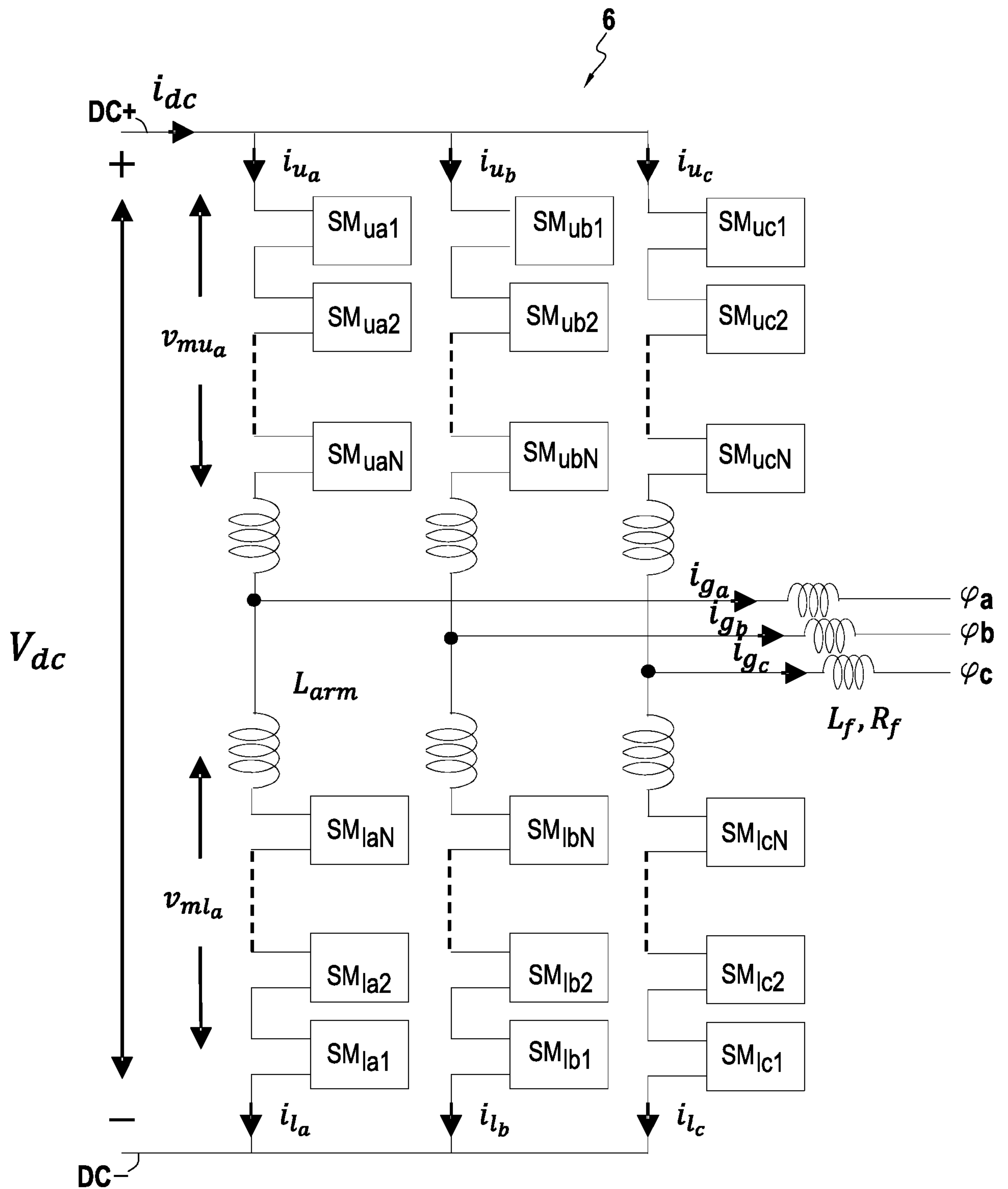


FIG.1  
ART ANTERIEUR

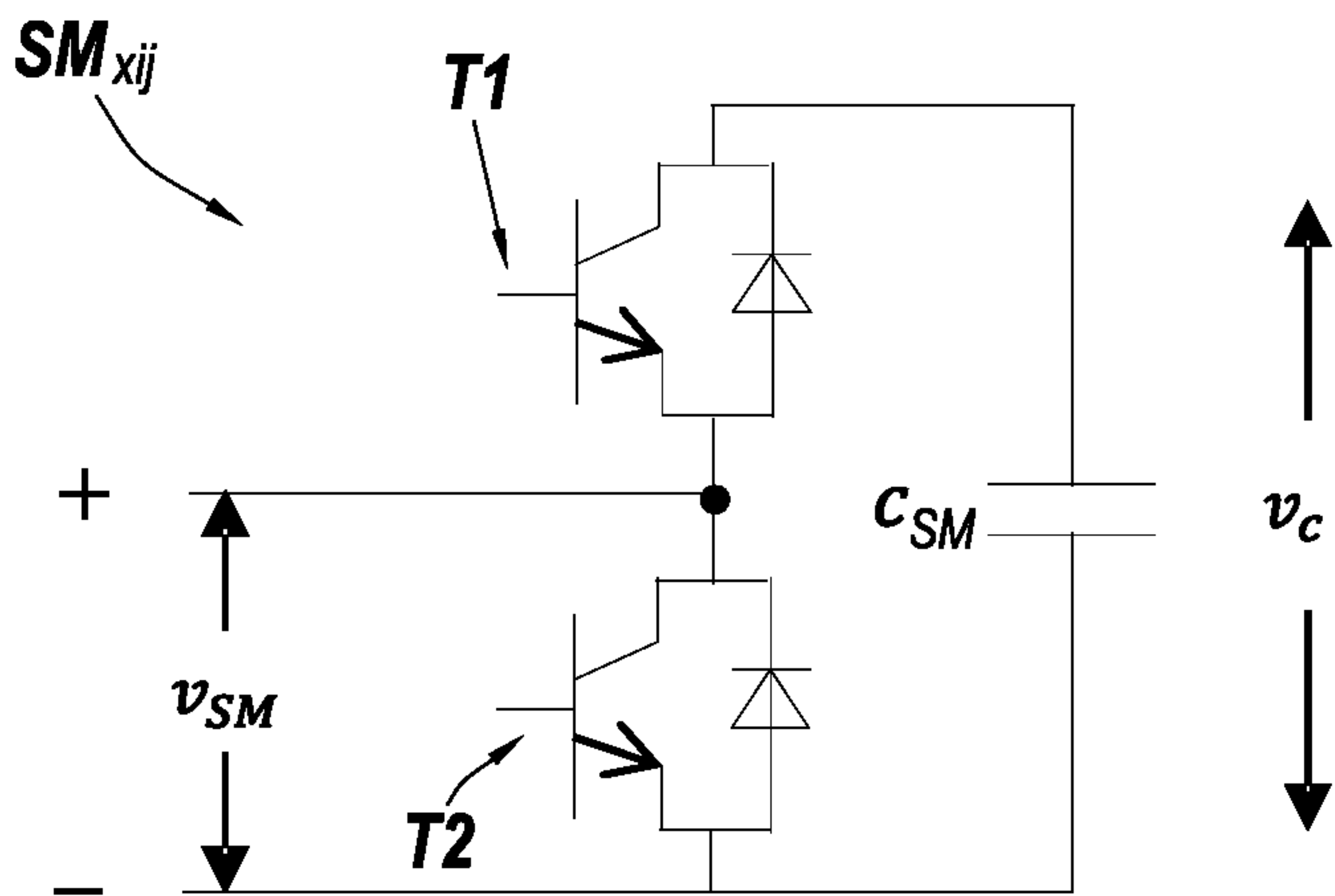


FIG.2  
