

EVOLUTION DE LA TRACTION

Pierre CHAPAS

1° partie – La traction électrique

Le moteur à collecteur en voie de disparition

L'avènement du semi conducteur contrôlé

Passage aux moteurs triphasés à induction

Le moteur asynchrone en traction

Le moteur synchrone

La dernière génération de semi conducteurs : IGBT

Convertisseurs

Architecture des chaînes de traction triphasée

Conclusion de la première partie

Depuis vingt cinq années, le chemin de fer est l'objet de profondes évolutions vis-à-vis desquelles l'ensemble de ses composants est concerné. Sous l'influence, voire même la pression, du contexte économique politique, la structure même des réseaux se modifie. En un mot l'espace de travail ferroviaire n'a plus aucun rapport avec celui des décennies précédentes au cours desquelles il s'agissait essentiellement de perfectionnement technique à l'abri, croyait-on, de toute concurrence. Au coeur de tels bouleversements, les technologies mises en oeuvre, contribuent encore largement, bien que discrètement, à ces transformations.

Dans cette perspective, nous proposons au lecteur un voyage au cœur de la traction actuelle. Il nous conduira, à partir de quelques rappels des fondements, à travers l'apparition des nouveaux composants de l'électronique de puissance pour aboutir à l'universalité du moteur à induction. Nous nous baserons toujours sur la réalité technologique et son expérience « en service » et dépasserons le cadre de nos frontières pour donner l'écho de l'Europe, voir du monde.

Le moteur à collecteur en voie de disparition

Les premiers tours de roues de la traction électrique en 1879 avec Siemens, ont été effectués grâce au moteur à courant continu à collecteur à excitation série. Il répond parfaitement à l'exigence ferroviaire : couple élevé au démarrage et grande plage de variation de ce couple en fonction de la vitesse, représenté par la caractéristique de la figure 1.

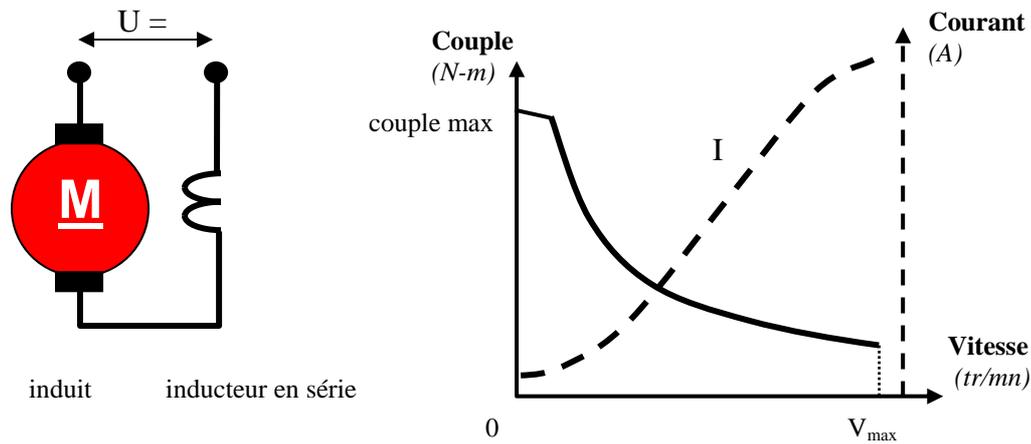


Fig. 1 – Caractéristique couple – vitesse du moteur à collecteur à excitation série

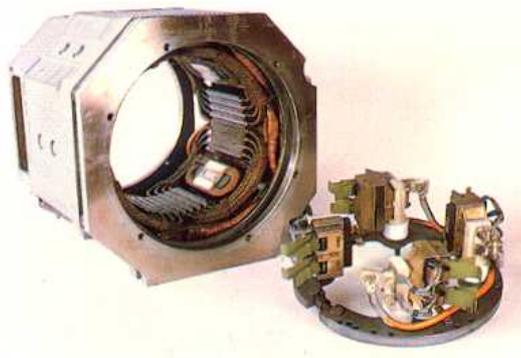
Sa technologie, de réalisation délicate se prêtant peu à l'automatisation, a toujours été d'un prix de revient très élevé (fig.2) :

- le stator - ou carcasse - reçoit les pôles et leurs bobinages inducteurs ;
- le rotor – induit - est un cylindre de tôles magnétiques empilées. Il porte, logés dans les encoches longitudinales, les conducteurs parcourus par le courant et siège de la force électromotrice, formés en spires, isolées entre elles, assemblées en bobines. Chacune d'elles est reliée à des lames de cuivre constituant le collecteur.
- le courant est amené au collecteur par des rangées de balais en carbone disposées sur une couronne.

Un double handicap frappe ce moteur du fait de la « commutation » et du collecteur :

- le phénomène de la commutation, très complexe, est provoqué par le changement brusque du sens du courant dans chaque section d'induit au passage des lames de collecteur. Un arc de rupture en résulte du fait de l'inductance propre de chaque bobine d'enroulement. Pour y remédier, ultérieurement aux premières générations de moteurs, des pôles auxiliaires sont disposés dans l'axe de l'espace inter polaire. Ils sont magnétisés par le courant principal traversant l'induit et créent, dans l'entrefer, en regard de la section en commutation, une induction telle que la force électromotrice induite dans la spire en commutation s'oppose à celle qui provoque l'arc de rupture. Le collecteur et ses balais restent néanmoins soumis à une dégradation progressive : si l'arc devient trop important, il se propage aux lames suivantes jusqu'à faire le tour complet du collecteur : c'est le « flash ».
- le collecteur est constitué d'un grand nombre de lames en cuivre, isolées entre elles et par rapport à la masse de l'induit, par des lames de mica, le tout serré par un double cône, lui-même isolant. Les soudures de chaque spire aux lames constituent un point délicat. La rotation de l'ensemble le soumet à une force centrifuge telle qu'elle tend à le déformer, d'où une usure prématurée des balais. La vitesse linéaire maximale d'un collecteur, compte tenu de son diamètre, limite la vitesse de rotation (vitesse linéaire de 55 m/s au collecteur pour un moteur de TGV Paris Sud Est à 270 km/h !). Une maintenance importante exige une reprise de la concentricité du collecteur par un usinage appelé « reprofilage » et un remplacement périodique des balais en carbone. Ce reprofilage précis nécessite un outillage de coupe au diamant.

La langue allemande utilise l'appellation « commutateur », nettement mieux appropriée que « collecteur », montrant bien le rôle d'inverseur du courant lorsque chaque enroulement rotorique défile alternativement sous un pôle inducteur positif, puis négatif.



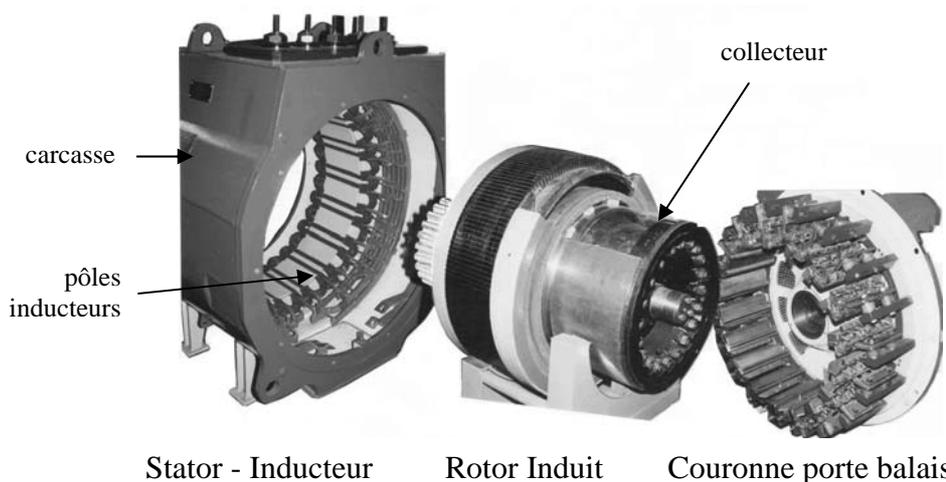
Carcasse et pôles inducteurs
Couronne porte balais



Induit

Fig. 2 – Moteur à courant continu à collecteur à 4 pôles

L'alimentation du moteur à collecteur peut être soit une tension continue ou redressée, soit une tension alternative monophasée à faible fréquence. Les deux solutions ont été largement développées dans le monde : la première par tous les réseaux électrifiés en tension continue (de 600 V à 3000 V) ; la seconde par les réseaux suisses, germaniques et scandinaves, en fréquence 16 Hz 2/3 (devenue 16,7 Hz).



Stator - Inducteur Rotor Induit Couronne porte balais

Fig. 3 – Moteur direct 50 Hz à collecteur à 18 pôles (moteur de BB 13000)

L'accroissement des puissances demandées aux engins de traction provoqua deux évolutions distinctes selon l'alimentation :

- les réseaux « continus » ou à fréquence industrielle 50 Hz avec redressement du courant à bord de l'engin, développèrent des moteurs de plus en plus performants mais de plus en plus coûteux. La France en particulier, se lança dans le bogie monomoteur, justement pour réduire le nombre de moteurs et faciliter la maîtrise de l'adhérence en réduisant la fâcheuse tendance au patinage des bogies multimoteurs.
- les réseaux « monophasés basse fréquence » envisagèrent dès les années 1970, le moteur sans collecteur, c'est-à-dire asynchrone. En effet les problèmes de commutation devenaient de plus en plus difficiles, voire impossibles à maîtriser.

