

MOTEUR ASYNCHRONE

Depuis le début de la traction électrique, le moteur sans collecteur a motivé de nombreuses recherches de la part des constructeurs et des exploitants.

La raison essentielle de ces investigations était d'aboutir à une conception très simple du moteur de traction.

Il ne s'agit, en fait, que d'une apparente simplicité, car si la construction du rotor est effectivement relativement simple, celle du stator de grosses machines tels que les moteurs de traction demande un grand nombre d'opérations de reprises manuelles d'isolation pour réaliser les connexions entre bobines du stator et les cercles d'alimentation de ces bobines.

Dès la fin du siècle dernier, les électrifications en courant triphasé se développent en Suisse, en Allemagne, aux Etats Unis et surtout en Italie.

Mais, ce type d'électrification ne s'est pas étendu en raison :

- de la complexité des lignes aériennes de contact, bifilaires, la troisième phase étant constituée par les rails de roulement,
- du manque de souplesse du réglage de la vitesse du moteur asynchrone alimenté à fréquence fixe.

Il est apparu dès lors que le moteur asynchrone devait être alimenté par l'intermédiaire de convertisseurs embarqués. L'alimentation de ces convertisseurs pouvait, ainsi, être assurée par une ligne aérienne de contact unifilaire, le deuxième conducteur d'alimentation étant constitué par les rails de roulement.

Cette conversion a été obtenue jusqu'aux années 1950/1960 par des groupes tournants (un convertisseur de phase et un convertisseur de fréquence).

Cette solution, à groupes tournants, a été appliquée à une série de 20 locomotives monophasées CC.14000 de 2650 KW pour service "marchandises". Ces locomotives ont été livrées à partir de 1955.

D'une remarquable technologie, ces locomotives présentaient toutes les propriétés des transmissions à moteurs asynchrones modernes.

Malheureusement leurs groupes tournants et leurs moteurs de traction ont donné lieu à de nombreux incidents d'isolation. Aussi, elles ont été toutes retirées du service à partir des années 1980.

Le développement des performances des semi-conducteurs (diodes-thyristors) a permis d'aborder la conversion statique par onduleurs triphasés à bord des engins moteurs à partir de 1965, et en 1970, BBC présentait, à l'exposition de Munich, une locomotive diesel-électrique, DE 2500, de 1800 kW, à moteurs asynchrones alimentés par onduleurs de tension à thyristors.

Deux types de chaînes de traction à moteurs asynchrones sont actuellement utilisés en traction :

- **la chaîne de traction à moteurs asynchrones alimentés par onduleurs de tension.** Le développement de cette chaîne de traction a été favorisé par la mise à disposition des thyristors GTO.
- **la chaîne de traction à moteurs asynchrones alimentés par onduleurs de courant.**

Après un rappel rapide des propriétés et des caractéristiques du moteur asynchrone, nous examinerons, ensuite, chacun de ces deux types d'équipements.

Nous rappellerons brièvement le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone et nous examinerons ensuite les conditions dans lesquelles il faut alimenter ce moteur pour une utilisation en traction. Le procédé d'alimentation décrit ci-après qui est appliqué sur la BB 10003 est appelé "alimentation en tension imposée".

Il faut signaler que ce procédé n'est pas le seul possible et qu'il existe aussi une «alimentation en courant imposé» qui a été appliquée par Alstom aux nouvelles automotrices Z2N à moteurs asynchrones.

Principe de Fonctionnement.

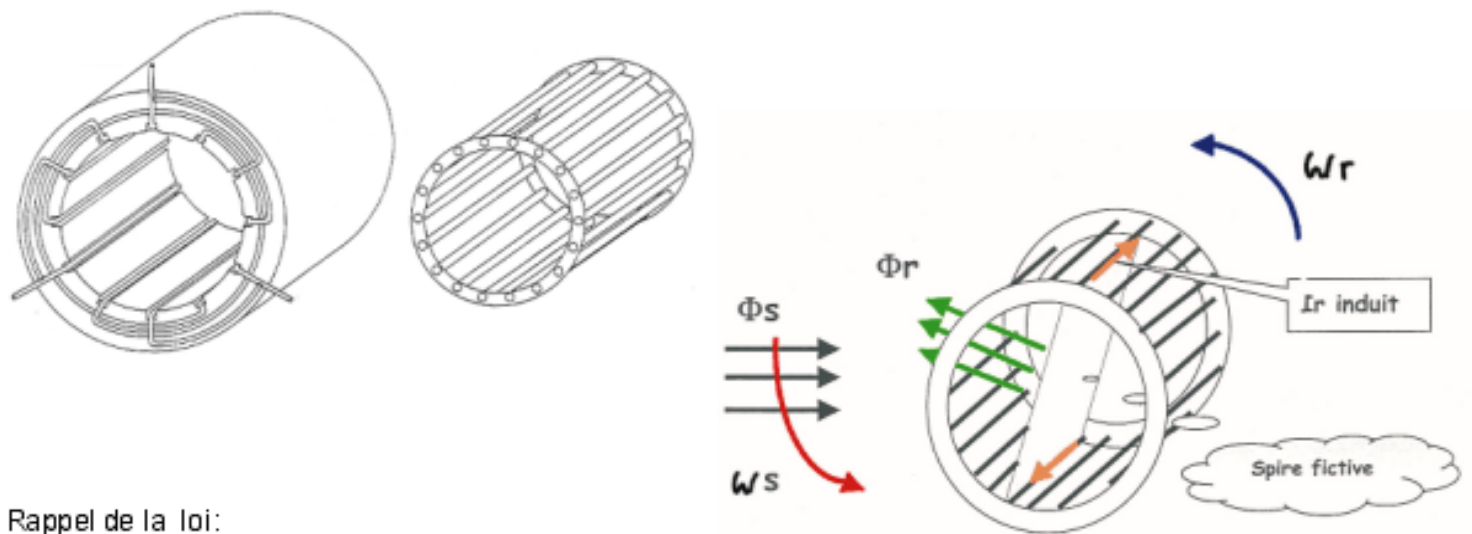
1-1 Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone

Le stator d'un moteur asynchrone porte un enroulement triphasé c'est-à-dire trois enroulements décalés entre eux de 120° . Il faut remarquer que ce stator est strictement identique au stator d'une machine synchrone. Si on alimente les trois enroulements (phases) de ce stator par une source de courant alternatif triphasé, on génère un champ magnétique «tournant». Ce champ «tournant» est tout simplement équivalent à celui qui serait engendré par un aimant tournant à une vitesse angulaire égale à la pulsation du courant triphasé.

Le rotor le plus simple pour un moteur asynchrone est constitué d'un ensemble de barres conductrices reliées entre elles par deux anneaux de court circuit à la façon d'une «cage d'écureuil».

Supposons que le rotor tourne à l'intérieur du stator. Si sa vitesse de rotation est égale à la vitesse du champ tournant, le rotor «voit» un champ magnétique constant et aucun courant ne circule dans les conducteurs rotoriques. Dans ce cas qui correspond au synchronisme, aucun couple électromagnétique ne s'exerce sur le rotor. Par contre, si la vitesse de rotation est différente de celle du champ tournant, le rotor «voit» un champ magnétique variable lequel induit des courants dans les conducteurs du rotor. L'interaction de ces courants rotoriques avec le champ magnétique crée un couple qui est moteur si le rotor tourne moins vite que le champ tournant et frein dans le cas contraire. Le moteur est ainsi appelé asynchrone car l'obtention d'un couple nécessite un certain «glissement» entre le rotor et le champ du stator.

Le glissement d'un moteur asynchrone de traction est faible, de l'ordre de 1 % pour l'obtention du couple maximum au point de définition du moteur.



Rappel de la loi:

LAPLACE:

Une portion de conducteur l , parcouru par un courant I placé dans un champ d'induction magnétique \vec{B} qui fait un angle x avec le conducteur, est soumise à une force perpendiculaire au plan défini par l'élément de conducteur et l'induction; elle est dirigée vers la gauche d'un observateur d'Ampère qui regarde dans le sens du champ; son intensité est donnée par la relation :

$$F = l I B \sin x$$

(Newton) (Ampère) (mètre) (teslas)

un circuit plan, de surface S parcouru par un courant I placé, dans un champ d'induction uniforme, est soumis à un couple qui s'exercerait sur un aimant de moment magnétique $\vec{\mu}$ porté par la normale au circuit sortant par sa face nord et de valeur $\vec{\mu} \cdot \vec{B}$

Soit une spire fermée placée dans un induit d'alternateur qui fournit une induction tournante. Le flux Φ_s produit coupe les conducteurs de la spire en Y induisant une f.e.m.e. et donc un courant i : loi de LENZ. L'application de la loi LAPLACE permet de dire qu'une force f tangentielle s'exerce sur les conducteurs de la spire.

La figure ci-dessus démontre le fonctionnement du moteur synchrone, les conducteurs du rotor sont « balayés » par le champ tournant Φ_s lorsque ω_r : il existe un "glissement" entre le rotor et le stator défini par :

$$g = \frac{\omega^s - \omega}{\omega^s}$$

1-2 Principe de fonctionnement d'un onduleur "de tension".

A partir d'une tension continue constante, un onduleur de tension élabore un système de tensions triphasées équilibrées réglables en fréquence et en amplitude.