ART ANTERIEUR

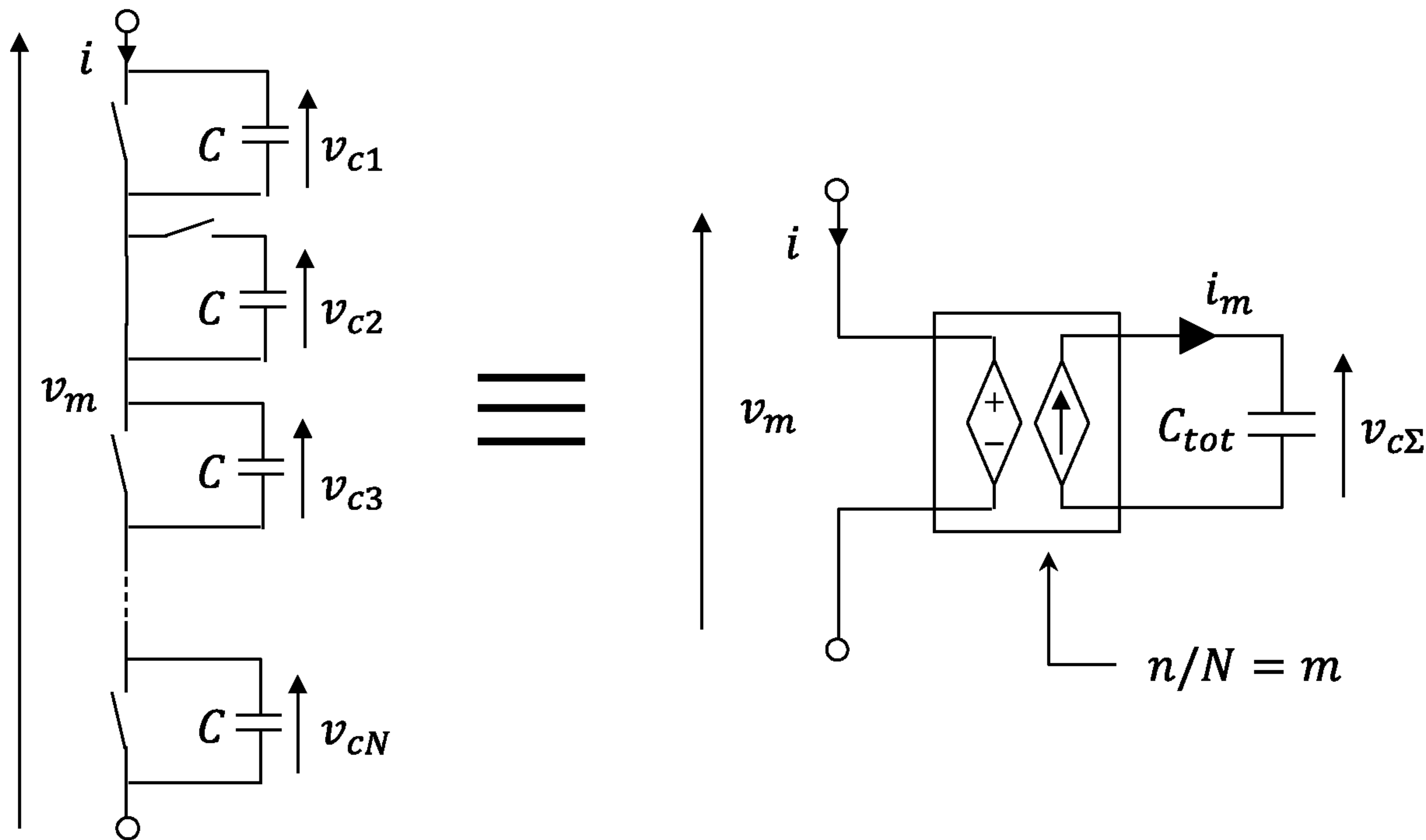


FIG.3  
ART ANTERIEUR

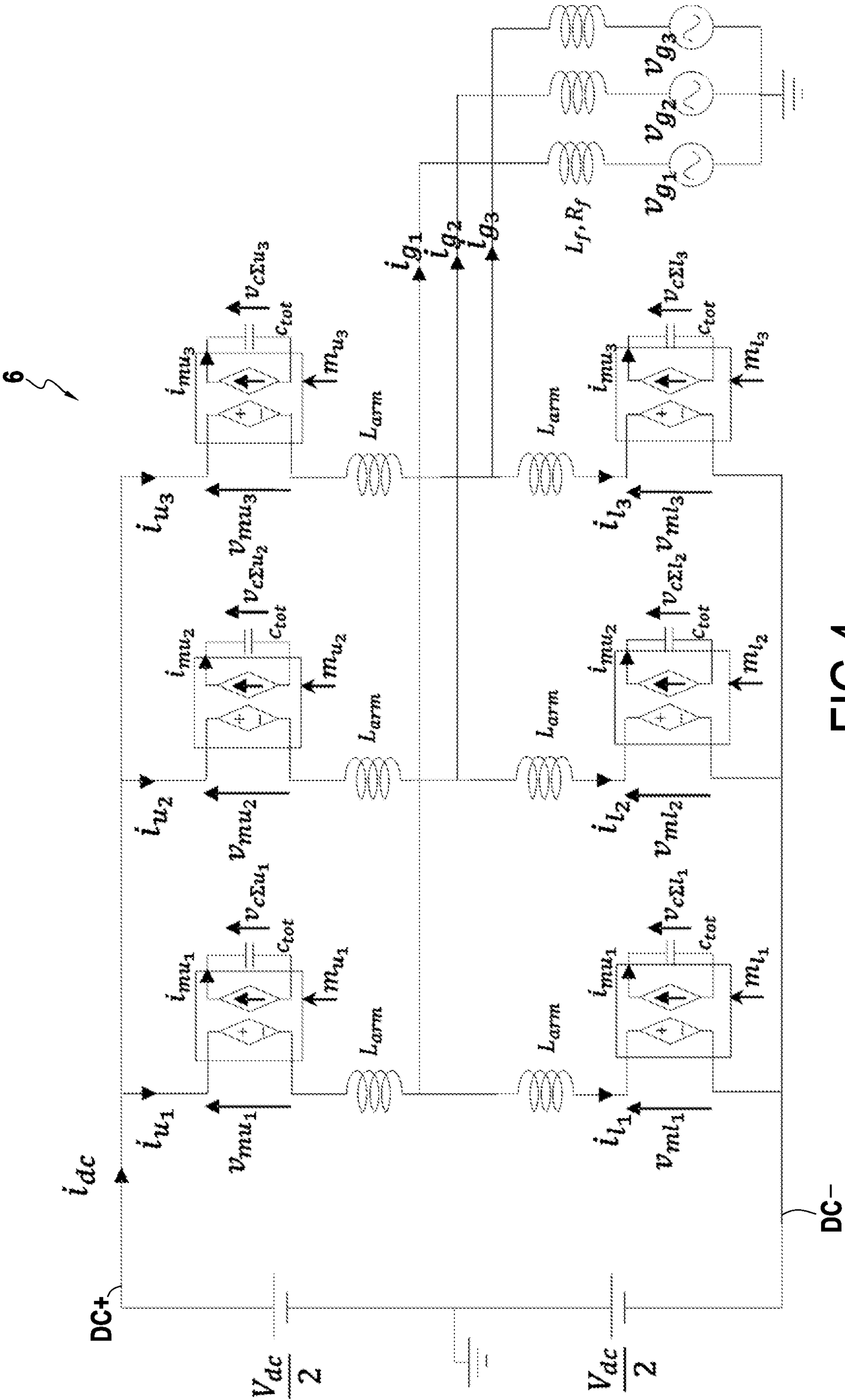


