



(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;
BENCHAIB, ABDELKRIM, FR;
GUILLAUD, XAVIER, FR;
DAI, JING, FR

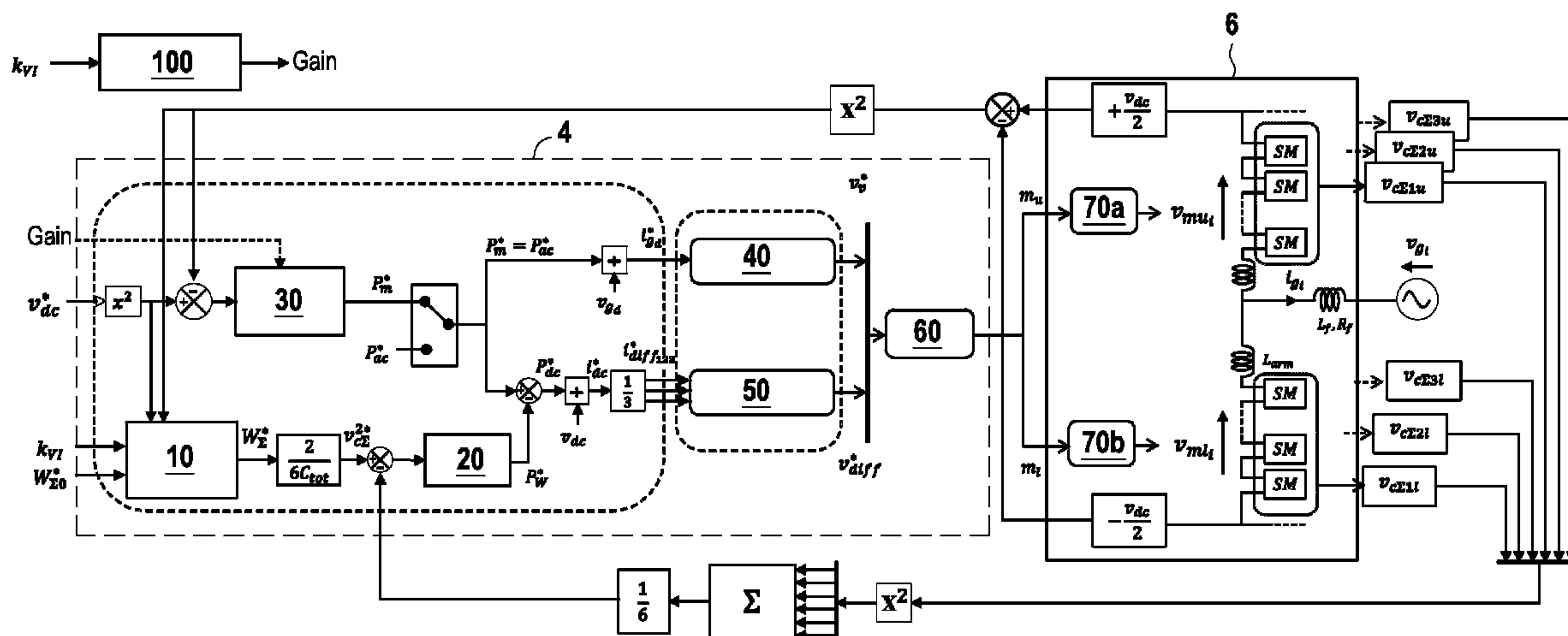
(74) **Agent:** ROBIC

(54) Titre : VIRTUAL CAPACITANCE

(54) Title: CAPACITE VIRTUELLE

2

FIG.6



(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



(43) Date de la publication internationale
9 février 2017 (09.02.2017)



(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). **BENCHABIB, Abdelkrim**; 65 Boulevard Vauban, 78180 Montigny Le Bretonneux (FR). **GUILLAUD, Xavier**; 5 rue de la Fraternité, 59830 Béthune (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, 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

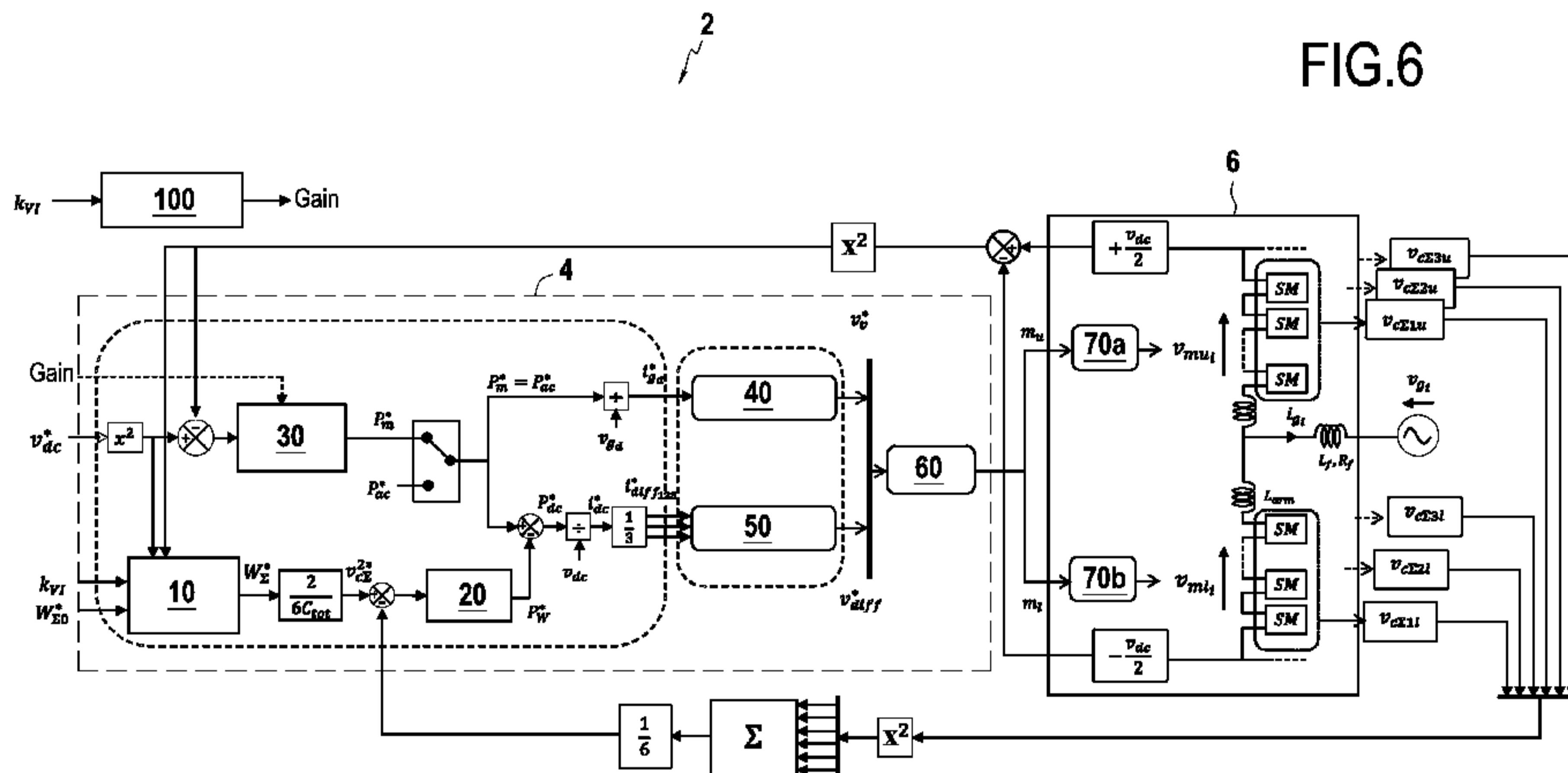


FIG.6

- (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.

CAPACITE VIRTUELLE

Arrière-plan de l'invention

La présente invention concerne le domaine technique des 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 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 φ_a , φ_b , et φ_c), trois bras de 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 d'alimentation électrique alternatif (AC). En particulier, chacun des bras est connecté à une des trois lignes de phase φ_a , φ_b , ou φ_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 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 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-saxone « 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 φ_a , φ_b , et φ_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 5 est possible de décomposer le convertisseur MMC en une partie alternative 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 25 de réguler plus facilement et plus précisément la tension aux points de 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 influer 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 5 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 10 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 15 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 20 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 25 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 30 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 stabilité du réseau 5 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 10 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 15 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 20 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 25 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 30 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 α , 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_{Σ}^* 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_{Σ}^* du convertisseur selon la fonction:

$$15 \quad W_{\Sigma}^* = \frac{1}{2} 6C_{tot}k_{VI}(\nu_{dc}^2 - \nu_{dc0}^2) + W_{\Sigma0}^*$$

où C_{tot} est une capacité totale du condensateur modélisé, ν_{dc} est une tension mesurée du réseau d'alimentation électrique continu, ν_{dc0} est une valeur nominale de la tension du réseau d'alimentation électrique continu et $W_{\Sigma0}^*$ 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 $(\nu_{dc}^2 - \nu_{dc0}^2)$ 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 5 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 10 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 15 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.

