

①⑨ RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

①① N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

**2 572 859**

②① N° d'enregistrement national : **84 16866**

⑤① Int Cl<sup>4</sup> : H 02 H 7/122; H 02 M 7/515; H 05 B 6/04.

①② **DEMANDE DE BREVET D'INVENTION**

**A1**

②② Date de dépôt : 6 novembre 1984.

③③ Priorité :

④③ Date de la mise à disposition du public de la  
demande : BOPI « Brevets » n° 19 du 9 mai 1986.

⑥③ Références à d'autres documents nationaux appa-  
rentés :

⑦① Demandeur(s) : *ELECTRICITE DE FRANCE (Service na-  
tional)*. — FR.

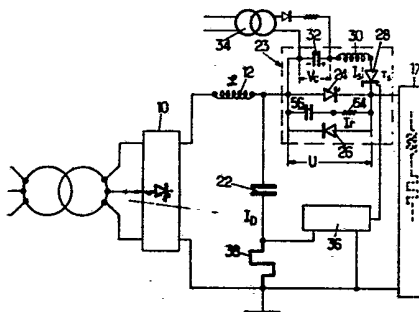
⑦② Inventeur(s) : Jacques Nuns.

⑦③ Titulaire(s) :

⑦④ Mandataire(s) : Cabinet Plasseraud.

⑤④ Onduleur à thyristors comportant un circuit de protection contre les défauts.

⑤⑦ L'onduleur à thyristors comprenant une source de courant continu 10 à condensateur de filtrage 22, un pont de thyristors asymétriques à faible tension inverse sur chacun desquels est montée en anti-parallèle une diode, et un circuit de commande des thyristors. Il comporte un circuit de protection en cas de défaut comprenant : en parallèle avec un thyristor principal 24 parcouru par le courant du pont, un montage constitué par un thyristor secondaire 28 en série avec une self 30 et un condensateur de stockage 32; un circuit de protection 34 permettant d'établir et de maintenir une tension de soufflage aux bornes du condensateur de stockage en fonctionnement normal; et un circuit 36 de détection de défaut et d'enclenchement du thyristor secondaire en cas de défaut.



!

Onduleur à thyristors comportant un circuit de protection contre les défauts

L'invention concerne les onduleurs à thyristors permettant de fournir, à partir d'une source électrique continue ou à fréquence industrielle, de l'énergie électrique à fréquence élevée, utilisable notamment pour alimenter des installations de chauffage par induction.

A l'heure actuelle, on utilise surtout des onduleurs dits "à montage parallèle", comportant un pont de thyristors alimenté à partir d'une source à fréquence industrielle par un ensemble redresseur-inductance de lissage. L'inducteur est placé dans la diagonale du pont, en parallèle avec une batterie de condensateurs de compensation d'énergie réactive.

Ce montage permet de profiter de la tenue des thyristors classiques à des tensions inverses relativement élevées. Mais il ne permet guère de dépasser une fréquence de 10 kHz, du fait que ces thyristors exigent un temps de repos d'au moins 15 microsecondes et qu'il faut évacuer la puissance thermique due aux pertes de commutation.

Pour surmonter cette limitation, on a proposé d'utiliser des thyristors asymétriques qui n'exigent qu'un temps de repos très court, habituellement 5 à 7 microsecondes, ce qui permet d'atteindre des fréquences jusqu'à environ 25 kHz. Mais, du fait de la valeur très faible de la tension inverse admissible, le montage "parallèle" est plus complexe que le montage "série" du genre illustré en Figure 1. L'onduleur de la Figure 1 comporte encore un redresseur 10 et une inductance de lissage 12 fournissant une tension continue. L'inducteur 14 et les condensateurs 16 de compensation de puissance réactive sont placés en série dans la diagonale du pont 17 : le circuit oscillant en série 14, 16 voit, à ses bornes, des créneaux de tension. Chaque thyristor 18

placé dans un bras du pont doit, pour n'être pas soumis à une tension inverse appréciable, être monté en anti-parallèle avec une diode rapide 20. L'onduleur comporte encore un circuit de commande (non représenté car il peut être classique) attaquant les gâchettes des thyristors 18.

Un montage du genre illustré en Figure 1 ne présenterait que peu d'intérêt avec des thyristors 18 classiques. En effet, le courant est pratiquement le même dans les thyristors 18 et dans le circuit oscillant série 14, 16. Par contre, ce montage devient intéressant avec des thyristors asymétriques qui ont une tension inverse aux bornes presque nulle lorsqu'ils ne sont pas passants, de sorte que leurs pertes de commutation sont réduites.

En dépit de cet intérêt, les onduleurs série ne sont guère utilisés. La raison en est notamment que les conséquences d'un défaut de commutation, quelle qu'en soit la cause (court-circuit sur l'inducteur 14 ou sur les condensateurs 16, échauffement anormal des thyristors 18, parasitage du circuit électronique de commande,...) sont beaucoup plus graves que pour un onduleur parallèle. En effet, la batterie de condensateurs de filtrage 22 placée sur l'alimentation du pont de thyristors constitue une réserve d'énergie suffisante pour détruire les thyristors 18 en cas de défaut. Les moyens de protection classiques ne sont pas satisfaisants : la protection par fusibles rapides est aléatoire et onéreuse en cas de défauts fréquents. L'enclenchement simultané des deux bras du pont pour diviser le courant de défaut ne constitue qu'un palliatif, même lorsqu'il est combiné à l'enclenchement d'un thyristor de mise en court-circuit du condensateur 22. On a donc pratiquement renoncé à l'utilisation d'onduleurs série pour des ensembles fournissant des puissances appréciables, en dépit de la simplicité de conduite et de démarrage de

ces onduleurs.