L'avènement du semi conducteur contrôlé

L'histoire du semi conducteur reste à écrire et son application à la traction ferroviaire mérite un rapide panorama de son origine et de son développement.

Le moteur à courant continu à collecteur, nous l'avons dit, malgré son excellent couple, est de construction complexe et coûteuse et impose un réseau d'alimentation spécifique sous faible tension continue, engendrant donc des pertes en ligne par effet Joule importantes. Dès avant la seconde guerre, Allemagne et Hongrie ont tenté, avec difficultés, l'alimentation sous haute tension en fréquence industrielle : les moteurs de traction à collecteur alimentés ainsi étaient encore plus complexes et peu fiables. En 1951, Louis Armand, alors Directeur Général de la SNCF, reprend l'expérience sur la ligne du Höllenthal en Allemagne en expérimentant trois solutions :

- le moteur à collecteur alimenté directement en 50 Hz ;
- le moteur à courant continu alimenté en courant redressé ;
- le moteur asynchrone alimenté par groupe convertisseur de phases à machines tournantes sur lequel nous reviendrons.

Fort de son expérience réussie en 16 Hz 2/3, Oerlikon - Suisse réalise 10 locomotives (CC 6051 devenue 20001, puis CC 25002 à 10) équipées de moteurs à collecteur 50 Hz pour l'expérimentation française poursuivie sur La Roche sur Foron – Annecy. Bien que d'excellentes performances, prix, poids et maintenance du moteur direct ne le rendent pas concurrentiel face à la solution du redresseur.

Le redresseur à vapeur de mercure à cuve scellée (ignitron et excitron à commande de grille) donne d'excellents résultats et permet de conserver le moteur à collecteur, moyennant quelques adaptations au courant redressé légèrement ondulé, notamment grâce à sa carcasse feuilletée et non plus massive. La très importante série des BB 12000 est ainsi réalisée pour la ligne Valenciennes Thionville, électrifiée en 25 kV 50 Hertz en 1954.

Le redresseur « sec » - la diode – en matériau semi-conducteurs (germanium puis silicium) apparaît en fin des années 1950 et se développe avec une rapidité fulgurante. Sans rentrer dans la description complexe du mécanisme de la conduction au niveau atomique, rappelons le résultat obtenu.

La diode en redressement

Si une tension alternative U (sinusoïdale ou non) est appliquée aux bornes d'une résistance R en série avec une diode D , le courant I qui la traverse est « redressé » c'est-à-dire « unidirectionnel » : seule l'alternance positive traverse la diode. Pendant l'alternance négative, la diode est bloquée (redressement mono alternance fig. 3).

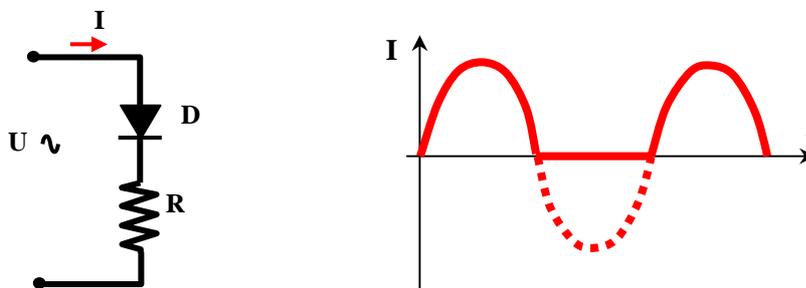


Fig. 3 – Redressement mono alternance

Le schéma à 4 diodes en pont de Graetz permet le redressement monophasé double alternance ; c'est le plus utilisé en traction (fig. 4) :

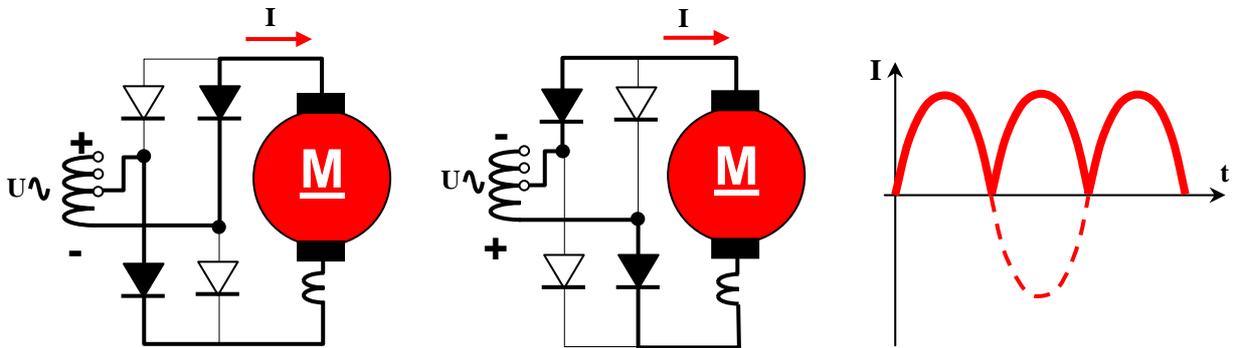


Fig. 4 – Redressement en pont de Graetz

Sous tension triphasée délivrée par un alternateur entraîné par un moteur Diesel, en traction autonome, le pont de Graetz est constitué de 6 diodes qui fournissent une tension ondulée (fig.5). (voir 2^o partie) :

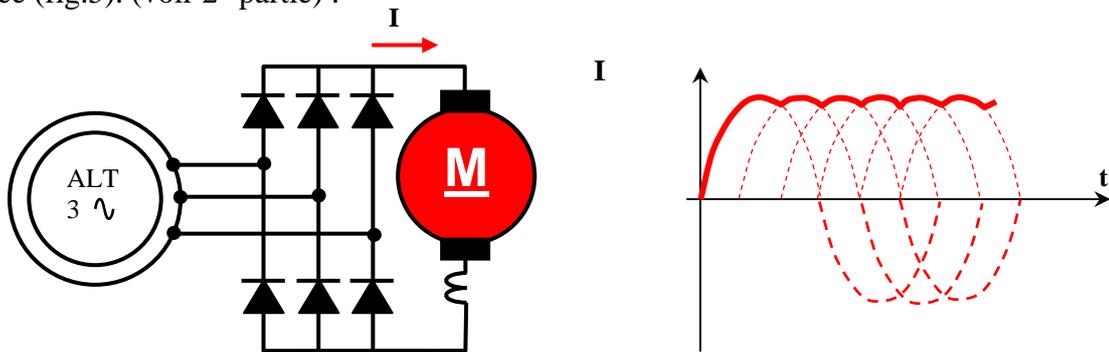


Fig. 5 – Redressement triphasé

Utilisée ainsi, la diode associée au moteur à courant continu adapte la tension alternative mais n'intervient pas dans son réglage, essentiel pour fournir le courant donc le couple variable. C'était le rôle du gradateur en aval du transformateur pour une locomotive monophasée (représenté en figure 4).

Le thyristor

Dans les années 1960, apparaît sur le marché le thyristor : une diode « intelligente » dont l'amorçage est contrôlé par une impulsion de tension sur une troisième connexion, la *gâchette*. La première application prototype fut réalisée sur la BB 10001, ancienne locomotive laboratoire des expérimentations de Savoie, puis en série sur les BB 15000 de Paris Strasbourg en 1971.

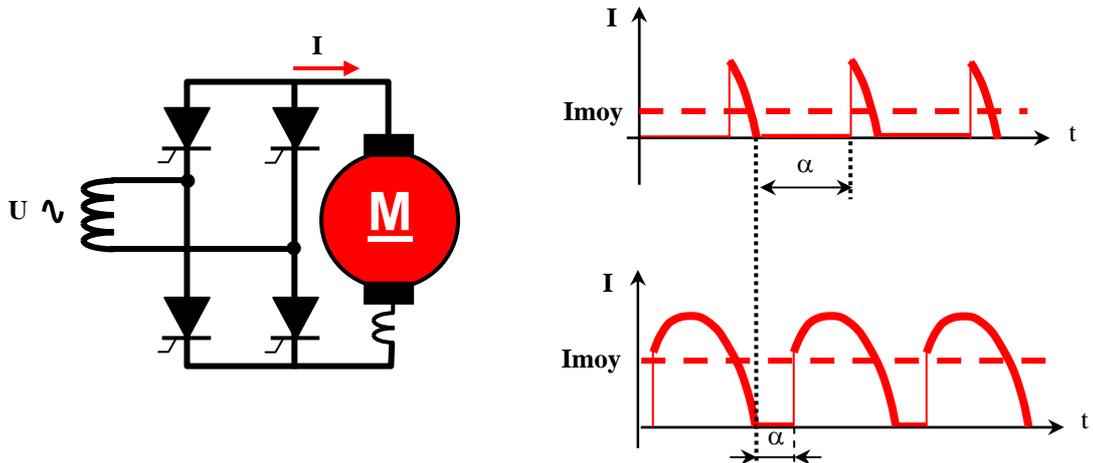


Fig. 6 – Redressement contrôlé par thyristors en pont de Graetz

En plus de la fonction redressement, l'instant d'amorçage des thyristors est commandé à un angle α de l'alternance permettant de faire varier la valeur moyenne du courant traversant le moteur (fig. 6) Le graduateur est ainsi remplacé.

