

2554

Développement et utilisation des hacheurs en traction électrique

par P. MOURY

Les études de JEUMONT-SCHNEIDER dans le domaine de la commande par thyristors des équipements de traction pour locomotives et automotrices à courant continu ont été concrétisées par la réalisation de prototypes de hacheurs de plus en plus puissants, toujours immédiatement expérimentés dans les conditions réelles d'exploitation et suivis de fabrications de série.

Il est maintenant possible de définir une technique qui fait du hacheur un outil commode et avantageux pour l'exploitant et un partenaire discret pour les systèmes à courants faibles.

L'avènement des semi-conducteurs est sans doute la cause principale de l'évolution récente extrêmement rapide de l'électronique et de l'électrotechnique. Dans le domaine de la traction électrique ferroviaire, cette évolution a débuté vers 1960 en France.

En premier lieu, les diodes au silicium se sont imposées sur les locomotives monophasées à 25 kV, 50 Hz, remplaçant progressivement les redresseurs à vapeur de mercure. Puis les thyristors ont permis d'effectuer à la fois le redressement et le réglage du courant.

Depuis 1968, toutes les nouvelles locomotives et automotrices monophasées sont de cette conception.

Presque simultanément, des thyristors « rapides » de forte puissance ont été disponibles et ont permis de réaliser des hacheurs pour effectuer le réglage du courant continu des moteurs de traction à partir d'une ligne de contact à tension continue.

Plusieurs expériences de hacheurs ont été entreprises par JEUMONT-SCHNEIDER à partir de 1964. Elles ont abouti, de 1968 à 1972, à la réalisation d'équipements complets de traction et de freinage dont la technologie « industrielle » pouvait immédiatement s'adapter à la fabrication en série. Les performances, la qualité du service et la technologie ont donné des résultats si convaincants que la plupart des équipements à courant continu fabriqués actuellement par JEUMONT-SCHNEIDER sont du type « hacheur ».

Le présent article a pour but de décrire le hacheur et ses propriétés. Ses performances sont ici comparées à celles des équipements conventionnels, mais il apparaîtra que les hacheurs ont aussi des qualités propres qui les rendent incomparables.

Fig. 1 Locomotive électrique à courant continu 1500 V. BB 7003 SNCF - équipée de bloc hacheur.



Le hacheur

Parmi les convertisseurs à semi-conducteurs, le hacheur est l'un des systèmes les plus simples. Son principe est bien connu, mais il est utile d'en rappeler les particularités ainsi que d'en présenter les schémas les plus utilisés.

Principes

Hacheur abaisseur de tension

Le principe est donné par la figure 2 où le hacheur est représenté par un contact inverseur.

Les principales relations entre le rapport de conduction h et E , i_m , u_m , i_h , se calculent aisément.

Pendant l'intervalle conducteur,

$$E = u_m + L \cdot \Delta i_m / hT$$

Pendant l'intervalle complémentaire,

$$0 = u_m + L \cdot (-\Delta i_m) / (1 - h) T$$

De ces équations, on tire :

$$u_m = h \cdot E$$

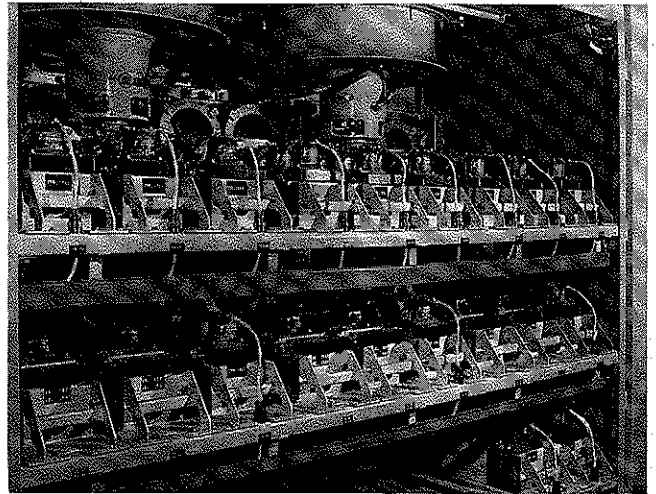
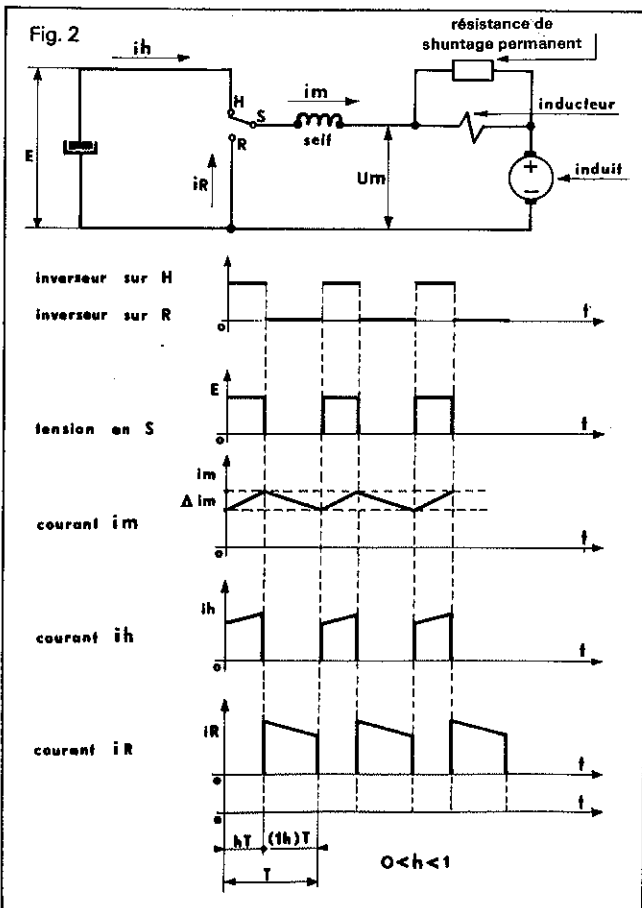


Fig. 3 Tiroirs à thyristors (bloc hacheur type chemin de fer) SNCF BB 7200.

Si i_l est le courant de ligne, égal à la valeur moyenne de i_h ,

$$i_l \cdot E = u_m \cdot i_m$$

$$i_l \cdot E = h \cdot E \cdot i_m$$

$$i_l = h \cdot i_m$$

Hacheur éleveur de tension ; fonctionnement en freinage.

Le principe est donné par la figure 4.