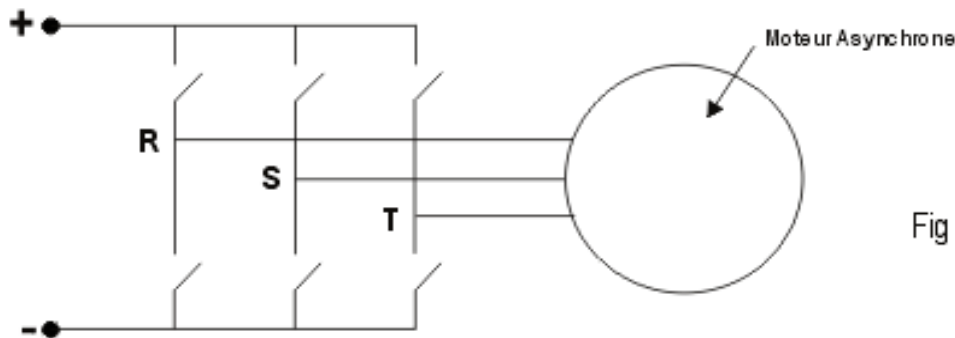


Fig : 2

fig. 2 principe de fonctionnement d'un onduleur de tension

Pour ce faire, l'onduleur utilise six interrupteurs électroniques, conformément à la figure 2. En commandant de façon judicieuse ces différents interrupteurs, il est possible d'obtenir sur les sorties des tensions alternatives formées de créneaux d'amplitude constante mais de durée variable reconstituant une onde équivalente sinusoïdale. Ce procédé de commande d'un onduleur s'appelle la modulation de largeur d'impulsion. Il est illustré sur la figure 3 qui montre les possibilités de variation de fréquence, d'amplitude et du nombre de créneaux (découpes) de la tension équivalente.

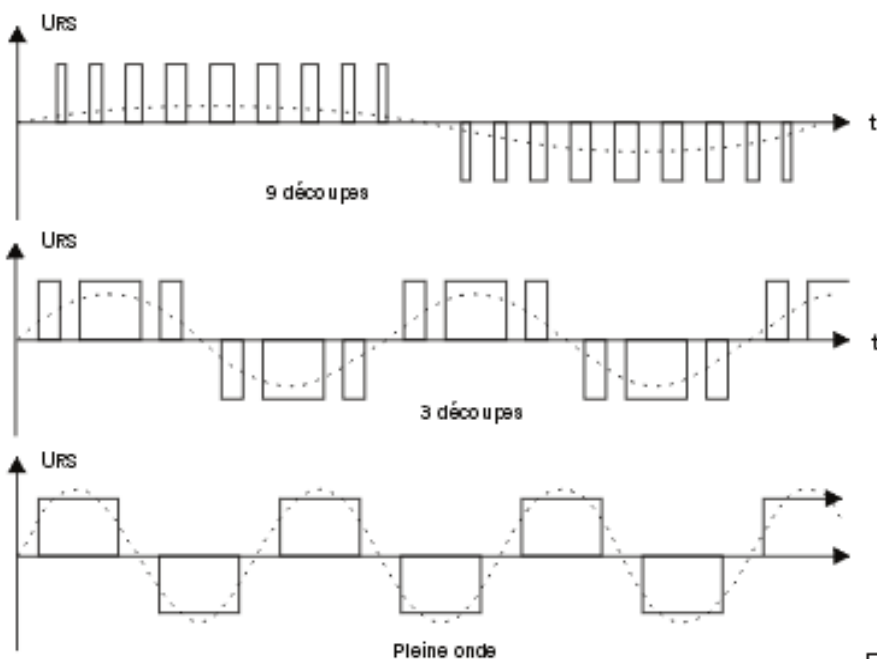


Fig : 3

Rappel de la loi :

LENZ

Le courant de self induction qui s'établit dans la bobine s'oppose à la cause qui le produit et a pour effet de freiner l'établissement du courant principal; d'où une résistance apparente ou impédance Z , supérieure à la résistance ohmique. Le courant I sera en retard par rapport à celui qui passerait dans la résistance pure de même valeur, c'est-à-dire en retard de phase par rapport à la tension U appliquée.

Calcul de l'impédance ; l'emploi du calcul complexe permet de trouver la somme $\vec{U}_1 + \vec{U}_2$ de ces 2 fonctions sinusoïdales. Un nombre complexe est la forme de $\vec{a} + j\vec{b}$, où le symbole j est tel que $j^2 = -1$. dans le plan complexe le vecteur $\vec{U} = \vec{a} + j\vec{b}$

le symbole j correspond à une rotation

fig 3: Modulation de la largeur d'impulsion

Allure de la tension aux bornes du moteur

La tension sinusoïdale équivalente est en tracé en pointillé.

La difficulté de réalisation d'un onduleur de tension réside dans les interrupteurs électroniques. Compte tenu des valeurs de tension et de courant mises en jeu pour un moteur de traction de locomotive, il ne pouvait être envisagé au début du projet BB 10003 d'autre solution que l'utilisation de thyristors classiques rapides. Comme dans un hacheur, il est nécessaire de disposer de circuits d'extinction pour être capable d'ouvrir l'interrupteur constitué par le thyristor. La figure 4 représente le schéma de principe d'une "phase onduleur" qui correspond fonctionnellement à deux interrupteurs. Cette figure montre les deux thyristors principaux, les deux thyristors d'extinction (TE1 est chargé d'éteindre TP1) ainsi que les deux diodes de roue libre (D1 et D2) dont la présence est nécessaire car le courant peut être de sens opposé à celui de la tension. Le schéma comprend également deux condensateurs "de commutation", une inductance "de commutation" et deux inductances de protection des thyristors principaux.

1-3 Commande à vitesse variable d'un moteur asynchrone alimenté en tension imposée

Pour régler le fonctionnement d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur "de tension", nous disposons, grâce à la modulation de largeur d'impulsion, d'un réglage d'amplitude de la tension et d'un réglage de fréquence.

L'amplitude de la tension est ajustée de telle sorte que le flux magnétique dans le moteur soit maximal. Il est nécessaire pour cela d'augmenter la tension à peu près proportionnellement à la vitesse de rotation du moteur. Bien entendu, ce réglage n'intervient qu'en deçà de la vitesse pour laquelle la tension maximale de l'équipement est atteinte (68 Km/h sur la BB 10003). Au-delà de cette vitesse, le flux magnétique diminue.

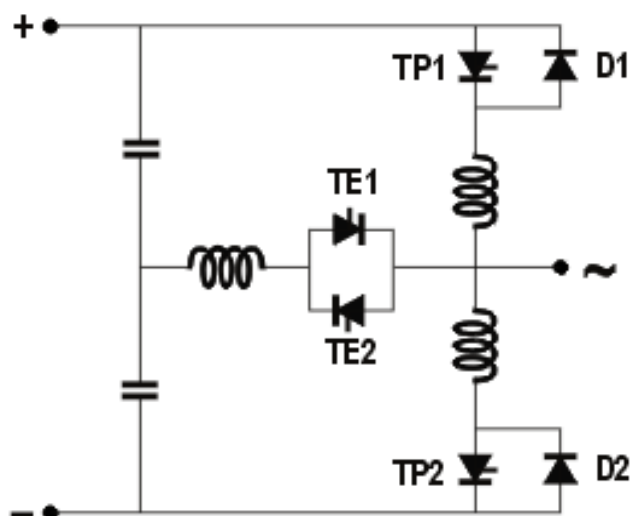


Fig.4 - Principe d'une phase onduleur.

Le couple du moteur, c'est-à-dire finalement l'effort de la locomotive, est tout simplement proportionnel à la différence de vitesse entre le champ tournant et le rotor appelée fréquence glissée. Pour régler ce couple, il suffit de mesurer la vitesse de rotation et d'ajuster la fréquence de l'onduleur de manière à obtenir une fréquence glissée proportionnelle au couple souhaité. Il faut remarquer que le passage de traction à freinage électrique ne nécessite rien d'autre que le changement de signe de la fréquence glissée.

Les différents réglages précédemment évoqués s'effectuent au niveau de l'électronique de commande de même que l'inversion de sens de marche qui est obtenue en permutant la commande de deux phases pour changer le sens de rotation du champ tournant.

1-4 Avantages du moteur asynchrone

Nous ne reviendrons pas sur l'intérêt des moteurs sans collecteur par rapport aux moteurs à collecteur, de nombreux articles ayant été publiés sur ce sujet.

L'intérêt particulier du moteur asynchrone réside dans son rotor. En effet moyennant certaines précautions de construction qui seront évoquées dans la suite de cet article, le rotor d'un moteur asynchrone est d'une remarquable robustesse et semble donc bien adapté à une utilisation en traction ferroviaire. La simplicité du rotor permet également d'aboutir à des coûts de construction très compétitifs.

Les essais ont été réalisés sur une locomotive du type BB15000 (la 15007 spécialement modifiée).

La BB 10003 à moteurs asynchrones triphasés et onduleurs de tension lors des essais de 1985 entre Verberie et Ormoy-Villiers, cette locomotive a été transformée à Belfort pour recevoir des moteurs asynchrones et des appareillages du TGV Transmanche qui sera tritension (750 V et 3000 V continu - 25 kV 50 Hz); elle a circulé sur la ligne du Médoc, de Bordeaux à La Pointe Grave, alimentée en conséquence (3000V entre Lesparre et Soulac).

2-1 Schéma des circuits de puissance

Le schéma des circuits de puissance de la locomotive est donné à la figure 5. Le transformateur principal comporte 2 enroulements secondaires de traction d'une tension nominale de 2900 V. Chaque secondaire débite sur un pont de thyristors de façon à délivrer une tension redressée de 2200 V qui est filtrée par un ensemble inductance-condensateur.