Le pas suivant est franchi dès lors que le thyristor peut être utilisé en continu. En lieu et place du rhéostat de démarrage, lourd et encombrant, d'un rendement déplorable puisqu'il gaspille l'énergie en pure perte, le thyristor règle le courant nécessaire au moteur en phase de démarrage, à l'issue de laquelle, en pleine conduction, il autorise la pleine tension donc la vitesse maximale : c'est le hacheur, développé à grande échelle sur les BB 7200 et de nombreuses séries de locomotives en Europe (fig. 7).

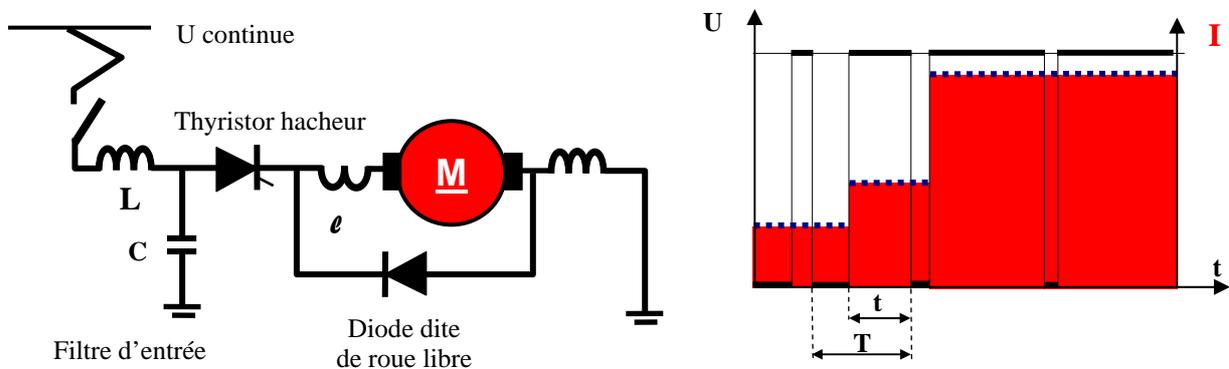


Fig. 7 – Hacheur à thyristor sous tension continue

Le thyristor hacheur joue le rôle d'un interrupteur statique, nécessitant un circuit d'extinction, dont le temps de conduction varie à la demande de sorte que l'on règle la valeur moyenne du courant traversant le moteur. Le montage est complété par un filtre d'entrée (inductance + condensateur) et une diode de roue libre permettant la circulation de l'énergie emmagasinée par le moteur en phase d'interruption.

En conjuguant le hacheur et le redresseur, on obtient un engin multi tensions tel que les BB 22200 construites à plus de cent exemplaires dans les années 1975 par Alstom et MTE.

A ce stade de notre brève rétrospective, remarquons l'aisance avec laquelle le moteur à collecteur s'est adapté et a profité des innovations de l'électronique de puissance. L'apogée fut certainement atteinte avec le schéma de la première génération de TGV Paris – Sud Est, déduit de celui des BB 22200. Mais le signe annonciateur de la mutation à venir reste la tenue

en service du collecteur : soumis à une vitesse périphérique telle que son contrôle et son reprofilage fréquents interdisent d'envisager un accroissement de puissance et de vitesse de rotation. Il faut envisager un autre type de moteur : les pays germaniques et la Suisse l'on fait depuis longtemps.

Passage aux moteurs triphasés à induction

Notons, par souci de rigueur historique, que la tentative n'est pas nouvelle : en 1903 deux automotrices équipées de moteurs asynchrones, alimentés en fréquence fixe, construites par AEG et Siemens, en Allemagne, battent un record de vitesse à 210 km/h sur la ligne Marienfeld Zossen ! L'Italie s'est faite le champion du triphasé avec, en 1914, plus de 400 km électrifiés en 3600 V 16/17 Hz et 1800 km à la veille de la seconde guerre. En 1954 Louis Armand, soucieux de sélectionner la meilleure utilisation du 50 Hz à bord des locomotives, lance une série de locomotive à moteurs asynchrones : les CC 14000. A l'époque le réglage de la fréquence et du courant faisait appel à un groupe de plusieurs machines tournantes ; l'expérience s'arrêta là.

En Allemagne comme en Suisse le moteur à collecteur alimenté en monophasé à fréquence 16,7 Hz, a posé dès le début, des problèmes de commutation, finalement assez bien résolus. Il reste cependant plus lourd, plus coûteux et de maintenance plus importante que le moteur continu. Dès la fin des années 1960, les constructeurs ferroviaires cherchent à développer le moteur asynchrone triphasé adapté à la traction. Problème difficile connaissant sa caractéristique couple vitesse, absolument pas adaptée au démarrage d'un train et fonctionnant à vitesse quasi constante pour une fréquence d'alimentation donnée. Au début des années 1970, l'expérimentation débouche sur une série de locomotives livrées à la DB : les E 120. Dès lors tous les réseaux électrifiés en 15 kV 16,7 Hz (Allemagne, Autriche, Suisse et Suède), misent sur l'asynchrone.

Les réseaux électrifiés en courant continu ou en 25 kV 50 Hz vivent sans grand problème avec le moteur à collecteur, d'autant mieux que l'apparition du semi conducteur contrôlé – le thyristor – améliore considérablement le contrôle du moteur. Nous y reviendrons ci-après. Avec la mise en service des rames à grande vitesse, on pressent néanmoins que la limite est proche.

En 1980, la SNCF et les constructeurs français expérimentent la solution du moteur à induction synchrone. Sa construction est simple même s'il comporte encore la connexion de son rotor par bagues et balais ; sa puissance massique est près du double de celle du moteur à collecteur et son alimentation par onduleur est plus aisée que celle du moteur asynchrone.

Deux prototypes – les BB 20011 et 2012 – donnent d'excellents résultats et une rame TGV Sud Est est équipée de moteurs synchrones. Les décisions s'enchaînent rapidement : une série de 200 locomotives à grande puissance – 5600 kW - est commandée, ce seront les BB 26000 dite « Sybic » comme Synchrones BICourant – et le marché du TGV Atlantique sera équipé d'une chaîne de traction synchrone. Tous les marchés de TGV suivants le seront également, à l'exception d'Eurostar qui sera en asynchrone.

La solution synchrone présente une excellente tenue en service, mais reste à ce jour une exception française qui ne débouchera sur aucune commande à l'exportation, exception faite pour l'AVE Madrid Séville et les rames à grande vitesse pour la Corée. Pourquoi une telle situation, fort inquiétante pour l'industrie ferroviaire française ?

Comme nous l'analyserons plus loin, le moteur synchrone est plus complexe et plus coûteux que son frère asynchrone, champion de la puissance massique et du prix. En outre les développements très importants réalisés par les semi conducteurs et les microcalculateurs rendent l'alimentation du moteur asynchrone très modulaire et adaptable à toute la gamme de puissance : du trolleybus à la locomotive en passant par le tramway, le métro, l'automotrice et

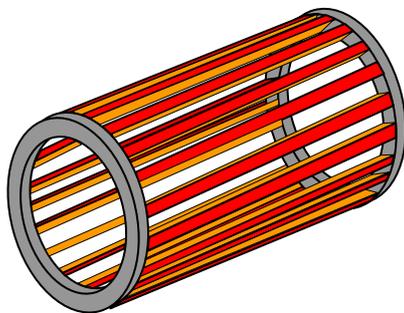
la rame à grande vitesse. Les constructeurs exercèrent de fortes pressions sur leurs clients pour inclure dans leur catalogue une telle gamme en asynchrone. La France débuta avec les BB 36000 et les T 13 pour la Belgique et le Luxembourg pour aboutir à la gamme PRIMA – BB 427000 et 437000. Les métros de Paris – MF 2000 –, de Singapour, le tramway Citadis, l'AGC, les rames Z TER, sont asynchrones.

Le moteur asynchrone en traction

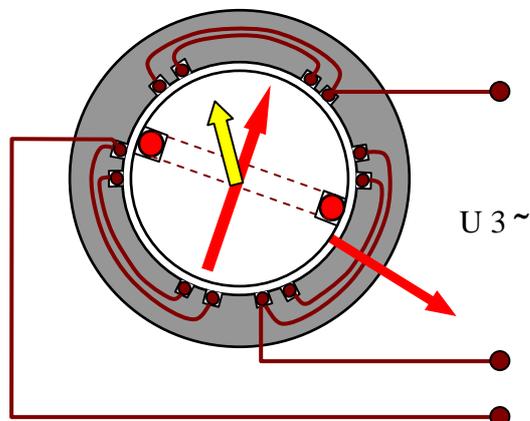
Ce type de moteur électrique est de très loin et depuis très longtemps, le plus répandu dans toutes les applications industrielles. Sa technologie est simple (fig. 8) :

- un stator bobiné relié aux trois phases d'un réseau ;
- un rotor constitué de tôles magnétiques à encoches, comportant un ensemble de barres conductrices reliées entre elles : c'est la « cage d'écureuil » ; aucune liaison électrique n'existe entre le rotor et son environnement¹.

