

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 102 (1976)
Heft: 12

Artikel: Le moteur asynchrone en traction électrique
Autor: Desponds, Marcel
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-72934>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 02.02.2025

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

LE CHEMIN DE FER: UN MOYEN DE TRANSPORT MODERNE (suite)

L'abondance des matières nous avait contraint à renvoyer la publication du dernier article de cette série; nous le présentons aujourd'hui à nos lecteurs, en relevant qu'il traite d'un développement commun des CFF et de l'industrie électrique suisse, à l'avant-garde du progrès dans le domaine de la traction électrique.

(Rédaction)

Le moteur asynchrone en traction électrique

par MARCEL DESPONDS, Yverdon

1. Introduction

L'utilisation de moteurs asynchrones en traction électrique rencontre actuellement un regain d'intérêt.

L'idée en soi n'est pas nouvelle, puisque des moteurs asynchrones triphasés ont déjà été utilisés lors des débuts de l'électrification des chemins de fer. C'est ainsi que, par exemple, certains tronçons des lignes du Simplon (Iselle - Sion), du Brenner et du réseau du nord de l'Italie ont initialement été électrifiés en courant triphasé.

Comme la technique d'alors obligeait d'alimenter les moteurs de traction à la fréquence fixe du réseau, les convois ne pouvaient rouler qu'à deux ou quatre vitesses de régime, selon le nombre de commutations possibles du nombre de pôles des moteurs.

Le captage du courant nécessitait une caténaire bipolaire délicate qui posait des problèmes, en particulier sur les aiguilles.

Cette difficulté a été résolue par l'apparition de locomotives alimentées en courant monophasé sur lesquelles ce dernier était transformé en courant triphasé de même fréquence au moyen de diviseurs de phases rotatifs (Norfolk et Western Railway, 1915; Hegyeshalom - Budapest, 1918). Comme les moteurs étaient toujours alimentés à fréquence fixe, ces locomotives ne pouvaient également circuler qu'à un nombre limité de vitesses de régime.

Devant ces difficultés d'ordre technique ou d'exploitation, ces systèmes ont été abandonnés au profit d'autres utilisant des moteurs série à collecteurs alimentés selon le système d'électrification choisi en courant alternatif monophasé, en courant continu ou en courant ondulé.

Comme nous le verrons par la suite, la possibilité d'utiliser des moteurs asynchrones en traction ferroviaire est liée à la nécessité de les alimenter avec du courant de tension et de fréquence variables. La première réalisation de ce genre est l'œuvre des Ateliers de Constructions d'Oerlikon qui ont livré dès 1955 à la SNCF 20 locomotives du type « mono-triphasé » sur lesquelles le courant monophasé pris à la caténaire est transformé par des groupes convertisseurs rotatifs en courant triphasé variable en fréquence et en tension. Ce courant alimente les moteurs de traction asynchrones.

C'est ce principe qui fait l'objet des études actuelles, dans lesquelles les lourdes machines tournantes à collecteur sont remplacées par des convertisseurs statiques utilisant les composants modernes de l'électronique de puissance.

2. L'attrait du moteur asynchrone

Le moteur à collecteur à caractéristique série est considéré comme le moteur de traction classique. Il a atteint un degré de perfectionnement et une fiabilité remarquables. Sa caractéristique couple/vitesse correspond aux besoins de la cinématique des convois. On peut dès lors se poser la question de l'intérêt que présente le moteur asynchrone dans cette application.

Il faut à ce sujet rappeler les avantages qui dès les débuts de l'électrification ont motivé l'intérêt porté à ce type de moteur. Le moteur asynchrone est simple, robuste et bon marché. Il est caractérisé par l'absence de collecteur et de balais et ne nécessite par conséquent pratiquement pas d'entretien.

Des considérations plus récentes expliquent aussi le regain d'intérêt que rencontre ce genre de moteur. Les grands réseaux envisagent des lignes à grande vitesse sur lesquelles les plafonds pourraient être de l'ordre de 300 km/h. Les engins moteurs nécessaires à un tel genre d'exploitation doivent répondre à des exigences nouvelles. La puissance installée sur les engins de traction doit être nettement supérieure aux valeurs actuelles, car elle croît en première approximation avec la troisième puissance de la vitesse. La stabilité de marche et la maîtrise des efforts de sollicitation de la voie imposent de réduire le plus fortement possible les masses non amorties des bogies. Il en résulte pour le moteur de traction la double exigence d'être aussi léger que possible et de présenter une puissance spécifique élevée.

L'absence de collecteur dans le moteur asynchrone offre des possibilités qui permettent de répondre à ces impératifs. Pour un encombrement donné, il est en effet possible d'augmenter la longueur de l'empilage, donc du volume du fer actif; la vitesse du moteur n'est plus limitée par la vitesse périphérique du collecteur; de plus il est, sans grande difficulté, possible d'alimenter le moteur à des tensions élevées. A puissance égale, le moteur asynchrone peut donc être plus petit et plus léger que le moteur série, ou à encombrement et poids égaux il sera plus puissant.

La caractéristique du moteur asynchrone, qui ne le prédestine pas aux tâches de traction, présente une propriété intéressante en ce qui concerne les qualités d'adhérence du véhicule moteur. Ceci est avantageux non seulement aux grandes vitesses mais également aux vitesses usuelles sur les lignes à caractère montagneux.

Ces réflexions montrent les possibilités qu'offre le moteur de traction asynchrone. Il reste à examiner quels sont les moyens à mettre en œuvre pour pouvoir en profiter.

3. Les caractéristiques

Les véhicules moteurs sont caractérisés par leur caractéristique effort-vitesse (fig. 193). Elle illustre la relation d'allure hyperbolique qui pour chaque cran de réglage n règne entre l'effort de traction disponible à la jante et la vitesse. Ce genre de relation est nécessaire en traction où il faut pouvoir exercer des efforts importants aux basses vitesses pour démarrer et accélérer des convois, alors que pour maintenir les vitesses supérieures, il suffit d'un effort moindre.

Si l'on considère l'allure de la caractéristique couple-vitesse d'un moteur à excitation série (fig. 194), on voit qu'il est simple d'obtenir avec ce moteur la caractéristique effort-vitesse désirée pour l'engin moteur puisqu'il suffit pour cela de faire varier la tension d'alimentation des moteurs. Le réglage des crans n de la figure 193 se fait par sauts discrets sur les engins à commande électromécanique (graduateurs) et de façon continue sur les engins à réglage électronique intégral des circuits de puissance.

La caractéristique couple-vitesse d'un moteur asynchrone (fig. 195) présente une allure très différente de celle d'un moteur série. Pour une fréquence et un flux statorique donnés, elle a entre le couple nul et la proximité du couple de décrochage le caractère du moteur à excitation en dérivation. Cette caractéristique montre une propriété intéressante du moteur asynchrone : il est capable de passer directement du régime moteur au régime générateur sans aucun changement de couplage alors que le moteur série a besoin pour cela de l'inversion du flux ou du courant d'induit. Cette particularité peut être utilisée avantageusement pour réaliser un freinage électrique.

Si comme dans la figure 196 on compare dans le plan couple-vitesse l'allure des caractéristiques du moteur série et du moteur asynchrones, on s'aperçoit que, pour un point de travail A donné, l'emballement Δn du moteur asynchrone est plus faible que celui du moteur série pour un décrochement ΔC commun du couple. Cette propriété peut être judicieusement utilisée lors du décel de patinage des roues en commutant alors le moteur asynchrone sur sa caractéristique naturelle pour combattre le patinage.

