

# MOTORISATION SYNCHRONE

## A PROPOS du MOTEUR SYNCHRONE AUTOPILOTE

L'idée d'utiliser un moteur synchrone n'est pas nouvelle.

On peut, par exemple, noter, dans le cadre des travaux de la **DETE** (Division des **Études de Traction Électrique**) l'arrivée sur l'étoile de Savoie fraîchement électrifiée en 20Kv 50Hz d'un élément de l'automotrice allemande ET 25025 à 3 caisses de la DRB. Mise en service le 9 octobre 1951 sous le n° Z 9053, elle deviendra Z 6001 et permettra des essais statiques de la solution BATTELLE sur des moteurs synchrones de type TS 127. Elle sera radiée le 18 avril 1967 et ferrillée. Les redresseurs statiques de l'époque, n'avaient pas permis d'aboutir à un fonctionnement satisfaisant. Cette réalisation dut être différée.

Aujourd'hui la maîtrise de l'électronique de puissance a permis de conduire à terme ces recherches.

Si le moteur de traction série, donne satisfaction aux utilisateurs, les contraintes d'entretien liées à l'existence du collecteur sont la préoccupation des services de maintenance. L'usure des balais, les dégradations éventuelles du collecteur lors de l'utilisation à grande vitesse et à pleine puissance doivent être suivies avec rigueur afin de permettre de déclencher en temps utile les opérations d'entretien préventif qui s'imposent.

L'utilisation du **moteur de traction à courant continu**, se trouve limitée par la commutation du système balai-collecteur. Pourtant jusqu'à l'apparition des moteurs synchrones et asynchrones il était incontournable.

Son principe est des plus simples :

### PETIT RAPPEL sur le moteur continu.

Lorsqu'un conducteur, parcouru par un courant «**I**» est placé dans un champ d'induction, il est soumis à une force perpendiculaire au conducteur et au champ d'induction «**F**» (loi de Laplace). Le sens de cette force dépend du sens du courant et de celui du champ.

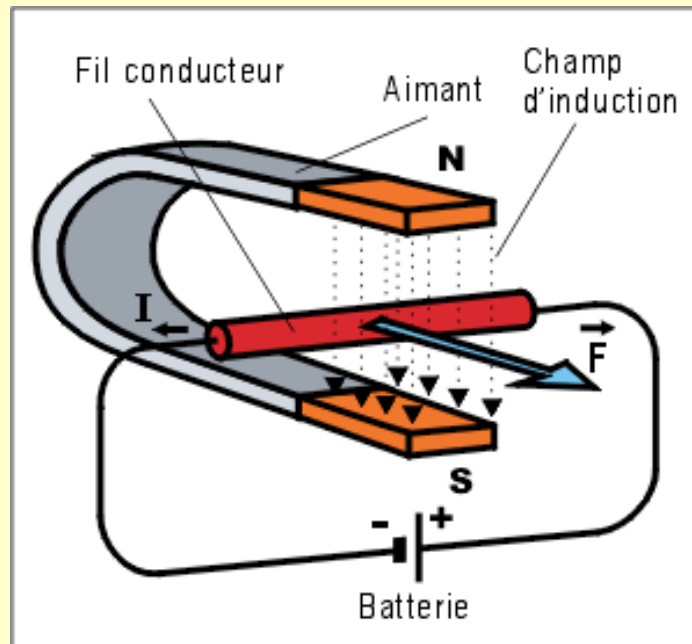


Fig: 1

C'est la force électromagnétique.

- Le fil conducteur est repoussé vers l'extérieur de l'aimant,
- Si l'on inverse la polarité de l'alimentation électrique, le fil est attiré vers l'intérieur de l'aimant.
- Ces forces d'attraction et de répulsion qu'exercent les aimants et les électro-aimants entre eux, permettent à un moteur électrique de fonctionner.

### La construction du moteur à courant continu

Le fil conducteur placé à la périphérie de l'induit ( partie tournante : **ROTOR** ) est appelé brin actif.

La façon de disposer les brins actifs sur l'induit va permettre de créer des forces tangentielles qui vont constituer le couple moteur.

Chaque brin est soudé à ses extrémités sur deux lamelles du collecteur.

Le collecteur solidaire de l'induit alimente tour à tour chaque brin actif par l'intermédiaire des balais et des lamelles. Il assure ainsi l'alimentation synchronisée de chaque brin

Le champ d'induction est produit par un électro-aimant fixe appelé inducteur.

Tout le fonctionnement du moteur repose sur le principe suivant :

Quand le courant traverse les bobinages du rotor et du stator, la configuration électrique des uns par rapport aux autres est telle que les bobinages du rotor produisent un champ magnétique antagoniste de ceux du stator qui leur font face et, donc, s'en éloignent. Seulement en s'en éloignant ils font tourner l'axe du moteur... et déplacent les lamelles du collecteur sous les balais d'alimentation. Du coup les polarités changent, les champs magnétiques aussi, et les bobinages se retrouvant dans la situation d'opposition qu'ils viennent de quitter, le mouvement continue... le moteur tourne !

Ce principe de fonctionnement est celui du moteur de traction du TGV Sud Est (figures 2 et 3).

