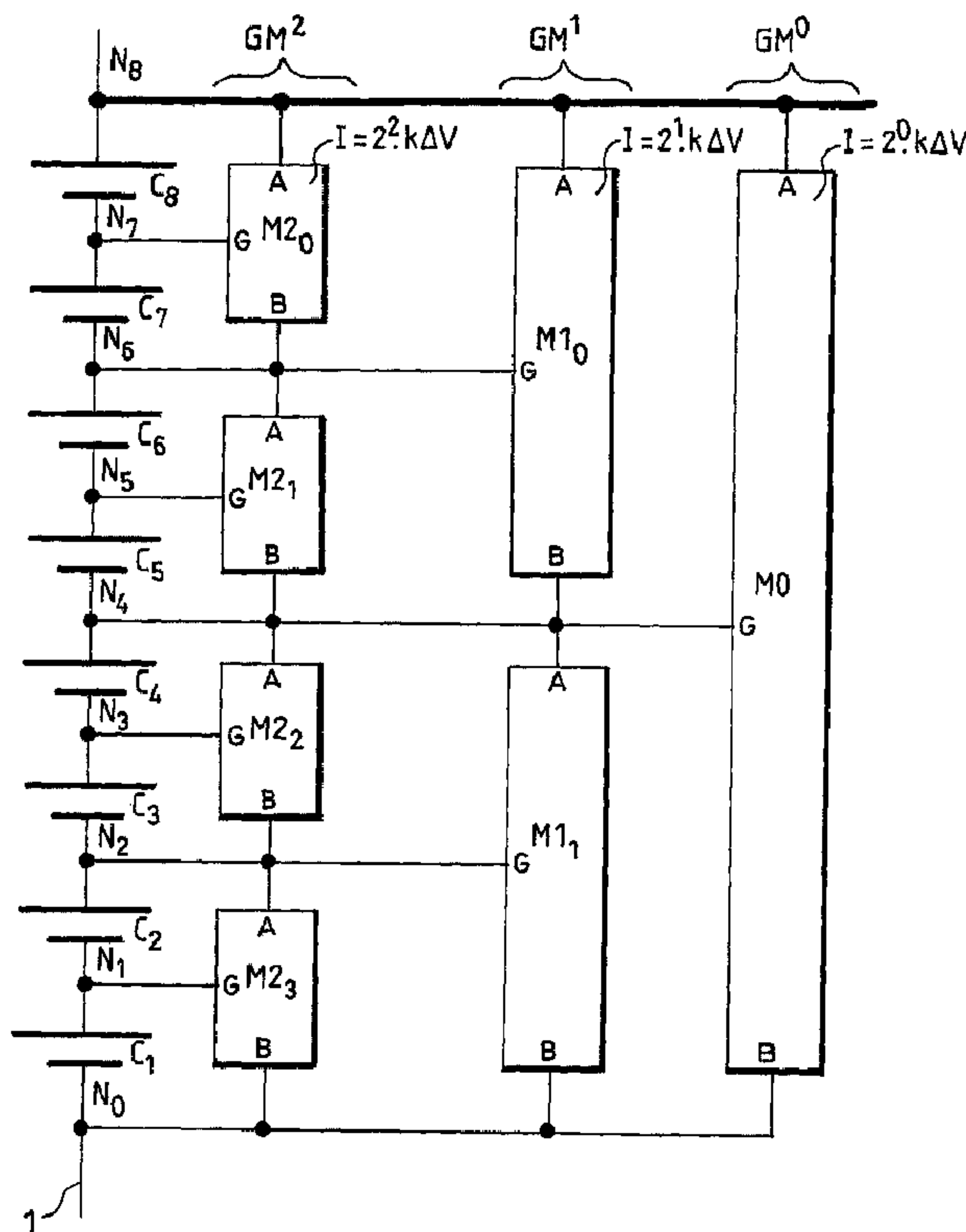




(86) Date de dépôt PCT/PCT Filing Date: 2004/09/27  
 (87) Date publication PCT/PCT Publication Date: 2005/04/07  
 (85) Entrée phase nationale/National Entry: 2006/03/29  
 (86) N° demande PCT/PCT Application No.: EP 2004/052325  
 (87) N° publication PCT/PCT Publication No.: 2005/031942  
 (30) Priorité/Priority: 2003/09/29 (FR03 11359)

(51) Cl.Int./Int.Cl. *H02J 7/00* (2006.01)  
 (71) Demandeur/Applicant:  
THALES, FR  
 (72) Inventeur/Inventor:  
TAURAND, CHRISTOPHE, FR  
 (74) Agent: GOUDREAU GAGE DUBUC

(54) Titre : SYSTEME D'EQUILIBRAGE D'UN DISPOSITIF DE STOCKAGE D'ENERGIE  
 (54) Title: SYSTEM FOR EQUILIBRATING AN ENERGY STORAGE DEVICE



(57) Abrégé/Abstract:

Dans un dispositif de stockage d'énergie comprenant un réseau série de n éléments de stockage C1, ... Cn, apte à fournir une tension continue à ses bornes, un système d'équilibrage des éléments est prévu comprenant une pluralité de modules Mi,j de transfert de charge, chaque module Mi,j assurant un transfert de charge bidirectionnel et linéaire au premier ordre entre deux éléments de stockage Ci et Ci dudit réseau. Chaque élément de stockage d'énergie est connecté à p modules, p ≤ n-1, chacun des p modules appariant ledit élément avec un autre élément du réseau. On réduit ainsi le temps nécessaire au rééquilibrage.

(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  
7 avril 2005 (07.04.2005)

PCT

(10) Numéro de publication internationale  
**WO 2005/031942 A1**(51) Classification internationale des brevets<sup>7</sup> : H02J 7/00(21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/EP2004/052325(22) Date de dépôt international :  
27 septembre 2004 (27.09.2004)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :  
03 11359 29 septembre 2003 (29.09.2003) FR(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US)  
: THALES [FR/FR]; 45, rue de Villiers, F-92200  
NEUILLY-SUR-SEINE (FR).

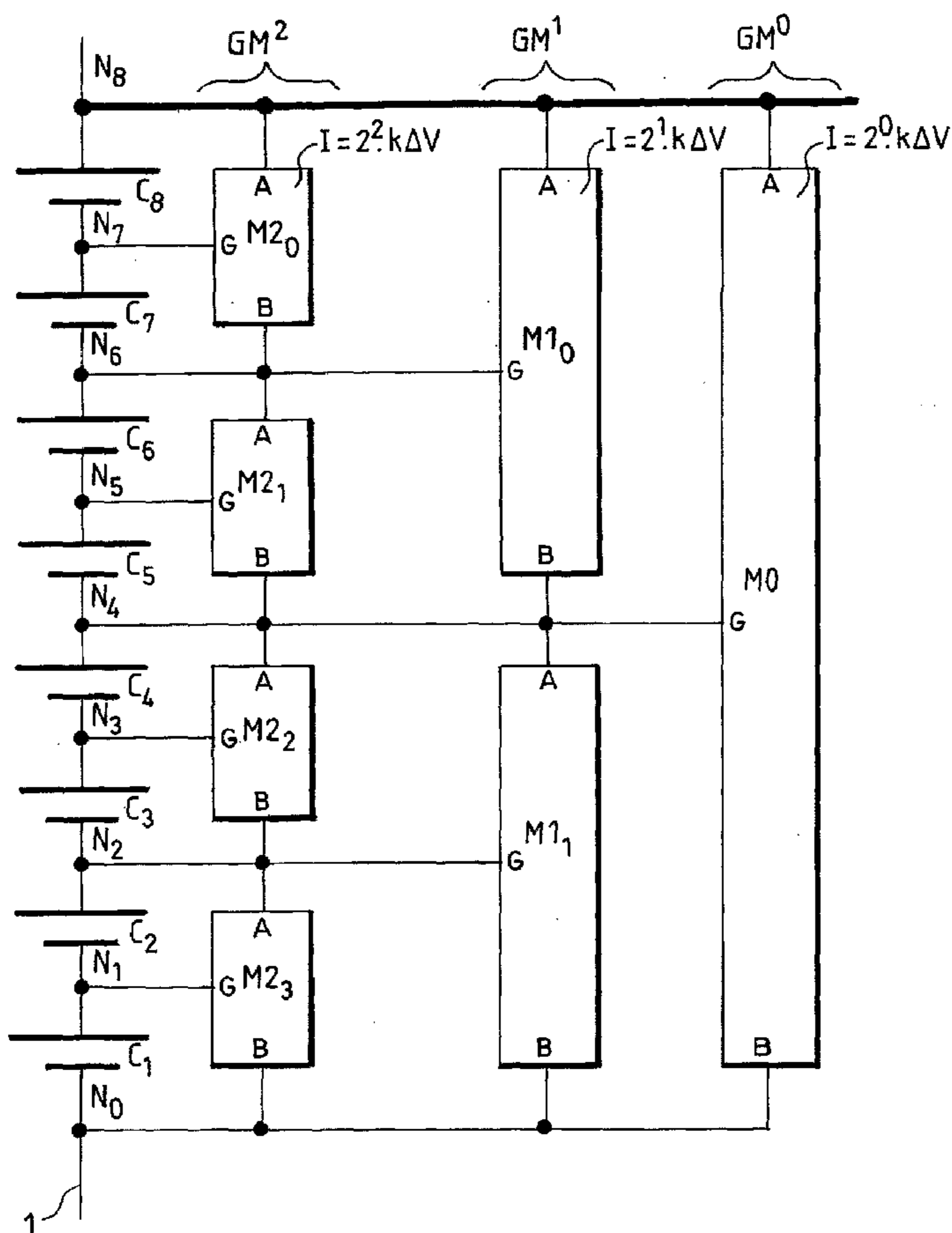
(72) Inventeur; et

(75) Inventeur/Déposant (pour US seulement) : TAURAND,  
Christophe [FR/FR]; THALES Intellectual Property,  
31-33, avenue Aristide Briand, F-94117 ARCUEIL Cedex  
(FR).(74) Mandataires : ESSELIN, Sophie etc.; THALES Intellec-  
tual Property, 31-33, avenue Aristide Briand, F-94117 AR-  
CUEIL (FR).(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de  
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT,  
AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO,  
CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,  
GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG,  
KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG,  
MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: SYSTEM FOR EQUILIBRATING AN ENERGY STORAGE DEVICE

(54) Titre : SYSTEME D'EQUILIBRAGE D'UN DISPOSITIF DE STOCKAGE D'ENERGIE



(57) Abstract: The invention relates to an energy storage device, comprising a serial network of storage elements  $C_1, \dots, C_n$ , embodied for the continuous supply of a voltage to the pins thereof, provided with an equilibrating system for the elements, comprising a number of charge transfer modules  $M_{i,j}$ , each module  $M_{i,j}$  providing a linear and bi-directional transfer of charge of the first order between two storage elements  $C_i$  and  $C_j$  of said network. Each energy storage element is connected to  $p$  modules,  $p = n - 1$ , each of the  $p$  modules pairing said element with another element of the network. The time for re-equilibration is hence reduced.

