

Chapitre 3

Machines à courant continu

Les dynamos à courant continu ont été les premiers convertisseurs électromécaniques utilisés. Leur usage est en régression très nette en particulier en tant que générateurs de courant. On utilise de préférence des redresseurs à semi-conducteurs alimentés par des alternateurs.

Les moteurs à courant continu restent très utilisés dans le domaine de l'automobile (ventilateurs, lève-vitre, etc.) ainsi qu'en tant que « moteur universel » dans l'électroménager et l'outillage. Dans le domaine des puissance supérieure au mégawatt, les sous-marins seront les seuls utilisateurs de machines à courant continu afin d'assurer leur propulsion. En effet, pour éviter de « rayonner » du 50 ou du 60 Hertz qui les rendrait facilement détectables, les sous-marins utilisent des circuits de distribution de l'énergie électrique à tensions continues.

La fabrication de machine à courant continu de puissance supérieure à 10MW se heurte à une frontière technologique infranchissable. En effet, les problèmes d'injection de courant par les contacts balais - collecteur posent des problèmes insolubles au dessus de ce seuil de puissance.

3.1 Symboles

Voici les différents symboles employés pour représenter la machine à courant continu, selon qu'elle fonctionne en génératrice (dynamo) ou en moteur et selon le type d'excitation employée.

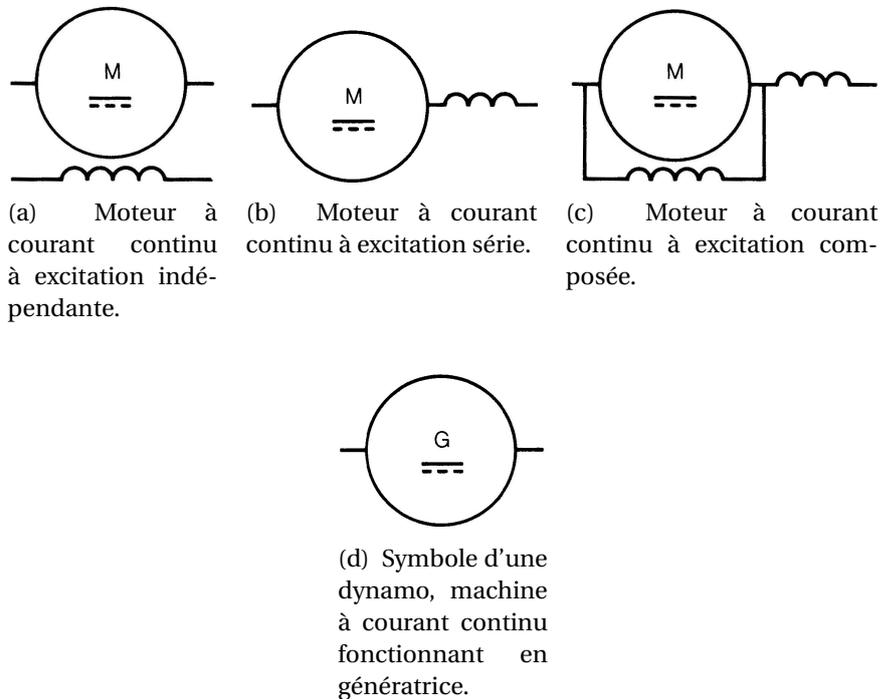


FIGURE 3.1 – Symboles de la machine à courant continu.

3.2 Constitution d'une machine à courant continu

Une machine à courant continu comprend quatre parties principales :

- l'inducteur ;
- l'induit ;
- le collecteur ;
- les balais également appelés charbons.

3.2.1 L'inducteur

Le bobinage inducteur, traversé par le courant inducteur I_e , produit le flux magnétique dans la machine. Il est constitué d'un électro-aimant qui engendre la force magnétomotrice (F.M.M.) nécessaire à la production du flux. Dans les machines bipolaires (à deux pôles), deux bobines excitatrices sont portées par deux pièces polaires montées à l'intérieur d'une culasse. La culasse est généralement en fonte d'acier, tandis que les pièces polaires sont formées de tôles d'acier doux, voir figure 3.3 et 3.4.