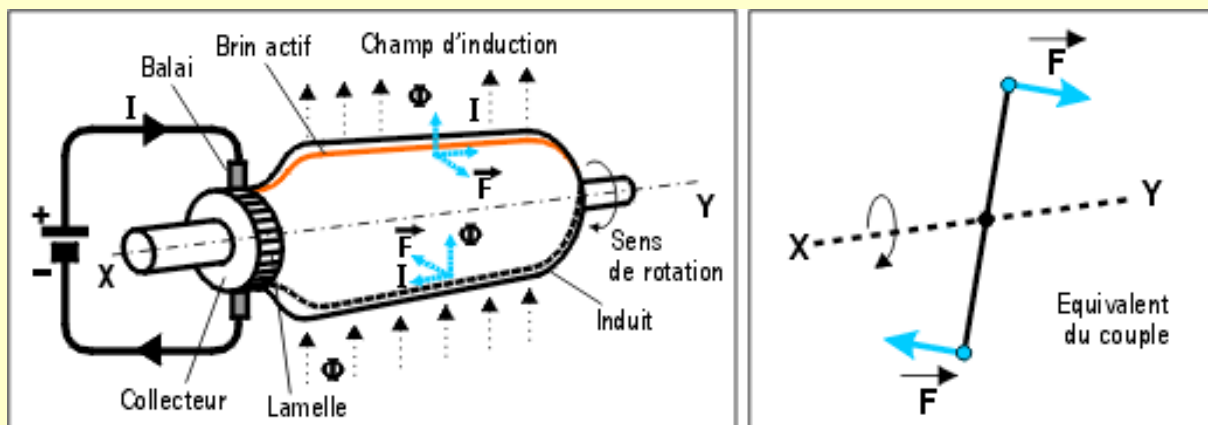


Fig : 2 et 3

### ASSEMBLAGE INDUIT- INDUCTEUR MOTEUR ELECTRIQUE

Moteur électrique série en coupe. Ce principe équipe les TGV Sud-Est.

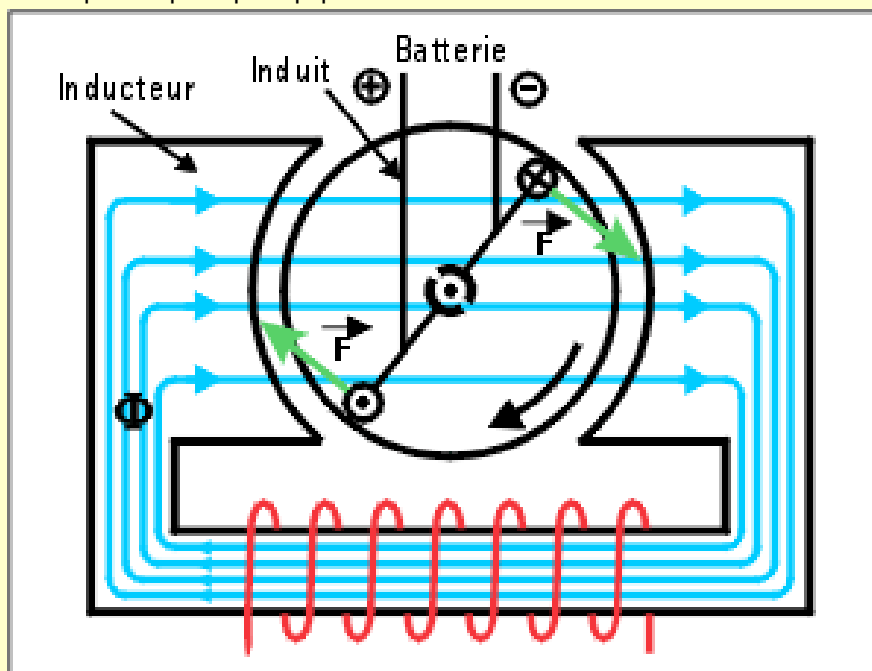


Fig : 4

Pour inverser le sens de rotation, il suffit d'inverser le sens du courant dans l'induit ou l'inducteur.

Par combinaisons des connexions entre induit et inducteur, on réalise un moteur série ou un moteur à excitation séparée.

