

①2

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 22.01.92.

③0 Priorité :

④3 Date de la mise à disposition du public de la
demande : 23.07.93 Bulletin 93/29.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche : *Se reporter à la fin du présent fascicule.*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

⑦1 Demandeur(s) : ALCATEL ESPACE — FR.

⑦2 Inventeur(s) : Capel Antoine.

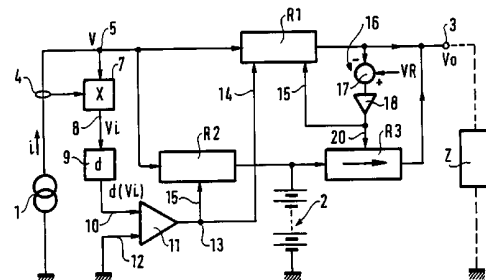
⑦3 Titulaire(s) :

⑦4 Mandataire : SOSPI Pothet Jean.

⑤4 Dispositif de poursuite du point de puissance maximale d'une alimentation à générateur solaire pour satellite.

⑤7 Alimentation à dispositif MPPT pour satellite en orbite basse.

Il est prévu des régulateurs (R1, R2, R3) commandés en courant, et non pas en tension. De plus, la Poursuite du Point de Puissance Maximale, ou MPPT, est effectuée entièrement par des moyens analogiques: mesure (4, 5, 7, 8) de la puissance (V_i), dérivation (9) de celle-ci, et comparaison (11) à zéro pour en déduire le signal de correction (13).



**DISPOSITIF DE POURSUITE DU POINT DE PUISSANCE
MAXIMALE D'UNE ALIMENTATION A GENERATEUR SOLAIRE
POUR SATELLITE**

5 La présente invention se rapporte à un dispositif de poursuite du point de puissance maximale d'une alimentation à générateur solaire pour satellite, en particulier d'un générateur solaire équipant un satellite circulant en orbite basse, un tel dispositif étant plus communément dénommé "M.P.P.T.".

10 La poursuite du point de puissance maximale d'un générateur solaire concerne plus particulièrement les satellites en orbite basse pour lesquels les deux sources d'énergie électrique, respectivement "primaires" et "secondaires", que constituent les panneaux solaires et les batteries d'accumulateurs sont très
15 sollicitées et constituent un pourcentage important, de l'ordre de par exemple 20 %, de la masse totale du satellite.

 Tout surdimensionnement de ces sources d'énergie est pénalisant pour le projet, soit parce qu'il intervient sur le coût du lancement du satellite, soit parce qu'il limite la masse
20 consacrée à la charge utile.

 En orbite basse, une révolution dure par exemple environ 90 minutes, dont 60 minutes où le satellite est éclairé par le soleil, et 30 minutes où il est dans l'obscurité. Ceci implique un nombre important, de l'ordre de 5850 par an, de cycles pendant
25 lesquels la source secondaire que constitue la batterie se recharge pendant le "jour" du satellite et se décharge pendant sa "nuit", tandis que la source primaire qui constitue le panneau solaire doit, pendant le "jour", à la fois maintenir les besoins d'alimentation énergétique du satellite et recharger la batterie
30 dans un intervalle de temps somme toute plutôt limité.

 Il paraît donc essentiel de dimensionner au plus juste ces deux sources d'énergie primaire et secondaire (panneau solaire et batterie), et il convient pour ceci de polariser le générateur solaire en un point où la puissance qu'il délivre est maximale.

35 Il existe dans la littérature de nombreuses descriptions de dispositifs prévus dans ce but : voir par exemple l'article de

Y.Robin-Jouan "CONVERSION OPTIMALE D'ENERGIE. ETUDE D'UN SYSTEME MPPT" , "SPACECRAFT POWER CONDITIONING ELECTRONICS SEMINAR", FRASCATI, 20-22 MAI 1974, pages 35 à 47.

5 Le dispositif d'alimentation à "M.P.P.T." qui est le plus couramment décrit prévoit généralement une structure triangulaire à trois régulateurs électroniques :

- . un premier régulateur R1 qui réalise l'interconnexion entre le générateur solaire et la charge électrique à alimenter;
- 10 . un second régulateur R2 qui réalise l'interconnexion entre le générateur solaire et la batterie d'accumulateurs, et qui permet donc d'isoler ces deux sources d'énergie entre elles, ce qui est essentiel; et
- 15 . un troisième régulateur R3 qui relie de manière unidirectionnelle la batterie à la charge, de façon à ce que cette charge puisse être alimentée directement par cette batterie en cas de défaillance du générateur solaire, que cette défaillance soit accidentelle (avarie du générateur solaire) ou naturelle (nuit du satellite).

