(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) N° de publication : **2 572 598**
(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

(21) N° d'enregistrement national : **85 15853**

(51) Int Cl⁴ : H 02 J 3/36.

(12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

(22) **Date de dépôt :** 25 octobre 1985.

(30) **Priorité :** IT, 26 octobre 1984, n° 23 347 A/84.

(43) **Date de la mise à disposition du public de la demande :** BOPI « Brevets » n° 18 du 2 mai 1986.

(60) **Références à d'autres documents nationaux apparentés :**

(71) **Demandeur(s) :** *Société dite : SOCIETA' CAVI PIRELLI Società per Azioni, Société par actions de droit italien.* — IT.

(72) **Inventeur(s) :** Giandomenico Testi.

(73) **Titulaire(s) :**

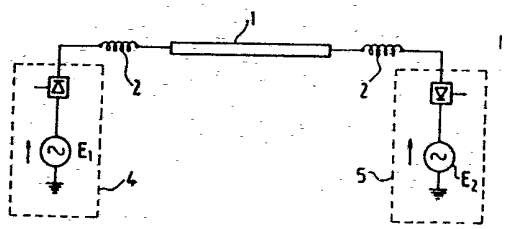
(74) **Mandataire(s) :** Armengaud Jeune, Cabinet Lepeudry.

(54) Procédé et installation pour alimenter un câble électrique avec une tension continue à laquelle est superposée une tension alternative.

(57) L'invention se rapporte au transport de l'énergie électrique.

La tension alternative est engendrée dans l'une des stations terminales 4 et compensée à l'autre station terminale 5 de manière à rendre nulle la somme des forces électromotrices alternatives dans la maille qui comprend le câble 1. La source de tension alternative et le dispositif compensateur sont réalisés en agissant sur les impulsions de commande des circuits de conversion AC/DC et DC/AC, ou ils sont constitués par des générateurs de tension.

Principales applications : câbles sous-marins.



FR 2 572 598 - A1

Vente des fascicules à l'IMPRIMERIE NATIONALE, 27, rue de la Convention — 75732 PARIS CEDEX 15

La présente invention concerne un procédé et une installation pour alimenter un câble électrique avec une tension continue à laquelle est superposée une tension alternative d'une valeur inférieure à cette tension continue et d'une fréquence basse.

Plus précisément, le procédé et l'installation qui constituent l'objet de la présente invention permettent d'alimenter de façon continue un câble électrique connecté entre deux stations terminales avec une tension continue qui peut être de l'ordre de quelques centaines de kV, à laquelle est superposée une composante de tension alternative possédant une valeur de pic à pic comprise entre 0,5 % et 10 % de la valeur de la tension continue et une fréquence inférieure à 50 Hz, et de préférence, comprise entre 1 et 20 Hz.

Dans la présente description, on entend d'une façon générale par l'expression "station terminale" une station de tête du câble dans laquelle il s'effectue la conversion d'une tension continue en une tension alternative ou inversement. Cette station peut donc être une station intermédiaire d'un réseau de distribution complexe, un point de ramification, le point de transition entre un câble enterré ou immergé et une ligne aérienne, etc..

La tension continue peut être la tension continue de service prévue pour le câble ou encore elle possède une valeur supérieure ou inférieure mais, de toute façon, cette tension est supérieure d'au moins un ordre de grandeur à la tension alternative. En outre, on entend par l'expression "de façon continue", une alimentation qui est maintenue pendant un intervalle de temps qui se mesure au moins en heures.

Les installations actuelles de transmission de l'énergie électrique en courant continu qui utilisent des câbles à haute tension (HVDC) comprennent globalement, deux ou plus de deux stations de conversion (redresseurs et onduleurs) qui permettent de transmettre la

puissance du réseau à courant alternatif au réseau à courant continu et inversement, et au moins une ligne de transmission à courant continu qui peut être aérienne et/ou en câble.

Les convertisseurs font usage de valves, de préférence à thyristors, dont la conduction est régie par des appareils de commande qui assurent les fonctions de régulation et de production/distribution des impulsions de commande aux valves et opèrent de manière que le réseau fonctionne aux valeurs d'intensité et de tension désirées.

En particulier, l'utilisation de la transmission en courant continu à haute tension par câble a trouvé jusqu'à présent application dans les traversées maritimes d'une longueur supérieure à quelques kilomètres, puisque la technique traditionnelle de transmission en courant alternatif pose de notables problèmes techniques qui sont dus à la grande valeur de la capacité des câbles par rapport à la terre elle-même.

Dans de telles installations, spécialement si elles sont d'une longueur supérieure à quelques dizaines de kilomètres, le coût des câbles peut devenir le poste de très loin le plus important de l'économie de l'ensemble du projet.

Le coût de ces câbles est fonction de l'intensité et de la tension nominales ainsi que de la profondeur de la mer à traverser et, plus généralement, des conditions de pose.

Le type de câble qui satisfait le mieux sous l'aspect technico-économique aux exigences d'utilisation comprend un isolement composé de papier imprégné d'huile et la tension nominale maximum utilisée à ce jour est d'environ $\pm$ 300 kV CC.

Dans le fonctionnement des installations de transmission en courant continu, dans les conditions de régime permanent, la tension qui est appliquée au câble se présente sous une forme sensiblement continue, sauf

une ondulation très faible ("ripple") dont la valeur de pic à pic est de l'ordre de quelques points pour mille.

On a observé que, si l'on superpose à la tension continue appliquée au câble de façon continue et sur toute la longueur du câble, une tension alternative possédant une amplitude comprise entre 0,5 et 10 % de la valeur de la tension continue et une fréquence comprise entre 1Hz et quelques dizaines de Hz, les caractéristiques de transmission du câble sont nettement améliorées. La tension continue peut être la tension nominale de service ou possèder une valeur différente de celle-ci mais du même ordre de grandeur. En outre, ce type d'alimentation peut être utilisé de façon permanente pendant le service du câble, ou de façon irrégulière (mais de façon continue pendant au moins un certain nombre d'heures ou de jours) ou, finalement, le câble peut être soumis à un traitement de ce genre avant sa mise en oeuvre. En particulier, on obtient une amélioration des caractéristiques de rigidité diélectrique du câble qui permet d'utiliser un câble dans des conditions de fiabilité même aux valeurs de tension et/ou d'intensité supérieures à celles qui sont prévues dans les conditions normales de service.

Ceci a pour effet qu'un câble réalisé de la façon traditionnelle (c'est-à-dire sans frais de recherches supplémentaires) pour la tension maximum utilisable avec une structure de câble donnée, peut être utilisé pour le transport d'énergie électrique à un niveau supérieur. En variante, on peut utiliser un câble sous-dimensionné pour transmettre une puissance à des tensions données qui, autrement, requèreraient l'utilisation d'un câble possédant des prestations et un coût supérieurs.

Pour la simplicité de l'exposé, l'invention sera décrite ci-après à propos de certains cas spécifiques mais elle est applicable d'une façon générale à tous les câbles pour haute tension en courant continu qui possèdent un isolement non assisté par une pression ni de

gaz, ni de liquide.

Selon l'invention, une tension alternative possédant les caractéristiques indiquées plus haut est appliquée au câble en superposition à la tension continue de service à une station terminale par au moins une source possédant les caractéristiques appropriées tandis qu'à l'autre extrémité, il est prévu un dispositif compensateur (actif ou passif) capable de produire une tension de même amplitude, mais de sens inverse, que celle de la source, de manière à rendre nulle la somme des forces électromotrices alternatives dans la maille qui comprend le câble et les deux stations terminales. Il ressort de ce qui a été exposé ci-dessus que la tension continue peut également ne pas être la tension effective à laquelle le câble sera soumis en service et que les points d'application de la tension alternative peuvent se réduire aux simples extrémités du câble.

L'invention a pour objet un procédé pour alimenter de façon continue un câble électrique connecté entre deux stations terminales avec une tension continue à laquelle est superposée une tension alternative de basse fréquence qui possède une valeur de pic à pic inférieure à la valeur de la tension continue, caractérisé en ce qu'on engendre une telle tension alternative à l'une des stations terminales, en la compensant, à l'autre station terminale, par une tension alternative identique, de manière à rendre minime le courant circulant dans le câble qui est dû à la composante de tension alternative.

On entend par le terme "minime" une valeur de courant alternatif calculée pour ne pas gêner le fonctionnement régulier des appareils de commande mentionnés plus haut. Plus précisément et pour les installations connues actuellement, ce courant est considéré comme minime lorsqu'il est inférieur à 5 % de l'intensité continue circulant dans le câble.

L'invention consiste en outre en une installation pour alimenter de façon continue un câble électri-

que connnecté entre deux stations terminales, avec une tension continue à laquelle est superposée une tension alternative de basse fréquence et d'une valeur de pic à pic inférieure à la valeur de la tension continue, conformément au procédé exposé ci-dessus et caractérisée en ce qu'elle comprend au moins une source de tension alternative, à l'une des stations et, à l'autre station, au moins un dispositif compensateur aux bornes duquel on trouve une tension égale à ladite tension alternative.

Selon une forme préférée de réalisation de l'invention, la source et le dispositif compensateur sont réalisés en modulant dans le temps et de façon coordonnée la distribution des impulsions de commande des valves dans les stations de conversion.

Les figures du dessin annexé, donné uniquement à titre d'exemple non limitatif, feront bien comprendre comment l'invention peut être réalisée. Sur ce dessin,

la figure 1 est un schéma qui illustre la disposition générale d'une station de conversion connue ;

la figure 2 illustre schématiquement l'invention pour le cas d'une installation de transmission unipolaire ;

la figure 3 représente une station terminale d'une façon plus détaillée ;

la figure 4 illustre schématiquement une forme de réalisation de l'invention relative à une installation de transmission bipolaire ; et

la figure 9 illustre une variante de réalisation de l'invention, également pour une installation bipolaire.

La figure 1 montre d'une façon détaillée la disposition générale d'une station de conversion AC/DC (alternatif/continu) dans laquelle la tension alternative provenant d'un réseau électrique 10 (triphasé dans le cas représenté) est convertie en une tension continue et transmise le long du câble 1.

La ligne triphasée 10 comprend des filtres 12

et elle est connectée aux enroulements primaires d'un ou plusieurs transformateur(s), dont l'un est représenté sur la figure par la référence 13. Les enroulements secondaires sont connectés à des circuits redresseurs en ponts dont l'un est représenté sur la figure par la référence 23, et qui comprennent des valves à thyristors 32 dont la conduction est commandée par des électrodes 33 qui reçoivent les impulsions d'allumage et d'extinction en provenance d'un appareil de commande 18, qui comprend l'unité de commande 20 et l'unité de protection 19. L'appareil de commande reçoit des signaux 15 de tension et d'intensité provenant de la ligne à tension alternative et de la ligne à tension continue et il produit les impulsions 16 envoyées aux électrodes de commande des ponts. Ces derniers sont connectés en série entre eux (comme indiqué par la ligne en traits interrompus) et avec le câble 1. Sur la figure, on a en outre représenté une inductance de nivellement 2 et l'un des circuits amortisseurs 7 disposés en parallèle avec les différents thyristors. Les autres ponts connectés en série sont schématisés par une ligne interrompue qui se termine à la ligne d'électrode A.

A l'autre extrémité du câble, se trouve une station de conversion DC/AC dans laquelle la tension continue est convertie en une tension alternative et transmise à des stations de distribution et/ou d'autres stations de conversion pour la transmission à d'autres localités.

Outre qu'elle produit et distribue les impulsions de commande des valves, l'unité de commande assure également la régulation d'une installation afin que celle-ci fonctionne à des valeurs d'intensité et de tension désirées, en élaborant les signaux de rétro-action 15 liés aux paramètres des réseaux et en modifiant en même temps la temporisation.

La station de conversion DC/AC est sensiblement analogue, avec un fonctionnement inverse, qui reconsti-

tue la tension alternative grâce aux circuits en ponts connectés en onduleurs. D'autres détails de ces appareils se trouvent dans la littérature et, en particulier, on se reportera au texte "Direct Current Transmission", Vol. I, de Edward W. Kimbark, Wiley-Interscience, New-York 1971.

Sur les figures suivantes, et pour la simplicité du dessin, on a utilisé des schématisations d'usage courant qui peuvent facilement être rapportées à la disposition illustrée sur la figure 1, et on a utilisé les mêmes références numériques pour indiquer les éléments identiques ou correspondants.

La figure 2 représente schématiquement l'invention pour le cas d'une installation de transmission unipolaire, c'est-à-dire dans laquelle le retour est constitué par la mer ou éventuellement par la terre.

Un câble électrique 1 est connecté entre deux stations terminales 4 et 5, qui sont respectivement des stations de conversion AC/DC et DC/AC, à travers des inductances de nivellement 2 aux extrémités. Selon l'invention, dans l'une de ces stations, on injecte une tension alternative possédant des valeurs d'amplitude et de fréquence comprises entre les limites qui ont été indiquées plus haut et qui se superpose à la tension continue de service qui alimente le câble.

La production de cette tension alternative est assurée par une source schématisée par E1 sur la figure 2. Ainsi que ceci sera décrit plus clairement dans la suite, il n'est pas nécessaire que la source E1 soit un composant actif physiquement distinct contenu dans la station terminale.

Dans l'autre station terminale, il est prévu un dispositif compensateur schématisé sous la forme d'une source E2, qui est en mesure de présenter à ses bornes une tension égale à ladite tension alternative et en phase avec celle-ci. Les flèches respectivement associées aux deux sources indiquent les sens des tensions qui

sont opposées pour la circulation du courant. Dans ce cas également, la source E2 n'est pas nécessairement un composant distinct et/ou de type actif mais elle peut être réalisée en modifiant le fonctionnement de circuits existants, ou être réalisée à l'aide de composants passifs ajoutés à l'installation.

Avec les caractéristiques exposées ci-dessus, on observe que, dans la maille formée par le câble, les deux stations terminales et le retour (à travers la terre, la mer ou un autre conducteur spécialement prévu), il ne se produit sensiblement pas de circulation de courant due à la tension alternative superposée. En fait, la somme des forces électromotrices alternatives dans la maille est nulle.

En réalité, il apparaît dans le câble une composante relativement modérée de courant alternatif, en raison de la capacité répartie du câble (vers la mer ou vers le conducteur de retour), de petites différences de phases entre E1 et E2 et d'autres phénomènes mineurs.

Toutefois, ce courant est d'une valeur négligeable comparativement aux valeurs du courant continu qui circule dans le câble et l'invention se propose justement de rendre minime le courant alternatif circulant dans le câble.

A titre indicatif, on considèrera une installation de transmission à 100 kV en tension continue, dans laquelle circule un courant continu d'environ 1000 A et auquel on superpose selon l'invention une tension alternative d'une valeur de 5,5 kV au moyen d'une source et d'un dispositif compensateur placés respectivement dans les deux stations terminales. L'oscillation ou l'excursion du courant qui circule dans le câble est comprise entre $\pm$ 20 A, c'est-à-dire qu'elle est suffisamment réduite pour que le dispositif de commande puisse fonctionner correctement. En général et avec les dispositifs de commande utilisés actuellement, la composante de courant alternatif superposée est considérée comme rendue minime

lorsqu'elle est limitée à une bande d'amplitude inférieure à 5 % de la composante de courant continu qui circule dans le câble et, de préférence, inférieure à 4 %.

On obtient ainsi deux importants avantages.

Le premier consiste en ce qu'il ne se produit pas une dissipation de puissance appréciable, et ce fait, outre qu'il n'altère pas les caractéristiques de transmission du câble, implique que, pour maintenir le câble soumis à la tension alternative sur toute sa longueur, il n'est pas nécessaire de prévoir de grandes puissances.

Le second consiste en ce que ce courant n'influe pas sur la régularité du fonctionnement de la commande de la station de conversion. Cette commande est basée sur les valeurs d'intensité présentes dans le câble et elle n'est donc pas altérée de façon appréciable par la superposition du courant alternatif.

Selon une forme préférée de réalisation de l'invention, la tension alternative est injectée dans l'une des stations de conversion et superposée à la tension continue de service, par intervention directe sur la commande, comme on l'a représenté sur la figure 3, sur laquelle on a utilisé les mêmes références numériques que sur les figures précédentes pour indiquer les éléments correspondants.

La station terminale représentée sur la figure 3 comprend des ponts redresseurs 23, 24 qui sont connectés, d'un côté, au câble 1 à travers une réactance de nivellement 2 et, de l'autre côté, au réseau alternatif 10, à travers des transformateurs 13, 14. Ce réseau comprend également des dispositifs de filtrage 12. La station peut être celle assurant la conversion AC/DC ou la conversion DC/AC, selon le type de fonctionnement.

Les électrodes de commande 33, 34 des valves des ponts sont connectées aux sorties de l'unité de commande 20 qui engendre les impulsions d'allumage et d'extinction des valves. L'unité est déjà programmée pour

s'adapter aux situations de service prévisibles, surcharges, etc., grâce à un régulateur 21 qui reçoit des signaux provenant de capteurs de l'installation (capteurs de tension, d'intensité, etc.) représentés par le bloc 22, dans le but de modifier les instants et les durées des impulsions transmises aux valves.

Selon cette forme de réalisation de l'invention, on applique à l'unité 20 de production et de distribution des impulsions un signal modulant d'une fréquence comprise entre 1 et 50 Hz, de préférence entre 1 et 20 Hz, et qui est propre à faire varier périodiquement l'angle d'allumage des valves. Le signal modulant est engendré par un circuit modulateur 25 et appliqué à l'unité 20 à travers un noeud sommateur 55 La tension présente à la sortie des ponts comprend maintenant une composante alternative d'une fréquence égale à la fréquence du signal modulant et d'une amplitude comprise entre 0,5 % et 10 % de la tension continue.

La station représentée sur la figure 3 est de préférence la station de conversion DC/AC, du fait qu'il est plus facile de moduler l'angle d'allumage pour introduire la composante alternative dans la station d'arrivée et pour effectuer la compensation (en agissant sur l'angle d'allumage, ou en agissant selon d'autres modes qui seront décrits dans la suite) dans la station AC/DC.

Selon une autre forme de réalisation, la source de tension alternative est un générateur de tension à basse fréquence proprement dit. La figure 4 illustre le cas d'une installation de transmission bipolaire comprenant des câbles 41 et 51 connectés entre deux stations terminales 44 et 45 qui comprennent respectivement deux générateurs de tension alternative E1 et E2. La tension produite par lesdits générateurs de tension ou sources extérieures est maintenue identique en amplitude et en phase par la commande centrale grâce aux capteurs placés le long du réseau et à des signalisations de retour

(transmises au moyen de conducteurs spécialement prévus, ou encore le long des câbles eux-mêmes).

Egalement dans la réalisation de la figure 4, les générateurs de tension peuvent être remplacés par une modulation dans le dispositif de conversion, comme celle qui est représentée sur la figure 3, puisqu'en pratique, l'origine de la tension alternative superposée est sans importance.

L'interchangeabilité entre les moyens qui réalisent matériellement la source ou le dispositif compensateur provient du fait que ces moyens comprennent des composants actifs, c'est-à-dire en mesure de produire de l'énergie.

Une variante de réalisation pour le dispositif compensateur qui n'est pas interchangeable est représentée sur la figure 5 et comprend un circuit résonant parallèle formé par des inductances et capacités représentées schématiquement par les composants L et C, et qui est ajouté à l'une des stations terminales. La fréquence de résonance de ce circuit, qui constitue un réseau LC, est égale à celle de la tension alternative appliquée, de sorte qu'il présente une impédance très élevée pour cette tension, en atteignant ainsi le but qui consiste à produire une tension égale à celle qui est appliquée à l'autre borne.

Dans ce cas également, la source El peut être du type qui est obtenu en commandant la modulation angulaire des ponts, ou encore elle peut être un générateur proprement dit. Le circuit résonant peut être placé aussi bien à la station de conversion AC/DC qu'à la station de conversion DC/AC, la source correspondante se trouvant dans l'autre station terminale.

Du fait de sa nature "passive", le circuit oscillant ne peut pas être utilisé comme source de tension alternative mais uniquement comme dispositif compensateur.

La tension alternative est de préférence du ty-

pe sinusoïdal et d'une fréquence comprise entre 2 et 10 Hz, de manière à éviter les valeurs de fréquence typiques des transitoires électromécaniques (au-dessous de la limite inférieure) et de résonance sub-synchrone (au-dessus de la limite supérieure). On peut également admettre un certain degré de déphasage entre la source et le dispositif compensateur pourvu que la valeur du courant alternatif circulant puisse de toute façon être limitée à une valeur inférieure à 5 % de celle du courant continu circulant dans le câble.

Il va de soi que diverses modifications pourront être apportées par l'homme de l'art aux modes de réalisation qui viennent d'être décrits, notamment par substitution des moyens moyens techniques équivalents, sans pour celà sortir du cadre de l'invention.

REVENDICATIONS

1 - Procédé pour alimenter de façon continue un câble électrique connecté entre deux stations terminales avec une tension continue à laquelle est superposée une tension alternative de basse fréquence qui possède une valeur de pic à pic inférieure à la valeur de la tension continue, caractérisé en ce qu'on engendre une tension alternative de ce genre dans l'une des stations terminales, en la compensant, à l'autre station terminale, par une tension alternative identique, de manière à rendre minime le courant circulant dans le câble qui est dû à la composante de tension alternative.

2 - Installation pour alimenter de façon continue un câble électrique relié entre deux stations terminales, avec une tension continue à laquelle est superposée une tension alternative de basse fréquence et d'une valeur de pic à pic inférieure à la valeur de la tension continue, conformément au procédé de la revendication 1, caractérisée en ce qu'elle comprend au moins une source de tension alternative, à l'une (4 ; 44) des stations cependant qu'elle comprend, à l'autre station (5 ; 45) au moins un dispositif compensateur aux bornes duquel on trouve une tension égale à ladite tension alternative.

3 - Installation selon la revendication 2, caractérisée en ce que l'une (4 ; 44) desdites stations est une station de conversion AC/DC comprenant des circuits en ponts montés en redresseurs tandis que l'autre station (5 ; 45) est une station de conversion DC/AC comprenant des circuits en ponts montés en onduleurs, une unité de commande (20) étant prévue dans chacune des stations pour engendrer des impulsions correspondantes d'allumage et d'extinction des ponts.

4 - Installation selon la revendication 3, caractérisée en ce que ladite source est réalisée au moyen d'un modulateur connecté à l'unité de commande (20) de l'une des stations de conversion et qui module dans le

temps la répartition des impulsions de commande émises par ladite unité.

5 - Installation selon la revendication 3, caractérisée en ce que ladite source est prévue dans la station de conversion DC/AC.

6 - Installation selon la revendication 3, caractérisée en ce que ladite source est prévue dans la station de conversion AC/DC.

7 - Installation selon la revendication 3, caractérisée en ce que le dispositif compensateur est réalisé au moyen d'un modulateur connecté à l'unité de commande de l'une des stations de conversion, qui module dans le temps la répartition des impulsions de commande émises par ladite unité.

8 - Installation selon la revendication 7, caractérisée en ce que ledit dispositif compensateur est prévu dans la station de conversion DC/AC.

9 - Installation selon la revendication 7, caractérisée en ce que ledit dispositif compensateur est prévu dans la station de conversion AC/DC.

10 - Installation selon l'une des revendications 2 et 3, caractérisée en ce que ladite source de tension alternative est un générateur de tension.

11 - Installation selon l'une des revendications 2 et 3, caractérisée en ce que ledit dispositif de compensation est un générateur de tension.

12 - Installation selon l'une des revendications 2 et 3, caractérisée en ce que ledit dispositif de compensation est un réseau LC dont la fréquence de résonance est égale à la fréquence de ladite tension alternative.

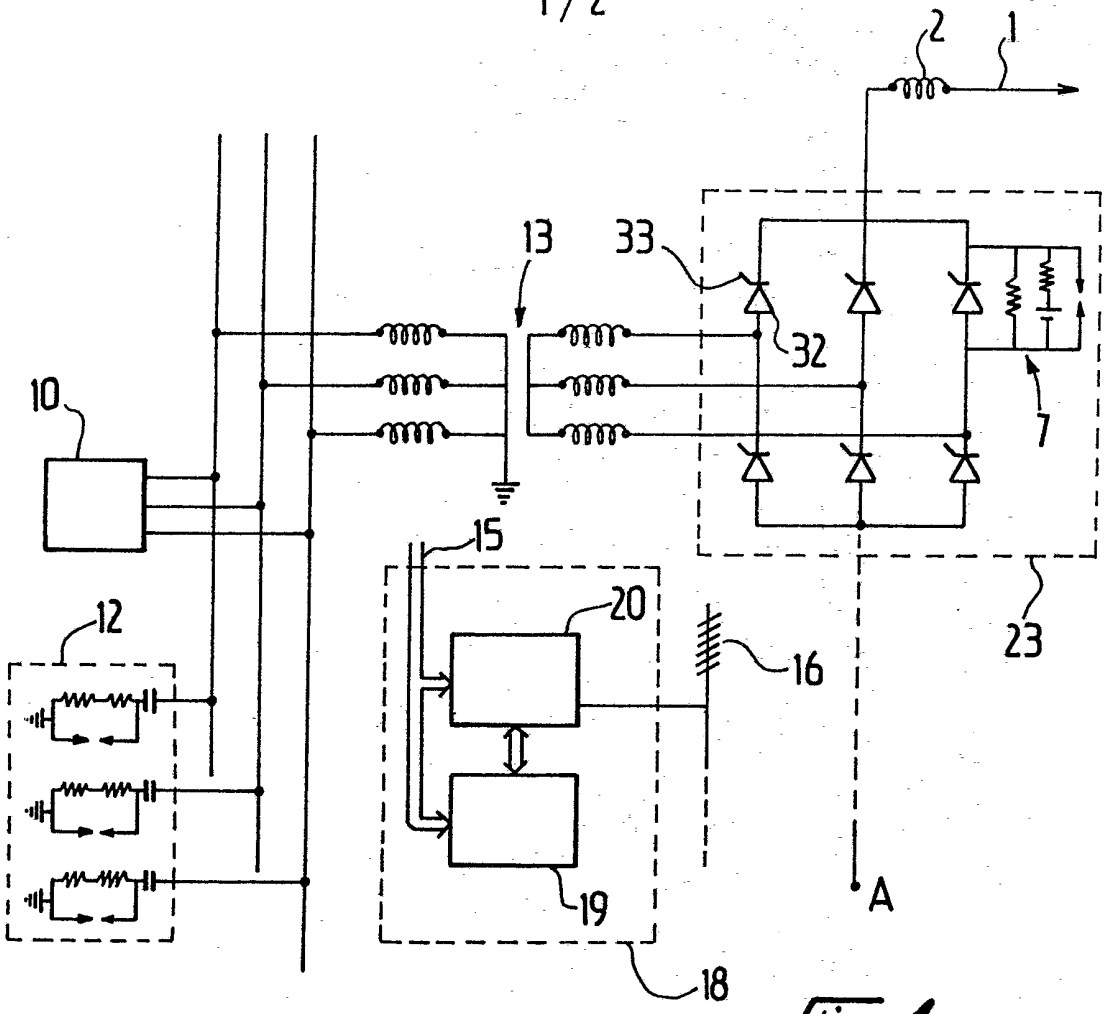


Fig. 1

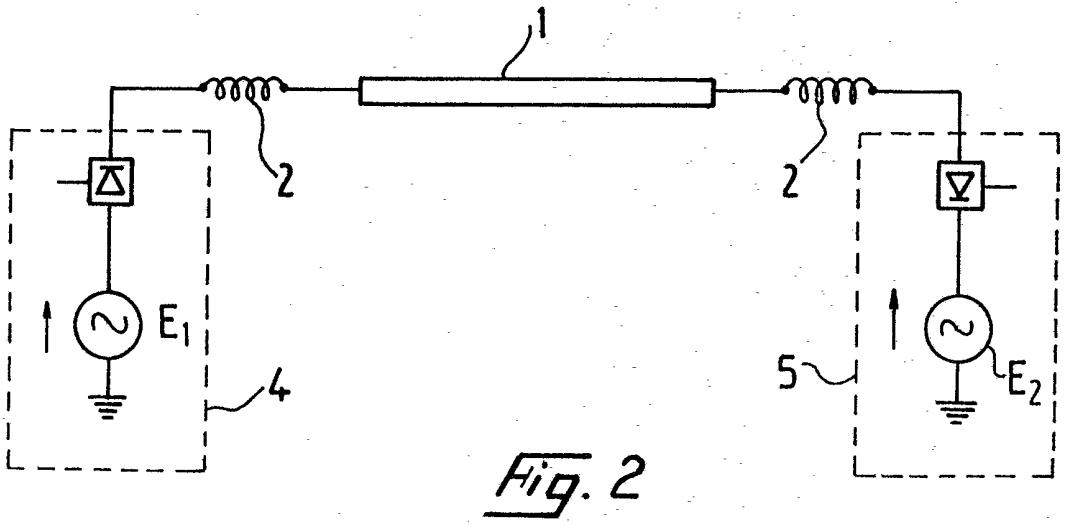


Fig. 2

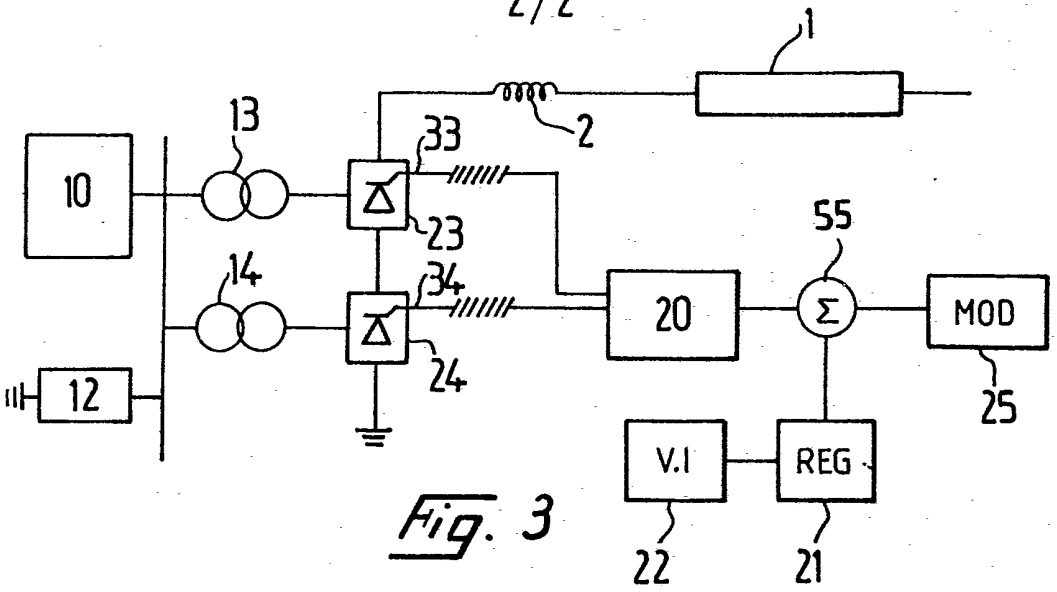


Fig. 3

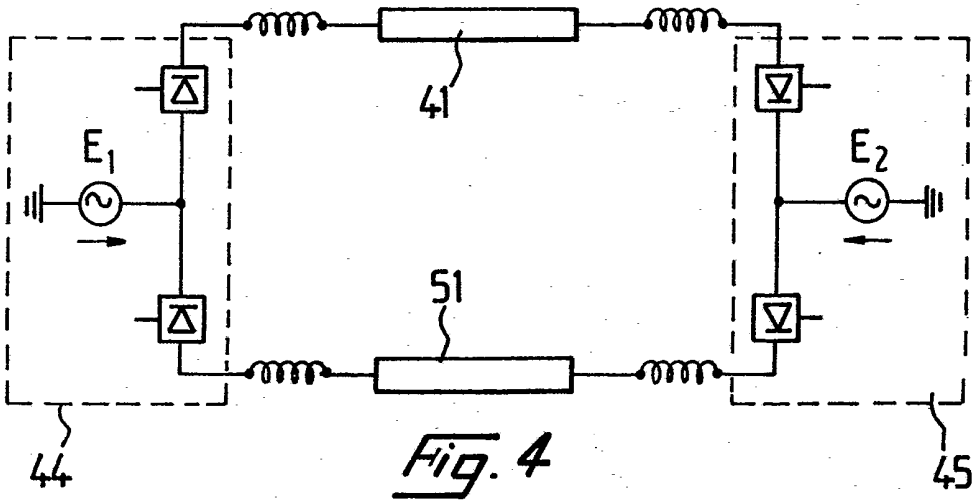


Fig. 4

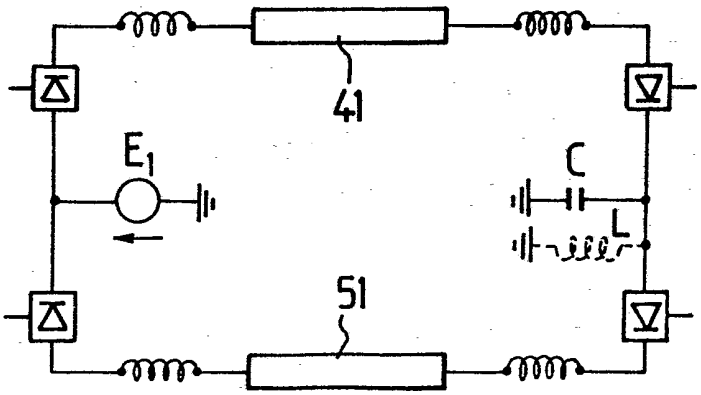


Fig. 5