FIG.4  
ART ANTERIEUR



4/11

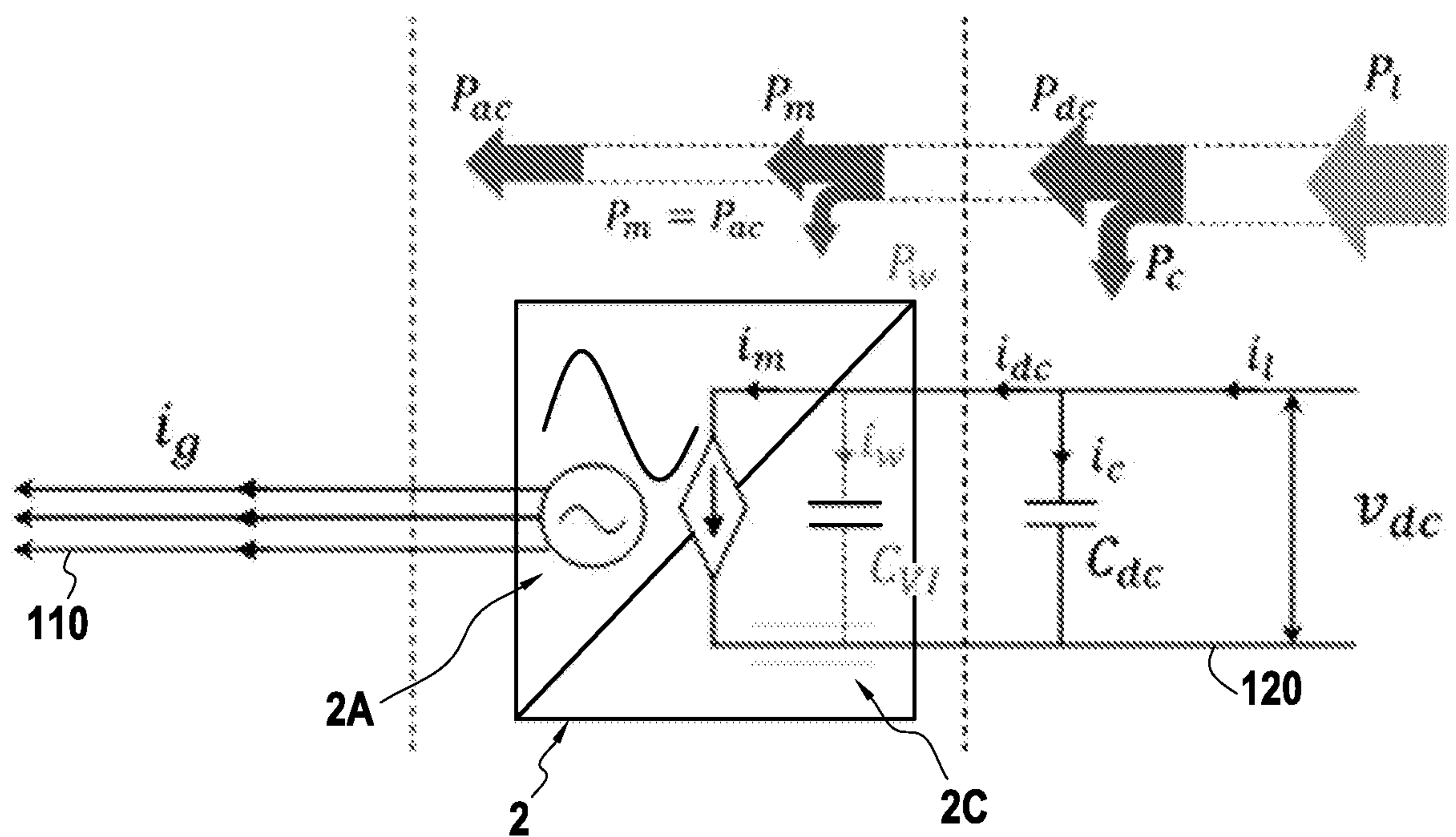


FIG.5

2

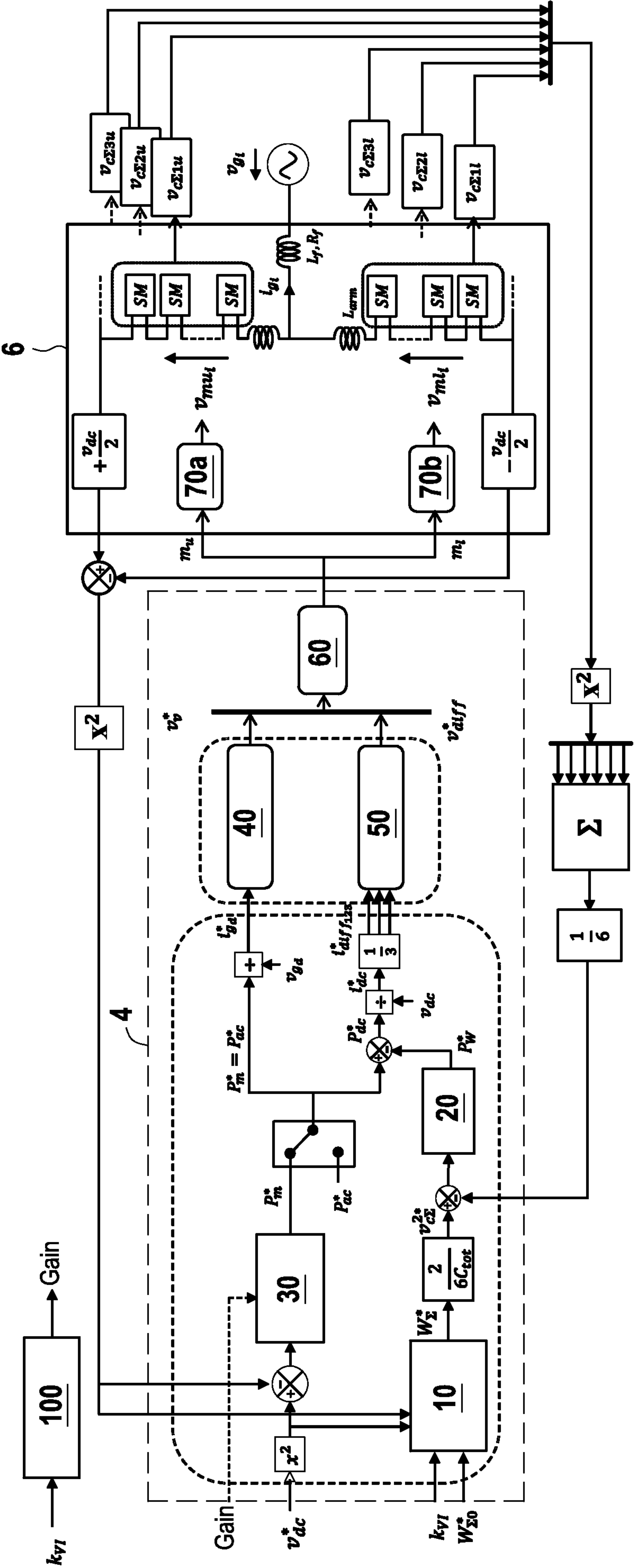