La locomotive est équipée de quatre moteurs asynchrones à rotor à cage. Chaque moteur est alimenté par un onduleur piloté de façon indépendante des autres moteurs. L'onduleur impose au moteur sa tension et sa fréquence, il fonctionne en modulation de largeur d'impulsion (MLI). Entre les moteurs et les onduleurs sont intercalées des inductances destinées à réduire, dans la zone des vitesses moyennes, la valeur de crête du courant alternatif dans le moteur afin que ce courant ne dépasse pas les possibilités de l'onduleur. Ces inductances qui deviendraient gênantes aux grandes vitesses sont court-circuitées à partir de 100 Km/h.

Les deux ponts redresseurs, susceptibles de fonctionner soit en pont mixte, soit en pont complet, permettent d'alimenter les onduleurs sous la tension constante de 2200 V.

En traction, chaque pont fonctionnant en pont mixte, alimente deux onduleurs en parallèle. Un facteur de puissance élevé est maintenu car les ponts travaillent avec un faible retard à l'amorçage.

En freinage par récupération, le pont du bogie 1 fonctionne en pont complet en mode onduleur.

Un inverseur entre le filtre et le pont complet permet d'utiliser ce dernier pour récupérer l'énergie des quatre onduleurs mis en parallèle par deux contacteurs.

Le pont du bogie 2 fonctionne toujours en pont mixte. Il permet ainsi de maintenir une tension continue constante aux très faibles efforts de freinage lorsque l'énergie récupérée est plus petite que les pertes de l'ensemble moteur onduleur.

Le freinage d'urgence est rhéostatique. Dans ce cas, les deux onduleurs de chaque bogie sont mis en parallèle et débitent sur des résistances.

Il faut noter que le schéma permet, tout au moins en traction, une totale indépendance de fonctionnement entre les deux bogies.

D'autre part, l'isolement en cas de besoin de l'un des moteurs permet de conserver les trois quarts de la puissance de la locomotive.

Sur le schéma de la figure 5, l'onduleur est symbolisé par six interrupteurs électroniques. Le schéma complet d'une phase onduleur c'est-à-dire du tiers d'un onduleur est donné

Fig 5 Ci-dessous montre le schéma de principe de la BB 10003

TR : contacteurs fermés en traction,

FR : contacteurs fermés en freinage par récupération

FU : contacteurs fermés en freinage rhéostatique d'urgence

Figure 6:

Sur cette figure apparaissent les deux branches de 4 thyristors principaux montés en série, leurs diodes de roue libre, les deux branches de 2 thyristors d'extinction montés en série.

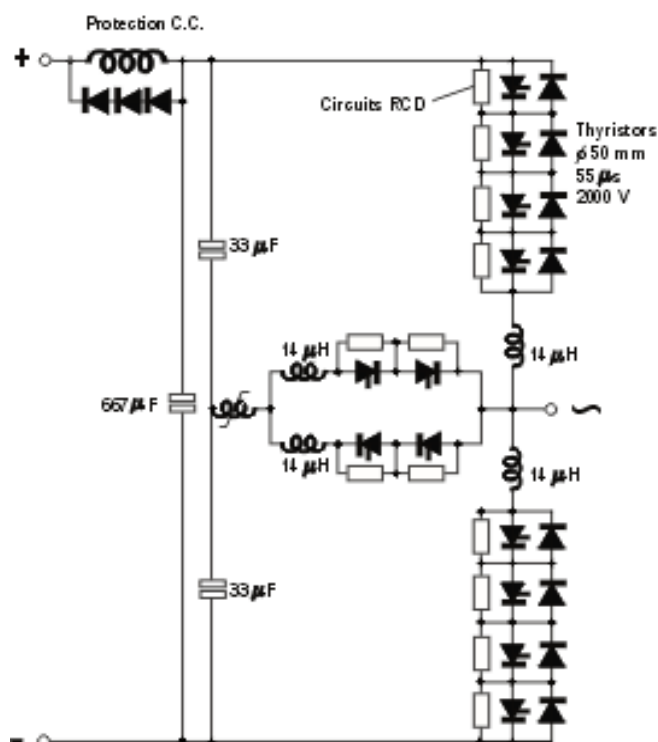


Fig : 6

2-2 Description sommaire des circuits auxiliaires

Les auxiliaires de la BB 10003 comprennent essentiellement :

- un chargeur de batterie,
- deux moto-ventilateurs pour les moteurs de traction,
- six moto-ventilateurs installés dans le bloc central,
- un compresseur.

Ces différents auxiliaires sont alimentés en continu par des ports mixtes connectés sur des prises intermédiaires de l'enroulement chauffage du transformateur principal. Les moteurs des moto-ventilateurs et du compresseur sont des moteurs à collecteur.

2-3 Installation de la locomotive

La BB 1 0003. L'équipement comprend :

- un bloc central,
- deux blocs moteur,

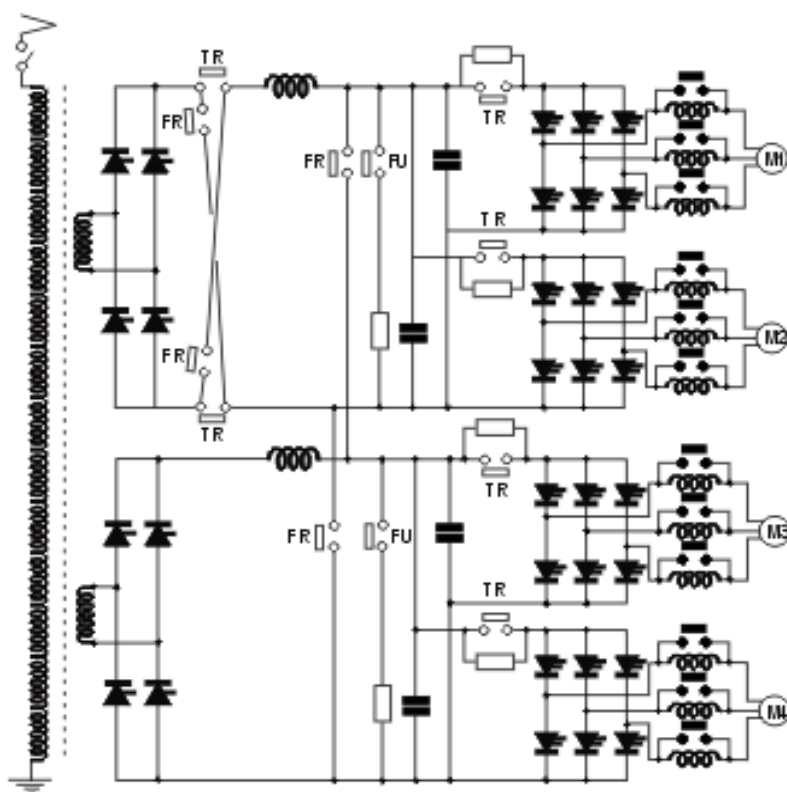


Fig : 5

- un bloc batterie,
- un bloc pneumatique.

L'ensemble "transformateur principal - inductances de filtrage" est monté sous caisse comme dans une locomotive BB 15000.

Le bloc central : Ce bloc regroupe l'ensemble des semi-conducteurs de puissance des deux ports et des quatre onduleurs ainsi que les différents condensateurs associés (condensateurs de filtrage et condensateurs de commutation). Les semi-conducteurs sont enfermés dans des enceintes contenant un fluide caloporteur (flugène 113, appelé plus couramment fréon).

Se reporter sur le livre "ABC du TGV" page 68.

GENERALITES SUR LES MOTEURS ASYNCHRONES.

Le champ tournant est représenté ici par 2 pôles d'aimant N, S, produisant un champ magnétique d'induction B . Cet aimant se déplace (glisse) dans le plan de la figure 7.

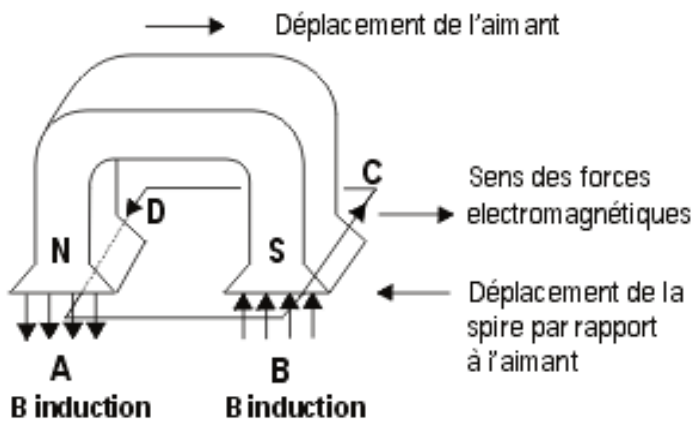


Fig : 7

Considérons une spire conductrice de forme rectangulaire, dont les côtés AD et BC, de longueur - l , sont perpendiculaires au plan de la figure et distants l'un de l'autre d'un espace égal à l'entraxe des pôles de l'aimant N.S.

Chacun des conducteurs AD et BC sera le siège d'une **fem e**, si les 2 pôles de l'aimant se déplacent à une vitesse V par rapport à la spire. La **fem e** induite dans chaque côté AD et BC de la spire a pour valeur :

$$\underline{e = Blv}$$

Il en résulte un courant i qui circule dans la spire conductrice considérée.

La présence de l'induction B et du courant i donne naissance à une force électromagnétique **F** qui s'exerce sur chacun des côtés AD et BC. Compte tenu du sens du déplacement de la spire par rapport aux pôles (à la vitesse **V**), la figure 8 fait apparaître le sens des **fem e** et celui du courant induit dans la spire.

Le sens des forces électromagnétiques qui en résultent montre que la spire est entraînée dans le sens du déplacement des pôles de l'aimant, qui s'exerce sur chacun des côtés **BC** ou **AD** est donc proportionnelle

- à l'induction **B** qui existe dans l'entrefer,
- au courant **i** qui circule dans la spire.