20 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 25 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 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 τ associée au 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_{Σ}^* , 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_{Σ}^* du convertisseur est réalisé d'après la fonction:

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

où C_{tot} est la capacité totale du condensateur modélisé dans un demi bras, ν_{dc} est la tension mesurée du réseau d'alimentation électrique continu, 20 ν_{dc0} est la valeur nominale de la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu et $W_{\Sigma0}^*$ 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 convertisseur modulaire multi-niveaux selon la technique 30 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 au réseau d'alimentation électrique continu ;
- 10 - 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 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} ;
- 15 - 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 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 ;
- 20 - la figure **10B** montre les variations de l'énergie totale du convertisseur pour les deux systèmes de simulation ;
-
- 25
-
- 30

- 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 5 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 10 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 15 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 20 interne W_{Σ} .

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 25 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_{Σ}^* du convertisseur **2** stockée dans les capacités des sous-modules des demi-bras à partir d'un coefficient d'inertie virtuelle 30 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_{Σ} 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 demi-bras.

Le calculateur permet de calculer la consigne d'énergie interne W_{Σ}^* 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_{Σ}^* 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 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 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** 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 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 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 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 $v_{c\Sigma xi}$ 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 influer 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_{Σ} . 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 *l* 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 faible. 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 5 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 10 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 15 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 20 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 25 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 30 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 10 capacités réelle et virtuelle soient égales, la réponse de la puissance du 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.

20 Sur la figure **10D**, d'après les courbes y et x , représentant 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_{Σ} 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_{Σ} 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 $W_{\Sigma0}^*$ 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 $W_{\Sigma0}^{* \prime}$ 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 $W_{\Sigma0}^{* \prime}$ de la valeur de l'énergie stockée dans les condensateurs s'exprime :

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

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_{Σ}^* du convertisseur selon la fonction:

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

10 où C_{tot} est la capacité totale du condensateur modélisé dans un demi bras, ν_{dc} est la tension mesurée du réseau d'alimentation électrique continu, ν_{dc0} est la valeur nominale de la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu et $W_{\Sigma0}^*$ 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 bornes des condensateurs modélisés, et délivrant une consigne de puissance pour les condensateurs dudit convertisseur.
- 20 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 ν_{diff} et ν_{gd} , où i_{diff} et ν_{diff} sont associées au réseau d'alimentation électrique continu et i_{gd} et ν_{gd} sont associées au réseau d'alimentation électrique alternatif.
- 25 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} .
- 30 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} .
- 35

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.
- 5
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} .
- 15
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.
- 20
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
- 25
- 30
- 35

- 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_{Σ}^* du convertisseur est réalisé d'après la fonction:
- $$W_{\Sigma}^* = \frac{1}{2} 6C_{tot} k_{VI} (\nu_{dc}^2 - \nu_{dc0}^2) + W_{\Sigma0}^*$$
- où C_{tot} est la capacité totale du condensateur modélisé dans un demi bras, ν_{dc} est la tension mesurée du réseau d'alimentation électrique continu, ν_{dc0} est la valeur nominale de la tension aux points de connexion du convertisseur au réseau d'alimentation électrique continu et $W_{\Sigma0}^*$ est une consigne nominale de la valeur de l'énergie stockée dans les condensateurs du convertisseur.

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. 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.
- 15
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.
- 20
- 25