L'invention vise à fournir un onduleur à thyristors répondant mieux que ceux antérieurement connus aux exigences de la pratique, notamment en ce qu'il est capable de fonctionner à fréquence élevée et assure une protection satisfaisante même en cas de défauts répétés, tout en étant relativement peu onéreux, ce qui représente des impératifs a priori contradictoires puisque le fonctionnement à fréquence élevée conduit à adopter des thyristors asymétriques qui imposent à leur tour un montage série vulnérable aux défauts. Pour écarter cette difficulté, il a fallu apprécier que la vulnérabilité aux défauts pouvait être écartée en associant au pont onduleur de thyristors, non plus un disjoncteur classique fonctionnant par création d'une tension antagoniste, mais un montage, en lui-même connu, permettant de superposer, au courant à interrompre, un courant de sens inverse fourni par une capacité de stockage.

Dans ce but, l'invention propose notamment un onduleur à thyristors comprenant une source de courant continu à inductance de lissage et condensateur de filtrage, un pont de thyristors asymétriques à faible tension inverse, sur chacun desquels est montée en antiparallèle une diode, et un circuit de commande des thyristors, caractérisé en ce qu'il comporte un circuit de protection en cas de défaut comprenant, en parallèle avec un thyristor principal parcouru par le courant du pont, un montage constitué par un thyristor secondaire en série avec une self et un condensateur de stockage ; un circuit de charge permettant d'établir et de maintenir une tension de soufflage aux bornes du condensateur de stockage en fonctionnement normal ; et un circuit de détection de défaut et d'enclenchement du thyristor secondaire en cas de défaut.

Comme on le verra plus loin, cette disposition permet de provoquer une commutation forcée du thyristor

parcouru par le courant de pont. L'intervention du circuit de protection réduit l'amplitude de l'impulsion de courant qui traverse les thyristors du pont en cas de défaut et là rend non répétitive.

5           Le circuit de protection peut par ailleurs fonctionner à cadence élevée : son temps de récupération est en effet celui nécessaire à la recharge du condensateur de stockage, qui ne dépasse pas quelques secondes.

10           On voit donc que l'on fait remplir, au circuit de protection, un rôle original du fait de son inclusion dans l'onduleur série à thyristors asymétriques.

          Dans un premier mode d'exécution de l'invention, le thyristor principal et le montage série constituent un ensemble ajouté au pont. Cette solution permet de ré-  
15           équiper facilement des onduleurs existants. En contrepartie, ce mode d'exécution présente l'inconvénient de solliciter le thyristor principal qui est traversé par le courant de chaque diagonale du pont onduleur et, de plus, travaille à une fréquence double de celle des thy-  
20           ristors du pont. Une solution plus avantageuse consiste à utiliser un des thyristors de chacune des branches du pont comme thyristor principal. Dans ce cas, le circuit de détection sera généralement monté pour être sensible au courant fourni par la source.

25           L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui suit de modes particuliers d'exécution donnés à titre d'exemples non limitatifs. La description se réfère aux dessins qui l'accompagnent, dans lesquels :

30           - la Figure 1, déjà mentionnée, est un schéma de principe d'un onduleur "série" de type connu,

          - la Figure 2 est un schéma de principe d'un onduleur comportant un circuit de protection suivant un premier mode d'exécution de l'invention,

35           - la Figure 3 montre la variation, en fonction du temps, des courants et tensions en divers points du

schéma de la Figure 2, lorsque survient un défaut,

- la Figure 4 est un schéma simplifié d'un circuit de détection de courant de défaut et d'enclenchement du thyristor secondaire du circuit de la Figure 2,

5       - la Figure 5 est un schéma de principe d'un shunt coaxial utilisable dans le circuit de la Figure 2,

- la Figure 6, similaire à la Figure 2, montre une variante de réalisation,

10       - la Figure 6A est un synoptique de commande de l'onduleur de la Figure 6,

- les Figures 7 et 8 montrent respectivement un circuit de détection et un circuit de commande des thyristors utilisables dans le montage de la Figure 6.

On décrira tout d'abord le principe de fonctionnement d'un circuit de protection 23 suivant l'invention en faisant référence à la Figure 2 où sont représentés le redresseur 10 muni de son transformateur d'alimentation à partir d'un réseau triphasé et le pont de thyristors 17, qui peut avoir la constitution déjà  
20 montrée en Figure 1. Chacun des bras du pont 17 est équivalent à un circuit constitué par le montage en série d'une résistance et d'une inductance, alimentées par une tension fournie par la source 10.

