

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

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

2 629 942

②1 N° d'enregistrement national :

88 04672

⑤1 Int Cl⁴ : H 01 F 5/08; H 03 K 3/53.

①2

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 8 avril 1988.

③0 Priorité :

④3 Date de la mise à disposition du public de la
demande : BOPI « Brevets » n° 41 du 13 octobre 1989.

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

⑦1 Demandeur(s) : *COMPAGNIE GÉNÉRALE D'ELECTRI-
CITE, Société anonyme.* — FR.

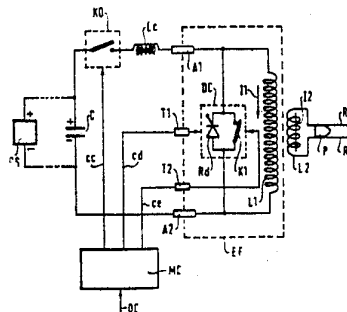
⑦2 Inventeur(s) : François Moisson-Franckhauser.

⑦3 Titulaire(s) :

⑦4 Mandataire(s) : Jean Pothet, Sospì.

⑤4 Dispositif d'accumulation d'énergie dans une inductance supraconductrice.

⑤7 Dispositif d'accumulation d'énergie dans une inductance supraconductrice en vue de la libérer sous une forme impulsionnelle comprenant, dans une enceinte froide EF pourvue d'amenées de courant A1, A2, l'enroulement L1 constituant l'inductance supraconductrice et un dispositif de commutation froid DC bouclant l'inductance supraconductrice pour la conservation sans perte de l'énergie qu'elle contient, ainsi que, hors de l'enceinte froide, un condensateur C, un dispositif d'alimentation PS pour charger le condensateur C, un commutateur chaud KO inséré dans un circuit connectant ce condensateur en série avec l'inductance supraconductrice L1, par lesdites amenées A1, A2, et des moyens de commande MC comprenant des dispositions pour ouvrir ledit dispositif de commutation froid DC et pour fermer ledit commutateur chaud KO, afin que l'inductance se trouve connectée en série avec le condensateur et reçoive de l'énergie de ce condensateur, et ensuite pour refermer ledit dispositif de commutation froid DC et pour rouvrir ledit commutateur chaud KO, afin que l'inductance supraconductrice L1 conserve l'énergie ainsi acquise, tandis que le condensateur C est rechargé, une telle succession d'opérations étant répétée plusieurs fois pour charger par étapes l'inductance supraconductrice.



FR 2 629 942 - A1

D

Dispositif d'accumulation d'énergie dans une inductance supraconductrice

La présente invention concerne un dispositif à accumulation d'énergie dans une inductance supraconductrice, en vue de libérer cette énergie sous une forme impulsionnelle. Elle s'appliquera, par exemple, dans un lanceur électromagnétique, c'est-à-dire dans une machine lançant des projectiles avec une énergie se chiffrant en dizaines de mégajoules, par l'effet des forces électromagnétiques développées à partir de l'énergie stockée dans l'inductance supraconductrice et libérée sous la forme d'une impulsion de quelques millisecondes.

Dans le domaine des hautes énergies, il est classique d'utiliser un dispositif d'accumulation d'énergie recevant l'énergie fournie par une source à débit limité et capable de fournir toute l'énergie accumulée en un bref intervalle de temps. On a utilisé à cette fin des bancs de condensateurs ou des machines homopolaires.

L'utilisation d'une inductance supraconductrice dans un tel domaine semblait indiquée par le fait que l'énergie stockable dans une telle inductance est notablement supérieure à celle que peut stocker un banc de condensateurs de même encombrement. Elle était toutefois impraticable en raison de ce que, en régime impulsionnel, le matériau de l'inductance ne conservait pas son état supraconducteur, du fait des pertes par hystérésis et par courants induits.