20 Un dispositif central d'exploration et de poursuite agit sur les deux régulateurs R1 et R2 afin d'obliger le générateur solaire à fonctionner à son point de puissance maximale, tandis qu'il recharge la batterie, pendant le jour du satellite.

25 Si "I", "V" et "P", sont respectivement le courant, la tension et la puissance fournis par le générateur solaire, le point recherché M où la puissance P est maximale est défini par la relation : $dP/dV = 0$.

30 Le principe très général qui est utilisé dans les MPPT connus dans la littérature consiste à obtenir un point courant sur la caractéristique I(V), à calculer sa dérivée, et à provoquer sa progression sur cette caractéristique jusqu'à ce que la relation ci-dessus soit vérifiée.

Ceci est alors réalisé à l'aide de MPPT numériques qui agissent sur l'impédance d'entrée des régulateurs R1, R2 commandés en tension, dits "régulateurs contrôlés en tension".

35 Ces régulateurs R1, R2 travaillent en échantillonné pour être très peu dissipatifs. Ce faisant, ils présentent une impédance d'entrée négative qui ne peut être asservie par le courant

d'entrée, ce paramètre n'étant pas pris en compte dans le principe du "contrôle en tension".

5 La caractéristique "courant-tension" de cet ensemble de régulateurs et de la charge du satellite est représentée, pour les faibles valeurs de la tension où les régulateurs ne fonctionnent pas, par une droite de forte pente positive, suivie, pour les valeurs plus élevées de la tension où ces régulateurs fonctionnent, d'une portion d'hyperbole à pente négative.

10 L'intersection de cette caractéristique avec celle du générateur solaire définit généralement trois points de fonctionnement A, B, C dont un point médian B instable et deux points extrêmes stables :

- . un point stable C, vers les tensions élevées, qui est le point stable de fonctionnement du dispositif; et
- 15 . un point stable A, vers les tensions basses où les régulateurs ne fonctionnent pas, qui correspond à un décrochage de ces régulateurs, qui ne peuvent alors plus assurer le transfert de la puissance requise.

20 Poursuivre le point de puissance optimal, revient à asservir le système autour du point M où la puissance est maximale en obligeant le point stable C à se mouvoir vers ce point M. Si la puissance requise est supérieure à la puissance maximale, le régulateur décroche et se verrouille au point A, ce qui arrête le fonctionnement du système.

25 La difficulté majeure d'un tel système de poursuite est d'assurer le transfert de C vers M sans jamais se verrouiller en A. En d'autres termes de générer une caractéristique d'entrée d'un dispositif qui ne détermine qu'un point et un seul point d'intersection avec la caractéristique d'un générateur solaire.

30 La deuxième difficulté concerne la régulation de la tension distribuée au réseau, par les régulateurs R1 ou R3, dans certaines topologies de systèmes de puissance, ce qui implique la gestion d'un double asservissement réparti sur l'ensemble des régulateurs R1, R2 et R3.

35 Enfin, la présence d'une batterie soumise à des cyclages importants nécessite, pour des raisons de durée de vie, une

gestion particulière, qui interdit les surcharges et les intensités trop élevées. Ces conditions interfèrent dans le processus de poursuite en y introduisant des contraintes qui affectent la stabilité dynamique de cet asservissement.

5 Afin d'assurer l'asservissement du générateur solaire à sa puissance maximale de façon stable, il est préférentiel, et actuellement recherché, de ne garantir qu'un seul point de fonctionnement possible sur la caractéristique de fonctionnement "courant-tension" de ce générateur lorsqu'il est connecté aux
10 régulateurs précités.

Diverses façons d'isoler un tel point existent, mettant en jeu des systèmes de poursuite et de commande numériques assez complexes.

15 L'inconvénient de ces MPPT connus réside dans le fait que d'une part, comme ils fonctionnent en numérique, c'est-à-dire par tout ou rien, ils introduisent des micro-coupures d'alimentation pouvant être dommageables pour certaines utilisations, et que d'autre part ils ne permettent pas de fonctionner avec un seul point de fonctionnement stable sans nécessiter d'introduire des
20 systèmes de sécurité numériques destinés à éviter les risques de déstabilisations.

