Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 96 (1970)

Heft: 5

Artikel: Impact de l'électronique de puissance sur les installations électriques et le transport d'énergie

Autor: Kaloussis, E. / Lakah, B.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-70844

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: 16.07.2025

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

Impact de l'électronique de puissance sur les installations électriques et le transport d'énergie

par E. KALOUSSIS et B. LAKAH, ingénieurs, assistants à la Chaire d'installations électriques et de transport d'énergie de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

Introduction

Le développement ces dernières années des semi-conducteurs a permis la fabrication d'éléments (diodes, thyristors, triacs) ayant des caractéristiques intéressantes du point de vue des installations électriques à courant fort.

On dispose, actuellement, sur le marché d'une gamme étendue d'éléments à semi-conducteurs permettant une utilisation rationnelle de leurs propriétés dans différents montages. Parallèlement, les fabricants, tout en améliorant les caractéristiques de leurs éléments de base, proposent des montages standard à semi-conducteurs capables de remplacer avantageusement différents appareillages électromécaniques.

Dans le cadre de la Chaire d'installations électriques et de transport d'énergie de l'EPFL (professeur J.-J. Morf), il nous a semblé intéressant d'étudier la situation actuelle et les perspectives d'avenir afin de dégager l'influence future de l'électronique de puissance sur les installations électriques en général.

1. Eléments usuels actuellement à disposition

1.1 *Diodes*

Eléments à semi-conducteurs ne permettant le passage du courant que dans un seul sens. Les diodes à jonction sont fabriquées soit par alliage, soit par diffusion, soit par épitaxie.

Les caractéristiques électriques actuelles des diodes couvrent un large domaine. A titre indicatif nous donnons des valeurs pour deux diodes disponibles sur le marché.

Tension de crête inverse nominale	1000 V	2000 V
Tension inverse périodique maximale. . .	2500 V	5000 V
Tension de crête inverse transitoire. . . .	2750 V	5500 V
Courant direct moyen nominal :		
avec refroidissement naturel	100 A	80 A
avec ventilation forcée	260 A	170 A

Les diodes à 5 kA existent déjà sous forme de prototypes ; leur fabrication industrielle est prévue à court terme. Du point de vue industriel la fabrication des diodes par épitaxie représente l'avenir, car elle permet d'obtenir une jonction abrupte, donc un taux d'accroissement du courant plus grand.

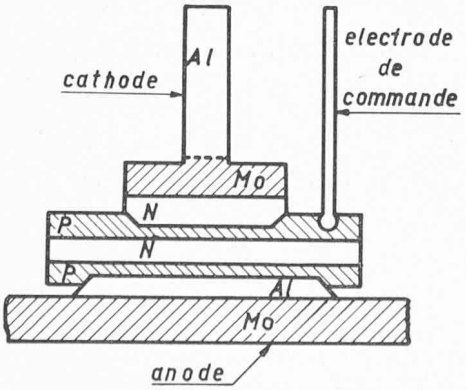


Fig. 1. — Coupe d'un thyristor.

Epitaxie : phénomène de croissance progressive d'un métal monocristal par fixation d'atomes fournis par une vapeur ambiante. On fait croître ainsi un cristal sur un cristal support en maintenant la continuité du réseau

1.2 *Thyristor*

Elément à semi-conducteur ne permettant le passage du courant que dans un seul sens ; l'instant du début de la conduction étant commandée (fig. 1).

Comme pour les diodes les caractéristiques électriques actuelles couvrent un large domaine. A titre indicatif, nous donnons des valeurs pour deux types de thyristors.

Tension de crête inverse nominale	1500 V	700 V
Tension inverse périodique maximale. . .	2500 V	1200 V
Tension inverse de crête transitoire. . . .	2750 V	1400 V
Courant direct moyen nominal :		
avec refroidissement naturel	85 A	85 A
avec ventilation forcée	230 A	320 A

On prévoit dans un proche avenir des thyristors ayant des caractéristiques électriques encore plus élevées.

2. Montages usuels et relations entre différentes grandeurs pour une charge résistive

Afin de pouvoir comparer les différents montages, nous ramenons toutes les grandeurs à la tension de crête de la tension redressée.