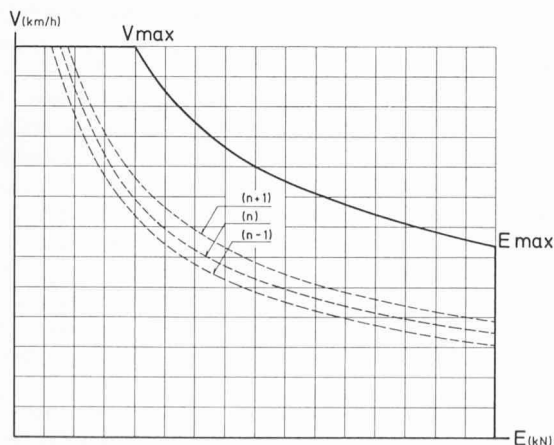


Fig. 193. — Caractéristique effort-vitesse d'un engin moteur.
 E effort de traction à la jante
 V vitesse

Dans ses conditions normales d'utilisation, c'est-à-dire à fréquence et tension d'alimentation fixes, le moteur asynchrone n'est donc pas favorable à la solution des problèmes de traction électrique. Pour obtenir les caractéristiques

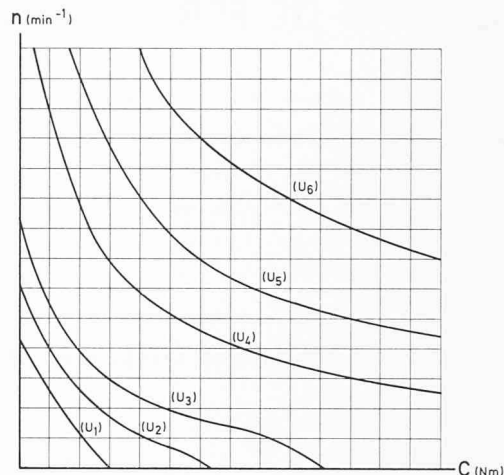


Fig. 194. — Caractéristique couple-vitesse d'un moteur à excitation série.

C couple
 n vitesse de rotation
 U_{1-6} tension d'alimentation

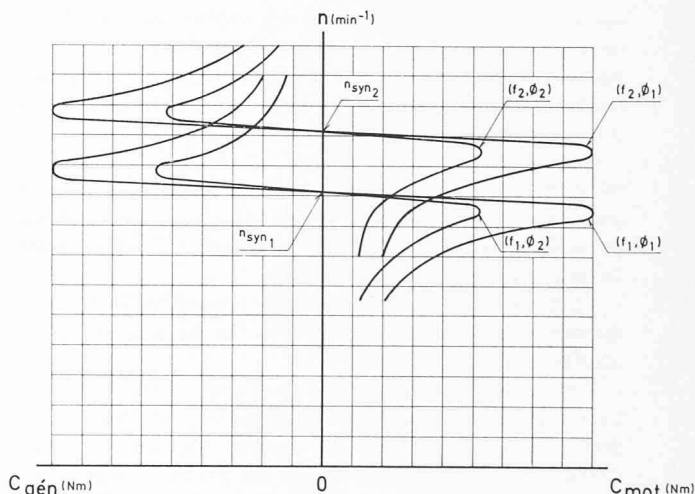


Fig. 195. — Caractéristique couple-vitesse d'un moteur asynchrone.

C couple
 n vitesse de rotation
 ϕ_{1-2} flux statorique
 f_{1-2} fréquence statorique

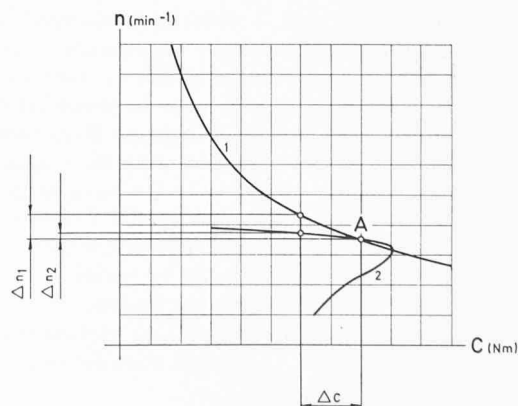


Fig. 196. — Influence de la pente des caractéristiques.

C couple
 n vitesse de rotation
 1 caractéristique du moteur série
 2 caractéristique du moteur asynchrone

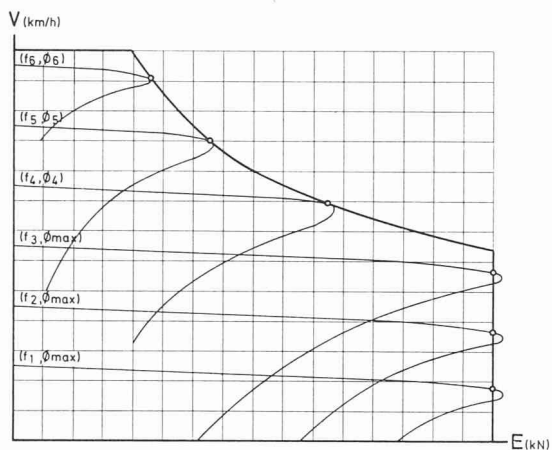


Fig. 197. — Caractéristique effort-vitesse d'un engin moteur réalisée par une infinité de caractéristiques asynchrones.

E effort de traction à la jante
 V vitesse
 ϕ flux statorique
 f fréquence statorique

téristiques d'allure hyperbolique désirées il faut disposer d'un point de travail stable sur une infinité de caractéristiques asynchrones de flux et fréquence différents. La figure 197 montre à titre d'exemple comment la courbe enveloppe d'une caractéristique effort-vitesse peut être réalisée. Il en résulte que, pour pouvoir être utilisé judicieusement en traction électrique, le moteur asynchrone doit être alimenté en tension et fréquence variables.

4. Le schéma de principe

Le courant triphasé des moteurs de traction est obtenu à partir d'un circuit à courant continu qui alimente un convertisseur, lequel délivre à son tour de l'énergie triphasée variable en fréquence et en amplitude.

Selon les conditions de service, on peut envisager sur le plan de la conversion d'énergie les trois variantes principales suivantes :

I. Engins monophasés :

Le courant pris à la caténaire alimente un transformateur qui abaisse la tension de ligne (15 000 V, $16 \frac{2}{3}$ Hz ou 25 000 V, 50 Hz) et alimente à son tour un redresseur. C'est à partir de la tension continue délivrée par ce redresseur que les convertisseurs génèrent le courant triphasé des moteurs de traction.

II. Engins à courant continu :

Le courant pris à la caténaire (1,5 ou 3 kV =) peut en principe être appliqué directement aux convertisseurs d'alimentation des moteurs de traction.

III. Engins diesel-électriques :

Le moteur diesel entraîne un alternateur polyphasé qui alimente un redresseur dont la tension continue est appliquée aux convertisseurs d'alimentation des moteurs de traction.

Le schéma bloc de ces trois variantes est donné à la figure 198.

5. Le convertisseur

Pour obtenir du courant triphasé de fréquence et amplitude variables à partir d'une tension continue que nous supposons constante, il est fait usage de convertisseurs à commutation forcée. Le principe de ces convertisseurs appelés également onduleurs consiste dans la production d'une tension sinusoïdale à partir de la valeur moyenne d'impulsions d'amplitude constante et de durée variable.

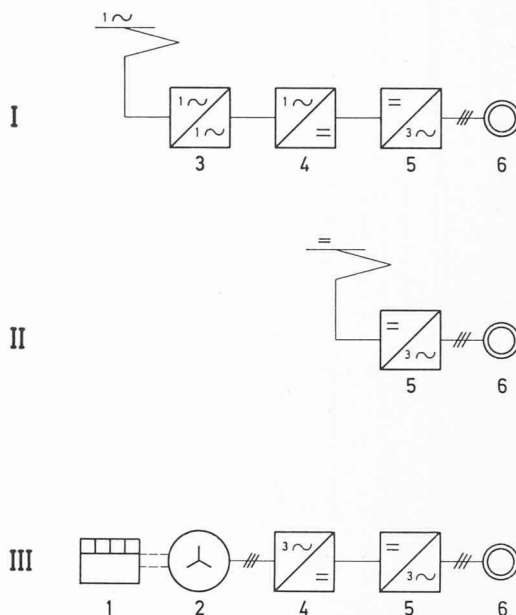


Fig. 198. — Schéma-bloc d'engin de traction à moteurs asynchrones.