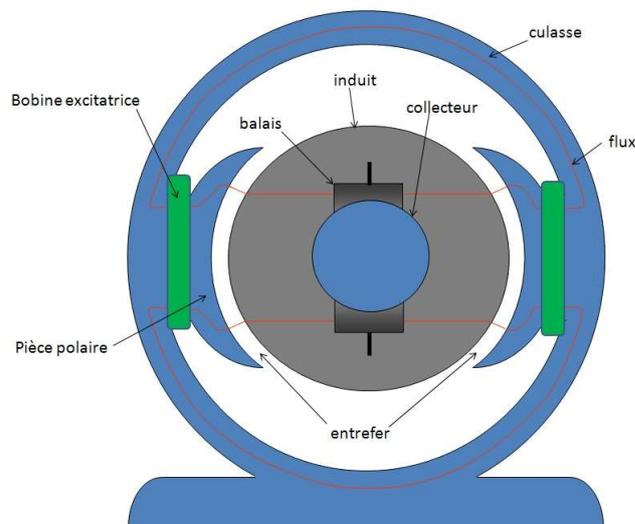


FIGURE 3.2 – Constitution d'une machine à courant continu.

Les bobines excitatrices sont alimentées en courant continu, et le courant qui les traverse porte le nom de courant d'excitation (I_e). Ces bobines sont composées de plusieurs centaines de spires et sont traversées par un courant relativement faible. Dans certaines machines, les bobines et les pièces polaires sont remplacées par des aimants permanents.

Le champ magnétique créé par la F.M.M. des bobines traverse les pièces polaires, la culasse, l'induit et l'entrefer. L'entrefer est l'espace d'air séparant la surface de l'induit de celle des pièces polaires : il est de l'ordre de 1,5 à 5 mm pour les machines de faible et moyenne puissance.

Comme l'induit et l'inducteur sont construits avec des matériaux de faible réluctance, la majeure partie de la F.M.M. sert à « pousser » le flux à travers l'entrefer. Celui-ci doit donc être aussi peu long que possible.

Le nombre de pôles que porte l'inducteur d'une machine à courant continu dépend surtout de la grosseur de la machine. Plus une machine est puissante et plus sa vitesse est basse, plus grand sera le nombre de pôles.

Les bobines excitatrices d'un inducteur multipolaire sont connectés de façon à ce que les pôles adjacents soient de polarités magnétiques opposées.

3.2.2 L'induit

L'induit est composé d'un ensemble de bobines identiques réparties uniformément autour d'un noyau cylindrique. Il est monté sur un arbre et tourne



FIGURE 3.3 – Culasse, circuit magnétique statorique d'une machine à courant continu.

entre les pôles de l'inducteur. L'induit constitue un ensemble de conducteurs qui coupent les lignes de champ magnétique. Les bobines sont disposées de telle façon que leurs deux côtés coupent respectivement le flux provenant d'un pôle nord et d'un pôle sud de l'inducteur.

Le noyau est formé d'un assemblage de tôles en fer doux. Ces tôles sont isolées électriquement les unes des autres et portent des encoches destinées à recevoir les bobines, voir figure 3.6.

Les conducteurs de l'induit sont parcourus par le courant absorbé ou débité par la machine. Ils sont isolés du noyau par des couches de feuilles isolantes, voir figure 3.8. Pour résister aux forces centrifuges, ils sont maintenus solidement en place dans les encoches au moyen de cales en fibre de verre. Si le courant est inférieur à une cinquantaine d'ampères, on emploie des conducteurs ronds. Au delà de 50 A, les conducteurs sont rectangulaires, ce qui permet une meilleure utilisation du volume de l'encoche.



FIGURE 3.4 – Culasse, circuit magnétique statorique d'une machine à courant continu.

3.2.3 Collecteurs et balais

Le collecteur est un ensemble cylindrique de lames de cuivre isolées les unes des autres par des feuilles de mica. Le collecteur est monté sur l'arbre de la machine, mais isolé de celui-ci. Les deux fils sortant de chaque bobine de l'induit sont successivement et symétriquement soudés aux lames du collecteur.

Dans une machine bipolaire, deux balais fixes et diamétralement opposés appuient sur le collecteur. Ainsi, ils assurent le contact électrique entre l'induit et le circuit extérieur. La construction du collecteur relève de la mécanique de précision, voir figure 3.12. Les machines multipolaires ont autant de balais que de pôles.

Les balais permettent l'injection ou la collecte du courant sur le collecteur. Lors de la construction des premières machines à courant continu, les balais étaient constitués de fils de cuivre disposés comme la paille de riz ou les branches sur les balais pour nettoyer, d'où le nom de balais (voir figure 3.13). Les balais (aussi appelés « charbon ») sont en carbone (on choisit souvent du graphite). D'une part, ce matériaux possède une bonne conductivité d'autre part, le frottement du couple cuivre/carbone est faible et ainsi, le collecteur ne s'use pas prématurément. La pression des balais sur le collecteur peut être réglée par des



FIGURE 3.5 – mise en place des bobines sur le circuit magnétique statorique d'une machine à courant continu.



FIGURE 3.6 – Encoche sur l'induit destinée à recevoir les conducteurs dits actifs.



