

(19)



(11)

EP 2 220 658 B1

(12)

FASCICULE DE BREVET EUROPEEN

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:
13.04.2011 Bulletin 2011/15

(51) Int Cl.:
H01F 6/00 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **08850407.1**

(86) Numéro de dépôt international:
PCT/FR2008/051937

(22) Date de dépôt: **27.10.2008**

(87) Numéro de publication internationale:
WO 2009/063150 (22.05.2009 Gazette 2009/21)

(54) **SYSTEME DE CREATION D'UN CHAMP MAGNETIQUE VIA UN AIMANT SUPRACONDUCTEUR**
SYSTEM ZUM ERZEUGEN EINES MAGNETFELDS ÜBER EINEN SUPRALEITENDEN MAGNETEN
SYSTEM FOR CREATING A MAGNETIC FIELD VIA A SUPERCONDUCTING MAGNET

(84) Etats contractants désignés:
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR
HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MT NL NO PL PT
RO SE SI SK TR**

(30) Priorité: **12.11.2007 FR 0758969**

(43) Date de publication de la demande:
25.08.2010 Bulletin 2010/34

(73) Titulaires:
• **Commissariat à l'Énergie Atomique
et aux Énergies Alternatives
75015 Paris (FR)**
• **Centre National de la Recherche Scientifique
(C.N.R.S.)
75794 Paris Cedex 16 (FR)**

(72) Inventeurs:
• **SCHILD, Thierry
F-91400 Orsay (FR)**

• **DONATI, André
F-91400 Orsay (FR)**
• **SINANNA, Armand
F-78280 Guyancourt (FR)**
• **TIXADOR, Pascal
F-38031 Grenoble (FR)**
• **BERMOND, Stéphane
F-38000 Grenoble (FR)**

(74) Mandataire: **Lebkiri, Alexandre et al
Cabinet Camus Lebkiri
10 rue de la Pépinière
75008 Paris (FR)**

(56) Documents cités:
EP-A- 0 299 325 WO-A-96/30990
DE-C1- 10 156 234 FR-A- 1 437 233
FR-A- 2 661 775 US-A1- 2003 057 942
US-A1- 2004 082 482 US-A1- 2004 263 165

EP 2 220 658 B1

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la publication de la mention de la délivrance du brevet européen au Bulletin européen des brevets, toute personne peut faire opposition à ce brevet auprès de l'Office européen des brevets, conformément au règlement d'exécution. L'opposition n'est réputée formée qu'après le paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

Description

[0001] La présente invention concerne un système de création d'un champ magnétique via un aimant supraconducteur destiné à produire ledit champ magnétique. Un aimant supraconducteur est formé d'un bobinage supraconducteur (par exemple un composite de Niobium-Titane) maintenu à une température telle que l'état supraconducteur du matériau constituant le bobinage soit assuré (par exemple à 4.2 K dans un bain d'hélium liquide à pression atmosphérique pour un composite de Niobium-Titane soumis à un champ typiquement inférieur à 10 T). La résistance électrique nulle ainsi atteinte permet de créer des intensités de champ magnétique très élevées dans les limites des capacités de transport des matériaux supraconducteurs. L'invention trouve une application particulièrement intéressante dans le domaine de la résonance magnétique nucléaire (RMN) et de l'imagerie par résonance magnétique (IRM).

[0002] Les applications dans le domaine de la RMN et de l'IRM nécessitent des champs magnétiques intenses (pouvant atteindre plusieurs dizaines de teslas) et stables dans le temps.

[0003] Une configuration connue consiste à utiliser un aimant supraconducteur mis en court-circuit : ce mode de fonctionnement, appelé mode persistant, est réalisé par la déconnexion de l'alimentation électrique de la bobine et la présence d'un interrupteur supraconducteur formant un circuit fermé avec la bobine. Un interrupteur supraconducteur formé par un composite supraconducteur couplé à un élément chauffant (désigné indifféremment dans la suite par le terme chaufferette) est un interrupteur thermique qui a une résistance nulle lorsque la chaufferette qui lui est associée est éteinte, l'interrupteur est alors dit « fermé » et une résistance grande devant les autres résistances du circuit lorsque la chaufferette est sous tension, l'interrupteur est alors dit « ouvert ». La résistance de l'interrupteur est celle de la matrice résistive du composite supraconducteur au-dessus d'une température dite critique, et est quasi nulle en dessous de cette température. Le circuit électrique équivalent ainsi formé est composé de l'inductance de l'aimant, typiquement de plusieurs centaines d'henrys, de la résistance de l'aimant et de la résistance du court-circuit formé par l'interrupteur supraconducteur.

[0004] Cette solution présente cependant certaines difficultés.

[0005] En effet, pour que la dérive du champ magnétique dans le temps soit faible, typiquement de moins de 0,05 ppm/h, il est nécessaire que les résistances du circuit soient extrêmement faibles, typiquement inférieures à 1 nΩ pour un aimant de 100 H.

[0006] Or pour des raisons liées à la technologie de l'aimant (utilisation de supraconducteur à haute température critique), ou des causes accidentelles (défaut sur une jonction à l'intérieur du bobinage de l'aimant), la résistance résiduelle de l'aimant peut être supérieure à la valeur rendant possible un fonctionnement du système en mode persistant.

[0007] Une solution connue à ce problème est décrite dans le document US6624732 et consiste à compenser la dérive temporelle de l'aimant. La figure 1 illustre le circuit électrique 1 permettant la mise en oeuvre de cette compensation. Le circuit électrique 1 comporte :

- Une première branche comportant un électroaimant 2 supraconducteur modélisé par une inductance L de bobinage en série avec une résistance R_2 représentant la résistance résiduelle de l'aimant empêchant le fonctionnement en mode persistant,
- une deuxième branche formée par un interrupteur supraconducteur thermique S_1 en série avec une résistance R_1 .
- une troisième branche formée par une source d'alimentation en courant 3.

[0008] Les trois branches sont montées en parallèle.

[0009] La valeur de la résistance R_1 est comprise dans un rapport de 10 à 1000 fois la valeur de la résistance R_2 .

[0010] Le circuit 1 fonctionne suivant les deux modes de fonctionnement suivants :

- un mode de charge de l'aimant : lorsque l'injection de courant par la source 3 dans la bobine L de l'aimant commence, l'interrupteur supraconducteur S_1 est ouvert ;
- un mode de fonctionnement normal (ou mode nominal) : lorsque le courant dans la bobine de l'aimant a atteint sa valeur nominale (courant stabilisé), l'interrupteur supraconducteur S_1 est fermé ; après fermeture de cet interrupteur S_1 , au lieu de déconnecter la source d'alimentation 3, on la laisse connectée à la bobine L de l'aimant pour compenser les pertes; le courant est injecté dans l'interrupteur S_1 , jusqu'à la stabilisation du champ produit par l'aimant à la valeur souhaitée.

[0011] Pour limiter la dérive temporelle due à la source d'alimentation en courant 3, la première branche résistive formée par R_1 est donc rajoutée de sorte que toutes les pulsations de l'alimentation passeront dans cette branche, et le courant dans la bobine sera parfaitement continu. Si on désigne par I_{op} le courant de fonctionnement nominal de l'aimant et ΔI le courant circulant dans la résistance R_1 , la stabilisation est obtenue par la relation :

$$R_2 \cdot I_{op} = R_1 \cdot \Delta I.$$

[0012] Cependant, la mise en oeuvre du circuit tel que décrit dans le document US6624732 pose également certaines difficultés.

[0013] Ainsi, l'aimant peut perdre localement ses propriétés supraconductrices et transiter dans un mode dissipatif (On parle de « Quench » de l'aimant). Une telle transition implique que ce dernier soit protégé sur lui-même (i.e. que la résistance développée dans l'aimant lors de la transition soit suffisante pour décharger le courant dans l'aimant à une vitesse telle que l'échauffement du conducteur reste limité). Toutefois, pour des raisons technologiques comme l'énergie très élevée stockée dans l'aimant (typiquement au dessus de 100 MJ) il est parfois difficile d'appliquer ce type de protection. L'effet Joule qui est généré pourrait alors conduire à un échauffement anormal de l'aimant et ainsi à une détérioration définitive de ses propriétés supraconductrices.

[0014] Une solution à ce problème consiste à ajouter une branche additionnelle aux bornes de l'aimant et de l'alimentation constituée d'une résistance de protection : un tel circuit 10 est illustré en figure 2.

[0015] Le circuit électrique 10 comporte (les éléments communs au circuit 1 de la figure 1 portent les mêmes références):

- Une première branche comportant un électroaimant 2 modélisé par une inductance L de bobinage en série avec une résistance R_2 représentant la résistance résiduelle de l'aimant empêchant le fonctionnement en mode persistant,
- une deuxième branche formée par un interrupteur supraconducteur thermique S_1 en série avec une résistance R_1 ,
- une troisième branche formée par une source d'alimentation en courant 3 montée en série avec un organe de coupure S_2 (et éventuellement un organe de coupure de redondance S_3),
- une quatrième branche formée par une résistance R_3 , dite résistance de protection, qui peut se situer aussi bien dans l'enceinte du cryostat de l'aimant qu'à l'extérieur à température ambiante.

[0016] En cas de quench, l'organe de coupure S_2 est ouvert (et éventuellement S_3) de sorte que la bobine L se décharge dans la résistance R_3 dont la valeur est optimisée pour obtenir une décharge rapide sans dégradation de l'aimant. La vitesse de décroissance du courant est alors déterminée par la valeur de la résistance de protection.

[0017] Comme nous l'avons évoqué plus haut, l'interrupteur supraconducteur S_1 en série avec R_1 , doit être fermé, i.e. à impédance faible en comparaison des autres résistances du circuit, en fonctionnement normal avec courant stabilisé.

[0018] En revanche, ce même interrupteur S_1 doit être ouvert (i.e. à impédance élevée en comparaison des autres résistances du circuit (R_1 , R_2 , R_3)) lors de la charge/décharge de la bobine L et lors de la protection de l'aimant (décharge rapide de la bobine L dans R_3).

[0019] En effet, pour que le procédé de stabilisation fonctionne, il faut utiliser une résistance R_1 présentant une valeur bien inférieure à la résistance de protection R_3 et une valeur supérieure à celle de R_2 (comprise dans un rapport de 10 à 1000 fois la valeur de la résistance R_2 comme nous l'avons déjà mentionné plus haut). Pour limiter les pertes thermiques, la résistance R_1 doit être telle que la puissance Joule dissipée en régime de stabilisation reste faible, typiquement inférieure à quelques milliwatts.