L'invention vise à remédier à ces inconvénients. Elle se rapporte à cet effet à un dispositif de poursuite du point de puissance maximale, ou "MPPT", d'une alimentation à générateur
25 solaire pour satellite, en particulier pour satellite en orbite basse, cette alimentation et ce dispositif MPPT comprenant au moins :

- . un générateur solaire,
- . une batterie d'accumulateurs,
- 30 . un ou plusieurs régulateurs électroniques, dont au moins un régulateur qui réalise l'interconnexion et l'isolement entre ce générateur solaire et cette batterie d'accumulateurs,
- . un circuit d'interconnexion entre ce générateur solaire et la charge à alimenter, ce circuit pouvant, selon la configuration
35 adoptée, comprendre le régulateur précité, et
- . un circuit d'interconnexion entre cette batterie d'accumulateurs

et la charge à alimenter,

Ce dispositif se caractérisant :

. en ce qu'au moins ce régulateur est un régulateur commandé en courant, et

5 . en ce que la poursuite du point de puissance maximale est effectuée par un circuit électronique purement analogique qui réalise la comparaison à zéro de la dérivée de la puissance émise par le générateur solaire et en déduit un signal de correction qui est appliqué à au moins ce régulateur afin de faire varier son
10 impédance d'entrée dans un sens ou dans l'autre jusqu'à ce que la puissance émise par ce générateur solaire soit en son point maximal recherché.

De toute façon, l'invention sera bien comprise, et ses avantages et autres caractéristiques ressortiront, lors de la
15 description suivante d'un exemple non limitatif de réalisation, en référence au dessin schématique annexé dans lequel :

. Figure 1 est un schéma synoptique de principe très dépouillé de cette alimentation à dispositif MPPT;

20 . Figure 2 est un schéma synoptique plus réaliste de cette alimentation à dispositif MPPT; et

. Figures 3 à 5 montrent très schématiquement trois autres exemples de configurations possibles pour une alimentation à dispositif MPPT conforme à l'invention.

En se référant à la Figure 1, il s'agit d'une alimentation,
25 par exemple pour satellite en orbite basse, qui comporte un générateur primaire 1 constitué par des panneaux solaires et un générateur secondaire qui est constitué par une batterie d'accumulateurs 2.

De manière classique, le générateur solaire 1 a pour rôle
30 d'alimenter la charge électrique Z du satellite ainsi que de recharger la batterie 2 pendant le "jour" du satellite (c'est-à-dire pendant la portion de révolution autour de la terre où il est éclairé par le soleil), tandis que la batterie 2 a pour rôle d'alimenter cette charge Z pendant la "nuit" du satellite (c'est-à-dire pendant sa phase d'éclipse par rapport au soleil) ainsi qu'en
35 cas d'autre défaillance du générateur solaire 1.

Comme c'est le cas pour la plupart des systèmes d'alimentation actuels pour satellites, cette alimentation est une alimentation à "MPPT", c'est à dire comportant un dispositif de poursuite du point de puissance maximale.

5 De manière assez classique dans son principe, le générateur solaire 1, la batterie 2, et la charge Z sont reliés entre eux par une configuration triangulaire de régulateurs électroniques :

10 . un premier régulateur R1 qui réalise l'interconnexion entre le générateur solaire 1 et la borne 3 sur laquelle est connectée la charge Z;

. un second régulateur R2 qui réalise l'interconnexion entre le générateur solaire 1 et la batterie 2, et donc l'indispensable isolement de ces deux sources d'énergie entre elles; et

15 . un troisième régulateur R3 qui réalise la liaison unidirectionnelle entre la batterie 2 et la borne 3 de branchement de la charge Z, cette liaison unidirectionnelle ne fonctionnant qu'en cas de défaillance des panneaux solaires 1.

20 Selon un aspect important de l'invention, au moins les régulateurs R1 et R2 sont des régulateurs commandés en courant, de tels régulateurs étant connus en soi dans la technique, où ils sont dénommés "régulateurs MC²" (MC² = "Current Controlled Mode"), mais n'ayant pas été utilisés jusque là dans le cadre d'un MPPT conforme à l'invention.