C'est ainsi que l'on trouve décrit, dans l'article "Hybrid pulsed power transformer (HPPT) : Magnet design and results of verification experiments", de E.M.W. Leung et al, publié dans le document CS14 de la "10th International Conference on Magnet Technology (MT10), 21-25/9/87, Boston, (U.S.A.)", un transformateur d'impulsion hybride subissant une charge lente, par son enroulement primaire demeurant à l'état supraconducteur, et fournissant une décharge impulsionnelle dans un enroulement secondaire non supraconducteur, lorsque l'enroulement primaire est amené à quitter

l'état supraconducteur.

On notera en passant que le terme "hybride" vient de ce que le transformateur possède un enroulement supraconducteur, dans lequel l'énergie est stockée sans pertes, et un enroulement secondaire non supraconducteur servant à extraire l'énergie stockée.

Les pertes au primaire du dispositif décrit dans cet article sont déjà prohibitives pour certaines applications ; de plus, l'énergie thermique dissipée au primaire devant être évacuée avant qu'un nouveau cycle de fonctionnement puisse avoir lieu, la fréquence maximale d'utilisation du dispositif est considérablement réduite.

L'arrivée au stade de la production de matériaux supraconducteurs multifilamentaires ne souffrant pas des restrictions mentionnées permet maintenant d'envisager l'utilisation pratique des inductances supraconductrices pour le stockage d'énergie avec restitution impulsionnelle.

Par ailleurs, l'accumulation d'énergie dans une inductance supraconductrice soulève, d'une manière générale, un problème de pertes cryogéniques par les amenées de courant. Le problème des amenées de courant est traité, par exemple, dans un autre contexte, dans l'article "Designs of pulsed power cryogenic transformers", de S.K. Singh et al, publié dans le document CS13 de la "10th International Conference on Magnet Technology (MT10), 21-25/9/87, Boston, (U.S.A.)", qui décrit un transformateur d'impulsion non supraconducteur pour un lanceur électromagnétique, d'une structure cylindrique, avec primaire et secondaire concentriques, les amenées de courant ayant une section résultant d'un calcul basé sur leur échauffement adiabatique pendant l'impulsion. En résumé, pour limiter des pertes cryogéniques au niveau des amenées, celles-ci doivent avoir une section réduite. Mais, pour limiter les pertes par effet Joule et l'augmentation corrélative de température aux niveau des amenées, il faut leur donner une section élevée.

Le conflit entre ces exigences contradictoires est encore plus aigu dans le cas d'un dispositif à accumulation d'énergie dans une inductance supraconductrice, en raison des risques de perte de l'état supraconducteur. Une solution de compromis implique toujours un surcoût en moyens de refroidissement cryogénique.

Dans le premier document cité, ce problème n'est pas traité, les amenées de courant devant supporter le courant de l'inductance supraconductrice durant toute la charge lente de cette dernière.

Un premier objet de l'invention est donc un dispositif d'accumulation d'énergie dans une inductance supraconductrice dans lequel les exigences contradictoires relatives aux amenées de courant sont considérablement allégées.

Un autre objet de l'invention est un dispositif d'accumulation d'énergie dans lequel les pertes d'énergie durant la charge de l'inductance supraconductrice sont minimisées.

Un autre objet de l'invention est un dispositif d'accumulation d'énergie dans lequel la libération impulsionnelle de l'énergie stockée s'effectue avec des pertes minimisées.

Selon une caractéristique de l'invention, le dispositif d'accumulation d'énergie dans une inductance supraconductrice en vue de la libérer sous une forme impulsionnelle comprend, dans une enceinte froide pourvue d'amenées de courant, l'enroulement constituant l'inductance supraconductrice et un dispositif de commutation froid bouclant l'inductance supraconductrice pour la conservation sans perte de l'énergie qu'elle contient, ainsi que, hors de l'enceinte froide, un condensateur, un dispositif d'alimentation pour charger le condensateur, un commutateur chaud inséré dans un circuit connectant ce condensateur en série avec l'inductance supraconductrice, par lesdites amenées.

et des moyens de commande comprenant des dispositions pour ouvrir ledit dispositif de commutation froid et pour fermer ledit commutateur chaud, afin que l'inductance se trouve connectée en série avec le condensateur et reçoive de l'énergie de ce condensateur, et ensuite pour refermer ledit dispositif de commutation froid et pour rouvrir ledit commutateur chaud, afin que l'inductance supraconductrice conserve l'énergie ainsi acquise, pendant que le condensateur est rechargé, une telle succession d'opérations étant répétée plusieurs fois pour charger par étapes l'inductance supraconductrice.