[0020] En cas de décharge rapide (mode de protection), le courant de l'aimant doit s'écouler dans R_3 , car c'est la seule résistance dimensionnée pour recevoir une forte énergie et c'est elle qui pilote la vitesse de décroissance du courant pour protéger l'aimant : l'interrupteur S_1 doit donc impérativement être ouvert.

[0021] La mise en oeuvre de la configuration 10 de la figure 2 présente dès lors plusieurs difficultés :

- Première difficulté : l'interrupteur supraconducteur S_1 a maintenant un rôle prépondérant dans la sécurisation du fonctionnement de l'aimant car en l'absence d'ouverture, le courant dans l'aimant ne décroît pas à la vitesse attendue. Or ce retard peut causer un échauffement anormal du bobinage conduisant à une détérioration irréversible de ses propriétés supraconductrices,
- Deuxième difficulté : en cas de décharge de l'aimant, la tension aux bornes de l'interrupteur supraconducteur S_1 peut être de plusieurs centaines voire milliers de volts. L'énergie déposée lors de la décharge dans l'interrupteur S_1 est donc très grande. Afin d'éviter une détérioration de l'interrupteur S_1 , la masse de ce dernier doit donc être telle que son échauffement reste limité à typiquement moins de 100 K. L'interrupteur supraconducteur S_1 présente donc une grande difficulté de réalisation par rapport aux interrupteurs de l'état de l'art (qui supportent 1000 A sous quelques volts) et est nécessairement volumineux et lourd.
- Troisième difficulté : lors des opérations de charge et décharge en courant de l'aimant, l'interrupteur S_1 doit être maintenu dans l'état résistif à l'aide de sa chaufferette électrique (usuellement quelques centaines de milliwatt). Or, du fait de la taille imposée par la forte tension de décharge, la puissance nécessaire pour le maintenir ouvert est

de quelques watts, ce qui est très sollicitant pour les systèmes cryogéniques assurant la régulation de la température de l'aimant.

[0022] Une solution connue consiste à remplacer l'interrupteur supraconducteur thermique par un interrupteur mécanique. Une configuration de ce type est décrite dans le document US2007/0024404. Cette solution fournit une réponse technologique de principe aux deuxième et troisième difficultés mentionnées ci-dessus mais laisse en suspens la première difficulté liée au fait que la fiabilité de la protection de l'aimant est tributaire de la fiabilité de l'interrupteur et de son circuit de commande.

[0023] Dans ce contexte, la présente invention vise à fournir un système de création d'un champ magnétique visant à s'affranchir des trois difficultés mentionnées ci-dessus tout en assurant une charge efficace de la bobine, une très faible dérive du champ magnétique dans le temps et une décharge rapide sans dégradation de l'aimant en cas de quench.

[0024] A cette fin, l'invention propose un système de création d'un champ magnétique incluant :

- une première branche comportant un aimant supraconducteur destiné à produire ledit champ magnétique, ledit aimant étant modélisé par une inductance de bobinage en série avec une résistance résiduelle ;
- une deuxième branche comportant une résistance, dite résistance de protection,
- une troisième branche comportant une source d'alimentation ;

ledit système étant caractérisé en ce qu'il comporte une quatrième branche formée par une résistance montée en série avec un dispositif supraconducteur limiteur de courant basculant d'un état à résistance basse vers un état à résistance haute lorsque le courant le traversant dépasse un courant de déclenchement, ledit dispositif supraconducteur ayant une inductance au moins 10^5 fois inférieure à celle de la bobine, et lesdites première, deuxième, troisième et quatrième branches étant montées en parallèle,

ledit système présentant au moins trois modes de fonctionnement :

- un premier mode de fonctionnement, dit mode de charge ou de décharge de l'aimant, dans lequel :
 - o ladite source d'alimentation est reliée au dit aimant de façon à augmenter ou diminuer le courant dans l'aimant,
 - o ledit limiteur de courant est dans son état à résistance haute ;
- un deuxième mode de fonctionnement, dit mode normal de fonctionnement, dans lequel :
 - o ladite source d'alimentation est reliée au dit aimant,
 - o ledit limiteur est dans son état à résistance basse ;
- un troisième mode de fonctionnement, dit mode de décharge rapide de l'aimant dans ladite résistance de protection, dans lequel :
 - o ladite source d'alimentation est déconnectée dudit aimant,
 - o ledit limiteur est dans son état à haute résistance ;

l'activation de l'état dudit limiteur dans lesdits trois modes de fonctionnement se faisant de manière passive sans recours à une commande externe.

[0025] Le limiteur doit avoir une inductance la plus faible possible, d'une part pour assurer la fonction de stabilisation telle décrite dans le brevet US6624732, et d'autre part pour minimiser le temps de transition entre l'état « fermé » et l'état « ouvert ». Avec les dispositifs expérimentaux utilisés, elle est de l'ordre de quelques microhenry.

[0026] Le matériau supraconducteur est choisi tel que sa température critique soit supérieure à la température du milieu dans lequel il est placé.

[0027] Au cours de la phase de décharge rapide de l'aimant dans la résistance de protection, la température du fil supraconducteur formant ledit limiteur passe par une valeur maximale appelée T_{max} . Cette valeur doit être telle que le limiteur ne soit pas détérioré si le fil supraconducteur le constituant atteint, localement ou en totalité, la valeur T_{max} . Cette valeur T_{max} doit au moins être inférieure à la température à partir de laquelle les propriétés supraconductrices du fil supraconducteur choisi ne sont pas dégradées, par exemple autour de 300°C pour du NbTi. Dans le choix de cette valeur, il est parfois nécessaire de tenir compte de l'effet de la déformation mécanique liée à la dilatation des matériaux. Afin de s'affranchir de cet effet, on choisit parfois T_{max} inférieure à 100 K car en-dessous de cette valeur, la plupart des matériaux ne se déforment plus sous l'effet d'une variation de température.

[0028] On entend par limiteur supraconducteur un dispositif basé sur la transition des supraconducteurs entre un état non dissipatif (résistance quasi nulle) et un état dissipatif (résistance non nulle). Cette transition des supraconducteurs

se caractérise notamment par la présence d'un courant critique au-delà duquel le dispositif bascule dans l'état dissipatif. Le limiteur selon l'invention se distingue des limiteurs destinés aux réseaux de distribution électrique où les nécessités de limitation en courant ne durent que quelques centaines de millisecondes. A l'opposé, dans le cadre de l'invention, le fonctionnement en limitation doit pouvoir durer plusieurs minutes ou même plusieurs heures. Les échanges thermiques qui étaient négligés dans ce type d'application prennent ici une grande importance.

[0029] En effet, ces conditions temporelles ont une influence directe sur les échanges entre le supraconducteur et le refroidisseur (fluide cryogénique ou point froid). Ces échanges sont presque négligeables dans le cas d'un limiteur d'un réseau (régime pratiquement adiabatique) alors que les échanges prennent une grande importance dans l'invention et permettent d'optimiser le dimensionnement du limiteur. On notera en outre que les limiteurs utilisés dans les réseaux de distribution limite le courant à une valeur crête ; inversement, le rôle du limiteur selon l'invention est bien d'abaisser (et non d'écarter) le courant lorsque celui-ci atteint une valeur critique.

[0030] Grâce à l'invention, l'interrupteur supraconducteur commandé par un système à chaufferette selon l'état de l'art est avantageusement remplacée par un limiteur supraconducteur ne nécessitant aucune commande extérieure pour basculer en mode résistif lors de la charge ou la décharge de la bobine ou de sa décharge rapide. Une telle configuration présente un avantage considérable en termes de sécurité de fonctionnement dans la mesure où l'efficacité de la décharge rapide en cas de quench n'est plus conditionnée par l'ouverture de l'interrupteur commandé par sa commande externe ; le limiteur selon l'invention permet intrinsèquement de basculer de son état passant à son état résistif lors des trois modes de fonctionnement que sont la charge ou la décharge de la bobine, le mode de fonctionnement normal et la décharge rapide de la bobine dans la résistance de protection à la détection d'un quench de l'aimant.

[0031] Les avantages d'un limiteur de courant par rapport à un interrupteur supraconducteur commandé sont donc les suivants :

- le limiteur ne perturbe pas la charge ou la décharge de l'aimant car il réagit intrinsèquement sans action extérieure ; les pertes dans le limiteur dans ces régimes peuvent être maintenues à un niveau faible par un dimensionnement adapté du limiteur,
- le limiteur en limitant naturellement et automatiquement le courant lors d'une décharge rapide de l'aimant ne modifie pas la protection de l'aimant,
- le fonctionnement du limiteur est automatique, il ne nécessite ni circuit de détection ni de donneur d'ordre.

[0032] Le système selon l'invention peut également présenter une ou plusieurs des caractéristiques ci-dessous, considérées individuellement ou selon toutes les combinaisons techniquement possibles :

- ledit limiteur est formé par un fil supraconducteur comportant une pluralité de filaments élémentaires supraconducteurs intégrés dans une matrice résistive ;
- le fil supraconducteur peut aussi être constitué du dépôt ou de plusieurs dépôts d'un matériau supraconducteur sur un substrat résistif (par exemple un matériau supraconducteur fait à partir de céramiques tel qu'YBaCuO par exemple) ;
- la résistivité de ladite matrice résistive est supérieure à $10^{-7} \Omega.m$;
- ladite matrice résistive est réalisée en CuNi ;
- lesdits filaments élémentaires sont réalisés en NbTi ou dans un matériau dit « haut Tc » tel que le MgB_2 ;
- ladite résistance montée en série avec ledit limiteur présente une valeur 10 à 1000 fois supérieure à celle de la résistance résiduelle de l'aimant ;
- le fil supraconducteur formant ledit limiteur est choisi de sorte de son courant critique soit supérieur à $(R'_2/R'_1)I_{op}$ où R'_2 désigne la valeur de ladite résistance résiduelle dudit aimant, R'_1 désigne ladite deuxième résistance montée en série avec ledit limiteur et I_{op} désigne le courant circulant dans ladite première branche lors dudit mode normal de fonctionnement ;
- la longueur du fil supraconducteur formant ledit limiteur est déterminée de sorte que la température dudit fil supraconducteur reste toujours inférieure ou égale à une valeur maximale de température prédéterminée T_{max} ;
- ladite longueur dudit fil supraconducteur est inférieure à une longueur l déterminée par

$$l = U_c \sqrt{\frac{\tau}{2 \int_{T_{He}}^{T_{max}} C_p(T) \rho(T) dT}}$$

où S, C_p et ρ sont respectivement la section, la chaleur spécifique volumique et la résistivité dudit fil avec ses brins supraconducteurs et sa matrice, T_{He} désigne la température initiale du bain cryogénique dudit limiteur, U_0 désigne

la tension initiale aux bornes dudit aimant avant ladite décharge rapide dans ladite résistance de protection et τ désigne une constante de temps donnée par le rapport L'/R'_3 , L' représentant ladite inductance de bobinage et R'_3 représentant ladite résistance de protection ;