(57) Abrégé : Dans un dispositif de stockage d'énergie comprenant un réseau série de  $n$  éléments de stockage  $C_1, \dots, C_n$ , apte à fournir une tension continue à ses bornes, un système d'équilibrage des éléments est prévu comprenant une pluralité de modules  $M_{i,j}$  de transfert de charge, chaque module  $M_{i,j}$  assurant un transfert de charge bidirectionnel et linéaire au premier ordre entre deux éléments de stockage  $C_i$  et  $C_j$  dudit réseau. Chaque élément de stockage d'énergie est connecté à  $p$  modules,  $p \leq n - 1$ , chacun des  $p$  modules appariant ledit élément avec un autre élément du réseau. On réduit ainsi le temps nécessaire au rééquilibrage.

**WO 2005/031942 A1**

PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN,  
TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

- (84) **États désignés** (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Publiée :**

- avec rapport de recherche internationale
- avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues

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

## SYSTEME D'EQUILIBRAGE D'UN DISPOSITIF DE STOCKAGE D'ENERGIE

La présente invention concerne un système d'équilibrage d'un dispositif de stockage d'énergie, notamment à base de cellules de batterie rechargeable, telles des cellules électrochimiques ou des supercapacités.

Ces dispositifs de stockage sont couramment utilisés dans les milieux industriels et aéronautique, comme source d'énergie de secours, lorsque le réseau d'alimentation est défectueux, ou au démarrage. Il est très important de maintenir ces dispositifs en état de charge complète, car ils doivent être opérationnels sur demande. Ceci suppose une surveillance de leur charge avec déclenchement de leur recharge le cas échéant, et une recharge après usage.

Ces dispositifs comprennent habituellement une pluralité d'éléments de stockage identiques connectés en série, par exemple des cellules électrochimiques ou des supercapacités. Le nombre d'éléments dépend de l'application visée : typiquement 24 volts dans le domaine industriel, 28 volts dans le domaine de l'aéronautique et 42 volts dans le domaine de l'automobile. Si on prend des cellules de type lithium-ion (4 volts pour une cellule chargée) et une application aéronautique, un dispositif de stockage d'énergie comprend ainsi typiquement 7 éléments. Un chargeur, comprenant un convertisseur de puissance alimenté par le réseau principal et dont la sortie est régulée en tension et en courant, permet de charger les cellules qui sont connectées en série.

Les éléments de stockage utilisés sont tels que la tension à leur bornes est fonction de l'état de charge. De manière connue, ces éléments de stockage supportent mal les surcharges et/ou les décharges trop importantes. Si on prend l'exemple de cellules de batterie rechargeable de type lithium-ion, ces cellules ont des performances énergiques et massiques très intéressantes, mais posent des problèmes de gestion de leur charge au fur et à mesure de leur exploitation. Ceci est gênant pour des applications dans lesquelles une longue durée et une grande fiabilité sont recherchées. Notamment, ces cellules sont très sensibles aux surtensions, ce qui nécessite un contrôle de la tension aux bornes de chaque cellule. Si on prend l'exemple des supercapacités qui sont des capacités obtenues par des

## 2

empilements de films minces, et qui se caractérisent par une faible tension (de l'ordre du volt à quelques volts), et une valeur de capacité très élevée, de l'ordre de plusieurs farads, la tension aux bornes de chaque capacité peut se décaler par rapport à celle des autres capacités en raison de différence de  
5 valeurs et ou de courants de fuite.

Mis en série, les éléments de stockage ne vont donc pas tous se comporter de la même façon : ils peuvent être dans un état de charge initial différent ; certains peuvent avoir des courants de fuite ; d'autres une capacité de stockage énergétique différente, soit due à une dispersion initiale  
10 naturelle entre éléments soit due à un vieillissement. Toutes ces différences de comportement se traduisent par un temps de recharge et des tensions qui varient. Si on gère la recharge du dispositif de stockage en observant la tension à ses bornes, si une cellule se recharge plus vite que les autres, elle va se retrouver en surcharge (tension supérieure à 4 volts pour une cellule  
15 au lithium). Inversement, une cellule beaucoup plus lente à se recharger va se retrouver en sous-charge (tension en dessous de 3,5 volts pour une cellule au lithium). Dans les deux cas, ce sont des conditions très défavorables à la fiabilité de ces cellules, et par voie de conséquence, du dispositif de stockage lui-même. En outre, les différences d'état de charges  
20 qui peuvent exister initialement vont s'accroître au fil des cycles de charge/décharge, induisant un mauvais fonctionnement du dispositif, par dégradation prématurée de ses performances.

Pour ces différentes raisons, une gestion rigoureuse d'un tel dispositif de stockage d'énergie pour en améliorer la fiabilité ne peut se baser  
25 sur le seul contrôle de la tension disponible aux bornes terminales du dispositif. On utilise ainsi une unité de contrôle de batterie généralement dénommée BMU selon l'acronyme anglais pour "*Battery Monitoring Unit*", qui agit comme un mécanisme de protection. Cette BMU vérifie que chacun des éléments de stockage ne dépasse pas une tension de seuil critique en  
30 charge et/ou décharge. En outre, elle contrôle l'activation d'un système d'équilibrage des éléments série du dispositif de stockage d'énergie. La fonction d'un tel système d'équilibrage est de maintenir une tension identique sur tous les éléments de stockage. Le principe de base de l'équilibrage consiste en la surveillance par la BMU de toutes les différences de tension  
35 entre les éléments série du dispositif de stockage, pour déclencher le

## 3

5 système d'équilibrage dès que au moins une de ces différences de tension dépasse une certaine valeur critique. Par exemple, si on dépasse 60 millivolts entre l'élément de stockage le plus chargé et l'élément de stockage le moins chargé, le système d'équilibrage est déclenché. Le système d'équilibrage sera arrêté lorsque la différence de tension repassera à une valeur acceptable, par exemple 30 millivolts. Le principe de base du rééquilibrage est de prélever une quantité d'énergie sur le ou les éléments les plus chargés pour la dissiper ou la transférer sur les éléments qui sont le moins chargés. En aéronautique, un tel système d'équilibrage gagne à 10 pouvoir équilibrer les charges tant en mode de charge qu'en mode d'attente d'utilisation de la réserve d'énergie, ceci afin d'en augmenter la disponibilité.

Un système d'équilibrage de l'état de la technique est représenté sur la figure 1. Dans cet exemple, le dispositif de stockage d'énergie 1 comporte  $n=6$  éléments de stockage en série,  $C_1$  à  $C_6$ . Le système d'équilibrage des tensions consiste à prévoir  $n-1$  modules de transfert de charge bidirectionnelle identiques, chaque module de transfert de charge  $M_{i,j+1}$  étant affecté à deux éléments de stockage d'énergie  $C_i$  et  $C_{i+1}$  connectés en série : Dans l'exemple on a ainsi un module  $M_{1,2}$  qui appaire les éléments de stockage  $C_1$  et  $C_2$  pour effectuer le cas échéant un transfert de charge entre ces deux éléments. 20

Les modules de transfert de charge sont commandés (com) par le système de gestion de charge BMU, quand ce dernier détecte un trop grand écart de tension entre deux éléments de stockage du réseau série. Quand ils sont activés, chaque module de transfert de charge assure un transfert de charge entre les deux éléments de stockage ainsi appairés, en injectant un 25 courant proportionnel à la différence de tension entre les deux éléments de stockage vers l'élément de stockage présentant la tension à ses bornes la plus faible. Un module de transfert de charge  $M_{i-1,i}$  associé à la paire d'éléments de stockage  $C_{i-1}$ ,  $C_i$ , peut par exemple être réalisé par un circuit électronique de type tripôle à pompe de charge comme illustré sur la figure 2. Ce circuit comprend trois bornes AB et G. L'élément de stockage  $C_i$  est connecté entre les bornes A et G, et l'élément de stockage  $C_{i-1}$  est connecté entre les bornes G et B, le point G étant ainsi connecté au nœud de connexion entre les deux éléments adjacents  $C_i$  et  $C_{i-1}$ . Ce circuit tripôle 30 comprend dans cet exemple de réalisation, un condensateur de charge 2 et 35

## 4

deux paires d'interrupteurs haut et bas (T1, B1) (T2, B2), par lesquels le condensateur est alternativement connecté en parallèle sur un élément de stockage,  $C_i$ , par les bornes A et G, puis sur l'autre  $C_{i+1}$ , par les bornes G et B. La commutation des interrupteurs suit la fréquence horloge du signal de commande com, fourni par la BMU. L'application d'un signal de commande com de type binaire, à la fréquence  $f$ , provoque la commutation alternative des deux paires, la première paire (T1, B1) sur le niveau haut ("1") du signal com et la deuxième paire (T2, B2) sur le niveau bas ("0").

Un inconvénient d'un tel système d'équilibrage est que l'excédent d'énergie sur un élément de stockage est transféré sur l'élément de stockage adjacent, et ainsi de suite selon un mode de transfert chaîné, l'arrangement des modules de transfert de charge correspondant à la structure série des éléments de stockage.