2.1 *Montage à une seule diode* (fig. 2.1)

Valeur de crête de la tension redressée	1
Valeur moyenne de la tension redressée	0,318
Valeur efficace de la tension redressée.	0,500

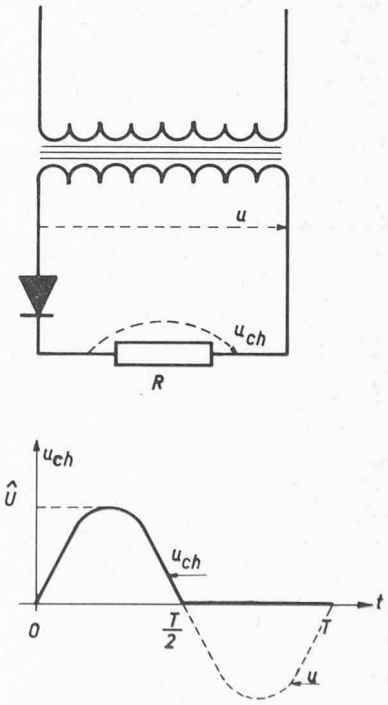


Fig. 2.1. — Montage à une seule diode. Charge résistive. $u^{ch} = f(t)$.

2.2 *Montage avec transformateur à point milieu* (fig. 2.2.1)

Montage en pont monophasé (fig. 2.2.2)

Valeur de crête de la tension redressée	1
Valeur moyenne de la tension redressée	0,636
Valeur efficace de la tension redressée.	0,707

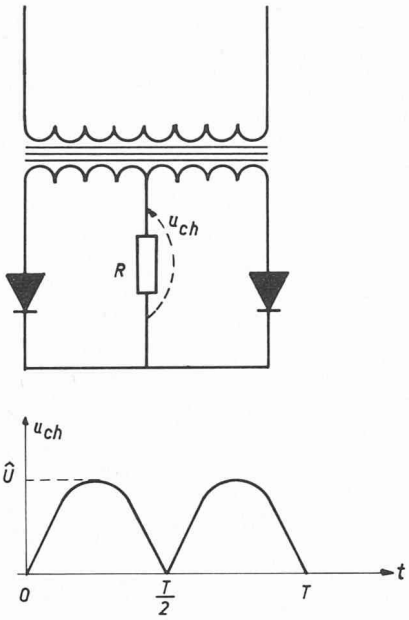


Fig. 2.2.1. — Montage avec transformateur à point milieu. Charge résistive. $u_{ch} = f(t)$.

2.3 *Montage en pont triphasé* (fig. 2.3)

Valeur de crête de la tension redressée	1
Valeur moyenne de la tension redressée	0,830
Valeur efficace de la tension redressée.	0,844

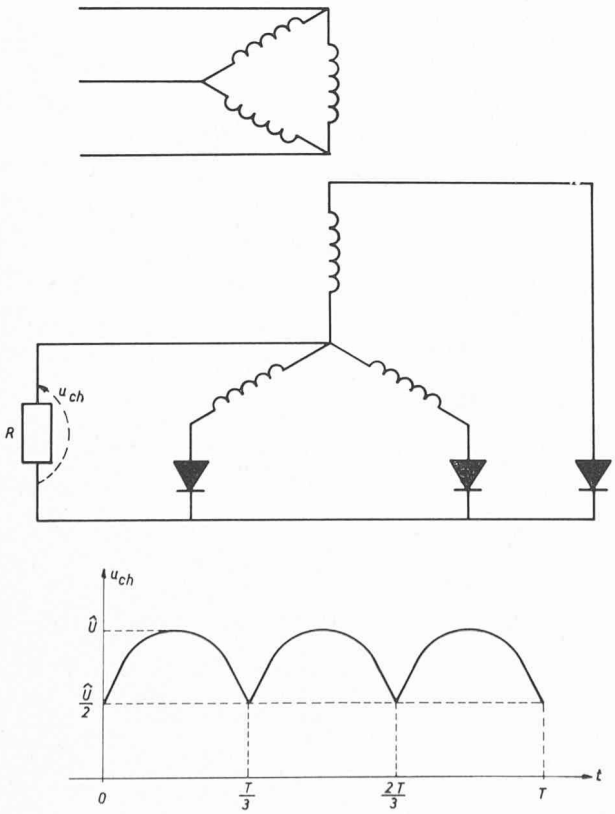


Fig. 2.3. — Montage en pont triphasé. Charge résistive. $u_{ch} = f(t)$.

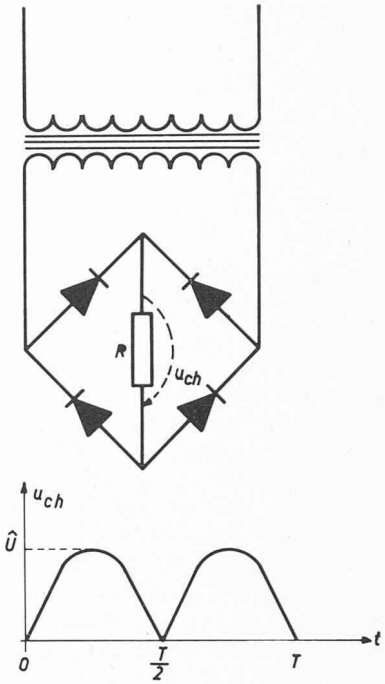


Fig. 2.2.2. — Montage en pont monophasé. Charge résistive. $u_{ch} = f(t)$.