Le circuit de protection 23 comporte un thyristor principal 24 muni d'un circuit de commande (non  
25 représenté) prévu pour enclencher ce thyristor 24 en même temps que les thyristors 18 du pont onduleur 17. Le circuit doit être prévu pour interrompre l'enclenchement du thyristor 24 et des thyristors 18 en cas de défaut.  
30 Une diode rapide 26 est montée en anti-parallèle sur le thyristor principal 24 : elle remplit un rôle similaire à celui des diodes 20 pour les thyristors 18.

Un circuit qu'on peut qualifier de "circuit de soufflage" est placé en parallèle avec la diode 26 et le  
35 thyristor 24. Ce circuit de soufflage comprend un thyristor secondaire ou thyristor de soufflage 28, une

inductance 30 de valeur  $L$  et un condensateur 32 de capacité  $C$ . Un circuit de charge 34 est prévu pour établir aux bornes du condensateur 32, lors du fonctionnement normal, une tension continue  $V_c$ .

5            Enfin, un circuit de détection et d'enclenchement 36 est prévu pour enclencher le thyristor secondaire 28 lorsque le courant qui traverse le condensateur 22 dépasse une valeur déterminée. Dans le cas montré en Figure 2, le circuit 36 est sensible à la différence de  
10            potentiel aux bornes d'un shunt coaxial 38 qui mesure le courant traversant le condensateur 22.

Le fonctionnement du circuit de protection qui vient d'être décrit est le suivant :

Aussi longtemps que l'onduleur fonctionne de  
15            façon normale, le courant qui traverse les branches du pont 17 traverse également le thyristor principal 24.

Si un défaut survient à un instant  $t_0$  (Figure 3) l'intensité du courant de défaut  $I_d$  augmente (première et quatrième lignes de la Figure 3). A l'instant  $t_1$ ,  
20            cette intensité atteint une valeur limite  $I_{max}$  pour laquelle le circuit 36 enclenche le thyristor 28. Ce dernier s'amorce à l'instant  $t_2$ .

Le condensateur 32, préalablement chargé sous la tension  $V_c$ , se décharge alors dans le circuit constitué  
25            par l'impédance 30 de valeur  $L$ , le thyristor secondaire 28 et le thyristor principal 24. En effet, l'impédance de ce circuit est négligeable devant celle du circuit comprenant le pont 17 et la source 10. La diode 26, étant polarisée en inverse, n'est pas passante.

30            Le courant de soufflage  $I_s$  s'établit alors suivant une loi du genre montré en Figure 3. Si en effet on néglige la résistance du circuit constitué par le thyristor secondaire 28, le thyristor principal 24 et l'inductance 30, on peut écrire la tension  $U$  (26, 24) aux  
35            bornes de la diode 26 et du thyristor 24 sous la forme :

$$U = L \frac{dI_s}{dt} + \frac{1}{C} \int I_s dt \quad (1)$$

ce qui conduit à :

$$I_s = I_0 \sin \omega t$$

où  $\omega = (LC)^{1/2}$

La pente initiale de la courbe représentative de  $I_s$  est approximativement égale à  $V_c/L$ .

On voit que le courant  $I_{24}$  qui traverse le thyristor principal 24 commence à décroître à l'instant  $t_2$ . A un instant ultérieur  $t_3$ , l'intensité du courant  $I_s$  atteint la même valeur que le courant de défaut. Le courant dans le thyristor principal s'annule et s'interrompt. L'impulsion de courant  $I_s$  passe alors par la diode 26 et une tension inverse est appliquée aux bornes du thyristor principal 24. Le courant de défaut  $I_d$  augmente toujours. Mais il est dévié par le circuit 30, 32, 28 et il tend à recharger en inverse le condensateur 32.

A l'instant  $t_4$  enfin, le courant s'annule dans la diode 26. La tension redevient positive aux bornes du thyristor principal 24. Mais, à condition que le temps  $t_4 - t_3$  soit supérieur au temps de recouvrement du thyristor principal 24, ce dernier reste non passant et le courant de défaut  $I_d$ , toujours dévié par le circuit de soufflage, commence à décroître, pendant que la tension aux bornes du transistor principal recommence à croître (5ème ligne sur la Figure 3). A l'instant  $t_5$  le courant de défaut  $I_d$  s'annule : le circuit de protection a alors rempli sa fonction.

Dès que la tension  $U_{26, 24}$  aux bornes du thyristor principal 24 est revenue à sa valeur maximale, le courant de défaut étant nul, le condensateur 32 est rechargé en inverse. Pour que le circuit de protection puisse fonctionner de nouveau, il faut que la source auxiliaire 34 ait le temps de recharger le condensateur

32 à sa valeur initiale. En règle générale, on prévoira le circuit 34 de façon que cette durée soit de 1 à 2 secondes.

Le circuit 36 peut avoir la constitution générale montrée en Figure 4. La tension prélevée aux bornes du shunt 38 attaque, par l'intermédiaire d'un amplificateur opérationnel bouclé 40, un circuit logique 42. Le signal de sortie de ce dernier est porté à un niveau suffisant par un amplificateur Darlington 44 et attaque, par l'intermédiaire d'un transformateur 46, la gâchette du thyristor secondaire 28.