Les principales relations se déduisent des précédentes :

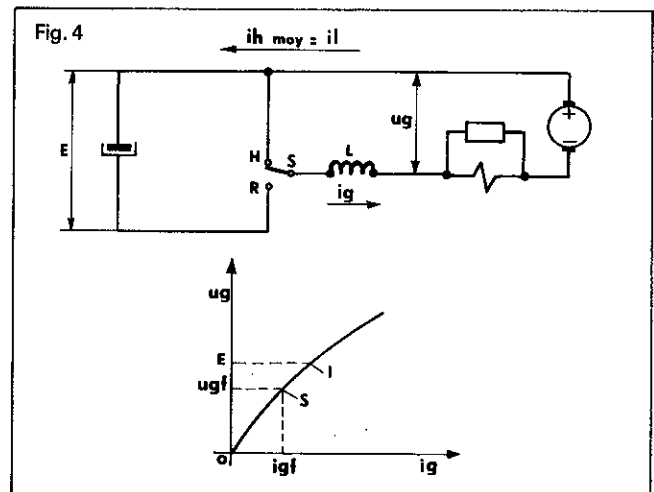
$$u_g = E - h \cdot E = (1 - h) E$$

$$i_l \cdot E = u_g \cdot i_g$$

$$i_l \cdot E = (1 - h) E \cdot i_g$$

$$i_l = (1 - h) i_g$$

Ce sont les même formules que celles de l'abaisseur de tension en remplaçant h par $1 - h$.



Toutefois le schéma de la figure 4 exige une explication complémentaire. La génératrice, auto-excitée dans cet exemple, débite sur la source E à travers le hacheur. On sait qu'une génératrice auto-excitée n'aurait pas un débit stable vers une source à tension fixe E (point I instable sur la figure 4).

Or, le hacheur permet d'obtenir un débit stable si le point S, représentant ce fonctionnement, est compris entre les points O et I :

- lorsque le hacheur est conducteur (inverseur sur H), il oppose une tension nulle à l'ensemble génératrice + self L.
- Le point de fonctionnement S se déplace vers I,
- lorsque le hacheur ne conduit pas (inverseur sur R), la tension E, plus élevée que u_g , est opposée à l'ensemble génératrice + self. Le point de fonctionnement S se déplace vers O.

On conçoit donc qu'il est possible de maintenir le point S où l'on veut, par une régulation appropriée du rapport de conduction h. Il est seulement nécessaire que le hacheur soit assez rapide par rapport à la vitesse de l'évolution du courant.

Pour réaliser le freinage rhéostatique, il suffit de remplacer la source E par une résistance R_h telle que

$$R_h \cdot (i_h \text{ maximal}) = E.$$

Le hacheur produit alors le freinage au courant maximal comme s'il régénèrait sur E. Pour des courants inférieurs, tout se passe comme s'il régénèrait sur une source de tension plus faible.

Particularités du schéma

Un schéma de hacheur

Le schéma de la figure 6 fait partie des schémas les plus avantageux et les plus largement utilisés. Plusieurs autres

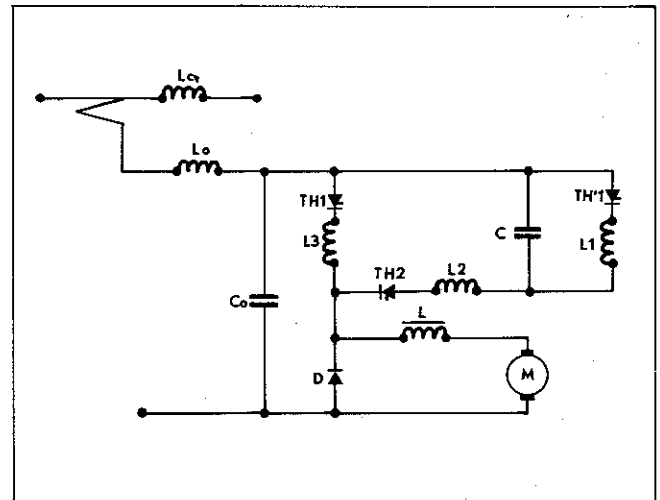


Fig. 6 Schéma de principe du hacheur.

schémas présentent également des avantages intéressants et le choix entre eux ne peut être fait qu'en fonction des particularités du problème posé.

Les différences par rapport au schéma de principe sont les suivantes :

- le contact R est remplacé par D, la diode de roue libre,
- le contact H est remplacé par la branche Th1, L3, et par le système d'extinction Th'1, L1, C, L2, Th2.
- un filtre $L_o C_o$, est placé entre le hacheur et la source. En traction ferroviaire avec ligne de contact, celle-ci insère entre la source et l'utilisation une self variable L_c . Pour reconstituer la source d'impédance faible nécessaire au hacheur on place le plus près de lui un condensateur C_o ; on ajoute L_o pour que la période

$$T = 2\pi\sqrt{(L_c + L_o) C_o} \quad \text{du circuit } L_c L_o C_o$$

ne soit pas trop dépendante de L_c .

Fig. 5 Bloc hacheur type chemin de fer. Vue d'ensemble : tiroirs à thyristors, appareillage de ventilation et, à droite, disjoncteur type HRKS (SNCF BB 7200).

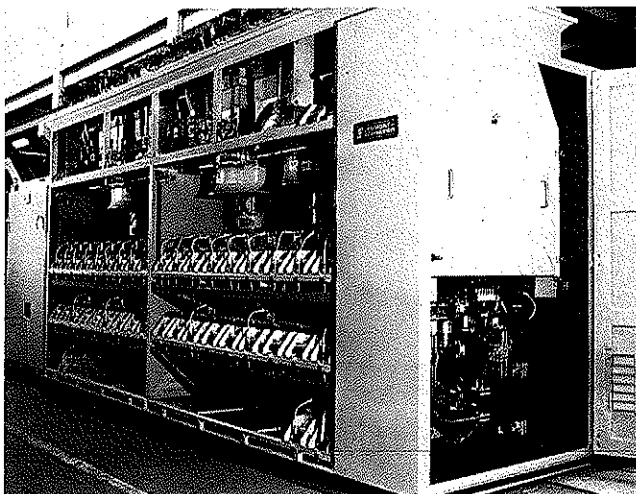
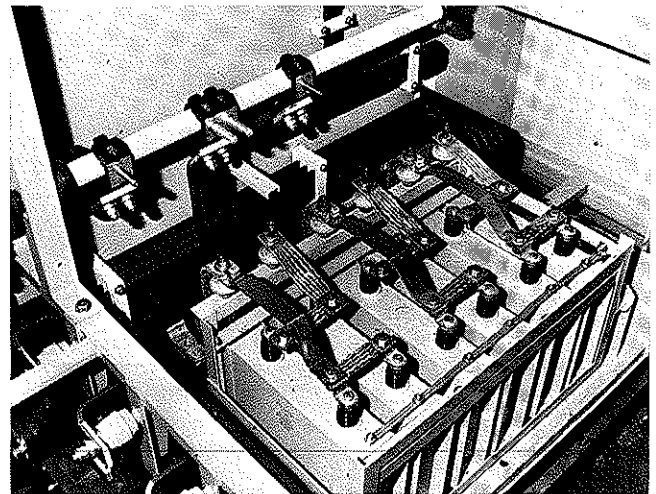


Fig. 7 Condensateur d'extinction.