2.4 *Montage trihexaphasé* (fig. 2.4)

Valeur de crête de la tension redressée	1
Valeur moyenne de la tension redressée	0,955
Valeur efficace de la tension redressée.	0,961

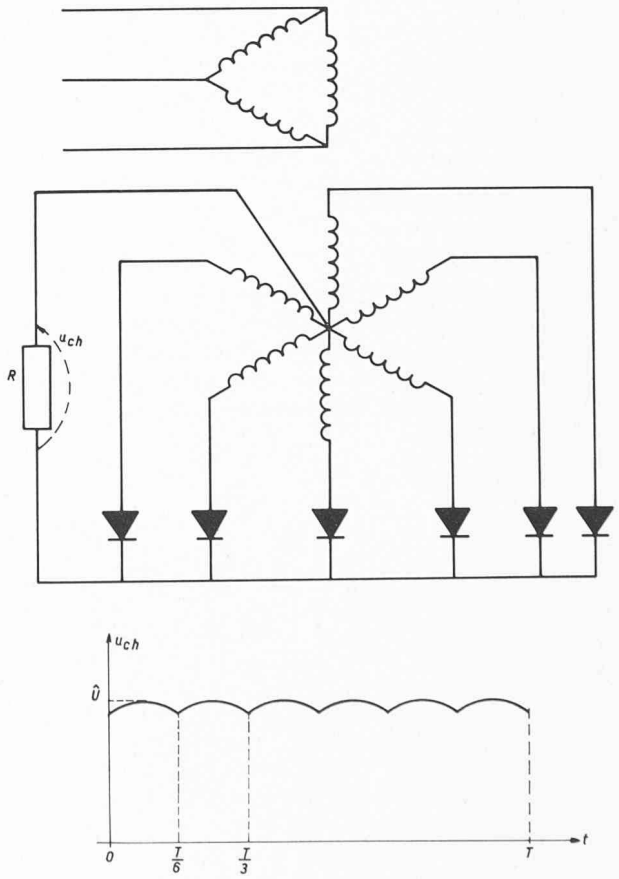


Fig. 2.4. — Montage trihexaphasé. Charge résistive. $u_{ch} = f(t)$.

Il est à remarquer que la valeur de la tension redressée dépend de la charge. A titre d'exemple, nous donnons l'allure de la tension et du courant pour un montage à une seule diode débitant sur une charge composée d'une résistance et d'une inductance en série (fig. 2.5). Nous constatons que les valeurs trouvées sous 2.1 ne sont plus applicables et même que la tension qui apparaît aux bornes de la charge, après le redresseur, est périodiquement négative.

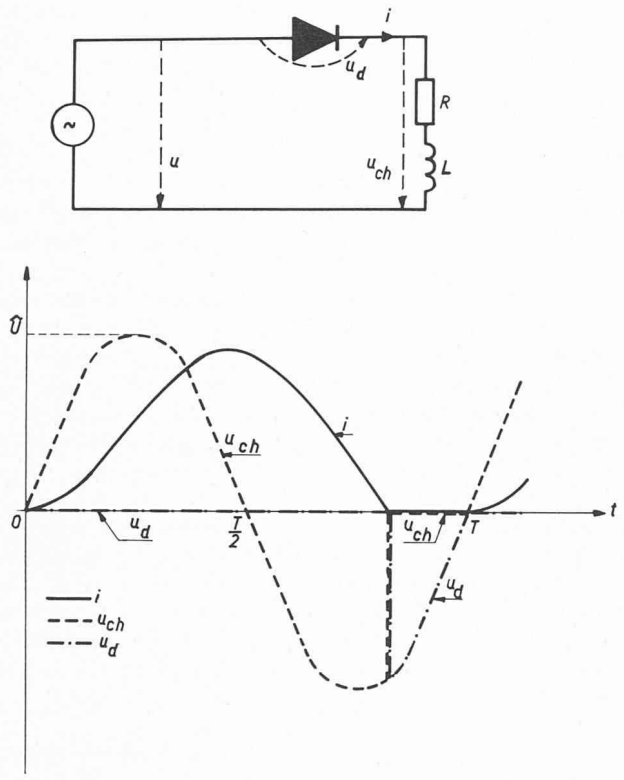


Fig. 2.5. — Montage à une seule diode. Charge composée d'une résistance et d'une inductance en série.
$u_{ch} = f(t)$;
$u_d = f(t)$;
$i = f(t)$.
Le passage du courant à travers la charge dure plus que la demi-période (à comparer avec la figure 2.1) et la tension après le redresseur est périodiquement négative.