1/11

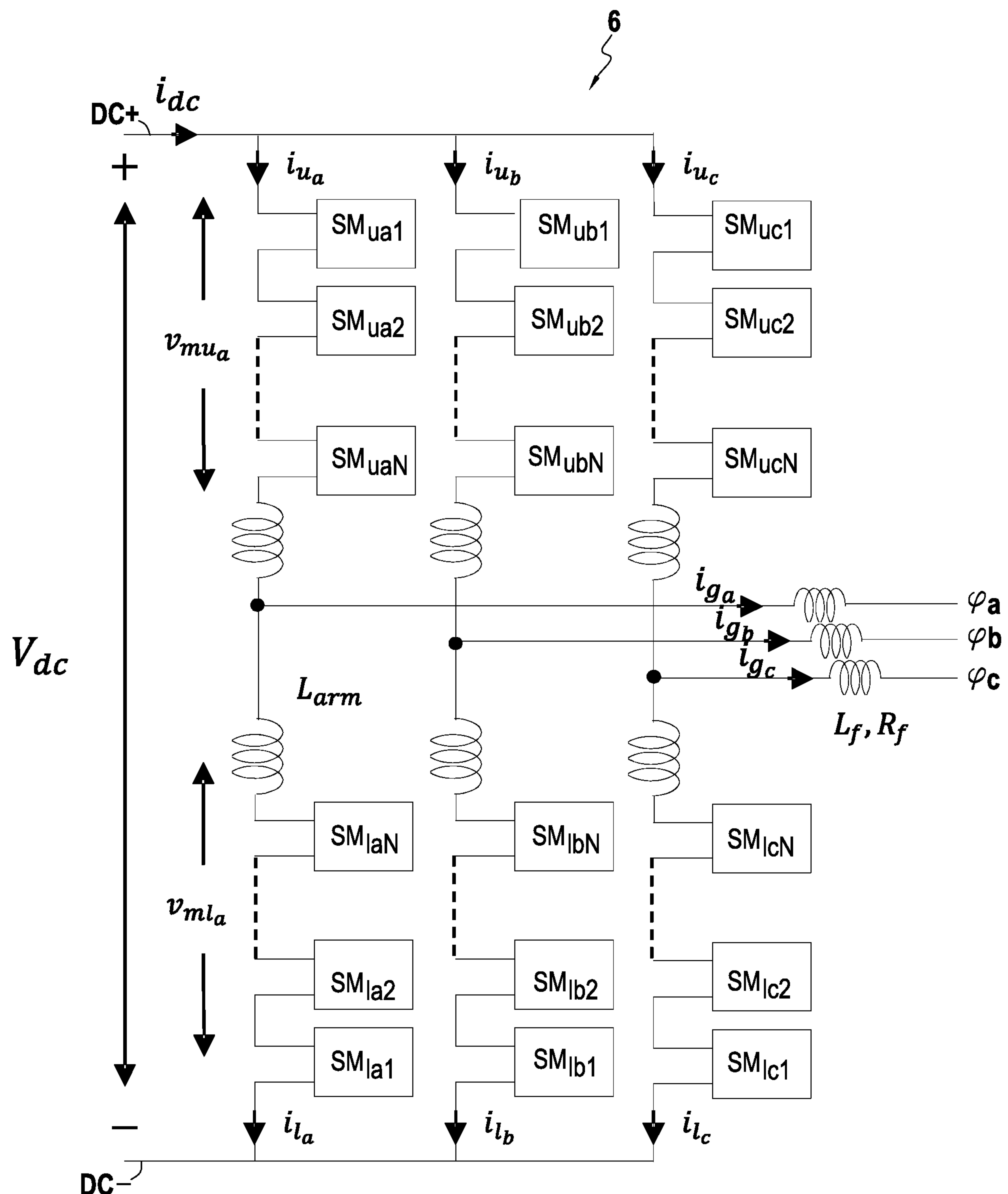


FIG.1
ART ANTERIEUR

2/11

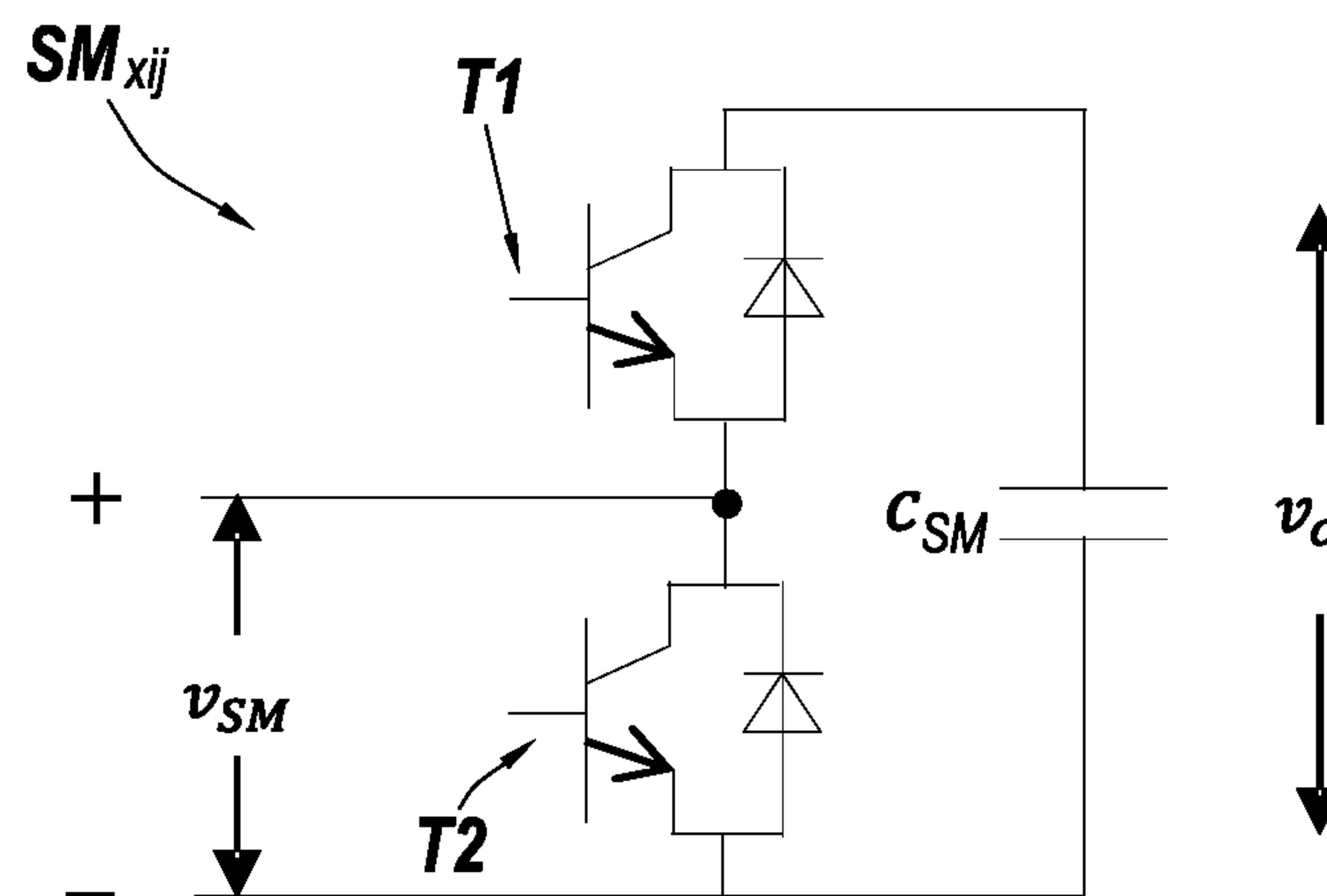


FIG.2
ART ANTERIEUR

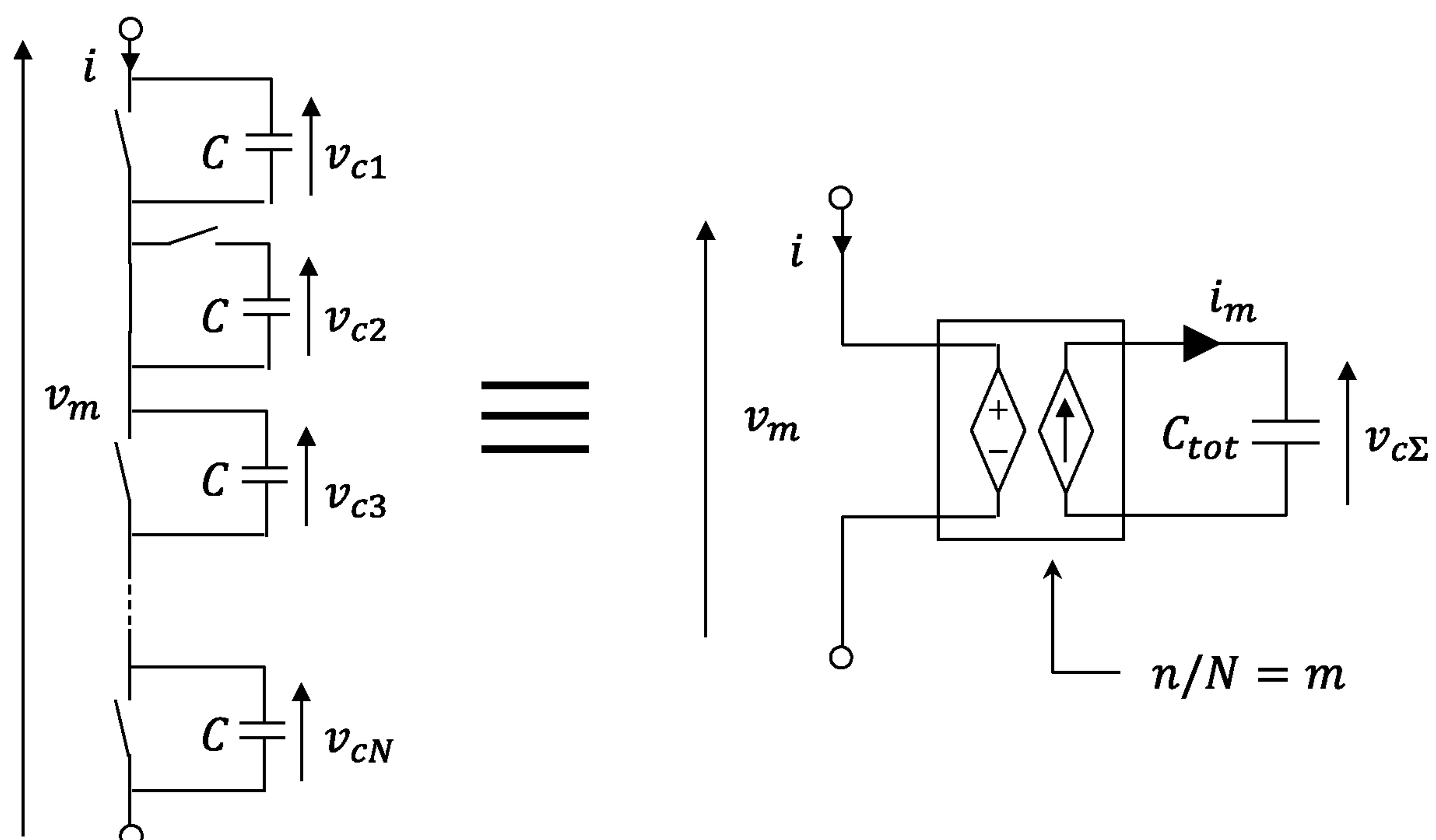