25 Par ailleurs, selon un autre aspect important, et se combinant avec le précédent, de l'invention, la poursuite du point de puissance maximale, ou MPPT, est ici totalement réalisée par des moyens analogiques, à l'exclusion de tout dispositif numérique.

30 Le courant i et la tension V fournis par le générateur solaire 1 sont captés respectivement par un capteur d'intensité 4 et par une prise de potentiel 5, et sont tous deux appliqués aux deux entrées respectives d'un multiplicateur analogique 7.

35 Le produit V_i , c'est à dire la puissance P , en sortie 8 de ce multiplicateur 7 est appliqué à un différentiateur analogique 9, sur la sortie 10 duquel on trouve donc la dérivée $d(V_i)$ de

cette puissance P.

Le signal sur cette sortie 10 est comparé à zéro dans un comparateur 11 dont l'autre entrée 12 est reliée à la masse, c'est à dire au potentiel zéro.

5 Le signal d'erreur en sortie 13 de ce comparateur 11 est appliqué sur les entrées de commande 14 et 15 des régulateurs R1 et R2 pour entraîner, par commande en courant, le déplacement du point représentatif de la puissance délivrée sur la caractéristique Puissance/Tension de l'alimentation vers son point de puissance
10 maximale, ce dernier étant atteint lorsque le signal d'erreur au point 13 est nul, c'est à dire lorsque la dérivée de la puissance fournie par le générateur solaire 1 à la charge Z est nulle.

A noter que par ailleurs, et de manière cette fois ci très classique, la tension délivrée au point de sortie 3 est asservie à
15 une valeur déterminée V_0 par une boucle d'asservissement rapide 16 qui comprend un soustracteur analogique qui reçoit, outre la tension de sortie au point 3, une tension de référence V_r , et un amplificateur 18. Cette boucle de régulation 18 agit d'une part sur une autre entrée de commande 19 du régulateur R1 pour maintenir à
20 la valeur V_0 la tension de sortie, et elle agit d'autre part sur l'entrée de commande 20 du régulateur unidirectionnel R3 afin de diriger son action lorsque le panneau solaire 1 ne fonctionne pas.

La Figure 1 n'est qu'un schéma de principe destiné à une claire compréhension de l'invention. Un schéma pratique de
25 réalisation est représenté en Figure 2.

On retrouve sur cette Figure 2 le générateur solaire 1, la batterie 2, les trois régulateurs R1, R2, R3, et la boucle rapide 16, tous ces éléments étant inchangés.

Comme il se doit, et ceci n'était pas représenté en Figure
30 1 pour ne pas alourdir ce dessin, il est en outre prévu une boucle rapide 21 de régulation et de commande du courant de charge i_B de la batterie 2.

Cette boucle rapide 21, en soi très classique, comprend un capteur d'intensité 22, un soustracteur analogique 23 qui reçoit
35 un courant de référence i_R , et un amplificateur 24. Elle agit sur l'entrée de commande 15 du régulateur R2 via un additionneur 25

pour éviter que le courant de charge i_B ne dépasse une valeur prédéfinie pendant la charge et stopper ce courant i_B lorsque la batterie 2 est chargée.

Au lieu de posséder, comme en Figure 1, un seul capteur
5 4 de courant i et un point de mesure 5 de la tension V du
générateur solaire, ce circuit en possède respectivement deux :

10 . d'une part un capteur de courant 4a et une prise de tension 5A dont les signaux sont respectivement appliqués à des dérivateurs analogiques 26 et 27; et

. d'autre part un autre capteur de courant 4B et une autre prise de tension 5B dont les signaux sont respectivement appliqués à un diviseur 28.

En sortie 30 du diviseur 28 apparaît donc le rapport V/i .

1 5 Les signaux dérivés dV/dt et di/dt (t étant le temps) en sortie des dérivateurs 26 et 27 sont respectivement appliqués à un autre diviseur 29, sur la sortie 31 duquel apparaît donc finalement le rapport dV/di .

Ces deux signaux en 30 et en 31 sont soustraits dans un soustracteur analogique 32, et le signal d'erreur qui résulte de
20 cette soustraction et qui est égal à

$$V/i - dV/di$$

est comparé à zéro et amplifié dans un amplificateur 33, puis appliqué à une première entrée 35 d'un additionneur 34.