Dans le dispositif d'accumulation d'énergie de l'invention, les amenées de courant sont ainsi utilisées par courts intervalles, le temps de chaque transfert incrémentiel d'énergie du condensateur à l'inductance supraconductrice. Elles peuvent donc supporter des pertes ohmiques relativement élevées sans échauffement inacceptable ; cela permet de leur conférer une section relativement faible réduisant d'autant le flux thermique qu'elles apportent et les pertes cryogéniques qu'elles causent.

Selon une autre caractéristique de l'invention, le dispositif d'accumulation d'énergie comprend en outre, hors de l'enceinte froide, un enroulement secondaire et une charge commutable, et lesdits moyens de commande comprennent aussi des dispositions intervenant lorsque l'inductance est chargée et que la charge commutable est en circuit, pour ouvrir ledit dispositif de commutation froid et pour fermer temporairement ledit commutateur chaud, de sorte qu'une faible part de l'énergie stockée dans l'inductance supraconductrice est transférée dans le condensateur, après l'ouverture dudit commutateur froid, sans dissipation notable d'énergie dans ledit commutateur froid au moment de son ouverture, pendant que l'essentiel de l'énergie stockée, induite au secondaire, est transférée à la charge sous une forme impulsionnelle.

Ainsi, le transfert vers la charge de l'énergie accumulée s'effectue par ouverture de la boucle froide du circuit primaire et sans pertes dans l'enceinte froide. La surtension qu'on obtiendrait dans la boucle froide, sans circuit de dérivation du courant, et la dissipation d'énergie dans le commutateur froid, créée au moment de son ouverture, sont évitées au primaire grâce à la mise en circuit d'un condensateur de dérivation qui n'est autre que le condensateur servant au transfert d'énergie de la source à l'inductance. L'énergie retournée au condensateur pourra être réutilisée, ce qui améliorera encore l'efficacité globale.

Selon une autre caractéristique de l'invention, ledit dispositif de commutation froid comprend la combinaison en parallèle d'un contact métallique et d'un redresseur, de sorte que, lorsque le dispositif de commutation froid est fermé, le contact métallique permette l'établissement d'une boucle sans résistance, et que, lorsque le dispositif de commutation est ouvert, pour un transfert d'énergie du condensateur à l'inductance supraconductrice, le redresseur redevienne ensuite passant et boucle l'inductance supraconductrice dès que la charge du condensateur est sensiblement transférée dans l'inductance.

Selon une autre caractéristique de l'invention, ledit redresseur est un redresseur commandé et lesdits moyens de commande comprennent des dispositions pour le bloquer, lorsque le contact métallique du dispositif de commutation froid est ouvert afin de transférer à la charge l'énergie stockée dans l'inductance supraconductrice, et pour lui permettre de devenir passant, lorsque le contact métallique du dispositif de commutation froid est ouvert en vue de permettre un transfert d'énergie dudit condensateur à l'inductance supraconductrice.

Les différents objets, caractéristiques et avantages du dispositif à accumulation d'énergie de la présente

invention seront maintenant exposés de façon plus détaillée dans le cours de la description qui va suivre, faite en se reportant à la figure annexée qui représente le schéma de principe d'un exemple de réalisation de l'invention, fourni
5 à titre d'exemple limitatif.

La figure annexée représente donc le schéma de principe d'un dispositif d'accumulation d'énergie dans une inductance supraconductrice en vue de la libérer sous une forme impulsionnelle conforme à la présente invention.
10 L'utilisation de l'énergie libérée indiquée dans cet exemple est la propulsion d'un projectile. L'énergie doit par conséquent être maximale, le poids du projectile et/ou la portée du lanceur en dépendant. De plus, si le dispositif doit être mobile, le rendement doit être également le plus
15 élevé possible, en vue de limiter le poids de la source d'énergie. Enfin, s'il s'agit d'une arme, des cycles opératoires complets doivent être accomplis dans une durée minimale, pour l'obtention d'une cadence de tir élevée. Il est bien évident, toutefois, que des considérations similaires pourraient être développées dans d'autres cas
20 d'application.