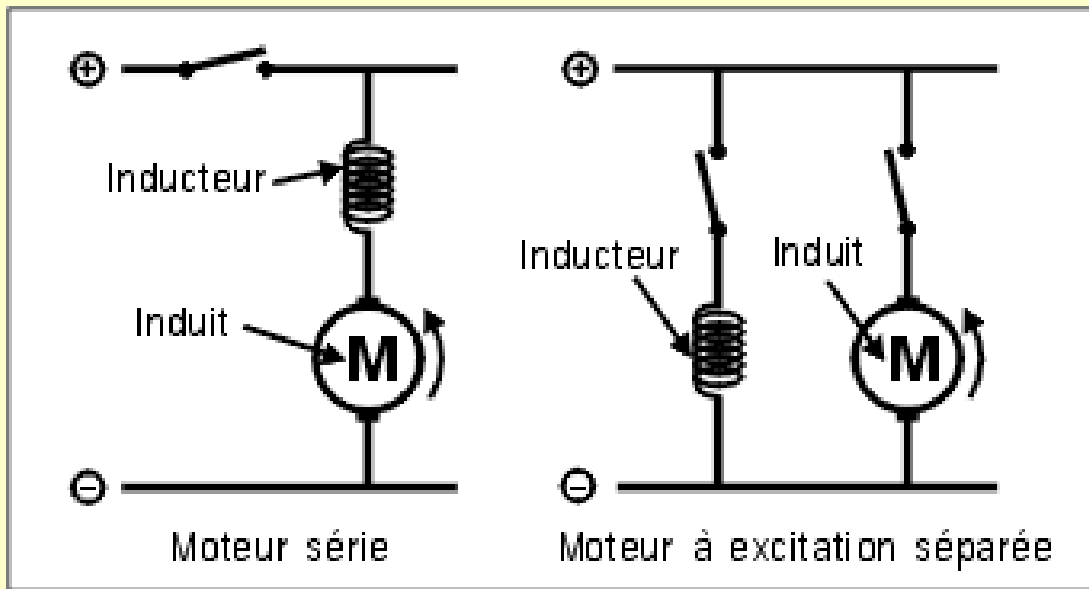


Fig : 5

### Principe de fonctionnement du moteur à courant alternatif

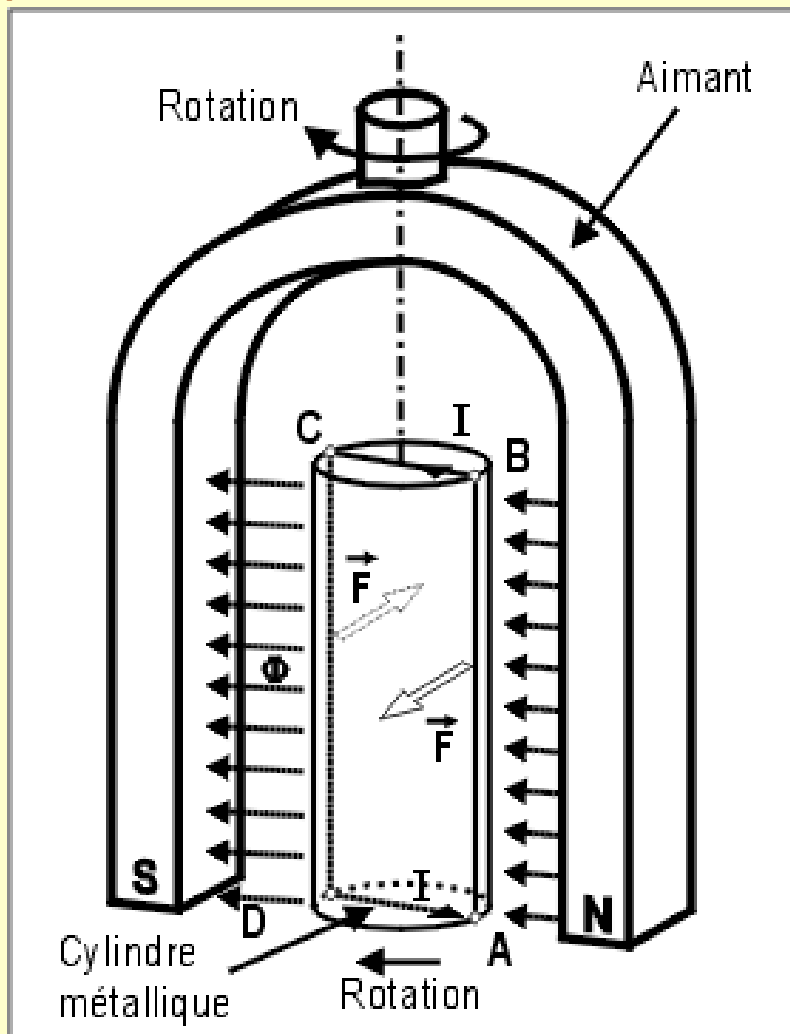


Fig : 6

L'aimant tournant produit un champ magnétique « $I$ » qui traverse un cylindre métallique  
 Les génératrices du cylindre placées dans le champ se comportent comme des brins actifs (AB et CD)  
 Elles sont parcourues par un courant « $I$ » proportionnel à  $F$  et engendrent des forces perpendiculaires qui constituent le couple.  
 On constate que le cylindre suit la rotation de l'aimant avec un léger décalage appelé glissement.

# Enfin parlons du MOTEUR SYNCHRONE,

## A) DESCRIPTION ET APPLICATION AU TGV

Les brillants résultats du prototype TGV-PSE à moteurs synchrones ont permis de retenir cette motorisation pour le TGV A puis pour les TGV Nord Europe ainsi que les TGV Duplex par la suite. C'est une version améliorée du prototype qui équipe les nouvelles rames. Ces moteurs de 1100 kW en régime continu permettent de disposer de 8800 Kw (11000 cv) soit une puissance unitaire par rame de 10400 Kw (14 000 cv). En régime continu l'échauffement du moteur ne dépasse pas 130 °C alors que l'isolation appliquée à ces moteurs autorise un échauffement double. Le dispositif de commutation assistée d'une masse de 30 kilos par équipement de bogie moteur permet de faire développer au démarrage un effort de traction deux fois supérieur à celui d'un moteur équipant le TGV SE.

### TABLEAU COMPARATIF MASSE TGV SE et TGVA

TGV PSE : 1560 kg	535 Kw (726 cv)
TGV ATL : 1580 kg	1100 Kw (1494 cv)

Ainsi avec ce supplément de masse de seulement 20 kg, il est possible de développer une puissance **2 fois** plus grande ainsi qu'un effort au démarrage **1,6 fois plus élevé**.

## B) CONCEPTION et FONCTIONNEMENT

Emplacement des moteurs synchrones dans le bogie TGV/A.

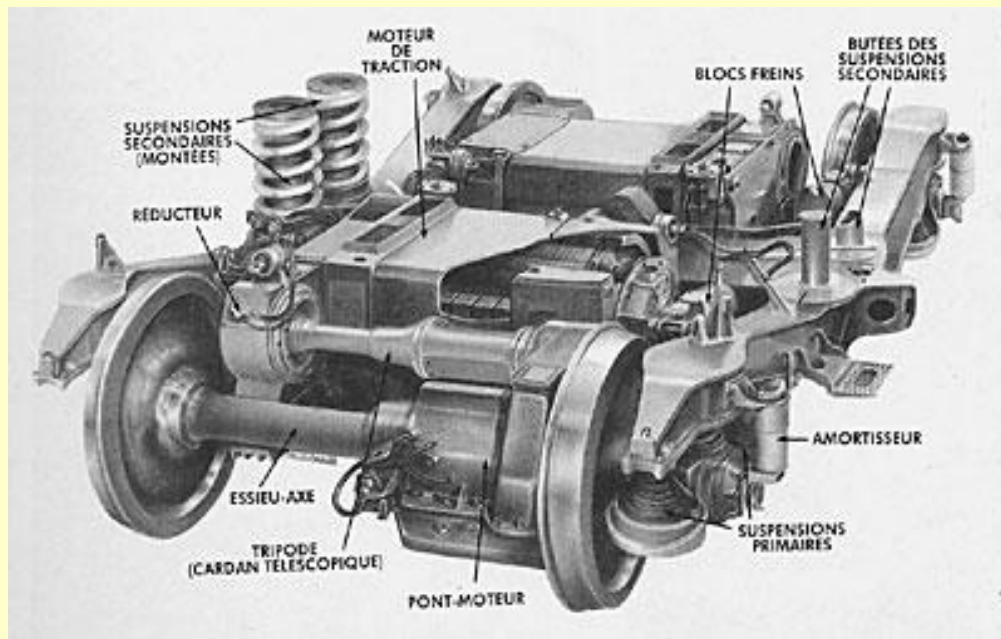
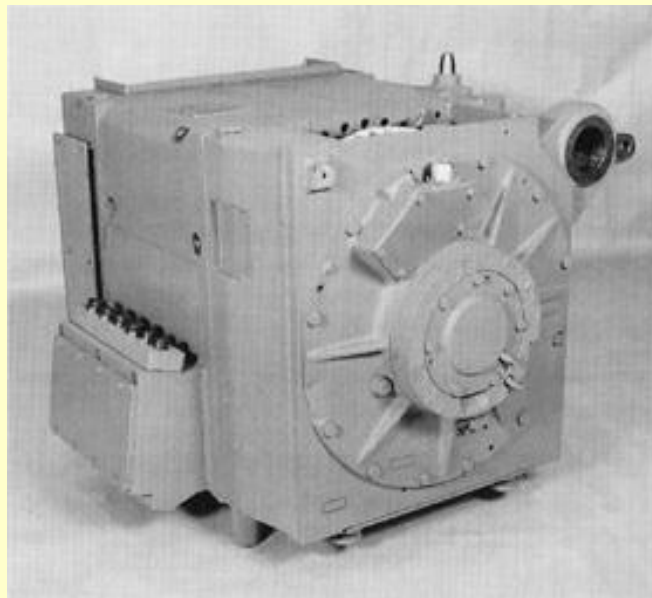