Le shunt 38 est avantageusement du type coaxial, qui a l'avantage de fournir, sur un câble coaxial de sortie 48, une tension qui est une image fidèle du courant de défaut qui entre et sort par des connexions 50. La partie de mesure du shunt se compose de deux cylindres coaxiaux, le cylindre externe étant par exemple en cuivre et le cylindre interne en "INCONEL". Un tel shunt est peu sensible aux perturbations et permet la mesure de courants ayant des composantes alternative et continue importantes. Il peut cependant être remplacé par d'autres capteurs capables de mesurer des courants continus et alternatifs de fréquence élevée (par exemple capteurs de la société LEM de Genève).

Le circuit 36 peut être constitué par une carte de circuits imprimés, une seconde carte étant consacrée à la commande du thyristor principal 24 et couplée à une carte de commande des thyristors 18 du pont onduleur.

A titre d'exemple, on peut indiquer qu'un montage du type montré en Figure 2 a été utilisé pour protéger un onduleur dont chaque bras en court-circuit à la suite d'un défaut de commutation d'un thyristor 18 est équivalent à une charge inductive de 7  $\mu\text{H}$  alimentée par un condensateur 22 de 44 000  $\mu\text{F}$ . Le circuit de soufflage comportait un condensateur 32 de 500  $\mu\text{F}$  chargé sous 160 V et une self à inductance 30 de 0,6  $\mu\text{H}$  : le courant de

défaut maximum provoqué par une charge initiale de 90 V du condensateur 22 est alors réduit à une intensité maximale de 800 A et complètement annulé au bout de 110 $\mu$ s. La surtension provoquée par l'annulation du courant dans l'inductance de lissage 12 recharge le condensateur 22 sous une tension de 140 V, supérieure à sa tension initiale. Le thyristor 24 était protégé contre cette surtension par un circuit RC série 54, 56.

Comme on l'a indiqué plus haut, la solution qui vient d'être décrite a l'inconvénient de faire travailler le thyristor principal à fréquence double de celle des thyristors 18 du pont onduleur et avec la même intensité de courant. Une solution plus économique consiste à utiliser un thyristor dans chaque branche du pont onduleur comme thyristor principal. Le montage peut alors être celui indiqué en Figure 6 où les éléments correspondant à ceux déjà représentés en Figures 1 et 2 portent le même numéro de référence.

Chaque bras comporte alors un circuit de protection propre sur chaque thyristor 18 qui remplit le rôle du thyristor principal 24 du circuit de la Figure 2. Les deux condensateurs sont chargés par la même source 34 à travers des diodes respectives 58. Le circuit de détection du courant de défaut et d'enclenchement des thyristors secondaires 28 et le circuit de commande des thyristors 18 peuvent alors avoir les constitutions montrées respectivement en Figures 7 et 8 et être associés comme indiqué sur la Figure 6A.

Le fonctionnement du circuit de la Figure 8 pour inhiber les thyristors 18 en cas de défaut est provoqué par celui du circuit de détection de la Figure 7. Un contact manuel 60 permet d'effectuer la remise à zéro du circuit après fonctionnement.

REVENDICATIONS

1. Onduleur à thyristors comprenant une source de courant continu (10) à condensateur de filtrage (22), un pont de thyristors asymétriques à faible tension inverse (18) sur chacun desquels est montée en anti-parallèle une diode (20), et un circuit de commande des thyristors, caractérisé en ce qu'il comporte un circuit de protection en cas de défaut comprenant : en parallèle avec un thyristor principal (24 ou 18) parcouru par le courant du pont, un montage constitué par un thyristor secondaire (28) en série avec une self (30) et un condensateur de stockage (32) ; un circuit de protection (34) permettant d'établir et de maintenir une tension de soufflage aux bornes du condensateur de stockage en fonctionnement normal ; et un circuit (36) de détection de défaut et d'enclenchement du thyristor secondaire en cas de défaut.

2. Onduleur suivant la revendication 1, caractérisé en ce que le thyristor principal et le montage série constituent un ensemble ajouté au pont, en série avec ce dernier.

3. Onduleur suivant la revendication 2, caractérisé en ce que le circuit de protection comporte un montage RC série (54, 56) en parallèle avec le thyristor principal.

4. Onduleur suivant la revendication 2 ou 3, caractérisé en ce que le circuit de détection (36) est prévu pour mesurer le courant dans le condensateur de filtrage (22).

5. Onduleur suivant la revendication 1, caractérisé en ce que l'un des thyristors de chaque branche du pont constitue thyristor principal, tous les condensateurs de stockage (32) étant alimentés par un même circuit de charge (34).