I engin monophasé
 II engin à courant continu
 III engin diesel-électrique
 1 moteur diesel
 2 alternateur
 3 transformateur
 4 redresseur
 5 onduleur

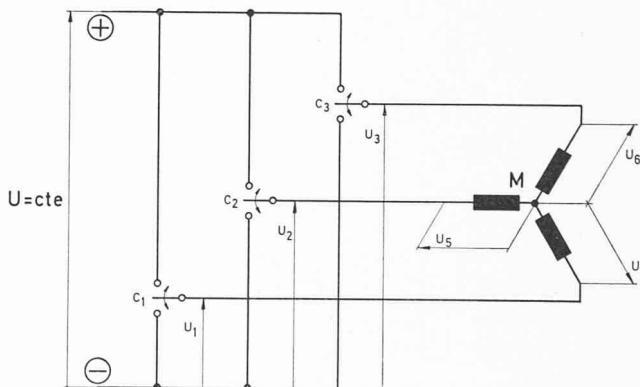


Fig. 199. — Principe de fonctionnement d'un onduleur triphasé.
 C_{1-3} commutateurs
 M moteur triphasé

La figure 199 montre le schéma simplifié d'un convertisseur alimentant un moteur triphasé couplé en étoile. Chaque phase comporte un commutateur qui permet de relier l'enroulement du moteur soit au pôle positif, soit au pôle négatif de la source de courant continu. On voit dans la figure 200 la séquence des différentes tensions de l'onduleur. Selon la position des commutateurs, les tensions de phase U_1 , U_2 et U_3 prennent les valeurs 0 ou $+U$. Dans le procédé de la sous-oscillation, la fréquence de hachage est un multiple de la fréquence fondamentale souhaitée pour le moteur.

Une modulation sinusoïdale de la largeur des impulsions donne des valeurs moyennes telles qu'il en résulte une variation de tension dont l'allure est indiquée en traitillé. Par suite du couplage en étoile des enroulements du moteur, les tensions de phase prennent les valeurs

$$0, \pm \frac{U}{3}, \pm \frac{2U}{3}$$

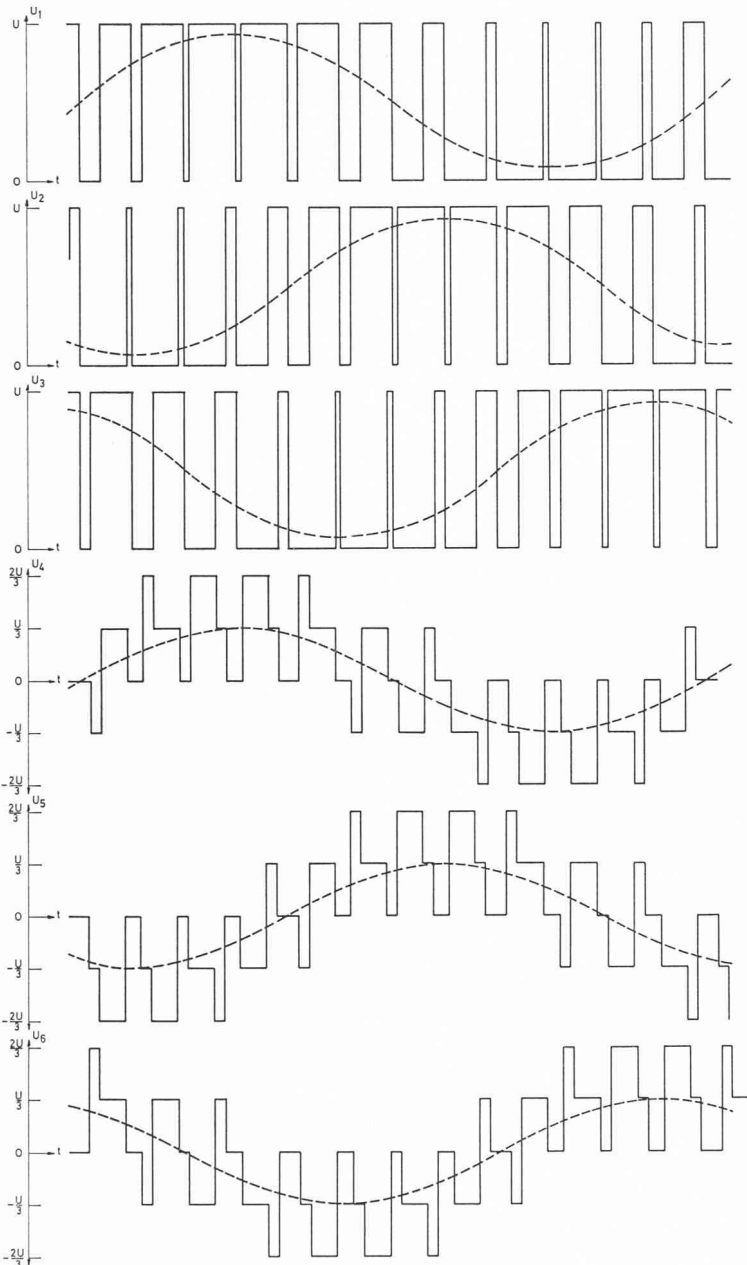


Fig. 200. — Séquences des tensions d'un onduleur triphasé à pulsation simple dans le procédé de la sous-oscillation.

Il est bien entendu que, pour les cadences de hachage utilisées en pratique qui sont de l'ordre de 500 impulsions par seconde, il n'est pas possible d'utiliser les commutateurs mécaniques dessinés sur le schéma de principe de la figure 199. Il est fait usage de commutateurs électroniques dont la figure 201a donne un exemple. Le circuit comporte deux thyristors principaux Th_1 et Th_2 et deux diodes principales D_1 et D_2 . Les thyristors conduisent le courant en provenance du pôle positif alors que celui circulant en direction du pôle négatif traverse les diodes. Le circuit comporte encore un dispositif d'extinction composé d'un circuit oscillant (formé par l'inductivité L et les condensateurs C) et de deux thyristors d'extinction Th_3 et Th_4 couplés en antiparallèle. L'allumage d'un thyristor d'extinction provoque le blocage du thyristor principal correspondant. La figure 201b donne une notation simplifiée de cet important ensemble électronique. Le schéma de principe de la figure 202 est équivalent à celui de la figure 199; les commutateurs mécaniques y ont été remplacés par les commutateurs électroniques en notation simplifiée.

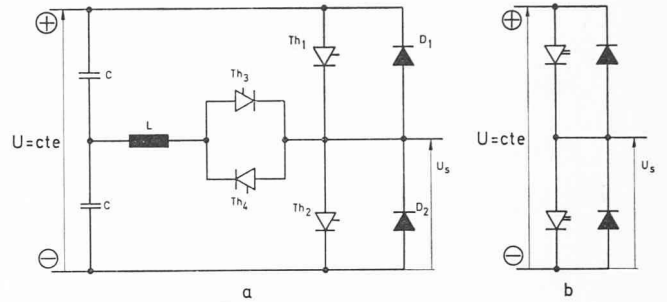


Fig. 201. — Schéma du commutateur électronique.

a schéma complet
b notation simplifiée
 Th_{1-2} thyristors principaux
 D_{1-2} diodes principales
 Th_{3-4} thyristors d'extinction
 L, C self et capacité du circuit oscillant d'extinction

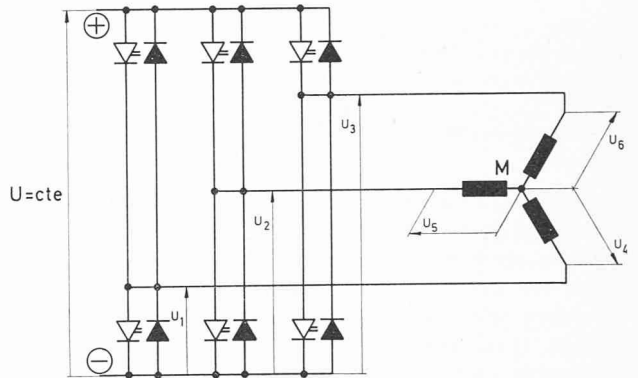


Fig. 202. — Schéma d'un onduleur triphasé à pulsation simple.

Le convertisseur décrit ci-dessus était à pulsation simple. Comme la fréquence de hachage est un élément déterminant pour le poids, le volume et le prix du convertisseur, on est tenté de la choisir la plus basse possible. Mais d'autre part il n'est pas avantageux pour le moteur d'avoir les harmoniques de tension et de courant plus élevées qui résultent de l'abaissement de la fréquence de hachage.