Sur le plan énergétique, ce n'est pas très bon : si le premier module assure un rendement énergétique de 90%, on perd 10% de module en module.

En outre les modules de transfert de charge sont généralement dimensionnés pour passer une certaine quantité d'énergie correspondant typiquement à celle due à un seul élément déséquilibré dans le réseau. Si deux éléments sont déséquilibrés dans le réseau, le module est ainsi limité par sa capacité en courant. Aussi, le temps d'équilibrage du réseau série sera-t-il deux fois plus long.

Un but de l'invention est de proposer un système d'équilibrage optimal de  $n$  éléments série d'un dispositif de stockage d'énergie, ce système d'équilibrage pouvant être activé tant en mode de charge qu'en mode d'utilisation de la réserve d'énergie.

Ce but est atteint par un système d'équilibrage comprenant  $h$  modules de transfert de charges bidirectionnel. Selon l'invention, à chaque élément de stockage est associé  $p$  modules, chaque module appairant ledit élément de stockage à un autre élément de stockage du dispositif de stockage d'énergie.

Il en résulte pour chacun des  $n$  éléments de stockage du dispositif de stockage d'énergie, un transfert de charge correspondant à un courant proportionnel à la moyenne de tension sur les  $p$  éléments associés.

## 5

Les modules de transfert sont plus nombreux, mais sont aussi plus petits, puisque pour chaque élément de stockage du réseau, le transfert de charge est distribué par  $p$  modules.

L'équilibrage du réseau converge aussi plus rapidement.

5 Ainsi l'invention concerne un dispositif de stockage d'énergie comprenant un réseau série de  $n$  éléments de stockage apte à fournir une tension continue à ses bornes, et une pluralité de modules de transfert de charge, chaque module assurant un transfert de charge bidirectionnel entre deux éléments de stockage dudit réseau.

10 Selon l'invention, un système d'équilibrage optimal est obtenu en prévoyant que le transfert de charge sur chacun des  $n$  éléments du réseau est distribué sur chacun des  $n-1$  autres éléments du réseau série. Ceci est atteint en associant à chacun des  $n$  éléments de stockage,  $n-1$  modules de transfert, chaque module étant associé à un parmi les  $n-1$  autres éléments  
15 de stockage.

Un tel système nécessite  $n(n-1)/2$  modules de transfert de charge.

L'invention concerne ainsi un dispositif de stockage d'énergie comprenant un réseau série de  $n$  éléments de stockage apte à fournir une tension continue à ses bornes, et une pluralité de modules de transfert de  
20 charge, chaque module assurant un transfert de charge bidirectionnel entre deux éléments de stockage dudit réseau, caractérisé en ce que qu'il comprend  $n(n-1)/2$  modules identiques, chaque élément de stockage étant appairé à chacun des autres  $n-1$  éléments de stockage du réseau par  $(n-1)$  modules associés.

25 Selon un autre aspect de l'invention, pour le cas où  $n=2^m$ , on prévoit avantageusement que le dispositif comprend  $n-1$  modules de type tripôle, distribués en  $m-1$  groupes de rang 0 à  $m-1$ , tel qu'au groupe de rang  $i$  correspond  $2^i$  modules, chacun associé à  $n/2^i$  éléments arrangés en deux ensembles de manière à former une paire, les modules dudit groupe de rang  
30  $i \neq 0$  étant dimensionnés pour avoir un gain en courant  $2^i$  fois plus important que le gain en courant du module du groupe de rang 0.

Selon un autre aspect de l'invention, pour le cas où  $n=2^m-x$ , caractérisé en ce qu'il comprend un nombre  $l$  de modules de type tripôle, avec  $n-1-x < l \leq n-1$  modules, distribués en  $m-1$  groupes de rang 0 à  $m-1$ , tel  
35 qu'au groupe de rang  $i$  correspond au plus  $2^i$  modules, chacun associé à  $n/2^i$

## 6

éléments arrangés en deux ensembles de manière à former une paire, les modules dudit groupe de rang  $i \neq 0$  étant dimensionnés pour avoir un gain en courant  $2^i$  fois plus important que le gain en courant du module du groupe de rang 0.

5

D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description qui suit, faite à titre indicatif et non limitatif de l'invention et en référence aux dessins annexés, dans lesquels :

- 10 - la figure 1 illustre un système d'équilibrage selon l'état de la technique;
- la figure 2 illustre un exemple de module de transfert de charge qui peut-être utilisé dans un système d'équilibrage;
- la figure 3 illustre un premier mode de réalisation d'un système  
15 d'équilibrage selon l'invention;
- la figure 4 illustre un exemple de module de transfert de charge qui peut-être utilisé dans un système d'équilibrage selon l'invention;
- la figure 5 illustre un autre mode de réalisation d'un système de rééquilibrage selon l'invention;
- 20 - les figures 6a, 6b et 6c illustrent le phénomène d'équilibrage obtenu avec un système d'équilibrage tel que représenté sur la figure 5; et
- les figures 7a et 7b illustrent le gain de temps d'équilibrage obtenu avec un système d'équilibrage selon l'invention (fig.7a) par rapport à un système selon l'état de la technique (fig.7b) et
- 25 - la figure 8 représente une variante de réalisation du système de rééquilibrage de la figure 5.

Un système d'équilibrage selon l'invention comprend  $h$  modules de transfert de charge,  $h \geq n-1$ .

30 Le principe de base de l'invention est pour chaque élément de stockage du réseau série, de distribuer le transfert de charge sur  $p$  éléments,  $p \leq n-1$ .

Soit  $C_i$  un élément de stockage.  $p$  modules de transfert de charge lui sont associés, chaque module appairant cet élément  $C_i$  avec un autre élément de stockage du dispositif. Chaque module assure ainsi un transfert  
35 direct d'une partie de l'énergie entre l'élément  $C_i$  et chacun des  $p$  éléments

## 7

qui lui sont appairés. Le courant injecté est ainsi proportionnel à la différence de tension entre l'élément  $C_i$  et la moyenne des tensions aux bornes des  $p$  autres éléments.

Les modules de transfert de charge doivent être dimensionnés en  
5 nombre et en gain en courant pour qu'au final, l'énergie à transférer se trouvent distribuée sur tous les éléments.

Un premier mode de réalisation de l'invention est représenté sur la figure 3. Dans ce mode de réalisation, on a  $p = n - 1$ . Le nombre total de  
10 modules est ainsi égal à  $n(n-1)/2$ .

Chaque élément de stockage  $C_i$  est appairé avec chacun des  $n-1$  autres éléments du dispositif de stockage par un module de transfert de charge propre. Cet arrangement combinatoire est représenté sur la figure 3 en utilisant la représentation dite triangle de pascal. Les éléments de  
15 stockage d'énergie  $C_1$  à  $C_7$  sont représentés sur la diagonale. Dans le triangle pascal, on trouve les  $n(n-1)/2$  modules de transfert de charge qui permettent de relier chacun des éléments de la diagonale à un autre élément de cette diagonale.

Par exemple, l'élément  $C_7$  est appairé :

- 20 - à l'élément  $C_6$ , par le module  $M_{7,6}$ ;
- à l'élément  $C_5$ , par le module  $M_{7,5}$ ;
- à l'élément  $C_4$ , par le module  $M_{7,4}$ ;
- à l'élément  $C_3$ , par le module  $M_{7,3}$ ;
- à l'élément  $C_2$ , par le module  $M_{7,2}$ ;
- 25 - à l'élément  $C_1$ , par le module  $M_{7,1}$ .

Cet arrangement suppose l'utilisation comme module de transfert de charge des circuits électroniques de type tripôle comme représenté sur la figure 2, pour appairer deux éléments adjacents, et de type quadripôle pour appairer deux éléments distants. Un tel circuit électronique de type  
30 quadripôle est représenté sur la figure 4, dans un exemple de transfert de charge bidirectionnel linéaire effectué par pompe de charge au moyen d'un condensateur comme dans l'exemple de tripôle de la figure 2. Ce quadripôle a alors quatre bornes  $ABG_1G_2$ , les bornes  $G_1, G_2$  étant connectées au même point dans le cas d'éléments adjacents, équivalant à des tripôles.

## 8

Le principe de régulation se fait ainsi pour chaque élément de stockage par transfert direct sur chacun des n-1 autres éléments, au moyen d'un courant proportionnel à la différence de tension entre cet élément et la moyenne de tension aux bornes des autres n-1 éléments :  $I=k \cdot \Delta V$ .

5 Si on suppose que l'on un excès de tension  $\Delta V$  sur l'élément  $C_4$ , les autres éléments de stockage étant tous à la même tension  $V$ , un transfert de charge va s'effectuer depuis l'élément  $C_4$  vers les autres éléments  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_5$ ,  $C_6$ , et  $C_7$  en sorte que chacun de ces 6 éléments reçoive un courant de  $k \frac{\Delta V}{7}$ . Dans le même temps, l'élément  $C_4$  se voit prélever un courant de  
 10  $k \frac{6 \cdot \Delta V}{7}$ . Ces courants injectés et prélevés vont faire s'équilibrer à terme la tension aux bornes des différentes cellules. Lorsque l'équilibrage est réalisé, chaque élément à une tension de  $V + \frac{\Delta V}{7}$  à ses bornes.

En pratique, l'équilibrage se fait pour tous les éléments en même temps. Les modules de transfert sont sollicités tous en même temps, une  
 15 seule fois, en parallèle. On arrive à l'équilibrage de façon beaucoup plus rapide.

C'est ce qui est illustré sur les figures 7a et 7b, pour un dispositif de stockage d'énergie, partant d'un état de charge initial nul, ayant une cellule de capacité énergétique 5% plus faible que celle des autres cellules.