FIGURE 3.7 – Mise en place des conducteurs d'induit dans les encoche et sou-
dure de ceux-ci sur le collecteur.



FIGURE 3.8 – Mise en place des conducteurs d'induit dans les encoche et sou-
dure de ceux-ci sur le collecteur.

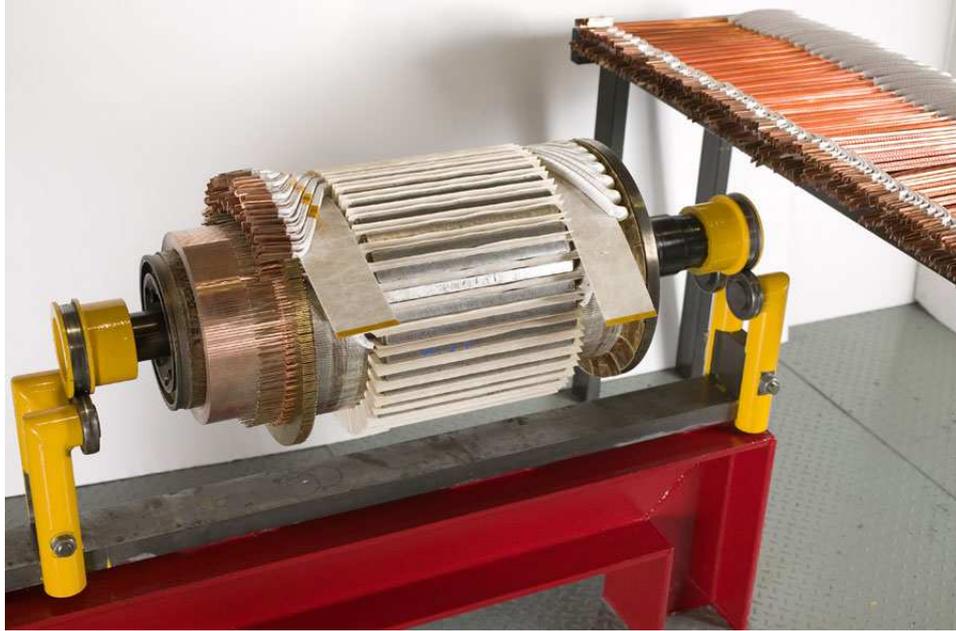


FIGURE 3.9 – Mise en place des conducteurs d'induit dans les encoche et soudure de ceux-ci sur le collecteur.

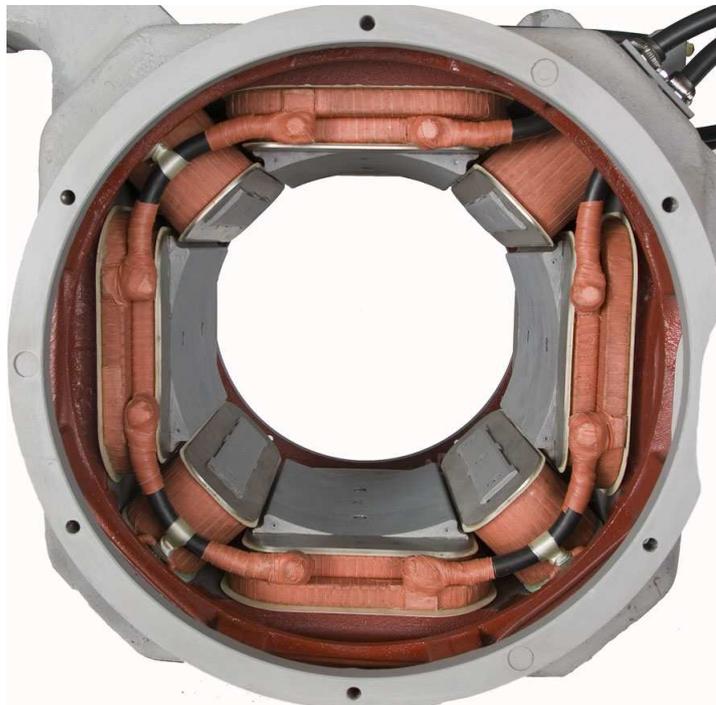


FIGURE 3.10 – Inducteur complet d'une machine à courant continu.



FIGURE 3.11 – Collecteur d'une machine à courant continu de faible puissance.

ressorts ajustables. Pour les intensités très importantes, on utilise plusieurs balais connectés en parallèle, voir figure 3.14.

3.3 Équation générale

3.3.1 Force électromotrice à vide

Nous avons vu au chapitre précédent qu'il était possible d'obtenir une f.é.m. continue en mettant en série les conducteurs de l'induit et en recueillant cette f.é.m. par deux balais fixes par rapport à l'inducteur et placés sur la ligne neutre. La « ligne neutre » est l'axe de symétrie d'une machine bipolaire, perpendiculaire à une ligne joignant les pôles.