Hacheurs entrelacés

Le schéma de la figure 6 montre le principe de l'entrelacement qui est souvent employé.

Cette disposition permet de diviser par le cube du nombre de phases (q^3) l'amplitude du courant alternatif que le hacheur fait circuler sur la ligne.

L'ondulation du courant moteur est également réduite, mais ceci est moins important car les moteurs de traction la supportent bien.

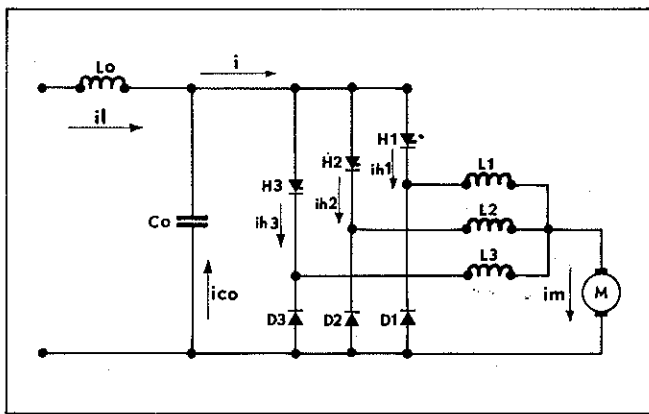


Fig. 8 Entrelacement de trois hacheurs.

Commutation statique traction-freinage

Le schéma de la figure 9 montre comment un hacheur peut passer du fonctionnement en traction au fonctionnement en freinage au moyen d'un commutateur statique.

Dans l'état « traction », le courant passe par la diode DT et le thyristor ThT ; dans l'état « freinage », le courant passe par ThF et DF.

Les thyristors ThT et ThF ne sont pas du type « rapide ». C'est le hacheur qui les éteint en annulant le courant.

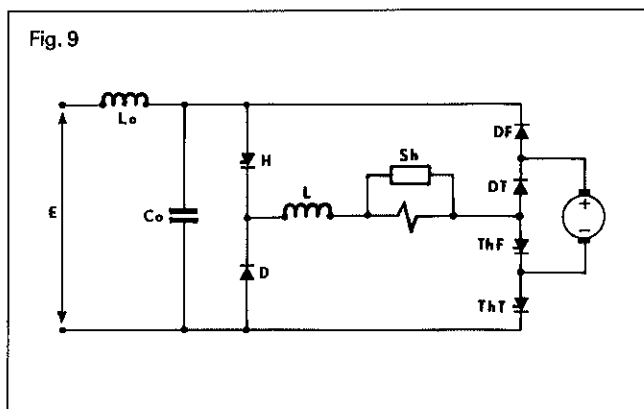


Fig. 9

Shuntage des inducteurs

Le shuntage de l'inducteur d'un moteur série permet une grande extension du domaine utilisable de son diagramme effort-vitesse.

Le shuntage est utilisé en traction et en freinage. Dans les deux cas, il est avantageux de le faire varier sans discontinuité. Ce résultat est obtenu par des systèmes de type hacheur, fonctionnant aussi bien en traction qu'en freinage et totalement progressifs.

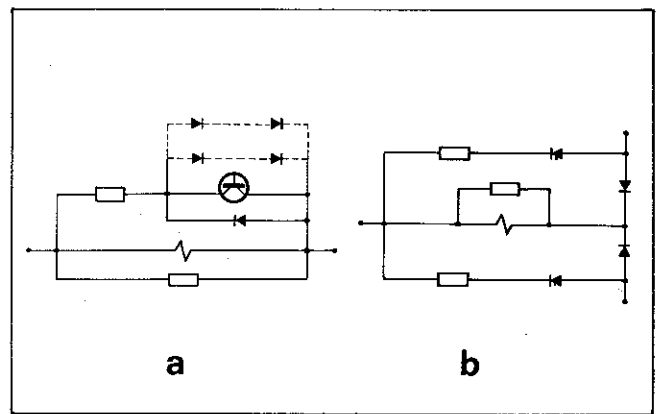


Fig. 10 Shuntage. a) par transistors b) par thyristors

Freinage électrique

Freinage rhéostatique

Le freinage rhéostatique est aisément réalisé au moyen d'une seule résistance (cf. § « Hacheur élévateur de tension, fonctionnement en freinage »).

C'est le type de freinage le plus souvent employé sur les locomotives de grandes lignes. En effet, à l'exception des cas de très longues pentes, l'énergie de freinage est faible par rapport à l'énergie de traction et il est peu rentable de la récupérer.

Freinage par récupération

La récupération est avantageuse sur les réseaux de transports urbains ou de banlieue. Elle soulage le frein mécanique, comme le fait un freinage rhéostatique, mais en plus, elle économise de l'énergie et réduit l'échauffement du matériel roulant, des tunnels et des stations.

Par contre elle impose quelques aménagements dans la conception de l'ensemble « installations fixes - matériel roulant ».

Il convient donc d'examiner ces particularités des points de vue :

- de l'énergie,
- du freinage mécanique,
- du réseau d'alimentation.

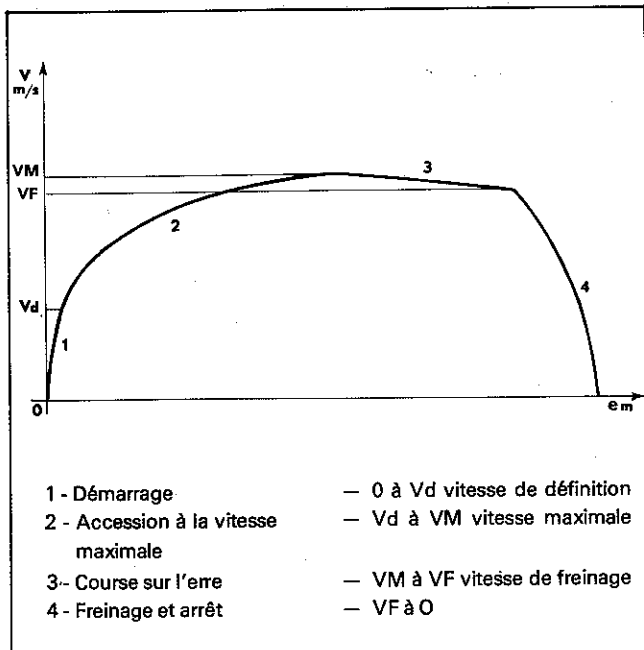


Fig. 11 Diagramme de la vitesse en fonction de l'espace pour un parcours ordinaire entre deux stations de métro ou de banlieue.