FIG.6



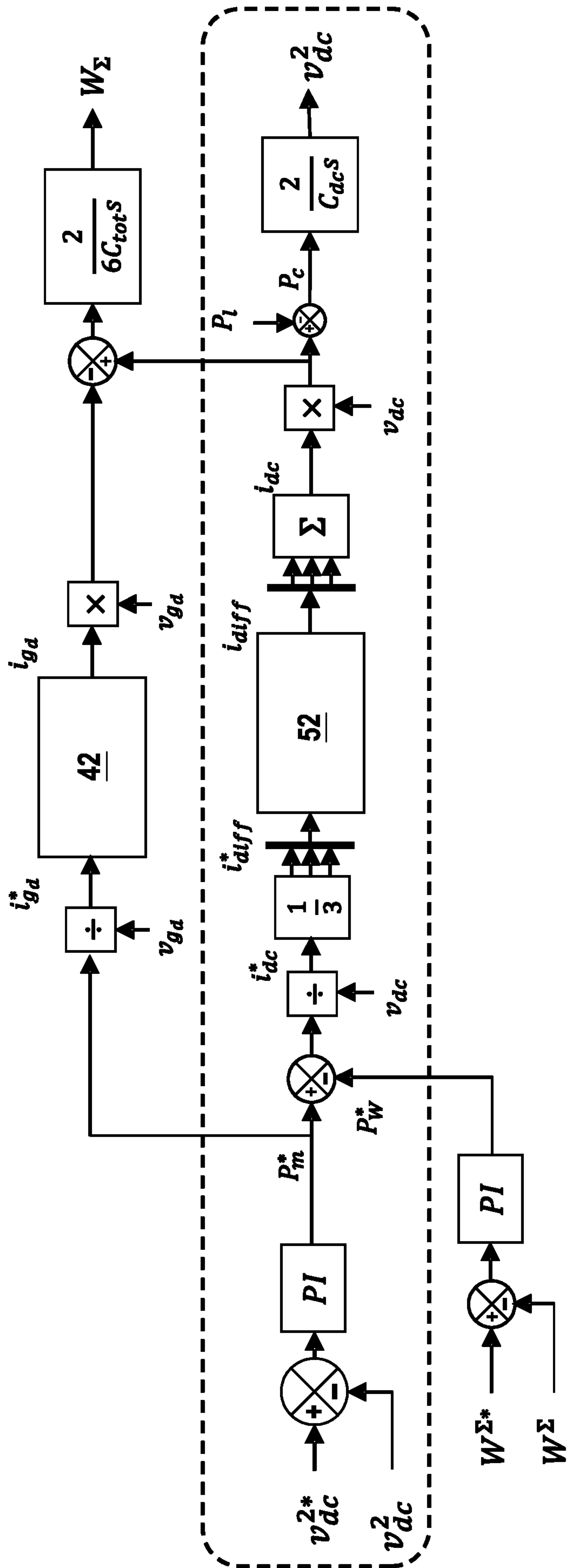


FIG.7

7/11

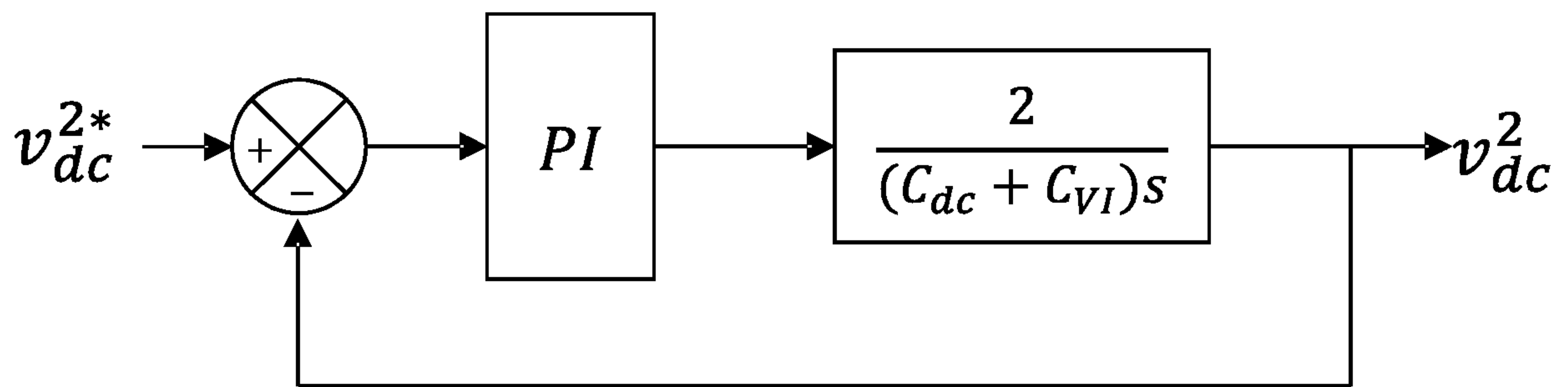


FIG.8