FIG.3
ART ANTERIEUR

3/11

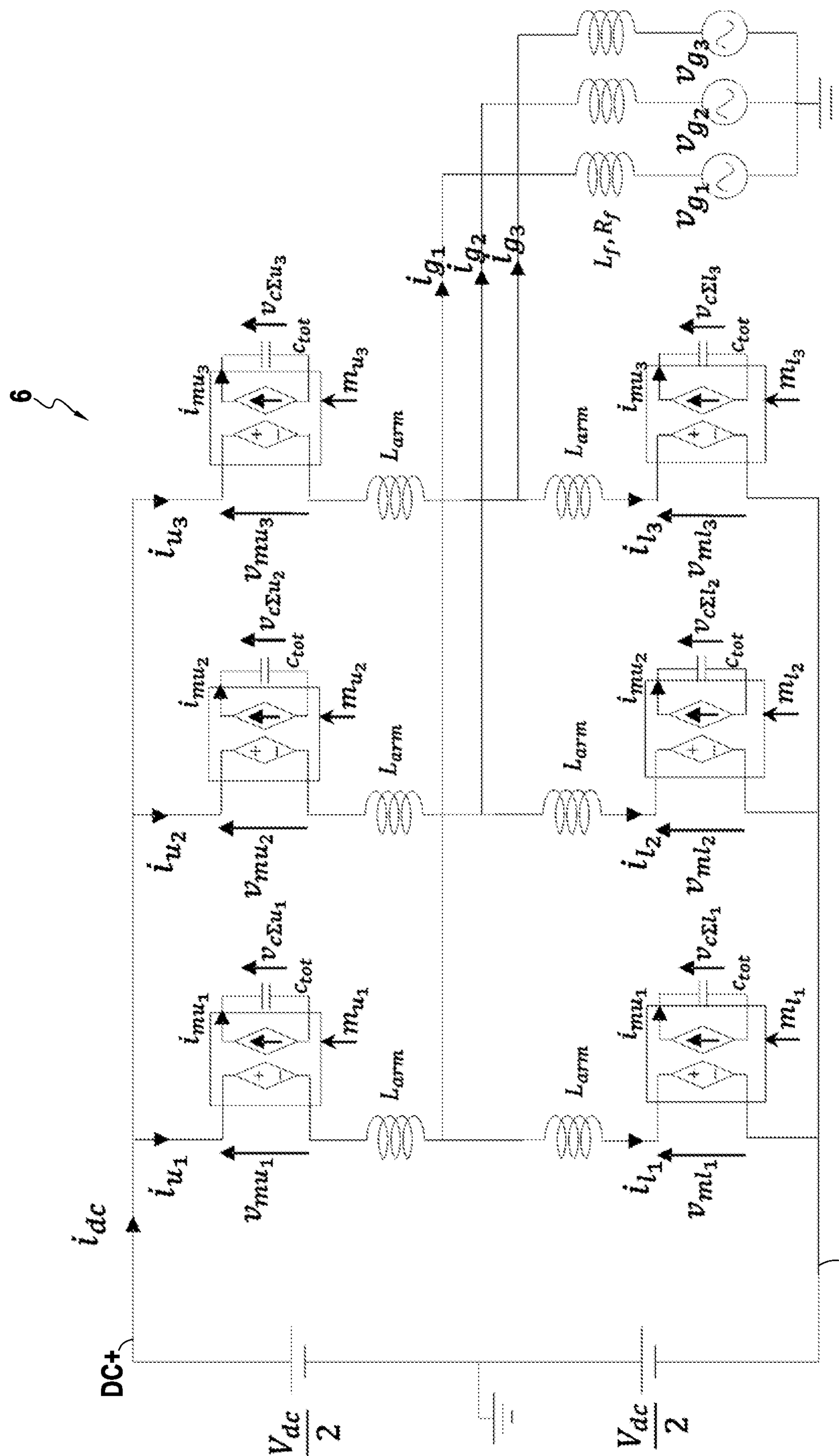


FIG.4
ART ANTERIEUR

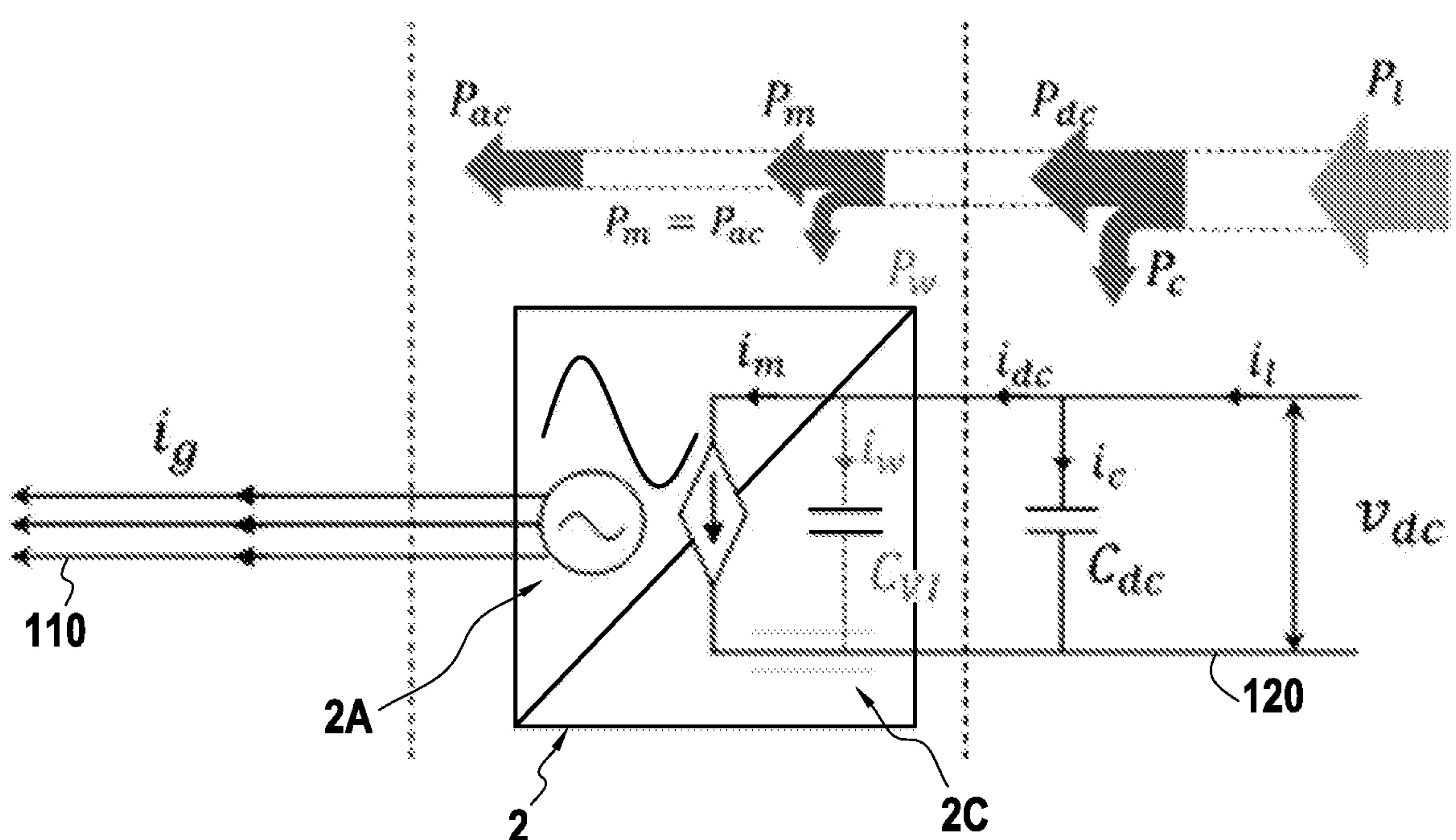
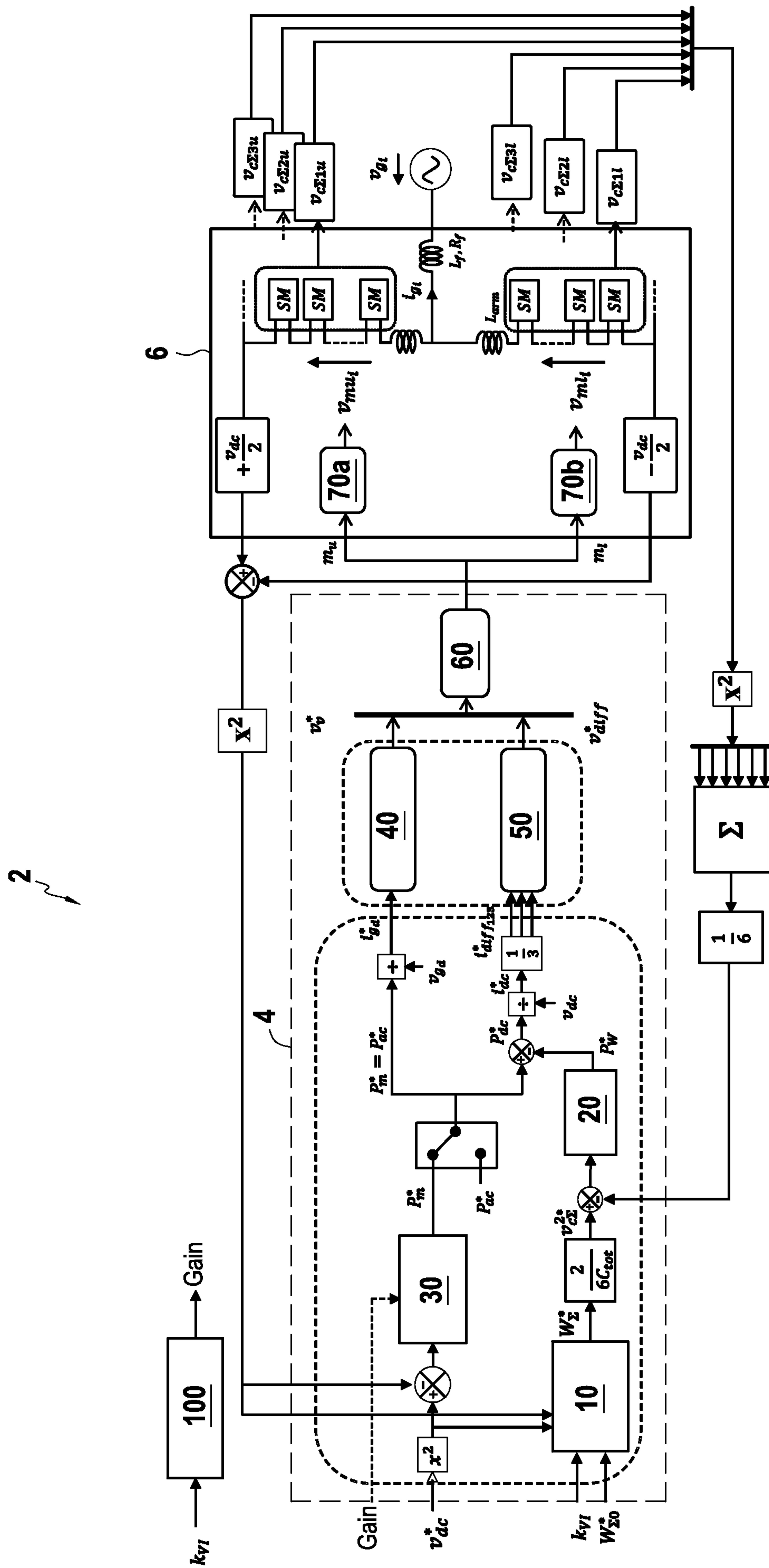