20 La figure 7b correspond à un système d'équilibrage à structure des modules chaînée, selon l'état de la technique (Figs 1 et 2). Les courbes 10 et 11 représentent les valeurs minimales et maximales du courant de compensation des cellules normales. La courbe 12 représente le courant de charge commun à toutes les cellules en provenance du chargeur de batterie.  
 25 On y distingue une phase de régulation à courant constant suivie d'une décroissance exponentielle de ce courant de charge lorsque le chargeur passe d'une régulation en mode courant à une régulation en mode tension. Les courbes 13 et 14 montrent l'enveloppe d'évolution des tensions aux bornes de chaque cellule. L'équilibre est atteint vers  $t=240$  mn.

30 La figure 7a, montre qu'un système d'équilibrage selon l'invention permet d'atteindre l'équilibre beaucoup plus rapidement, vers  $t=120$  mn.

Dans ce premier exemple de réalisation d'un système d'équilibrage d'énergie d'un dispositif comprenant n éléments de stockage

## 9

d'énergie en série,  $n(n-1)/2$  modules sont nécessaires, tous identiques, c'est à dire dimensionnés à l'identique pour passer le même courant  $I_{max}$ .

Les figures 5 et 6a à 6c concernent un autre mode de réalisation d'un système d'équilibrage selon l'invention, par lequel le nombre de modules nécessaire est réduit à  $n+1$  quand  $n$  est une puissance de 2, soit  $n=2^m$ . Les modules sont alors tous de type tripôle ABG.

Cette réduction est obtenue en utilisant la réduction en base deux du nombre  $n$  d'éléments de stockage du réseau série.

On rappelle qu'un module de transfert de type tripôle fournit un courant  $I$  proportionnel à la différence de tension  $V_{AG}-V_{GB}$ . On note  $k$  ce facteur de proportionnalité :  $I = k [V_{AG}-V_{GB}]$ .

Selon l'invention, on a alors  $m$  groupes de module de transfert, de rang 0 à  $m-1$ . Chaque groupe de rang  $i=0$  à  $m-1$  comprend  $2^i$  modules. Chaque module de ce groupe de rang  $i \neq 0$  est dimensionné pour avoir un gain en courant  $k_i 2^i$  fois plus important que le module du groupe de rang 0. Chaque module est connecté en parallèle sur un groupe de  $n/2^i$  éléments de stockage arrangés en deux ensembles de manière à former une paire.

Plus particulièrement, si on prend l'exemple représenté sur la figure 5, avec  $n=8=2^3$  éléments de stockage en série. Dans cet exemple, on a  $m=3$ . On a ainsi  $m=3$  groupes de modules  $GM^0$ ,  $GM^1$ ,  $GM^2$  de rang respectivement 0, 1 et 2.

Le groupe  $GM^0$ , de rang 0, comprend  $2^0=1$  module de transfert, noté  $M0$ , connecté entre les bornes terminales du réseau (en parallèle sur les  $n$  éléments de stockage).

Le groupe de rang 1, comprend  $2^1=2$  modules de transfert, notés  $M1_0$  et  $M1_1$ . Chaque module est connecté en parallèle sur  $n/2^1=4$  éléments de stockage série arrangés en deux ensembles de chacun deux éléments, pour former une paire. Chaque module est dimensionné pour avoir un gain en courant  $2^1$  fois plus important que le module  $M0$ .

On a ainsi  $M1_0$  connecté en parallèle sur  $C_5, C_6, C_7, C_8$ , avec le point de référence  $G$  du tripôle connecté au point milieu  $N_6$  de cet ensemble série (entre  $C_6$  et  $C_7$ ). De même,  $M1_1$  est connecté en parallèle sur  $C_1, C_2, C_3, C_4$ ,

## 10

avec le point de référence G du tripôle connecté au point milieu  $N_2$  de cet ensemble série (entre  $C_2$  et  $C_3$ ).

Le groupe de rang 2, comprend  $2^2=4$  modules de transfert, notés  $M2_0$  à  $M2_3$ . Chaque module est connecté en parallèle sur  $n/2^2=2$  éléments de stockage série qui forment une paire. Ils ont un gain en courant  $2^2$  plus important que le module  $M0$ .

Par exemple le module  $M2_0$  est connecté en parallèle sur  $C_7$  et  $C_8$ , avec le point de référence G connecté au point milieu  $N_7$  de connexion entre ces deux éléments. Les autres modules de ce groupe, respectivement  $M2_1$ ,  $M2_2$  et  $M2_3$  sont connectés de façon similaire, respectivement sur  $(C_6, C_5)$ ,  $(C_4, C_3)$  et  $(C_2, C_1)$ .

Comme dans le premier mode de réalisation, les modules de transfert sont tous sollicités en même temps, une seule fois, pour réaliser l'équilibrage. On obtient des performances identiques. La différence tient au nombre de modules réduit.

Un exemple d'équilibrage de charge est représenté sur la figure 6a, pour un dispositif de stockage conforme à la figure 5, avec  $n=8$  éléments de stockage, dans un exemple où tous les éléments ont une tension  $V_n$  à leurs bornes, sauf un, dans l'exemple  $C_5$ , qui a une tension  $V_n+\Delta V$ .

Les modules du groupe  $GM^2$  opèrent par paires d'éléments adjacents, représentées sur la figure par des rectangles le long de la colonne  $GM^2$ . Pour les paires d'éléments équilibrées, le transfert est nul. Pour la paire a contenant l'élément  $C_5$ , le transfert peut s'écrire comme une quantité de charge négative  $-Q$  prélevée sur l'élément  $C_5$  et une quantité de charge positive  $+Q$  transférée sur l'élément  $C_6$ . Pour marquer le gain de quatre affecté aux modules de cette colonne, on écrit  $+Q=+4$  et  $-Q=-4$ .

Les modules du groupe  $GM^1$  opèrent chacun sur quatre éléments adjacents, arrangés en deux ensembles de deux éléments pour former une paire. Chaque paire est représentée sur la figure par un rectangle dans la colonne  $GM^1$ . La paire  $\{(C_1, C_2), (C_3, C_4)\}$  est équilibrée, le transfert est nul pour cet ensemble. Pour la paire b  $\{(C_5, C_6), (C_7, C_8)\}$  contenant l'élément  $C_5$ , le transfert peut s'écrire comme une quantité de charge négative  $-Q$  prélevée sur l'ensemble série  $(C_5, C_6)$  et une quantité de charge positive  $+Q$  transférée sur l'ensemble série  $(C_7, C_8)$ . Pour marquer le gain de deux affecté aux modules de cette colonne, on écrit  $+Q=+2$  et  $-Q=-2$ .

## 11

Le module du groupe  $GM^0$  opère sur les huit éléments adjacents, arrangés en deux ensembles de quatre éléments pour former une paire  $c$  représentée sur la figure par un rectangle le long de la colonne  $GM^0$  :  $\{(C_1, C_2, C_3, C_4), (C_5, C_6, C_7, C_8)\}$ . Cette paire  $c$  contenant l'élément  $C_5$ , le transfert peut s'écrire comme une quantité de charge négative  $-Q$  prélevée sur l'ensemble série  $(C_5, C_6, C_7, C_8)$  et une quantité de charge positive  $+Q$  transférée sur l'ensemble série  $(C_1, C_2, C_3, C_4)$ . Pour marquer que ce module sert de référence pour le gain en courant, ce qui revient à dire que l'on attribue un gain unité à  $M0$ , on écrit  $+Q=+1$  et  $-Q=-1$ .

La colonne  $\Sigma 1$  représente la somme des charges transférées sur chaque élément du réseau. La quantité de charge prélevée sur l'élément  $C_5$  est distribuée sur chacune des autres éléments qui reçoit donc une quantité de charge égale à la quantité de charge prélevée divisée par le nombre d'éléments sur lesquels elle est distribuée.

Ce transfert se fait en sollicitant tous les modules du système d'équilibrage en même temps, en parallèle, d'où un gain en temps d'équilibrage particulièrement avantageux.

Ce mode de réalisation d'un système d'équilibrage selon l'invention avec un nombre réduit de modules de transfert de charge vient d'être décrit dans un exemple de dispositif de stockage d'énergie contenant un nombre  $n$  d'éléments s'exprimant comme une puissance de deux :  $n=2^m$ .

Dans le cas où  $n$  est un entier quelconque qui s'écrit :  $n=2^m-x$ , on montre que l'on peut réaliser un système d'équilibrage de ce type, en utilisant  $x$  éléments de stockage virtuels pour construire la structure du système. En pratique, on obtient un système d'équilibrage comprenant  $l$  modules, avec  $l$  entier tel que  $n-1-x < l \leq n-1$ .

Si on reprend la figure 5. Dans les éléments de stockage  $C_1$  à  $C_8$  représentés, on considère maintenant que le dispositif de stockage ne comprend que 7 éléments, ce qui est généralement le cas pour les applications de l'aéronautique (avec des cellules lithium-ions).

Le nombre réel d'éléments est donc  $n=7$ . On a  $2^{m-1} \leq n \leq 2^m$ , ou encore  $n=2^m-1$ .

On conçoit alors la structure en rajoutant 1 cellule virtuelle qui est  $C_8$  sur la figure 5.

## 12

Cet élément virtuel n'existe pas en réalité dans la structure. Le dispositif de stockage 100 avec ces  $n=7$  éléments  $C_1$  à  $C_7$  et son système d'équilibrage est en réalité comme représenté sur la figure 8. Les bornes A des modules  $M_{20}$ ,  $M_{10}$  et  $M_{00}$  sont reliées en commun au moyen d'une ligne de connexion X. Le potentiel VX sur cette ligne X est dans un état indéfini initialement. On montre que lorsque le système d'équilibrage est activé, le système d'équilibrage est tel qu'il établit le potentiel VX à un niveau tel que le courant qui est induit dans l'élément virtuel  $C_8$  est forcément nul. C'est ce qui est représenté dans les tableaux des figures 6b et 6c, à prendre en combinaison avec celui de la figure 6a.

On a vu que le tableau de la figure 6a illustre le cas d'un dispositif à  $n=8$  éléments, dans lequel le système d'équilibrage a été activé sur détection d'un déséquilibre, dû à un excès de charge sur l'élément  $C_5$ . Le transfert de charge total qui s'établit pour chaque cellule est donné dans la colonne  $\Sigma 1$  ce tableau, a déjà été expliqué.