Cet additionneur 34 reçoit, selon un processus bien classique, une perturbation définie 37 sur son autre entrée 36, cette perturbation consistant en un signal sinusoïdal d'amplitude constante et faible et étant classiquement (voir l'article de Y.Robin-Jouan précité, pages 43 et 44) destinée à donner au point de fonctionnement du générateur solaire une variation "petit signal" dans le temps qui permet de déterminer les dérivées de V et I.

Ce signal d'erreur est représentatif de la dérivée de la puissance V_i puisque cette dérivée est nulle lorsque :

$$d(Vi) = i.dV + V.di = 0$$

c'est à dire lorsque, en valeurs absolues :

35 $V/i = dV/di.$

Le signal d'erreur en sortie 13 de l'additionneur 34 est

appliqué respectivement aux régulateurs R1 et R2 via les additionneurs respectifs 25 et 38.

5 A noter que l'asservissement MPPT peut, sans intervention extérieure, être assuré soit par le régulateur R2, soit par le régulateur R3, selon l'état de la batterie ou la demande du ou des utilisateurs Z.

Comme il va de soi, l'invention n'est pas limitée à l'exemple de réalisation qui vient d'être décrit, ni à cette configuration triangulaire.

10 A titre illustratif, les Figures 3 à 5 représentent schématiquement trois autres configurations possibles, parmi d'autres, pour la mise en oeuvre de cette invention :

. Régulateur R1 seul présent et relié directement à la batterie 2 (Figure 3);

15 . Régulateur R2 seul présent, la batterie 2 étant reliée unidirectionnellement à la sortie 3 par l'intermédiaire d'un redresseur D (Figure 4);

. Pas de régulateur R2, mais régulateur R3 bi-directionnel (Figure 5).

20

REVENDICATIONS

1 - Dispositif de poursuite du point de puissance maximale, ou "MPPT", d'une alimentation à générateur solaire pour satellite, en particulier pour satellite en orbite basse, cette alimentation et ce
5 dispositif MPPT comprenant au moins :

- . un générateur solaire (1),
- . une batterie d'accumulateurs (2),
- . un ou plusieurs régulateurs électroniques (R1,R2,R3), dont au
10 moins un régulateur (R2) qui réalise l'interconnexion et l'isolement entre ce générateur solaire (1) et cette batterie d'accumulateurs (2),
- . un circuit d'interconnexion (R1) entre ce générateur solaire (1) et la charge (Z) à alimenter, et
- 15 . un circuit (R3) d'interconnexion entre cette batterie d'accumulateurs (2) et la charge (Z) à alimenter, caractérisé :

- . en ce qu'au moins ce régulateur d'isolement (R2) est un régulateur commandé en courant, et
- 20 . en ce que la poursuite du point de puissance maximale est effectuée par un circuit électronique (26 à 34) purement analogique qui réalise la comparaison à zéro de la dérivée de la puissance émise par le générateur solaire et en déduit un signal de correction qui est appliqué à au moins ce régulateur d'isolement
- 25 (R2) afin de faire varier son impédance d'entrée dans un sens ou dans l'autre jusqu'à ce que la puissance émise par ce générateur solaire (1) soit en son point maximal recherché.

2 - Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comporte :

- 30 . des moyens analogiques (4A, 4B) de mesure du courant (i) fourni par le générateur solaire (1);
- . des moyens analogiques (5A, 5B) de mesure de la tension (V) de ce générateur solaire (1);
- . un premier diviseur analogique (28) qui reçoit d'une part cette
35 mesure (4B) du courant (i) et d'autre part cette mesure (5B) de cette tension (V), et qui fournit donc sur sa sortie (30) le

rapport (V/i) de cette tension sur ce courant;

5 . un deuxième diviseur analogique (29) auquel est d'une part appliquée, par passage dans un premier différenciateur analogique (27), la dérivée de cette tension (V) , et d'autre part, par passage dans un second différenciateur analogique (26) la dérivée de ce courant (i) , et qui fournit donc sur sa sortie (31) le rapport (dV/di) des différentielles de cette tension et de ce courant;

10 . un soustracteur analogique (32) qui soustrait ledit signal de sortie (V/i) du premier diviseur (28) dudit signal de sortie (dV/di) du second diviseur, pour en déduire un signal d'erreur $(V/i - dV/di)$;

15 . un additionneur analogique (34) qui additionne ce premier signal d'erreur (33, 35) à une perturbation sinusoïdale (37) d'amplitude fixe, pour obtenir le signal de correction analogique (13) avec une variation déterminée dans le temps à appliquer à au moins ledit régulateur d'isolement (R2) des deux sources d'énergie (1, 2).