3.3.1.1 f.é.m. réellement obtenue

Prenons par exemple un induit comportant 8 conducteurs comme le montre la figure 3.15 ($n = 8$) et étudions la tension obtenue.

Le nombre de conducteurs étant fini, la tension obtenue entre B et B' ne sera pas rigoureusement constante. Les schémas de la figure 3.15 représentent le circuit de l'induit et les f.é.m. des conducteurs. Les f.é.m. 1-1', 2-2', ... ont respectivement même module.



FIGURE 3.12 – Collecteur d'une machine à courant continu de forte puissance.

À l'instant t , les conducteurs 1 et 1', par exemple, sont en contact avec les balais. Pendant le passage des conducteurs sous les balais, la tension varie : elle est maximale quand 1 et 1' sont sur la ligne neutre. Quand 1 et 1' quittent les balais, 4' et 4 les remplacent à $t + \Delta t$; les noms des conducteurs changent mais la répartition des f.é.m. reste identique.

On obtient une tension ondulée comme le montre la figure 3.16. L'ondulation est d'autant plus faible que le nombre n de conducteurs est élevé (Δt petit). La tension maximale est sensiblement égale à $nN\Phi$ et on peut en général négliger l'ondulation qui ne représente que quelques pour cents de la tension.

3.3.1.2 Bobinage de l'induit ; collecteur

Il existe de nombreux procédés de mise en série des conducteurs de l'induit. D'autre part, les balais ne frotteront pas directement sur les conducteurs mais sur des lames de cuivre reliées aux conducteurs et constituant le *collecteur*.

EXEMPLE DE RÉALISATION :

Les connexions sont effectuées à l'avant et à l'arrière de l'induit et, à la figure 3.17 on représente la surface latérale du rotor.

Les flèches indiquent le sens des f.é.m. à l'instant t . On réalise en fait la mise



FIGURE 3.13 – Balais des premières machines à courant continu.

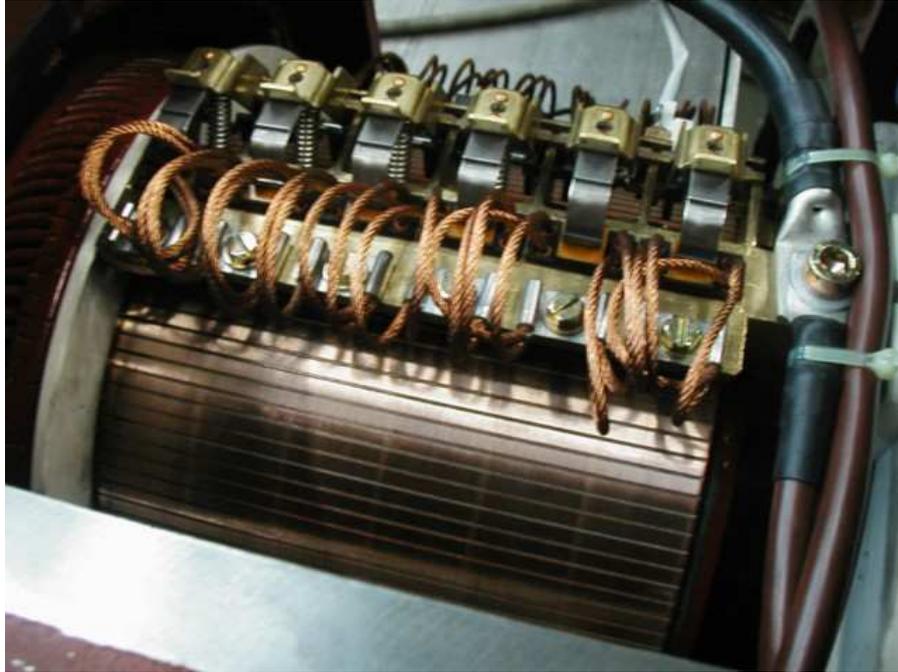


FIGURE 3.14 – Détails de la ligne des balais d'une machine à courant continu de forte puissance.