Fig : 7

**Fig : 8 Montage du ROTOR et du STATOR**



**Fig : 9 Vue d'ensemble du moteur monté**



### **1) le STATOR (partie fixe)**

Il tient lieu d'induit alimenté en courant triphasé 1500 volts alternatif par un commutateur statique ou onduleur, constitué de 6 thyristors. Il est constitué de 3 séries d'enroulements montés en étoile et décalés de  $120^\circ$  et dont l'alimentation doit s'effectuer :

- a) dans un ordre convenable
- b) dans un sens qui détermine le sens de rotation
- c) avec un courant dont la valeur détermine le couple, c'est à dire l'effort de traction.



Fig : 10

## 2) le ROTOR (partie mobile)

Il tient lieu d'inducteur alimenté de façon variable en courant continu 500 volts par l'intermédiaire de bagues et de balais.

C'est un électro-aimant tournant à la même vitesse que le champ magnétique tournant créé par le stator

La commande de puissance en alternatif de ces moteurs s'effectue, à partir de quatre secondaires du transformateur, par réglage de tension à l'aide de deux ponts mixtes (thyristors/diodes) en série pour chaque bogie moteur. Les induits (stators) sont également couplés en série et un **filtrage d'harmonique** est inclus sur chaque secondaire du transformateur.

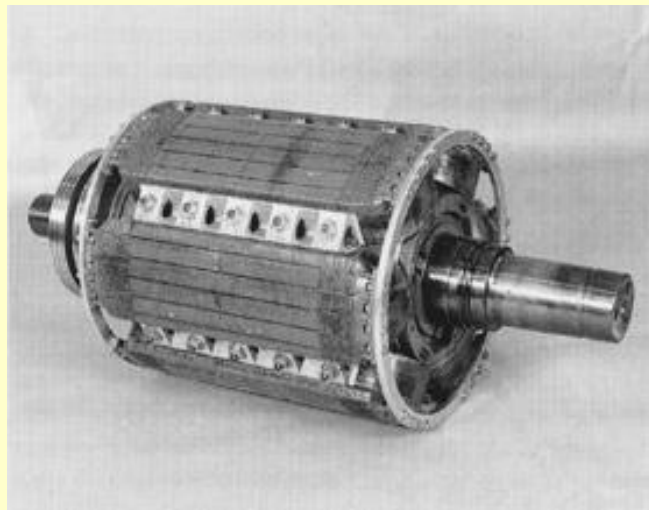


Fig : 11

Sachant que tout moteur électrique alimenté par une tension alternative provoque un retard entre l'intensité qui le traverse et la tension appliquée à ses bornes, ce décalage,  $\cos \Phi$ , appelé facteur de puissance, engendre un accroissement des chutes de tension en ligne, une augmentation de consommation électrique et des perturbations dans la distribution du courant et dans la téléphonie. Ce phénomène est combattu par l'AFP par l'utilisation de circuits de puissance utilisant des ponts mixtes et par l'adjonction de filtres d'harmoniques constitués d'inductances et de capacités. Tout dysfonctionnement de l'AFP provoque l'ouverture du disjoncteur, l'isolement automatique de ce dispositif et la réduction de puissance de tous les moteurs de traction. (Le rendement avec l'AFP avoisine 1, sans AFP le rendement avoisine 0,65).

En courant continu il est fait appel au schéma classique de hacheurs de courant à fréquence fixe de 300 Hz et tension régulée.

Les semi-conducteurs, montés en enceintes cylindriques sont refroidis par fluogène bouillant ( fréon R.113 ).

L'utilisation de moteurs synchrones fait disparaître les inverseurs électromécaniques puisque le sens de rotation de ce type de moteur est commandé par inversion dans la succession des consignes gérant la commutation assistée.

Un cinquième enroulement du transformateur permet entre autres l'alimentation d'un hacheur abaisseur de tension 1500V/500V permettant, par exemple, l'excitation des rotors des moteurs de traction.

Mais, au fait, savez vous ce que veut dire «SYNCHRONE» ?

**SYNCHRONE** : Se dit de phénomènes de mouvements qui se produisent en même temps.

**PHYSIQUE** : Se dit de deux oscillations couplées l'une à l'autre, de façon que leurs périodes restent constamment égales.

**ELECTRIQUE** : Machine synchrone : machine tournante dont le nombre de tours par seconde est un multiple de la période du courant alternatif.

## Le moteur synchrone à la même conception qu'un alternateur

### C) GENERATION DU COUPLE

La génération du couple nécessite l'allumage des thyristors dans l'ordre 1-3-5 4-6-2. Supposons le moteur à l'arrêt ( fig 12) position 1 du rotor.

Les thyristors 1 et 6 étant allumés, le courant parcourt les enroulements des phases R et S dont le sens est donné par les signes :

- Conducteurs du stator parcourus par le courant de l'arrière vers l'avant,
- Conducteurs du stator parcourus par le courant de l'avant vers l'arrière.