- ledit limiteur est formé par un fil supraconducteur entouré par une couche isolante dont l'épaisseur est déterminée de sorte que la puissance déposée dans le bain cryogénique dudit limiteur soit inférieure à une valeur prédéterminée ;
- ledit limiteur et ledit aimant sont localisés dans des bains cryogéniques séparés ;
- ledit limiteur est formé par un bobinage en deux couches, les deux couches étant bobinées en sens inverse et étant mises soit en parallèle soit en série, ceci dans le but d'obtenir un limiteur avec la plus faible inductance possible ;
- le système selon l'invention comporte des moyens de commande pour faire basculer ledit limiteur de son état à résistance basse vers son état à résistance haute ;
- lesdits moyens de commande sont formés par un élément chauffant ;
- lesdits moyens de commande comportent des moyens pour générer un signal de courant alternatif circulant dans ledit limiteur de sorte que ledit limiteur bascule de son état à résistance basse vers son état à résistance haute, notamment sous l'effet de l'élévation de la température entraînée par la circulation dudit courant alternatif ;
- lesdits moyens pour générer un signal de courant alternatif comportent des moyens transformateurs de tension recevant en entrée la tension du réseau électrique et fournissant en sortie une tension abaissée à la même fréquence que la tension du réseau électrique ;
- la fréquence f dudit signal de courant alternatif est choisie suffisamment élevée pour que le courant alternatif soit bloqué par l'inductance de la bobine ;
- lesdits moyens de commande comportent des moyens pour générer un courant supérieur au dit courant de déclenchement permettant de faire basculer ledit limiteur ;
- lesdits moyens pour générer un courant supérieur au dit courant de déclenchement permettant de faire basculer ledit limiteur sont formés par des moyens générant une impulsion de courant d'intensité et de durée suffisante pour faire basculer ledit limiteur ;
- lesdits des moyens pour générer un courant supérieur au dit courant de déclenchement permettant de faire basculer ledit limiteur sont intégrés à ladite source d'alimentation.

[0033] La présente invention a également pour objet un procédé d'ajustement du courant dans un aimant compris dans un système selon l'invention comportant les étapes suivantes considérées dans un ordre quelconque :

- génération d'une rampe de courant avec une consigne fixée à la nouvelle valeur de courant à atteindre dans l'aimant ;
- génération d'une impulsion de courant dont la durée et l'intensité sont telles que ledit limiteur bascule dans son état à haute résistance.

[0034] Avantagusement, le procédé selon l'invention comporte une étape de génération d'un créneau en courant qui suit l'étape de génération de ladite impulsion de courant, la valeur du courant de ce créneau étant égale à la somme du courant circulant dans ladite résistance de protection et du courant circulant dans ledit limiteur lorsque celui-ci est dans son état haute résistance.

[0035] D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront clairement de la description qui en est donnée ci-dessous, à titre indicatif et nullement limitatif, en référence aux figures annexées, parmi lesquelles :

- la figure 1 est une représentation schématique d'un premier circuit selon l'art antérieur ;
- la figure 2 est une représentation schématique d'un second circuit selon l'art antérieur ;
- la figure 3 est une représentation schématique d'un système selon l'invention ;
- la figure 4 est une représentation schématique d'un système selon l'invention incorporant des moyens de commande pour faire basculer le limiteur de son état à résistance basse vers son état à résistance haute selon un premier mode de réalisation ;
- la figure 5 est une représentation schématique d'un système selon l'invention incorporant des moyens de commande pour faire basculer le limiteur de son état à résistance basse vers son état à résistance haute selon un deuxième mode de réalisation ;
- la figure 6 représente respectivement l'évolution du courant de l'alimentation, le courant dans l'aimant et le courant dans le limiteur en fonction du temps en utilisant un système tel que représenté en figure 5.

[0036] Dans toutes les figures, les éléments communs portent les mêmes numéros de référence.

Les figures 1 et 2 ont déjà été décrites en référence à l'état de la technique.

La figure 3 est une représentation schématique d'un système 100 de création d'un champ magnétique selon l'invention.

[0037] Le système 100 comporte :

- Une première branche comportant un électroaimant supraconducteur 102 modélisé par une inductance L' de bobinage en série avec une résistance R'_2 représentant la résistance résiduelle de l'aimant empêchant le fonctionnement en mode persistant,
- une deuxième branche formée par une résistance de protection R'_3 localisée dans l'enceinte du cryostat de l'aimant ou à l'extérieur de l'enceinte à température ambiante
- une troisième branche formée par une source d'alimentation en courant 103 montée en série avec un organe de coupure 104 (et éventuellement un organe de coupure de redondance 105),
- une quatrième branche formée par un limiteur de courant supraconducteur 106 en série avec une résistance R'_1 .

[0038] Le limiteur supraconducteur 106 est composé d'un fil supraconducteur formé par une pluralité de filaments élémentaires supraconducteurs intégrés dans une matrice résistive, le fil supraconducteur peut aussi être constitué du dépôt d'un matériau supraconducteur sur un substrat résistif ; nous reviendrons dans la suite de la description sur le choix du matériau pour la réalisation de la matrice résistive.

[0039] Le limiteur 106 est caractérisé par deux courants : le courant de déclenchement de la limitation I_0 et le courant de récupération I_r .

[0040] Le courant de déclenchement représente le courant au-delà duquel le limiteur développe une résistance importante qui limite le courant. Ce courant est proche du courant critique I_c caractéristique du matériau supraconducteur et est défini par le courant pour lequel le conducteur développe un champ électrique donné ($10 \mu V/m$ ou $100 \mu V/m$).

[0041] Le courant de récupération est le courant d'équilibre thermique du conducteur avec son environnement. Ce courant est atteint après un temps assez long (de l'ordre de quelques secondes) et n'est pas un paramètre classique d'un limiteur. Il est défini par les caractéristiques du conducteur, en particulier sa résistance par unité de longueur, et les conditions de refroidissement (épaisseur d'isolant entourant le limiteur et conductivité thermique du limiteur).

[0042] On peut distinguer trois phases de fonctionnement du limiteur pour l'application concernée :

- La charge (ou décharge) lente de l'aimant 102 constitue un premier mode de fonctionnement qui peut être très long (plusieurs heures). Pendant ce mode de fonctionnement, les organes de coupure 104 et 105 sont fermés. Au début de ce fonctionnement, le limiteur 106 transite vers son état haute résistance et le courant s'établit rapidement à son courant de récupération I_r . La puissance dissipée dans le limiteur est égale à $|V_0|I_r$ où V_0 est la tension de charge ou de décharge. Le dimensionnement du limiteur, en particulier son isolation thermique permet d'adapter son courant de récupération et d'ajuster la puissance dissipée dans les phases de montée et de descente du courant. A titre d'exemple, en considérant un aimant présentant une inductance de $L'=300$ H sous une tension de $V_0=10$ V et si on souhaite atteindre un courant nominal $I_N=1500$ A, on a en faisant l'approximation que la montée en courant dans l'aimant est linéaire:

$$V_0 = L \frac{dI_N}{dt} \Rightarrow \Delta t = \frac{L \times I_N}{V_0} = 12,5 \text{ heures.}$$

Durant cette période, il est important que le limiteur 106 n'échange pas trop d'énergie avec le bain d'hélium du cryostat dans lequel il se trouve.

- Une deuxième phase de fonctionnement est formée par le mode nominal ou mode normal de fonctionnement. Dans ce cas, les organes de coupure 104 et 105 sont fermés et ce mode de fonctionnement correspond au régime établi de courant dans l'aimant 102. La source d'alimentation 103, reste connectée à l'aimant 102. Le courant ΔI qui traverse le limiteur 106 est une faible fraction du courant opérationnel I_{op} traversant la bobine L' . Ce courant ΔI est fonction du rapport R'_2/R'_1 . En première approximation, on a $\Delta I = (R'_2/R'_1)I_{op}$. Bien entendu, ΔI doit être inférieur au courant de déclenchement I_0 du limiteur 106 pour que le limiteur 106 présente une résistance basse.
- Le troisième mode de fonctionnement concerne la décharge rapide de l'aimant, en cas de transition du type quench. Cette phase assure la protection de l'aimant lorsqu'on vide l'aimant de son courant dans la résistance de protection R'_3 . Dans ce cas, l'un au moins des organes de coupure 104 ou 105 est ouvert. Ce mode est caractérisé par une tension élevée (plusieurs centaines à milliers de Volts) aux bornes de l'aimant pour décharger rapidement le courant et ainsi limiter la montée en température du conducteur supraconducteur qui se trouve à l'état normal. L'aimant se décharge alors dans la résistance de protection R'_3 . Durant cette phase, le limiteur 106 développe automatiquement et naturellement une résistance élevée et limite le courant dans la quatrième branche comportant la résistance R'_1 à une valeur bien inférieure au courant qui circule dans la résistance de protection R'_3 . Cette phase est sensible car la protection de l'aimant en dépend. Le limiteur 106 présente une caractéristique très sûre de ce point de vue

puisque le pire défaut pour le limiteur est sa destruction qui conduit à une résistance équivalente infinie et donc à une protection de l'aimant. Même si le temps de décharge est ici beaucoup plus court (de l'ordre de quelques minutes) que le temps de charge mentionné plus haut en référence au premier mode de fonctionnement, la tension appliquée aux bornes du limiteur 106 est beaucoup haute et entraîne une température du limiteur 106 beaucoup plus élevée que dans le mode de charge.

[0043] Les trois modes de fonctionnement décrits ci-dessus permettent de définir un procédé de dimensionnement du limiteur 106 comportant les étapes suivantes :

Etape 1 : on définit la valeur de la résistance R'_1 en fonction de la valeur de la résistance résiduelle R'_2 de l'aimant dans un rapport de 10 à 1000.

Etape 2 : de façon à ne pas faire transiter le limiteur 106 vers une impédance haute lors du mode de fonctionnement normal, on choisit un fil supraconducteur présentant un courant critique I_c supérieur à $(R'_2/R'_1)I_{op}$.