La force électromagnétique :

$$\underline{F = Bil}$$

Ce courant **i** est d'autant plus important que la **fem e** induite dans chacun des côtés est plus importante.

La valeur de cette fem e est donnée par la relation classique: $e = Blv$,

V étant la vitesse de déplacement de l'aimant par rapport au côté BC ou AD. Rappelons, que nous avons considéré que ces deux côtés de spires sont séparés l'un de l'autre d'une distance égale au pas polaire.

Dans ces conditions, les **fem e** induites dans chacun des côtés BC ou AD sont égales, puisque **B** a la même valeur pour des distances égales au pas polaire.

On voit donc que pour qu'il y ait courant induit **i** dans la spire, il faut qu'il y ait déplacement relatif de l'aimant par rapport à la spire.

Le raisonnement que l'on vient de tenir est vrai pour les positions relatives de la spire et de l'aimant indiquées à la figure 8.

Mais comme la spire glisse par rapport à l'aimant on voit que l'induction varie suivant la position des côtés de la spire par rapport à l'aimant. En particulier, lorsque les côtés BC et AD se trouveront dans l'espace interpolaire (entre les pôles S et N), l'induction **B** sera nulle et donc l'effort sur chacun des côtés BC et AD sera nul.

GENERATION DU COUPLE DANS UN MOTEUR ASYNCHRONE

Dans un moteur asynchrone, le rôle de l'aimant est joué par le champ tournant généré par les bobines du stator alimentées par un système de tensions triphasées.

Les conducteurs actifs BC et AD sont disposés suivant des génératrices d'un cylindre magnétique, feuilleté, tournant à l'intérieur du stator.

C'est le rotor du moteur asynchrone.

L'ensemble stator et rotor constitue un circuit magnétique qui présente, évidemment, un entrefer entre stator et rotor. C'est par ce circuit magnétique que passe le flux du champ tournant. Celui-ci est créé par les courants triphasés qui alimentent les bobines des pôles du stator.

On énonce ceci en disant que le courant magnétisant est fourni par le réseau triphasé.

Ce courant en quadrature avec la tension appelle donc une puissance purement réactive. C'est ce courant qui crée (comme dans un transformateur) la force contre-électromotrice du moteur asynchrone.

Toutefois, en raison de la présence de l'entrefer entre rotor et stator le courant magnétisant d'un moteur asynchrone est nettement plus important que celui d'un transformateur.

Nous rappellerons ici qu'il n'y a courant induit dans les barres du rotor et donc couple que si il y a "glissement" du rotor par rapport au champ tournant.

On désigne par glissement

$$g = \frac{\omega^s - \omega^r}{\omega^s} \quad \text{ou} \quad g = \frac{N_s - N}{N_s}$$

ω^s et ω^r étant respectivement la vitesse angulaire du champ stator et celle du rotor proportionnelle aux vitesses en tours minutes

N_s du champ tournant

N du rotor

VALEUR DU COUPLE DU MOTEUR ASYNCHRONE POUR UNE VALEUR DE GLISSEMENT DONNEE

Supposons que le stator présente simplement 3 bobines décalées les unes par rapport aux autres de 120° (stator bipolaire) - Cet ensemble de 3 bobines va créer le champ tournant d'induction **B** au niveau de l'entrefer.

Si la répartition de l'induction dans l'entrefer est sinusoïdale, le côté BC coupera, en fonction du temps une induction **B** dont la variation est indiquée à la figure 9. Il en sera de même pour le côté AD.

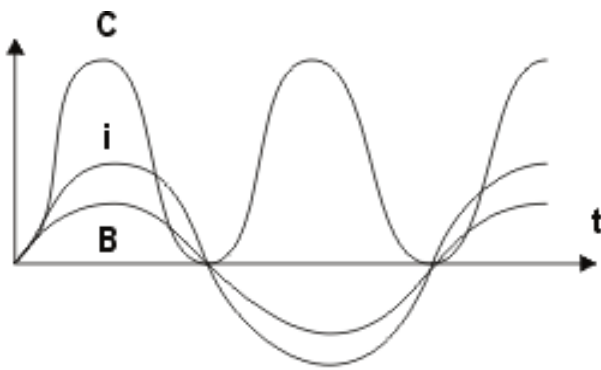


Fig : 8

La **fem e** : $e = Blv$, induite dans chacun des côtés, suit donc la même loi sinusoïdale que l'induction **B**.

Le courant **i** qui circule dans la spire ABCD se déduit de la valeur de cette **fem e**, compte tenu de l'impédance **Z** de la spire pour la fréquence de l'induction, fréquence proportionnelle à la différence des vitesses de rotation **Ns** du champ tournant et **Nr** du rotor. On appelle souvent cette fréquence: "fréquence glissée ou fréquence des courants".

a)- L'inductance de la spire est supposée négligeable

Si on suppose que l'inductance de cette spire est négligeable, le courant **i** sera en phase avec la **fem e**, et sera donc en phase avec l'induction **B**.

La valeur de l'effort

$$F = Bil$$

se déduit donc des courbes représentatives de **B** et de **i**, en multipliant les valeurs des ordonnées correspondantes.

On voit que cette courbe représentative de l'effort sur un conducteur du rotor est une sinusoïde telle que représentée à la figure 8

Si la spire est disposée sur le rotor de telle sorte que la distance entre **BC** et **AD** soit égale au pas polaire on voit que ces deux efforts créent un couple.

La variation du couple développé par cette spire se déduit de la figure 8 précédente. Le couple est donc une fonction sinusoïdale de fréquence double de celle du courant. On voit que le couple s'annule lorsque **B** et **i** sont nuls.

Le couple est donc pulsatoire et de fréquence $2f$, f étant la fréquence d'alimentation du stator.

Pour réaliser un moteur asynchrone (ou d'induction) présentant un fonctionnement convenable, il faut éviter de telles pulsations de couple.

Pour obtenir ce résultat, il suffit de disposer, sur le rotor, de nombreuses spires telles que **ABCD**, décalées les unes par rapport aux autres (fig.9).

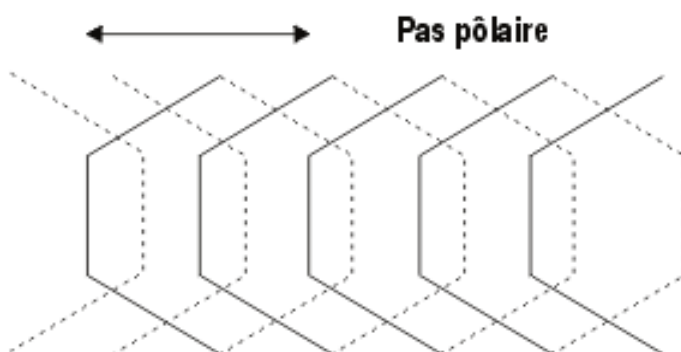


Fig : 9

Cette pulsation ω est, comme nous l'avons vu, proportionnelle au glissement du rotor par rapport au stator, et donc proportionnelle à la fréquence des courants rotoriques.

- * Elle est maximale lorsque le rotor est bloqué à l'arrêt.
- * Elle est nulle lorsque le rotor tourne à la vitesse du champ tournant.

Ainsi, pour une certaine valeur de glissement du rotor par rapport au champ tournant du stator la réactance $L\omega$ va créer un déphasage Φ entre courant et tension tel que :

$$\text{Tg } \Phi = \frac{L\omega}{R}$$

La figure 12 donne l'allure des variations de B , donc de e , de i (déphasé par rapport à e) et de F , donc du couple C s'exerçant sur les côtés BC et AD de la spire. Rappelons que la valeur de F (Bil) donc du couple s'obtient en multipliant, à chaque instant, t , les ordonnées de B et de i .

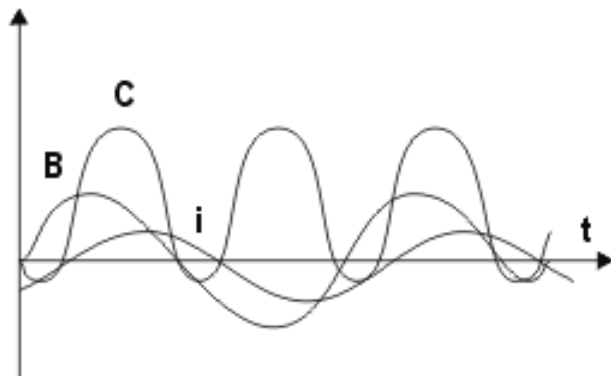


Fig : 12

Du fait du déphasage entre B et i on voit que la valeur de (Bil) donc du couple, est tantôt positive (couple moteur) tantôt négative, (couple résistant).

Le couple moyen qui s'exerce sur les côtés de la spire est donc plus faible que dans le cas où l'on supposait nulle l'inductance L de la spire.

Comme dans le cas précédent, les couples qui s'exercent sur les côtés des diverses spires s'ajoutent pour donner un couple total qui est *ici* plus faible que dans le cas précédent où on supposait nulle l'inductance de la spire.

VARIATION DU COUPLE EN FONCTION DU GLISSEMENT

Il résulte de ce qui précède que, l'inductance L de la spire a donc un effet défavorable sur le couple.

Pour les grandes valeurs de glissement, (ω important), $L\omega$ est important :

$$\text{Tg } \Phi = \frac{L\omega}{R}, \text{ est important.}$$

Le déphasage entre le courant i et l'induction B tend alors vers $\frac{\pi}{2}$ et la courbe représentative de la variation du couple en fonction du temps présente des arches négatives dont l'amplitude est voisine de celle des arches positives. Le couple moyen de la spire est donc faible.