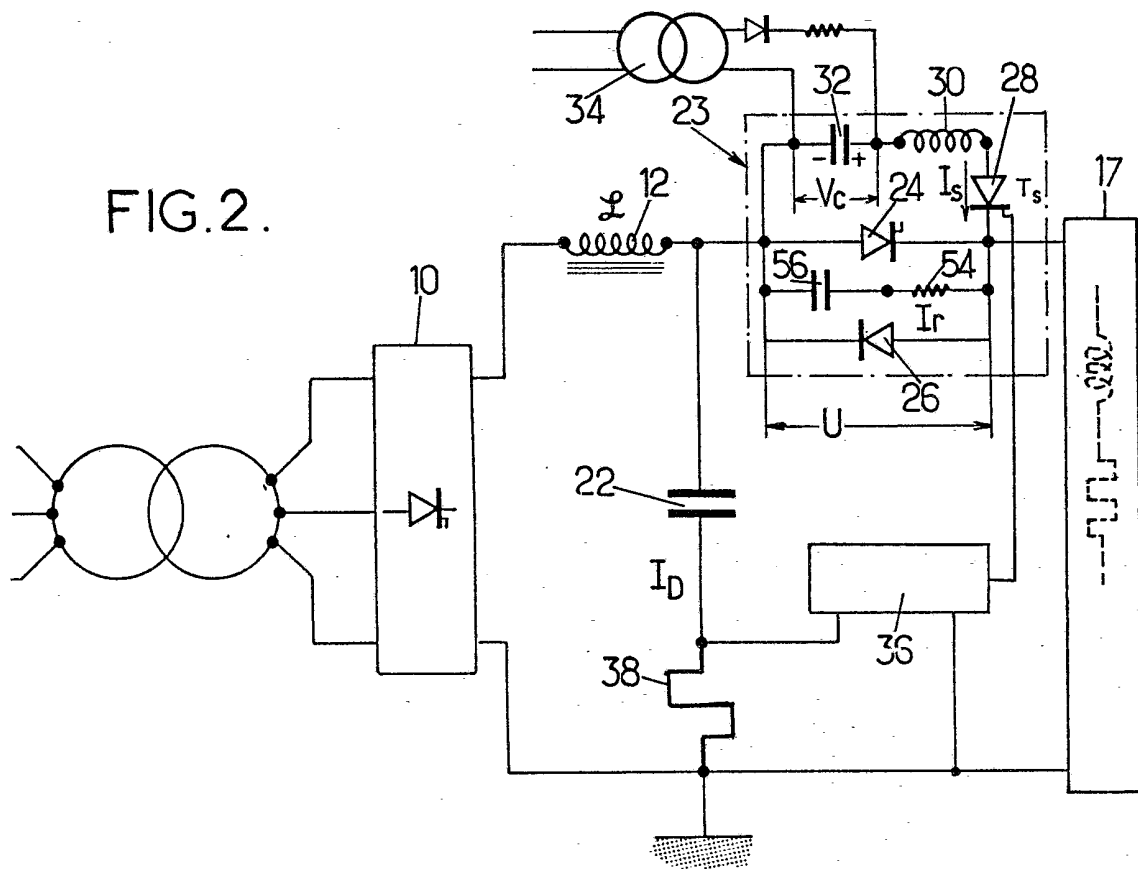


FIG.3.