Etape 3 : comme nous l'avons déjà mentionné plus haut, la température maximale T_{max} vue par le limiteur 106 se produit pendant la phase de décharge rapide de l'aimant 102 dans la résistance de protection R'_3 . Le dimensionnement du limiteur 106 implique le choix de cette température maximale admissible, T_{max} , sur le limiteur 106 en cas de décharge de l'aimant 102.

Etape 4 : Il est important que le limiteur 106 n'échange pas trop d'énergie avec le bain d'hélium, notamment pendant les opérations de chargement et déchargement de l'aimant 102 avec l'alimentation 103. Dès lors, le dimensionnement du limiteur 106 implique également le choix de la puissance maximale admissible sur le bain cryogénique, W_{max} , lors des opérations de chargement et déchargement de l'aimant.

Etape 5 : Cette étape vise à calculer la longueur de fil strictement nécessaire pour maintenir le fil à une température inférieure à la température T_{max} fixée à l'étape 3 (lors de la décharge rapide de l'aimant 102). La tension aux bornes

de l'aimant 102, $U(t)$, et donc du limiteur 106, est fournie par la relation suivante : $U(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$ où τ est une constante de temps caractéristique de décharge donnée par le rapport L/R'_3 . Dans une hypothèse adiabatique où on néglige tout transfert de chaleur entre le limiteur 106 et le bain d'hélium, la chaleur produite par effet joule est absorbée par le fil lui-même. Par ailleurs, en supposant que la vitesse du front résistif qui fait transiter le fil supraconducteur est infinie, on obtient la relation suivante :

$$\frac{(U_0 e^{-\frac{t}{\tau}})^2}{\frac{l}{S} \rho(T)} = SIC_p(T) \frac{dT}{dt}$$

où l , S , C_p et ρ sont respectivement la longueur, la section, la chaleur spécifique volumique et la résistivité du fil avec ses brins supraconducteurs et sa matrice. Ainsi, si on néglige de façon très conservatrice l'échange thermique entre le bain d'hélium et le limiteur 106, la longueur maximale de fil qu'il est avantageux de donner au limiteur est donnée par la formule suivante (obtenue en intégrant la relation précédente) :

$$l = U_0 \sqrt{\frac{\tau}{2 \int_{T_{Hz}}^{T_{max}} C_p(T) \rho(T) dT}} \quad \text{(Relation 1)}$$

Il convient bien entendu de noter que le calcul précédent donne une valeur maximale de la longueur de fil (liée à l'hypothèse adiabatique) ; une longueur de fil plus faible permet donc également de répondre aux exigences en température. Une longueur plus importante est également possible du point de vue technique, mais peu intéressante du point de vue économique.

Etape 6 : cette étape vise à déterminer l'isolation thermique nécessaire sur le limiteur 106 pour limiter la puissance déposée sur le bain. Cette isolation est caractérisée par le flux thermique par unité de longueur de fil, $w_{isolation}$, entre le bain d'hélium et le limiteur 106 une fois le régime stationnaire établi. Lors des charges et décharges de l'aimant 102, la tension aux bornes du limiteur est constante et imposée par l'alimentation 103, U_{Alim} . L'équilibre thermique entre le bain et le limiteur s'écrit donc

$$\frac{U_{Alim}^2}{R_{lim} I_{trans}} = W_{isolation} \quad I_{trans} = W_{max}$$

où R_{lim} est la résistance par unité de longueur de fil et I_{trans} est la longueur de fil transitée dans le limiteur une fois l'équilibre thermique atteint. Pour une tension d'alimentation fixée, la longueur de fil transitée est donc imposée par l'isolation. La nature et l'épaisseur de l'isolation peuvent donc être ajustées de sorte que la puissance déposée sur le bain soit inférieure à W_{max} .

[0044] Cette relation montre également que c'est la tension fournie par l'alimentation qui maintient le limiteur ouvert, I_{trans} non nul, lors des opérations de charge et décharge.

[0045] Le fait de placer le limiteur de courant 106 dans l'hélium liquide entraîne que le limiteur est par exemple composé d'un fil supraconducteur formé par une pluralité de filaments élémentaires en niobium-titane (NbTi) dont la température de transition est égale à 9,5K si il est soumis à une induction magnétique nulle et dont le diamètre est préférentiellement inférieur à 120 μm intégrés dans une matrice résistive. La matrice résistive est de préférence fortement résistive de façon à diminuer la longueur de fil (comme nous l'avons mentionné plus haut, la longueur maximale de fil est inversement proportionnelle à la résistivité du fil et de sa matrice) : une matrice fortement résistive permet donc de réduire l'encombrement du limiteur. La matrice peut par exemple être réalisée en cupronickel (CuNi). Le fait de choisir une matrice fortement résistive permet en outre d'accélérer la transition supraconductrice et d'avoir une grande résistance après transition. En effet comme la résistivité du cupronickel est très élevée (environ $0,4 \cdot 10^{-6} \Omega.m$) en comparaison d'une matrice en cuivre ($10^{-10} \Omega.m$ à 4,2 K) par exemple, la limitation s'en trouvera améliorée.

[0046] On peut également placer le limiteur à plus haute température et utiliser dans ce cas un matériau supraconducteur du type haut T_c (à plus haute température critique) tel que le diborure de magnésium (MgB_2) ou un supraconducteur de type céramique, tel qu' $YBaCuO$ par exemple.

[0047] La présence du limiteur de courant 106 à proximité de l'aimant 102 qui a pour objectif d'être le plus stable possible impose au limiteur d'avoir une inductance la plus faible possible afin que les variations de courant circulent bien dans la branche du limiteur et non dans l'aimant. De plus, plus l'inductance du limiteur 106 sera faible plus rapide sera la limitation de courant. La longueur de fil doit donc être disposée de telle sorte que l'inductance propre du limiteur 106 soit la plus faible possible pour avoir un temps de réponse réduit, ne pas induire des surtensions et assurer une bonne stabilisation. Une solution consiste à utiliser un bobinage en deux couches, les deux couches étant bobinées en sens inverse (deux bobines de même longueur imbriquées l'une dans l'autre et séparées par un isolant pour éviter le claquage diélectrique entre les deux bobines).

[0048] Selon une première configuration, les deux couches sont mises en parallèle à chaque extrémité : cette configuration est intéressante car elle répartit la tension sur une distance importante (la distance entre les deux extrémités) et permet d'éviter le claquage diélectrique.

[0049] Selon une deuxième configuration, les deux couches sont mises en série.

[0050] Nous allons appliquer dans ce qui suit le procédé de dimensionnement décrit ci-dessus à un aimant supraconducteur produisant un champ de 7 teslas formé d'un bobinage supraconducteur de Niobium-Titane (intégré dans une matrice de cuivre) baigné dans de l'hélium liquide à pression atmosphérique (i.e. à une température de 4,2K). Les valeurs numériques suivantes (données à la température de 4,2 K) utilisées sont données dans le tableau 1 suivant :

Tableau 1

Courant nominal de l'aimant	I_{op}	400 A
Résistance résiduelle de l'aimant	R'_2	$10 \mu\Omega$
Inductance de l'aimant	L'	0,68 H
Résistance de protection	R'_3	$0,5 \Omega$

[0051] En déroulant les six étapes mentionnées plus haut :

Etape 1 : Choix de la résistance de stabilisation R'_1 à 1 m Ω pour assurer un rapport R_1/R_2 de 100.

Etape 2 : Choix d'un fil supraconducteur de diamètre 0,2 mm non isolé composé de filaments supraconducteurs en NbTi de 30 μm de diamètre dans une matrice en CuNi avec 30% de Ni en poids. Le rapport de la section de Cu sur la section de NbTi est de 1.2 ce qui permet d'assurer un courant critique supérieur à $(R'_2/R'_1)I_{op}$, soit 4 A.

Etape 3 : Choix de la température maximale admissible T_{max} à 100 K.

Etape 4 : Choix de la puissance maximale admissible sur le bain cryogénique $W_{\max}$ à 1 W.

Etape 5 : En appliquant la relation 1, on trouve une longueur maximale de fil nécessaire d'environ 250 m. Comme nous l'avons déjà précisé, cette valeur est fortement majorée ; ainsi, des essais démontrent qu'une longueur 50 m est suffisante.

Etape 6 : Le limiteur est isolé du bain hélium par exemple avec une résine isolante (d'époxy par exemple) présentant une épaisseur de 1 mm. Si cela est nécessaire, l'épaisseur de la couche isolante peut être augmentée afin de diminuer la puissance dissipée à une valeur inférieure à la valeur seuil $W_{\max}$ souhaitée en régime stationnaire avec le limiteur dans son état haute impédance.

[0052] On notera que l'invention s'applique à la fois à une configuration dans laquelle l'aimant 102 et le limiteur 106 sont dans le même bain cryogénique qu'à une configuration dans laquelle l'aimant 102 et le limiteur 106 sont dans des bains séparés ; dans ce dernier cas, une application possible consiste à utiliser deux bains d'hélium, l'un contenant de l'hélium superfluide à une température comprise entre 1,7 et 2,2 K (de l'ordre de 1,8 K) pour les besoins de l'aimant 102 et l'autre contenant de l'hélium liquide à 4,2 K, les deux bains étant reliés entre eux par un canal de section réduite selon le principe du « Bain Claudet ». Une telle configuration permet un accès plus facile au limiteur 106 séparé de l'aimant 102.

[0053] Dans le cas de certaines applications en IRM ou RMN, il peut être parfois nécessaire d'ouvrir de façon commandée le limiteur par exemple pour ajuster le courant circulant dans l'aimant. Avec un limiteur sans commande d'ouverture, cet ajustement pourrait causer un problème car il serait nécessaire d'augmenter le courant dans le limiteur jusqu'au courant de limitation seuil qui se retrouve alors injecté dans l'aimant, puis d'ajuster la valeur du courant une fois le limiteur ouvert. Pour des aimants dimensionnés très proche de leurs valeurs critiques, ou dont la protection est sensible aux variations rapides du courant, une telle contrainte peut s'avérer rédhibitoire.

[0054] Une première solution consiste à ajouter une chaufferette permettant de mettre temporairement le limiteur en mode « ouvert », sans pour autant dégrader la sécurité liée au fonctionnement intrinsèque du limiteur.