20 3 - Dispositif selon l'une des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce que cette alimentation comporte trois régulateurs (R1, R2, R3) en configuration triangulaire classique, et en ce que ledit signal de correction (13) est appliqué simultanément au régulateur (R2) qui réalise l'interconnexion entre le générateur solaire (1) et la batterie (2) et au régulateur (R1) qui réalise l'interconnexion entre le générateur solaire (1) et la charge (Z).

25 4 - Dispositif selon la revendication 3, caractérisé:

. en ce que le régulateur (R1) qui réalise l'interconnexion entre le générateur solaire et la charge assure, par un asservissement (16) plus rapide que celui du dispositif MPPT, la régulation du paramètre de sortie (V_o) et,

30 . en ce que le régulateur (R2) qui réalise l'interconnexion entre le générateur solaire et la batterie assure, par un asservissement (21) plus rapide que celui du dispositif MPPT, la charge de la batterie (2) par un courant (i_B) qui ne peut pas dépasser une valeur de consigne (i_R) .

35 5 - Dispositif selon la revendication 3 ou la revendication 4, caractérisé en ce que l'asservissement MPPT est tel qu'il peut,

sans intervention extérieure, être assuré soit par le régulateur (R2) d'interconnexion entre la générateur solaire et la batterie, soit par le régulateur (R3) d'interconnexion entre la batterie et la charge (Z), selon l'état de cette batterie (2) ou la demande des
5 utilisateurs (Z).