Son principe de fonctionnement est régi par la loi de Lenz : la force électromotrice induite s'oppose à la cause qui lui donne naissance. Si un pôle d'aimant, créant un champ B , se déplace devant une spire fermée à une vitesse V , celle-ci est le siège d'un courant induit I . Elle réagit sur la cause qui l'engendre par une force F . Pour que cette réaction ait lieu il faut qu'il y ait vitesse relative de l'aimant par rapport à la spire, c'est-à-dire que le champ doit tourner plus vite que la spire : d'où le nom asynchrone. Le « glissement » du rotor par rapport au stator est générateur du couple. Ce glissement est faible, de l'ordre de 1%, pour l'obtention du couple maximum au point de définition du moteur. La rotation du champ est obtenue par un enroulement polyphasé monté sur le stator. Si l'on fait varier la fréquence de la tension stator on fera varier le glissement et la vitesse de rotation du rotor.



cage d'écureuil rotorique



rotor



stator

¹ Notons que le rotor peut être bobiné avec connexions par bagues et balais ; il n'est pratiquement plus utilisé.

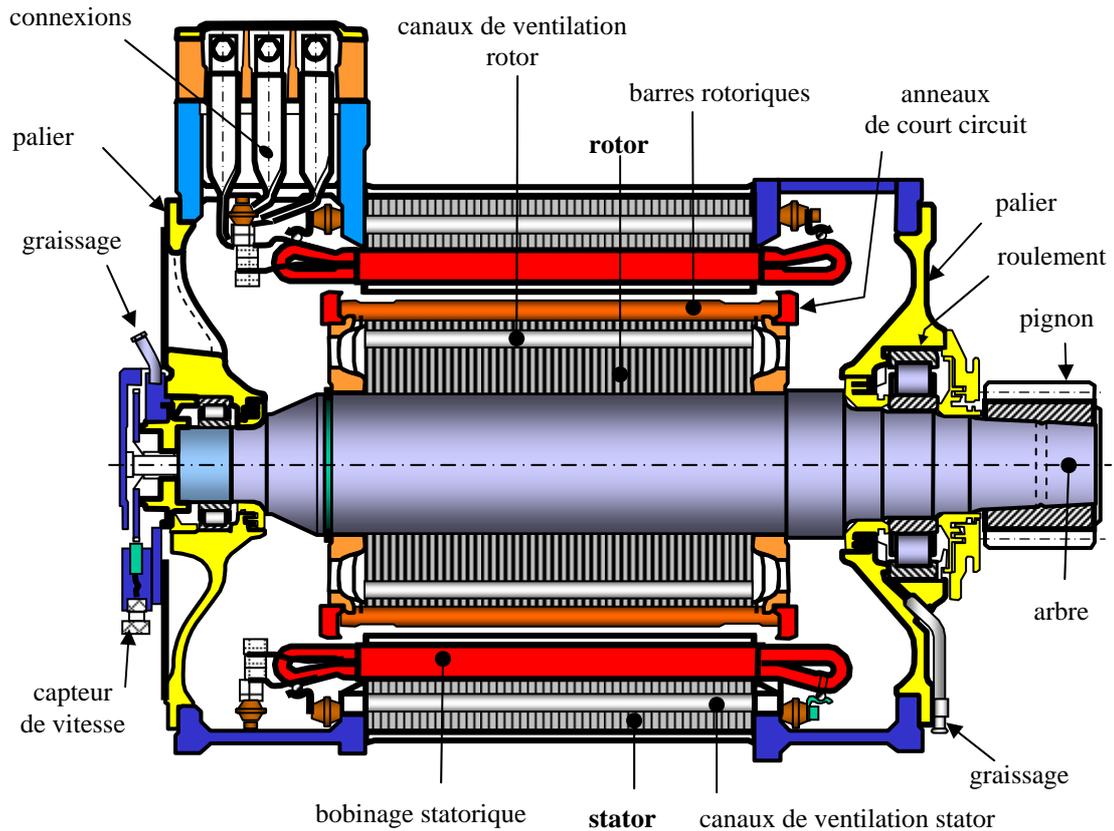


Fig. 8 – Principe et technologie du moteur asynchrone

Comment démarrer un tel moteur avec un couple élevé, la caractéristique couple vitesse à une fréquence donnée étant représentée en figure 9 ? :

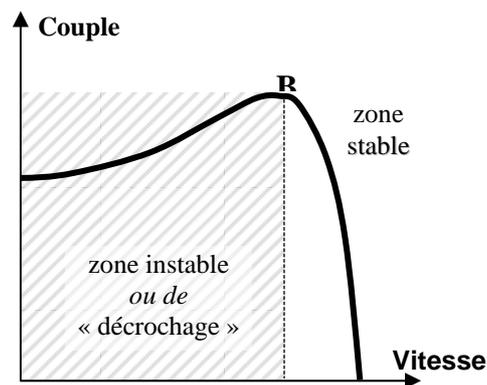


Fig. 9 – Caractéristique couple vitesse du moteur asynchrone pour une fréquence donnée

L'alimentation doit être adaptée en tension et en fréquence de sorte que le rapport U/F soit constant. Pour se rapprocher des caractéristiques du moteur à excitation série, on considère 2 phases (fig.10) :

- au démarrage et à faible vitesse, fonctionnement à couple constant, le flux étant maintenu constant en faisant varier la vitesse proportionnellement à la fréquence.

- à vitesse élevée, fonctionnement à puissance constante, la fréquence est proportionnelle à la vitesse, durant laquelle le couple décroît proportionnellement à la vitesse. Pour atteindre ce but, la tension est diminuée avec la racine carrée de la fréquence.

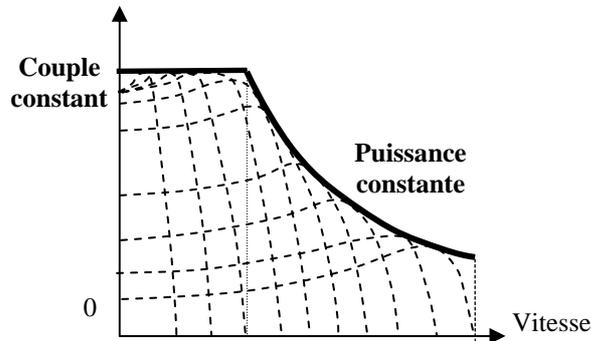


Fig. 10 – Caractéristique couple vitesse du moteur asynchrone en U/F constant

Pour obtenir ce résultat, le moteur est alimenté par un onduleur qui élabore un système de trois tensions réglables en fréquence et en amplitude, constitué par un système de 6 hacheurs alimentés à partir d'une source de tension continue de valeur U , tel un filtre L_0C_0 .

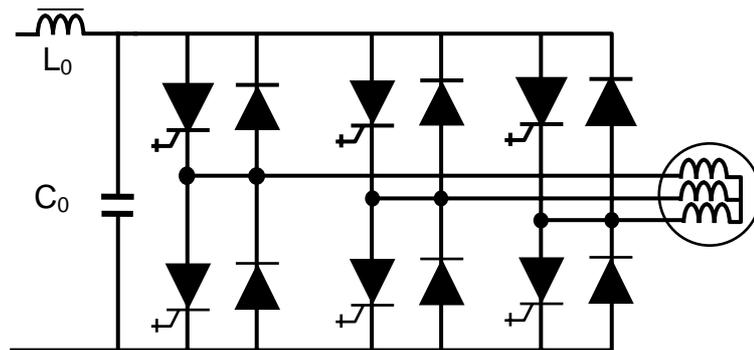


Fig. 11 – Onduleur en tension à 6 hacheurs

Par un découpage approprié de la tension U , l'onduleur permet de reconstituer un système de trois tensions déphasées de 120° aux bornes des phases du stator. Leur valeur moyenne est de forme sinusoïdale. Le type de découpage engendrera soit une variation de l'amplitude, soit une variation de la fréquence de l'onde résultante pour obtenir $U/F = Cte$

Le moteur synchrone

Son principe est celui de l'alternateur : un électroaimant N-S ou un aimant permanent (voir plus loin), appelé rotor, constitué de pôles excités par des bobines permettant de faire varier le champ inducteur tourne à l'intérieur d'un circuit magnétique dans les encoches duquel sont logés des conducteurs, constituant le stator. Au passage de chaque pôle du rotor, le flux croît progressivement de 0 à sa valeur maximale, puis décroît lorsque le pôle s'éloigne. Aux bornes de chaque enroulement prend naissance une force électromotrice alternative. On recueille donc un système de trois tensions déphasées de 120° l'une par rapport à l'autre. Inversement si les enroulements du stator sont alimentés par un système de trois tensions déphasées de 120° , un champ tournant est créé présentant lui aussi un système de pôles fictifs N-S, tournant à vitesse imposée par la fréquence d'alimentation. Supposons que le rotor soit

entraîné à cette même vitesse : les deux aimants « s'accrochent » ; si l'entraînement du rotor est supprimé il continue à tourner.