[0055] Avantagusement, une seconde solution consiste à injecter via les amenées de courant de l'aimant (dans la bobine de l'aimant et les branches de protection situés en parallèle entre les organes de coupure 104 et 105), un courant alternatif sinusoïdal ou impulsif qui se superpose au courant de fonctionnement. La fréquence de ce courant est choisie suffisamment élevée pour que le courant alternatif soit bloqué par l'inductance L' de la bobine, de sorte que cette dernière ne reçoive pas une énergie thermique susceptible de la faire transiter hors de l'état supraconducteur. La fréquence peut par exemple être choisie pour que plus de 99,9% de ce courant alternatif passe à travers le limiteur. La transition du limiteur de son état basse impédance à son état haute impédance est obtenue soit par l'élévation de température entraînée par la circulation dudit courant alternatif (élévation créée par les pertes induites par le courant alternatif) soit parce que la valeur efficace du courant alternatif dépasse la valeur du courant de déclenchement du limiteur. En pratique, une fréquence égale ou supérieure à 50 Hz suffit pour les applications connues. Ce courant alternatif peut être généré par des circuits internes spécifiques conçus à cet effet, ou encore de manière externe à l'alimentation par une alimentation secondaire située de préférence en parallèle avec l'alimentation principale. Il n'est cependant pas contraire à l'invention de réaliser cette alimentation secondaire par un dispositif placé en série avec l'alimentation principale. Un exemple de système 200 de création d'un champ magnétique selon l'invention incorporant un dispositif de commande 201 générant un tel signal est illustré en figure 4.

[0056] Le système 200 est identique au système 100 de la figure 3 à la différence qu'il comporte le dispositif de commande 201 formant des moyens pour le basculement du limiteur 106 de son état basse résistance à son état haute résistance en permettant la génération d'un signal de courant sinusoïdal apte à faire basculer le limiteur 203 et qu'il ne comporte pas de deuxième organe de coupure de redondance 105.

[0057] Le dispositif de commande 201 comporte :

- un transformateur abaisseur de tension TBT (Très Basse Tension) 205 dont le courant de court circuit I_{cc} est supérieur au courant nécessaire pour faire transiter le limiteur 106 et la tension de sortie suffisante pour maintenir le limiteur 106 dans l'état résistif compte tenu des résistances des lignes ($I_{cc} = 38$ A avec $U_{cc} = 0,80$ V),
- un autotransformateur variable 204 permettant d'ajuster la tension du réseau (230 V) pour obtenir ces deux valeurs de courant de court-circuit et de tension de sortie suffisante pour maintenir le limiteur 106 dans son état résistif,
- un interrupteur 203 permettant de connecter le dispositif de commande 201 au circuit de l'aimant pendant la phase opératoire.
- un interrupteur 202 permettant de connecter le dispositif de commande 201 au réseau électrique 230V/50Hz (ou 115V/60Hz) pour sa mise en service.

[0058] Nous allons illustrer le fonctionnement du dispositif de commande 201 dans le cas d'un aimant supraconducteur d'inductance $L' = 0,68$ H donnant un champ magnétique nominal de 7 T pour un courant de 400 A. Une résistance R'_2 de $10 \mu\Omega$ (résistance simulant les connexions résistives d'un aimant supraconducteur) est montée en série avec la

bobine L' .

[0059] L'interrupteur 203 étant fermé, le dispositif de commande 201 est mis en service par la fermeture de l'interrupteur 202 (connexion au réseau 230V/50Hz).

[0060] Dans une première phase, l'autotransformateur 204 est réglé à la tension de 230 V.

[0061] Comme $2\pi fL'$ est bien supérieur à la résistance du limiteur 106, le courant circule seulement dans la maille du limiteur 106 jusqu'à la transition de ce dernier. On notera que dans l'exemple cité ici, le limiteur 106 transite car le courant de court circuit I_{cc} (correspondant à la valeur efficace du courant sinusoïdal fourni par le transformateur TBT 205) est supérieur au courant de déclenchement nécessaire pour faire transiter le limiteur 106. Toutefois, on peut également commander l'ouverture du limiteur 106 si on choisit une tension fournie par le transformateur TBT 205 telle que le courant circulant dans le limiteur entraîne, non pas un dépassement du courant de déclenchement, mais une élévation de température allant au-delà de la température critique permettant de faire basculer le limiteur 106 : une telle solution nécessite de travailler à des fréquences de fonctionnement plus élevées.

[0062] Dans une deuxième phase, le limiteur 106 étant résistif, le courant le traversant est faible (quelques dizaines de mA) et la tension nécessaire pour maintenir le limiteur 106 transité est donc de quelques volts (1 V environ en sortie de l'autotransformateur 205). Cette tension fera circuler un courant d'environ 2 A dans la résistance de décharge R'_3 et un très faible courant alternatif dans la maille de la bobine inversement proportionnel à son inductance L' . Ce courant alternatif ne modifie pas le courant continu principal dans la bobine.

[0063] Dans une troisième phase, on peut augmenter (ou diminuer) le courant principal dans la bobine en modifiant le courant fourni par l'alimentation 103. Pendant cette phase, l'interrupteur 203 est soit fermé pour maintenir le limiteur 106 ouvert soit ouvert (dans ce cas, le courant qui maintient le limiteur 106 ouvert est fourni par l'alimentation 103 pendant le temps nécessaire à la modification du courant). L'interrupteur 203 ouvert permet d'effectuer les ajustements en courant sans être perturbé par les signaux alternatifs.

[0064] Dans une quatrième phase, dès que les ajustements nécessaires ont été effectués, le limiteur 106 redevient supraconducteur suite à l'ouverture de l'interrupteur 203. En effet, sans apport d'énergie extérieur, le limiteur 106 retrouve la température du bain cryogénique typiquement au bout de quelques secondes. Le temps de retour à l'état fermé dépend avant tout du niveau d'isolation thermique entre le limiteur et le bain cryogénique.

[0065] On notera que l'exemple ci-dessus concerne un signal sinusoïdal mais que d'autres types de signaux alternatifs (carré - triangulaire - à impulsions,...) peuvent également être utilisés.

[0066] On peut également utiliser directement l'alimentation principale 103 pour générer une impulsion de courant de quelques millisecondes à une valeur de courant supérieure au courant de déclenchement du limiteur 106 suffisante pour faire transiter ce dernier.

[0067] La figure 5 illustre la mise en oeuvre d'une telle commande sur un circuit 300 sensiblement identique au circuit 100 de la figure 3 (à la différence qu'il ne comporte pas d'interrupteur 105).

[0068] Le circuit 300 présentée en figure 5 est composée d'un aimant supraconducteur d'inductance 0,68 H donnant un champ magnétique nominal de 7 T pour un courant I_2 de 400 A. La résistance R'_2 simulant les connexions résistives de l'aimant supraconducteur et montée en série avec la bobine L' a une valeur de $10 \mu\Omega$. Une alimentation 103 (1000 A - 10 V) régulée en courant est connectée à la charge par la fermeture de l'interrupteur 104.

[0069] Comme nous l'avons déjà expliqué en référence à la figure 1, pour protéger l'aimant, la résistance R'_3 (d'une valeur ici égale à $0,5 \Omega$) est montée en parallèle à la branche de l'aimant. Dans le cas du circuit 300, la résistance R'_3 est à l'intérieur du cryostat C. Lors d'un problème grave, l'interrupteur 104 est ouvert entraînant la décharge rapide de l'énergie de l'aimant dans la résistance de protection R'_3 . Le limiteur 106 et la résistance de stabilisation R'_1 (ici égale à $1 m\Omega$) sont montés en parallèle sur l'aimant. Le courant I_1 dans cette branche doit être tel que $R'_2 \cdot I_2 = R'_1 \cdot I_1$ en régime permanent, où I_2 désigne le courant circulant dans l'inductance L' .

[0070] L'alimentation 103 comporte des moyens pour générer une impulsion de courant pendant une durée suffisante (ici $>5ms$) et d'amplitude I_p (ici $>40 A$) supérieure au courant de déclenchement permettant de faire basculer le limiteur 106 de son état basse résistance à son état haute résistance. Une solution pour générer cette impulsion consiste à intervenir dans la boucle d'asservissement de l'alimentation 103. On peut également utiliser une alimentation auxiliaire permettant de générer cette impulsion.

[0071] L'alimentation 103 régulée en courant, génère une rampe en courant (avec un di/dt ici choisie entre 2 et 10 A/s). Une valeur de rampe minimale est imposée afin que la tension U_c aux bornes de l'aimant soit suffisante pour maintenir le limiteur 106 dans son mode résistif.

[0072] En régime établi on peut écrire la relation suivante :

$$U_c = L' dI_2/dt + R'_2 I_2 = R'_3 I_3 = (R'_1 + R'_{1O}) I_1$$

où $R'_{1O} \approx 10 \Omega$ désigne la résistance du limiteur supraconducteur 106 dans son état haute résistance.

[0073] On obtient donc, pour une valeur de di/dt de 2 A/s, les valeurs suivantes :

$$U_c \approx 0,68 \times 2 = 1,36 \text{ V}$$

$$I_3 = 1,36/0,5 = 2,72 \text{ A}$$

$$I_1 = 1,36/10 = 0,136 \text{ A.}$$

[0074] Il convient de noter que, juste après le basculement du limiteur 106 dans son état résistif, le courant va essentiellement basculer dans la résistance R'_3 . Dès lors, la montée en courant I_2 dans l'aimant s'établit avec une rampe de constante de temps proche de L'/R'_3 (i.e. il y a un certain délai avant que le courant I_2 dans l'aimant ne rattrape la rampe de courant délivrée par l'alimentation 103). De même, à la fin de la rampe, le courant finit de s'établir dans l'aimant avec la même constante de temps. Un tel comportement du courant, I_2 peut entraîner deux inconvénients :

- d'une part des phases transitoires de durées d'autant plus importantes que l'inductance L' de l'aimant est élevée et,
- d'autre part le risque que la tension U_c soit trop faible pendant les premières secondes pour maintenir le limiteur 106 en mode résistif et ce particulièrement pour des aimants de grande inductance.

[0075] Une solution efficace pour palier à ces inconvénients consiste à faire générer un créneau en courant I_c par l'alimentation 103 immédiatement après l'impulsion I_p de basculement du limiteur 106, la valeur de I_c étant choisie telle que $I_c = I_3 + I_1$. Ce créneau en courant aura la même durée que la rampe de montée (i.e. correspondant au temps d'ajustement de l'aimant).

[0076] Deux autres solutions peuvent également être utilisées :

- réaliser le chargement de l'aimant avec une tension constante aux bornes de l'aimant avec une alimentation régulée en tension et une valeur de di/dt inférieure à 10 A/s. Cette solution nécessite une alimentation spécifique pour le chargement et n'est pas particulièrement adaptée à des petits ajustements en courant.
- monter une diode en opposition en série avec R'_3 ce qui permet d'annuler le courant I_3 . Dans ce cas, le circuit électrique n'est plus symétrique et ne fonctionne pour des descentes en courant.