FIG.5

5/11



CO.
G.
LL

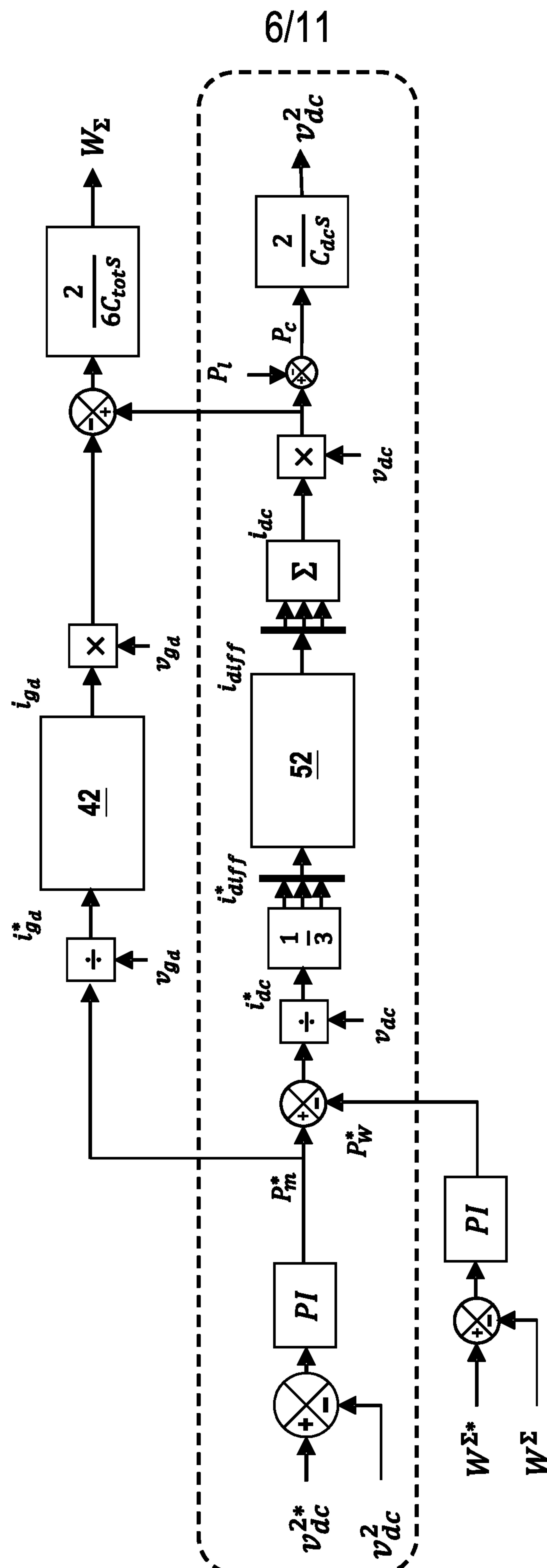


FIG.7

7/11

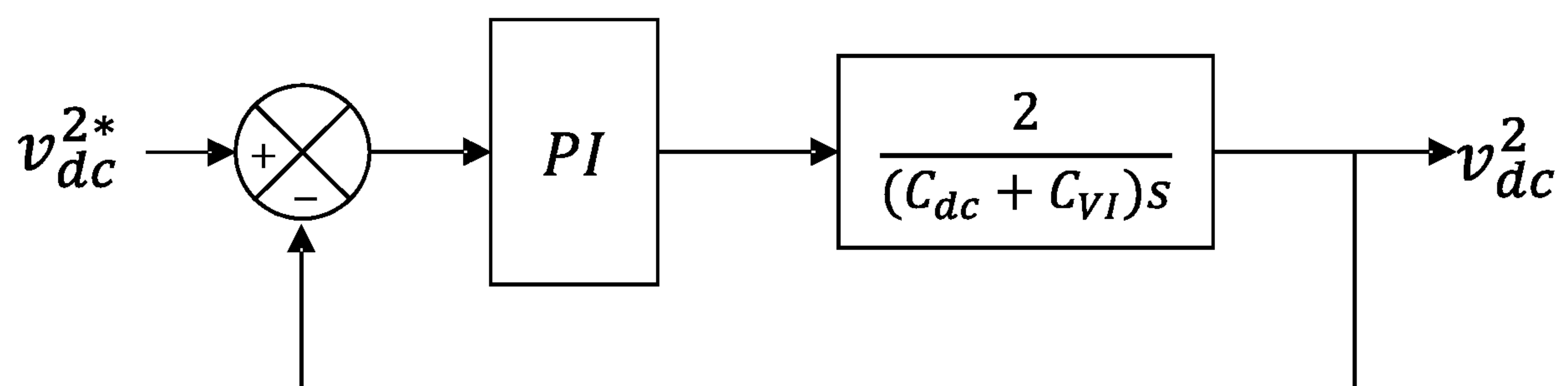


FIG.8

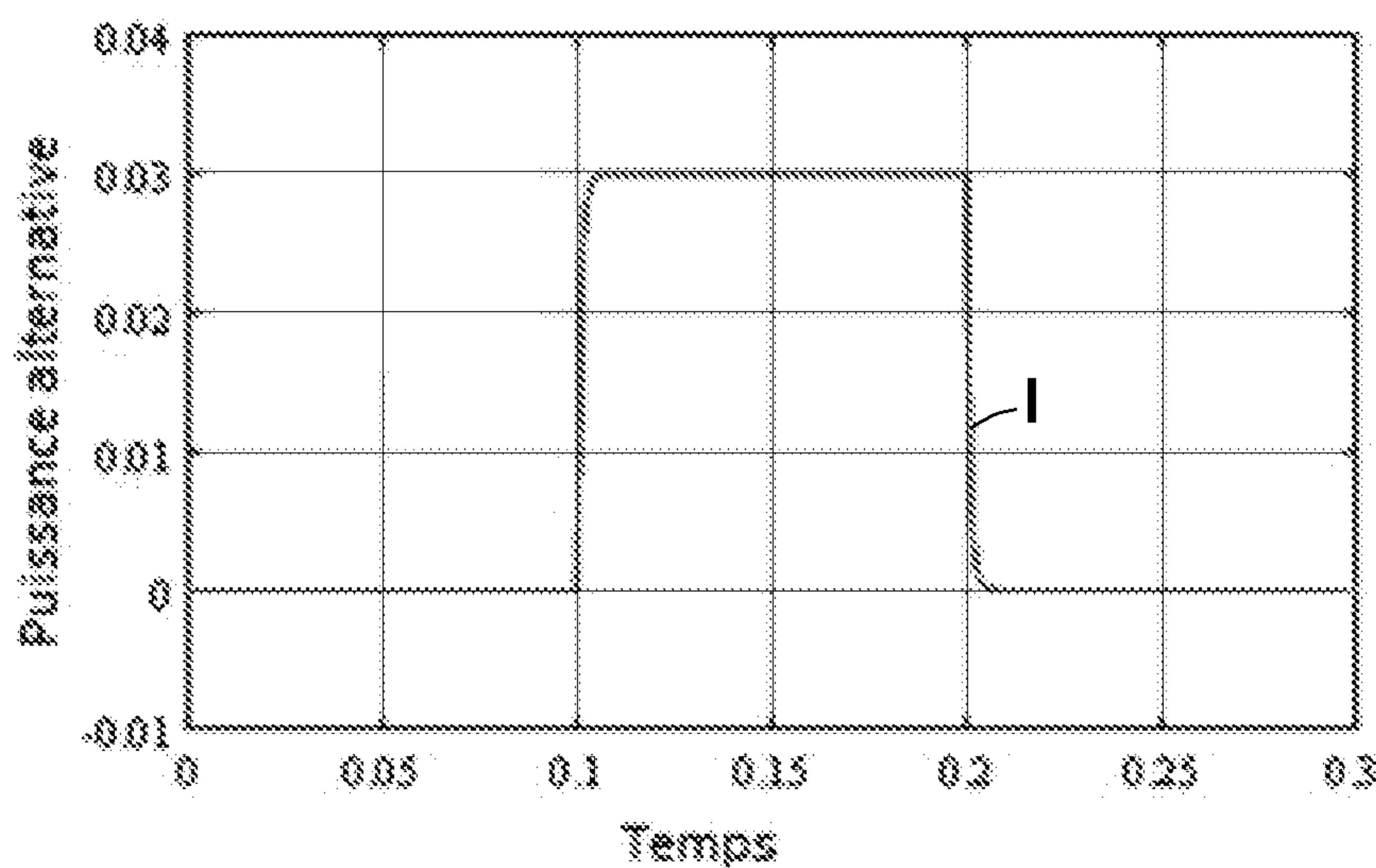