Le stockage de l'énergie s'opère dans une inductance supraconductrice L_1 . L'énergie provient d'une source PS. Elle est destinée à être libérée sous une forme impulsionnelle au profit d'une charge constituée par un projectile
25 P. Un dispositif de commande DC ordonne le stockage de l'énergie dans l'inductance L_1 et sa libération impulsionnelle.

L'inductance L_1 et un dispositif de commutation DC
30 sont placés dans une enceinte froide EF. La température dans cette enceinte froide est telle que les conducteurs électriques soient supraconducteurs. Le dispositif de commutation DC est normalement fermé. Ce dispositif de commutation comprend en particulier un contact métallique K_1
35 bouclant l'inductance L_1 et un redresseur R_d shuntant le

contact K1. Si l'on suppose que l'inductance L1 est parcourue par un courant I1, ce courant se maintient dans la boucle, sans pertes, en raison de ce que tous les éléments de la boucle sont supraconducteurs. Ce courant engendre un
5 champ magnétique dans lequel est stockée l'énergie qui a été apportée lors de l'établissement du courant. L'inductance L1 peut ainsi conserver l'énergie qui lui est apportée.

Cette énergie provient d'une source de courant
10 continu PS couplée à un condensateur C. Ce couplage peut être effectué d'une manière connue quelconque : c'est pourquoi il est figuré par des traits interrompus. Il a pour effet d'entretenir, aux bornes du condensateur C, une tension élevée (plusieurs dizaines de milliers de volts,
15 par exemple) convenant à l'apport d'énergie à l'inductance L1. Dans une forme de couplage particulièrement simple, la source PS est connectée en permanence au condensateur C par des résistances de découplage.

Les moyens de commande MC comprennent des dispositions leur permettant de connaître les courants et tensions en divers endroits du dispositif d'accumulation et, en particulier, la tension aux bornes du condensateur C et le courant dans l'inductance L1. De telles dispositions de mesure sont banales en elles-mêmes et n'ont pas été représentées sur le schéma. Elles permettent d'établir que
25 l'inductance L1 n'est pas complètement chargée et qu'un cycle de transfert de charge doit encore être accompli.

Dans l'accomplissement de ce cycle d'accumulation de l'énergie, les moyens de commande MC maintiennent
30 constamment, par une liaison cd comprenant une traversée T1 de l'enceinte EF, le redresseur Rd en situation de se comporter comme une diode.

Au début de ce cycle d'accumulation de l'énergie, les moyens de commande MC provoquent d'abord, par une autre
35 liaison ce comprenant une traversée T2 de l'enceinte EF,

l'ouverture du contact froid K1 qui cesse de court-circuiter le redresseur Rd ; puis les moyens de commande MC provoquent, par une liaison cc, la fermeture du commutateur chaud KO, ce qui a pour effet d'interrompre la circulation
5 du courant dans la branche du dispositif de commutation froid DC, pendant la durée du transfert d'énergie du condensateur C à l'inductance L1, par un courant I1 d'intensité croissante circulant dans le circuit de transfert. Ce circuit de transfert comprend, depuis la
10 borne inférieure de l'inductance L1, une traversée A2 de l'enceinte étanche EF, les armatures négative et positive du condensateur C, le commutateur KO, une inductance de protection Lc, une autre traversée A1 de l'enceinte EF et la borne supérieure de l'inductance L1. Dès que le contact
15 K1 est ouvert et le commutateur KO fermé, le courant I1 passe par le condensateur C et les traversées A1 et A2 et il est augmenté du courant qu'engendre la tension existant aux bornes du condensateur C. Cette tension, par ailleurs, polarise en inverse et bloque le redresseur Rd. L'énergie
20 contenue dans le condensateur C est ainsi transférée à l'inductance L1 par un accroissement progressif du courant I1 et du champ magnétique qu'il engendre. Dès que la tension aux bornes du condensateur C s'inverse, le redresseur Rd devient passant et la boucle se rétablit pour le
25 courant I1 dans l'enceinte EF. Les amenées A1 et A2 ne sont plus parcourues par le courant I1. Les moyens de commande MC détectant la fin du transfert d'énergie entre le condensateur C et l'inductance L1 comprennent des dispositions pour rouvrir le commutateur KO et refermer le dispositif de
30 commutation froid DC, en particulier le contact K1. Le cycle de transfert d'énergie entre le condensateur C et l'inductance L1 est terminé. Le condensateur C est maintenant rechargé, tandis que les amenées de courant A1 et A2, échauffées pendant la période de temps où elles ont été
35 traversées par le courant I1, sont refroidies par les