[0077] Nous allons décrire dans ce qui suit les étapes permettant le passage (i.e. ajustement) d'un courant de 400 A à un courant de 410 A dans l'aimant, la rampe de courant étant toujours de 2 A/s :

- on commence par annuler le courant de stabilisation I_1 en passant la consigne de l'alimentation 103 à 400 A ;
- après quelques secondes (typiquement 2 s), on fixe une nouvelle consigne de courant de 410 A ;
- on génère impulsion de 40 A pendant quelques millisecondes (typiquement 10 ms) pour rendre le limiteur 106 résistif ;
- on génère immédiatement après l'impulsion un créneau en courant à une valeur de courant I_c telle que $I_c = I_3 + I_1 = 2,72 + 0,14 = 2,86 \text{ A}$
- dès que le courant de l'alimentation 103 atteint 410 A (typiquement après 5 s), on arrête le créneau de courant ($I_c = 0$). Le courant dans l'aimant est alors de 410 A et les courants I_1 et I_3 sont quasiment nuls ($< 10 \text{ mA}$). Le limiteur 106 se refroidit et redevient supraconducteur en quelques secondes, recouvrant ainsi son état basse résistance.
- après quelques secondes, on injecte un courant de stabilisation I_1 égal à 4,1 A dans la résistance R'_1 choisi de sorte que $R'_1 I_1 = R'_2 I_2$, l'injection se faisant par une nouvelle consigne donnée à l'alimentation à 414,1 A.

[0078] A titre illustratif, une montée de 0 à 30 A (le principe serait identique en passant de 400 à 410 A) a été réalisée expérimentalement en appliquant les étapes exposées ci-dessus (sans l'étape de génération de créneau). Cette montée est illustrée sur la figure 6 qui représente l'évolution en fonction du temps respectivement du courant de l'alimentation 103, du courant dans l'aimant et du courant dans le limiteur 106. Les échelles de courant et de temps sont les mêmes pour les trois courbes. On peut distinguer les étapes suivantes :

1. à $t=2\text{s}$ (valeur purement illustrative correspondant au départ de la rampe), on fixe une consigne de chargement de 30 A à l'alimentation : on observe donc le démarrage d'une rampe de courant pour la courbe d'alimentation.
2. Le limiteur étant passant, il a l'impédance la plus faible du circuit ; le courant s'écoule donc dans sa branche et la courbe du limiteur suit la rampe de courant de l'alimentation.

3. On envoie alors une impulsion de courant (35 A) sur l'alimentation qui dépasse le courant de déclenchement du limiteur. On observe que l'impulsion est également vue par le limiteur.

4. Le limiteur passe en mode résistif et le courant bascule essentiellement dans la résistance de protection R'_3 . La montée en courant dans l'aimant s'établit avec une rampe de constante de temps proche de L/R'_3 . Cette phase transitoire peut être évitée en utilisant un créneau de courant tel qu'évoqué plus haut. Le courant dans l'aimant rattrape ensuite la rampe de courant délivrée par l'alimentation.

5. Durant toute la poursuite de la rampe de courant, le limiteur reste en mode résistif car une tension est maintenue à ses bornes et le chargement de l'aimant se poursuit donc normalement.

6. Une fois arrivé à la consigne de courant souhaitée dans l'aimant, le limiteur redevient passant (non représenté sur la figure 6).

[0079] Le bruit observé sur la mesure du courant dans l'aimant est lié au bruit de mesure du fait de la très faible valeur de résistance ($R_2=10\mu\Omega$) utilisée pour la mesure de ce courant.

[0080] On notera que, dans l'exemple donné, le délai est important (environ 3 s) entre le début de la rampe et l'impulsion ; ce délai vise uniquement à illustrer le principe de fonctionnement mais peut être réduit à zéro.

Revendications

1. Système (100) de création d'un champ magnétique incluant :

- une première branche comportant un aimant supraconducteur (102) destiné à produire ledit champ magnétique, ledit aimant étant modélisé par une inductance (L') de bobinage en série avec une résistance résiduelle (R'_2);
- une deuxième branche comportant une résistance (R'_3), dite résistance de protection,
- une troisième branche comportant une source d'alimentation (103);

ledit système étant **caractérisé en ce qu'il** comporte une quatrième branche formée par une résistance (R'_1) montée en série avec un dispositif supraconducteur limiteur (106) de courant basculant d'un état à résistance basse vers un état à résistance haute lorsque le courant le traversant dépasse un courant de déclenchement, ledit dispositif supraconducteur (106) ayant une inductance au moins 10^5 fois inférieure à celle de la bobine (L'), et lesdites première, deuxième, troisième et quatrième branches étant montées en parallèle, ledit système (100) présentant au moins trois modes de fonctionnement :

- un premier mode de fonctionnement, dit mode de charge ou de décharge de l'aimant, dans lequel :

- o ladite source d'alimentation (103) est reliée au dit aimant (102) de façon à augmenter ou diminuer le courant dans l'aimant,
- o ledit limiteur (106) de courant est dans son état à résistance haute ;

- un deuxième mode de fonctionnement, dit mode normal de fonctionnement, dans lequel :

- o ladite source d'alimentation (103) est reliée au dit aimant (102),
- o ledit limiteur (106) est dans son état à résistance basse ;

- un troisième mode de fonctionnement, dit mode de décharge rapide de l'aimant dans ladite résistance (R'_3) de protection, dans lequel :

- o ladite source d'alimentation (103) est déconnectée dudit aimant (102),
- o ledit limiteur (106) est dans son état à haute résistance ;

l'activation de l'état dudit limiteur (106) dans lesdits trois modes de fonctionnement se faisant de manière passive sans recours à une commande externe.

2. Système (100) selon la revendication précédente **caractérisé en ce que** ladite résistance (R'_1) montée en série avec ledit limiteur (106) présente une valeur 10 à 1000 fois supérieure à celle de la résistance résiduelle de l'aimant (R'_2).

3. Système (100) selon l'une des revendications précédentes **caractérisé en ce que** le fil supraconducteur formant ledit limiteur (106) est choisi de sorte que son courant critique soit supérieur à $(R'_2/R'_1)I_{op}$ où R'_2 désigne la valeur de ladite résistance résiduelle dudit aimant, R'_1 désigne ladite résistance montée en série avec ledit limiteur (106) et I_{op} désigne le courant circulant dans ladite première branche lors dudit mode normal de fonctionnement.
4. Système (100) selon l'une des revendications précédentes **caractérisé en ce que** la longueur du fil supraconducteur formant ledit limiteur (106) est déterminée de sorte que la température dudit fil supraconducteur reste toujours inférieure ou égale à une valeur maximale de température prédéterminée T_{max} .
5. Système selon l'une des revendications précédentes **caractérisé en ce que** ledit limiteur est formé par un fil supraconducteur entouré par une couche isolante dont l'épaisseur est déterminée de sorte que la puissance déposée dans le bain cryogénique dudit limiteur soit inférieure à une valeur prédéterminée.
6. Système selon l'une des revendications précédentes **caractérisé en ce que** ledit limiteur est formé par un bobinage en deux couches, les deux couches étant bobinées en sens inverse et étant mises soit en parallèle soit en série.
7. Système (200) selon l'une des revendications précédentes **caractérisé en ce qu'il** comporte des moyens de commande (201) pour faire basculer ledit limiteur (106) de son état à résistance basse vers son état à résistance haute.
8. Système selon la revendication précédente **caractérisé en ce que** lesdits moyens de commande sont formés par un élément chauffant.
9. Système (200) selon la revendication 7 **caractérisé en ce que** lesdits moyens de commande (201) comportent des moyens (202, 203, 204, 205) pour générer un signal de courant alternatif circulant dans ledit limiteur (106) de sorte que ledit limiteur (106) bascule de son état à résistance basse vers son état à résistance haute.
10. Système (200) selon la revendication 9 **caractérisé en ce que** lesdits moyens (202, 203, 204, 205) pour générer un signal de courant alternatif comportent des moyens transformateurs (204, 205) de tension recevant en entrée la tension du réseau électrique et fournissant en sortie une tension abaissée à la même fréquence que la tension du réseau électrique.
11. Système (200) selon l'une des revendications 9 ou 10 **caractérisé en ce que** la fréquence f dudit signal de courant alternatif est choisie suffisamment élevée pour que ledit courant alternatif soit bloqué par l'inductance de la bobine (L').
12. Système selon la revendication 7 **caractérisé en ce que** lesdits moyens de commande comportent des moyens pour générer un courant supérieur au dit courant de déclenchement permettant de faire basculer ledit limiteur.
13. Système selon la revendication 12 **caractérisé en ce que** lesdits moyens pour générer un courant supérieur au dit courant de déclenchement permettant de faire basculer ledit limiteur sont formés par des moyens générant une impulsion de courant d'intensité et de durée suffisante pour faire basculer ledit limiteur.
14. Système selon l'une des revendications 12 ou 13 **caractérisé en ce que** lesdits des moyens pour générer un courant supérieur au dit courant de déclenchement permettant de faire basculer ledit limiteur sont intégrés à ladite source d'alimentation.
15. Procédé d'ajustement du courant dans un aimant compris dans un système selon l'une des revendications 13 ou 14 comportant les étapes suivantes considérées dans un ordre quelconque :
 - génération d'une rampe de courant avec une consigne fixée à la nouvelle valeur de courant à atteindre dans l'aimant ;
 - génération d'une impulsion de courant dont la durée et l'intensité sont telles que ledit limiteur bascule dans son état à haute résistance.
16. Procédé selon la revendication précédente **caractérisé en ce qu'il** comporte une étape de génération d'un créneau en courant qui suit l'étape de génération de ladite impulsion de courant, la valeur du courant de ce créneau étant égale à la somme du courant circulant dans ladite résistance de protection et du courant circulant dans ledit limiteur

lorsque celui-ci est dans son état haute résistance.