3. Quelques applications de montages à semi-conducteurs actuellement utilisées en courant fort

3.1 *Moteur à courant continu*

Les moteurs à courant continu sont particulièrement bien adaptés pour avoir une variation de la vitesse dans de larges domaines. Cette variation de la vitesse est obtenue en faisant varier soit le flux, soit la tension d'induit, soit encore par la combinaison des deux procédés. Le moyen usuel est constitué par un groupe : Moteur-Génératrice à courant continu-Moteur à courant continu (fig. 3.1.1). L'introduction des éléments à semi-conducteurs permet d'obtenir cette variation de vitesse en remplaçant le groupe Moteur-Génératrice à courant continu par un système à redresseur (fig. 3.1.2).

Au vu des caractéristiques des éléments à semi-conducteur qui ne laissent passer le courant que dans un seul sens, il faut distinguer si l'on freine avec ou sans récupération.

Réglage de la vitesse lorsque le couple demandé par l'utilisateur est constant : Dans ce type de redresseur le courant redressé ne peut pas être inversé. Plusieurs types de schémas

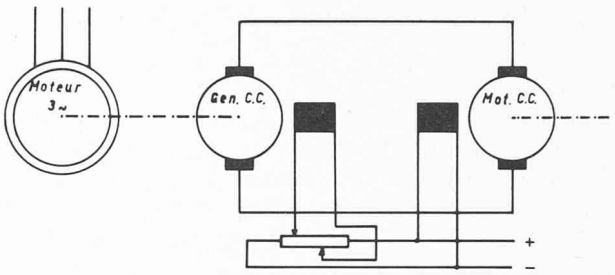


Fig. 3.1.1. — Réglage de la vitesse d'une machine à courant continu par un groupe Ward-Leonard.

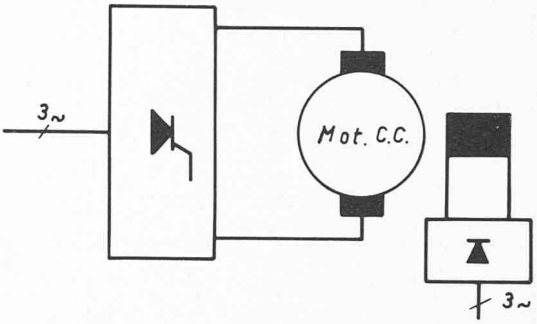
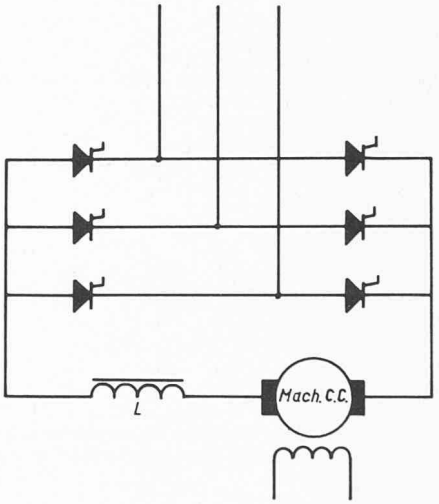


Fig. 3.1.2. — Schéma bloc du réglage de la vitesse d'une machine à courant continu par redresseur.



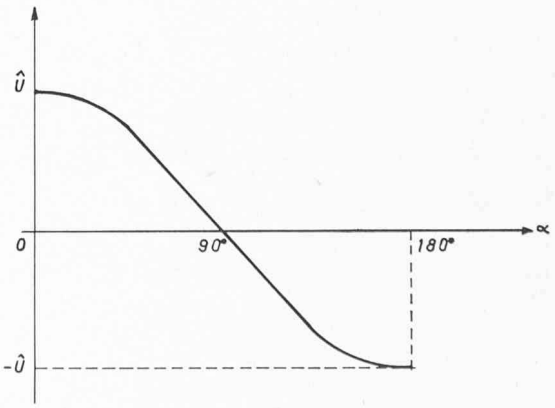


Fig. 3.1.3 et 3.1.4. — Réglage de la vitesse d'un moteur à courant continu par un dispositif à semi-conducteurs lorsque le couple demandé par l'utilisateur est constant.

sont fréquemment utilisés. A titre d'exemple nous en donnons un (fig. 3.1.3). La tension redressée dépend de l'angle d'allumage α suivant une loi cosinusoïdale (fig. 3.1.4). Pour $90° < \alpha \leqq 180°$ le redresseur fonctionne en onduleur ; c'est le moteur qui fournit l'énergie au réseau d'alimentation alternatif. Il est à remarquer que le courant passe toujours dans le même sens dans la charge et que ce sont la tension et la vitesse qui changent de signe, le moteur s'est alors transformé en génératrice.