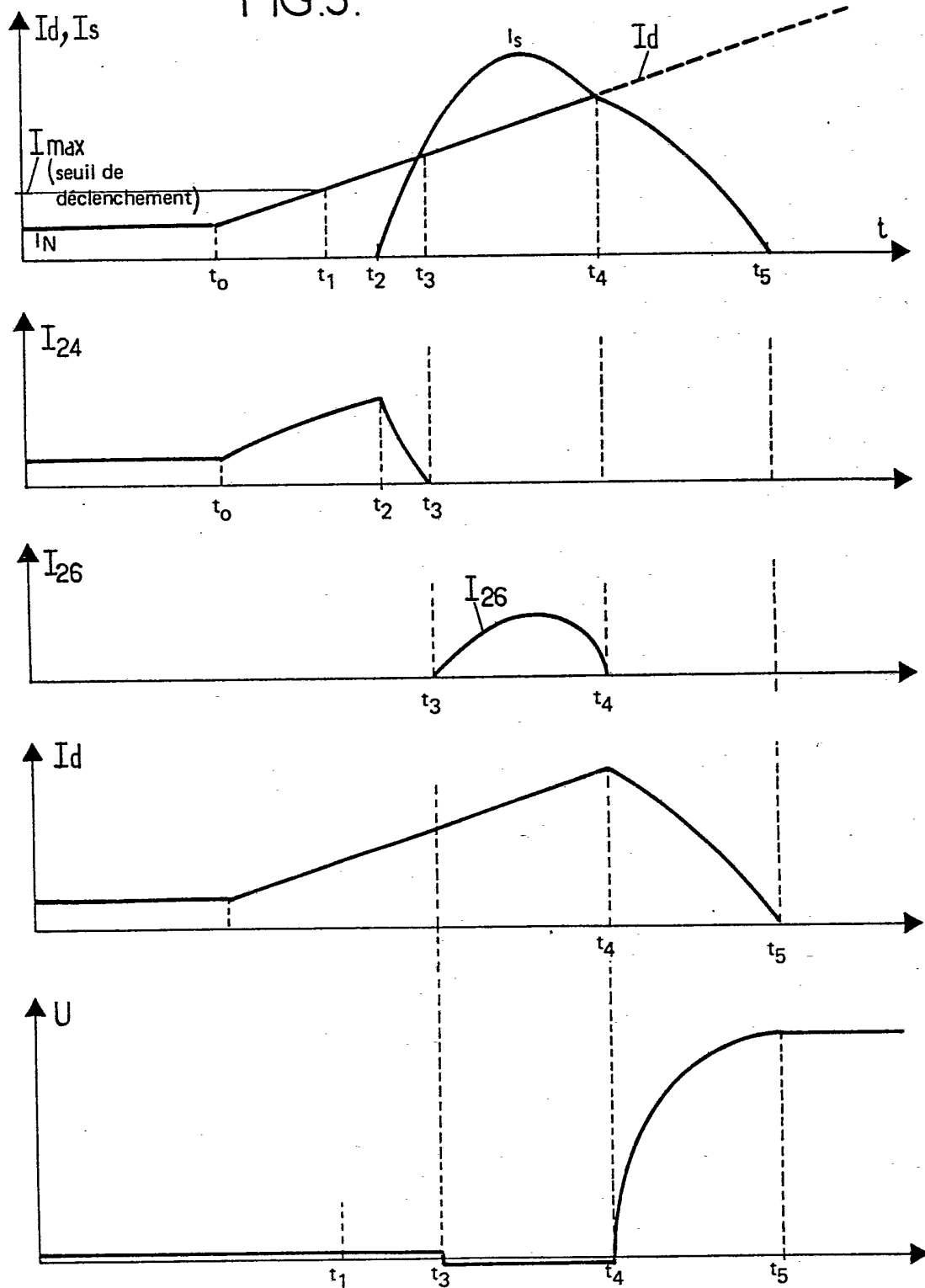


FIG. 4.

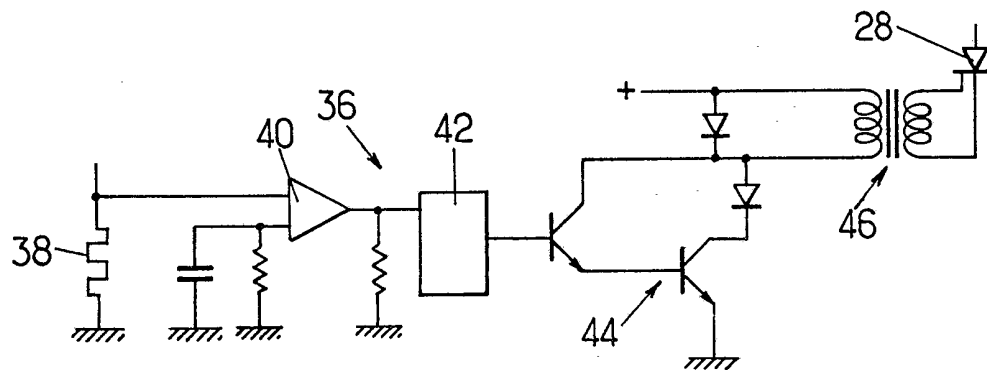
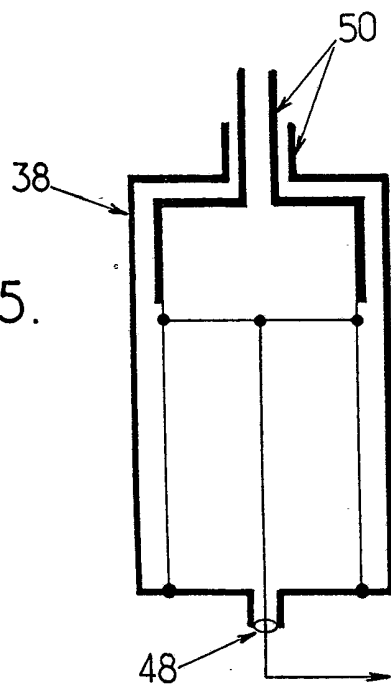


FIG. 5.