Claims

1. A system (100) for creating a magnetic field including:

- a first branch comprising a superconducting magnet (102) intended to produce said magnetic field, said magnet being formed by a coil inductance (L') in series with a residual resistance (R'2);
- a second branch comprising a resistance (R'3), said protection resistance,
- a third branch comprising a power supply (103);

said system being **characterized in that** it comprises a fourth branch formed by a resistance (R'1) mounted in series with a current-limiting superconducting device (106) switching from a low-resistance state to a high-resistance state when the current passing therethrough exceeds a breaking current, said superconducting device (106) having an inductance at least 10^5 times less than that of the coil (L'), and said first, second, third and fourth branches being mounted in parallel,

said system (100) presenting at least three modes of operation:

- a first mode of operation, known as charge mode or discharge mode of the magnet, in which:

- o said power source (103) is connected to said magnet (102) so as to increase or reduce the current in the magnet, o said current limiter (106) is in its high-resistance state;

- a second mode of operation, known as normal mode of operation, in which:

- o said power source (103) is connected to said magnet (102),
- o said limiter (106) is in its low-resistance state; - a third mode of operation, known as the rapid discharge mode of the magnet in said protection resistance (R'3), in which:

- o said power source (103) is disconnected from said magnet (102),
- o said limiter (106) is in its high-resistance state; Activation of the state of said limiter (106) in said three operation modes is done in a passive manner without resorting to an external command.

2. The system (100) according to the previous claim **characterized in that** said resistance (R'1) mounted in series with said limiter (106) presents a value 10 to 1000 times greater than that of the residual resistance of the magnet (R'2).

3. The system (100) according to one of the previous claims **characterized in that** the superconductor wire forming said limiter (106) is chosen such that its critical current is greater than $(R'2/R'1)I_{op}$ where R'2 designates the value of said residual resistance of said magnet, R'1 designates said resistance mounted in series with said limiter (106) and I_{op} designates the current circulating in said first branch during said normal operation mode.

4. The system (100) according to one of the previous claims **characterized in that** the length of the superconductor wire forming said limiter (106) is determined such that the temperature of said superconductor wire always remains less than or equal to a predetermined maximum temperature value T_{max} .

5. The system according to one of the previous claims **characterized in that** said limiter is formed by a superconductor wire surrounded by an insulating layer whose thickness is determined such that the power deposited in the cryogenic bath of said limiter is less than a predetermined value.

6. The system according to one of the previous claims **characterized in that** said limiter is formed by a coil in two layers, the two layers being wound in opposing directions and being placed either in parallel or in series.

7. The system (200) according to one of the previous claims **characterized in that** the system comprises control means (201) to cause said limiter (106) to switch from its low-resistance state to its high-resistance state.

8. The system according to the previous claim **characterized in that** said control means are formed by a heating element.

9. The system (200) according to claim 7 **characterized in that** said control means (201) comprise means (202, 203, 204, 205) for generating a signal of alternating current circulating in said limiter (106) such that said limiter (106) switches from its low-resistance state to its high-resistance state.

10. The system (200) according to claim 9 **characterized in that** said means (202, 203, 204, 205) to generate an alternating current signal comprise voltage transformer means (204, 205) receiving in input the voltage from the electrical network and providing in output a lowered voltage at the same frequency as the voltage of the electrical network.

11. The system (200) according to one of claims 9 or 10 **characterized in that** the frequency f of said alternating current signal is chosen sufficiently high so that said alternating current is blocked by the coil inductance (L').

12. The system according to claim 7 **characterized in that** said control means comprise means for generating a current greater than said breaking current enabling said limiter to be caused to switch.

13. The system according to claim 12 **characterized in that** said means for generating a current greater than said breaking current enabling said limiter to be caused to switch are formed by means generating a current pulse of a sufficient intensity and duration to cause said limiter to switch.

14. The system according to one of claims 12 or 13 **characterized in that** said means for generating a current greater than said breaking current enabling said limiter to be caused to switch are integrated into said power source.

15. A method of adjusting the current in a magnet included in a system according to one of claims 13 or 14 comprising the following steps, considered in any order:

- generation of a current ramp with a setting set to the new current value to be reached in the magnet;
- generation of a current pulse in which the duration and intensity are such that said limiter switches in its high-resistance state.

16. The method according to the previous claim **characterized in that** the method comprises a step of generating a current slot that follows the step of generating said current pulse, the value of the current in this slot being equal to the sum of the current circulating in said protection resistance and of the current circulating in said limiter when it is in its high-resistance state.

Patentansprüche

1. System (100) zur Erzeugung eines Magnetfelds, das Folgendes umfasst:

- einen ersten Schenkel, der einen supraleitenden Magneten (102) umfasst, der dazu bestimmt ist, das Magnetfeld zu erzeugen, wobei der Magnet durch eine Wicklungsinduktivität (L') in Reihe mit einem Restwiderstand (R'_2) modelliert ist;
- einen zweiten Schenkel, der einen Widerstand (R'_3) umfasst, der Schutzwiderstand genannt wird,
- einen dritten Schenkel, der eine Stromversorgung (103) umfasst;

wobei das System **dadurch gekennzeichnet ist, dass** es einen vierten Schenkel umfasst, der durch einen Widerstand (R'_1) gebildet ist, der mit einer supraleitenden Strombegrenzungsvorrichtung (106) in Reihe geschaltet ist, die von einem Zustand mit niedrigem Widerstand in einen Zustand mit hohem Widerstand kippt, wenn der sie durchfließende Strom einen Auslösestrom überschreitet, wobei die supraleitende Vorrichtung (106) eine Induktivität aufweist, die mindestens 10^5 mal kleiner ist als diejenige der Spule (L'), und der erste, zweite, dritte und vierte Schenkel parallel geschaltet sind,

wobei das System (100) mindestens drei Arbeitsweisen aufweist:

- eine erste Arbeitsweise, die Ladungs- oder Entladungsbetriebsweise des Magneten genannt wird, in der:
 - o die Stromversorgung (103) mit dem Magneten (102) verbunden ist, derart, dass der Strom im Magneten erhöht oder vermindert wird,
 - o der Strombegrenzer (106) sich in seinem Zustand mit hohem Widerstand befindet;

- eine zweite Arbeitsweise, die normale Arbeitsweise genannt wird, in der:

- o die Stromversorgung (103) mit dem Magneten (102) verbunden ist,
- o der Strombegrenzer (106) sich in seinem Zustand mit niedrigem Widerstand befindet;

- eine dritte Arbeitsweise, die Betriebsweise zur Schnellentladung des Magneten in den Schutzwiderstand (R'_3) genannt wird, in der:

- o die Stromversorgung (103) vom Magneten (102) getrennt ist,
- o der Strombegrenzer (106) sich in seinem Zustand mit hohem Widerstand befindet;

wobei die Aktivierung des Zustands des Strombegrenzers (106) in den drei Arbeitsweisen passiv ohne Zurückgreifen auf eine externe Steuerung erfolgt.

2. System (100) nach dem vorhergehenden Anspruch, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Widerstand (R'_1), der mit dem Strombegrenzer (106) in Reihe geschaltet ist, einen Wert aufweist, der 10 bis 1000 mal höher ist als derjenige des Restwiderstands des Magneten (R'_2).

3. System (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der supraleitende Draht, der den Strombegrenzer (106) bildet, derart ausgewählt ist, dass sein kritischer Strom höher ist als $(R'_2/(R'_1) I_{op})$, wo R'_2 den Wert des Restwiderstands des Magneten bezeichnet, R'_1 den Widerstand bezeichnet, der mit dem Strombegrenzer (106) in Reihe geschaltet ist, und I_{op} den Strom bezeichnet, der in der normalen Arbeitsweise im ersten Schenkel zirkuliert.

4. System (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Länge des supraleitenden Drahtes, der den Strombegrenzer (106) bildet, derart bestimmt ist, dass die Temperatur des supraleitenden Drahtes immer niedriger als oder gleich einem vorbestimmten Höchstwert für die Temperatur T_{max} bleibt.

5. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Strombegrenzer durch einen supraleitenden Draht gebildet ist, der von einer isolierenden Schicht umgeben ist, deren Dicke derart bestimmt ist, dass die im Kältemittelbad des Strombegrenzers abgegebene Leistung geringer ist als ein vorbestimmter Wert.

6. System nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Strombegrenzer durch eine Wicklung in zwei Schichten gebildet ist, wobei die zwei Schichten in umgekehrte Richtungen gewickelt sind und entweder parallel oder in Reihe geschaltet sind.

7. System (200) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** es Steuerungsmittel (201) umfasst, um den Strombegrenzer (106) von seinem Zustand mit niedrigem Widerstand in seinen Zustand mit hohem Widerstand zum Kippen zu bringen.

8. System nach dem vorhergehenden Anspruch, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Steuerungsmittel durch ein Heizelement gebildet sind.

9. System (200) nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Steuerungsmittel (201) Mittel (202, 203, 204, 205) zum Generieren eines Signals von Wechselstrom umfassen, der im Strombegrenzer (106) zirkuliert, derart, dass der Strombegrenzer (106) von seinem Zustand mit niedrigem Widerstand in seinen Zustand mit hohem Widerstand kippt.

10. System (200) nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Mittel (202, 203, 204, 205) zum Generieren eines Wechselstromsignals Spannungswandlernmittel (204, 205) umfassen, die am Eingang die Spannung des Stromnetzes empfangen und am Ausgang eine gesenkte Spannung mit derselben Frequenz wie die Spannung des Stromnetzes liefern.

11. System (200) nach einem der Ansprüche 9 oder 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Frequenz f des Wechselstromsignals ausreichend hoch ausgewählt ist, damit der Wechselstrom durch die Induktivität der Spule (L') gesperrt wird.

12. System nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Steuerungsmittel Mittel zum Generieren eines

Stroms umfassen, der höher ist als der Auslösestrom, der es ermöglicht, den Strombegrenzer zum Kippen zu bringen.

5 13. System nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Mittel zum Generieren eines Stroms, der höher ist als der Auslösestrom, der es ermöglicht, den Strombegrenzer zum Kippen zu bringen, durch Mittel gebildet sind, die einen Stromimpuls generieren, dessen Stärke und Dauer ausreicht, um den Strombegrenzer zum Kippen zu bringen.

10 14. System nach einem der Ansprüche 12 oder 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Mittel zum Generieren eines Stroms, der höher ist als der Auslösestrom, der es ermöglicht, den Strombegrenzer zum Kippen zu bringen, in die Stromversorgung integriert sind.

15 15. Verfahren zur Einstellung des Stroms in einem Magneten, der in einem System nach einem der Ansprüche 13 oder 14 enthalten ist, das die folgenden Schritte in einer beliebigen Reihenfolge umfasst:

- Generierung einer Stromrampe mit einem Sollwert, der auf den neuen im Magneten zu erreichenden Stromwert festgelegt wird;
- Generierung eines Stromimpulses, dessen Dauer und Stärke derart sind, dass der Strombegrenzer in seinen Zustand mit hohem Widerstand kippt.