Compte tenu du sens du champ engendré par le rotor, le stator est soumis à la force  $F'$  (règle des 3 doigts) et le rotor est soumis à la force  $F$  égale et opposée. Le stator étant immobilisé, le rotor a donc tendance à tourner dans le sens de la force  $F$  qui crée le couple moteur. En faisant croître le courant dans les enroulements R et S, la valeur du couple moteur développé par la machine dépassera celle du couple résistant et le rotor tournera dans le sens de la flèche pour venir occuper la position 2.

Pour une excitation donnée du rotor, le couple sera proportionnel au courant qui traverse le stator. Il suffit donc de régler le courant qui traverse le stator pour obtenir le couple désiré.

### Fonctionnement d'un tour moteur (Figures 12 à 17)

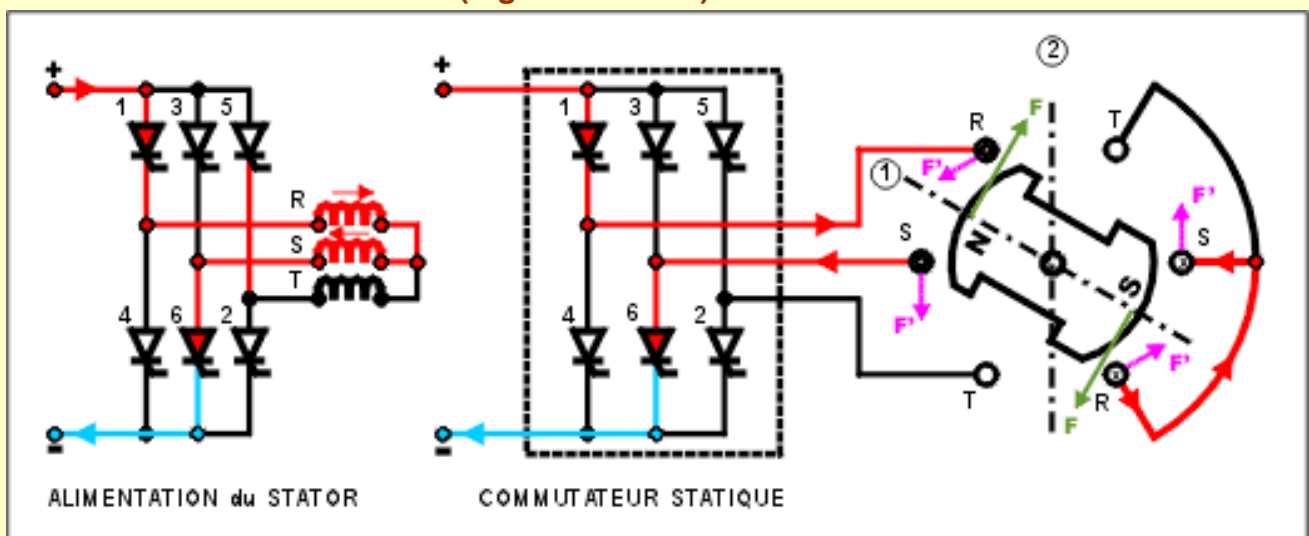


Fig : 12

Au cours de la rotation, on allume le thyristor 2 et on éteint le thyristor 6 (commutation de 6 sur 2). Les phases R et T sont alors alimentées et la figure fait apparaître le sens des courants qui parcourent les conducteurs du stator. Le rotor continue de tourner. Il quitte la position 2 pour venir occuper la position 3.