Freinage avec récupération : Lorsqu'on veut alimenter un moteur réversible à champ constant par un redresseur à thyristors, il faut pouvoir fonctionner dans les quatre quadrants d'un diagramme couple/vitesse. On peut obtenir ce résultat soit en n'utilisant qu'un seul redresseur mais avec la possibilité d'inverser le sens du courant dans l'induit

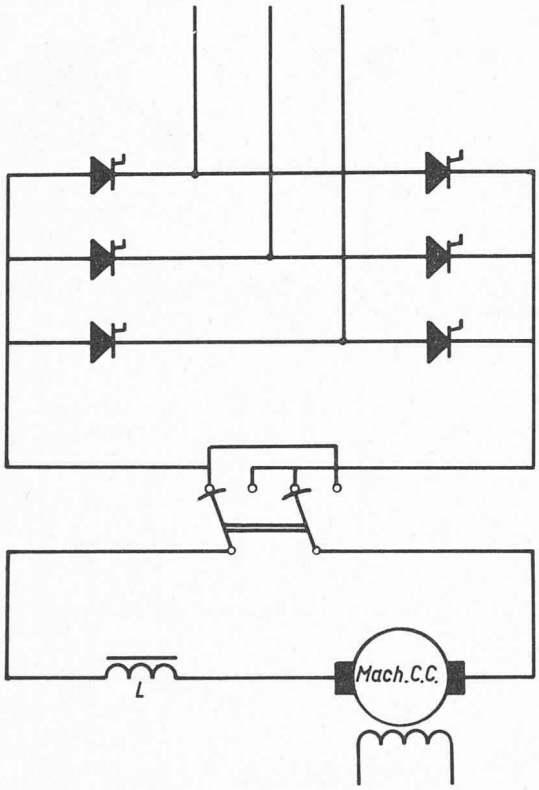


Fig. 3.1.5. — Freinage d'une machine à courant continu avec récupération en ayant la possibilité d'inverser la tension d'induit.

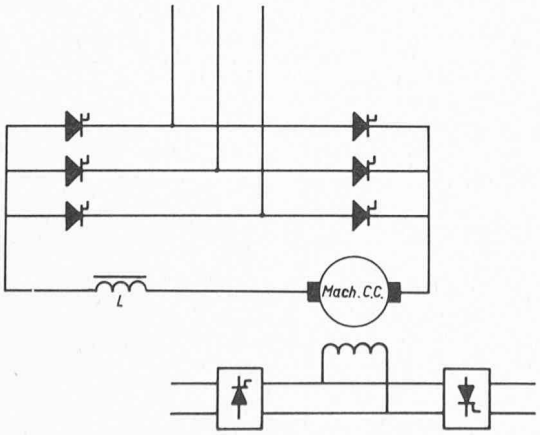


Fig. 3.1.6. — Freinage d'une machine à courant continu avec récupération en ayant la possibilité de croiser l'excitation.

(fig. 3.1.5), soit en utilisant un croisement de l'excitation au moyen de deux redresseurs en couplage antiparallèle (fig. 3.1.6). Les montages décrits sont actuellement couramment utilisés, malgré les difficultés qui apparaissent lors des commutations.

3.2 *Groupe transformateurs-redresseurs pour l'alimentation des circuits d'électrolyse*

Les industries chimiques et métallurgiques qui utilisent des procédés électrolytiques consomment de grandes quantités d'énergie électrique. Par exemple pour le cuivre, l'énergie nécessaire à l'électrolyse est environ 2300 à 2500 kWh/tonne et pour l'aluminium 14 500 à 18 000 kWh/tonne [8] [1]. De plus, pour les produits d'électrolyse, la consommation d'énergie électrique intervient pour une part importante dans le coût de production.

L'influence de ce facteur et les grandes puissances mises en œuvre exigent des groupes d'alimentation le rendement le plus élevé possible.

Une autre caractéristique des groupes d'alimentation doit être une grande robustesse et une sécurité de service absolue, parce que ces installations doivent fonctionner 8760 heures par an (100 %) au régime nominal maximal, toute suppression de courant dans une ligne d'électrolyse provoquant des pertes de production non négligeables et dans certains cas, des dégâts importants aux cuves.

Grâce à l'utilisation de redresseurs du type semi-conducteur monocristallin et de transformateurs construits avec des tôles magnétiques à très faibles pertes spécifiques, on obtient maintenant des rendements de l'ordre de 97,5 ou 98,5 % pour des équipements de 5000 à 20 000 kW de puissance unitaire et des tensions continues de 200 à 700 volts [8]. Ces équipements du point de vue robustesse et sécurité de service ont donné entière satisfaction et sont utilisés couramment.