Or on se place dans le cas où l'élément  $C_8$  est virtuel : le courant dû au transfert de charge provoqué par le système d'équilibrage doit donc être nul dans cet élément.

On montre que le potentiel VX sur la ligne X s'établit automatiquement à une valeur donnée pour que ce soit effectivement le cas. C'est comme si le système se comportait en sorte que l'élément virtuel induise lui aussi un transfert de charge, tel que la somme des deux transferts de charge, celui dû à  $C_5$  et celui dû à l'élément virtuel s'annule pour l'élément virtuel. Le tableau de la figure 6b montre le transfert de charge qui serait dû à l'élément virtuel. La colonne  $\Sigma 2$  donne le transfert de charge total qui s'établit pour chaque cellule.

La colonne  $\Sigma = \Sigma 1 + \Sigma 2$  dans le tableau de la figure 6c représente la superposition des deux transferts : on obtient bien un transfert nul sur l'élément virtuel. Le transfert de charge se distribue de l'élément  $C_5$  sur les 6 autres éléments du dispositif de stockage 100. La tension aux bornes de la cellule virtuelle s'établit donc à  $V_n + \Delta V / 7$ .

Dans l'exemple de la figure 8, le système d'équilibrage se construit sur la base d'un seul élément virtuel. Dans le cas général où  $n=2^m-x$ , avec  $x \geq 1$ , il y a  $x$  éléments virtuels.

## 13

Dans le cas où  $x > 1$ , le système d'équilibrage peut se simplifier en éliminant du système tout module qui aurait toutes ses bornes A, B, G reliées à des éléments virtuels. On a alors  $l$  modules avec  $n-1-x < l \leq n-1$ . Dans ce cas, les  $l$  modules sont distribués en  $m-1$  groupes de rang 0 à  $m-1$ , tel qu'au

5 groupe de rang  $i$  correspond au plus  $2^i$  modules ( $M_{10}, M_{11}$ ), chacun associé à  $n/2^i$  éléments arrangés en deux ensembles de manière à former une paire, les modules dudit groupe de rang  $i \neq 0$  étant dimensionnés pour passer  $2^i$  fois plus de courant que le module  $M_0$ .

10 L'invention qui vient d'être décrite est particulièrement intéressante pour tous les systèmes où l'on cherche à améliorer les performances du dispositif de stockage d'énergie à moindre coût.

L'invention s'applique à tout système d'équilibrage utilisant des modules de transfert de charge bidirectionnels et linéaires. En particulier,

15 l'invention ne se limite pas à l'exemple aux modules du type à pompe de charge donné uniquement à titre d'illustration.

Dans toute la description, le module de transfert de charge a une caractéristique de transfert en courant linéaire lorsque les tensions des deux cellules qui lui sont connectées sont proches de l'équilibre. On parle de

20 linéarité au premier ordre. Le système d'équilibrage de charge continuera de fonctionner correctement si le gain en courant n'est pas linéaire mais qu'il transfère un courant de même signe que la différence de tension aux bornes de cellules.

## REVENDICATIONS

1. Dispositif de stockage d'énergie comprenant un réseau série de  $n$  éléments de stockage ( $C_1, \dots, C_n$ ) apte à fournir une tension continue à ses bornes, et une pluralité de modules de transfert de charge, chaque module assurant un transfert de charge bidirectionnel entre deux éléments de  
 5 stockage dudit réseau, caractérisé en ce que qu'il comprend  $n(n-1)/2$  modules identiques, chaque élément de stockage ( $C_k$ ) étant appairé à chacun des autres  $n-1$  éléments de stockage du réseau par  $(n-1)$  modules associés ( $M_{k,1}, M_{k,2} \dots M_{k,k-1}, M_{k,k+1} \dots M_{k,n-1}, M_{k,n}$ ).

2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que lesdits  
 10 modules sont du type tripôle ou quadripôle selon que les éléments qu'ils appairent sont adjacents ou non.

3. Dispositif de stockage d'énergie comprenant un réseau série de  $n$  éléments de stockage ( $C_1, \dots, C_n$ ) apte à fournir une tension continue à ses bornes, et une pluralité de modules de transfert de charge, chaque module  
 15 assurant un transfert de charge bidirectionnel entre deux éléments de stockage dudit réseau, et dans lequel  $n=2^m$ , caractérisé en ce qu'il comprend  $n-1$  modules de type tripôle, distribués en  $m-1$  groupes de rang 0 à  $m-1$ , tel qu'au groupe de rang  $i$  correspond  $2^i$  modules ( $M_{10}, M_{11}$ ), chacun associé à  $n/2^i$  éléments arrangés en deux ensembles de manière à former une paire,  
 20 les modules dudit groupe de rang  $i \neq 0$  étant dimensionnés pour avoir un gain en courant  $2^i$  fois plus important que le gain en courant du module ( $M_0$ ) du groupe de rang 0.

4. Dispositif de stockage d'énergie comprenant un réseau série de  $n$  éléments de stockage ( $C_1, \dots, C_n$ ) apte à fournir une tension continue à ses  
 25 bornes, et une pluralité de modules de transfert de charge, chaque module assurant un transfert de charge bidirectionnel entre deux éléments de stockage dudit réseau, et dans lequel  $n=2^m-x$ , caractérisé en ce qu'il comprend un nombre  $l$  de modules de type tripôle, avec  $n-1-x < l \leq n-1$  modules, distribués en  $m-1$  groupes de rang 0 à  $m-1$ , tel qu'au groupe de

## 15

rang  $i$  correspond au plus  $2^i$  modules ( $M1_0, M1_1$ ), chacun associé à  $n/2^i$  éléments arrangés en deux ensembles de manière à former une paire, les modules dudit groupe de rang  $i \neq 0$  étant dimensionnés pour avoir un gain en courant  $2^i$  fois plus important que le gain en courant du module ( $M0$ ) du groupe de rang 0.

5  
10  
15  
20  
25  
30  
35  
40  
45  
50  
55  
60  
65  
70  
75  
80  
85  
90  
95  
100  
105  
110  
115  
120  
125  
130  
135  
140  
145  
150  
155  
160  
165  
170  
175  
180  
185  
190  
195  
200  
205  
210  
215  
220  
225  
230  
235  
240  
245  
250  
255  
260  
265  
270  
275  
280  
285  
290  
295  
300  
305  
310  
315  
320  
325  
330  
335  
340  
345  
350  
355  
360  
365  
370  
375  
380  
385  
390  
395  
400  
405  
410  
415  
420  
425  
430  
435  
440  
445  
450  
455  
460  
465  
470  
475  
480  
485  
490  
495  
500

5. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que le transfert de charge entre ledit élément et les  $p$  éléments qui lui sont appairés se traduit par un courant de charge ou décharge de ces éléments appairés proportionnel au premier ordre à la différence entre la tension aux bornes dudit élément et la moyenne des tensions aux bornes desdits  $p$  éléments de charge appairés au dit élément.

6. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en que lesdits éléments de stockage sont des cellules de batterie électrochimique.

15  
20  
25  
30  
35  
40  
45  
50  
55  
60  
65  
70  
75  
80  
85  
90  
95  
100  
105  
110  
115  
120  
125  
130  
135  
140  
145  
150  
155  
160  
165  
170  
175  
180  
185  
190  
195  
200  
205  
210  
215  
220  
225  
230  
235  
240  
245  
250  
255  
260  
265  
270  
275  
280  
285  
290  
295  
300  
305  
310  
315  
320  
325  
330  
335  
340  
345  
350  
355  
360  
365  
370  
375  
380  
385  
390  
395  
400  
405  
410  
415  
420  
425  
430  
435  
440  
445  
450  
455  
460  
465  
470  
475  
480  
485  
490  
495  
500

7. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en que lesdits éléments de stockage sont des cellules de batterie de type lithium-ion.

8. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que lesdits éléments de stockage sont des supercapacités.

20  
25  
30  
35  
40  
45  
50  
55  
60  
65  
70  
75  
80  
85  
90  
95  
100  
105  
110  
115  
120  
125  
130  
135  
140  
145  
150  
155  
160  
165  
170  
175  
180  
185  
190  
195  
200  
205  
210  
215  
220  
225  
230  
235  
240  
245  
250  
255  
260  
265  
270  
275  
280  
285  
290  
295  
300  
305  
310  
315  
320  
325  
330  
335  
340  
345  
350  
355  
360  
365  
370  
375  
380  
385  
390  
395  
400  
405  
410  
415  
420  
425  
430  
435  
440  
445  
450  
455  
460  
465  
470  
475  
480  
485  
490  
495  
500

9. Système électronique comprenant un chargeur et un dispositif de stockage d'énergie selon l'une quelconque des revendications précédentes, rechargeable par ledit chargeur.