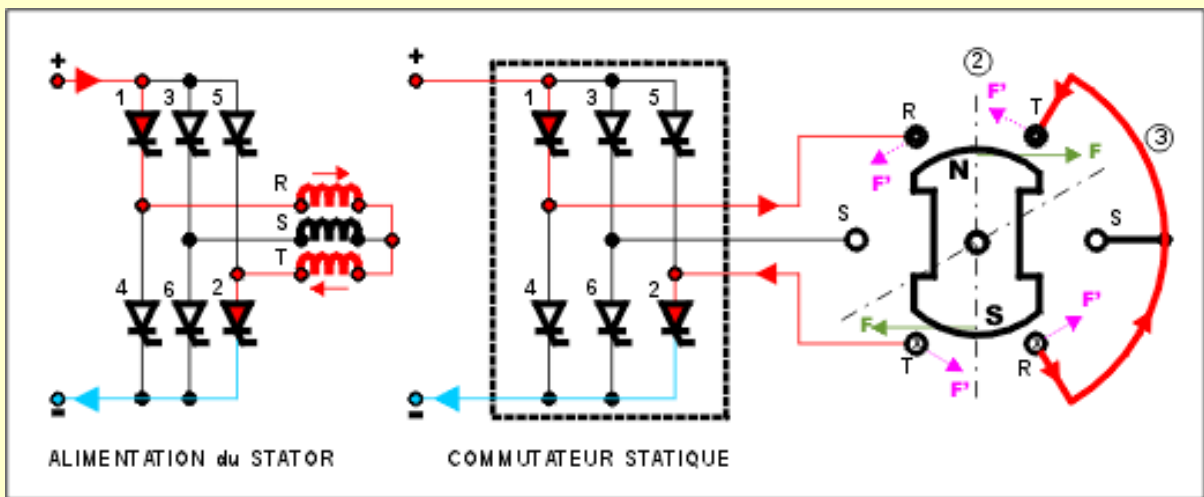


Fig : 13

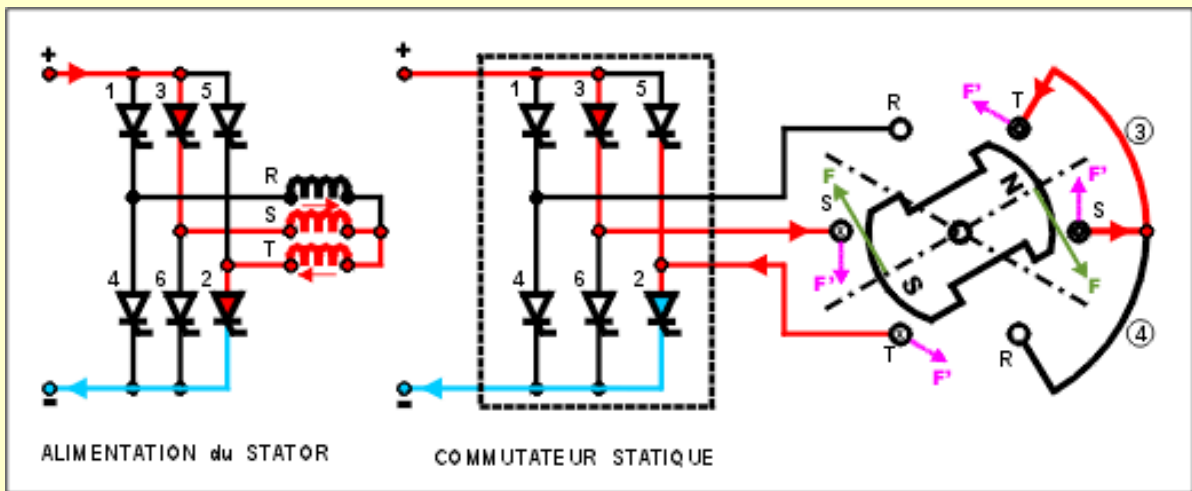


Fig : 14

Au cours de la rotation, on éteint le thyristor 1 et on allume le thyristor 3 (commutation de 1 sur 3). Les phases T et S sont alors alimentées. Le rotor continue de tourner. Il quitte la position 3 pour venir occuper la position 4.

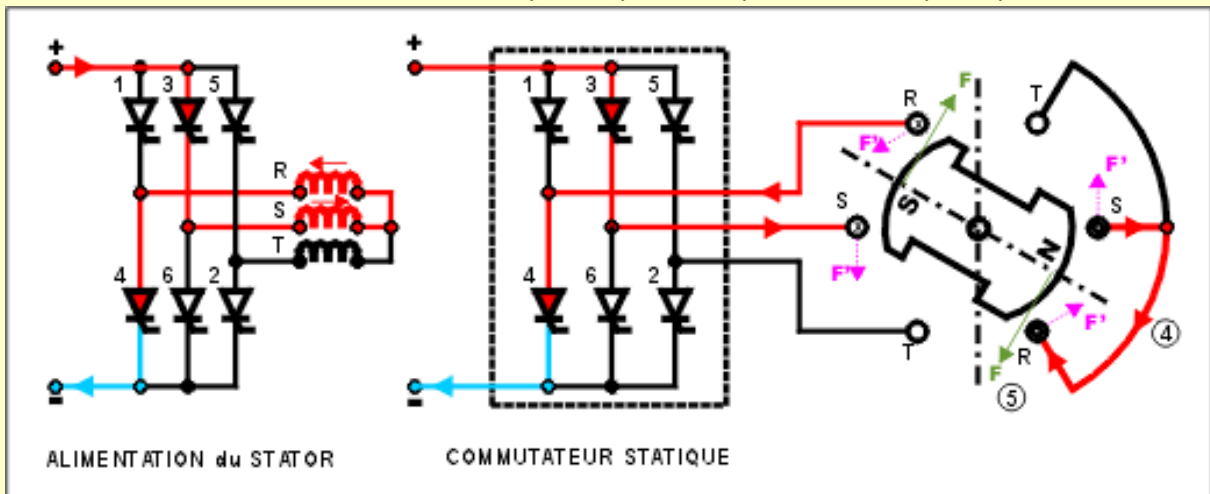


Fig : 15

Les figures 13, 14 et 15 montrent la distribution du courant dans les phases du stator qui fait accomplir un tour complet au rotor.