L'arrivée du courant d'excitation au rotor se fait par deux bagues tournantes sur lesquelles viennent en contact deux balais (fig.12)

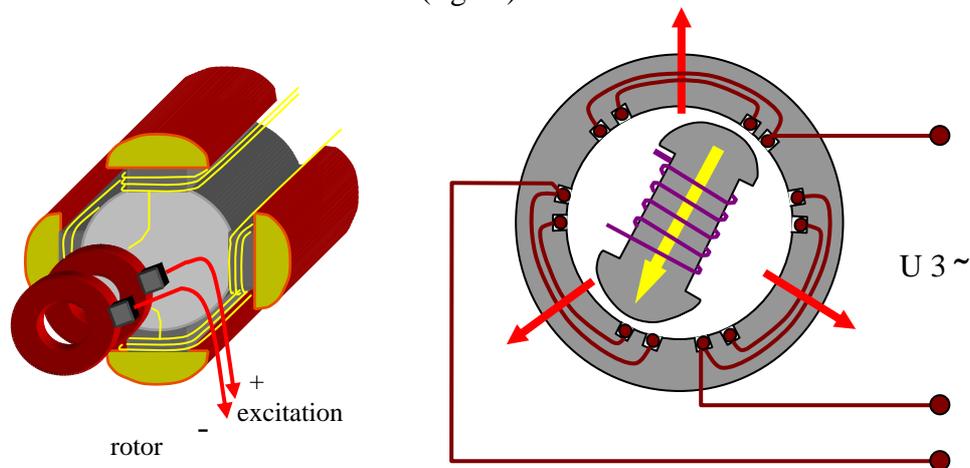


Fig. 12 – Principe du moteur synchrone

Sous l'effet du couple résistant, les pôles réels du rotor ont tendance à ralentir et à se décaler par rapport aux pôles fictifs du stator. Les attractions et répulsions entre pôles réels et fictifs ont des composantes tangentielles dans le sens de la rotation. Leur ensemble crée un couple moteur donc une puissance mécanique.

Onduleur d'alimentation

A l'arrêt, sous l'effet du champ et du courant stator, le moteur est soumis à un couple. Le courant stator de l'enroulement face au rotor est commuté sur celui qui est le mieux disposé dans le champ pour que le couple se maintienne en mouvement de rotation continue. En disposant d'un réseau tel que le système de tensions triphasées à fréquence variable d'alimentation du stator, crée un flux tournant à vitesse progressivement croissante, la force contre-électromotrice sera alors suffisante pour entraîner le rotor à très faible vitesse. On fera ensuite croître la fréquence du réseau pour permettre l'accroissement de la vitesse de synchronisme. Ainsi sera-t-il possible de suivre une caractéristique effort -vitesse adaptée à la traction. Les enroulements du stator U, V, W, sont couplés en étoile et reliés aux trois phases d'un onduleur de courant à thyristors alimenté par une tension continue (fournie par un hacheur ou un redresseur). Le champ tournant du stator est créé en provoquant la conduction des thyristors suivant la séquence indiquée en figure 13.

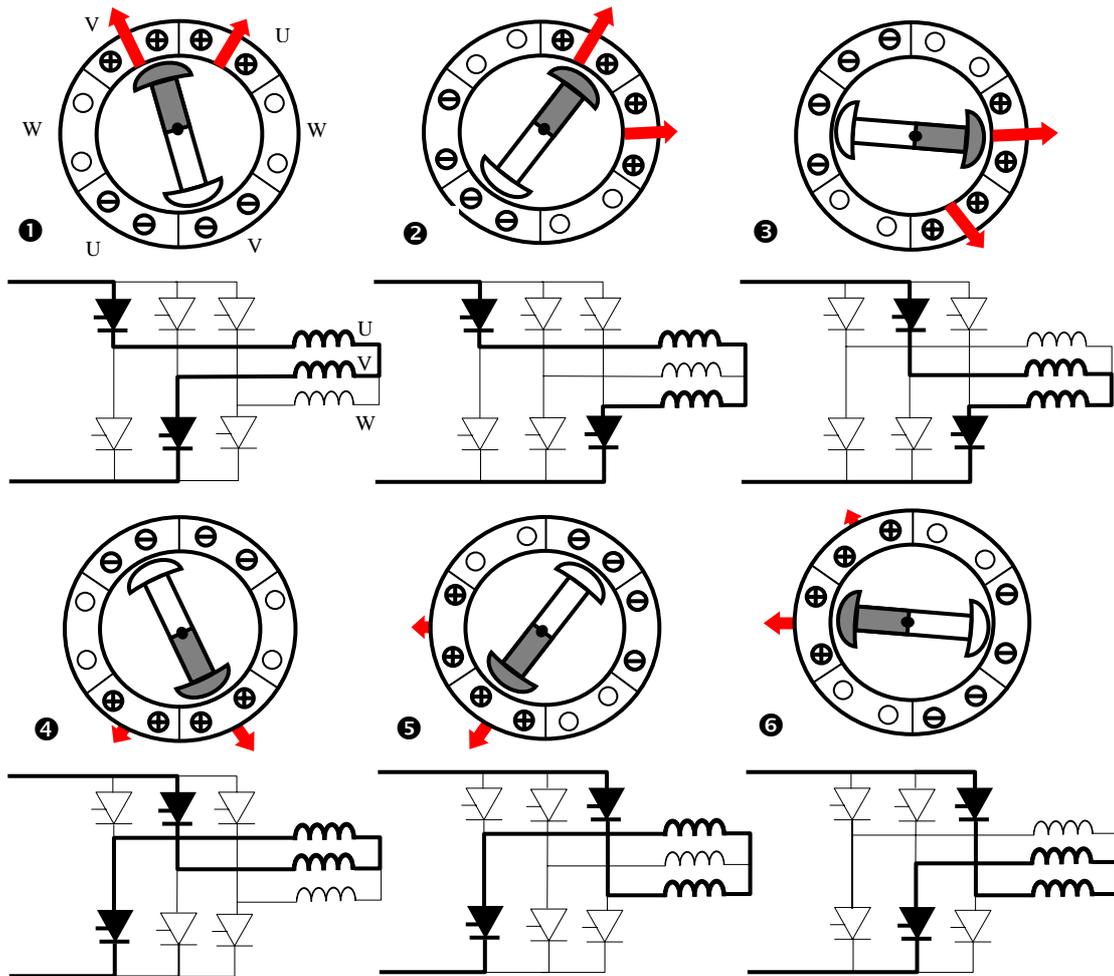


Fig. 13 – Alimentation du moteur synchrone par un onduleur de courant

En régime normal, au-delà d'une certaine vitesse, les forces contre-électromotrices induites sont suffisantes pour fournir l'énergie réactive nécessaire à l'extinction des thyristors de chaque bras de l'onduleur : la commutation est dite naturelle. Les thyristors à mettre en conduction et les instants de commutation sont déterminés par la position des pôles fictifs du stator en regard du champ créé par le rotor de sorte que celui-ci soit toujours soumis au couple maximal. Ce sont les forces électromotrices triphasées présentes aux bornes des enroulements du stator qui garantissent, dès l'amorçage du thyristor suivant, l'extinction de celui qui termine son cycle de conduction. C'est l'auto pilotage.

A faible vitesse, l'amplitude des forces contre électromotrices aux bornes des enroulements du stator est insuffisante pour garantir la commutation naturelle des thyristors; un circuit spécial d'assistance à la commutation est mis en action permettant la commutation d'un bras d'onduleur sur l'autre. Ce mode est appelé « commutation assistée ». Le choix des thyristors à mettre en conduction est assuré par des détecteurs de proximité fixes, disposés en regard de la périphérie d'un disque solidaire du rotor.

Les dernières générations de semi conducteurs : GTO et IGBT

Le thyristor est un semi conducteur dont la conduction est commandée par le courant de gâchette. Pour retrouver l'état « bloqué » il est nécessaire d'annuler le courant gâchette et de réduire le courant d'anode en dessous du seuil d'entretien de la condition d'amorçage;

les deux conditions étant nécessaires. Selon l'utilisation du thyristor, en alternatif ou en continu, le schéma sera totalement différent :

- en alternatif, l'extinction est dite « naturelle » au passage à zéro de la sinusoïde de courant ;
- en continu, un contre-courant est nécessaire pour annuler le courant d'anode; il est délivré, généralement par un thyristor auxiliaire, dit d'extinction.

Le circuit d'extinction complique sérieusement le schéma en alimentation continue. C'est pourquoi un autre type de thyristor a été développé : c'est le GTO.