FIG.9A

8/11

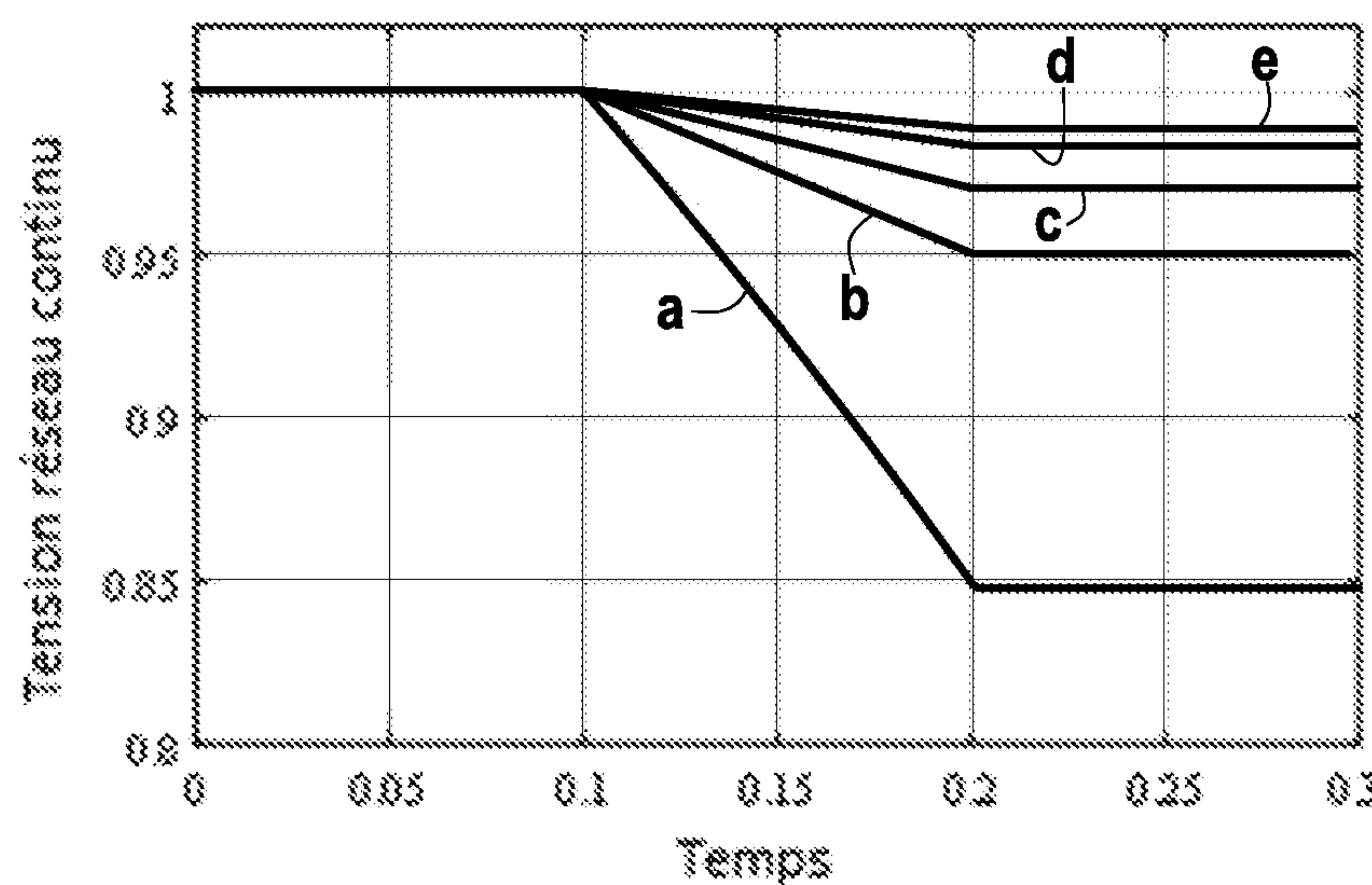


FIG.9B

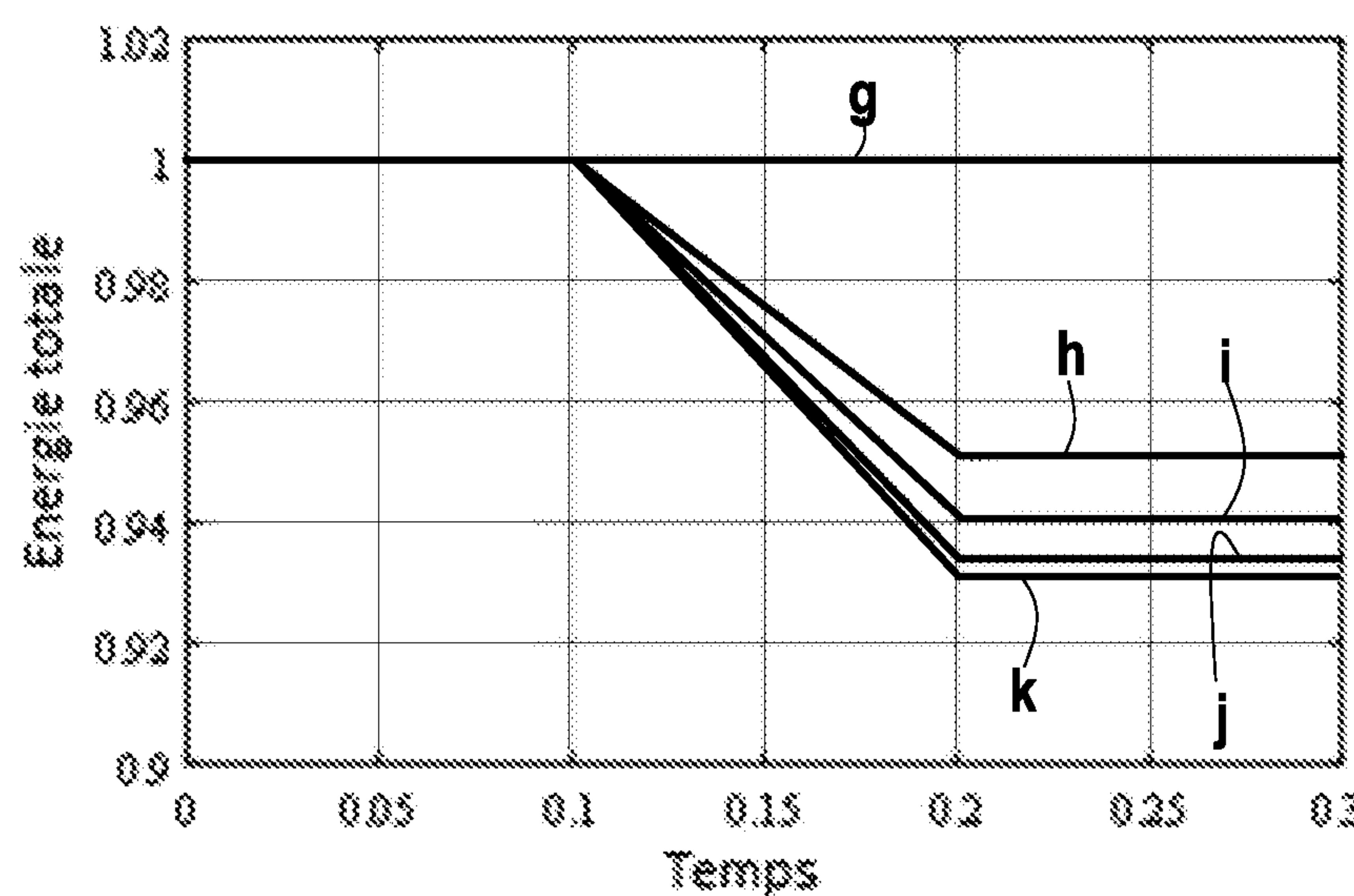


FIG.9C

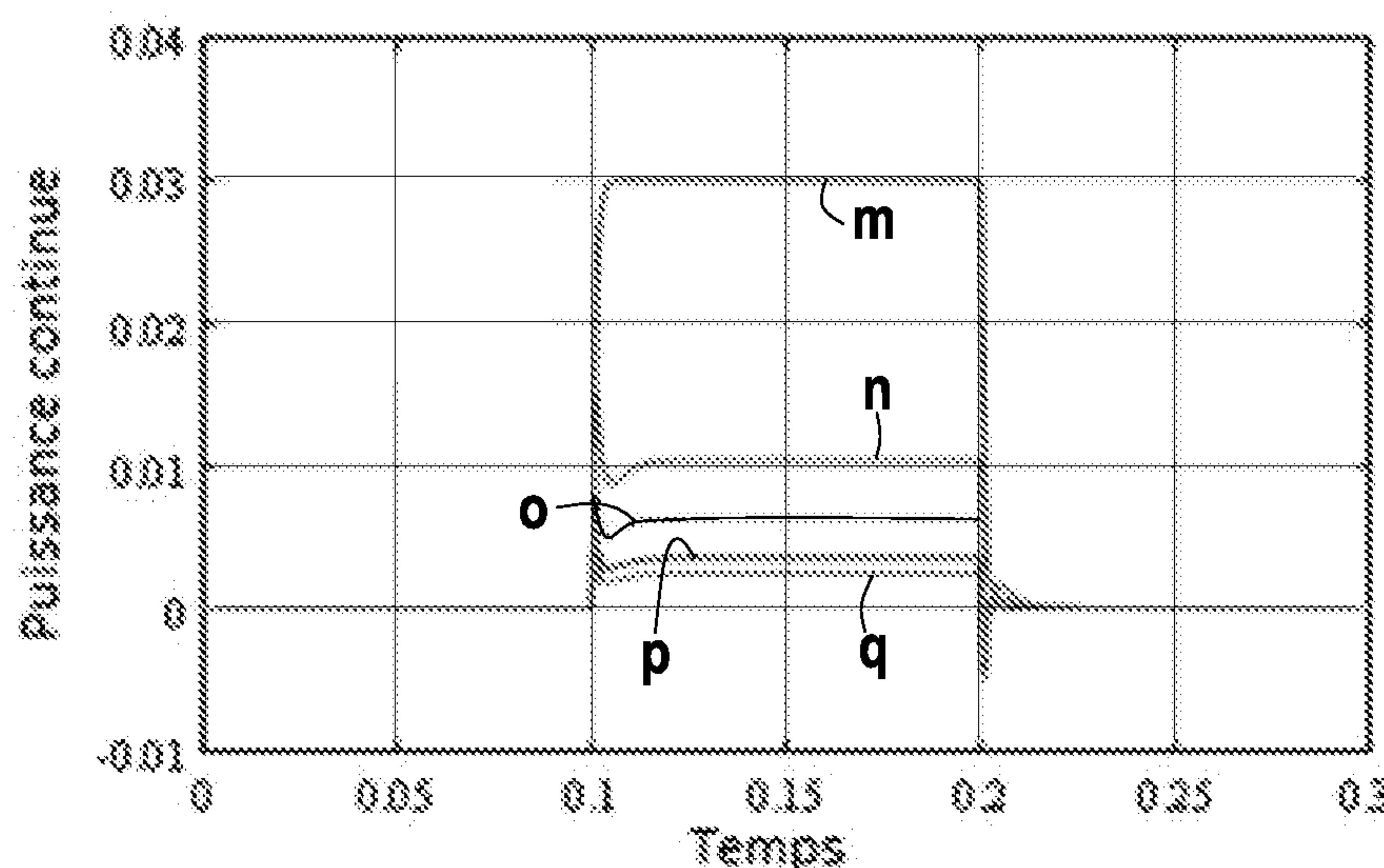