A la figure 3.2, nous donnons le schéma bloc d'une installation utilisée pour l'alimentation des circuits d'électrolyse.

Le groupe est constitué par :

1. Un disjoncteur haute tension.
2. Autotransformateur.
3. Transformateur abaisseur.
4. Selfs autosaturables.
5. Redresseur.
6. Sectionneur.

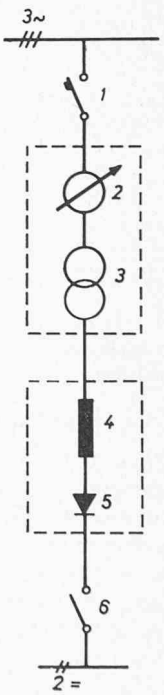


Fig. 3.2. — Schéma de principe d'une installation à redresseurs pour l'alimentation des circuits d'électrolyse.

3 ~ Réseau d'alimentation triphasé alternatif.
1. Disjoncteur haute tension.
2. Autotransformateur.
3. Transformateur abaisseur.
4. Selfs autosaturables.
5. Redresseur.
6. Sectionneur.
2 = Réseau à tension continue.

3.3 *Hacheur* (fig. 3.3)

Pour varier la tension appliquée aux bornes d'une machine à courant continu, on utilise actuellement un montage à semi-conducteurs appelé « hacheur ». Ce montage remplace avantageusement le rhéostat de démarrage

[1] Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

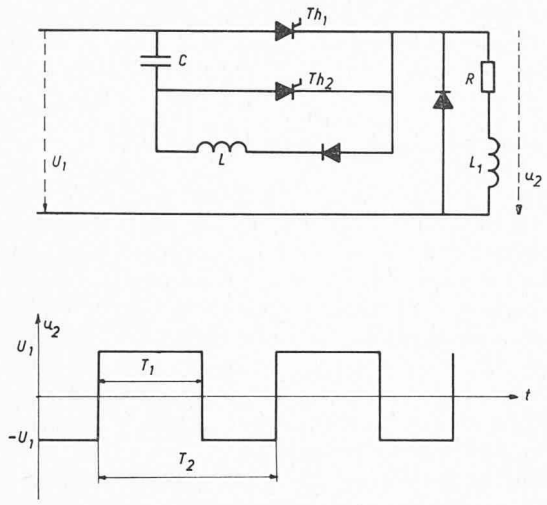


Fig. 3.3. — Schéma de principe du dispositif appelé Hacheur. En agissant sur l'instant d'enclenchement des thyristors Th1 et Th2, on modifie T_1 et T_2, d'où réglage de u_2 et de $U_{2\,moy} = U_1 \frac{2\,T_1 - T_2}{T_2}$.

et permet d'éviter les à-coups lors des démarrages et freinages des moteurs à courant continu.

3.4 *Réglage de la vitesse d'un moteur à induction*

En utilisant un dispositif à thyristors, il est possible de varier la vitesse d'un moteur à induction (synchrone ou asynchrone) en variant la fréquence d'alimentation entre 20 Hz et 120 Hz.

3.5 *Véhicules diesel-électriques*

Avec l'augmentation de la vitesse et de la puissance des moteurs diesel, on a pratiquement atteint la limite des génératrices à courant continu. L'apparition d'éléments redresseurs de puissance permet actuellement le remplacement de la génératrice à courant continu par un bloc « alternateur-redresseur ».

3.6 *Poste de secours*

L'interruption, même fugitive, du courant peut avoir de graves conséquences dans certains domaines particuliers ; par exemple : les hôpitaux.

Les dispositifs à semi-conducteurs permettent actuellement de parer à cet inconvénient. L'installation se compose d'un pont, d'une batterie et d'un pont inverseur.

Le pont transforme le courant alternatif en courant continu pour charger la batterie qui, à son tour, fournit l'énergie au pont inverseur qui la transforme en alternatif. Ce dispositif est maintenu continuellement en circuit, grâce aux faibles pertes des éléments le composant. Dès qu'une panne se produit, la batterie fournit l'énergie nécessaire au pont inverseur qui continue à alimenter les installations en courant alternatif. On élimine ainsi le temps nécessaire à la mise en marche des installations de secours utilisées jusqu'à maintenant.