moyens de maintien de l'enceinte EF à basse température.

Un tel cycle est répété un certain nombre de fois en fonction du dimensionnement du circuit (tension et courant pour la charge du condensateur C, énergie totale que stocke l'inductance L1). L'intervalle entre cycles de transfert successifs permet aux amenées de courant de se refroidir et cela fait que la section des amenées de courant peut être réduite, par rapport à ce qui serait nécessaire dans un dispositif à accumulation en un seul cycle, ou permet de charger plus vite l'inductance supra-conductrice ou permet encore des économies sur le système de refroidissement de l'enceinte froide EF. Quel que soit l'aspect privilégié, l'efficacité du système d'accumulation d'énergie est amélioré.

On va maintenant considérer la décharge impulsionnelle de l'énergie accumulée. Cette décharge a lieu sur une commande OC reçue par les moyens de commande MC et on admettra qu'elle est exécutée seulement lorsque l'inductance L1 a atteint le niveau de charge prescrit, ce qui est vérifié, dans les moyens de commande MC, par la mesure du courant I1.

Les moyens de commande MC comprennent à cette fin des dispositions commandant d'abord l'ouverture du contact K1, qui cesse de court-circuiter le redresseur Rd, et la fermeture du commutateur KD, ce qui ne modifie pas la circulation du courant dans la boucle froide. Ensuite, les moyens de commande MC provoquent le blocage du redresseur Rd, par la liaison cd, ce qui ouvre la boucle du courant I1 dans l'enceinte froide et établit un courant par le condensateur C, chargeant celui-ci sous une tension dont la polarité est inverse de celle qu'il recevait au cours du cycle d'accumulation de l'énergie dans l'inductance L1.

Bien entendu, étant donné les tensions et courants considérés, le terme "redresseur" correspond à une combinaison de composants individuels, tels que des thyristors,

en série et en parallèle.

L'enroulement L2 est magnétiquement couplé à l'enroulement L1. Il comporte un petit nombre de spires pour former avec l'enroulement primaire un transformateur abaisseur de tension et multiplicateur de courant, grâce à quoi on peut envisager d'atteindre des courants secondaires de l'ordre du million d'ampères. Cet enroulement est connecté à deux rails R1 et R2 sur lesquels est placé un projectile à lancer P. La tension induite au secondaire L2 tend donc à faire circuler un courant de boucle secondaire I2 par les rails R1, R2 et le projectile P. L'effet électromagnétique de ce courant tend à repousser le projectile P sur les rails R1, R2. Comme les rails R1 et R2 sont de longueur limitée, pour des raisons d'encombrement du lanceur, le courant secondaire doit croître le plus vite possible. Il peut ainsi être souhaitable de disposer entre le projectile et les rails un isolant destructible cédant lorsque la tension secondaire est suffisamment élevée. Une telle solution offre encore l'avantage que le projectile P peut être disposé sur les rails sans cependant interférer avec le processus de charge de l'inductance supraconductrice, si celui-ci n'est pas terminé.

A la fin de la décharge impulsionnelle, le contact K0 est ensuite réouvert, dès que, le condensateur étant chargé, le courant qui le traverse s'annule, de sorte que la charge accumulée par le condensateur C est conservée, en vue d'être réemployée, par des moyens de commutation non représentés, mais du domaine de la technique courante, lors d'un cycle opératoire suivant, ce qui améliore l'efficacité globale du dispositif.