FIG.9D

9/11

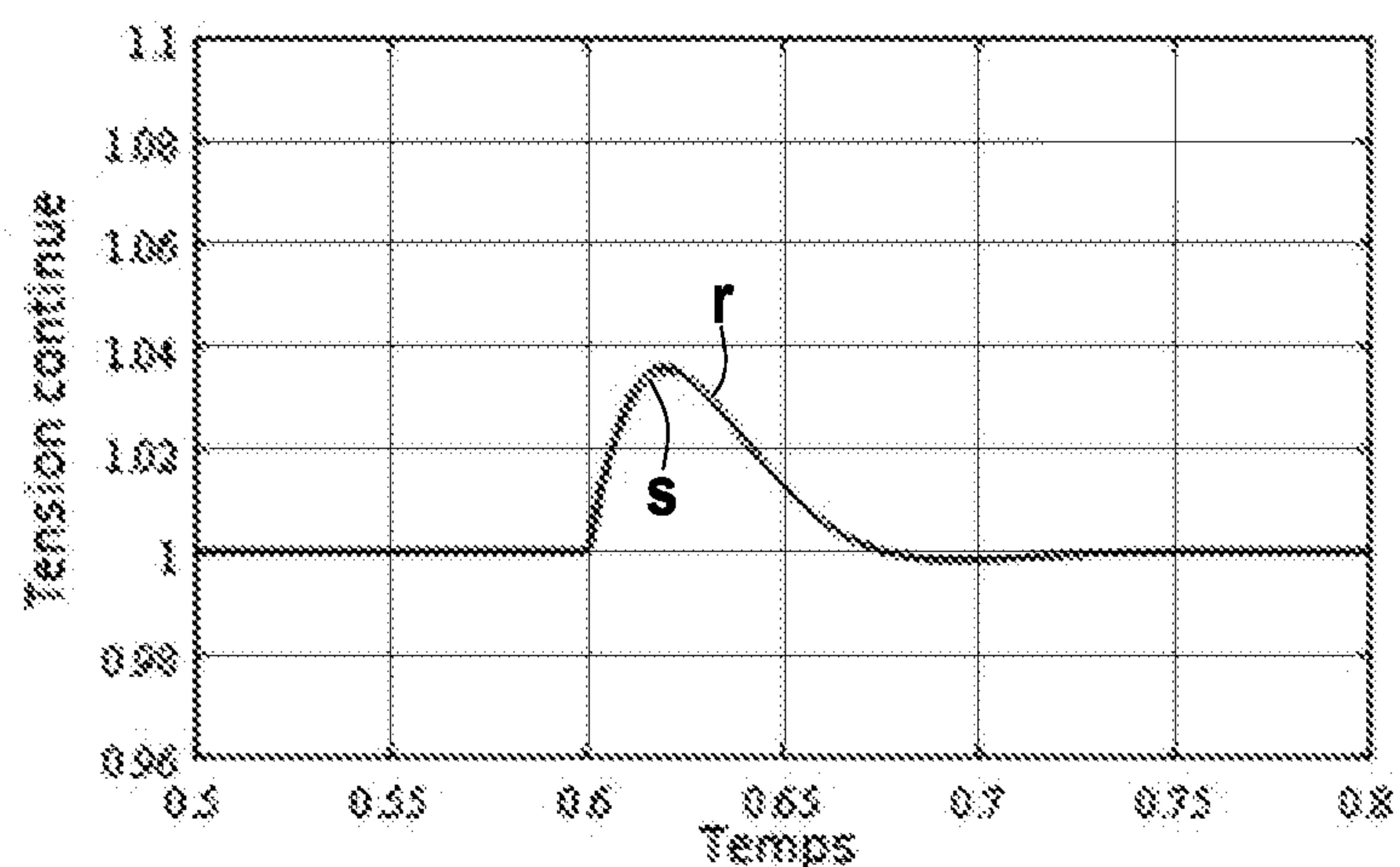


FIG.10A

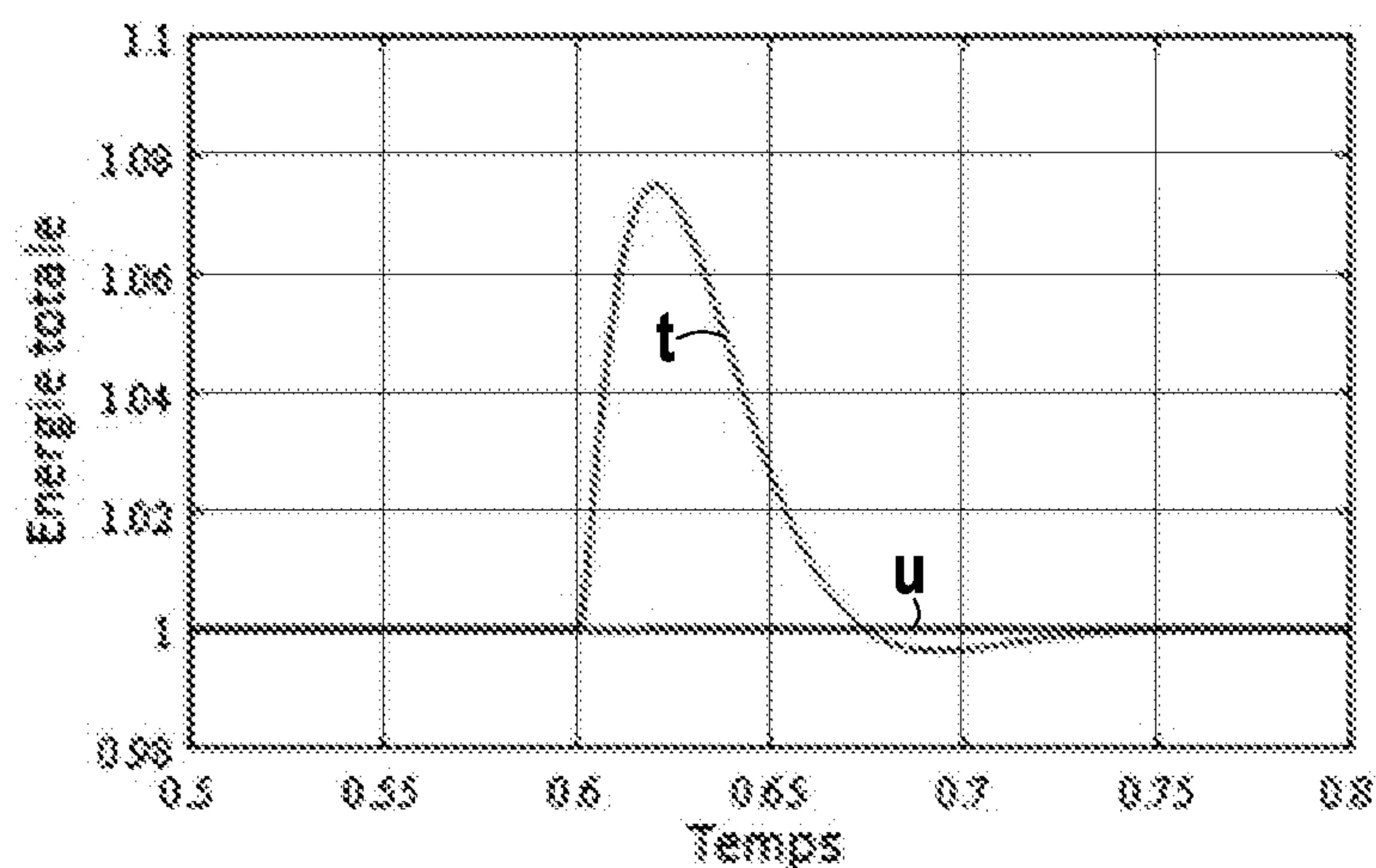


FIG.10B

10/11