3.7 *Moteur à collecteur*

Les problèmes de commutation des moteurs à collecteur sont plus difficiles à résoudre que ceux des machines à courant continu, car durant la commutation on a un courant de court-circuit qui passe entre les charbons et le collecteur. Afin de réduire ce courant, on est amené à réduire le flux principal en augmentant le nombre de pôles et à réduire la fréquence ($16\,^2/_3$ Hz). L'introduction des thyristors conduit à remplacer les moteurs à collecteurs par des moteurs à courant continu alimentés par un pont à thyristors, les ponts pouvant être alimentés à 50 Hz ou à 60 Hz (Etats-Unis).

Electronique de puissance et transport d'énergie

Pour apprécier l'impact du développement de l'électronique de puissance sur le transport d'énergie, il faut rappeler la situation actuelle en ce qui concerne l'utilisation du courant continu pour le transport d'énergie à H.T.

L'utilisation du courant continu élimine les pertes inductives et capacitives dans la ligne ou le câble de transport. L'élimination des pertes inductives ($X_L = 0$) dans une ligne à haute tension est appréciable pour le transport à longue distance de grandes quantités d'énergie. D'autre part, l'élimination des pertes capacitives dans un câble à H.T. permet l'utilisation des longs câbles sous-marins ou souterrains, ce qui est impossible en courant alternatif parce que la capacité totale du câble augmentant avec la longueur, les pertes dues au courant capacitif deviennent prohibitives dès qu'une certaine longueur est dépassée (env. 30 km).

Nous avons donc des utilisations possibles du transport à courant continu dans les cas suivants :

— Transport de grandes quantités d'énergie par lignes aériennes à longue distance.
— Transport d'énergie par longs câbles sous-marins.
— Introduction d'importantes quantités d'énergie par câbles souterrains dans de grandes agglomérations.
— Liaisons entre réseaux fonctionnant à des fréquences différentes, etc.

A ce jour, plusieurs installations sont en service dans le monde et d'autres en projet ou en cours de réalisation.

Nous donnons ci-après la liste de ces installations [3] :

Liaisons en service

— Liaison Suède continentale - Ile de Gotland (1954) : Câble sous-marin de 100 km, sous 100 kV. Puissance 20 MW (aller : câble conducteur à + 100 kV par rapport à la terre, retour par la terre).
— Liaison France - Angleterre (1961) : Câble sous-marin de 60 km sous ± 100 kV. Puissance 160 MW (aller conducteur à + 100 kV et retour conducteur à −100 kV par rapport à la terre).
— Liaison Volgograd - Donbass (URSS) (1965) : Ligne aérienne de 500 km, sous ± 400 kV. Puissance 750 MW.
— Interconnexion Nord-Sud en Nouvelle-Zélande : Ligne aérienne de 580 km et câble de 40 km sous ± 250 kV. Puissance 600 MW.
— Convertisseur de fréquence (50-60 Hz) Sakuma - Japon (1965) Tension : 2×125 kV. Puissance : 300 MW.
— Liaison Suède - Danemark (1965) : Ligne aérienne de 90 km et câble sous-marin de 85 km sous 250 kV. Puissance : 250 MW.
— Liaison Sardaigne - Italie continentale (1966) : Ligne aérienne de 300 km et câble sous-marin de 120 km sous 200 kV. Puissance : 200 MW.
— Interconnexion du Pacifique (Columbia River à Los Angeles) (1969) : Ligne aérienne de 1330 km sous ± 400 kV. Puissance : 1440 MW.

Liaisons projetées ou en cours de réalisation

— Liaison Continent canadien - Ile de Vancouver :
En service depuis 1967. En 1969, la puissance a été portée à 312 MW sous 260 kV. Ligne aérienne de 40 km et câble de 30 km.

— Liaison Londres - Estuaire de la Tamise :
La mise en service est prévue pour 1970. Il y aura deux circuits distincts de 320 MW chacun. Câble d'une longueur de 85 km. Cette liaison à courant continu permettra d'alimenter directement les réseaux à 132 kV sans avoir à renforcer les réseaux à 275 et 400 kV. C'est le premier exemple d'injection d'une forte puissance au centre d'un réseau de distribution. La réussite de ce projet pourra provoquer un grand changement de structure des réseaux d'alimentation des grandes agglomérations.

— Projet de liaison Manitoba - aménagement du fleuve Nelson (Canada). La mise en service est prévue pour 1971. L'installation complète comprendra trois lignes de 900 km à ± 450 kV. Puissance transportée 810 MW.

— James Bay (Canada) :
En projet pour une liaison de 5000 ou 10 000 MW vers Montréal.

— Aménagement du Zambèze : Liaison Cabora Bassa - Afrique du Sud.
En cours de réalisation par un consortium européen. Ligne d'une longueur de 1500 km sous ± 533 kV. Puissance transportée 1920 MW. L'appareillage de conversion alternatif-continu est composé de 280 thyristors montés en série.