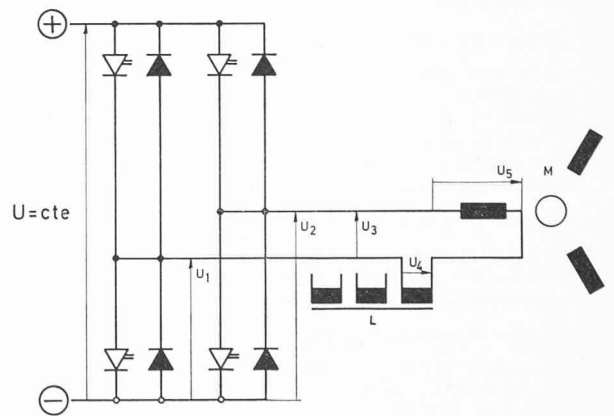


Fig. 203. — Schéma d'une phase d'un onduleur triphasé à double pulsation.

Il est possible de faire face à ces exigences contradictoires au moyen de convertisseurs à double pulsation illustrés à la figure 203. Chaque phase du moteur est alimentée par l'intermédiaire de deux commutateurs. Le circuit comporte encore une bobine de lissage L à couplage magnétique étroit entre les phases; cette bobine remplace le point neutre du moteur et élimine les harmoniques en phase du réseau triphasé. Aux vitesses inférieures la commande se fait selon le procédé de la sous-oscillation avec hachage déphasé dont la figure 204 donne les diffé-

rentes séquences. Les deux commutateurs d'une phase sont reliés de façon décalée aux pôles positif et négatif de la source continue de sorte que les impulsions de largeur variable de la tension de sortie du convertisseur prennent les valeurs 0 et $\pm U$. Par suite du couplage magnétique, la bobine de lissage L présente une tension proportionnelle à la valeur moyenne des tensions de sortie des trois commutateurs. La tension de phase prend les valeurs $0, \pm \frac{U}{3} \pm \frac{2V}{3}, \pm U, \pm \frac{4V}{3}$ et approche assez correctement la forme sinusoïdale malgré une fréquence de hachage peu élevée.

La limite de ce procédé de commande est atteinte lorsque la fréquence fondamentale de la tension de sortie est d'environ cinq fois inférieure à la fréquence de hachage.

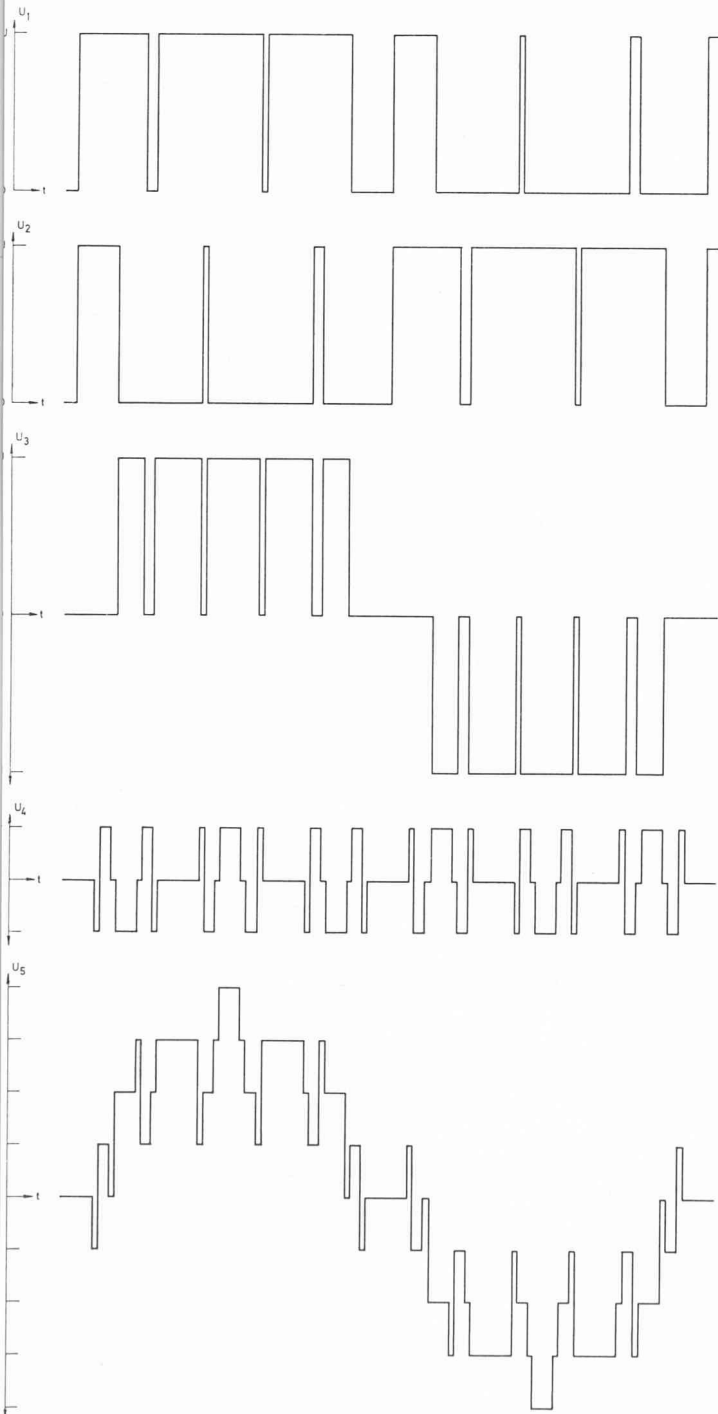


Fig. 204. — Séquences des tensions d'une phase d'un onduleur triphasé à double pulsation dans le procédé de la sous-oscillation.

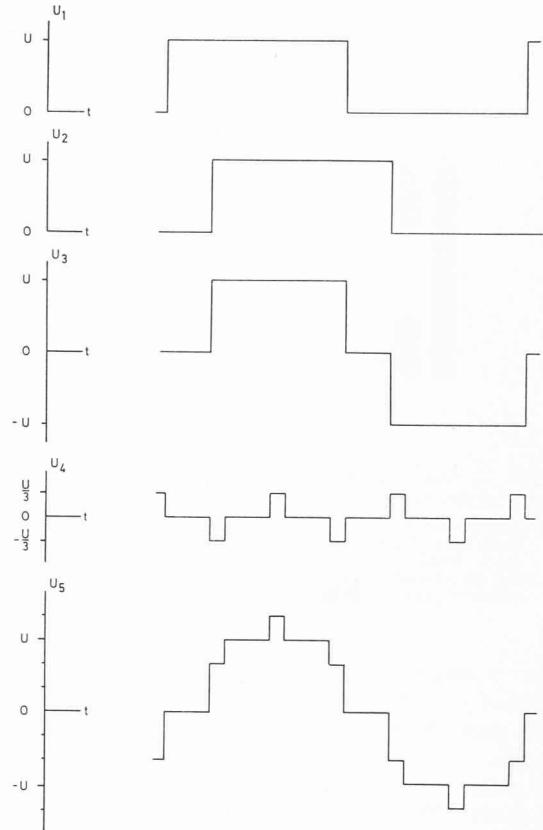


Fig. 205. — Séquences des tensions d'une phase d'un onduleur triphasé à double pulsation dans le procédé de la commande rectangulaire.

Pour les vitesses supérieures, on utilise le procédé de la commande rectangulaire illustré à la figure 205. La commutation ne se fait qu'une fois par demi-période de la fréquence fondamentale. Malgré la durée d'impulsion constante, l'amplitude de la tension alternative peut être variée par le décalage de la commutation des deux commutateurs de chacune des phases. L'amplitude maximale est atteinte lorsque les deux commutateurs travaillent de façon synchrone.

6. L'alimentation du circuit intermédiaire à courant continu

Pour des raisons de dimensionnement des semi-conducteurs et pour assurer la commutation, les onduleurs doivent être alimentés en tension continue constante. Une façon simple de compenser les variations de la tension de la caténaire consiste à prévoir sur les engins monophasés un redresseur partiellement commandé dont un exemple est donné à la figure 206.

Cette solution présente les inconvénients connus de tous les engins à redresseurs en ce qui concerne la consommation d'énergie réactive et les influences que les harmoniques du courant primaire peuvent exercer sur le réseau d'alimentation et sur les installations voisines de signalisation et de télécommunications.