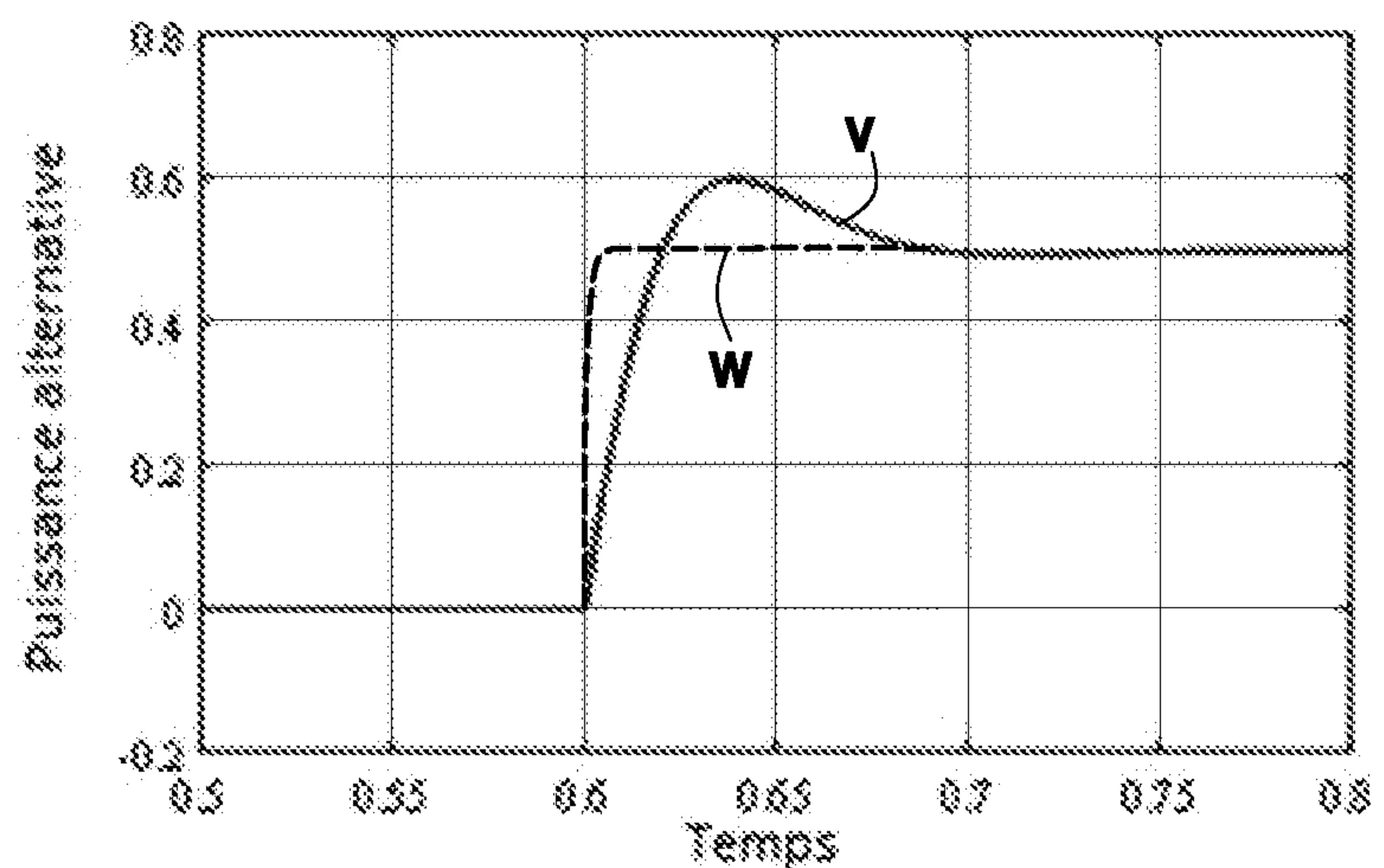


FIG.10C

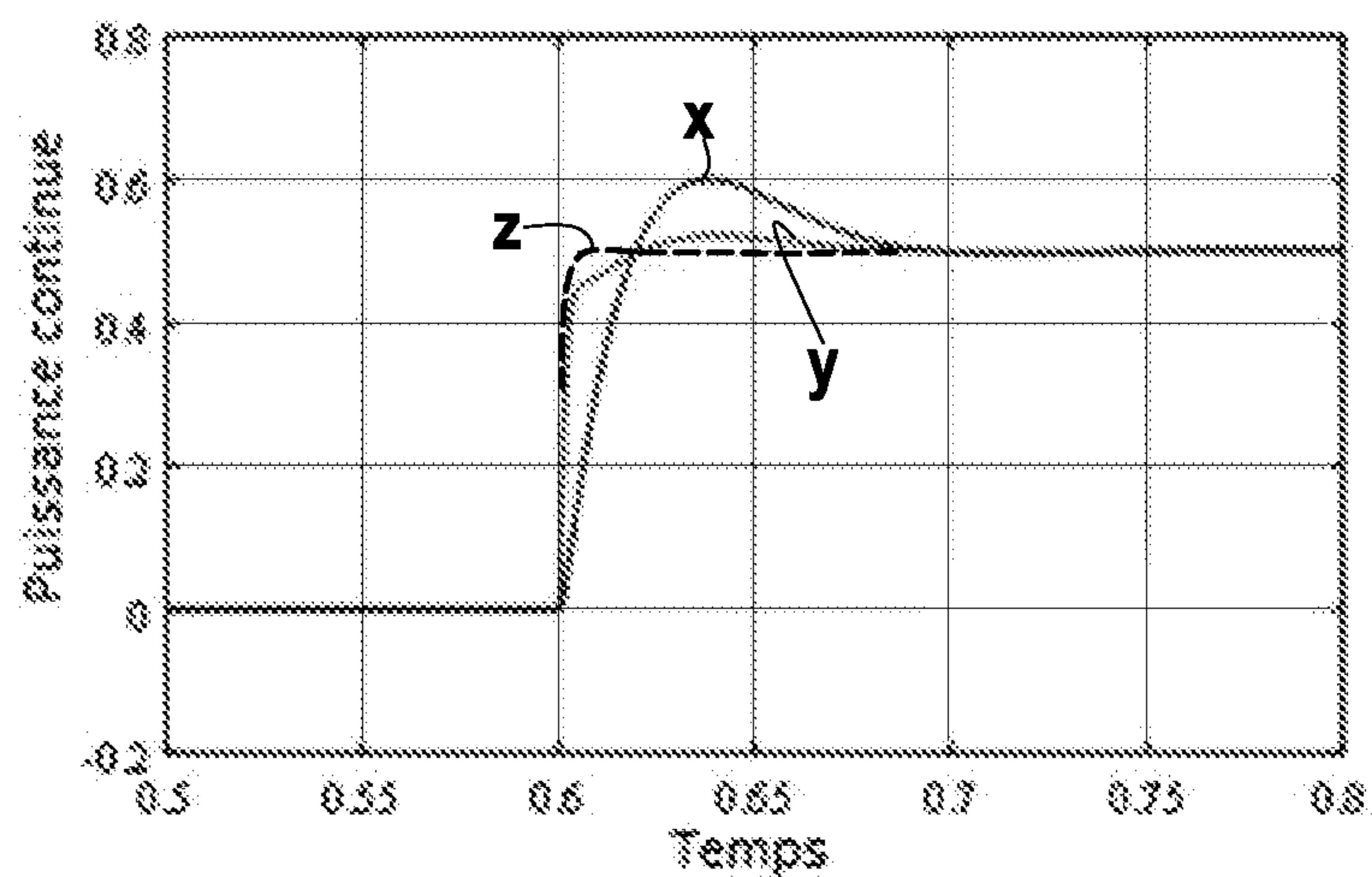
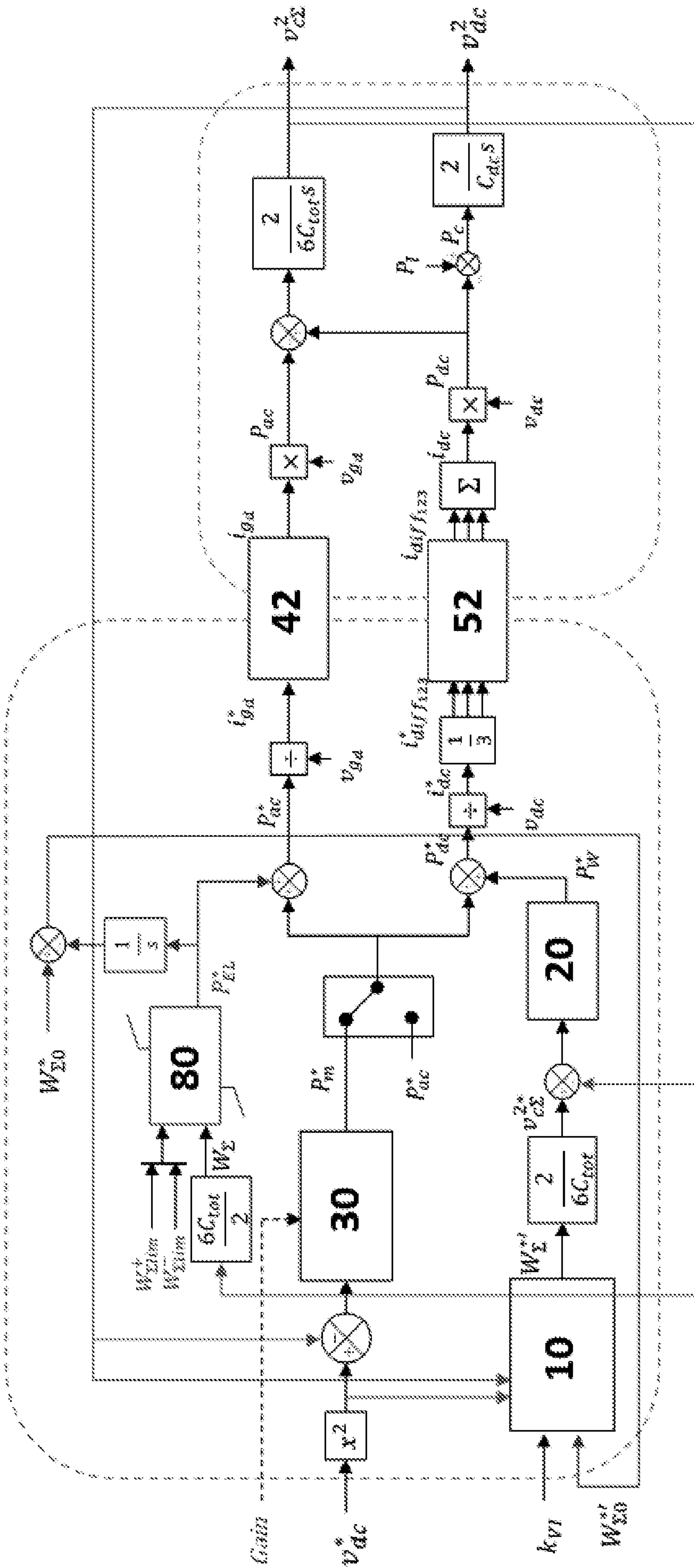


FIG.10D

11/11



—
—
—
—
—

FIG.6