1/2

FIG.1

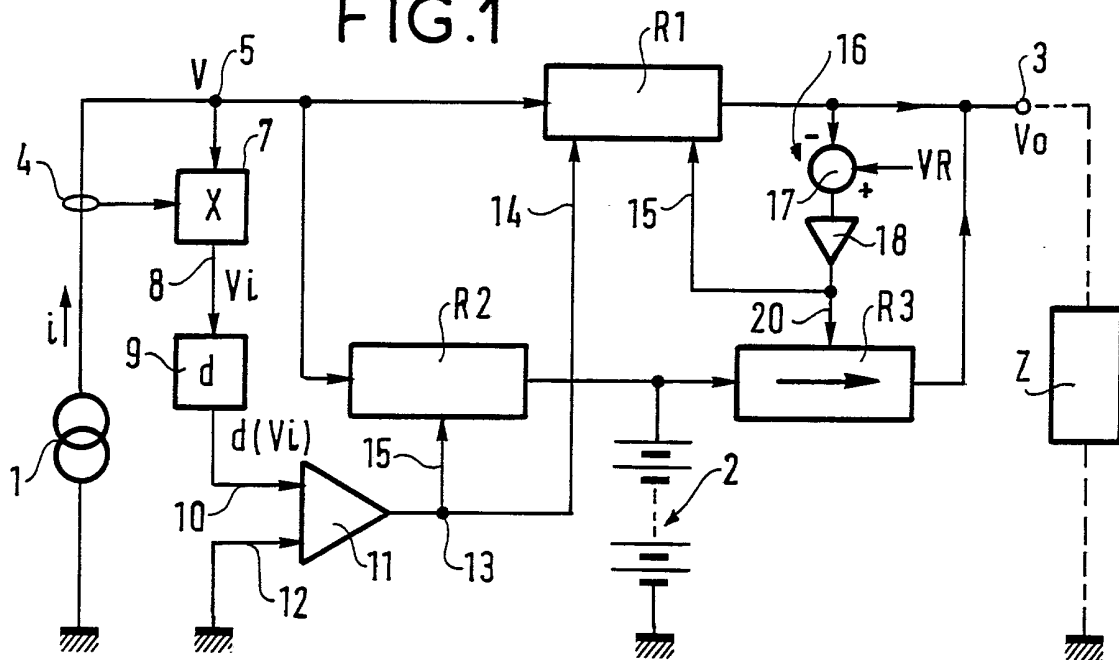
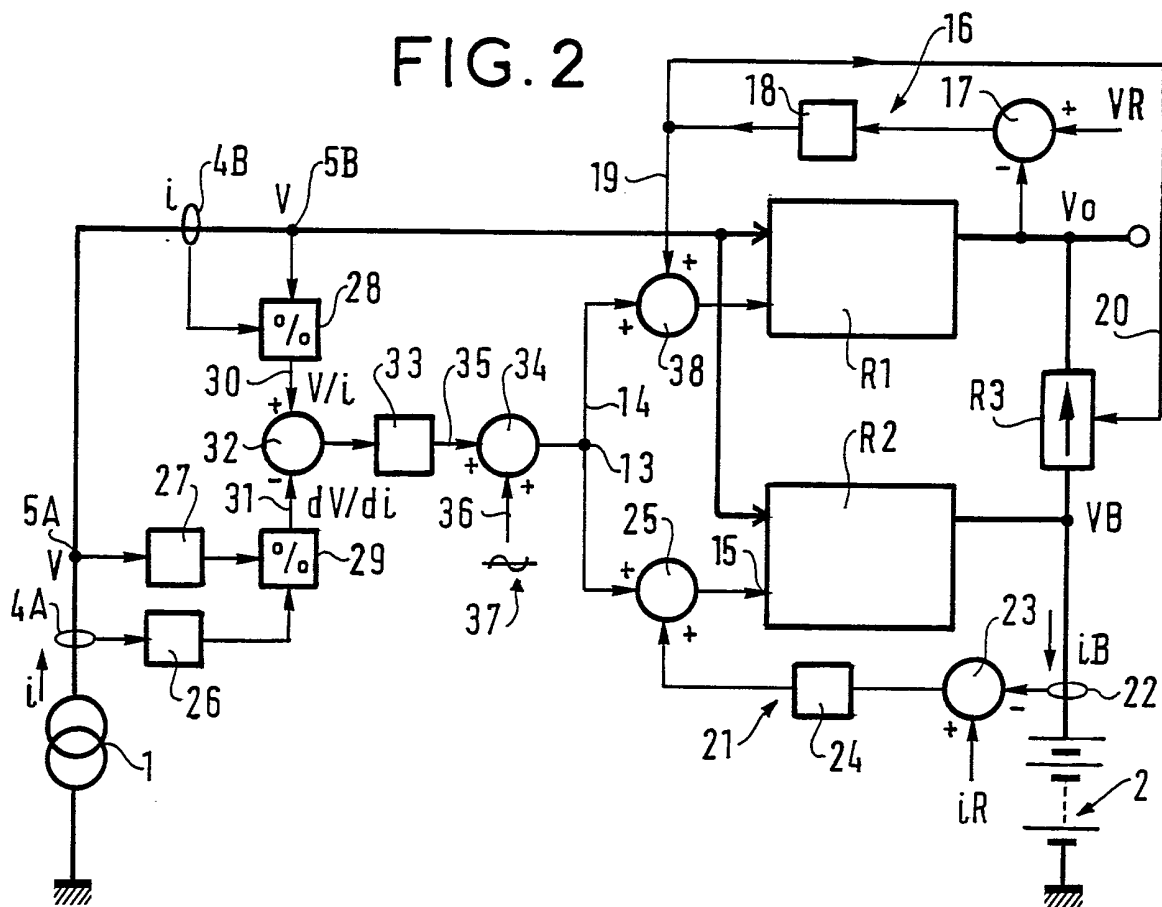