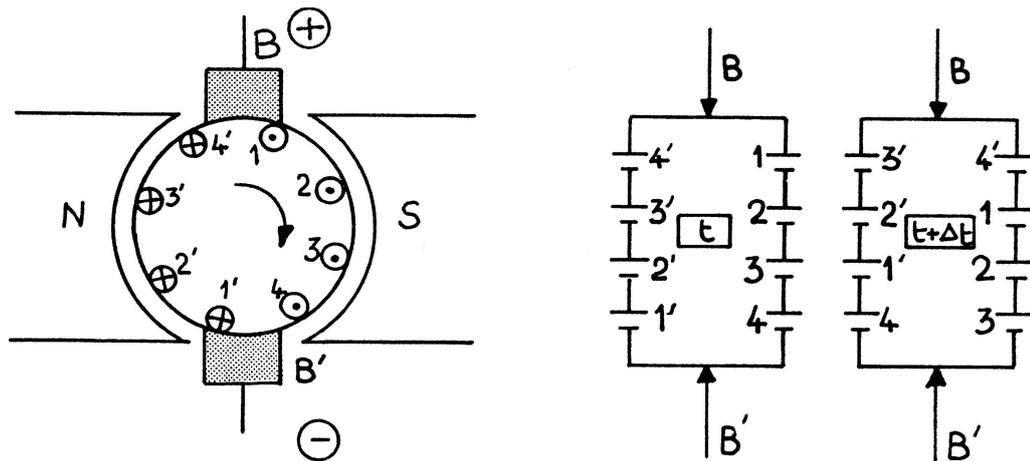


FIGURE 3.15 – F.é.m. produite dans une machine à courant continu.

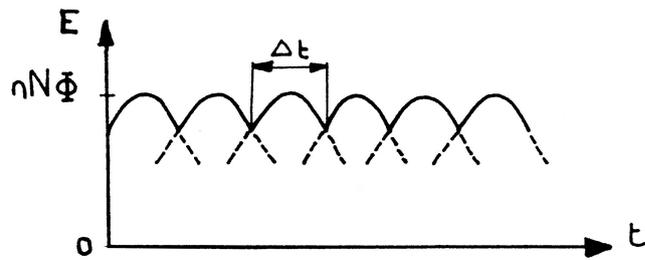


FIGURE 3.16 – Tension ondulée produite par une machine à courant continu.

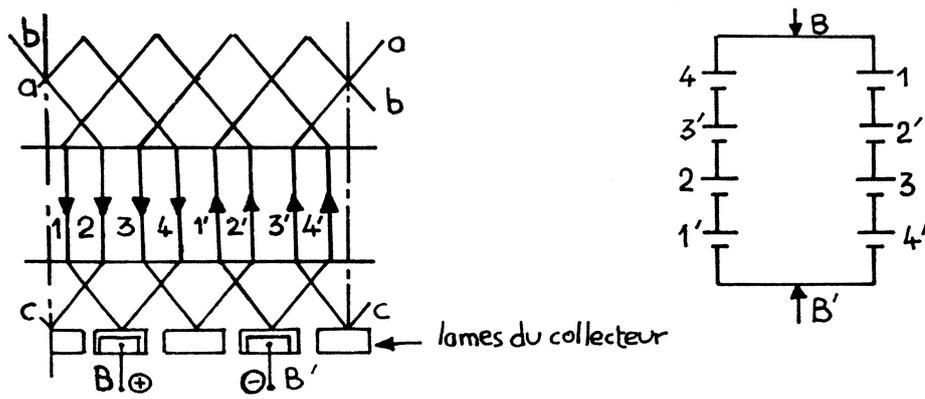


FIGURE 3.17 – Exemple de bobinage de l'induit d'une machine à courant continu.

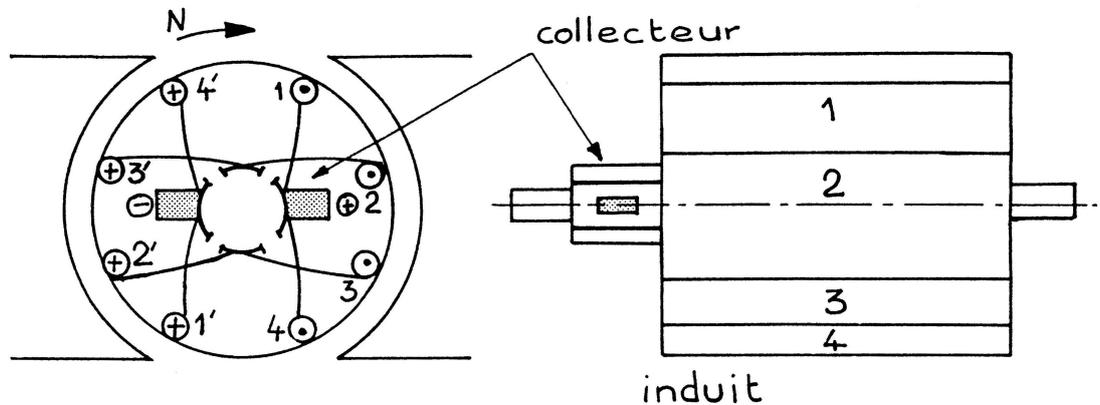


FIGURE 3.18 – Position des balais par rapport à l'induit d'une machine à courant continu.

en série représentée sur la figure 3.17, mais comme $1 = 1'$, $2 = 2'$, $3 = 3'$, $4 = 4'$ la tension entre les balais B et B' est la même que précédemment.