Bilan énergétique

La détermination quantitative de l'économie d'énergie donne des résultats très divers selon le profil de la voie, la distance entre arrêts, les performances, le réseau d'alimentation...

Le bilan relatif à un train de banlieue ou à une rame de métropolitain dans une interstation en palier (fig. 11) peut se calculer approximativement et simplement par la méthode des énergies cinétiques.

Si la masse d'inertie du train, y compris la contribution des masses tournantes, est M, les énergies cinétiques Ed, EM, EF aux vitesses Vd, VM, VF sont :

$$E_d = \frac{1}{2} M (V_d)^2$$

$$E_M = \frac{1}{2} M (V_M)^2$$

$$E_F = \frac{1}{2} M (V_F)^2$$

et les énergies électriques EDd et EDM demandées au réseau pour fournir au train les énergies Ed et EM sont :

$$E_{Dd} = \frac{E_d}{r}$$

$$E_{DM} = \frac{E_M}{r}$$

r étant le rendement global de la transformation de l'énergie électrique en énergie cinétique, compte tenu de toutes les pertes (électriques, roulement, résistance de l'air, transmission...).

Si Ef est l'énergie de freinage par dissipation (mécanique et/ou rhéostatique), il est commode de définir le facteur

$$f = \frac{E_f}{E_F}$$

f = 0 si la récupération renvoie toute l'énergie récupérable.

f = 1 si toute l'énergie est dissipée.

Dans l'application numérique donnée plus loin :

— pour le cas du hacheur, l'énergie restituée à la ligne est

$$E_{RF} = r \cdot E_F (1 - f) \text{ avec } f = 0,33$$

— pour le cas de l'équipement conventionnel, la dissipation dans les freins mécaniques est, s'il n'y a pas de freinage rhéostatique :

$$E_f = f \cdot E_F \text{ avec } f = 0,82$$

(Le reste de l'énergie de freinage, soit ici, 0,18 EF, est dissipé par la résistance à l'avancement).

La consommation Cc d'un équipement conventionnel est :

$$C_c = E_{DM} + E_{Rh}$$

(ERh, énergie dissipée dans un rhéostat de démarrage est EDd s'il n'y a pas de changement de couplage des moteurs ; elle vaut $\frac{E_{Dd}}{2}$ si l'on utilise un couplage série puis parallèle, cas le plus fréquent).

La consommation CH d'un équipement à hacheur est :

$$C_H = E_{DM} - E_{RF}$$

Application numérique

		Équipement Conventionnel		Équipement à Hacheur	
Masse M	(t)	190		194	
r		0,7		0,685	
f		0,82		1/3	
VM	(m/s)	30	25	30	25
VF	(m/s)	28	23	28	23
Vd	(m/s)	12	12	12	12
EDM	(MJ)	122	85	127,5	88,5
ERh	(MJ)	10	10	0	0
ERF	(MJ)	0	0	35	23,5
Ef	(MJ)	61	41	17,5	11,5
Consommation :					
Cc	(MJ)	132	95	—	—
CH	(MJ)	—	—	92,5	65
$\frac{CH}{C_c} =$		0,7 pour VM = 30 m/s 0,685 pour VM = 25 m/s			

Cette détermination est souvent un prélude utile à des calculs complets et exacts où sont pris en compte les pentes et les rampes, les reprises, les ralentissements et la vitesse maintenue.

En utilisant un ordinateur, il est possible de simuler l'exploitation d'une ligne. On peut ainsi calculer les consommations sur les trains et dans les sous-stations, les énergies et les puissances dans les freins mécaniques et dimensionner les postes redresseurs, les postes onduleurs, certains équipements de voie (connexions inductives, sectionneurs...) — (Cf. § « Le réseau d'alimentation et la récupération » — la figure 14 résulte d'un tel calcul).

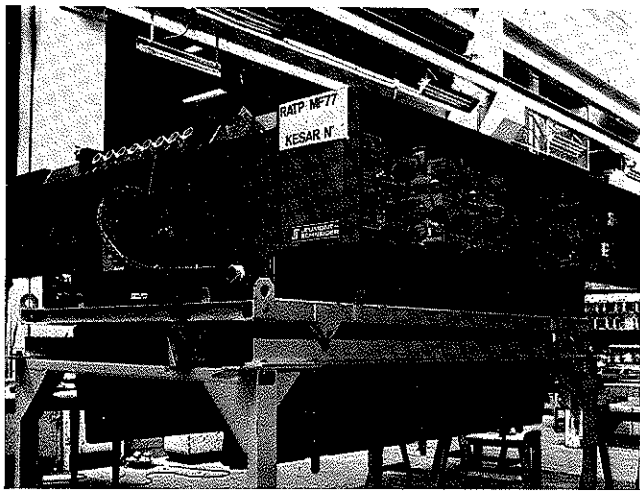


Fig. 12 Bloc hacheur type métro (MF 77 - Métro de Paris).

Contraintes du frein mécanique

Dans l'application numérique qui précède, nous avons choisi $f = 1/3$, ce qui signifie que les freins mécaniques dissipent en chaleur un tiers de l'énergie cinétique. Ceci se présente souvent et pour des raisons diverses :

- lorsque l'on a des formations de motrices et de remorques où l'on conserve un certain freinage mécanique sur les remorques,
- lorsque l'on ne veut pas surdimensionner les motrices et leur équipement pour les besoins d'un freinage entièrement électrique à partir de vitesses élevées,
- lorsque le système d'alimentation de la ligne n'est pas pourvu d'onduleur et que les consommations sont insuffisantes pour absorber l'énergie récupérable.

D'une façon générale, le coefficient f résulte d'un compromis entre l'énergie récupérée, la puissance des moteurs et des équipements de bord, la contrainte sur le frein mécanique et les équipements d'alimentation de la ligne.

L'énergie qui n'est pas récupérée peut être dissipée dans des résistances (freinage rhéostatique) ou par le freinage mécanique.