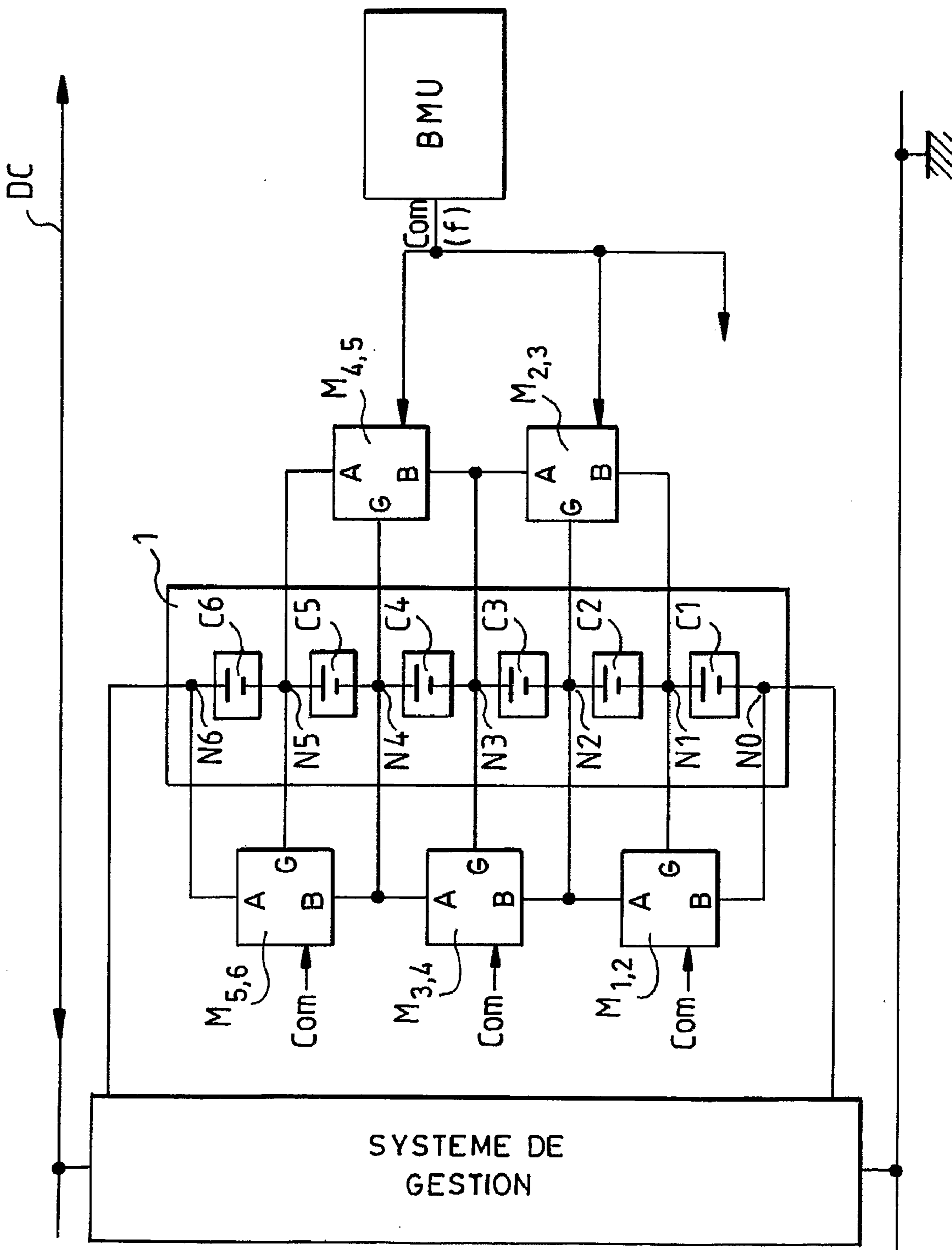


FIG.1

2/7

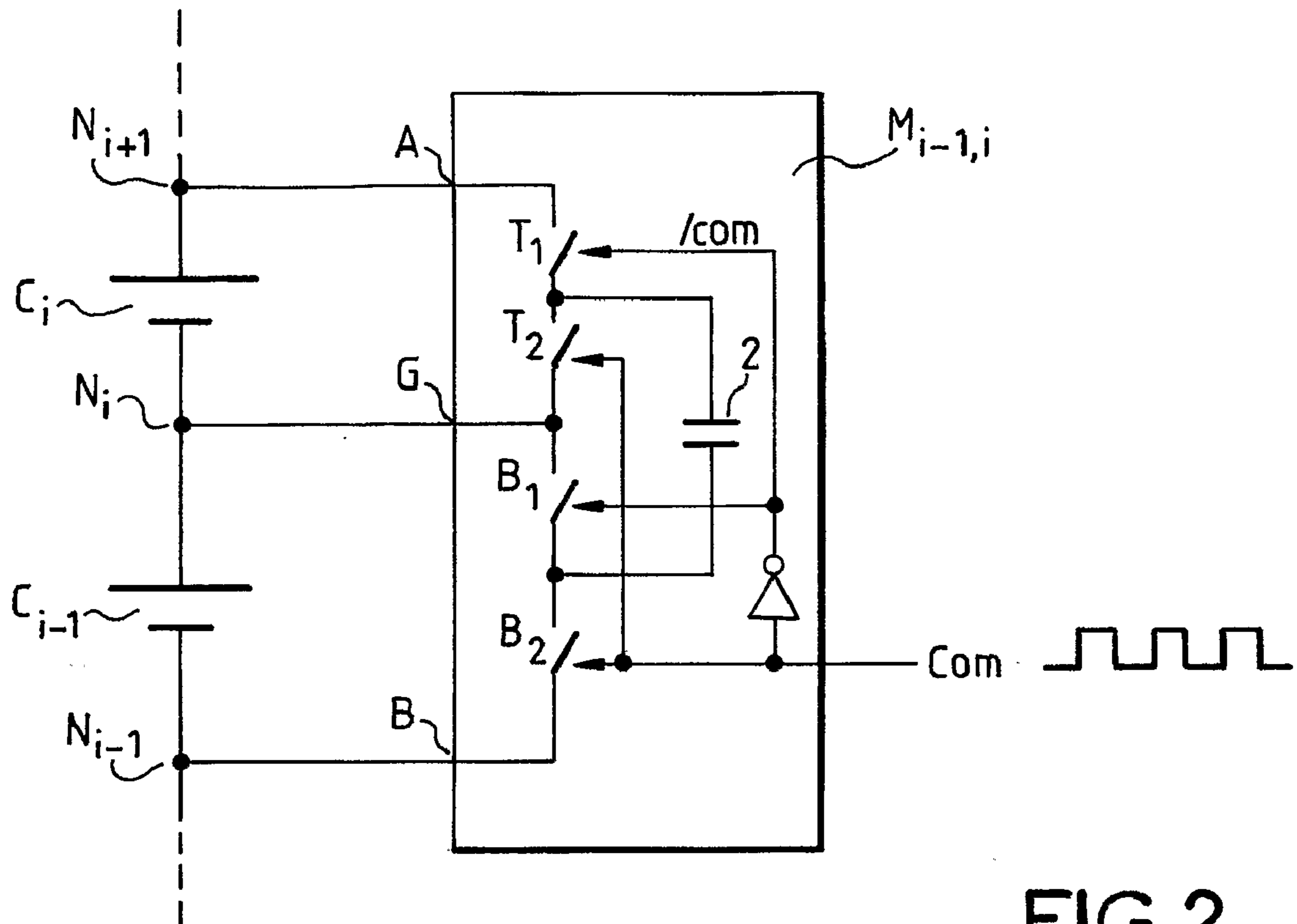


FIG.2

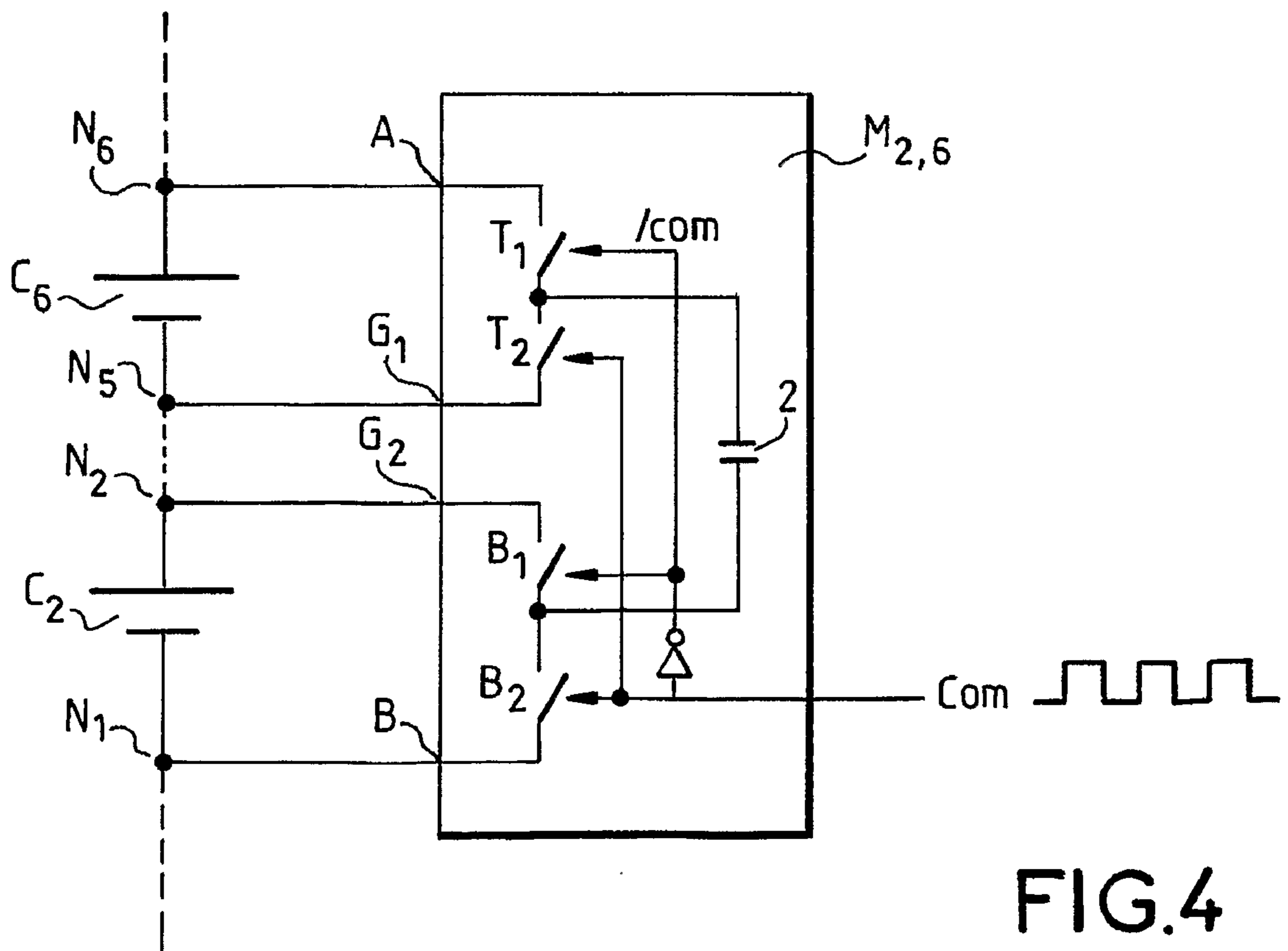


FIG.4

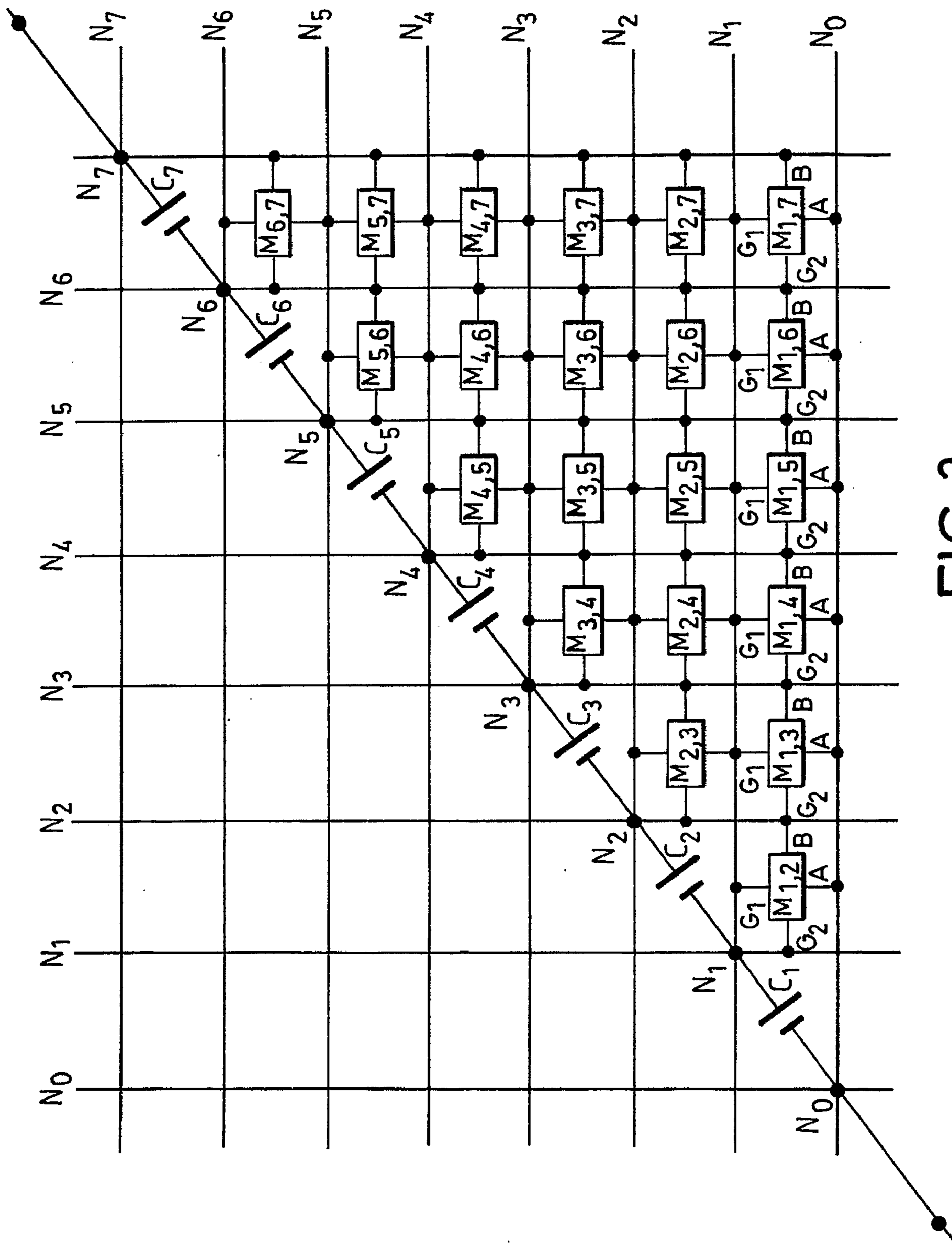


FIG. 3

4/7

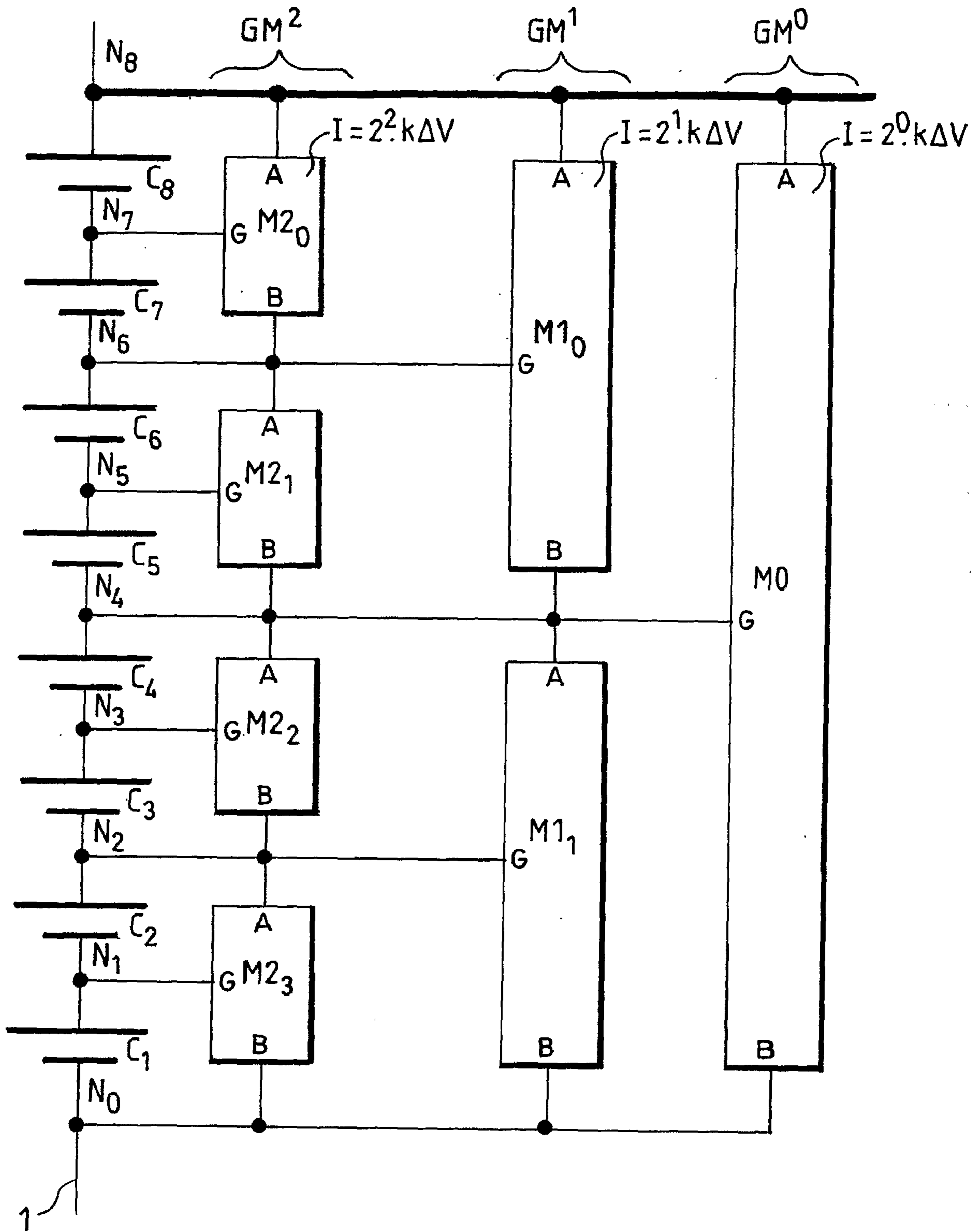


FIG.5

5/7

	$V(C_i)$	$GM^2$	$GM^1$	$GM^0$	$\Sigma_1$
$C_8$	$V_n$	0	+2 <sup>b</sup>	-1 <sup>c</sup>	+1
$C_7$	$V_n$	0	+2	-1	+1
$C_6$	$V_n$	+4 <sup>a</sup>	-2	-1	+1
$C_5$	$V_n + \Delta V$	-4	-2	-1	-7
$C_4$	$V_n$	0	0	+1	+1
$C_3$	$V_n$	0	0	+1	+1
$C_2$	$V_n$	0	0	+1	+1
$C_1$	$V_n$	0	0	+1	+1