REMARQUE : Bien que reliés aux conducteurs situés le plus près de la ligne neutre, les balais, du fait du bobinage et du collecteur, sont placés dans l'axe des pôles inducteurs comme l'indique la figure 3.18.

3.3.1.3 Formule générale de la force électromotrice

On a donc : $E = nN\Phi$

Si l'inducteur comporte $2p$ pôles, il revient au même de considérer une machine bipolaire avec un induit qui tourne p fois plus vite que dans la machine à $2p$ pôles, soit $N \Rightarrow pN$

Nous avons vu d'autre part qu'entre les balais, 2 trajets ou « voies d'enroulement » existent pour le courant. Certains enroulement d'induit permettent de répartir les n conducteurs en $2a$ voies soit : $n \Rightarrow \frac{n}{a}$

D'où la formule générale :

$$E = \frac{p}{a} nN\Phi(I_e)$$

où p , a , n , sont des paramètres fixés par construction, et on écrira plus simplement :

$$E = kN\Phi(I_e)$$

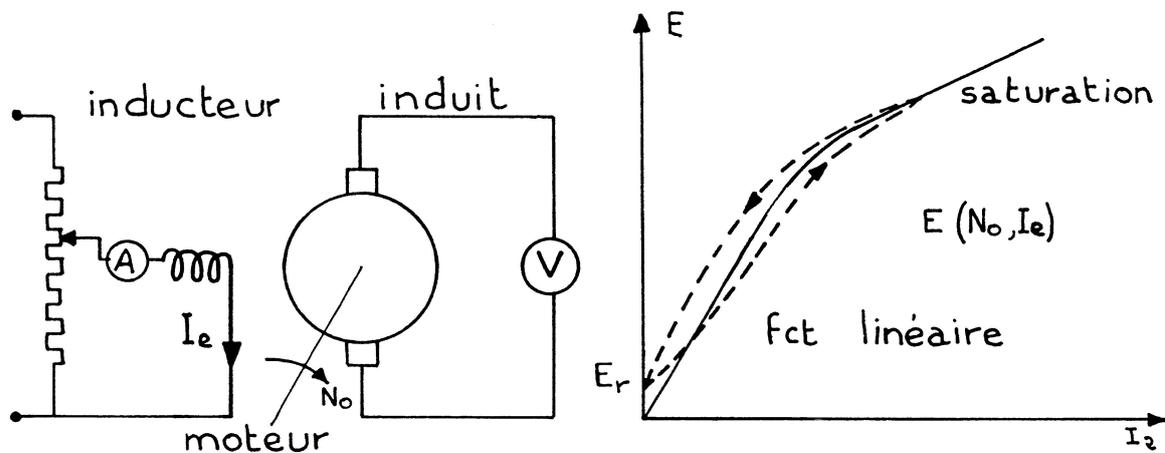


FIGURE 3.19 – Essai à vide et caractéristique à vide d'une machine à courant continu.

La relation entre le flux et le courant d'excitation I_e n'étant pas, en général, mesurable directement, on utilise la courbe expérimentale donnant, à vitesse constante N_0 , la f.é.m. E en fonction du courant d'excitation I_e : c'est la *caractéristique à vide* de la machine, obtenue par l'essai à vide. Dans cet essai, la machine est entraînée à vitesse constante N_0 par un moteur auxiliaire ; on fait varier I_e et on mesure E .

Pour les faibles valeurs de I_e , le fonctionnement est à peu près linéaire et on peut poser :

$$E = k' N_0 I_e$$

Lorsque I_e augmente, le circuit magnétique se sature et la f.é.m. augmente moins fortement. Enfin, l'hystérésis introduit un dédoublement des courbes, fonction des cycles effectués. Il subsiste généralement une f.é.m. rémanente E_r en l'absence du courant d'excitation I_e .