Si on fait la somme des couples qui s'exercent sur les diverses spires, ABCD, A' B' C' D', A'' B'' C'' D'', etc... on obtient un couple moyen sur le rotor, de valeur faible.

Lorsque le glissement diminue, donc lorsque ω diminue,

$$\text{Tg } \Phi = \frac{L\omega}{R}, \text{ diminue}$$

Le déphasage entre le courant i et l'induction B diminue. Les arches négatives de couple diminuent par rapport aux arches positives, le couple moyen augmente. On démontre qu'il varie suivant une hyperbole équilatère (figure 13).

CAS DES FAIBLES GLISSEMENTS :

Lorsque le glissement est nul ($\omega = 0$) il ne peut y avoir de courant dans les conducteurs du rotor puisque la vitesse relative des conducteurs du rotor par rapport au champ tournant est nulle. Le couple est alors nul.

Pour de faibles glissements, le déphasage entre le courant i dans la spire et l'induction est faible car :

$$\text{Tg } \varphi = \frac{L \omega}{R}, \text{ est faible}$$

Courant i et induction B sont pratiquement en phase et le couple est donc pratiquement proportionnel au courant i induit dans chacun des côtés de la section.

Ce courant i est proportionnel au glissement du rotor par rapport au champ tournant du stator.

Pour la valeur d'induction B donnée, le couple varie donc alors proportionnellement au glissement du rotor par rapport au champ tournant du stator.

Pour de faibles glissements la courbe représentative de la variation du couple en fonction du glissement est une droite passant par l'origine.

Lorsque cette droite rejoint l'hyperbole équilatère précédemment décrite le couple passe par un maximum.

La figure 13 donne en définitive la courbe représentative du couple en fonction du glissement g -

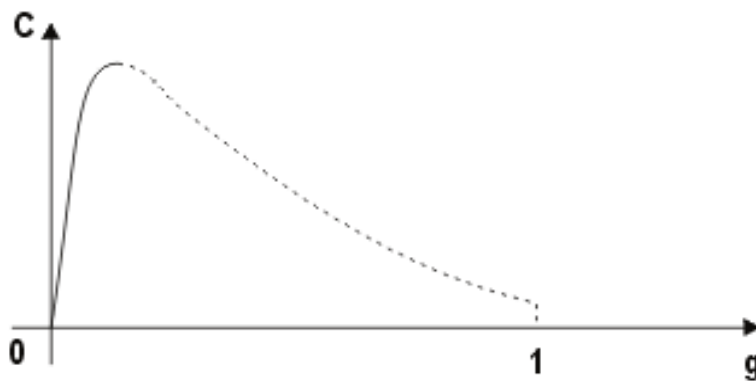


Fig : 13

De la relation :

$$g = \frac{N_s - N_r}{N_s} = 1 - \frac{N}{N_s}, \text{ avec } N = N_r \text{ vitesse du rotor}$$

Et, N_s vitesse du champ tournant, appelée **vitesse de synchronisme**, on tire $N = N_s (1-g)$

La courbe de la figure 14 donne, déduite de la figure 13, la courbe représentative de la variation du couple en fonction de la vitesse du rotor.

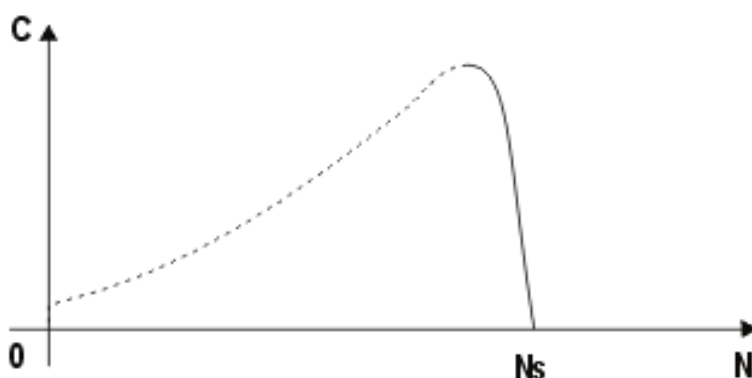


Fig : 14

On voit que le couple est :

- * nul pour la vitesse de synchronisme,
- * maximum pour une valeur de glissement relativement faible.

Il décroît ensuite comme indiqué précédemment.

Remarque

Lorsque le glissement croît, la vitesse relative entre le champ tournant et les conducteurs du rotor augmente. La fem alternative e induite dans chaque spire augmente et sa fréquence augmente. Le courant alternatif i dans la spire a pour valeur

$$i = \frac{e}{Z} \text{ avec } Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$$

LOI DE VARIATION DU COUPLE EN FONCTION DE LA TENSION D'ALIMENTATION

Pour une valeur donnée de glissement g , le couple a une valeur moyenne donnée.

Or, B , induction créée dans l'entrefer par les enroulements stator est comme pour un transformateur, proportionnelle à la tension U d'alimentation de l'enroulement, pour une fréquence d'alimentation donnée f .

$$B = \frac{U}{K}$$

Par ailleurs, pour une valeur de glissement donnée, le courant i est proportionnel à e , donc à B .

Le couple moyen proportionnel au produit $B i$ est donc proportionnel au carré de l'induction B donc au carré de la tension d'alimentation.

Ainsi, lorsqu' on connaît la courbe représentative de la variation du couple en fonction du glissement pour une tension donnée U , la courbe représentative de la variation du couple en fonction du glissement pour une autre tension U' se déduit de la précédente en multipliant les ordonnées de cette courbe par le rapport :

$$\left[\frac{U'}{U} \right]$$

Ainsi, pour une valeur

$$U' = \frac{U}{2}$$

la courbe représentative de la variation de l'effort en fonction de la vitesse se déduira de celle pour la tension U en divisant par 4 les ordonnées de chacun des points de cette courbe (figure 15)

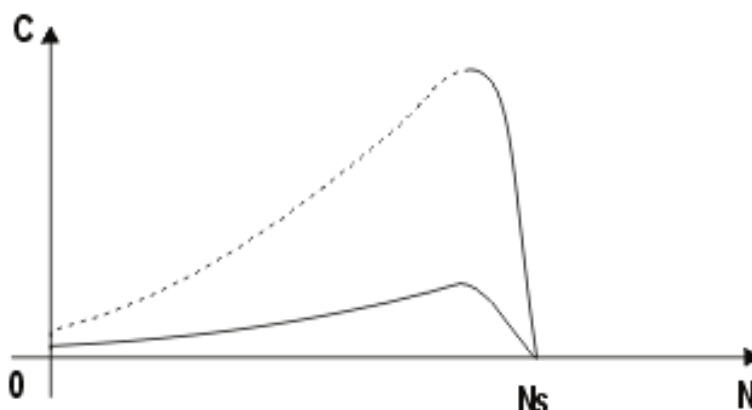


Fig : 15

$$\text{De la relation : } \mathbf{B} = \frac{\mathbf{KU}}{\mathbf{f}}$$

On voit que, à tension constante \mathbf{U} , et à fréquence croissante \mathbf{f} l'induction \mathbf{B} diminue.

Or la vitesse de synchronisme \mathbf{N}_s est proportionnelle à la fréquence \mathbf{f} et la valeur maximale du couple correspondant au glissement optimal se déplace avec cette vitesse de synchronisme.

Comme le couple est proportionnel au carré de l'induction, donc à l'inverse du carré de la fréquence ($\frac{1}{\mathbf{f}^2}$)

Le couple maximal varie donc en raison inverse du carré de la fréquence pour une alimentation à tension constante \mathbf{U} et à fréquence croissante \mathbf{f} .

FONCTIONNEMENT EN GENERATRICE ASYNCHRONE

Si on entraîne le rotor à une vitesse angulaire supérieure à celle du champ tournant on inverse le sens du déplacement relatif des côtés AD et BC par rapport au champ tournant. Il en résulte donc l'inversion du sens du courant dans ces barres par rapport au cas examiné précédemment.

La machine fournit alors un couple résistant et renvoie de l'énergie vers la ligne. **C'est le freinage par récupération.**

Le passage de traction à freinage par récupération se fait par changement du signe du glissement et ne nécessite aucune commutation électromécanique.

Il est capital de remarquer que le fonctionnement en génératrice asynchrone n'est possible que si le réseau triphasé est présent pour fournir le courant magnétisant qui crée le champ tournant.

La figure 16 montre la variation du couple en fonction de la vitesse \mathbf{N} du rotor.

Si $\mathbf{g} < 0$ devient négatif.

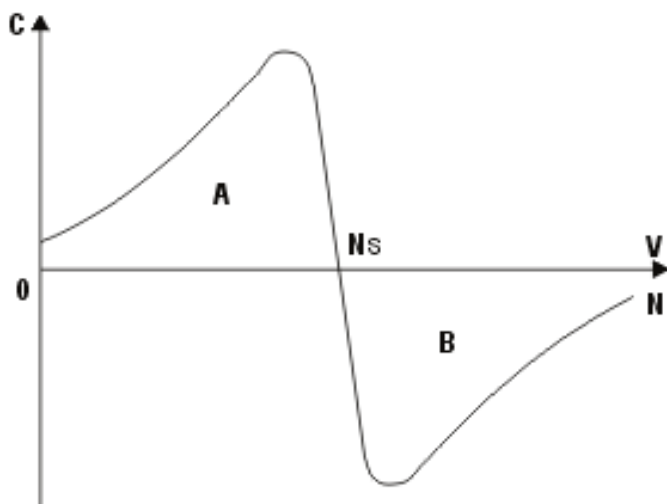


Fig : 16

La partie A de cette courbe correspond à la marche en traction.