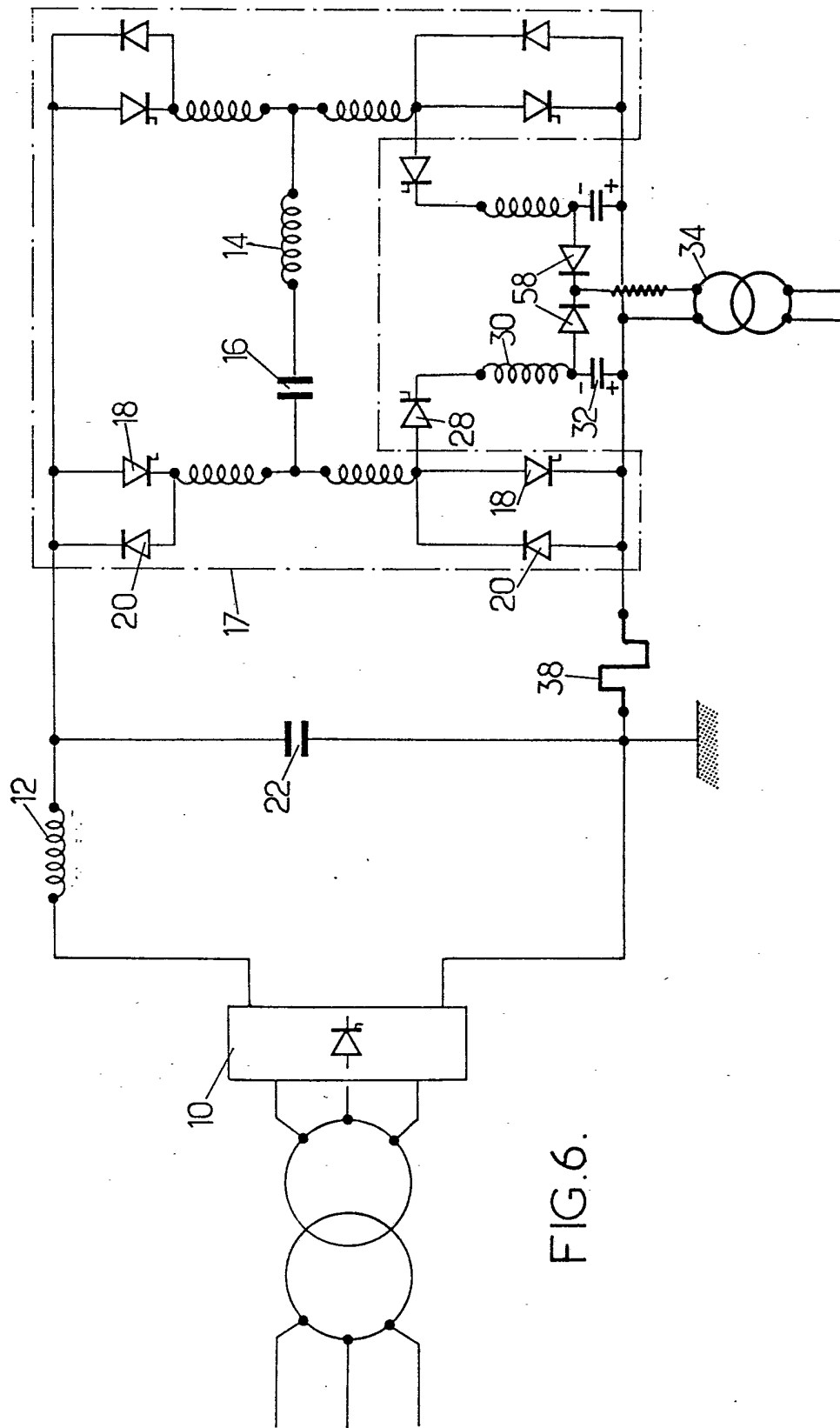


FIG. 6.