De plus, le circuit intermédiaire est lissé par le filtre formé de la bobine L et la capacité C . La fréquence de résonance du circuit oscillant doit être nettement inférieure à la première harmonique de la tension de sortie du redresseur pour assurer une bonne stabilité du circuit lors de variations de la puissance des onduleurs. Ceci conduit — et tout particulièrement pour les réseaux à $16\frac{2}{3}$ Hz — à des valeurs très importantes de la capacité C dont l'encombrement devient vite considérable.

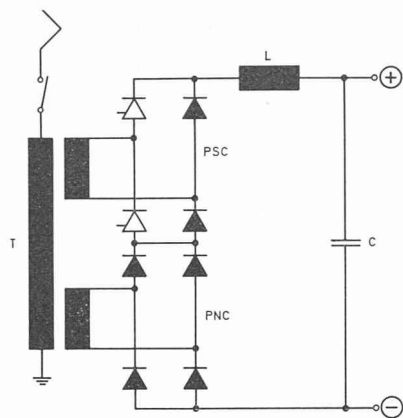


Fig. 206. — Alimentation du circuit intermédiaire par un redresseur partiellement commandé.

T transformateur
PNC pont non commandé
PSC pont semi commandé
L self de lissage
C condensateur de lissage

Pour pallier ces inconvénients, des solutions nouvelles proposent l'emploi de redresseurs pulsants pouvant travailler dans deux ou quatre des quadrants du plan de l'énergie.

Le principe du réglage dans deux quadrants est donné à la figure 207. Par un choix judicieux du hachage par l'interrupteur *A* on peut, en supposant l'inductivité d'entrée *L* nulle et la fréquence de hachage infinie, moduler le courant du réseau i_R de façon qu'il soit en phase avec la tension et que le courant i_0 entrant dans le redresseur soit de la forme $i_0 = \pm i_R \sin^2 \omega t$ selon le sens positif ou négatif de i_R . Le circuit oscillant $L_1 C_1$ est accordé sur le double de la fréquence du réseau et absorbe ainsi la composante alternative i_1 du courant redressé. L'allure des tensions et des courants du redresseur « 2 quadrants » est illustrée à la figure 208. Comme les éléments L_1 et C_1 travaillent à forte amplitude alternative, ils absorbent une énergie importante de sorte qu'à lissage égal ils auront des valeurs nettement plus faibles que dans le cas de l'alimentation par un redresseur partiellement commandé. La fréquence de hachage n'étant en réalité pas infinie, un condensateur de lissage C_1 est encore nécessaire; sa valeur sera relativement faible du fait que la fréquence de hachage est un multiple de la fréquence du réseau.

Il est bien entendu que le hachage ne se fait pas au moyen d'un interrupteur mécanique, mais par un commutateur électronique analogue à ceux utilisés dans les onduleurs.

L'inductivité d'entrée *L* n'est en réalité pas nulle. Il en résulte un déphasage φ entre la tension d'entrée du redresseur U_A et le courant i_R et la tension U_R du réseau. Pour avoir l'allure désirée du courant *i* (composante continue et 2^e harmonique) le hachage devrait se faire avec ce dépha-

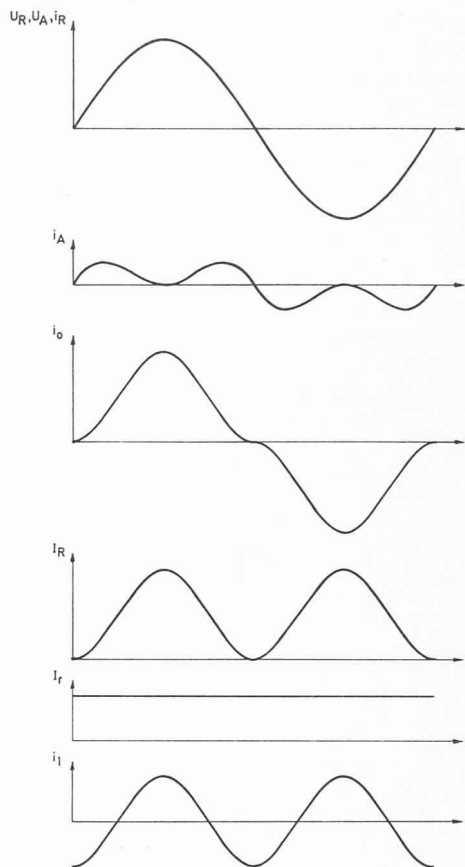


Fig. 208. — Allure des tensions et courants du redresseur pulsant « 2 quadrants » dans l'hypothèse d'une self d'entrée nulle et d'une fréquence de hachage infinie.

sage, selon le sens de i_R le courant i_0 serait

$$i_0 = \pm i_R \sin \omega t \cdot \sin (\omega t - \varphi).$$

Un tel produit présente des valeurs négatives qui ne peuvent pas être conduites par le redresseur et qui empêchent d'obtenir le courant *i* désiré. En d'autres termes, on peut dire que l'inductivité *L* a besoin d'énergie réactive qui doit être fournie par le réseau.

Pour pouvoir livrer cette énergie à partir du côté continu, il faut compléter le redresseur « 2 quadrants » de façon qu'il puisse transmettre de l'énergie en retour, ce qui conduit au redresseur « 4 quadrants » dont le principe est donné à la figure 209. La figure 210 montre l'allure des courants et tensions pour une inductivité $L \neq 0$, une valeur finie de la fréquence de hachage et en négligeant les harmoniques dues au hachage.

Le redresseur « 4 quadrants » apporte ainsi une solution au problème de l'alimentation puisqu'il ménage l'environnement électrique et réduit le volume des condensateurs de lissage du circuit intermédiaire. Comme il peut transmettre l'énergie dans les deux directions et qu'il

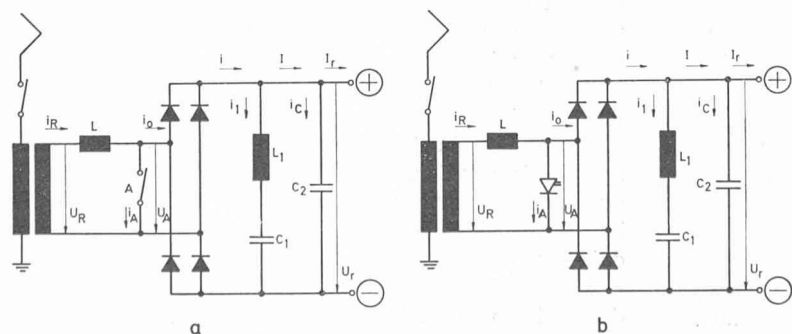


Fig. 207. — Redresseur pulsant « 2 quadrants ».

a schéma de principe
b schéma complet
L self d'entrée
A interrupteur
*L*₁, *C*₁ self et capacité du circuit oscillant
*C*₂ condensateur de lissage

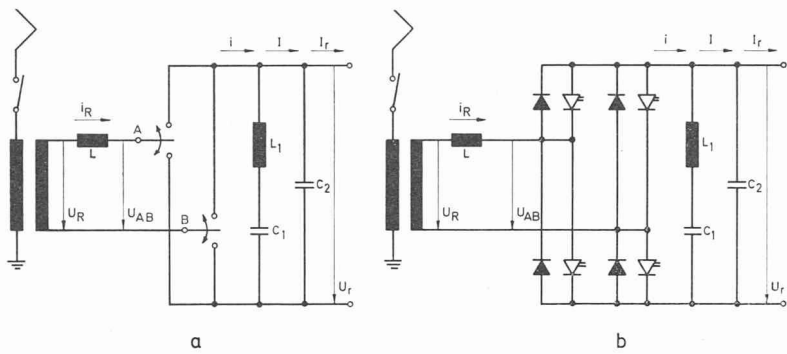


Fig. 209. — Redresseur pulsant « 4 quadrants ».

a schéma de principe
b schéma complet
L self d'entrée
A, B commutateurs
L₁, C₁ self et capacité du circuit oscillant
C₂ condensateur de lissage