FIG. 2



2/2

FIG. 3

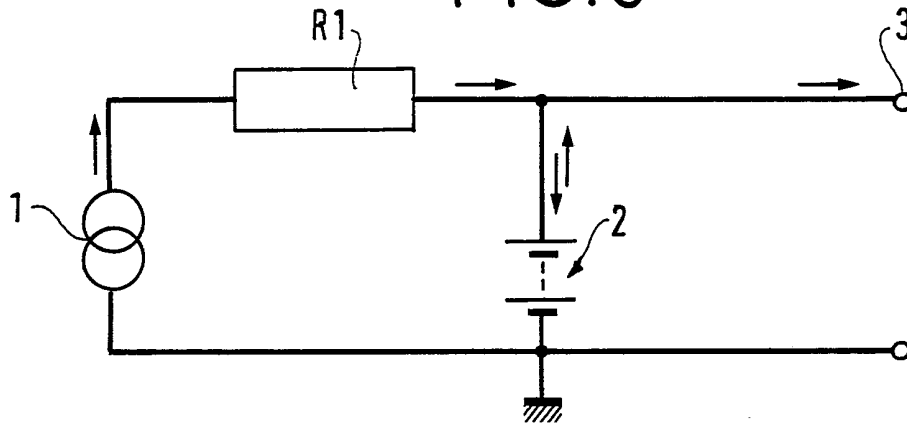


FIG. 4

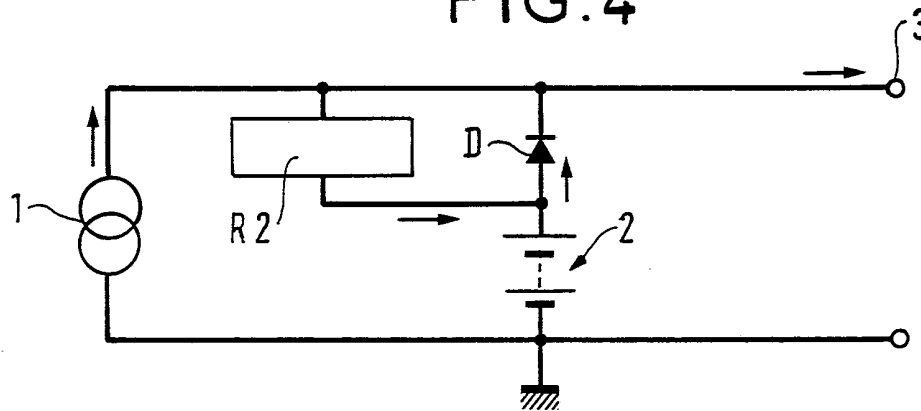
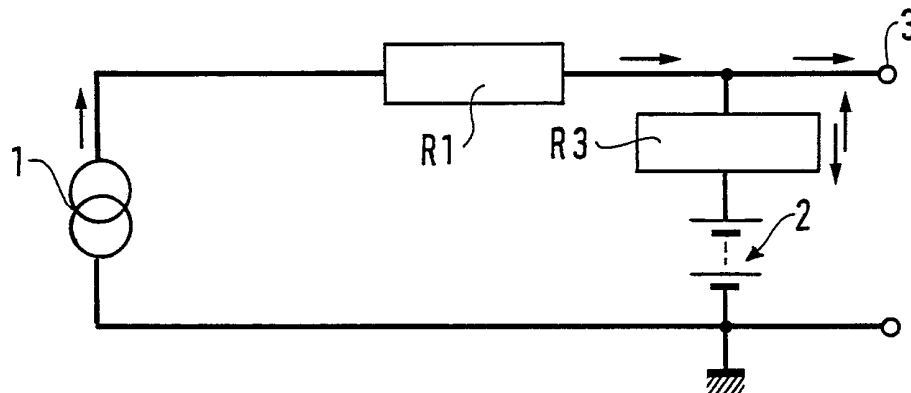


FIG. 5



INSTITUT NATIONAL
de la
PROPRIETE INDUSTRIELLE**RAPPORT DE RECHERCHE**
établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la rechercheFR 9200657
FA 471571

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		Revendications concernées de la demande examinée
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	
X	FR-A-2 175 653 (LABORATOIRE CENTRAL DE TELECOMMUNICATIONS) * page 10, ligne 1 - page 14, ligne 9 * * page 16, ligne 11 - ligne 35; figures 12-14 *	1,3-5

A	TECHNISCHE MITTEILUNG AEG-TELEFUNKEN vol. 62, no. 3, 1972, pages 126 - 128 ADOLF SCHREGER 'PARALLEL BETRIEB VON SOLARGENERATOR UND BATTERIE IM SATELLITEN SYMPHONIE' * page 126, colonne de droite, ligne 50 - page 128, colonne de gauche, ligne 12; figures 4-7 *	1,3

A	EP-A-0 027 405 (COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE) * page 5, ligne 13 - page 7, ligne 33; figures 2,3 *	2

		DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int. Cl.5)
		G05F H02J
Date d'achèvement de la recherche 30 SEPTEMBRE 1992		Examineur CLEARY F.M.
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : pertinent à l'encontre d'au moins une revendication ou arrière-plan technologique général O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant		