

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 62 (1971)
Heft: 10

Artikel: Divers aspects des grosses alimentations à thyristors
Autor: Pahud, J.-D.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915821>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 14.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Divers aspects des grosses alimentations à thyristors ¹⁾

Par J.-D. Pahud, Meyrin

1. Introduction

Le but de cette conférence est double:

a) Montrer à l'aide de quelques exemples en quoi consistent les grosses alimentations à thyristors connectées au réseau. Nous parlerons rapidement de leurs éléments constitutifs, de leurs fonctions et de leurs possibilités, sans oublier de mentionner certaines de leurs difficultés essentielles, afin de donner une idée de cet important domaine parfois éloigné de nos préoccupations quotidiennes.

b) Mentionner au passage certains problèmes et sujets fondamentaux qui seront traités dans le cours d'électronique de puissance. Rappelons qu'il s'agit là d'un cours à option destiné aux étudiants-électriciens du 7^e semestre et aux ingénieurs diplômés désireux de mieux connaître ce domaine. Ce cours, bien que lié partiellement à la technologie actuelle, permettra d'aborder les lois fondamentales que l'on rencontre toujours lorsque l'on veut procéder à un découpage d'ondes de tension ou de courant, que ce soit dans le passé avec les commutateurs rotatifs à contact, puis avec les redresseurs à vapeur de mercure, actuellement avec des thyristors essentiellement, ou dans le futur avec des éléments nouveaux qui apparaîtront à leur tour.

2. Qu'est-ce qu'un thyristor?

Nous allons nous pencher sur les aspects actuels et commencer par situer le thyristor au sein de la grande famille des semi-conducteurs.

Très schématiquement nous pouvons dire qu'il existe, vu de l'extérieur, trois groupes fondamentaux d'éléments semi-conducteurs:

- a) les éléments à une jonction P-N
- b) les éléments à deux jonctions P-N-P ou N-P-N
- c) les éléments à trois jonctions P-N-P-N

Les circuits intégrés, et d'autres dispositifs spéciaux, ne représentent plus véritablement des éléments fondamentaux, mais plutôt des combinaisons des trois groupes de base.

Comme chacun le sait, une jonction représente une barrière de potentiel qui permet l'obtention de caractéristiques «Tension-Courant» non linéaires (ou résistances variables) que nous allons rappeler sur la fig. 1.

a) Un élément à jonction unique est une diode qui présente une résistance presque nulle pour une polarité de tension à ses bornes, et une résistance presque infinie pour la polarité inverse (jusqu'à la tension de claquage). Les deux seuls états possibles dépendent exclusivement du signe de la tension à ses bornes.

b) Les éléments à deux jonctions et 3 électrodes de liaison forment le groupe bien connu des transistors. Leurs caractéristiques représentent une famille de courbes fonction du courant de base, dont chaque point de fonctionnement peut être atteint de façon stable et autour duquel il peut travailler suivant n'importe quelle résistance différentielle. Le point moyen de fonctionnement provoque des pertes internes ($U_{CE} \cdot I_c$) beaucoup plus élevées que celles des diodes. Vu sous cet aspect, on peut tout de suite remarquer que le transistor n'a pratiquement pas d'utilité comme élément de modulation de grosses puissances, même en fonctionnement par tout ou rien.

c) Les éléments à trois jonctions et trois électrodes de liaison constituent le groupe des thyristors. La triple jonction permet d'obtenir une résistance presque infinie pour les deux signes de tension appliquée sur les électrodes extrêmes (anode et cathode). De plus il est possible de faire basculer le thyristor à l'état de conduction (résistance pratiquement nulle) en injectant un bref courant d'amorçage dans la troisième électrode, lorsque l'anode est positive par rapport à la cathode. Après son allumage, le thyristor restera conducteur jusqu'au moment où le courant qui le traverse s'annule, sous l'effet de conditions extérieures au thyristor lui-même. Ainsi, il est essentiel de remarquer que les pertes à l'intérieur de cet élément restent toujours relative-

ment faibles (résistance environ nulle ou infinie), tout en permettant le contrôle de puissances considérables que l'on peut moduler par un choix judicieux de l'instant d'allumage et qui peut se répéter à chaque cycle de la tension alternative à laquelle il est

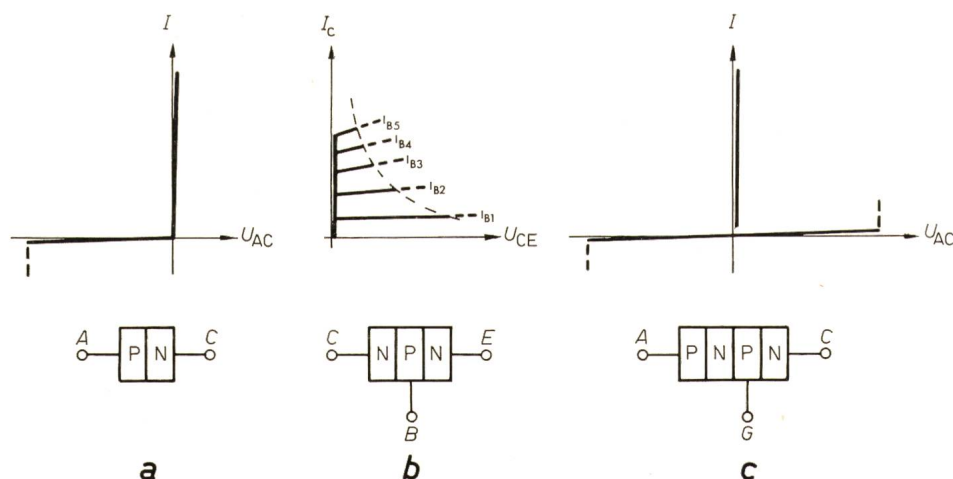


Fig. 1
Caractéristiques éléments à 1, 2 et 3 jonctions

a diode
b transistor
c thyristor
A anode; B base; C cathode, collecteur;
E émetteur; G gâchette; I courant;
 I_c courant collecteur; U_{AC} tension anode-cathode; U_{CE} tension collecteur-émetteur

réseau d'alimentation

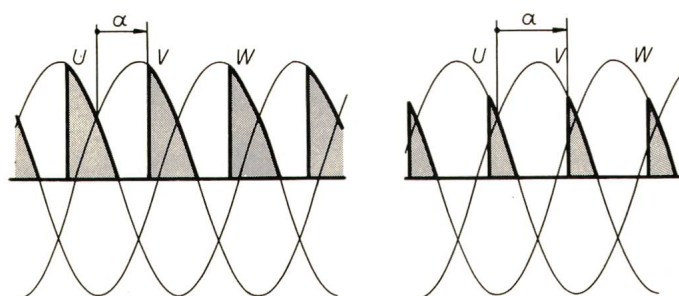
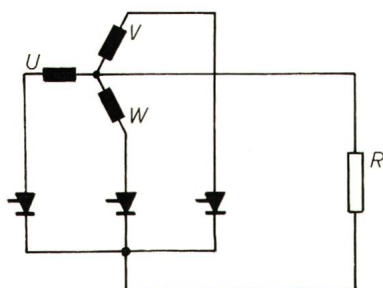


Fig. 2

Pont triphasé en étoile

Tension sur R pour différents α
 U, V, W : tensions secondaires simples

raccordé par exemple, comme nous allons le voir par la suite.

Nous ne parlerons pas ici des phénomènes transitoires d'enclenchement et de déclenchement, qui ne sont pas essentiels aux fréquences industrielles, mais qui occasionnent une limite d'utilisation rapidement atteinte lorsque la fréquence de commutation augmente. Ces points seront traités en détail dans le cours.

3. Performances actuelles des thyristors industriels

Disons d'emblée que les progrès accomplis actuellement ne connaissent plus la rapidité rencontrée il y a quelques années. Au fur et à mesure que l'on acquiert une meilleure connaissance des paramètres influençant la technologie interne de la pastille, l'on se rapproche de leur combinaison optimale. Ainsi, par exemple, le diamètre des pastilles est allé grandissant, permettant le passage de courants toujours plus élevés, mais entraînant les difficultés suivantes: synchronisme de l'allumage des différentes régions de la pastille, pouvant amener des surcharges locales momentanées excessives, difficulté de réaliser les connexions de sortie, difficulté d'évacuer la chaleur dégagée à l'intérieur de la pastille, etc. Si donc il paraît difficile de fabriquer des cellules à intensité toujours plus élevée, on peut alors chercher à augmenter les tensions de blocage. Ceci se fait, mais entraîne malheureusement, avec nos connaissances actuelles, une augmentation de la résistance dans l'état conducteur, qui oblige à réduire le courant de façon à ne pas augmenter les pertes directes. On pourrait aussi mentionner la difficulté grandissante qu'il y a à créer les fusibles de protection à très

grosse intensité représentant une capacité thermique voisine de celle du thyristor.

Les performances actuelles des thyristors industriels sont les suivantes:

Tension maximum de blocage: environ 2000 V.

Courant moyen permanent, pour une onde de courant rectangulaire d'une longueur de 120° électriques (50 Hz) et thyristor refroidi à l'eau, par ses deux faces: 500 à 600 A.

Surface maximum des pastilles: 800 à 1000 mm².

Ce sont là les valeurs obtenables actuellement auprès des grandes firmes mondiales et réalisées industriellement avec un pourcentage de réussite vraisemblablement suffisant. Ainsi, avec six thyristors de ce type couplés en pont triphasé Graetz, on peut obtenir une puissance permanente maximum d'environ:

$$P_{\max} = 1000 \text{ kW (1400 A, sous 720 V)}$$

en prenant les coefficients de sécurité suivants:

Sécurité en tension : 2,5

Sécurité en courant : 1,2

Quelle est la puissance nécessaire pour le contrôle d'un tel pont? On peut rapidement l'estimer comme suit:

Pour chaque thyristor, le courant d'allumage est de l'ordre de 1 A sous 10 V, pendant une durée de 100 μs. Il est injecté une fois par période au moins. Ainsi, la puissance moyenne calculée sur une période de 20 ms devient, pour le pont complet

$$P_{\text{allumage}} = \frac{6 \cdot 1 \text{ A} \cdot 10 \text{ V} \cdot 0,1 \text{ ms}}{20 \text{ ms}} = 0,3 \text{ W}$$

Dans ce cas, le rapport des puissances est de l'ordre de 3 millions! On comprend aisément qu'il est possible de contrôler une telle puissance à partir de quelques transistors ou circuits intégrés.

Si, comme nous l'avons vu précédemment, les cellules elles-mêmes n'offrent plus de progression notable dans leurs performances, il faut relever par contre que la mise au point des techniques de couplages de cellules et de ponts, en série ou en parallèle, est en plein essor. Les progrès réalisés dans cette direction permettent en effet d'utiliser les caractéristiques des cellules pratiquement sans facteur de réduction supplémentaire. La maîtrise grandissante de ces couplages ne permet pas d'apercevoir la limite d'évolution; c'est peut-être pour cette raison que le développement ardu des cellules est moins justifié, donc ralenti actuellement. Toute la gamme des puissances demandées par les utilisateurs est couverte, même si parfois un nombre élevé d'éléments est requis, ce qui peut altérer la fiabilité globale d'une alimentation.

4. Ponts triphasés

Nous allons maintenant examiner le fonctionnement et les caractéristiques d'un couplage triphasé simple. La fig. 2 représente un pont triphasé composé de 3 thyristors couplés en étoile contre le point neutre du secondaire d'un transformateur. Ce genre de pont n'est pas utilisé sous cette forme dans les alimentations de puissance, mais cette première présentation est là pour faciliter la compréhension.

Par définition, le moment d'allumage d'un thyristor est compté en angle électrique, en prenant comme origine le point de croisement positif de deux ondes de tension consécutives. Cela correspond à la pleine ouverture des thyristors, c'est-à-dire au maximum de tension redressée. (Ce maximum est aussi

la tension que l'on obtiendrait avec 3 diodes à la place des 3 thyristors). Dans le cas d'un régime non perturbé, l'angle d'allumage α est le même pour chaque phase. Il obéit aux ordres donnés sur l'électrode de commande. L'angle d'extinction ne peut malheureusement pas s'exprimer de façon aussi simple. Nous avons rappelé au début qu'un thyristor s'éteint lorsque son courant s'annule. Si la charge est constituée par une résistance pure, le courant s'annule lorsque la tension anode-cathode du thyristor s'annule, ce qui représente ici déjà deux cas possibles :

a) α compris entre 30° et 150° : le courant s'annule lorsque la tension simple passe par zéro ($\alpha = 150^\circ$).

b) α compris entre 0° et 30° : le courant s'annule lorsque la tension anode-cathode change de signe, ce qui correspond à l'instant d'allumage du thyristor suivant, la tension simple n'ayant pas encore atteint zéro.

Le caractère de la charge d'une alimentation de puissance n'est jamais purement ohmique, mais présente une constante de temps au moins, le plus souvent selfique (elle peut parfois provenir exclusivement de l'inductivité des câbles de raccordement, comme c'est le cas typique dans l'électrolyse). Cette inductivité de la charge va provoquer un lissage plus ou moins bon du courant continu et créer une nouvelle source de tension dans le circuit transformateur-thyristor-charge, qui va permettre au courant de circuler au-delà des angles mentionnés ci-dessus comme le montre la fig. 3. Dans ce cas il ne reste plus qu'un seul moyen d'annuler le courant dans le thyristor, c'est de provoquer l'allumage du thyristor suivant. Si l'on a trois sources de tension parfaites au secondaire du transformateur, seul alors le thyristor dont la tension d'anode est plus positive

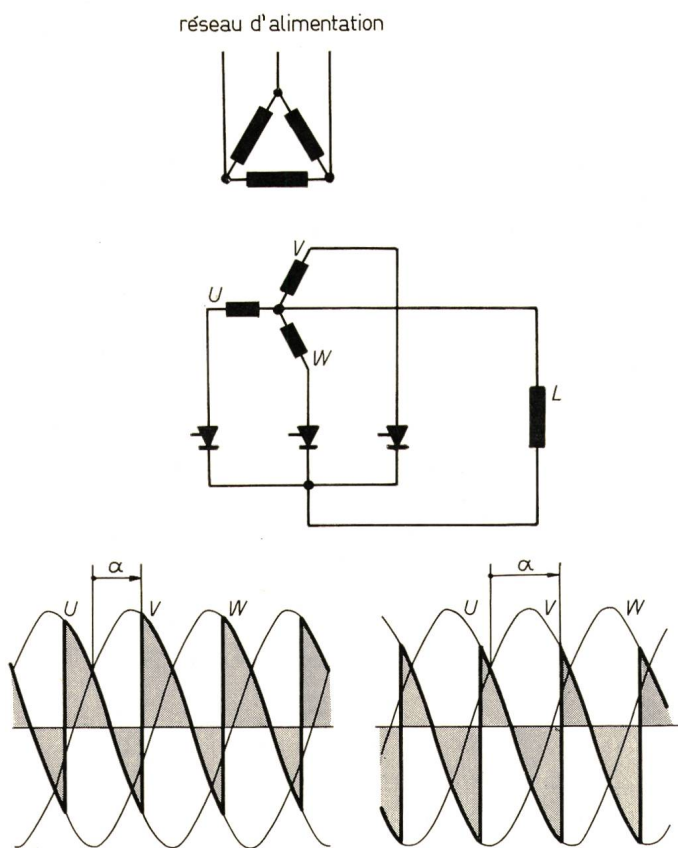


Fig. 3
Pont triphasé en étoile
Tension sur L pour différents α
Autres descriptions voir fig. 2

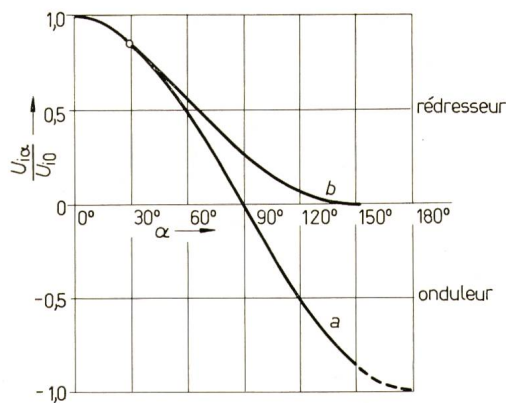


Fig. 4
Caractéristiques de tension d'un pont triphasé
a sur charge inductive
b sur charge résistive

$U_{i\alpha}$ tension continue idéale, fonction de α ; U_{i0} tension continue idéale maximum ($\alpha = 0^\circ$); α angle d'allumage

que celui qui conduit encore le courant peut être allumé; juste après cet allumage, le thyristor qui conduisait se voit alors soumis à une tension inverse qui le bloque. On peut remarquer en passant que si l'on oublie d'allumer le thyristor suivant, celui qui était conducteur va le rester jusqu'à disparition de l'énergie emmagasinée dans le circuit de charge. Ceci peut entraîner de graves surcharges ou détériorations. Il est donc essentiel de générer des impulsions de commande très fiables, avec un respect particulier des angles d'excursion limite (α min et α max).

La tension moyenne obtenue à la sortie du pont, en fonction de l'angle de commande peut s'exprimer comme suit, maintenant que nous avons vu l'allure des tensions instantanées. Il s'agit de calculer l'intégrale de tension divisée par la période d'intégration. Nous pouvons juste mentionner ici les résultats pour les deux cas de charge présentés :

$$\text{Charge ohmique: } \begin{cases} \text{de } 0^\circ \text{ à } 30^\circ : U_{i\alpha} = U_{i0} \cos \alpha \\ \text{de } 30^\circ \text{ à } 150^\circ : \\ U_{i\alpha} = U_{i0} \frac{1}{\sqrt{3}} [1 + \cos (\alpha + 30^\circ)] \end{cases}$$

$$\text{Charge inductive: } U_{i\alpha} = U_{i0} \cos \alpha$$

où U_{i0} représente la tension maximum de sortie à $\alpha = 0^\circ$, à courant nul, et $U_{i\alpha}$ la tension moyenne pour l'angle d'allumage α , toujours à courant nul. Les deux caractéristiques correspondantes sont représentées sur la fig. 4.

Remarquons encore qu'il est impossible de tester la caractéristique d'une grosse alimentation sur une simple résistance. Ceci a déjà surpris plus d'une personne qui mesure par exemple des dizaines d'ampères sur une charge test fictive, à $\alpha = 90^\circ$ et qui découvre un courant absolument nul sur la charge réelle (inductive), pour le même angle de commande α .

Il est intéressant d'examiner maintenant non plus seulement la tension, mais aussi l'onde de courant du côté alternatif, en fonction de l'angle de commande. Pour simplifier, nous allons supposer que le courant continu reste parfaitement constant, indépendamment de l'angle d'allumage (c'est le cas avec une charge à grande constante de temps).

Comme le pont triphasé présente 3 chemins exclusifs pour le courant, chaque thyristor va conduire le courant pendant un

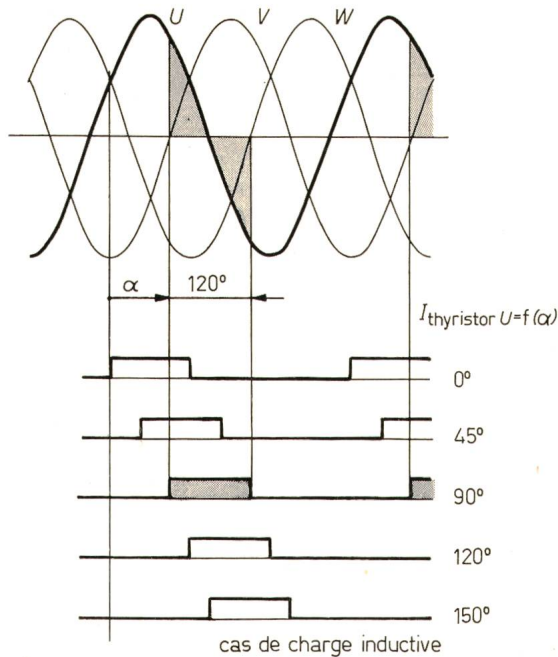


Fig. 5

Courant d'un thyristor et puissance réactive en fonction de α

I_d courant continu; Q puissance réactive; U_{i0} tension continue idéale maximum; I thyristor $U =$ courant traversant le thyristor connecté à la tension U

tiers de période, c'est-à-dire 120° électriques. La fig. 5 représente l'onde de courant d'une phase, pour différents angles d'allumage du système triphasé. Le maximum de l'harmonique fondamentale de cette onde rectangulaire est situé au milieu du rectangle. Ainsi pour $\alpha = 0^\circ$, l'onde fondamentale de courant est en phase avec la tension correspondante. La puissance demandée au réseau par le pont de thyristors est purement active. Pour $\alpha = 90^\circ$, l'onde de courant est en retard de 90° sur l'onde de tension. On peut par ailleurs remarquer que la tension est positive pendant la première moitié du temps de conduction et négative pendant la seconde moitié. Cela représente un échange de puissance purement réactif entre le réseau et le dispositif à thyristors. Enfin, pour $\alpha = 150^\circ$ (angle limite approximatif pour tenir compte des phénomènes d'empiètement), la puissance correspondante est à nouveau essentiellement active, mais son signe a changé: le réseau absorbe alors la puissance délivrée par le pont et sa «charge». C'est la marche en onduleur, par opposition à la marche en redresseur. Vu que le courant continu circule toujours dans le même sens, il est essentiel pour le fonctionnement en onduleur que la tension sur la «charge» s'inverse; c'est la seule façon de pouvoir provoquer un déphasage de l'onde de courant supérieur à 90° .

Il faut donc bien saisir que la puissance apparente passant à travers un pont de thyristors est constante, pour une marche à courant constant. Il est ainsi possible de tracer le cercle de la fig. 5, qui représente l'extrémité du vecteur «puissance ap-

parente» du pont, dont les deux composantes sont la puissance active (ou la tension $U_{i\alpha}$, à courant constant) et la puissance réactive.

Dès que l'on a affaire à des installations de puissance, cet aspect de contrôle par déphasage de la puissance devient très important pour la raison suivante: les chutes de tension usuellement provoquées en bout de ligne sont beaucoup plus importantes dans le cas d'un courant réactif que dans le cas d'un courant actif. Ceci provient tout simplement du fait que la réactance $X = \omega L$ d'une ligne courte est habituellement beaucoup plus élevée que sa résistance. Il en est de même dans les transformateurs. Les diagrammes vectoriels de la fig. 6 rappellent cette notion fondamentale, valable dans le cas d'une ligne courte, ce qui est le cas le plus fréquent. Les vecteurs ont une longueur volontairement exagérée sur cette figure. En première approximation on pourrait dire qu'un courant actif provoque une chute de tension proportionnelle à la résistance

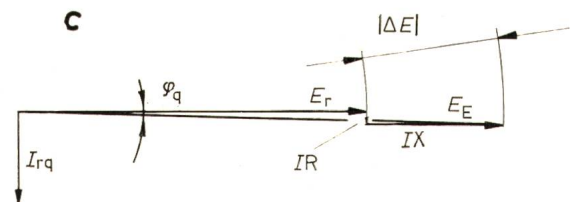
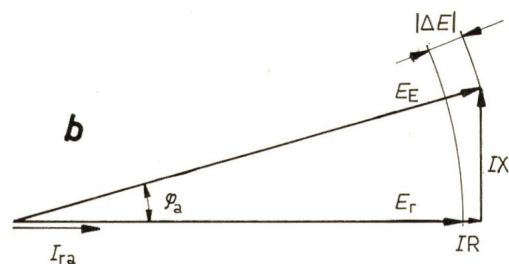
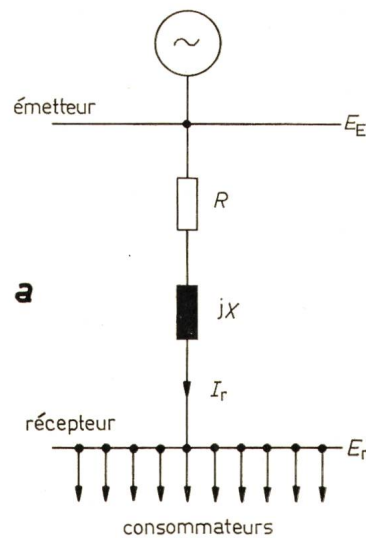


Fig. 6

Diagramme vectoriel de tension pour une ligne courte

a réseau d'alimentation (ligne courte)

b diagramme vectoriel pour courant actif I_{ra}

c diagramme vectoriel pour courant réactif I_{rq}

E_E tension de l'émetteur; E_R tension du récepteur; I_r courant du récepteur; φ_a déphasage entre tension émetteur et récepteur (courant actif); φ_q déphasage entre tension émetteur et récepteur (courant réactif)
 $IR + jIX$ chute de tension en ligne

de la ligne, et un courant réactif une chute proportionnelle à la réactance (inductive) de la ligne et des transformateurs. On obtient facilement des rapports de chute, pour une même intensité de courant de 1 à 5, voire de 1 à 10. Avant de projeter l'utilisation de ponts de grosse puissance il est donc essentiel de connaître si d'autres consommateurs peuvent être perturbés de façon insupportable par les variations de tension relativement importantes qu'un tel dispositif peut engendrer, suivant son mode de fonctionnement. Certains couplages et certaines façons de contrôler un ensemble de plusieurs ponts permettent de réduire partiellement cet inconvénient.

Il faut aussi mentionner qu'une telle alimentation représente un générateur de courants harmoniques. Les harmoniques de bas rang peuvent cependant être réduites assez facilement en utilisant des systèmes à nombre de phases plus élevé (6, 12 ou 24) et en choisissant judicieusement les couplages primaires-secondaires des transformateurs, afin de reconstruire, à partir de rectangles élémentaires de courant, une onde primaire se rapprochant de la sinusoïde. En cas de figinage plus poussé, il est aussi possible de mettre des circuits résonnants court-circuitant sur place ces harmoniques de courant, ce qui représente un problème plus délicat à bien étudier, vu qu'il faut connaître les données précises du réseau environnant et les différentes constellations possibles des lignes d'alimentation.

La fig. 7 montre des schémas de ponts utilisés très fréquemment. Il s'agit d'abord du pont Graetz triphasé, qui représente en quelque sorte la superposition de deux ponts triphasés en étoile, branchés en sens inverse. Ce type de pont est réellement à la base de toutes les combinaisons plus complexes. L'onde de courant dans chaque thyristor est toujours de 120° , comme dans le couplage étoile, mais la différence de principe essentielle réside dans le fait que le courant de sortie du transformateur est maintenant alternatif. Dans le cas du couplage en étoile à trois thyristors, le transformateur aurait dû laisser passer une composante continue du courant, ce qui n'est physiquement pas possible et se traduit par des phénomènes de saturation et de surintensité primaire.

5. Ponts polyphasés

Un exemple de pont dodécaphasé est représenté sur le bas de la fig. 7. Nous voyons là deux ponts Graetz triphasés alimentés par deux systèmes triphasés décalés de 30° entre eux. Comme les tensions instantanées des deux ponts ne sont pas égales, il faut découpler les deux ponts, normalement par deux selfs, avant de les relier en parallèle. Si cependant l'on est sûr que les tensions moyennes des deux ponts sont égales, il est possible de réaliser une solution plus économique en couplant magnétiquement ces 2 inductivités, ce qui donne une seule bobine avec un point milieu: un telle bobine est alors appelée «bobine d'absorption». Son dimensionnement correct est très délicat, car il doit permettre une marche en régime transitoire (tensions des deux ponts passagèrement inégales) sans entraîner la saturation des tôles. Si, par contre, les 2 tensions moyennes peuvent rester différentes, cette bobine d'absorption va se saturer et ne plus fonctionner correctement.

Disons également qu'il est parfois très difficile de réaliser des ensembles de ponts fonctionnant réellement à 12 ou 24 phases, car cela fait appel à une symétrie parfaite de tous les composants (tensions à vide des transformateurs, tensions de court-circuit, régularité des impulsions des commandes de

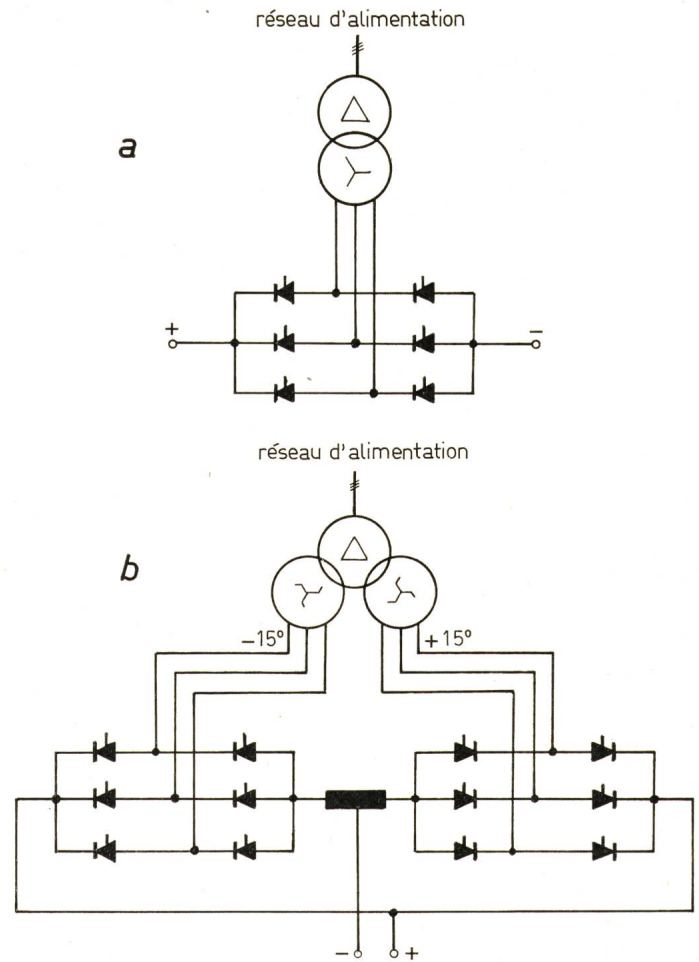


Fig. 7

Exemples de ponts usuels

a) pont Graetz

b) pont dodécaphasé avec bobine d'absorption

portes, etc.), et demande aussi bien entendu une symétrie presque parfaite du réseau triphasé d'alimentation qu'il sera peut-être possible d'obtenir en ayant un propre alternateur d'alimentation, mais que l'on ne rencontrera pas normalement sur les réseaux industriels. Les couplages à 48 phases et plus ressortent du domaine de la science fiction.

Le fait d'augmenter le nombre de phases (jusqu'à une valeur sensée) permet théoriquement d'obtenir les résultats suivants:

- a) meilleure forme de l'onde de courant du réseau;
- b) augmentation de la fréquence d'ondulation de la tension de sortie;
- c) diminution de l'amplitude des ondulations de la tension de sortie;
- d) diminution du temps de réponse du système (échantillonnage plus fréquent).

Les points b) et c) sont particulièrement attractifs si l'on désire un courant continu bien lissé. Malheureusement, dans la pratique, malgré les meilleurs soins apportés à la réalisation, il apparaît généralement des phénomènes perturbateurs se traduisant par des sous-harmoniques (par exemple du 100 Hz dans un système dodécaphasé générant en principe 600 Hz comme fréquence de base) qui limitent en définitive l'intérêt des couplages à grand nombre de phases.

La fig. 8 montre un oscillogramme du courant «réseau» dans le cas d'un pont dodécaphasé. Nous pouvons remarquer que sa forme n'est pas trop éloignée d'une sinusoïde. Sur cette photo, nous voyons apparaître un autre phénomène, dont nous

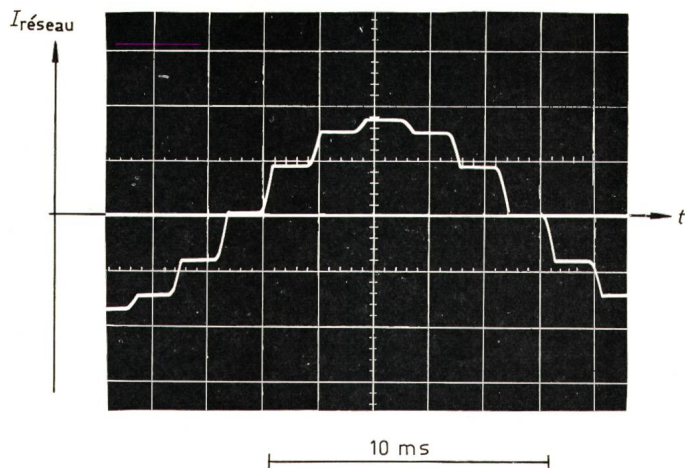


Fig. 8
Courant «réseau» d'un pont dodecaphasé ($\alpha \approx 0^\circ$)
 $I_{\text{réseau}}$ courant du réseau; t temps

nous bornerons à signaler l'existence aujourd'hui: le passage du courant d'un thyristor dans le suivant, lors de l'allumage, n'est pas instantané; l'inductivité de fuite du transformateur additionnée à celle du réseau s'oppose en effet à tout changement brusque du courant. Ainsi il y a un moment où deux thyristors conduisent simultanément: le courant décroît progressivement dans celui qui conduit, et croît dans celui qui vient d'être allumé, alors que la somme des 2 courants est toujours égale au courant dans la charge. Ceci explique pourquoi le courant de cette photo n'est pas la résultante d'ondes rectangulaires, mais plutôt d'ondes à peu près trapézoïdales (en réalité, les côtés verticaux des rectangles sont devenus des portions de sinusoïdes). Il s'agit là du phénomène d'empiétement qui correspond au court-circuitage d'un enroulement pendant le «basculement» du courant d'un thyristor à l'autre. Ce point est fondamental dans le fonctionnement des ponts et il sera étudié en détail dans le cours. Bien que se produisant de façon différente, il peut être rapproché de la commutation des machines à courant continu, où le balai court-circuite une partie de l'enroulement d'induit pendant que le courant change de signe.