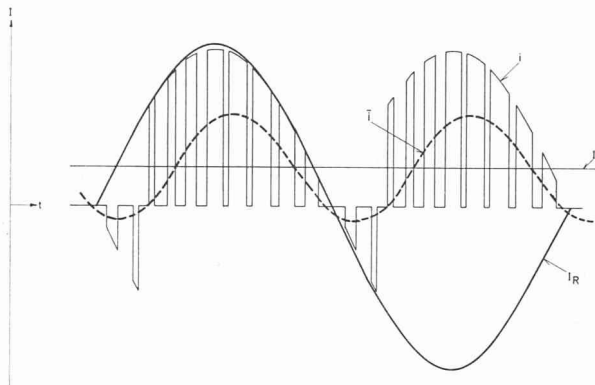
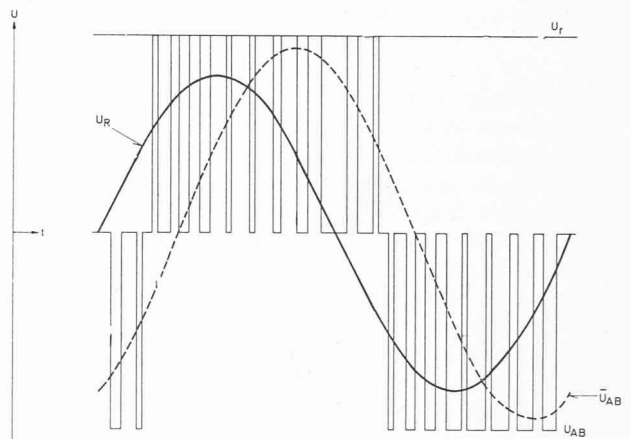


Fig. 210. — Courants et tensions du redresseur « 4 quadrants ». (sans les harmoniques de hachage) ▲ ▲



peut également être alimenté en courant continu, il offre des perspectives intéressantes pour la réalisation de freins électriques à récupération et d'engins moteurs « polycourant ».

7. La locomotive expérimentale Be 4/4 12001 des CFF

Suite à une initiative des Chemins de fer fédéraux suisses, la maison Brown Boveri & Cie, Baden a étudié

dès 1963 les possibilités d'utilisation de moteurs asynchrones en traction électrique. Après des essais approfondis en usine, la firme a livré en 1972 le matériel nécessaire à l'équipement de l'ancien fourgon automoteur De 4/4 1685 qui avait été mis hors service à la suite d'un incendie survenu en 1967. Les Ateliers principaux d'Yverdon ont procédé à la modification de la partie mécanique et au montage de l'équipement électrique. L'engin expérimental a été mis en service à fin 1972 (fig. 211). Ses caractéristiques principales sont données dans le tableau IV.

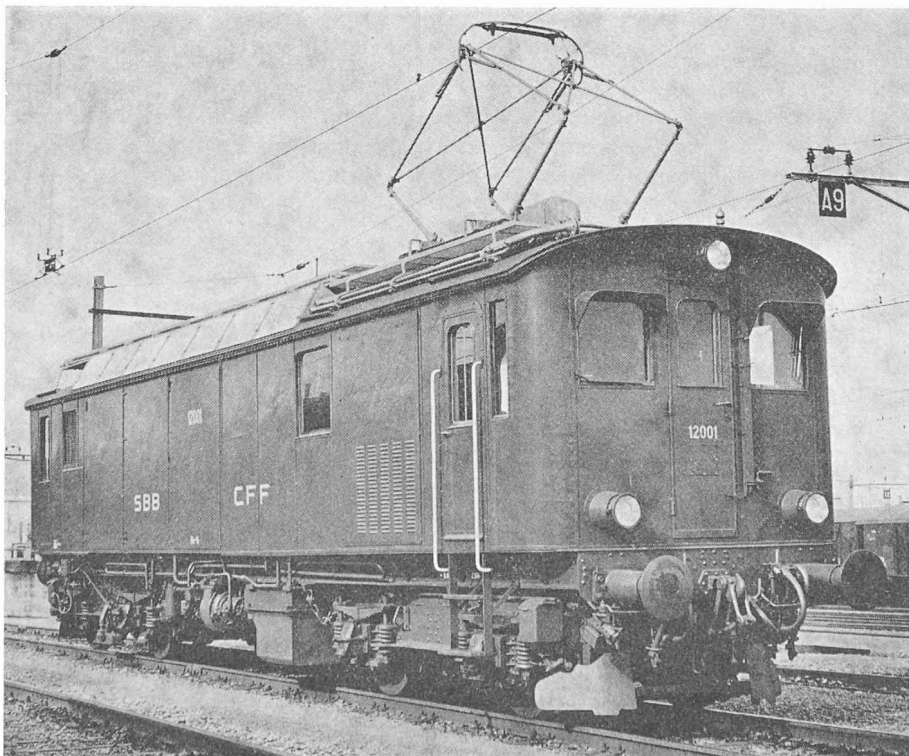


Fig. 211. — Locomotive expérimentale Be 4/4 12001 des CFF.

TABLEAU IV
Caractéristiques principales de la locomotive expérimentale
Be 4/4 12001

Diamètre des roues	1040 mm (à neuf)
Rapport d'engrènement	15 : 89
Effort de traction maximal = Effort de traction continu à la jante	128 * kN
Puissance continue à la jante vitesse correspondante	1330 ch 28 km/h
Effort de traction à la vitesse maximale	4,5 kN
Vitesse maximale	75 km/h
Masse en service = masse adhérente	64 t
Mise en service (après transformation)	1972
Constructeurs	SIG/At. Yv./BBC

* Pour des essais, l'effort maximal peut être porté à environ 200 kN.

Le couplage de principe des circuits de puissance est illustré par la figure 212. On y voit que l'alimentation du circuit intermédiaire à courant continu est réalisée par un redresseur partiellement commandé conformément au schéma de la figure 206. La tension du circuit intermédiaire est réglée à 500 V quelle que soit la tension de caténaire. La batterie de condensateurs d'une valeur totale d'environ 360 m F est disposée par quarts dans les quatre onduleurs qui alimentent chacun un moteur de traction.

Chaque onduleur travaille selon le principe de la double pulsation et est commandé individuellement. L'effort de traction peut être ainsi adapté aux conditions d'adhérence à la jante de chaque essieu. La plage de fréquence s'étend de 0 à 80 Hz, ce qui correspond aux vitesses du véhicule de 0 à 75 km/h. La commande se fait par le procédé de la sous-oscillation pour les vitesses de 0 à 41 km/h alors qu'aux vitesses supérieures c'est le principe de la commande rectangulaire qui est appliqué.

Le redresseur d'alimentation et les quatre convertisseurs sont ventilés artificiellement.

Les moteurs de traction également à ventilation forcée sont suspendus par le nez; ils transmettent le couple aux essieux par un engrenage dont la couronne est équipée d'éléments élastiques. La réduction est de 1 : 5,93. Les efforts de traction qui peuvent être exercés sont donnés par la caractéristique effort-vitesse de la figure 213. Le réglage de l'effort se fait de façon continue. Au moyen d'un levier de commande, le mécanicien fixe une consigne d'effort qui est maintenu constant jusqu'à une vitesse de l'ordre de 20 km/h et qui prend ensuite l'allure hyperbolique d'une caractéristique série. La disposition générale de l'installation est illustrée à la figure 214. Comme le but de la transformation n'était que l'expérimentation

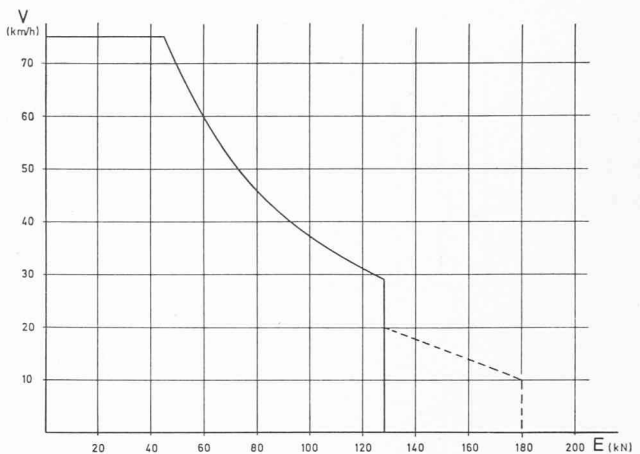


Fig. 213. — Caractéristique effort-vitesse de la locomotive Be 4/4 12001.

E effort de traction à la jante V vitesse

de la technique des convertisseurs, certaines machines auxiliaires de l'ancien fourgon telles que ventilateurs, compresseurs ont été conservées avec leur moteur à collecteur. Pour la même raison, il n'a pas été prévu de frein électrique.