— Liaison de Snettisham (Alaska) Mise en service prévue pour 1972.
Câble de 65 km sous 70-125 kV. Puissance 80 MW. Cette installation sera équipée de convertisseurs statiques à thyristors.

Les travaux du Comité d'études n° 10 de la CIGRE (Transport d'énergie par courant continu à très haute tension) montrent que sur le plan technique on peut escompter maintenant une sécurité d'exploitation aussi grande que pour le courant alternatif, ceci malgré la complexité de l'appareillage de conversion alternatif-continu, puis continu-alternatif formé jusqu'à maintenant par des valves à vapeur de mercure. Cet appareillage, sur le plan économique, grève assez lourdement le bilan total du transport à courant continu et détermine la limite inférieure de rentabilité d'un tel transport.

Le développement de l'électronique de puissance influencera fortement la conception de l'appareillage de conversion alternatif-continu et par là, le bilan total du transport à courant continu.

Déjà depuis 1966-1967 une des valves à vapeur de mercure de la liaison Suède continentale - Ile de Gotland a été remplacée par un ensemble à thyristors. Deux ensembles en parallèle de 50 éléments en série ont été utilisés. La commande s'effectue par faisceau lumineux. Chaque élément est conçu pour 2,8 kV (on peut maintenant atteindre 5 kV). L'ensemble fonctionne correctement.

Aux Etats-Unis, un ensemble à thyristors à 200 kV est utilisé expérimentalement et une autre consiste en un essai en boucle d'une installation redresseur-mutateur de 3 MW. Deux fabricants se déclarent prêts à livrer de telles installations.

En Europe, un consortium de trois constructeurs (allemands et suisses) a été formé pour étudier les techniques du transport d'énergie par courant continu à très haute tension.

Perspectives pour l'avenir

Nous pouvons nous attendre à ce que le développement des thyristors du point de vue tension, courant, taux d'accroissement de la tension, taux d'accroissement du courant et prix unitaire, facilitera la réalisation d'ensembles de thyristors pour hautes tensions et permettra le remplacement avantageux des valves à vapeur de mercure dans l'appareillage de connexion alternatif-continu et continu-alternatif. Ceci influencera le bilan total économique et technique du transport à courant continu et favorisera la multiplication de ces installations.

Nous ne prétendons pas que le courant continu supplantera le courant alternatif pour le transport d'énergie à haute tension, mais simplement qu'on utilisera la liaison à courant continu ou à courant alternatif ou des liaisons mixtes suivant le problème technique posé et après études économiques comparant les trois solutions. A ce sujet, les travaux du Comité n° 10 de la CIGRE relèvent que malgré la difficulté de réaliser des comparaisons économiques parfaitement valables entre le courant alternatif et le courant continu, une étude faite en Grande-Bretagne, a mis en évidence une économie d'environ 25 % par l'introduction d'un certain nombre de liaisons à courant continu entre le réseau 132 kV et 400 kV [3].

Conclusion

Le présent article fait partie d'une étude entreprise par la Chaire d'installations électriques et de transport d'énergie de l'EPFL (prof. J.-J. Morf) pour déterminer l'incidence du développement de l'électronique de puissance dans le cadre de sa mission de recherche et d'enseignement.

Vu l'étendue du sujet nous n'avons pas énumérés, ni développé ici toutes les applications possibles. Le lecteur qui désire avoir plus de détails consultera la documentation mentionnée en annexe.

D'autre part, nous n'avons pas abordé, dans cet article, les problèmes de commande des thyristors qui parallèlement se développent continuellement.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Siemens : *Thyristoren in der technischen Anwendung*. Tomes I et II.

[2] J. Schaefer : *Rectifier Circuits*. Theory and Design. John Wiley and Sons, Inc.

[3] *ÉLECTRA*, organe de la Conférence internationale des grands réseaux électriques à haute tension (CIGRE). N° 3, décembre 1967. N° 5, juin 1968. N° 7, décembre 1968.

[4] *IEEE-Spectrum : Solid State power electronics*. Octobre 1969.

[5] Sécheron : *Electronique industrielle*. Catalogue et documentation.

[6] *Publications BBC :* Documentation sur l'électronique de puissance. N°s. 2870 F, 3295 F, 2979 F.

[7] *Bulletin Oerlikon :* N°s 387-388, avril 1969.

[8] *ACEC*, revue des Ateliers de constructions électriques de Charleroi. N° 1, 1967. N°s 3-4, 1967.

[9] *Electrical Review : Developments in high voltage transmission Systems*. Juin 1969.

Adresse des auteurs :
E. Kaloussis, B. Lakah, ingénieurs, Institut d'Electrotechnique de l'EPFL, 16, chemin de Bellerive, 1007 Lausanne.