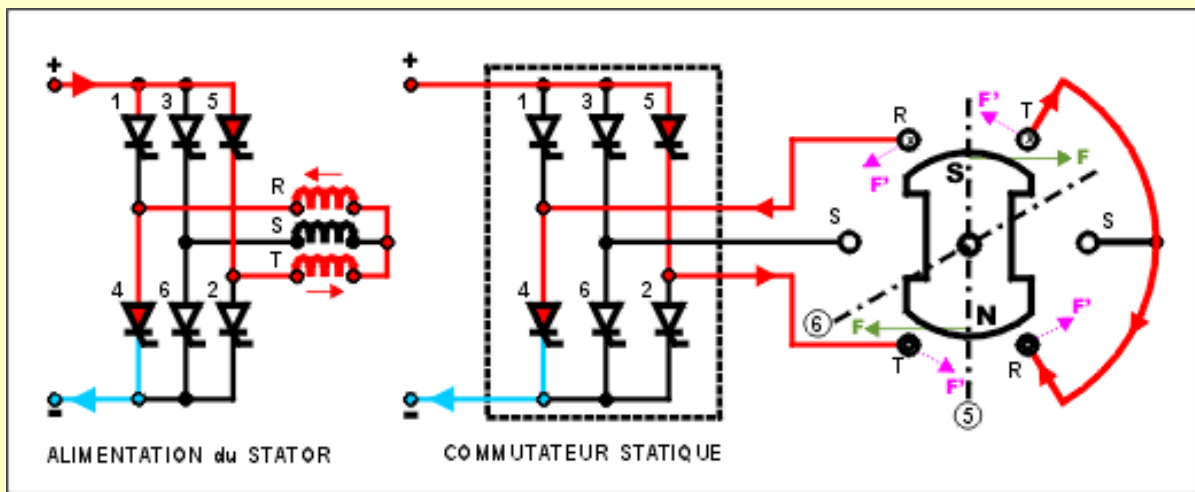


Fig : 16

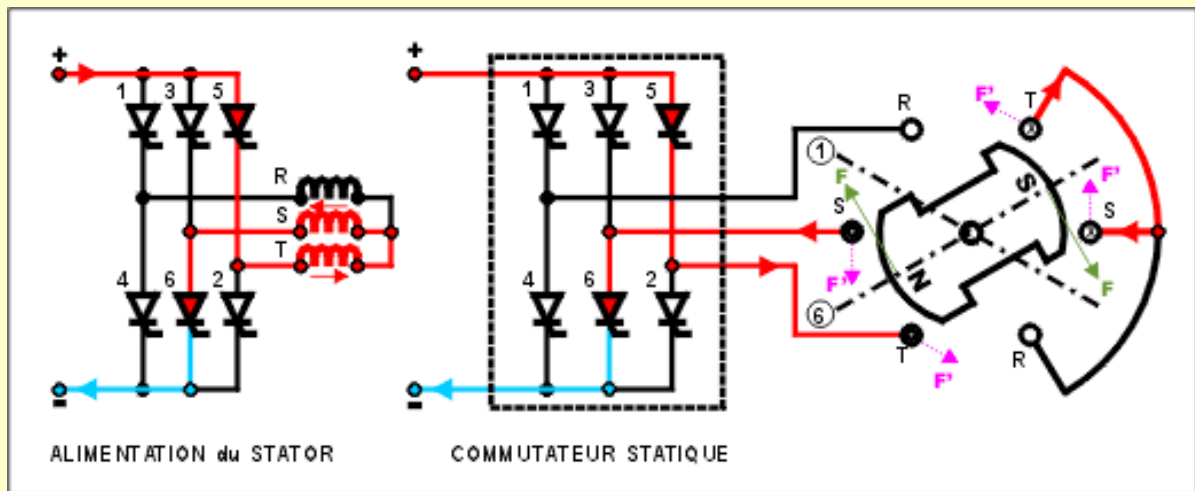


Fig : 17

Lors de la commutation d'un bras de l'onduleur sur un autre bras l'interruption momentanée du courant d'alimentation va provoquer des à-coups de couple. Afin de rechercher un couple sans à-coups au démarrage, à basse vitesse il faut :

- Équiper le stator de deux enroulements triples montés en «double étoile»,
- Insérer un inductance à enroulement couplés A et B, ainsi qu'un ensemble de deux thyristors **THCOM 1** et **THCOM 2** qui fonctionneront alternativement en «roue libre»

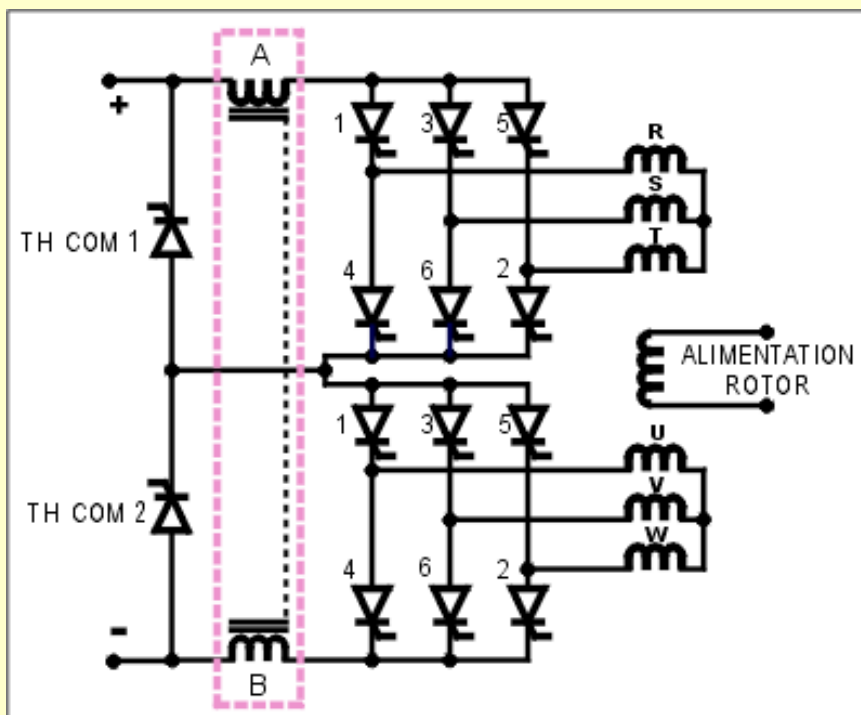


Fig : 18

**NOTA :**

Principe de fonctionnement d'une inductance à 2 enroulements couplés. Dans une inductance à 2 enroulements couplés A et B, avec une diode de «roue libre» sur l'enroulement B, l'annulation du courant dans l'enroulement A, par ouverture de l'interrupteur H et fermeture de H1, entraîne le doublement du courant dans l'enroulement B (fermeture de H1) . Il y a donc report d'ampères-tours de A sur B.

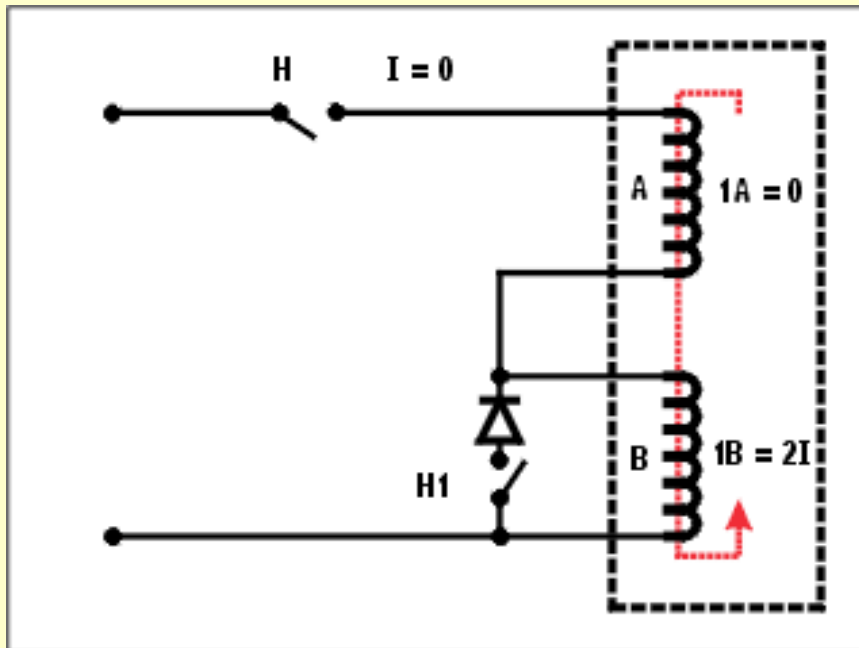


Fig : 19

Lorsqu'un courant I parcourt les deux étoiles on a « N » conducteurs traversés par ce courant. En passant en «roue libre» dans la deuxième étoile, par l'allumage de THCOM2, le courant produit par l'inductance à deux enroulements couplés ne traverse plus que la deuxième étoile, c'est à dire N/2 conducteurs du stator. L'intensité dans la deuxième étoile étant doublée nous avons un couple sensiblement constant.