Cette installation expérimentale, qui ne représente pas une optimisation en ce qui concerne le volume, le prix et le poids, a permis de contrôler en service pratique le comportement des circuits électroniques de puissance et les problèmes complexes que pose leur commande. Une attention particulière a été vouée à la conception des circuits de protection, à la charge du circuit intermédiaire, aux sauts de pantographe, au patinage et à la possibilité d'alimenter dans certaines limites plusieurs moteurs de traction par un même convertisseur.

L'expérimentation a montré que, malgré leur complexité, les problèmes soulevés ci-dessus peuvent être maîtrisés. Les enseignements tirés pourront être judicieusement exploités pour de futures études et conduire à des optimisations intéressantes.

8. Perspectives d'avenir

Après avoir vu les moyens électroniques importants qui sont nécessaires pour utiliser des moteurs asynchrones en traction électrique, il convient d'examiner quelles sont les chances que l'on peut actuellement donner à cette technique en plein développement.

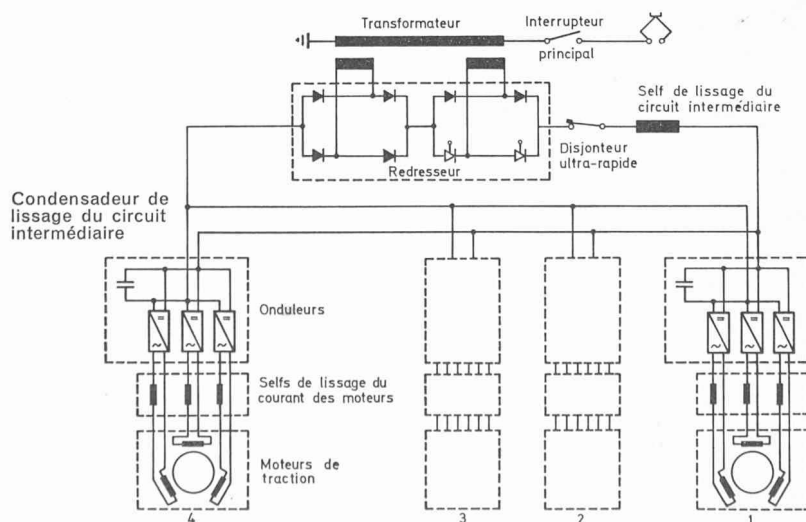


Fig. 212. — Schéma des circuits principaux de la locomotive Be 4/4 12001.

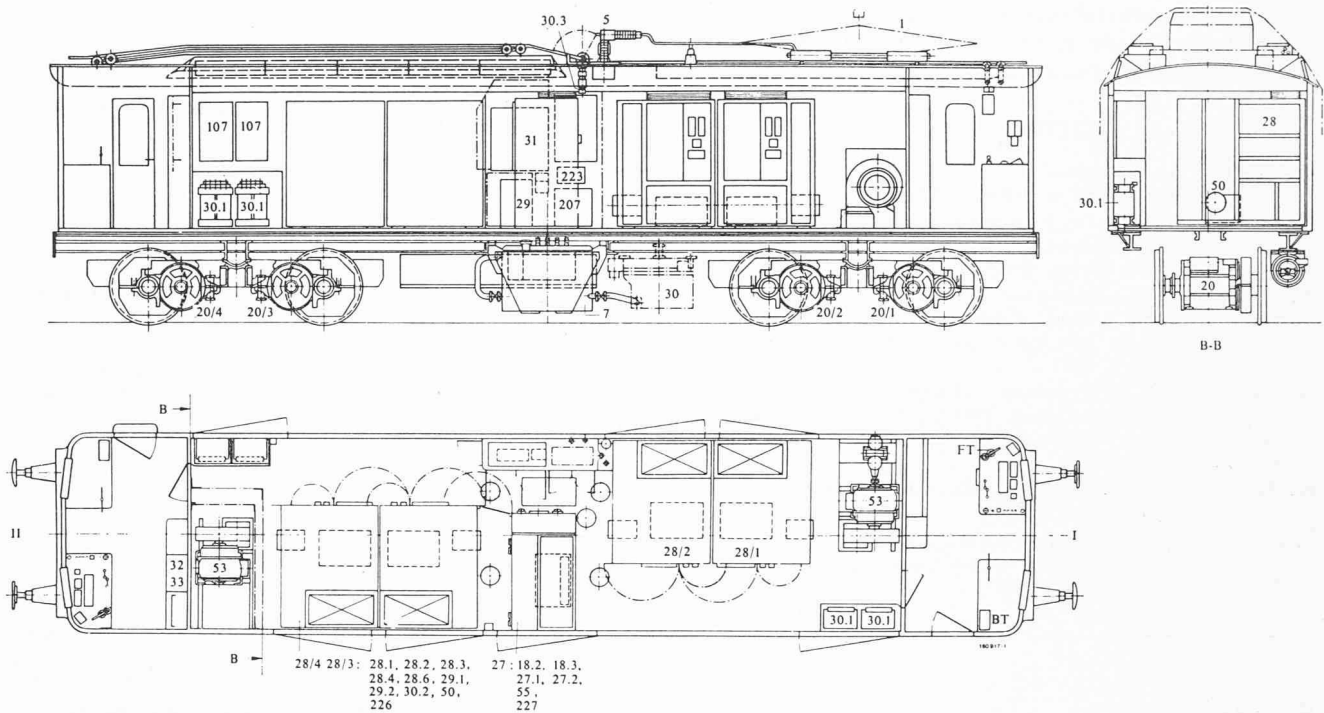


Fig. 214. — Disposition de l'équipement électrique de la locomotive Be 4/4 12001.

- | | | | |
|------|---|------|---|
| 1 | pantographe | 29.2 | séparateur de moteur |
| 5 | disjoncteur principal à air comprimé | 30 | bobine de lissage du circuit intermédiaire |
| 7 | transformateur | 30.1 | bobine de lissage du courant triphasé |
| 18.2 | transformateur de courant pour pont semi-commandé | 30.2 | condensateur du circuit intermédiaire |
| 18.3 | transformateur de courant pour pont non commandé | 31 | disjoncteur à courant continu |
| 20 | moteur de traction asynchrone triphasé | 32 | contacteur de chauffage |
| 27.1 | pont redresseur non commandé | 33 | transformateur de courant du chauffage |
| 27.2 | pont redresseur semi-commandé | 50 | moteur de ventilateur de l'onduleur |
| 28 | onduleur pour moteur de traction | 53 | moteur de ventilateur du moteur de traction |
| 28.1 | bloc des redresseurs principaux | 55 | moteur de ventilateur du redresseur |
| 28.2 | bloc des redresseurs auxiliaires | 107 | chargeur de batterie |
| 28.3 | condensateur de commutation | 207 | onduleur d'alimentation pour pos. 28 |
| 28.4 | self d'entrée | 223 | dispositif de déclenchement du disjoncteur |
| 28.6 | self de commutation | 226 | régulation de l'onduleur |
| 29 | contacteur de séparation du circuit intermédiaire | 227 | régulation du redresseur semi-commandé |
| 29.1 | séparateur de l'onduleur | | |

Les réalisations européennes connues jusqu'ici (locomotive diesel-électrique DE 2500 des firmes Henschel et Brown, Boveri, Mannheim, et Be 4/4 12001) présentent des puissances inférieures à 2000 kW.

A la question de savoir quelle est la puissance limite possible, on peut répondre que du point de vue de l'encombrement des moteurs *une puissance de l'ordre de 10 000 kW pour une locomotive à quatre essieux est envisageable*. Ceci implique une augmentation considérable de la tension du circuit intermédiaire et de la vitesse de rotation des moteurs; de cette dernière pourraient résulter des problèmes non négligeables dans la construction des paliers de moteurs et du train d'engrenages.

Le poids et surtout le volume des convertisseurs et du dispositif d'alimentation du circuit intermédiaire fixent également des limites à la puissance installée. Les convertisseurs et les redresseurs pulsants sont des éléments très complexes. Pour assurer une fiabilité comparable ou supérieure à celle des techniques conventionnelles, il faut disposer de composants très sûrs non seulement dans les circuits de puissance, mais aussi dans les organes de commande et de protection. Une des conditions nécessaires du succès de véhicules à moteurs asynchrones est une maîtrise absolue de ces fonctions compliquées de commande, de réglage et de protection.