Il est important de remarquer que l'usure des sabots peut être très faible si l'énergie et la puissance à dissiper sont inférieures à certains seuils.

En effet, l'usure des sabots n'est pas proportionnelle à la contrainte appliquée, elle augmente plus rapidement. Il est évident, par exemple, que si la contrainte produit des températures de fusion ou de décomposition, l'usure est très rapide.

C'est pourquoi une récupération, même partielle, peut diminuer fortement l'usure des sabots.

Le réseau d'alimentation et la récupération

Si les hacheurs étaient exploités en traction seulement, le réseau serait légèrement favorisé : un peu moins d'énergie à fournir, chutes de tension au démarrage plus faibles, captation du courant très facile au début du démarrage puisque le courant ligne est très faible, protection par di/dt plus facile.

Mais c'est la récupération qui apporte des avantages importants, en même temps que des sujétions nouvelles.

Les avantages sont que l'énergie à fournir est nettement diminuée et que la tension moyenne est relevée.

Les sujétions proviennent du fait que les demandes et les restitutions d'énergie sont rarement simultanées, sauf pour un trafic extrêmement dense. (fig. 14).

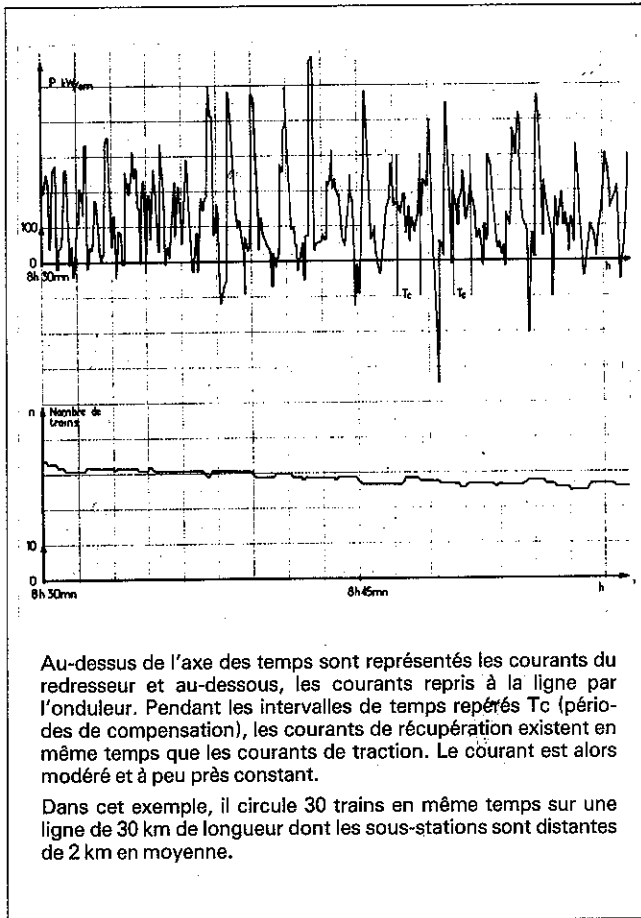
Si, dans une sous-station donnée, le courant distribué tend à devenir négatif parce que les courants récupérés l'emportent sur les courants de traction, il faut :

- ou bien adjoindre un onduleur au redresseur de cette sous-station,
- ou bien équiper les trains d'un système qui limite la récupération à ces instants.

Ce dernier procédé peut être employé seul : l'énergie de freinage est alors plus ou moins récupérée suivant que le trafic est plus ou moins dense. Le premier procédé est plus satisfaisant : l'énergie de freinage est toujours récupérée au mieux et la tension maximale du réseau est assez bien définie. Mais, dans ce cas, le système qui limite la récupération sur les trains doit exister quand même pour intervenir lorsqu'un onduleur est arrêté.

Fig. 13 Une des nouvelles motrices du métro de Paris équipées de hacheurs à récupération Jeumont-Schneider.





Au-dessus de l'axe des temps sont représentés les courants du redresseur et au-dessous, les courants repris à la ligne par l'onduleur. Pendant les intervalles de temps repérés T_c (périodes de compensation), les courants de récupération existent en même temps que les courants de traction. Le courant est alors modéré et à peu près constant.

Dans cet exemple, il circule 30 trains en même temps sur une ligne de 30 km de longueur dont les sous-stations sont distantes de 2 km en moyenne.

Fig. 14 Diagramme de l'intensité du courant en fonction du temps dans une sous-station à redresseur et onduleur.

Le hacheur du point de vue de l'exploitant

Le hacheur est donc très différent des équipements conventionnels et le fonctionnement en récupération entraîne un aménagement particulier du train et quelquefois, l'installation d'onduleurs sur le réseau. L'exploitant constatera pourtant que les avantages apportés sont très nombreux en ce qui concerne le réseau, la conduite, la protection et l'entretien.

Le hacheur et son réseau d'alimentation

Les avantages apportés au réseau par le hacheur peuvent se classer en fonction de deux caractéristiques : économie d'énergie et faibles courants de ligne à basse vitesse.

L'économie d'énergie apporte :

- une meilleure utilisation d'un réseau existant, qui pourra admettre un nombre de trains plus élevé ou de meilleures performances par une tension en ligne

plus élevée (et pour un réseau nouveau, un dimensionnement plus favorable des installations),

- une diminution de la quantité de chaleur dissipée dans les trains, la voie et les stations : ceci étant important pour les réseaux en tunnel et moins important pour les réseaux extérieurs, mais il faut remarquer que l'énergie du freinage mécanique, absorbée principalement par les roues, est restituée en partie dans les stations,
- une diminution du prix d'exploitation qui n'est pas négligeable.

Les faibles courants de ligne à basse vitesse permettent :

- une captation facile, sans détérioration aux points de contact,
- en cas de défaillance de plusieurs sous-stations, de faire circuler les trains, à vitesse réduite, mais avec le plein effort de traction si c'est nécessaire (en rampe par exemple).

La conduite des trains

Elle est avantagée par la rapidité et la progressivité du réglage qui donnent :

- des manœuvres faciles à toutes les vitesses et, en particulier, pour les accouplements,
- une conduite facile à vitesse constante, aussi bien manuelle qu'automatique (« vitesse imposée » ou pilotage automatique) et sans fatigue des équipements,
- des commutations traction - freinage ou inversement sans délai,
- une meilleure adhérence roue/rail en raison des variations progressives de l'effort,
- une intervention rapide en cas de patinage pour le retour à une situation normale.