6. Quelques exemples d'utilisation des ponts de thyristors

Nous avons jusqu'à maintenant regardé comment fonctionne un pont, mais il est temps d'examiner à quelles fins on peut l'utiliser.

Les champs d'application sont très nombreux et variés. Les ponts Graetz triphasés et ses dérivés, seront utiles chaque fois que l'on désire une tension ou un courant continu dont la valeur doit être contrôlée de façon simple, rapide ou précise.

Le domaine le plus connu peut-être est celui de l'alimentation industrielle des moteurs à courant continu à excitation séparée. La constante de temps électrique d'un induit de gros moteur est de quelques dizaines de millisecondes, ce qui autorise un changement aussi rapide du courant, donc du couple, qui pourra être utilisé à des fins diverses: par exemple maintien de la vitesse de rotation du moteur, quel que soit le couple demandé, pour autant qu'il ne change pas de signe. (Les couplages antiparallèles permettent l'inversion du couple.) Les très grandes puissances se rencontrent dans les laminoirs où la puissance de pointe de certains moteurs atteint 20 MW. Les machines à papier, les imprimeries nécessitent (à des puissances

moindres) de telles alimentations qui permettent un contrôle individuel de chaque section de la machine. Des boucles de réglage analogique ou numérique permettent d'obtenir un ajustage très fin des efforts de traction sur le papier. Ceci offre aussi l'avantage énorme de pouvoir assurer un bon synchronisme durant les phases d'accélération et de décélération, vu la rapidité de variation possible du couple moteur de chaque entraînement individuel. Ceci est très important si l'on songe aux grandes différences que peuvent présenter les moments d'inertie de différents types de cylindres. Mentionnons aussi toutes les alimentations de moteurs pour funiculaires et téléphériques dont le nombre et la puissance grandit d'année en année.

Il y a le domaine de l'électrolyse où les courants demandés sont très élevés (des dizaines de milliers d'ampères). D'autres domaines voisins sont ceux de l'usinage par électro-érosion et les fours électriques à arc. Dans ces trois cas, on peut être amené à une solution plus économique consistant à créer un pont triphasé antiparallèle au primaire du transformateur (tension et courant convenables), alors que le secondaire du transformateur (basse tension et haut courant) est relié à un pont de diodes simples.

Il y a aussi les alimentations de centraux téléphoniques dont les exigences au point de vue du filtrage sont très poussées.

Les chemins de fer de montagne nécessitent également des alimentations à thyristors, car il est souvent indispensable et économique de restituer l'énergie au réseau pendant la marche en descente, si aucune autre charge sur la ligne ne vient la consommer. (Un pont de diodes ne permettrait pas le freinage par récupération.)

Ces ponts servent encore à la création des champs magnétiques intenses et précis qui représentent l'outil de base pour la recherche en physique subnucléaire. Il en est de même dans le domaine des plasmas où les champs magnétiques nécessaires pour essayer d'obtenir un plasma stable sont très élevés (plusieurs dizaines de kGauss).

Il faut mentionner aussi les ponts monophasés à double alternance que l'on rencontre dans les locomotives, parfois difficiles à réaliser, vu les impédances de ligne élevées et variables.

Il y a tout un domaine, peu connu en Suisse, mais qui s'introduit progressivement pour le transport d'énergie à grande distance: c'est le transport à courant continu à très haute tension, où seules les pertes ohmiques subsistent. Il y a un pont de thyristors travaillant en redresseur à la station émettrice et un pont de thyristors travaillant en onduleur à la station réceptrice. (Un projet est en cours pour une tension continue de l'ordre de 700 kV!) Il est probable même qu'un jour les pertes ohmiques deviendront nulles grâce à l'utilisation des supraconducteurs, lorsque la création des grands froids sera plus économique.

On peut aussi utiliser les thyristors comme interrupteurs «tout ou rien» pour enclencher une charge alternative (self, condensateur, par exemple) ou changer statiquement le gradin d'un transformateur à prises. Ce sont là des applications des thyristors proprement dits, plutôt que des ponts.

Il y a enfin tout le domaine de la commutation forcée, où les thyristors ne sont plus reliés à la tension alternative du réseau, mais doivent moduler eux-mêmes, à partir d'une tension continue, la tension alternative désirée. Tout ce sujet fera l'objet de la 3^e conférence de ce cycle.

7. Exemple particulier: l'alimentation du nouvel injecteur du CERN

Il est nécessaire de créer un champ magnétique pulsé destiné à maintenir les protons sur leur trajectoire durant leur accélération. Pour cela, il faut fournir aux aimants le courant continu pulsé représenté sur le haut de la fig. 9, sous une tension continue totale dessinée sur le bas de cette même figure. La puissance continue maximum est de l'ordre de 7 MW et le temps de répétition minimum d'un cycle légèrement supérieur à 1 s.

Si l'on ne prend pas de précautions spéciales, les perturbations provoquées par cette alimentation, sur le réseau interne CERN, vont le rendre inutilisable pour certains appareils sensibles branchés sur le même réseau interne. C'est pourquoi nous avons élaboré la solution représentée sur la fig. 10, que nous allons décrire brièvement.