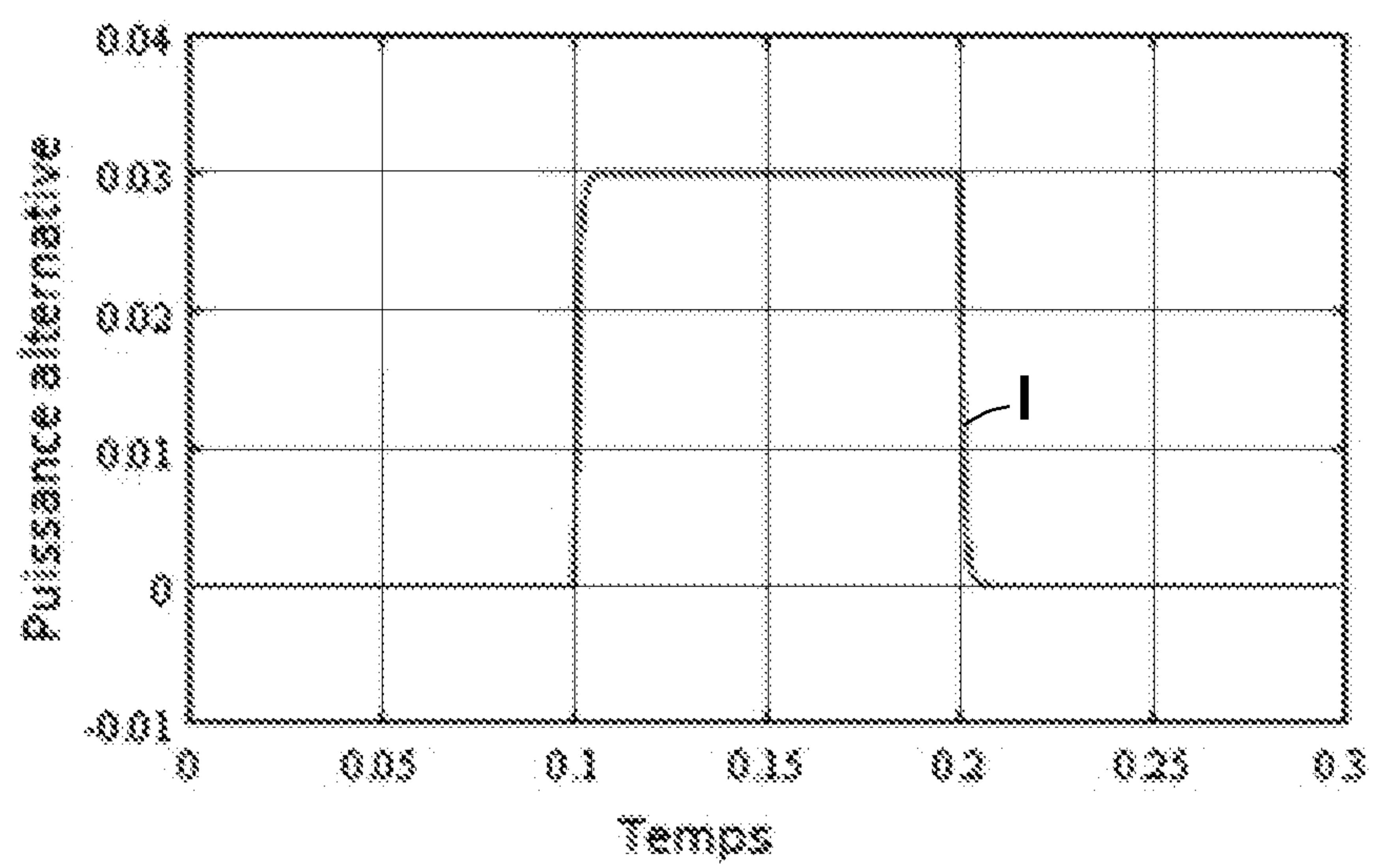


FIG.9A

8/11

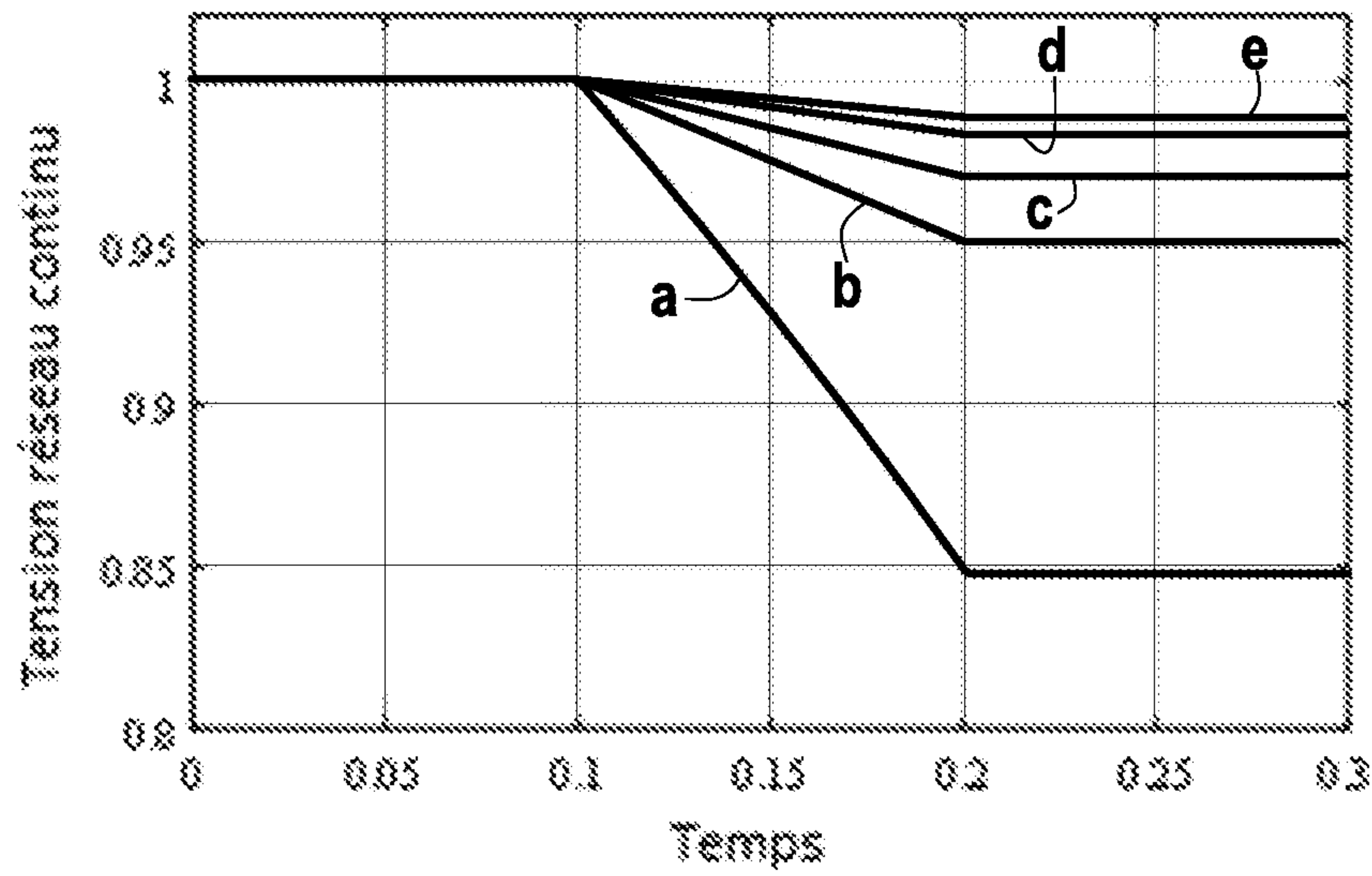


FIG.9B