Le thyristor GTO (Gate Turn Off ou extinction par gâchette)

Sa structure est obtenue en implantant sur un même substrat plusieurs centaines de mini thyristors, asymétriques en tension, connectés en parallèle. Le but recherché est d'extraire une quantité de charges suffisante pour provoquer rapidement le retour à l'état bloqué. Le thyristor exige un circuit de protection associé important avec inductance de limitation de variations de courant, circuit d'aide au blocage, résistance de décharge. Enfin son dispositif d'allumage et d'extinction – l'allumeur – demande une puissance importante (fig. 14).

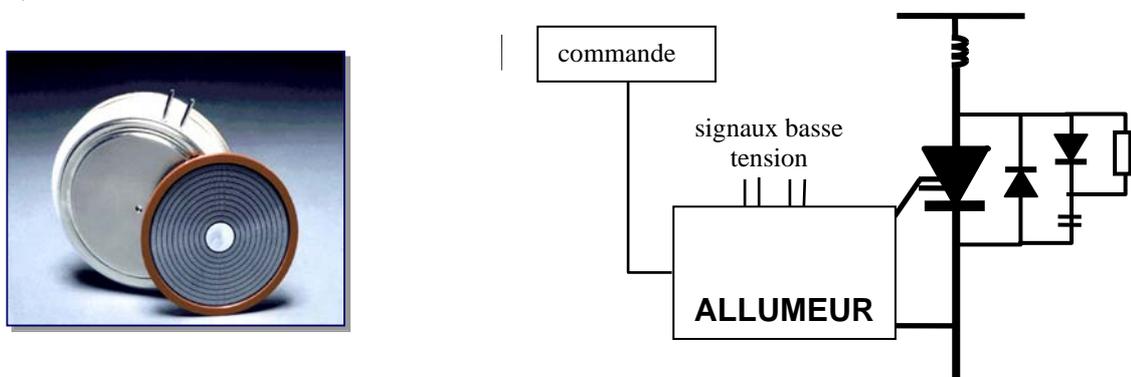


Fig. 14 – Thyristor GTO, allumeur et circuit auxiliaire

Les BB 36000, en France, sont équipées de GTO. Sa mise en oeuvre est encore complexe et l'arrivée sur le marché du transistor IGBT ne lui assure aucun avenir.

Le transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

C'est un composant dont la structure conjugue les avantages du transistor MOS - ou à grille isolée - en terme de commande, et ceux du transistor bipolaire du point de vue tenue en tension et capacité en courant. Le schéma équivalent et son symbole sont représentés en figure 15 :

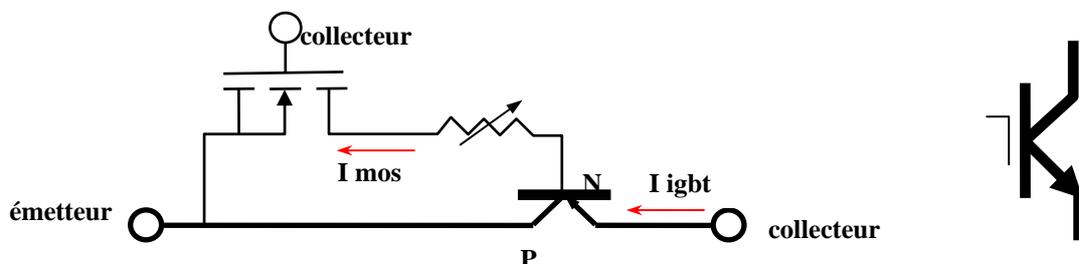


Fig. 15 – Schéma équivalent et symbole du transistor IGBT

La mise en conduction est inférieure à la microseconde dès l'application d'une tension positive entre grille et émetteur. La coupure de courant comporte deux phases :

- décroissance rapide due au MOS (80 % du courant à commuter)
- queue de courant due à la recombinaison des porteurs minoritaires piégés dans la zone de drain N-.

Les caractéristiques actuelles des transistors IGBT permettent une tenue en tension directe de l'ordre de 6500 V avec un courant collecteur de 2000 A.



Fig. 16 – Vues intérieure et extérieure du transistor IGBT

Convertisseurs

Les semi conducteurs de puissance permettent de constituer des « convertisseurs » aptes à toutes les configurations d'alimentation haute tension, du courant continu 750 V pour les transports urbains, au 1500 V ou 3000 V continu et au monophasé 15 kV ou 25 kV. L'engin moteur multi tensions n'est plus qu'un jeu de construction dont on analyse le développement ci-après. Les convertisseurs de bases sont :

- l'onduleur associé au moteur asynchrone ;
- le redresseur fournissant la tension continue à partir du secondaire de transformateur ;
- le hacheur d'alimentation en freinage rhéostatique.

Onduleur et moteur asynchrone

Il est constitué par un système de 6 hacheurs alimentés à partir d'une source de tension continue de valeur U . Chaque bras est équipé soit de GTO soit d'IGBT. Par un découpage approprié de la tension U , l'onduleur permet de reconstituer un système de trois tensions déphasées de 120° aux bornes des phases du stator. Leur valeur moyenne est de forme sinusoïdale. Le type de découpage engendrera :

- soit une variation de l'amplitude
- soit une variation de la fréquence de l'onde résultante pour obtenir le rapport U/F constant.

Ce procédé est appelé "Modulation de Largeur d'Impulsions" - MLI. (PWM en anglais : "Pulse Width Modulation") (fig. 17)

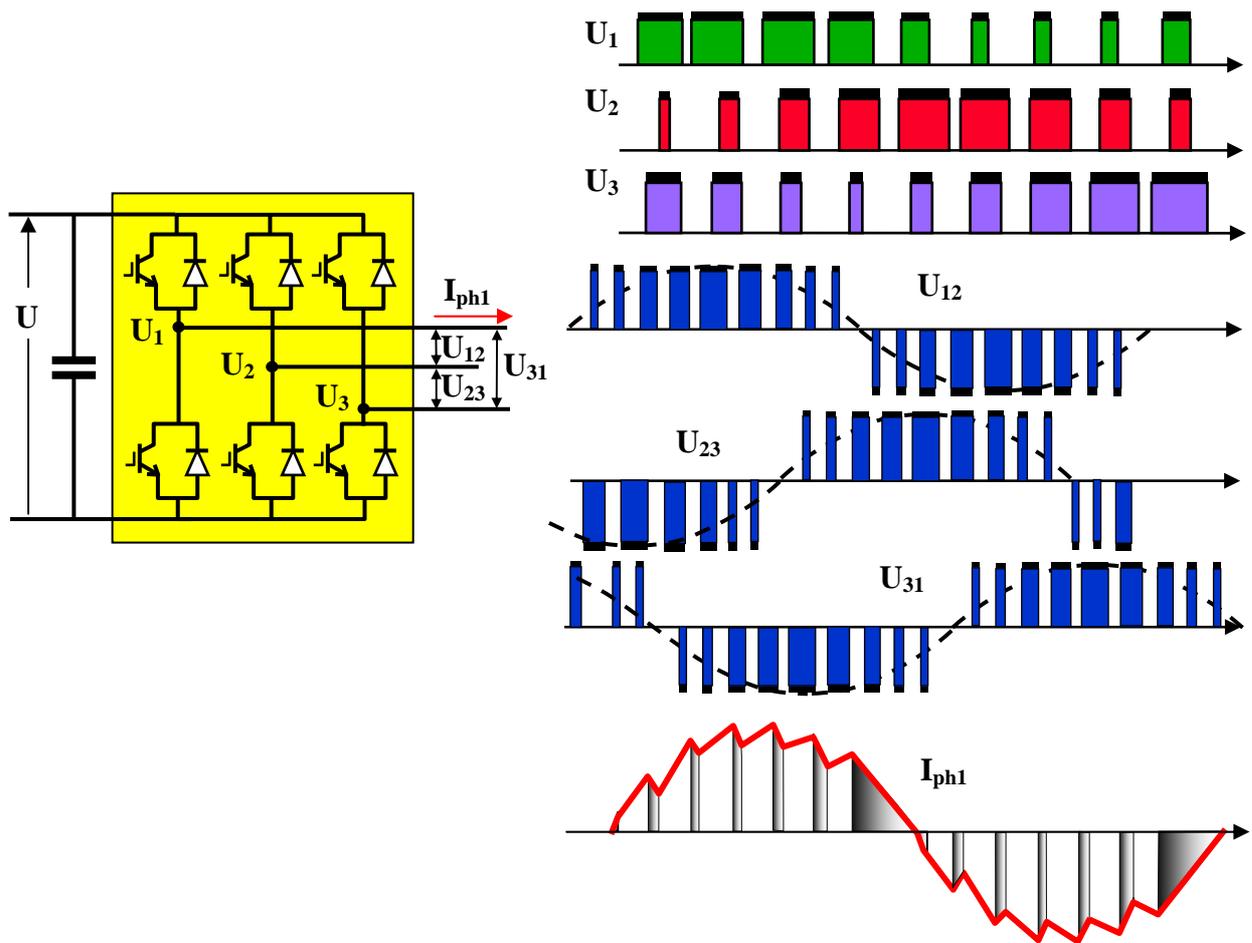


Fig. 17 – Fonctionnement de l'onduleur

Ce fonctionnement est réversible, de sorte que si le moteur devient générateur, entraîné par l'énergie cinétique du train, l'onduleur est redresseur et l'on recueille une tension continue.