L'absence de rhéostat de démarrage procure un avantage supplémentaire de conduite : dans le cas où un train très chargé est arrêté en rampe, le démarrage peut être extrêmement lent ; la longue durée d'un démarrage ne crée guère plus de contrainte au hacheur qu'aux moteurs alors qu'elle peut entraîner la destruction d'un rhéostat.

Enfin, l'ensemble de ces propriétés facilite le pilotage automatique. Il peut être conçu sans complications puisqu'il peut demander, sans inconvénient pour l'équipement, des ajustements fréquents de l'effort de traction ou de freinage, des commutations traction-freinage fréquentes, des fonctionnements près de la limite d'adhérence, des réglages fins de la vitesse pour toutes valeurs de l'effort. L'arrêt précis (tir au but) est facilité.

La protection apportée par le hacheur

Le hacheur permet d'améliorer la protection du réseau d'alimentation.

En effet, si le réseau n'alimente que des hacheurs, il n'y aura plus de variations rapides de courant en fonctionnement normal.

Il est possible alors de placer des détecteurs assez sensibles en di/dt et de déceler ainsi un court-circuit même s'il est éloigné des sous-stations.

Le hacheur améliore aussi la protection sur le train :

- il protège des surtensions du réseau tous les organes qui sont branchés à la sortie de son filtre,
- en cas de défaut dans le circuit alimenté par le hacheur (self de lissage, moteur, commutateur traction-freinage) les rapides détecteurs de courant du hacheur provoquent un arrêt immédiat du hacheur et, éventuellement, un ordre d'ouverture du disjoncteur.

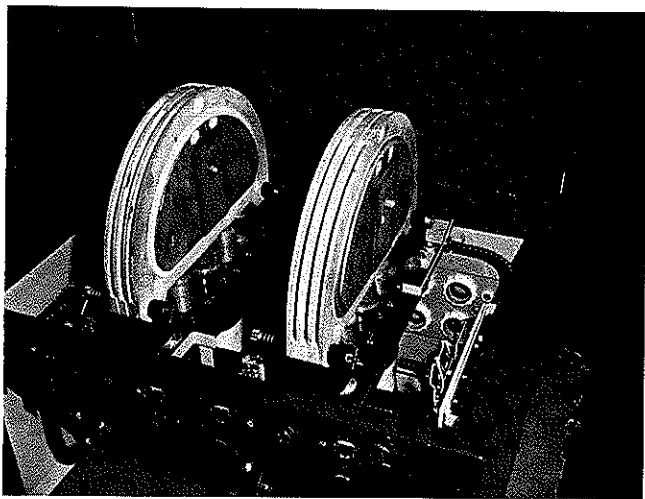


Fig. 15 Coffret disjoncteur type métro comportant deux appareils type CRA 1000 (un pour le freinage, un pour la traction) (métro de Montréal).

L'entretien

L'entretien des parties mécaniques

La diminution générale des contraintes mécaniques ne peut qu'apporter un gain sur l'usure ou la longévité de certaines pièces et justifiera, plus tard, un espacement des opérations d'entretien correspondantes. Mais, dès maintenant, un gain important d'entretien est évident. Il réside dans l'économie sur le remplacement des sabots de freins, lorsqu'un hacheur réalise le freinage électrique.

L'entretien des parties électromécaniques

L'électromécanique associée à un hacheur de notre conception est très restreinte. Elle comprend : un inverseur de sens de marche, deux disjoncteurs, éventuellement des sectionneurs d'isolement.

En fonctionnement normal, ces appareils ne coupent jamais aucun courant. En cas de défaut, c'est le hacheur qui réalise l'interruption du courant et il est rare qu'un disjoncteur ait à couper.

Dans ces conditions, l'entretien consiste seulement à vérifier le bon état des organes avec un intervalle assez long.

Entretien des parties électriques

Les parties électriques comprennent des selfs, des condensateurs, des semi-conducteurs de puissance et, pour les courants faibles, des semi-conducteurs avec leurs composants associés.

Pour tous ces composants, l'usure progressive n'existe pas. Par contre, des ruptures mécaniques ou électriques peuvent survenir sans indice précurseur. Compte tenu des taux de défaillance connus, il est possible d'évaluer, au moins approximativement, la Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement (MTBF). Le matériel étant conçu pour que ce temps soit compatible avec l'exploitation, il n'y a pas à faire d'entretien préventif ; il suffit de réparer les défauts quand ils se présentent.

Toutefois, les circuits de ventilation subissent un encrassement permanent et un nettoyage périodique est nécessaire. On en profite évidemment pour faire un examen visuel de tous les constituants.

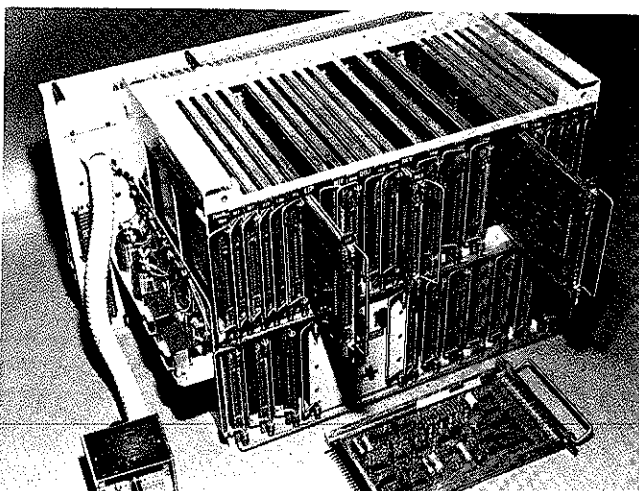
Vérification des hacheurs

L'entretien qui vient d'être décrit rapidement doit être complété par des vérifications systématiques très simples du bon fonctionnement des hacheurs.

A cet effet, les hacheurs JEUMONT-SCHNEIDER comportent des circuits supplémentaires permettant, par une manœuvre très simple dite « essai à blanc », d'exécuter automatiquement des vérifications très complètes de l'ensemble des circuits.

La vérification peut être effectuée par le conducteur avant la sortie du dépôt. Il suffit d'actionner le contact d'essai à blanc, de constater qu'une lampe clignote, de donner un ordre quelconque de traction (le train demeure immobile) et de constater que la lampe s'éteint. Ces opérations prennent quelques secondes seulement et permettent pourtant de garantir que les fonctions essentielles du hacheur sont correctes.

Fig. 16 Tiroir de logique hacheur type métro (MF 77 - Métro de Paris).



Lors des contrôles en atelier, la localisation des pannes sur le train même est facilitée par le dispositif d'essai à blanc, par les prises de test et par les voyants.