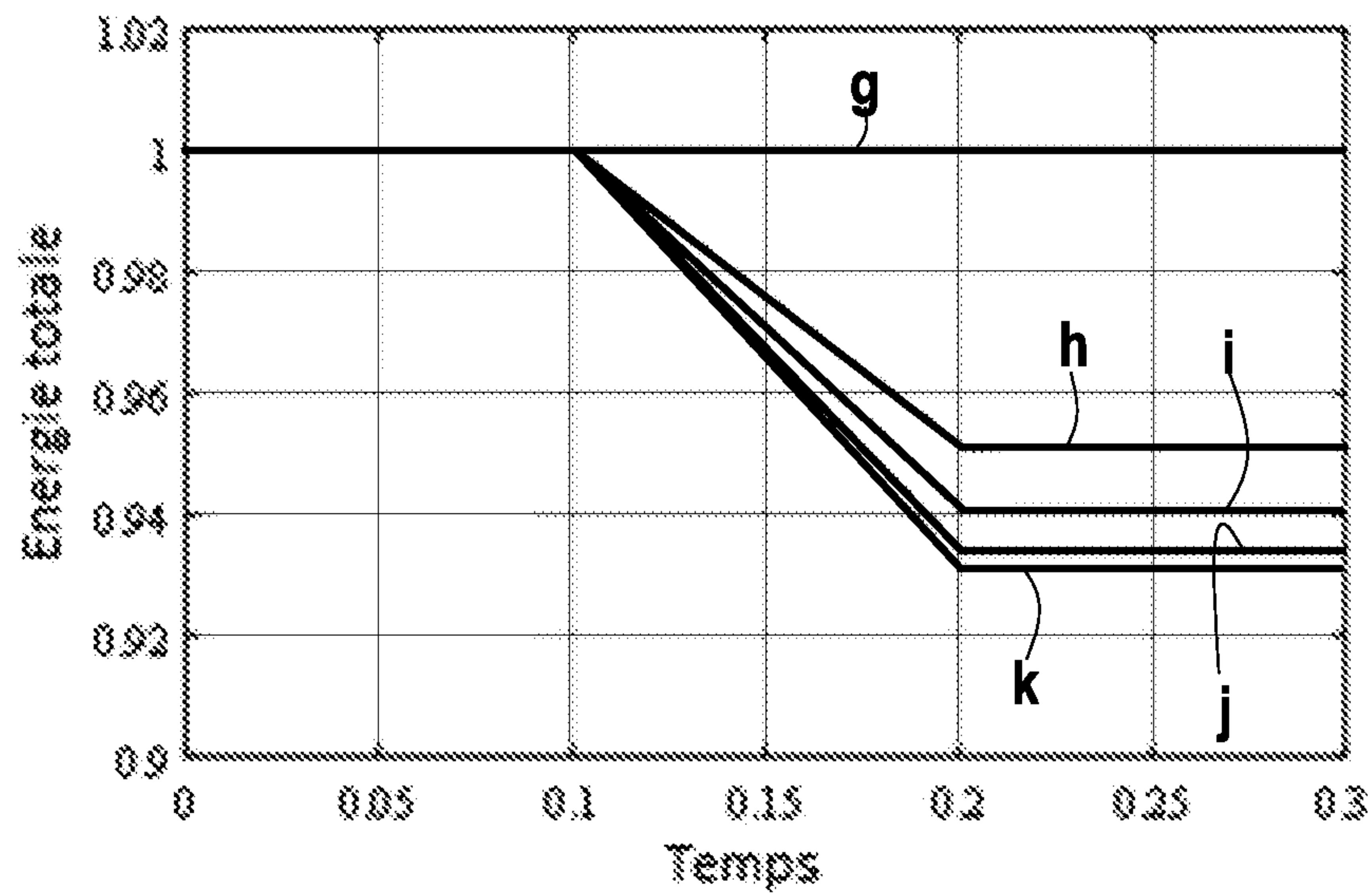


FIG.9C

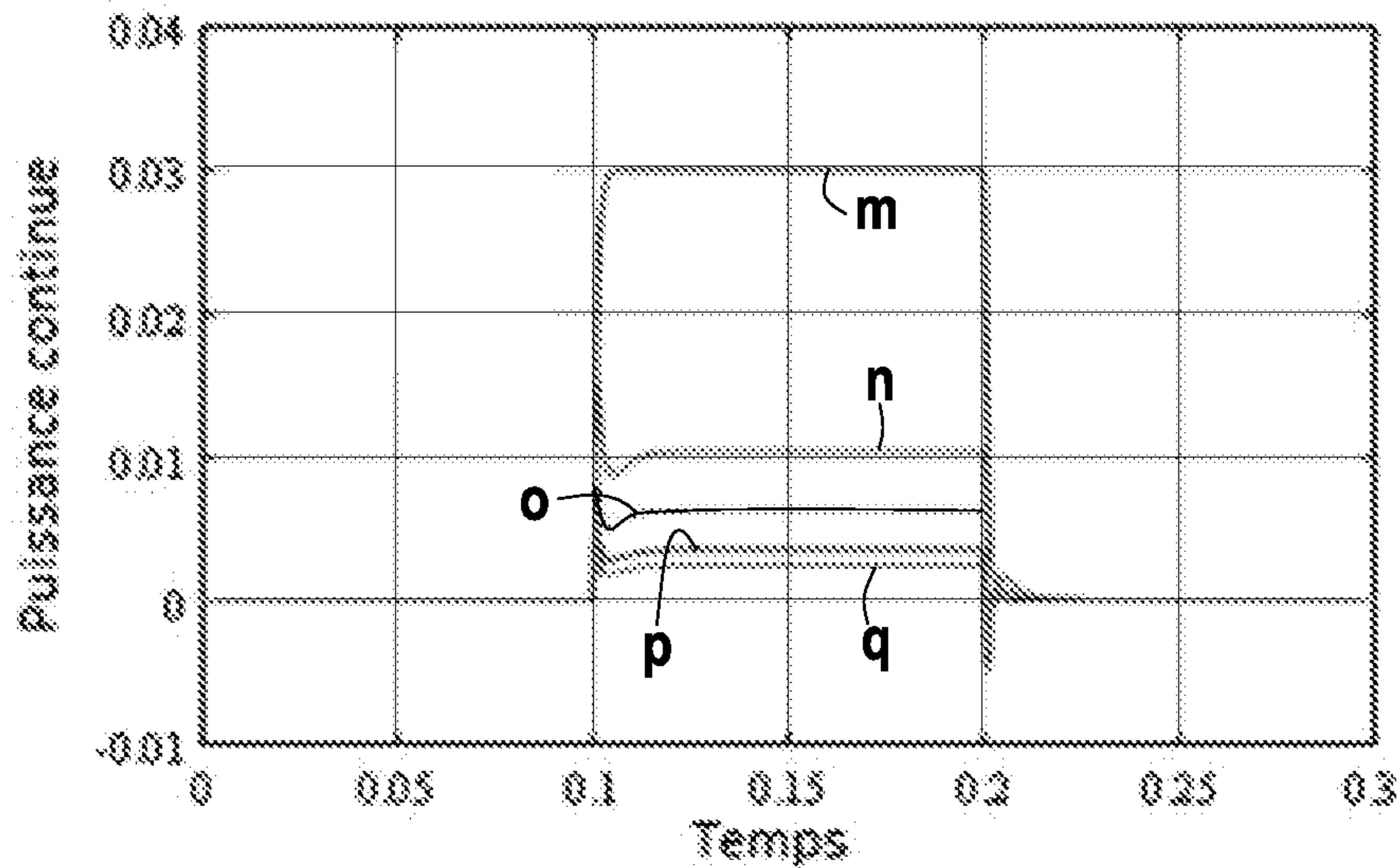


FIG.9D



9/11

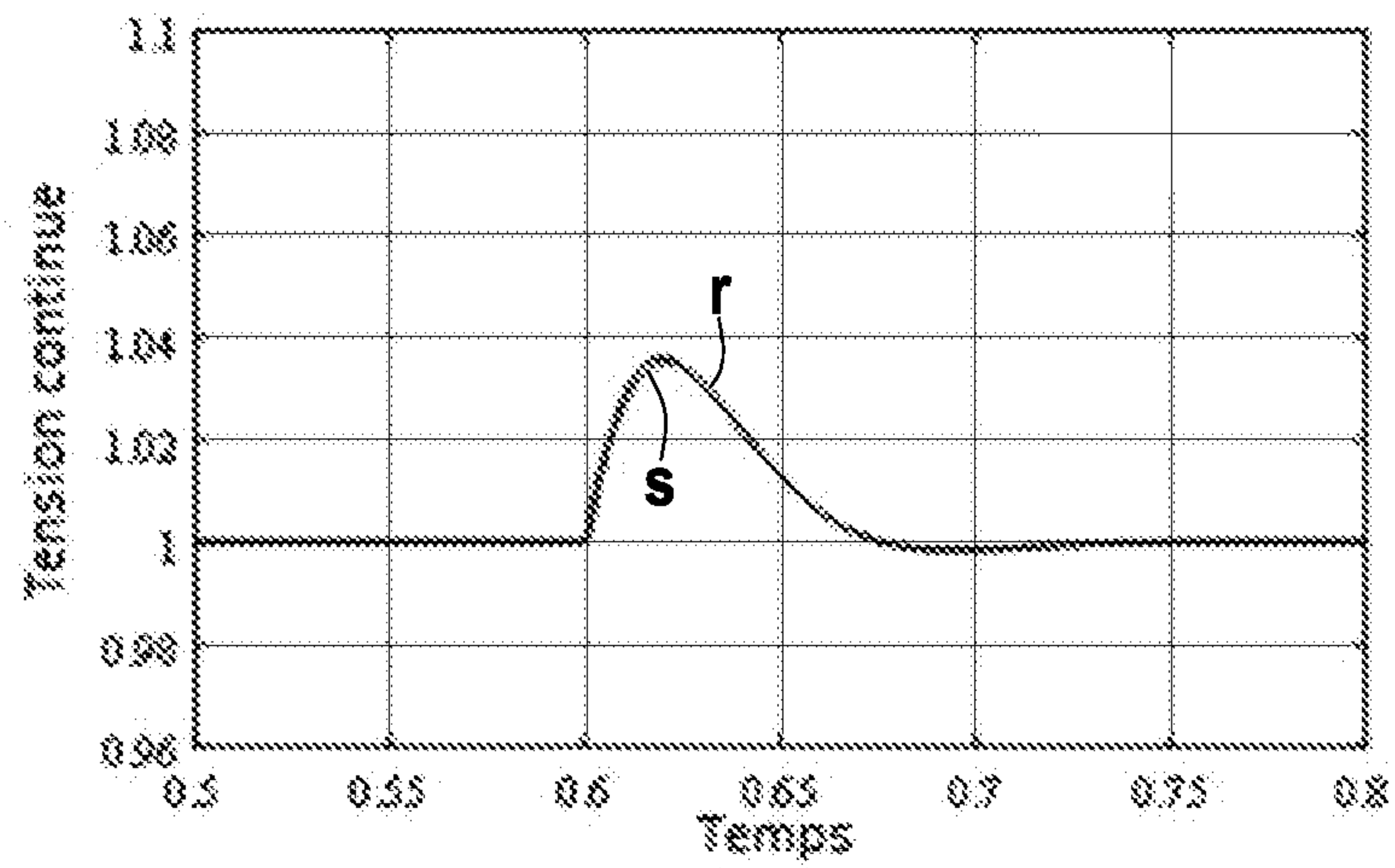