Le redresseur

C'est un convertisseur surtout utilisé depuis l'introduction du monophasé 25 kV. La diode puis le thyristor en furent les composants de base durant un demi siècle. Le thyristor introduit un déphasage entre la tension et le courant de sorte que le facteur de puissance (cosinus de l'angle de déphasage) est inférieur à l'unité. Cet inconvénient provoque une consommation de courant « réactif » nuisible au bon rendement de l'alimentation et générateur de courants harmoniques perturbateur des réseaux de communication et de signalisation situés à proximité.

Grâce aux semi conducteurs actuels leur commande forcée permet de régler le fondamental de la tension d'entrée U_e en phase et en amplitude de manière à obtenir le courant de sortie I_s en phase avec la tension de sortie U_s . Le facteur de puissance est donc égal à l'unité. Une telle commande permet de fournir une tension continue stable pour l'onduleur appelée « bus continu ». La réversibilité est assurée, le pont devenant onduleur, il permet le freinage par récupération. Ce convertisseur est appelé « Pont Monophasé à Commutation Forcée » - PMCF, ou encore Pont 4-quadrants. (fig. 18)

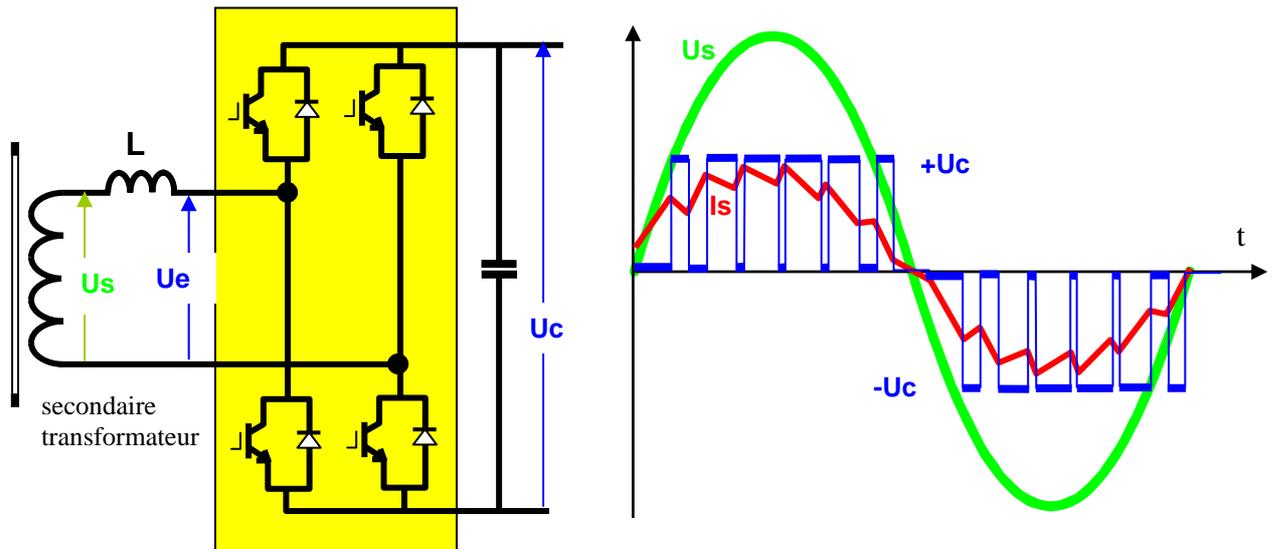
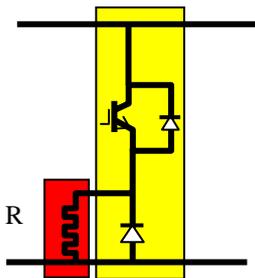


Fig. 18 – Pont redresseur monophasé à commutation forcée

Le hacheur



Avec un seul transistor IGBT fonctionnant en hacheur, le courant débité par le moteur à travers l'onduleur, est réglé pour faire varier la résistance apparente du rhéostat de freinage R. (fig. 19)

Fig. 19 – Hacheur de freinage rhéostatique

Architecture des chaînes de traction triphasées

Schéma mono tension continue

L'application la plus simple concerne les engins de traction urbains alimentés en 750 V continu (voir 600 V pour certains réseaux) : métros, tramways. La prise de courant, par frotteurs sur conducteur latéral ou pantographe sous fil de contact, est connectée à un disjoncteur. En aval du filtre d'entrée se trouve l'onduleur alimentant les moteurs asynchrones en parallèle. (fig. 20)

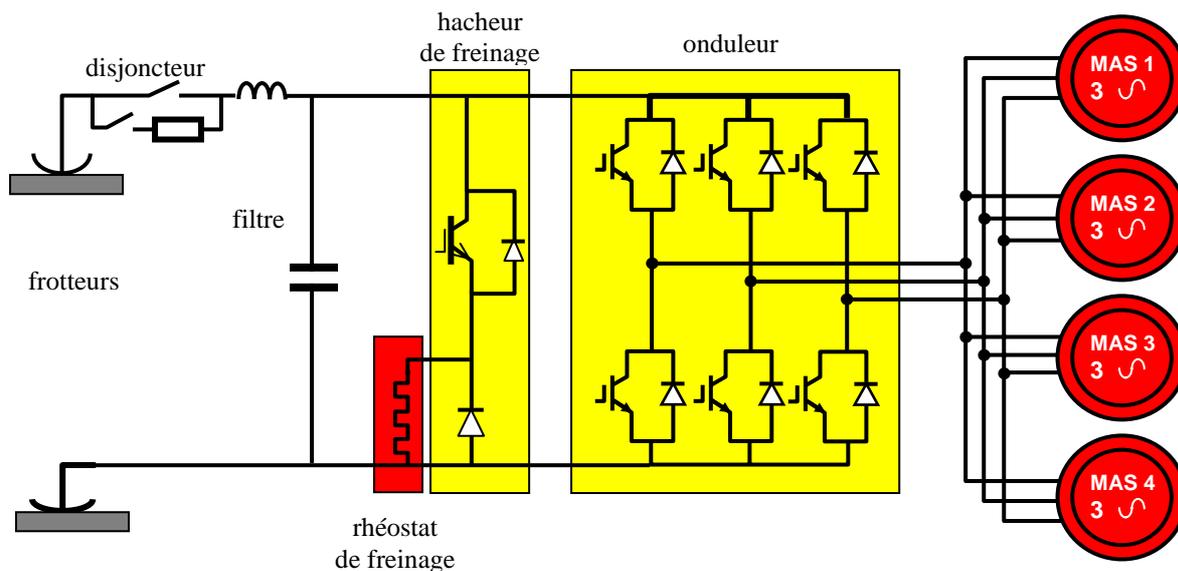


Fig. 20 – Chaîne de traction mono tension continue

Le freinage dynamique est possible :

- soit par récupération : l'onduleur fonctionne alors en redresseur ;
- soit rhéostatique : une résistance sur le bus est commandé par le hacheur.

Le schéma donné en exemple représente un onduleur alimentant quatre moteurs ; c'est la configuration habituelle d'une motrice de métro. Une rame comporte plusieurs motrices (deux ou trois pour une rame de cinq ou six véhicules) de sorte qu'une défaillance d'une chaîne de traction est acceptable compte tenu du nombre de chaînes restant actives sur les autres motrices.

Schéma bi tensions monophasée - continue

La configuration est des plus répandue pour les réseaux, tels qu'en France, disposant de lignes électrifiées en 1500 V continu et 25 kV 50 Hz.

- Les premières locomotives bi tensions furent les BB 25100 et 25200 datant de 1964. Equipées de moteurs à collecteur, l'appareillage de base est un rhéostat, branché directement sur la caténaire en 1500 V et connecté à un redresseur à diodes au secondaire du transformateur sous 25 kV.
- Le grand progrès vient avec les BB 22200, des années 1975. Toujours avec le moteur à collecteur (monté sur bogie monomoteur), l'équipement de base est un hacheur de courant à thyristors. Sous 1500 V il est branché directement après un filtre self – condensateur ; en monophasé, le secondaire du transformateur alimente un pont de Graëtz à thyristors. Les rames à grande vitesse de la première génération – TGV Sud Est – bénéficient d'une configuration analogue.
- L'étape majeure suivante est l'emploi du moteur synchrone autopiloté alimenté par un onduleur de courant à thyristors GTO. Ainsi sont réalisées les séries très importantes de rames TGV : Atlantique, Réseau, Duplex et les 170 BB 26000.
- Il faut attendre les rames automotrices 2 niveaux (Z2N) pour voir apparaître le moteur asynchrone qui se généralisera avec la gamme « Prima » d'Alstom Transport. Equipées de convertisseurs tels que décrits ci-dessus, la conception atteint un très haut niveau de modularité, rejoignant ainsi le peloton des autres constructeurs européens, Siemens et Bombardier.

Le schéma de la figure 21 est celui de la série des BB 427000, dite « Fret ».