Pour finir, le contact K1 est refermé, sur ordre des moyens de commande MC lorsque le projectile a quitté les rails.

Il est bien évident que la description qui précède n'a été donnée qu'à titre d'exemple non limitatif et que de nombreuses variantes peuvent être envisagées sans sortir pour autant du cadre de l'invention.

REVENDEICATIONS

1. Dispositif d'accumulation d'énergie dans une inductance supraconductrice en vue de la libérer sous une
5 forme impulsionnelle, caractérisé en ce qu'il comprend, dans une enceinte froide (EF) pourvue d'aménées de courant (A1, A2), l'enroulement (L1) constituant l'inductance supraconductrice et un dispositif de commutation froid (DC) bouclant l'inductance supraconductrice pour la conservation
10 sans perte de l'énergie qu'elle contient, ainsi que, hors de l'enceinte froide, un condensateur (C), un dispositif d'alimentation (FS) pour charger le condensateur (C), un commutateur chaud (KO) inséré dans un circuit connectant ce condensateur en série avec l'inductance supraconductrice
15 (L1), par lesdites aménées (A1, A2), et des moyens de commande (MC) comprenant des dispositions pour ouvrir ledit dispositif de commutation froid (DC) et pour fermer ledit commutateur chaud (KO), afin que l'inductance se trouve connectée en série avec le condensateur et reçoive de
20 l'énergie de ce condensateur, et ensuite pour reformer ledit dispositif de commutation froid (DC) et pour rouvrir ledit commutateur chaud (KO), afin que l'inductance supraconductrice (L1) conserve l'énergie ainsi acquise, tandis que le condensateur (C) est rechargé, une telle succession
25 d'opérations étant répétée plusieurs fois pour charger par étapes l'inductance supraconductrice.

2. Dispositif d'accumulation d'énergie conforme à la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend en
30 outre, hors de l'enceinte froide, un enroulement secondaire (L2) et une charge commutable (P), et lesdits moyens de commande (MC) comprennent aussi des dispositions intervenant lorsque l'inductance (L1) est chargée et que la charge commutable (P) est en circuit, pour ouvrir ledit dispositif de commutation froid (DC) et pour fermer temporairement
35 ledit commutateur chaud (KO), de sorte qu'une partie de

l'énergie stockée dans l'inductance supraconductrice (L1) est transférée dans le condensateur (C), tandis que l'essentiel de l'énergie stockée, induite au secondaire (L2), est transférée à la charge (P) sous une forme impulsionnelle.

3. Dispositif d'accumulation d'énergie conforme à la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que ledit dispositif de commutation froid (DC) comprend la combinaison en parallèle d'un contact métallique (K1) et d'un redresseur (Rd), de sorte que, lorsque le dispositif de commutation froid (DC) est fermé, le contact métallique (K1) permette l'établissement d'une boucle sans résistance, et que, lorsque le dispositif de commutation (DC) est ouvert, pour un transfert d'énergie du condensateur (C) à l'inductance supraconductrice (L1), le redresseur (Rd) redevienne passant et boucle l'inductance supraconductrice (L1), dès que la charge du condensateur (C) est sensiblement transférée dans l'inductance.

4. Dispositif d'accumulation d'énergie conforme à la revendication 3, caractérisé en ce que ledit redresseur (Rd) est un redresseur commandé et lesdits moyens de commande (MC) comprennent des dispositions pour le bloquer, lorsque le contact métallique (K1) du dispositif de commutation (DC) est ouvert afin de transférer à la charge (P) l'énergie stockée dans l'inductance supraconductrice (L1), et pour lui permettre de redevenir passant, lorsque le contact métallique (K1) du dispositif de commutation (DC) est ouvert afin de permettre la reprise de la circulation du courant (I1) dans la boucle froide, à la fin d'un transfert d'énergie dudit condensateur (C) à l'inductance supraconductrice (L1).