FIG.10A

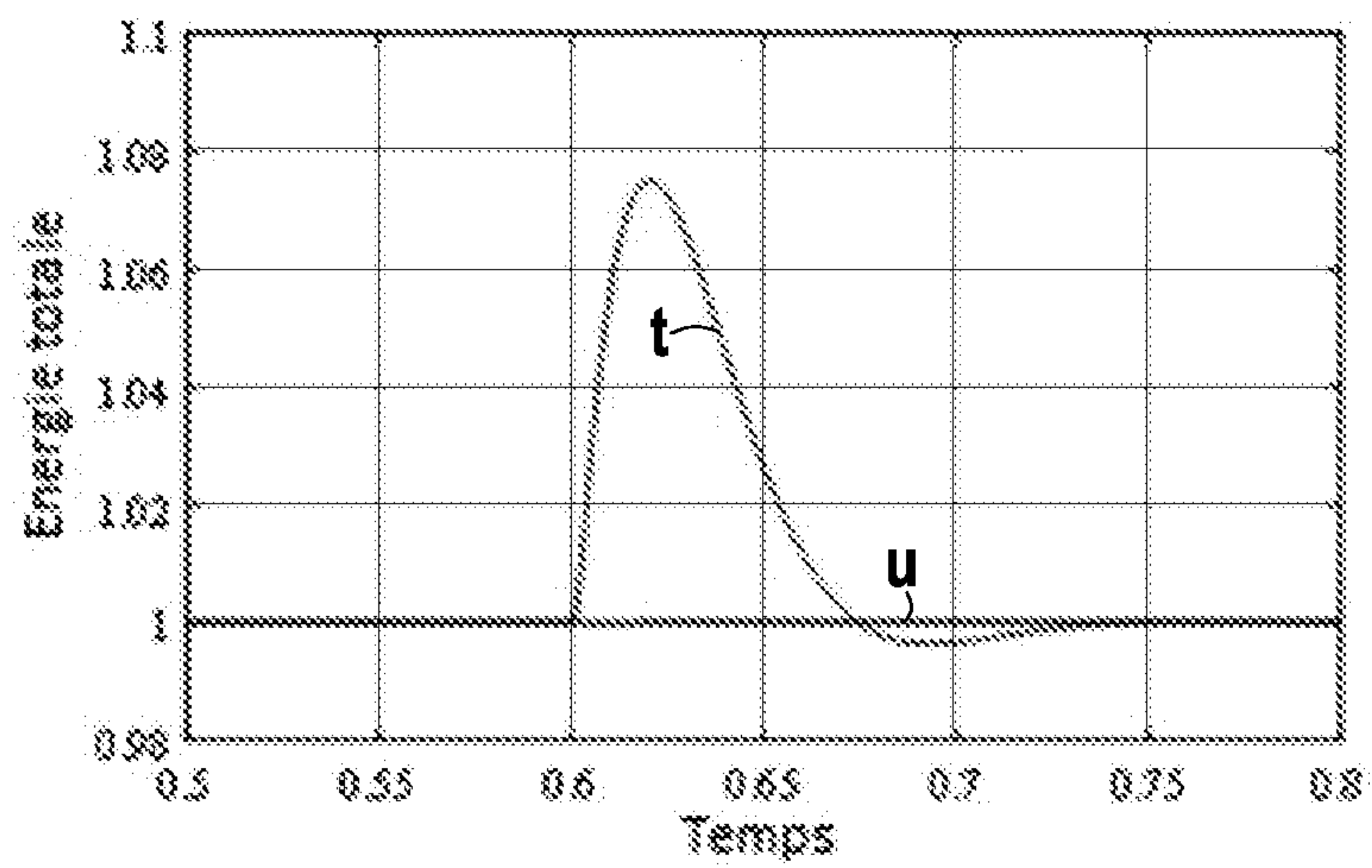


FIG.10B

10/11

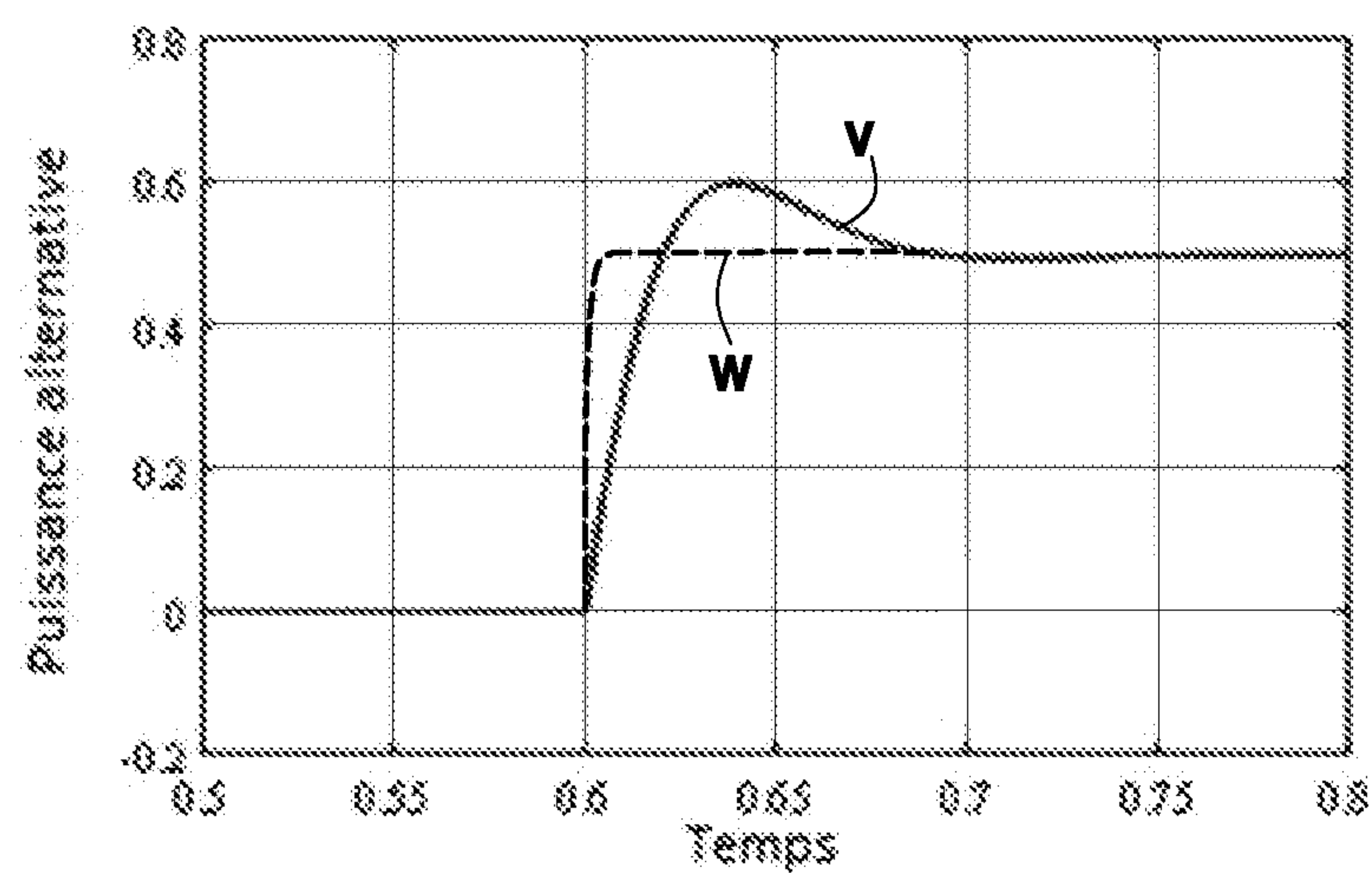