L'utilisation de redresseurs pulsants alimentés par une caténaire à courant continu se heurte aussi à une limite. Une caractéristique des redresseurs pulsants est en effet qu'ils livrent dans ce cas une tension de circuit intermé-

diaire supérieure à la tension de ligne à laquelle ils sont directement reliés. Dans le cas du système 3 kV =, la tension du circuit intermédiaire avoisinerait 4 kV =, ce qui ne serait pas sans poser d'ardus problèmes pour le dimensionnement des onduleurs et la protection contre les surtensions.

Du point de vue économique, la locomotive à convertisseurs est aujourd'hui plus onéreuse que celle à moteurs directs ou à redresseurs réglés par variation d'amplitude ou de l'angle d'allumage. Pour la comparaison avec les engins à redresseurs, le calcul de rentabilité devient complexe car il faut y faire entrer les investissements à faire sur les installations de signalisation et de télécommunication pour les rendre insensibles aux harmoniques qu'ils engendrent dans le courant d'alimentation.

Dans l'état actuel du développement technique, il serait donc hasardeux d'émettre un pronostic sur les chances définitives de succès de l'un ou l'autre des systèmes.

Seul un développement par étapes successives de puissance croissante permettra de mieux cerner les limites techniques et la rentabilité du nouveau système de traction. C'est dans cet esprit que les CFF ont commandé en 1973 six locomotives diesel-électriques Am 6/6 qui seront livrées en 1976; leur schéma de principe correspond à l'exemple III de la figure 198 et utilise des convertisseurs à double pulsation. Dans le cadre d'une étude de locomotives de manœuvre du type Ee 6/6, l'une des variantes envisagées prévoit des redresseurs « 4 quadrants » alimentant des convertisseurs à pulsation double.

L'expérience du service avec ces locomotives devrait mieux permettre de juger les possibilités d'utilisation de moteurs asynchrones sur des engins de haute puissance.

LITTÉRATURE

- K. MEYER : « La locomotive expérimentale à convertisseurs Be 4/4 12001 des CFF. » *Bulletin CFF* 4, 1973.
- H. HÖDLE, H. STEMMLER : « Equipements de traction modernes et principe de commande nouveaux pour les véhicules de traction. » *Revue Brown, Boveri* 9/10, 1965.
- A. SCHÖNUNG, H. STEMMLER : « Réglage d'un moteur triphasé réversible à l'aide d'un convertisseur statique commandé d'après le principe de la sous-oscillation. » *Revue Brown, Boveri* 8/9, 1964.
- M. BRECHBÜHLER, H. STEMMLER : « Probleme bei der Entwicklung und Auslegung eines Oberleitungsversuchfahrzeuges mit asynchronen Fahrmotoren. » *Elektrische Bahnen*, 1972, Heft 5.
- H. WEBER : « Traktionsantriebe, Erfordernisse und Möglichkeiten. » *Neue Technik* 6, 1974.
- J. KÖRBER : « Grundlegende Gesichtspunkte für die Auslegung elektrischer Triebfahrzeuge mit asynchronen Fahrmotoren. » *Elektrische Bahnen*, 1974, Heft 3.
- J. KÖRBER : « Die elektrische Lokomotive mit kommutatorlosen Fahrmotoren. » *ETR* 7/8, 1975.
- H. KEHRMANN, W. LIENAU, R. NILL : « Vierquadrantsteller — eine netzfreundliche Einspeisung für Triebfahrzeuge mit Drehstromantrieb. » *Elektrische Bahnen*, 1974, Heft 6.
- M. BRECHBÜHLER, W. BOHLI : « Expériences faites avec la locomotive expérimentale à convertisseurs statiques Bo' Bo' de la série Be 4/4 12001 des Chemins de fer fédéraux suisses. » *Revue BBC* 12, 1973.
- K. MEYER, H. SCHLUNEGGER : « Die Grenzleistung und die Eigenschaften von Triebfahrzeugen verschiedener Bauarten. » IFAC — Symposium Düsseldorf 1974 : Regelung und Steuerung in der Leistungselektronik und bei elektrischen Antrieben.
- F. BITTERBERG, W. TEICH : « Henschel — BBC — DE 2500 — Ein Wendepunkt in der Lokomotivtechnik. » *ETR*, 1971, Heft 11.

Adresse de l'auteur :

Marcel Desponds, ing. dipl.
Ateliers principaux CFF
1400 Yverdon

Façades

L'extrême diversité des matériaux aujourd'hui employés dans le domaine de la construction devrait permettre d'accorder une importance accrue à l'une des tâches d'une façade, c'est-à-dire son rôle en tant qu'élément décoratif. Alors que dans la construction traditionnelle il pouvait se révéler difficile de conférer à une paroi extérieure le triple rôle d'élément porteur, d'agent devant isoler l'immeuble des intempéries et des variations de température, ainsi que de décoration, la séparation de ces différentes tâches peut conduire à une meilleure efficacité et à une construction plus rationnelle.

Une structure porteuse bien réussie, une isolation thermique et phonique efficace passent inaperçues. En revanche, une façade réalisée sans étude approfondie, dépourvue d'harmonie avec son contexte architectural, frappera ou même choquera l'opinion publique. Les exemples ne manquent malheureusement pas.

Si l'on songe aux moyens qu'offre la technologie actuelle de répondre à tous les impératifs posés à une façade dans n'importe quel type de construction, il n'y a guère d'excuses pour le « ratage » d'une façade, que ce soit sur le plan technique ou esthétique.

Il est intéressant d'examiner quelques développements récents dans un domaine qui influence autant notre habitat urbain que notre confort.

Rédaction.

La technique de l'emboutissage au service de l'architecte

Pour nombre de bâtiments à vocation utilitaire, l'industrialisation de la construction constitue un élément important pour l'architecte qui veut concilier un coût total le plus faible possible avec la satisfaction de toutes les exigences du maître de l'ouvrage. Il est évident que cette évolution conduit à utiliser dans une mesure toujours plus grande des éléments standard, dont la fabrication en série est plus économique, en particulier parce que les frais de recherche et de développement peuvent être répartis sur de nombreux ouvrages.

Les moyens ainsi mis en œuvre permettent de mieux satisfaire aux impératifs physiques de la construction, qu'ils relèvent de la statique ou de l'isolation, par exemple. On ne peut en revanche nier que ces éléments de construction peuvent rendre ardues les problèmes d'expression architecturale, par la monotonie qu'ils risquent d'engendrer. C'est pourquoi il convient d'accorder toute l'attention qu'il mérite à cet aspect de la construction industrialisée.

Un exemple de cette tâche particulière de l'architecte et des moyens dont il dispose est fourni par la conception des façades du nouveau complexe de bâtiments de l'Ecole polytechnique fédérale à Dorigny. Ce ne sont pas moins de 70 000 m² qu'il s'agit de revêtir ; on conçoit qu'il est impossible de se concentrer sur les exigences de caractère utilitaire, sous peine de construire un ensemble totalement étranger à son entourage et intrinsèquement laid.

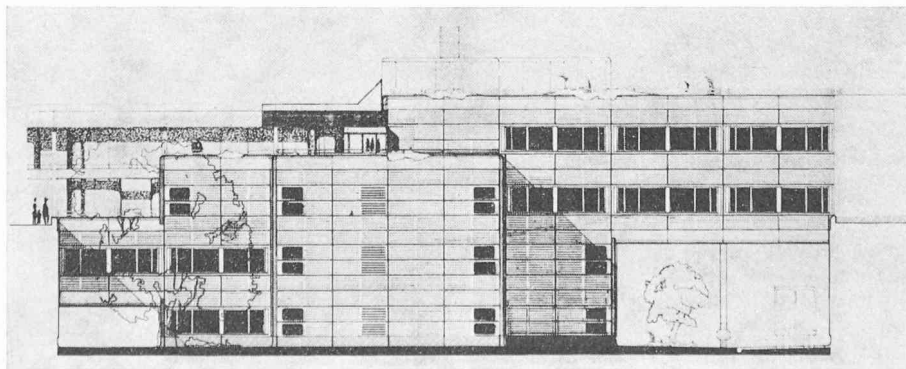


Fig. 1. — Ecole polytechnique fédérale, Lausanne : façades ouest du bâtiment de chimie.