Enfin, les sous-ensembles électroniques complexes (cartes et tiroirs) sont débrochables et peuvent être testés séparément sur des appareils spécialisés.

La signalisation et les télétransmissions en présence des équipements de traction

Traction conventionnelle

Si les systèmes de traction conventionnels ne perturbent guère les systèmes à courants faibles, c'est que leur coexistence a été aménagée ; le plus souvent, les systèmes à courants faibles ont été conçus pour s'adapter aux systèmes de traction existants.

Le réseau d'alimentation produit un courant continu par redressement (hexaphasé ou dodécaphasé) du courant alternatif de fréquence industrielle 50 Hz ou 60 Hz.

Distribué par la ligne de contact et les rails, ce courant tend à influencer par conduction ou par induction les circuits de voie de la signalisation et les lignes de télétransmissions parallèles à la voie.

Le spectre comprend principalement l'une de ces fréquences : (50 Hz ou 60 Hz) \times (6 ou 12), soit : 300 ou 360 Hz ou 600 ou 720 Hz, mais on peut trouver également des raies notables à tous les multiples de 50 Hz ou 60 Hz.

Tous les systèmes de signalisation et de télétransmission actuels ou à créer pour des réseaux à courant continu sont conçus pour fonctionner en présence de ces fréquences.

Les lignes aériennes de transmission, compensées par transpositions, sont influencées mais d'une façon le plus souvent acceptable.

Les câbles de transmission présentent généralement une large immunité et ne sont pas perturbés.

Quant aux circuits de voie, s'ils sont « à fréquence », ils utilisent évidemment des fréquences différentes de celles du spectre du réseau d'alimentation et, de plus, la tendance actuelle est de moduler ces fréquences.

Parmi les autres types de circuits de voie, les circuits de voie JEUMONT-SCHNEIDER à impulsions de tension élevée bénéficient d'une grande immunité aux perturbations. Cette immunité est due en particulier à la forme des impulsions, apériodiques et dissymétriques, et à l'utilisation d'une puissance instantanée très élevée : plusieurs kilowatts en crête. C'est pourquoi ce type de circuit de voie est compatible avec tous les systèmes de traction, conventionnels et modernes.

Actuellement, JEUMONT-SCHNEIDER a installé plus de 45.000 circuits de voie de ce type dans le monde entier. Ce succès ne provient pas que de leur grande immunité aux perturbations :

- le « shuntage » est assuré par la tension élevée, même si le véhicule est léger et la voie sale ;
- l'intervalle de répétition des impulsions sert à transmettre les informations à bord (cab-signal par exemple).

Traction moderne

Principes

Les hacheurs, comme tous les systèmes de traction modernes, sont conçus pour que les systèmes à courants faibles compatibles avec la traction électrique, puissent s'adapter aisément :

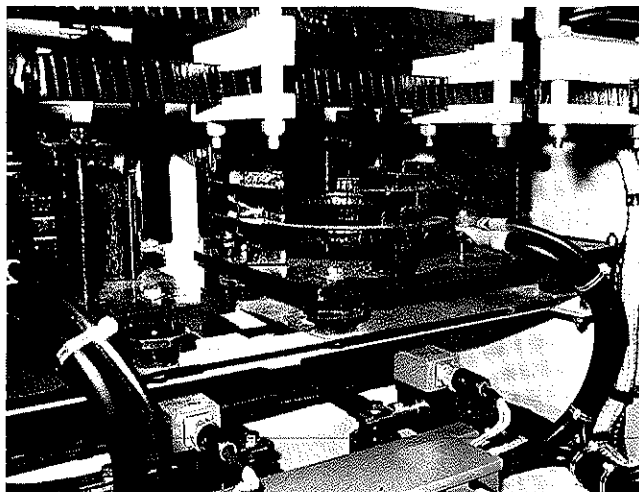
- Les fréquences de fonctionnement du hacheur sont choisies de façon à ce que le spectre de son courant de ligne (et même des tensions qu'il peut induire), soit contenu dans celui qui existe déjà sur le réseau (il ne se produit pas de raie supplémentaire).
- Par le filtre d'entrée, par l'entrelacement des phases et par quelques précautions de câblage et de blindage, l'amplitude des raies du hacheur est rendue telle, par rapport aux raies existantes, qu'il ne puisse en résulter une gêne supplémentaire.

En d'autres termes, les manifestations du hacheur se confondent avec celles qui existent déjà.

La mise en œuvre de ces principes s'est révélée relativement simple. Il a suffi :

- de renoncer à faire fonctionner le hacheur à fréquence variable.

Fig. 17 Jeu de selfs de phases (métro de Montréal).



Le fonctionnement à fréquence variable implique qu'une large bande du spectre lui soit entièrement réservée. Or, les signaux et télétransmissions habituels ont leur place dans cette même bande et, à notre connaissance, ils ont toujours été perturbés par les hacheurs expérimentaux à fréquence variable. Ces expériences ont laissé croire que le hacheur était un perturbateur puissant. Au contraire, lorsqu'il utilise des fréquences fixes bien choisies, le hacheur est extrêmement discret.

- de choisir une fréquence fixe de fonctionnement normal (généralement 300 ou 360 Hz), telle que le spectre du courant du hacheur soit contenu dans celui qui existe déjà sur le réseau,
- de choisir de même quelques fréquences inférieures, mais fixes également, pour assurer un réglage aussi fin qu'il est nécessaire aux faibles vitesses et aux faibles courants, en particulier au démarrage,
- de vérifier que le filtre d'entrée du hacheur et le nombre de phases, qui sont déterminés par d'autres considérations, assurent une réduction suffisante de l'amplitude des raies du spectre.

Composantes alternatives dans le courant de ligne

L'application numérique suivante montre l'influence du filtre et du nombre de phases dans la réduction de certaines raies du spectre.

Soit un réseau d'alimentation en courant continu, obtenu par redressement du courant industriel à 50 Hz au moyen de redresseurs hexaphasés. La tension redressée U aura une légère ondulation dont la composante principale, de fréquence 300 Hz, aura une amplitude de crête de 5 % de U environ.

Un équipement conventionnel, dont les moteurs, directement sur la ligne, absorberaient un courant continu i_m , se comporterait comme une résistance $R = U / i_m$

et ferait circuler dans la ligne une composante i_a à 300 Hz, d'amplitude de crête 5 % de i_m environ.

Un équipement équivalent à hacheur fait circuler des courants plus faibles.

Pour le montrer, il convient de considérer séparément les courants produits par le hacheur et ceux produits par la sous-station.