FIG.10C

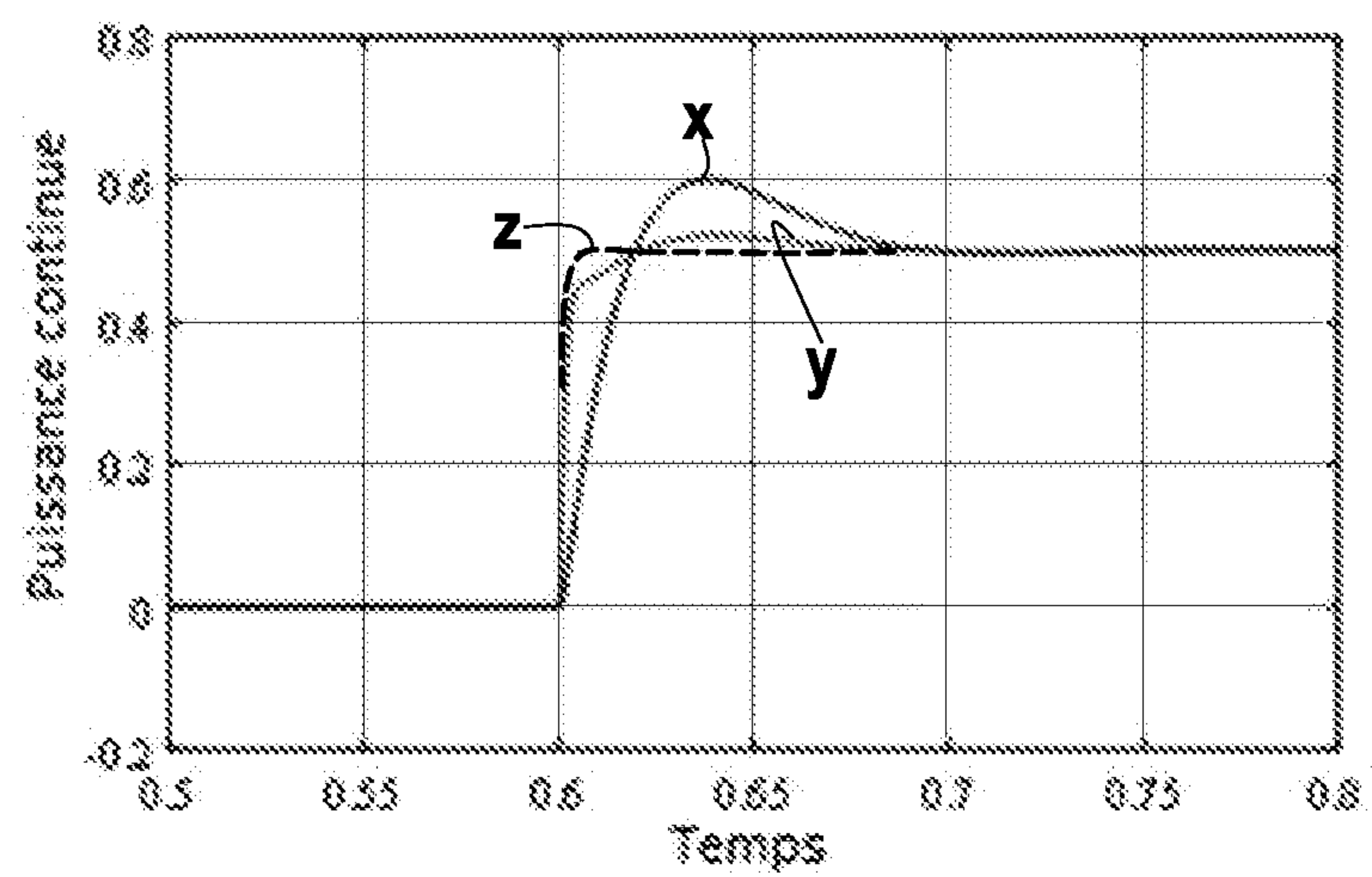
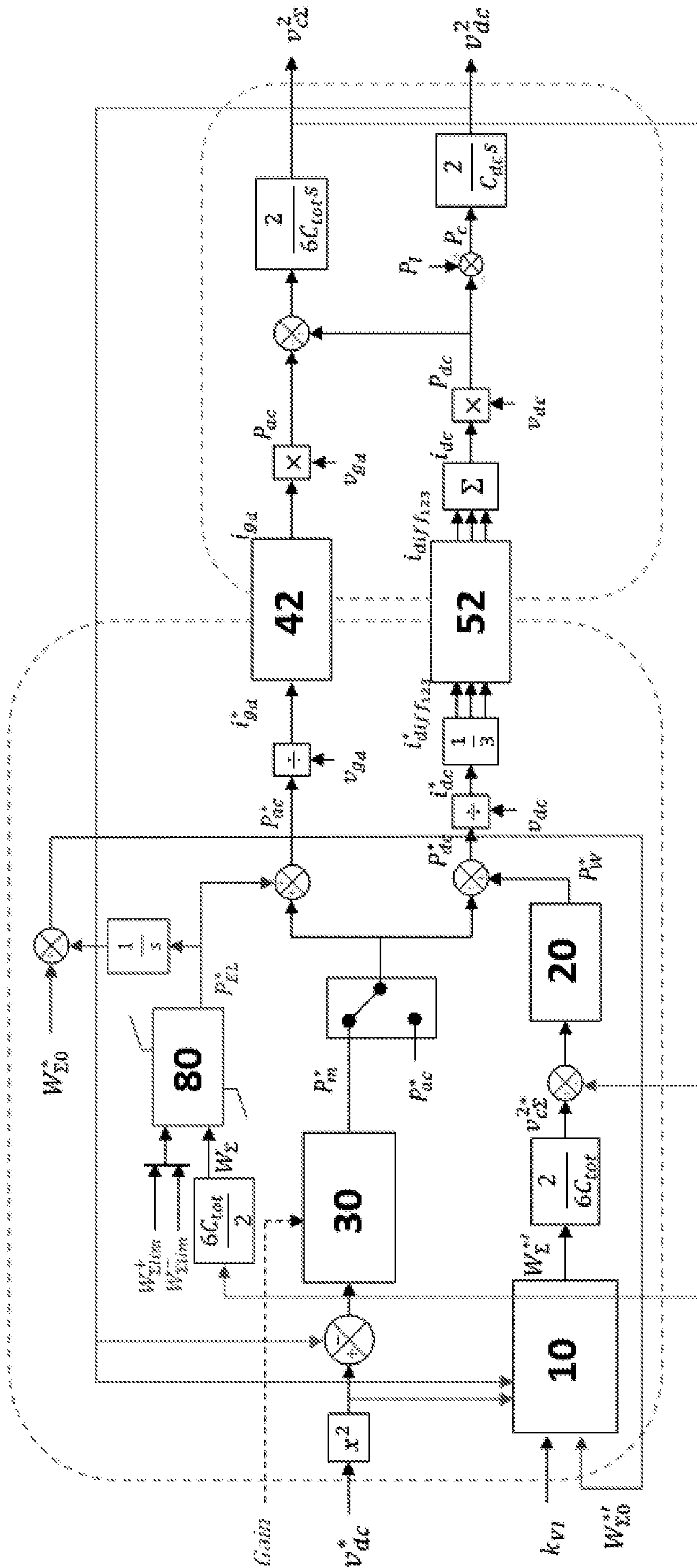


FIG.10D





# FIG.6