20 16. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, **dadurch gekennzeichnet, dass** es einen Schritt der Generierung eines Auftastimpulses im Strom umfasst, der dem Schritt der Generierung des Stromimpulses folgt, wobei der Wert des Stroms dieses Auftastimpulses gleich der Summe des im Schutzwiderstand zirkulierenden Stroms und des im Strombegrenzer zirkulierenden Stroms ist, wenn dieser sich in seinem Zustand mit hohem Widerstand befindet.

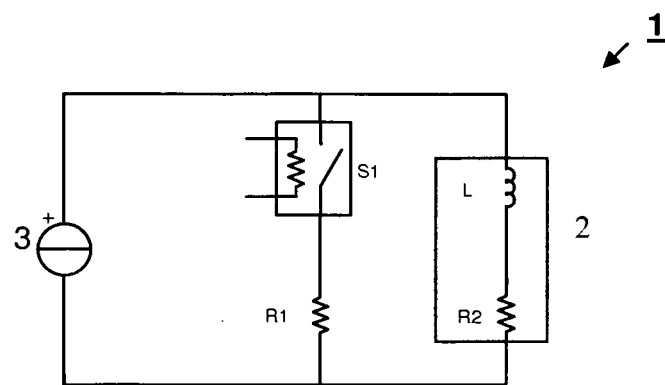


Figure 1

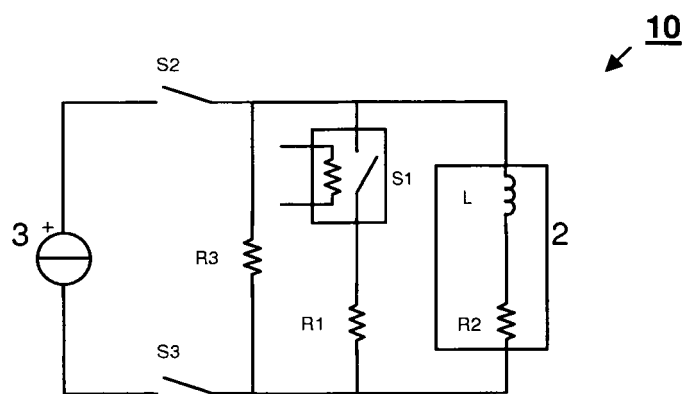


Figure 2

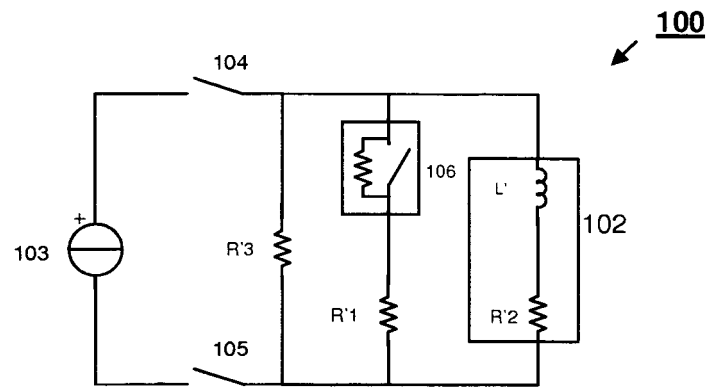


Figure 3

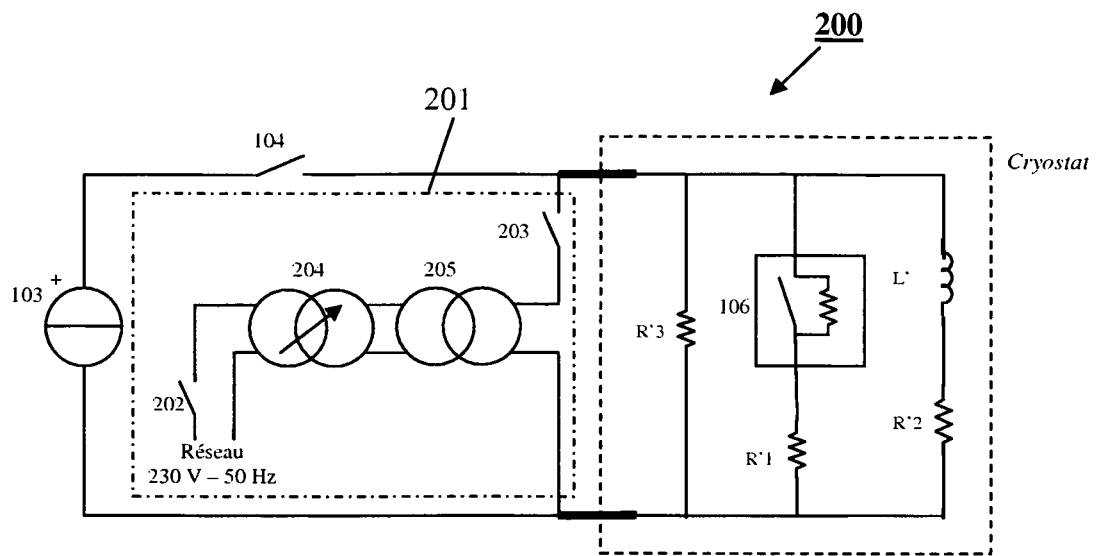


Figure 4

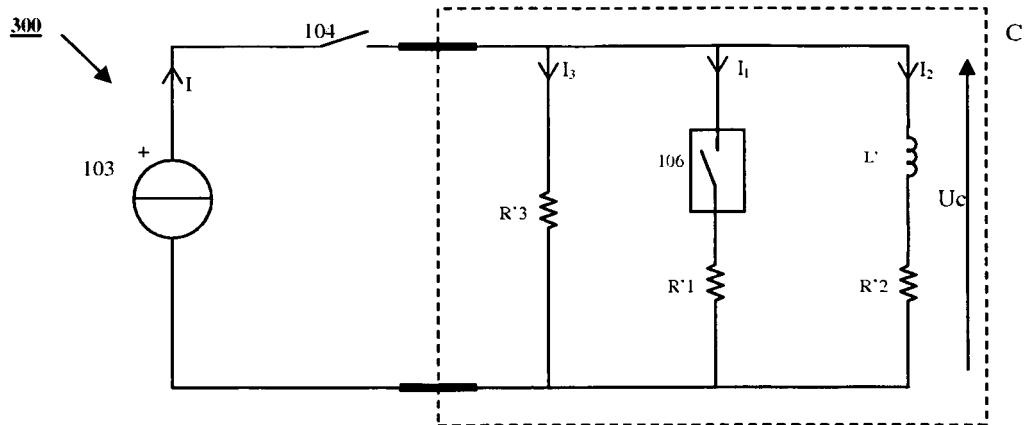


Figure 5

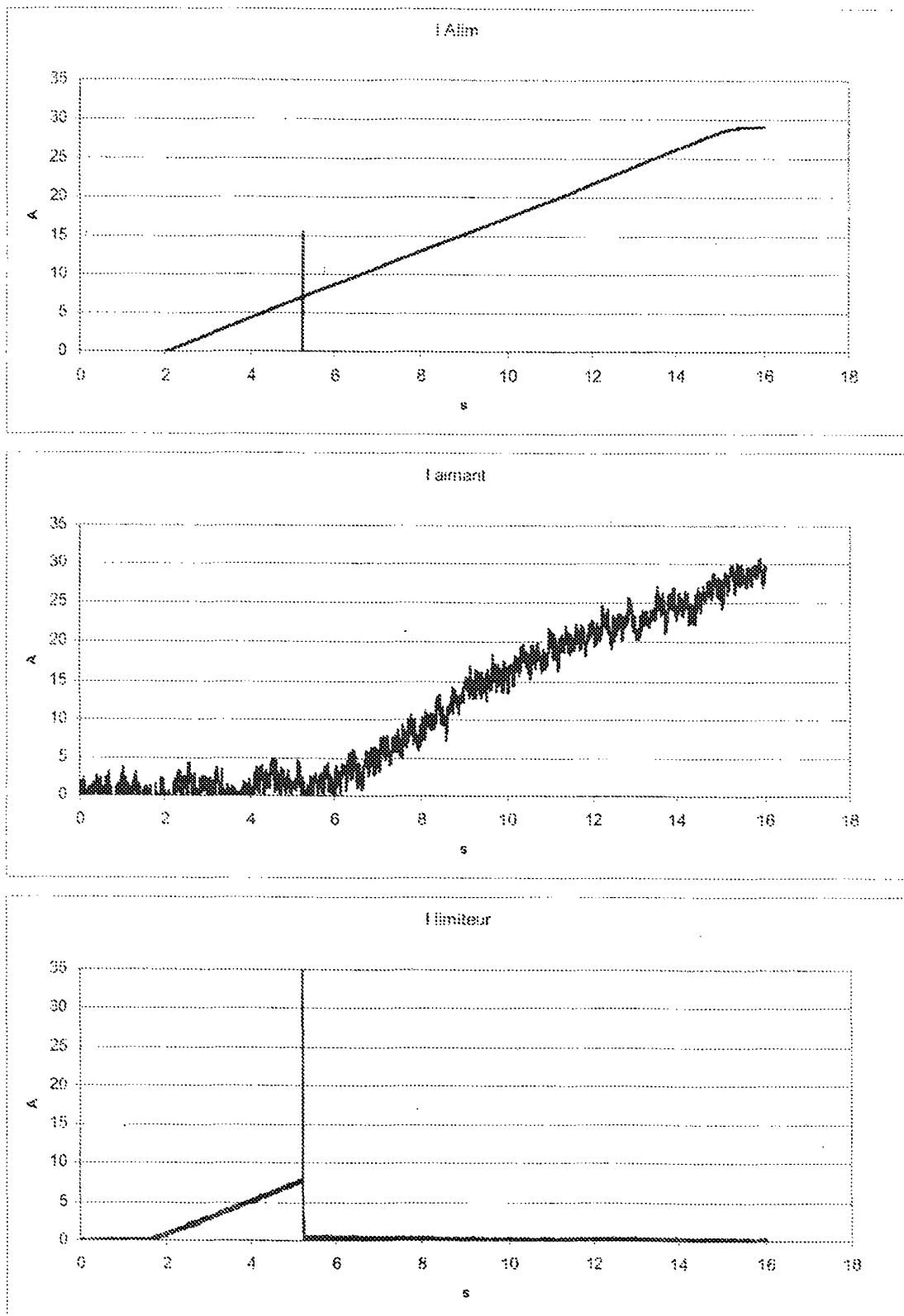


Figure 6

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- US 6624732 B [0007] [0012] [0025]
- US 20070024404 A [0022]