L'ensemble des aimants est alimenté par 3 groupes dodéphasés de thyristors, identiques, branchés en série. On ne réglera la tension qu'au moyen d'un seul groupe à la fois, les autres étant soit saturés à pleine tension, soit bloqués à tension nulle, avec une voie de passage parallèle ouverte au courant.

Ce mode de commande avec ouverture successive des groupes réduit au minimum la consommation de puissance réactive. Nous procédons ensuite à la création, avec le groupe 4 (identique aux 3 autres) qui débite sur une bobine, d'une puissance réactive telle que la consommation totale de puissance réactive des 4 groupes reste constante.

Cette puissance constante sera enfin ramenée à zéro par un banc de condensateurs de compensation. Ces condensateurs vont aussi faire partie du circuit résonnant de filtrage pour les harmoniques de bas rang (à partir de l'harmonique 5).

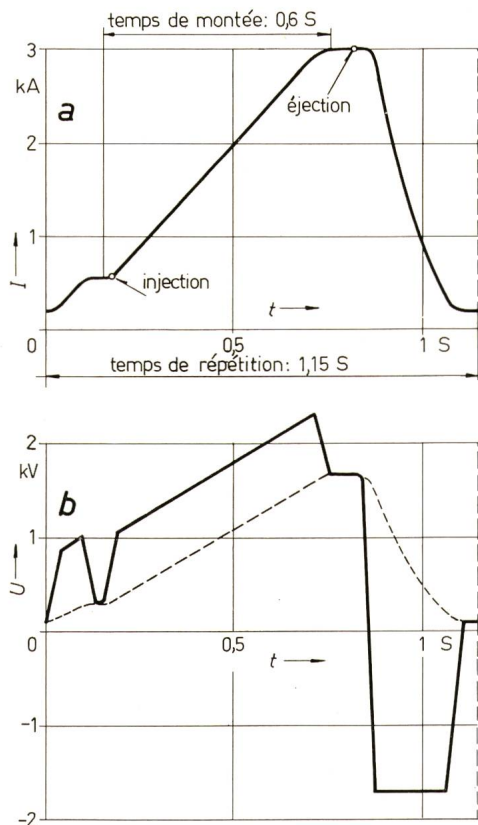


Fig. 9

Injecteur Cern: cycle de tension (a) et de courant (b)

I courant des aimants; U tension des aimants; t temps

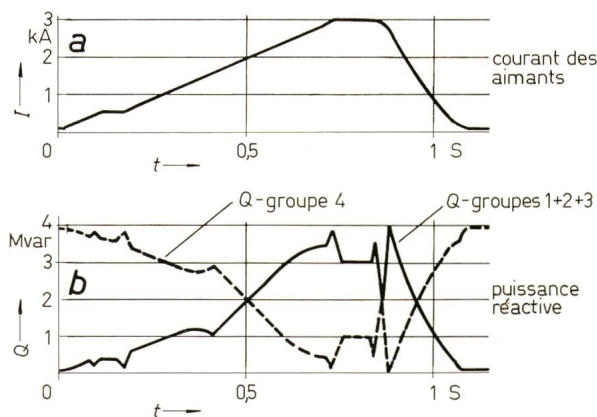
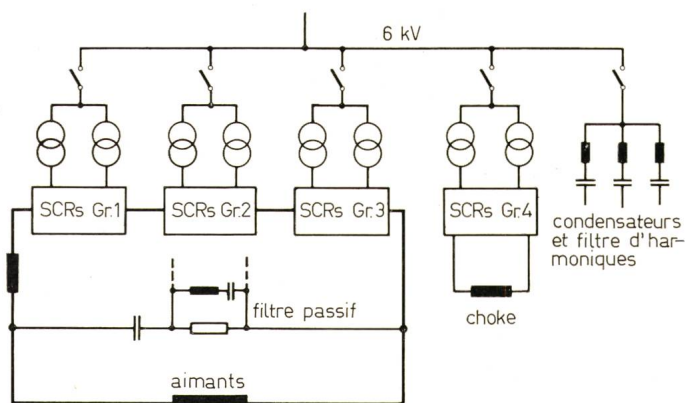


Fig. 10

Injecteur Cern: cycle de courant (a) et de puissance réactive (b)

Descriptions voir fig. 9

Ainsi, nous avons respecté les 2 conditions essentielles suivantes, pour ne pas perturber les autres utilisateurs:

- Maintien des variations cycliques de tension du réseau interne au-dessous du niveau admissible;
- Court-circuitage local des harmoniques de courant engendrées par les thyristors.

8. Conclusions

Nous avons ainsi fait un très rapide tour de quelques caractéristiques et utilisations possibles des thyristors raccordés au réseau. Le domaine peut paraître très spécialisé à ceux qui ne le connaissent guère.

Je dirai pour conclure que c'est exactement l'inverse qui se produit, c'est-à-dire que ce domaine fait appel à toutes les branches de l'électronique et de l'électricité (parfois aussi de la mécanique), en allant de l'ordinateur travaillant en temps réel pour le contrôle d'un processus aux problèmes des grosses puissances, touchant les réseaux d'alimentation et de distribution, en passant par ceux du réglage électronique (de telles installations ne peuvent en être dissociées) et souvent d'acquisition rapide et précise de la grandeur à régler (courant, tension, vitesse, puissance, etc.).

D'autre part, l'ingénieur qui veut s'occuper de telles alimentations est obligé de connaître et de comprendre les problèmes de l'utilisateur, ce qui élargit continuellement son horizon technique, sans oublier les contacts humains, nombreux et variés qui leur sont obligatoirement liés.

Adresse de l'auteur:

J. D. Pahud, ing. dipl., CERN, Meyrin, 1211 Genève 23.