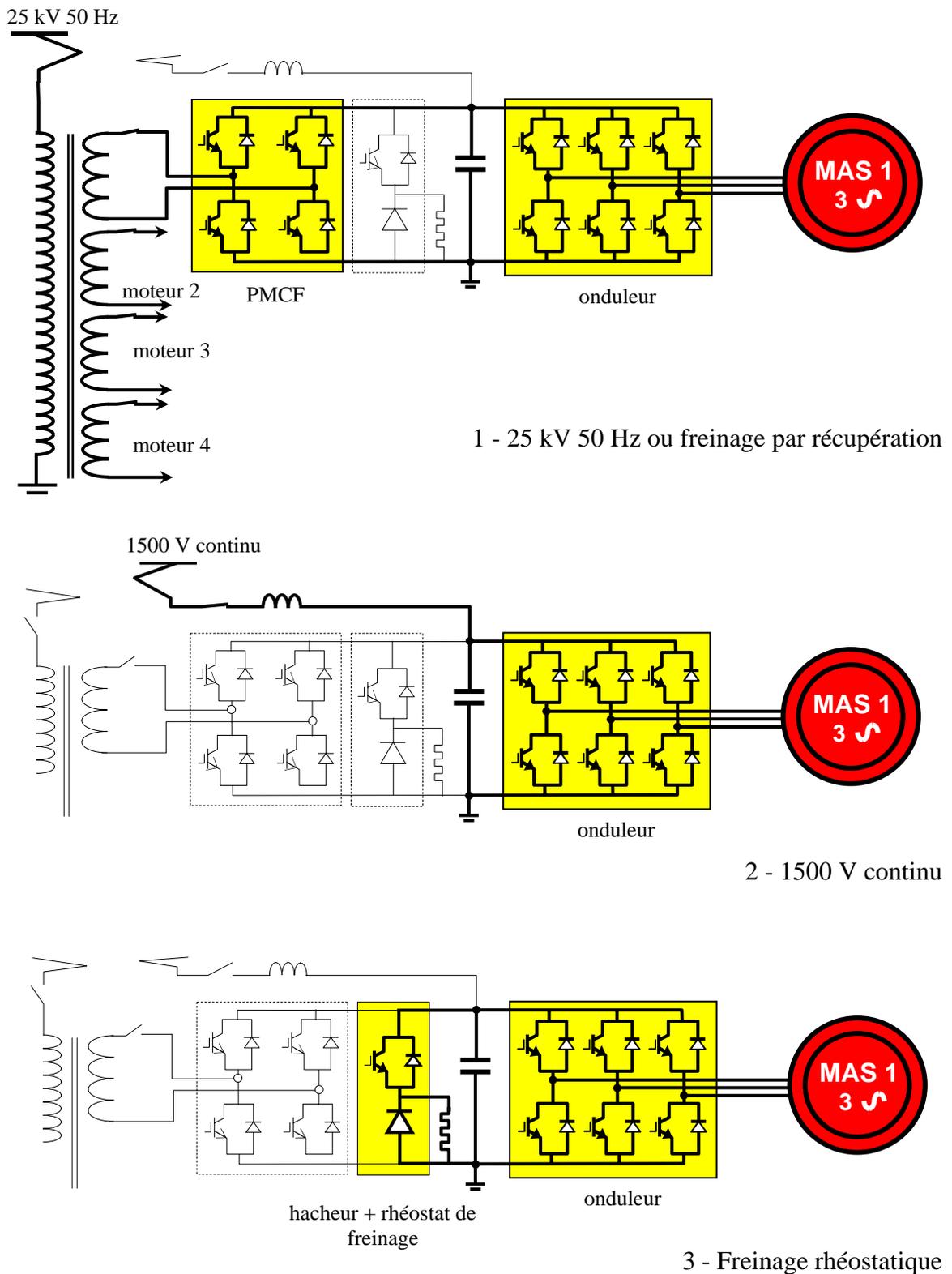


Fig. 21 – Configurations bi tensions et freinage électrique de la locomotive BB 427000

La configuration comprend une chaîne de traction indépendante pour chacun des quatre moteurs à partir du secondaire du transformateur. La disponibilité est ainsi optimale en cas de défaillance de l'une des chaînes, la locomotive peut poursuivre sa mission avec 75 % de sa puissance et de son effort à la jante.

On ne peut que se féliciter de la généralisation de ce type de schéma, puisque les rames destinées à la ligne Est - Paris Strasbourg et les futures tranches de TGV Duplex seront ainsi équipées, à l'instar des rames européennes.

Schéma tri tensions monophasées 25 kV et 15 kV 16,7 Hz – continue 1500 V

Tous les convertisseurs sont strictement identiques ; seul le transformateur est adapté au niveau de son circuit magnétique capable de la fréquence 16,7 Hz et chaque secondaire comporte une prise commutable pour adapter la tension secondaire au 15 kV primaire. (fig. 22). C'est le schéma équipant les locomotives Prima 437000.

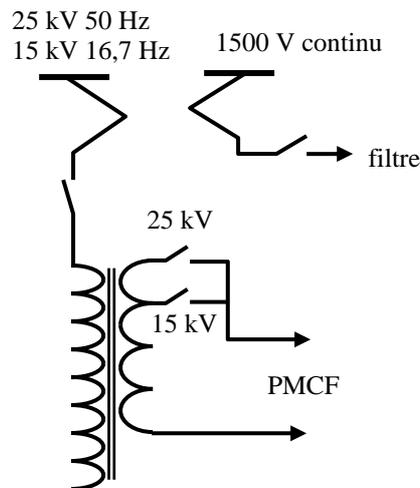


Fig. 22 – Alimentation tri tensions locomotive Fret BB 437000

Schéma quadri tensions monophasées 25 kV et 15 kV 16,7 Hz – continue 1500 V et 3000 V

Les engins de traction quadri tensions ont, en Europe exclusivement, une longue histoire datant des années 1960, lors de l'heureuse époque des trains Trans Europ Express (TEE). Rappelons que ces trains rapides, généralement de luxe pour une clientèle d'affaires ne connaissant pas ou peu l'avion, étaient pour la plupart, assurées par des rames à traction autonome. Quelle poésie au lieu des froids numéros actuels, lorsque chaque relation portait un nom : « Ligure », « Parsifal », « Etoile du Nord », « Mont Cenis », etc. ... Deux liaisons électrifiées donnèrent lieu à deux expérimentations quadri tensions :

- Milan – Paris avec les rames des Chemins de Fer Fédéraux Suisses du « Cisalpin » (Rame RAe TEE II)
- Paris Bruxelles Amsterdam avec les CC 40100 de la SNCF, puis CC 1800 de la SNCB. (la liaison Belgique Pays Bas ne fut jamais assurée pour des raisons beaucoup plus obscures que techniques !)

En tout état de cause, on est encore dans le domaine prototype ; il faut attendre le développement du TGV Thalys pour voir une série d'engins quadri tensions, bien que sous 15 kV 16,7 Hz la puissance soit nettement inférieure que sous 25 kV.

En Allemagne, avec les locomotives BR 189 et en France avec la Prima 6000 (comme 6000 kW) les réseaux ont à leur disposition pour la première fois de véritables quadri tensions. Le schéma est strictement le même qu'en tri tensions ; seul le dimensionnement des IGBT diffère par leur calibre, permettant une tension de bus continu de 2400 V au lieu de 1800 V.

Conclusions de la première partie

Est-il raisonnable de conclure alors que l'évolution des technologies nous surprend au fil des mois par sa rapidité ? Permettons nous de dire que le stade actuel marque une étape importante en termes de rendement énergétique et de modularité. Les chaînes de traction affichent une homogénéité quasi parfaite entre les domaines si variés du transport urbain, de la traction à grande puissance ou de la grande vitesse. Les principes de base sont les mêmes et les composants aussi. La triple alliance moteur asynchrone – semi conducteurs de puissance – micro contrôleurs informatiques a rapidement et définitivement supplanté le traditionnel moteur à collecteur. Les gagnants de cette « philosophie » ferroviaire sont assurément les réseaux et les opérateurs qui bénéficient ainsi de prix considérablement réduits et de technologie éprouvées par l'ensemble des acteurs de la construction ferroviaire. Ainsi les « frontières électriques » de jadis en Europe, n'existent plus. L'engin multi tensions n'est plus une prouesse technique mais un outil banal. Une évolution prochaine se dessine encore avec le moteur synchrone. Nous avons montré avec la plus grande objectivité possible, que son emploi est resté une exception française, certes importante puisqu'il équipe la majeure partie du parc à grande vitesse. Or la commande de son onduleur est nettement plus simple que celui du moteur asynchrone. Son handicap est dans le rotor qui reste complexe avec ses bagues et balais, donc coûteux. La technologie du rotor du moteur synchrone à aimant permanent, donc sans bobinage, est sans doute promis à un important développement. Des essais et prototypes sont en cours d'expérimentation. Donnons nous rendez dans quelques mois pour en suivre l'évolution. Dans cette attente nous aborderons en seconde partie, la traction autonome et ses diverses transmissions : électrique, hydraulique.

Pierre CHAPAS
Lyon, Janvier 2006