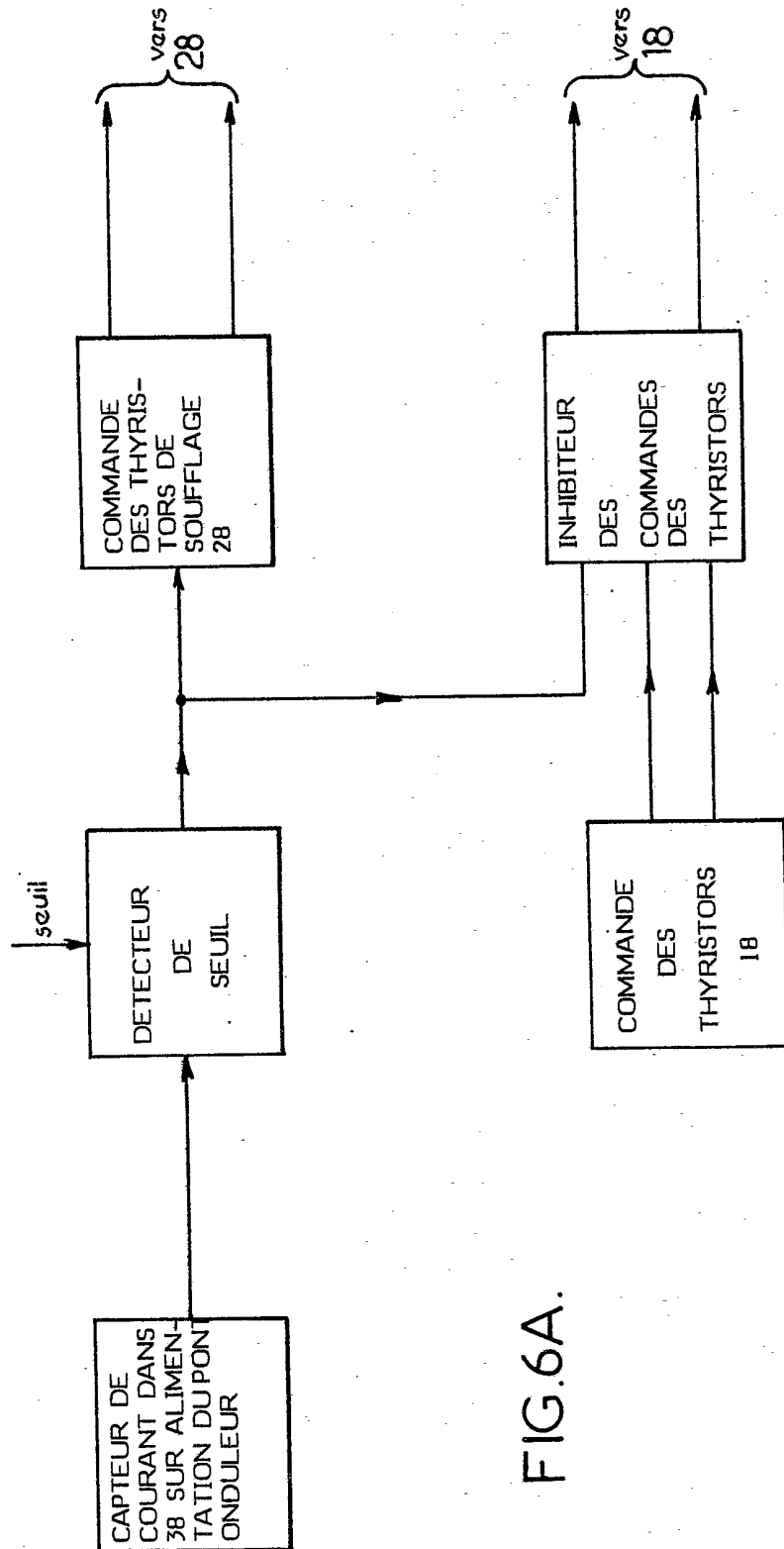


FIG. 6A.

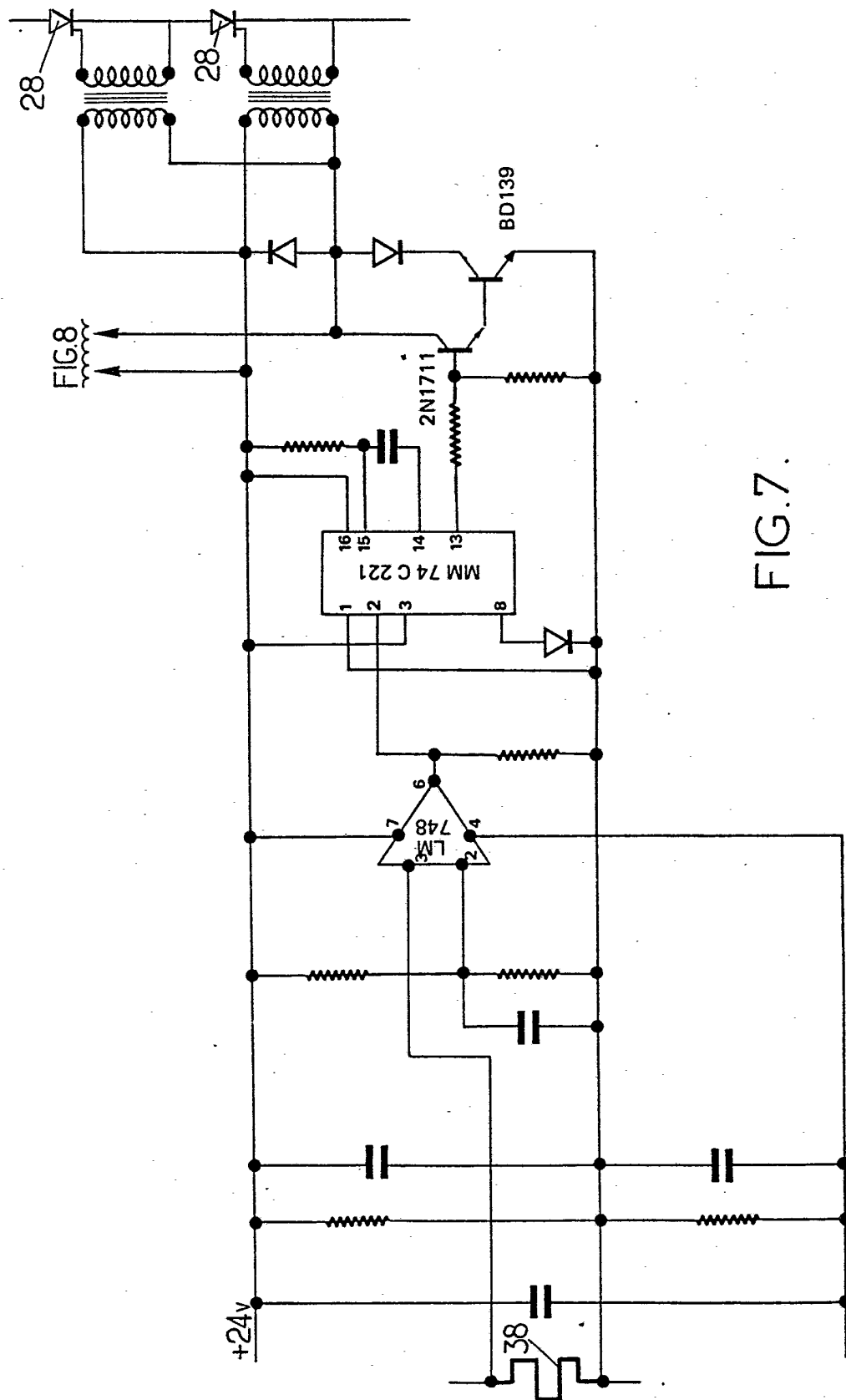


FIG. 7.