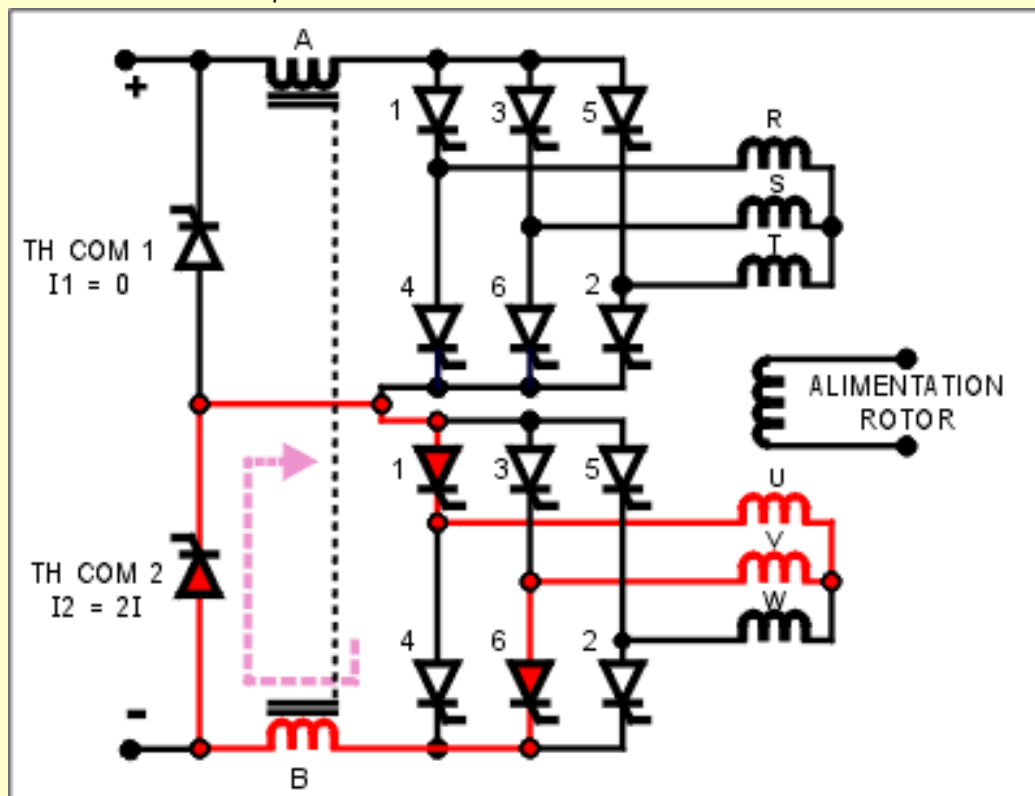


Fig : 20

**D) DEMARRAGE ET MISE EN VITESSE**

Pour générer le couple il faut, lorsque le rotor occupe une certaine position, allumer ou éteindre des thyristors du commutateur statique à des moments bien précis. Cette fonction est assurée à l'aide de capteurs magnétiques qui, repèrent et transmettent la position du rotor à un «coffret logique» commandant les thyristors.

Ce dispositif de démarrage est maintenu depuis le décollage jusqu'à une vitesse d'environ 80 km/h.

### **C'est la commutation assistée.**

Au delà de cette vitesse le stator est le siège de forces électromotrices sinusoïdales engendrées par la rotation du rotor. La mesure permanente de ces forces électromotrices permet au «**coffret logique**», convenablement programmé, d'allumer ou d'éteindre les thyristors à l'instant opportun.

### **C'est la commutation naturelle.**

## **CES DEUX PHENOMENES CARACTERISENT LE MOTEUR SYNCHROME AUTOPILOTE.**

La mise en vitesse est assurée par réglage de la tension de la source jusqu'à sa valeur maximale. Pour poursuivre ensuite l'accroissement de la vitesse, il est nécessaire de réduire le courant d'excitation du rotor. La diminution de la force contre-électromotrice a pour effet de faire croître le courant dans le stator. Ce phénomène correspond au shuntage en usage sur les moteurs classiques.

## **E) INVERSION DU SENS DE MARCHE :**

Elle est réalisée en inversant le courant dans deux enroulements des étoiles en agissant sur l'allumage des thyristors.

## **F) FREINAGE ELECTRIQUE :**

Il est réalisé

- en maintenant l'excitation du rotor,
- en faisant fonctionner les thyristors en redresseurs,

**le moteur fonctionne alors en alternateur.**

La marche en freinage électrique par récupération est particulièrement facile à obtenir de même que la marche en freinage rhéostatique de sécurité ; la machine est alors dans ce second cas excitée à partir de la batterie d'accumulateurs. Il est donc très aisé de freiner un TGV disjoncteurs ouverts.

## **G) ECONOMIE :**

L'absence de collecteur entraîne une économie d'exploitation très importante sur les rames TGV Atlantique, Réseau et Duplex. De fait, le moteur à courant continu du **TGV Sud Est pourtant d'une technologie très au point demande un reprofilage du collecteur à une périodicité voisine de 300 000 kilomètres.**

A masse comparable, on dispose avec le moteur synchrone **d'une puissance 1,5 fois supérieure en régime continu, et même d'une puissance double au démarrage par rapport au moteur série conventionnel.** L'électronique de commande et celle de puissance sont simples et peu volumineuses.

Les propriétés du moteur synchrone permettent aussi de supprimer tous les appareils électromécaniques, tels qu'inverseurs et commutateurs traction-freinage puisqu'ils se trouvent intégrés dans l'électronique de puissance.



**APRES LE MOTEUR SYNCHROME AUTOPILOTE NOUS PARLERONS PROCHAINEMENT DU MOTEUR ASYNCHROME.**