3.3.2 Étude en charge

3.3.2.1 Couple électromagnétique

Lorsqu'un courant I circule dans l'induit, il apparaît un couple électromagnétique C_e créé par les forces de Laplace qui s'exercent sur les conducteurs de l'induit.

$$C_e = \Sigma F_e \times r \text{ avec } r \text{ rayon de l'induit.}$$

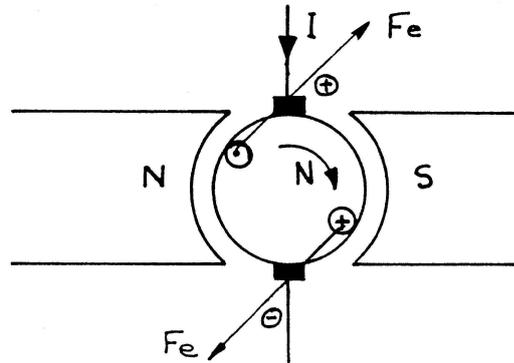


FIGURE 3.20 – Forces de Laplace s'exerçant sur l'induit d'une machine à courant continu.

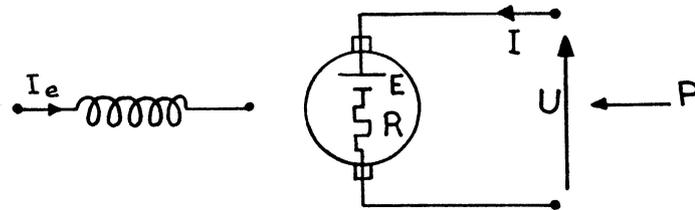


FIGURE 3.21 – Schéma équivalent de Thévenin d'une machine à courant continu.

Ce couple ne dépend que de I et de l'induction B ou du flux Φ . On pourrait en faire le calcul direct en utilisant l'expression précédente ; il est plus simple d'effectuer un bilan de puissance.

En vertu du théorème de Thévenin, le circuit d'induit, entre les deux balais, présente une f.é.m. E et une résistance R égale à la résistance mesurée aux bornes lorsque E est nulle, c'est à dire à l'arrêt de la machine. On considérera uniquement les régimes permanents où tensions d'alimentation et courants absorbés sont constants, ainsi on ne prendra pas en compte l'inductance de l'induit.

Le schéma équivalent est celui de la figure 3.21.

Supposons que le courant I est absorbé par l'induit sous la tension U (convention récepteur). La puissance P absorbée par l'induit peut s'écrire :

$$P = UI = (E + RI)I = EI + RI^2$$

RI^2 représente l'échauffement par pertes Joule de l'induit et des balais.

EI représente la puissance qui disparaît de la forme électrique pour réapparaître sous la forme mécanique. C'est la puissance électromagnétique P_e qui présente deux écritures :

$$P = EI = C_e \Omega = C_e 2\pi N$$

Soit : $C_e = \frac{EI}{2\pi N}$

ou en remplaçant E :

$$C_e = \frac{k}{2\pi} I \Phi(I_e)$$

Le couple ne dépend que des courants. Son signe dépend du sens du courant. Ici, la convention choisie correspond à la fourniture de puissance mécanique (C_e et N de même sens) c'est à dire moteur.

3.3.2.2 Réaction d'induit

La circulation des courants dans l'induit s'accompagne de phénomènes parasites :

- Résistance de l'induit et des contacts balais/collecteur : Cette résistance R , rencontrée au paragraphe précédent, est la résistance équivalente aux $2a$ voies d'enroulement mises en parallèle, en série avec la résistance des contacts balais/collecteur. Le phénomène est cependant plus complexe car le contact balais/collecteur se présente comme une résistance non linéaire (fonction du courant I). La chute de tension dans les contacts balais/collecteur restant faible, on négligera ce phénomène et on mesurera R pour des courants proches du courant nominal.
- Réaction magnétique de l'induit : Le passage du courant I produit une force magnétomotrice perpendiculaire à l'axe des pôles qui modifie la topographie des lignes d'induction. En fonctionnement *moteur*, on a les sens de courants indiqués sur la figure 3.22. L'induit constitue une bobine qui crée le flux de réaction d'induit Φ_r . La ligne neutre est décalée en sens inverse de la rotation et les balais ne recueillent plus la f.é.m. maximale : la réaction magnétique de l'induit entraîne donc une réduction de f.é.m. en charge. Pour rendre cet effet négligeable devant la chute ohmique, on utilise des *pôles auxiliaires*, excités par le courant de l'induit et qui créent une force magnétomotrice opposée à celle de l'induit comme le montre la figure 3.23.

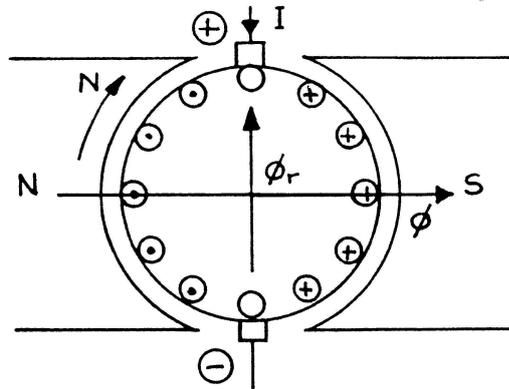


FIGURE 3.22 – Réaction magnétique de l'induit d'une machine à courant continu.