■ Courants produits par le hacheur

Le schéma général est celui des hacheurs entrelacés. Le hacheur en fonctionnement ($0 < h < 1$) produit une ondulation de courant dans la ligne à la fréquence $q.f$ (q = nombre de phases, f = fréquence de fonctionnement de chaque phase).

Soit $i_j(q.f)$ la valeur de crête de ce courant alternatif dans la ligne :

$$i_j(q.f) = \frac{i_m}{16 L_o C_o q^3 f^2} \cdot A$$

A : valeurs positives de $(qh - k) [1 - (qh - k)]$

avec k entier tel que $0 \leq k \leq q - 1$

Application 1 :

$$i_m = 1200A$$

$$L_o C_o = 16.10^{-6}$$

$$q = 2$$

$$f = 300 \text{ Hz}$$

$$A = 1/4 \text{ (valeur maximale obtenue pour } h = 1/4, k = 0 \text{ ou } h = 3/4, k = 1).$$

d'où : $i_j(600) = 1,6A$

soit : 0,14 % de i_m , ce qui est négligeable.

Application 2 :

C'est le cas précédent mais avec une phase arrêtée et un courant de 600A. ($q = 1, i_m = 600A$.)

d'où : $i_j(300) = 6,5 A$.

soit 1 % de i_m , de qui est environ 5 fois plus faible que le courant à 300 Hz que laisserait circuler un équipement conventionnel.

On peut de même calculer les composantes alternatives produites par le hacheur lors des fonctionnements aux fréquences inférieures pendant le démarrage. L'influence de la fréquence ($1/f^2$) tend à faire augmenter le courant alternatif mais, comme le hacheur ne fonctionne alors qu'avec des valeurs de h très faibles, il y a compensation partielle. Pratiquement la composante alternative peut atteindre 2 à 3 % de i_m , ce qui n'est pas gênant, même au cours de manœuvres longues.

■ Courant produit par la composante à 300 Hz de la tension fournie par la sous-station.

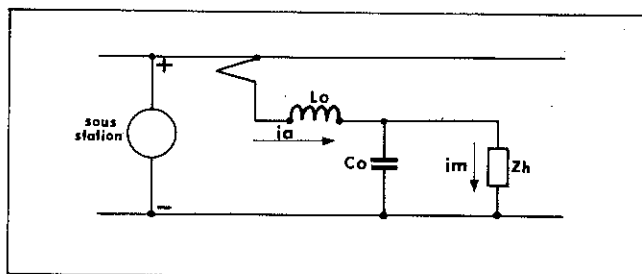


Fig. 18 Schéma général d'une sous-station alimentant un hacheur.

Z_h représente l'impédance des moteurs vue à travers le hacheur. C'est une impédance complexe, fonction des conditions de charge. On la compose avec L_o et C_o , et on cherche sa valeur minimale.

Avec les valeurs numériques des cas précédents, on trouve des impédances à 300 Hz voisines de 6 ohms, c'est-à-dire approximativement $L_o \omega$.



Fig. 19 Locomotive électrique à courant continu 1500 V - Série EU 4500 C1 - type BB 7200 à bogie monomoteur avec freinage rhéostatique. Puissance 4400 kW - Vitesse maximale possible 180 km/h. Vitesse maximale de service 160 km/h.

La composante à 300 Hz étant 5% U ; le courant à 300 Hz sera : si $U = 750 \text{ V}$ et $R = 6 \Omega$:

$$i_{i(300)} = \frac{5 \cdot 750}{100 \cdot 6} = 6,25 \text{ A}$$

Pour les courants moteurs considérés (1200 A et 600 A), ce courant alternatif n'est que de 0,5 et 1 %, bien plus faible qu'avec les équipements conventionnels.

On calcule de même l'impédance présentée par le hacheur et son filtre à 50 Hz. Elle est alors relativement faible, mais ceci est admissible. En effet, le seul système qui pourrait être perturbé, (la signalisation à 50 Hz) doit être abandonné pour les installations nouvelles. Sur les lignes qui en sont encore équipées, la sous-station, source éventuelle de tension à 50 Hz, doit comporter l'impédance nécessaire pour limiter le courant à cette fréquence.

Conclusion

L'avenir des hacheurs

En traction ferroviaire, les hacheurs existent depuis une décennie seulement. Pourtant, ils remplacent les équipements conventionnels dans bien des cas parce que les exploitants les préfèrent déjà.

Or, les conditions nouvelles apportées par les hacheurs permettent de reconsidérer la conception des moteurs et du réseau d'alimentation en vue d'obtenir des performances plus satisfaisantes.

Il faut donc s'attendre à de nouveaux progrès.

Ils confirmeront l'avantage acquis et devraient même écarter longtemps d'éventuels procédés concurrents.

BIBLIOGRAPHIE

Revue JEUMONT-SCHNEIDER n° 11 - Juin 1971

L. LEROY

Applications aux engins de traction des régleurs de courant continu du type « hacheurs ».

Revue Jeumont-Schneider N° 14 - Décembre 1972

J. DEMOULIN - F. JONARD

Équipement de la locomotive électrique CC 20002 avec un prototype de hacheur de 4400 kW.

Revue Générale des Chemins de Fer - Janvier 1973

A. COSSIE

Le hacheur en traction électrique à courant continu.

A. COSSIE

Les hacheurs à la S.N.C.F. - Réalisations expérimentales.

J. LEROY - S. GUIBEREAU

Expérimentations d'équipements à hacheurs (Késar) pour le contrôle des moteurs de traction du métropolitain de Paris.

Revue Générale d'Électricité - Tome 82 - N° 4 - Avril 1973

J. LEROY - S. GUIBEREAU

Le hacheur de courant Késar en traction. Réalisations et perspectives d'avenir pour le métropolitain.

A. COSSIE

Compte rendu d'essais et de mesures à la S.N.C.F. sur les engins de traction équipés de hacheurs.

C. HENNEBERT

Essais et mesures de perturbations dues à une motrice à hacheur de courant.

Revue Générale des Chemins de Fer - Avril 1974

A. COSSIE

Génération des harmoniques de courant de traction et perturbations engendrées par les engins moteurs équipés de thyristors.

A. FROEBE

Influence des engins moteurs à réglage par thyristors sur le fonctionnement des circuits de voie.

Revue Générale des Chemins de Fer - Juin 1974

R. BOILEAU - J. DUPUY

Les locomotives BB 7200 et BB 22200 de la S.N.C.F.

Revue Générale de l'Électricité - Janvier 1975

P. MOURY - H. SCHOORENS et G. SEQUIER

Caractéristiques du transformateur de tension continue utilisant un hacheur en montage parallèle.