La partie B qui correspond à des vitesses de rotation supérieures à la vitesse de synchronisme correspond à un fonctionnement en génératrice (**fonctionnement hypersynchrone**).

RENDEMENT DU MOTEUR ASYNCHRONE

La puissance fournie par le stator est:

$$\mathbf{P}_{\text{stator}} = \mathbf{C} \boldsymbol{\omega}_r$$

La puissance mécanique ($\mathbf{C} \boldsymbol{\omega}_r$) fournie par le rotor est prélevée sur le réseau triphasé (puissance active) tout comme la puissance au secondaire d'un transformateur est fournie par le primaire.

La puissance utile au rotor est

$$P_{\text{utile}} = C \omega_r$$

et le rendement est: $y = \frac{P_u}{P_s} = \frac{\omega_r}{\omega_s}$ (2)

or, d'après (1) : $g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = 1 - \frac{\omega_r}{\omega_s}$ ou $\frac{\omega_r}{\omega_s} = 1 - g$

soit

$$y = 1 - g$$

Cette relation montre que le rendement du rotor est d'autant plus faible que le glissement est important, c'est-à-dire se rapproche de 1.

Il est donc capital de fonctionner dans la zone des faibles glissements si on veut éviter des pertes inadmissibles dans le rotor.

CARACTERISTIQUE NATURELLE DU MOTEUR ASYNCHRONE ALIMENTÉ SOUS TENSION ET FREQUENCE FIXES COMPAREE A CELLE DU MOTEUR A COURANT CONTINU A EXCITATION SERIE ALIMENTÉ SOUS TENSION CONSTANTE.

La figure 17 donne la comparaison des caractéristiques de ces 2 types de moteurs avec le tracé de la résistance à l'avancement "R" d'un convoi.

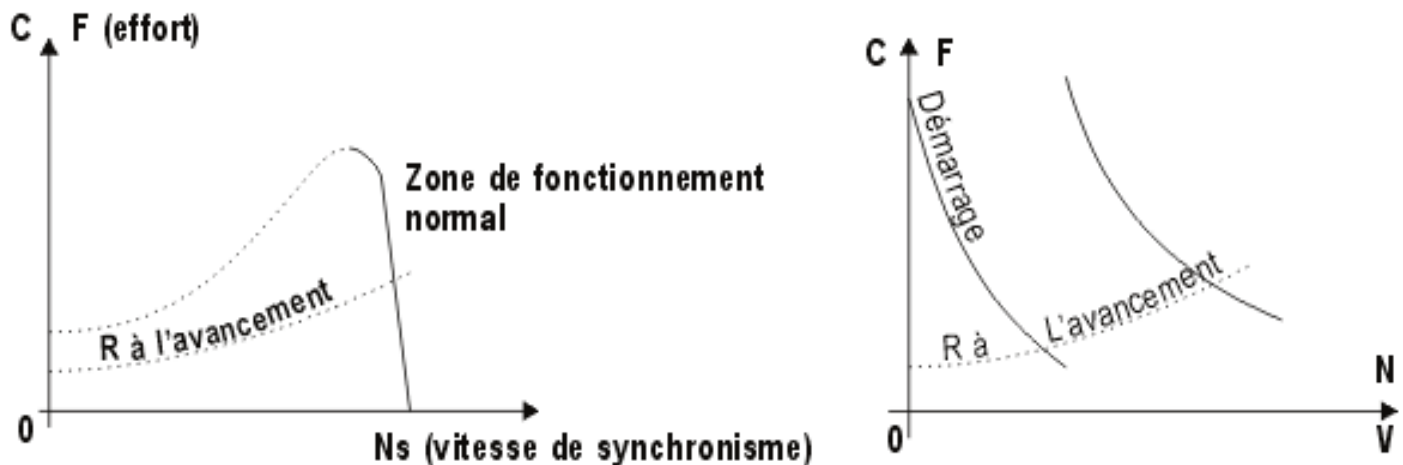


Fig : 17

On voit que la caractéristique du moteur asynchrone ne correspond pas aux objectifs de la traction qui exige d'importants efforts au démarrage et pour la mise en vitesse du convoi.

Une telle caractéristique est, à la limite, acceptable pour démarrer et entraîner un ventilateur dont le couple résistant varie comme le carré de la vitesse: $C = K N^2$. Pour de faibles vitesses le couple résistant est très faible et le couple moteur décrit précédemment suffit à assurer le démarrage et la mise en vitesse du ventilateur.

On conçoit dès lors que, pour que la zone utilisable de la caractéristique "effort vitesse" du moteur asynchrone se retrouve à faible vitesse, il faut que la vitesse de synchronisme N_s du moteur soit très faible. Or cette vitesse de synchronisme est donnée par la valeur de la fréquence d'alimentation.

Pour obtenir un effort important au démarrage, il faut donc partir de fréquences très faibles. Mais la force contre électromotrice de la machine a pour valeur :

$$E = K \Phi f.$$

Or E étant très voisin de la tension d'alimentation on peut écrire, comme dans un transformateur :

$U: K f \Phi$, soit encore $\frac{U}{f} = K \Phi$
avec Φ flux de la machine.

Pour obtenir le meilleur couple possible on a tout intérêt à faire fonctionner la machine au voisinage de l'induction maximale et le flux Φ est alors une constante.

On doit donc réaliser au cours du démarrage un fonctionnement à $\frac{U}{f} = cte$:

Aussi, devra-t-on alimenter le stator par un convertisseur délivrant un système de tensions triphasées de valeurs U et de fréquence variables satisfaisant à la relation précédente. La figure 18 fait apparaître les diverses caractéristiques correspondant aux vitesses de synchronisme: $N'''s$, $N''s$, $N's$, Ns correspondant à chaque fréquence f''' , f'' , f' , f des tensions d'alimentations délivrées par le convertisseur d'alimentation du moteur asynchrone.

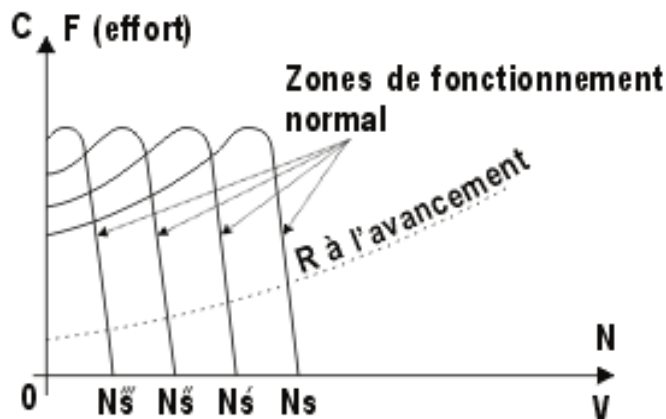


Fig : 18

CARACTERISTIQUES de L'ENGIN à MOTEURS ASYNCHRONES (Fig : 19)

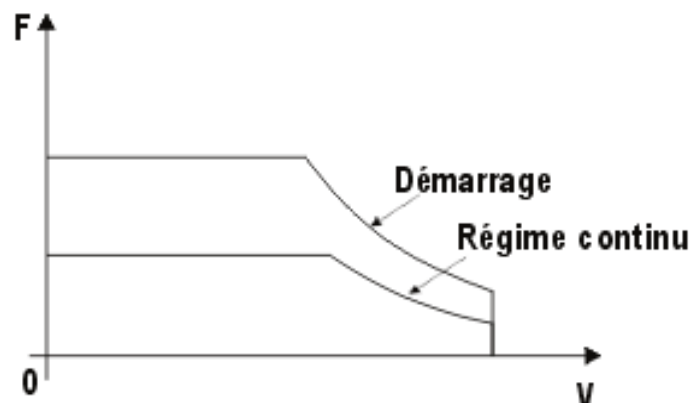


Fig : 19

Dans le plan "efforts-vitesses" $F(V)$ on trouve les caractéristiques générales suivantes :

-une caractéristique de régime continu qui doit pouvoir être soutenue indéfiniment par l'engin. Elle se présente dans le cas de moteurs à ventilation forcée sous forme d'une horizontale suivie d'une hyperbole d'équipuissance. L'ensemble des équipements (moteurs, inductances, transformateurs, appareillage, etc...) doit être défini pour cette caractéristique. Ce sont les possibilités de surcharge de ces équipements pendant un temps limité qui fixeront la caractéristique de démarrage.

Le réseau des caractéristiques naturelles devra être tel qu'il permette d'obtenir ces caractéristiques générales. L'effort maximal offert par chaque caractéristique naturelle doit toujours être supérieur à l'effort de démarrage pour éviter tout risque de décrochage du moteur.

- une caractéristique de démarrage qui est utilisable pour la mise en vitesse, donc pendant un temps limité. Cette caractéristique se présente sous la forme d'une horizontale (ou d'une droite inclinée) complétée par une hyperbole d'équipuissance fixée par les performances de semi-conducteurs du convertisseur d'alimentation. En effet, compte tenu de la fiable constante de temps thermique des semi-conducteurs, c'est pour cette caractéristique que doit être défini le convertisseur d'alimentation. Pour ce dernier, le régime de démarrage constitue donc le régime continu.

La figure 20 fait apparaître, outre les caractéristiques générales précédemment définies, le réseau des caractéristiques élémentaires du moteur pour diverses fréquences et tensions délivrées par le générateur d'alimentation. Ces caractéristiques élémentaires permettent d'assurer les caractéristiques générales.