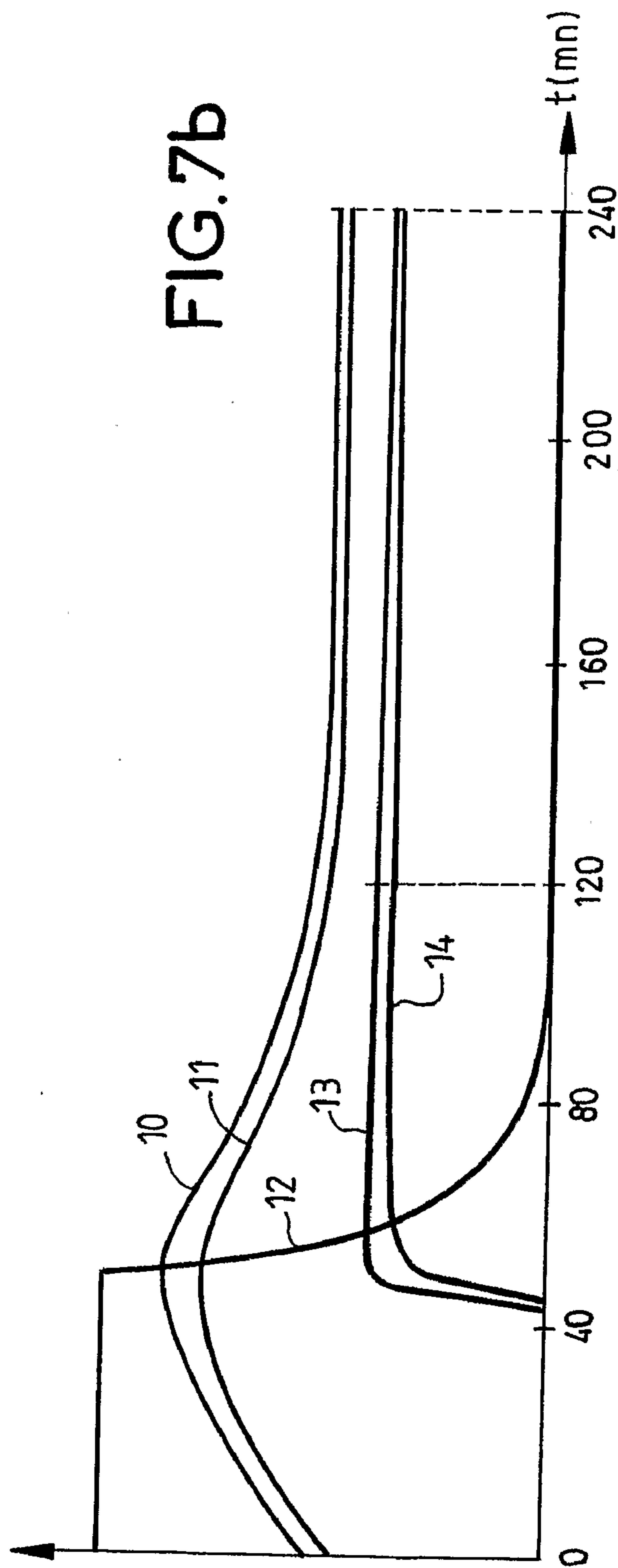
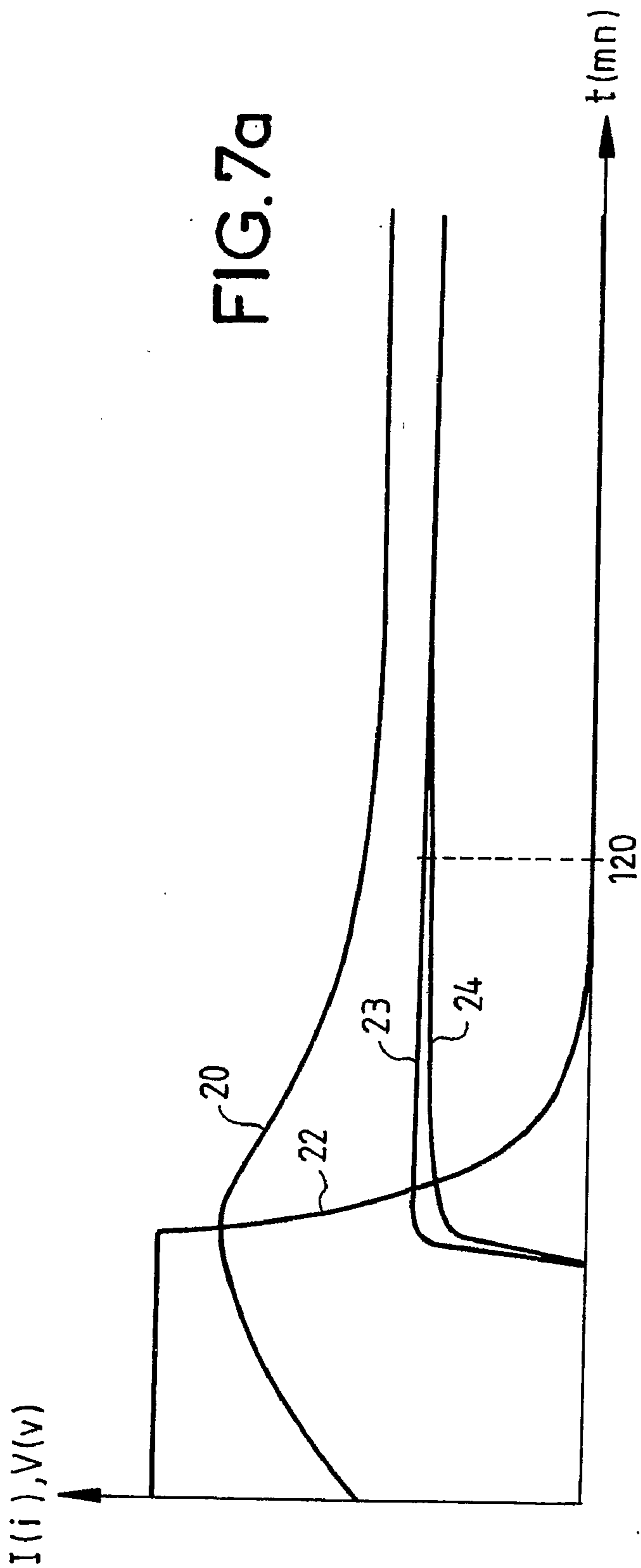
FIG.6a

	$V(C_i)$	$GM^2$	$GM^1$	$GM^0$	$\Sigma_2$
$C_8$	$V_n + \frac{\Delta V}{7}$	-4/7	-2/7	-1/7	-7/7
$C_7$	$V_n$	+4/7	-2/7	-1/7	-1/7
$C_6$	$V_n$	0	+2/7	-1/7	-1/7
$C_5$	$V_n$	0	+2/7	-1/7	-1/7
$C_4$	$V_n$	0	0	+1/7	-1/7
$C_3$	$V_n$	0	0	+1/7	-1/7
$C_2$	$V_n$	0	0	+1/7	-1/7
$C_1$	$V_n$	0	0	+1/7	-1/7

FIG.6b

	$V(C_i)$	$\Sigma_1$	$\Sigma_2$	$\Sigma$
$C_8$	$V_n + \frac{\Delta V}{7}$	+1	-7/7	0
$C_7$	$V_n$	+1	-1/7	+6/7
$C_6$	$V_n$	+1	-1/7	+6/7
$C_5$	$V_n + \Delta V$	-7	-1/7	-48/7
$C_4$	$V_n$	+1	-1/7	+6/7
$C_3$	$V_n$	+1	-1/7	+6/7
$C_2$	$V_n$	+1	-1/7	+6/7
$C_1$	$V_n$	+1	-1/7	+6/7

FIG.6c



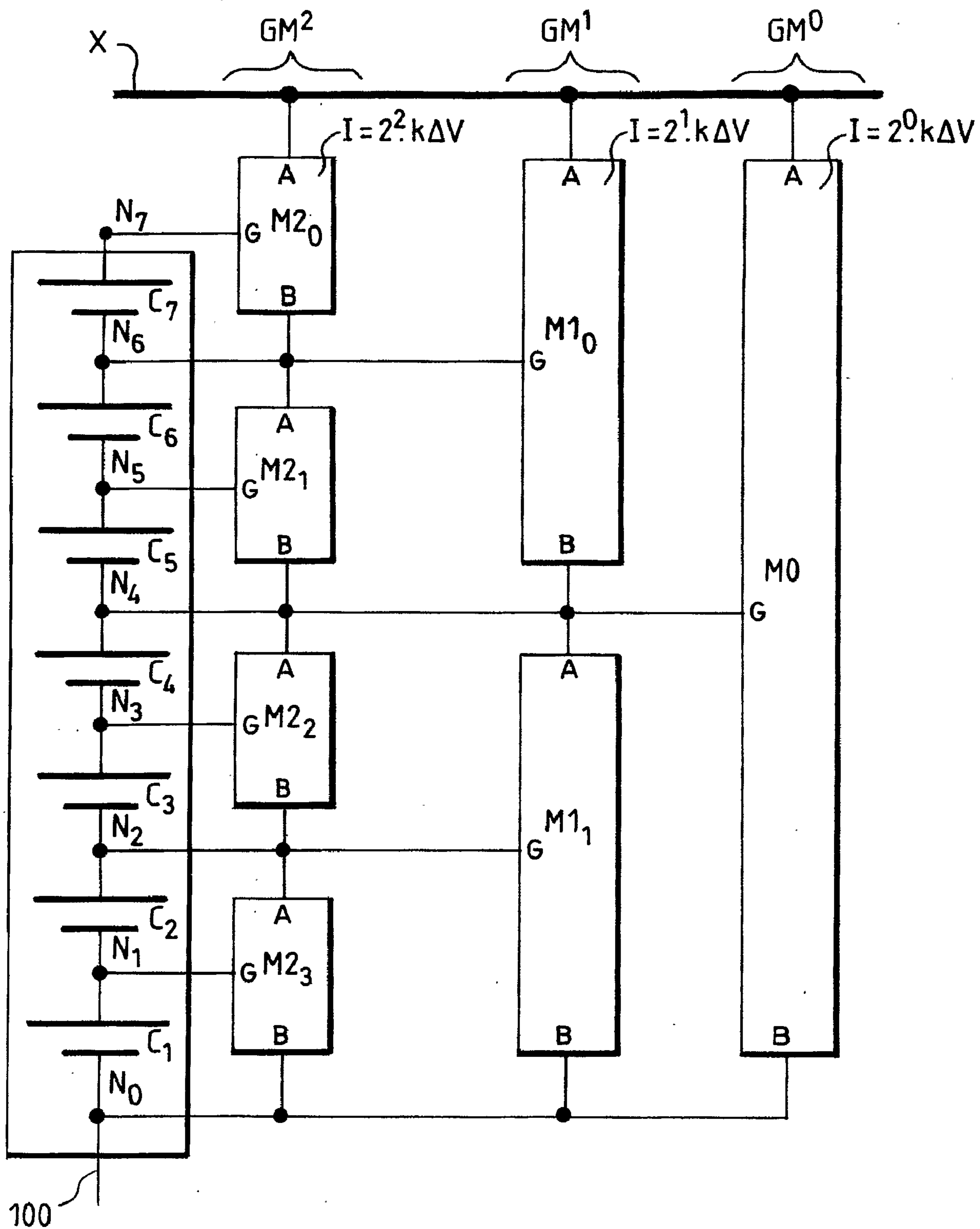


FIG. 8