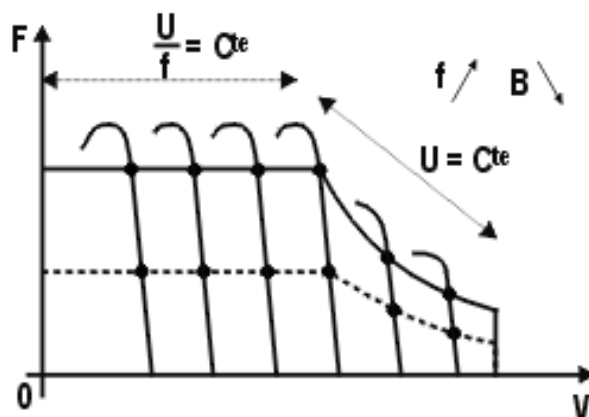


Fig 20

On y remarque également la zone de fonctionnement à tension constante et à fréquence croissante délivrée par le convertisseur.

Or on a vu que :

- la valeur maximale du couple maximal varie en raison inverse du carré de la fréquence donc du carré de la vitesse.

Ainsi, en définitive, la valeur maximale de couple que peut développer le moteur dans la zone de fonctionnement à tension constante et à fréquence croissante, donc à vitesse croissante, varie en $\frac{1}{V^2}$

Cette propriété est défavorable au moteur asynchrone, car dans cette zone:

- l'effort maximal possible variant en $\frac{1}{V^2}$

Et la puissance s'exprimant par : $P = F.V$

Il en résulte :

$$P = \frac{K}{V^2} \quad V = \frac{K}{V}$$

Dans cette zone de fonctionnement à tension constante et à fréquence croissante, la puissance délivrée par le moteur asynchrone varie en raison inverse de la vitesse :

$$\left(\text{en } \frac{1}{V} \right)$$

Ainsi pour un moteur dont la définition est prévue sous la tension **U**, à la vitesse nominale **V_n** donc pour **P_n** :

$$P_n = \frac{K}{V_n}$$

La puissance à **V_{max}** qu'il pourra développer sera :

$$P' = \frac{V_n}{V_{\max}}$$

c'est-à-dire :

$$\frac{P'}{P_n} = \frac{V_n}{V_{\max}} \quad \text{et} \quad P' = P_n \frac{V_n}{V_{\max}}$$

Il en résulte que si le moteur est défini électriquement, à la vitesse nominale de, par exemple: 70% de **V_{max}**, soit **V_n = 0,7 V_{max}**, la puissance à **V_{max}** ne sera plus que de :

$$P' = P_n \frac{V_n}{V_{\max}} = 0,7 P_n$$

Cette puissance n'est plus que 70% de celle que l'on souhaiterait obtenir pour le maintien de l'équipuissance.

Cette caractéristique s'explique par le fait que l'induction de la machine n'est pas un paramètre accessible, réglable extérieurement, comme c'est le cas pour une machine à courant continu. L'induction dépend de la tension et de la fréquence.

Si on souhaite soutenir l'équipuissance il faut donc augmenter la tension du moteur dans cette zone, afin de relever les efforts proportionnellement au carré des tensions comme vu précédemment.

Remarque:

La caractéristique de décroissance de l'effort en raison inverse du carré des vitesses se retrouve sur une machine à collecteur à excitation série sans réglage de champ.

Sous tension constante, dans la zone des vitesses élevées, dans la partie non saturée de la courbe de magnétisme, on peut écrire que :

$$F = K \Phi I$$

$$\text{D'où puisque ici } \Phi = K' I \quad F = K I^2$$

Or, l'expression de la **fcem** du moteur à la vitesse **V** est donnée par l'expression :

$$e = K' V \Phi$$

On sait par ailleurs, que **e** est pratiquement égal à la tension d'alimentation **U**: d'où:

$$U = K' V K' I, \quad U = K' K' V I$$

d'où l'on tire:

$$I = \frac{U}{V}$$

en reportant cette valeur de **I** dans la relation

$$F = K I^2$$

on en tire :

$$F = \frac{KA^2}{V^2}$$

L'effort varie donc, ici encore à plein champ, sous tension, constante, comme l'inverse du carré de la vitesse.

Mais la possibilité d'intervenir sur l'excitation permet de modifier la caractéristique du moteur et d'obtenir, pour une même vitesse, des efforts beaucoup plus élevés que ceux obtenus en plein champ. C'est alors le fonctionnement à champ réduit du moteur à courant continu.

COMPORTEMENT EN PATINAGE

Peut-on utiliser les caractéristiques naturelles du moteur asynchrone ?

La caractéristique naturelle du moteur asynchrone alimenté sous tension constante à fréquence fixe f paraît être la caractéristique idéale pour mesurer un excellent comportement en patinage. La raideur de la zone utilisable de la caractéristique permettrait effectivement d'obtenir naturellement le raccrochage de la roue. Elle est nettement meilleure que celle d'un moteur à courant continu qui "s'aplatit" lorsque la vitesse augmente (fig :21)

La caractéristique naturelle du moteur asynchrone permet de toujours couper la caractéristique d'adhérence.

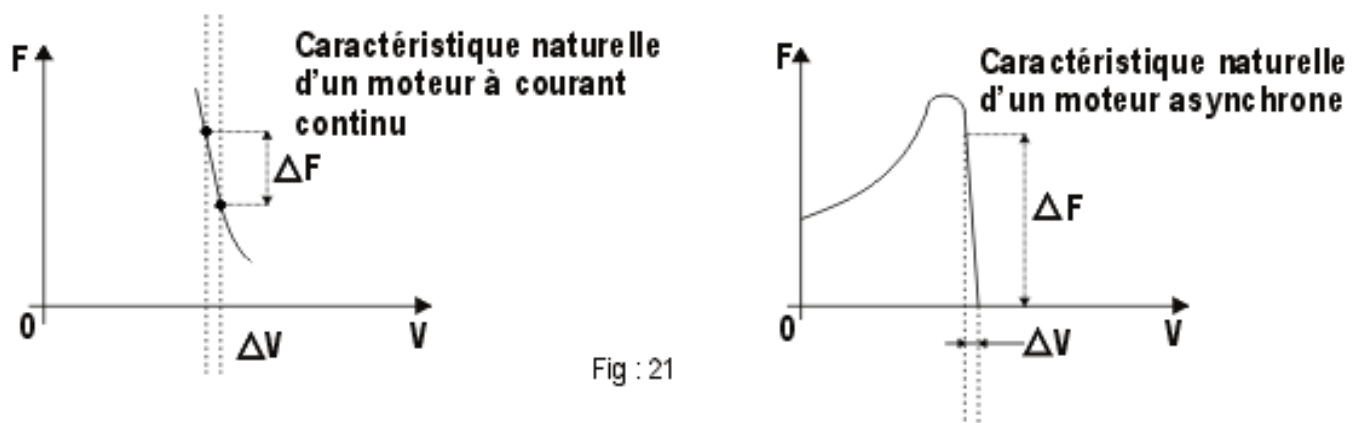


Fig : 21

Mais, en fait, comme le montre la figure 22, il n'est pas possible de conduire un engin à moteurs asynchrones en imposant la fréquence.

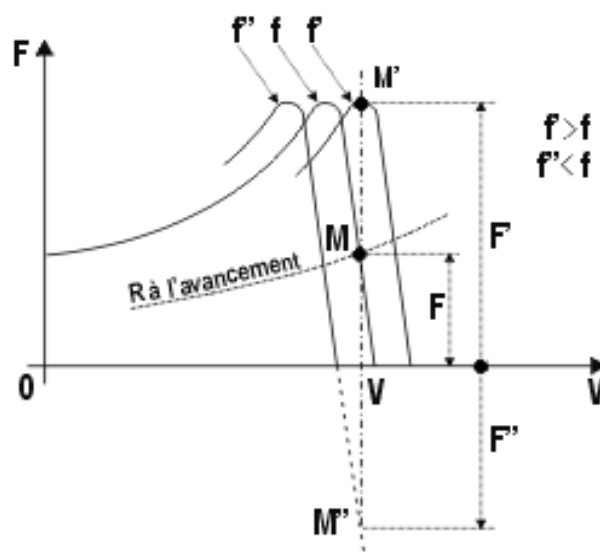


Fig : 22

Supposons, en effet, que le manipulateur fixe une fréquence f , le point de fonctionnement M correspondant à un effort F et une vitesse V .

Supposons maintenant que l'on déplace le manipulateur pour fixer une fréquence f' légèrement supérieure à f :

$$f' > f$$

En raison de la forme de la caractéristique naturelle, et, comme au moment de la manoeuvre du manipulateur, la vitesse V du convoi ne varie pas, le point de fonctionnement passe en M' avec une très grosse variation d'effort de F à F' . le point M' peut même se trouver dans la zone non utilisable de la caractéristique.

Supposons maintenant que l'on déplace le manipulateur pour fixer une fréquence f'' légèrement inférieure à f :

$$f'' < f$$

En raison de la forme de la caractéristique naturelle, et, là encore, comme la vitesse V ne varie pas au moment de la manoeuvre du manipulateur, le point de fonctionnement passe en M'' . L'effort s'inverse. Le système est passé en freinage.

La conduite en fréquence (qui permettrait de profiter de l'avantage "adhérence" du moteur asynchrone) est pratiquement impossible, car elle nécessiterait, de la part du conducteur, une surveillance permanente et très attentive du comportement du moteur.

Pour mettre en évidence cette difficulté, précisons que, pour un moteur de traction asynchrone de locomotive fonctionnant au régime continu, une augmentation de fréquence de l'ordre de 1 Hz entraîne l'annulation de l'effort de traction, (alors que la fréquence de fonctionnement varie de 0 à 150 Hz environ).

En conséquence, pour faciliter la conduite il faut passer à une commande en effort qui, en définitive, donne à l'engin des caractéristiques horizontales.

C'est la régulation qui intervient alors, avec beaucoup de finesse, de telle sorte que :

- si l'effort a tendance à **diminuer**, la fréquence du convertisseur est **légèrement augmentée**,
- si l'effort a tendance à **augmenter**, la fréquence du convertisseur est **légèrement diminuée**.

Avec, évidemment, action simultanée sur la tension.

On retrouve ainsi les mêmes caractéristiques globales que pour une locomotive à moteurs à courant continu à commande par thyristors (ponts mixtes ou hacheurs) et si on ne prend pas de mesures particulières le patinage ne se résorbe pas naturellement. En effet, sur un début de patinage, l'effort a tendance à diminuer naturellement mais, alors, la régulation pousse la fréquence pour maintenir l'effort imposé.

On retrouve donc les inconvénients présentés par les caractéristiques horizontales.

Il faut donc introduire autour de la commande du moteur asynchrone un dispositif d'antipatinage analogue à celui utilisé sur les engins moteurs à moteur à courant continu à commande en effort (ou en courant).

On peut opposer à ceci qu'il suffit de coupler en parallèle les divers moteurs asynchrones sur le même réseau triphasé, fourni par un seul convertisseur qui impose à tous les moteurs la même fréquence. Fig n°23.

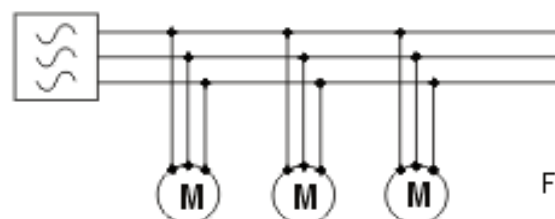


Fig : 23

Ce montage exige, évidemment, des tolérances très serrées sur les diamètres de roues si on veut éviter des surcharges intolérables de certains moteurs ou, ce qui revient au même, des écarts inadmissibles d'effort entre moteurs.

Avec un tel couplage, les essieux sont effectivement «biellés» naturellement par la fréquence.

Mais cette disposition, pourtant fort séduisante présente 2 inconvénients :

- 1) risque de surcharge de certains moteurs,
- 2) risque de patinage de tous les essieux.

a) - Surcharge de certains moteurs

Si l'un des essieux voit son adhérence diminuer, il peut glisser très légèrement et, en raison de la caractéristique "moteur" son effort va baisser jusqu'à la valeur permise par l'état du rail. Le glissement peut ainsi s'entretenir sur un ou plusieurs essieux avec des efforts nettement plus faibles que ceux développés avant glissement.

Il est donc indispensable de déceler ces glissements et d'agir au niveau du générateur commun pour diminuer les efforts de tous les moteurs et obtenir ainsi le raccrochage avec des essieux qui glissent. Cette baisse de l'effort total provoquée lorsqu'un des essieux glisse, est un inconvénient du schéma.

b) - Patinage simultané de tous les essieux

Avec le schéma indiqué et une commande en effort total, le glissement d'un essieu entraîne la surcharge des autres. Il peut en résulter, si les conditions d'adhérence s'y prêtent, le déclenchement du glissement des autres essieux.

SCHEMA DE L'ENGIN A TRANSMISSION ASYNCHRONE.

Des considérations précédentes, il semble bien que le meilleur schéma soit celui qui consiste à associer à chaque moteur son propre **convertisseur G** d'alimentation (fig .24).

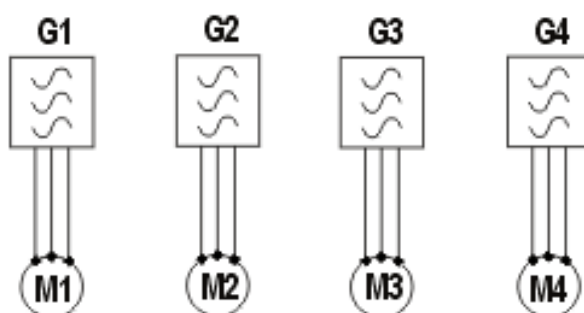


Fig : 24

TGV TRANSMANCHE

TRANS MANCHE SUPER TRAIN GROUP.

Généralités

Les rames Transmanche «EUROSTAR» sont constituées de 2 motrices encadrant 18 voitures et sont conçues pour relier Londres à Paris et Londres à Bruxelles via le tunnel sous la Manche.

Cette rame longue de 380 m a une masse de 76 tonnes. Elle a 12 essieux moteurs répartis en 2 fois 6 à chaque extrémité de la rame. Chaque essieu moteur est entraîné par un moteur asynchrone.

La rame est tritension et fonctionne sous 25 kV 50 Hz, 3.000 V courant continu et 750 V courant continu.

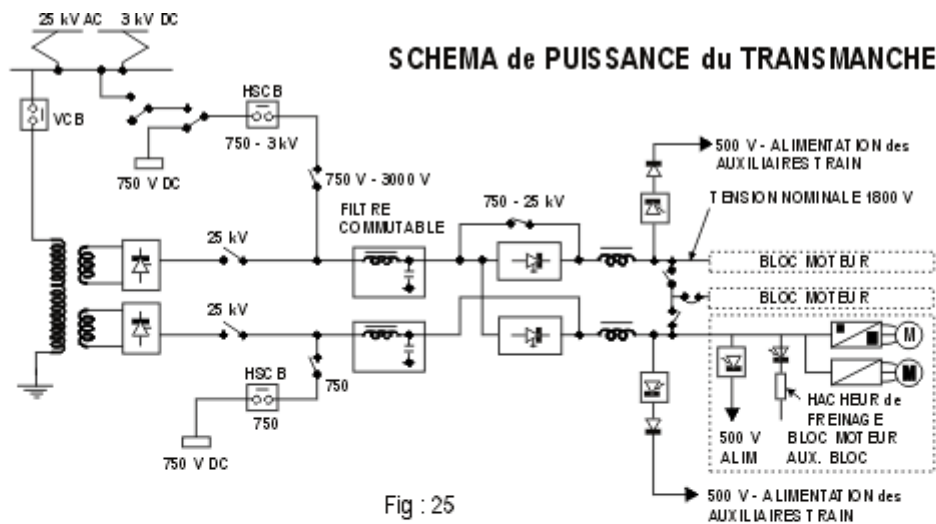
Les limites inférieures et supérieures de ces différentes tensions font que les conditions de fonctionnement des onduleurs sont très sévères.

. Schéma général

le schéma de puissance d'une motrice est donné par la figure 25.

Pour l'alimentation 25 kV 50 Hz chaque motrice possède un transformateur de 7,5 MVA. Ce transformateur est refroidi à l'huile silicone qui permet des températures de fonctionnement jusqu'à 120 °C.

Chacun des secondaires du transformateur est équipé d'un dispositif d'amélioration de facteur de puissance (filtres L. C avec interrupteurs statiques). la tension intermédiaire d'alimentation des onduleurs est fournie par 2 circuits en parallèle qui peuvent fonctionner indépendamment l'un de l'autre.



Sous 3 kV, 2 hacheurs à GTO par motrice permettent de réguler la tension d'entrée des **onduleurs à 1800 V**. Chacun des hacheurs est constitué par 2 GTO 4.500 V, 2,5 kA en série.

Sous 750 V, la tension ligne est appliquée directement à l'entrée des onduleurs.

Chacun des 3 blocs moteurs de chaque motrice comporte 2 onduleurs qui alimentent chacun **un** moteur de traction.

Onduleur de traction

Un onduleur alimente un moteur asynchrone défini à **1050 kW à 300 km/h**. Ce moteur a une masse de **1.310 kg**.

La structure générale du schéma de l'onduleur est conservée mais la technologie retenue reprend le refroidissement des semi-conducteurs par circulation forcée d'huile. Ce type de refroidissement déjà utilisé par les chemins de fer britanniques est efficace pour évacuer les pertes des thyristors **GTO** (4,5 kV, 2,5 kA) de chaque onduleur.

CONCLUSION

Bien que la prospective soit un exercice particulièrement périlleux, on peut toutefois dégager quelques orientations à court et moyen terme sur l'évolution des chaînes de traction.

Nous venons de montrer que compte tenu de la structure intrinsèque de l'onduleur de tension et des semi-conducteurs associés, le schéma de puissance n'évoluerait plus dans son principe, car le moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil ou éventuellement linéaire répond parfaitement aux impératifs de la traction ferroviaire.

Seules des améliorations d'ordre technologique sur les composants de puissance apporteront des gains de masse et de fiabilité en réduisant les éléments placés entre le micro contrôleur et les organes de puissance.

De plus, lorsque l'engin de traction est alimenté par une caténaire à courant continu on est en droit de penser que de nouveaux algorithmes de commande permettront au fur et à mesure de l'évolution des micro contrôleurs de mieux résoudre les problèmes de perturbations harmoniques en évitant l'emploi de filtres passifs.

Sous caténaire alternative, l'étage d'entrée constitué par un onduleur monophasé dont la structure est identique à l'étage de sortie verra aussi son pilotage évoluer afin de réduire là encore, les niveaux de perturbations électromagnétiques.

Il résulte de ce tour d'horizon que l'évolution des chaînes de traction à moteur asynchrone est plus liée à l'évolution des composants électroniques de puissance et de commande qu'à la recherche, comme ce fut le cas ces dernières années, de la structure électrotechnique la mieux adaptée.

Cet état de fait pourrait être profondément modifié si la supra-conductivité s'avérait un jour compétitive.

Voir «**l'ABC DU TGV**» page 69 à 72.

Gilbert DESPLANQUES et Jean WILLEMIN