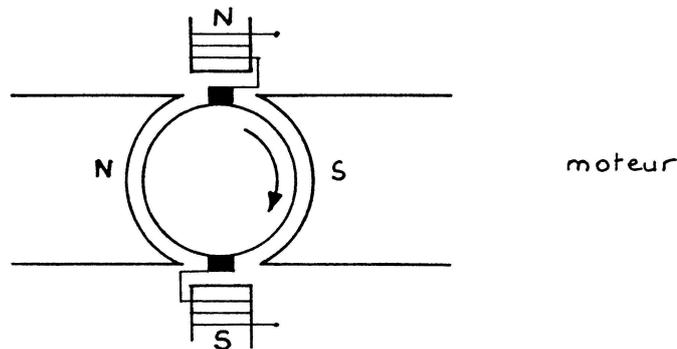


FIGURE 3.23 – Pôles auxiliaires d'une machine à courant continu.

- Commutation : Lorsque le balai passe d'une lame du collecteur à la suivante, il y a court-circuit momentané d'une section du bobinage induit et, pendant ce temps, le courant doit changer de sens dans les conducteurs en commutation ; l'inductance de la section s'oppose à cette inversion et conduit à l'apparition d'étincelles (arcs) de commutation. Les pôles auxiliaires favorisent la commutation.

3.3.2.3 Formules pratiques

Les formules pratiques utilisent la *caractéristique à vide* $E(N_0, I_e)$ relevée expérimentalement.

On en déduit la f.é.m. à la vitesse N pour le même courant I_e :

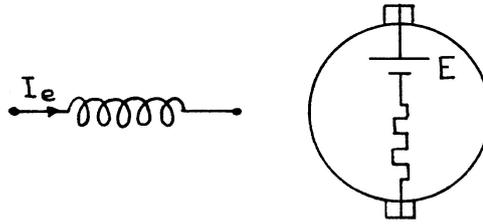


FIGURE 3.24 – Schéma équivalent d'une machine à courant continu.

$$E(N, I_e) = \frac{N}{N_0} E(N_0, I_e)$$

On obtient de même une expression *quantitative* du couple en fonction de I_e et de I :

$$C_e = \frac{E(N, I_e)}{2\pi N} I = \frac{E(N_0, I_e)}{2\pi N_0} I$$

On considérera que le schéma équivalent d'une machine à courant continu en régime permanent est celui donné à la figure 3.24.

3.4 Moteur à courant continu

L'utilisateur d'un moteur s'intéresse en premier lieu à la *caractéristique mécanique* $C_e = f(N)$ qui donne le couple produit en fonction de la vitesse. Il faut par ailleurs connaître le courant absorbé en fonction du couple demandé : c'est la *caractéristique électromécanique* $C_e = f(I)$. On utilise aussi la *caractéristique de vitesse* $N = f(I)$.

Ces courbes sont généralement tracées avec pour paramètres la tension d'alimentation U ; les propriétés obtenues dépendent du mode d'excitation.

3.4.1 Démarrage d'un moteur

Si, lorsque la vitesse du moteur est nulle, on applique une tension U aux bornes de l'induit, le courant circulant dans l'induit est alors : $I_D = \frac{U}{R}$ puisque la f.é.m. est nulle ($N = 0$).

Ce courant est très supérieur au courant nominal (10 à 100 fois), ce qui entraînerait :

- un échauffement instantané de l'induit très élevé ;

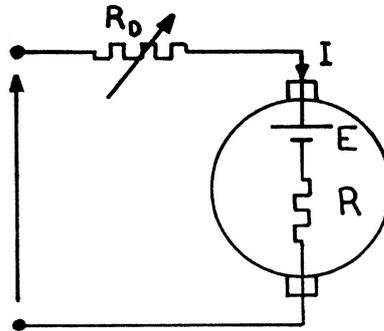


FIGURE 3.25 – Rhéostat de démarrage d'une machine à courant continu.

- une chute de tension inadmissible sur le réseau d'alimentation ;
- un couple de démarrage lui aussi très supérieur au couple nominal et risquant de rompre l'accouplement.

Aussi faut-il limiter le courant d'induit en plaçant, lors du démarrage, une résistance R_D en série avec l'induit. Ce *rhéostat de démarrage* est court-circuité progressivement tandis que le moteur prend sa vitesse et que la f.é.m. augmente.

$$I_D = \frac{U}{R + R_D}$$

On calcule R_D afin que I_D soit de 1 à 2 fois le courant nominal I_n . Pour que le démarrage soit rapide, il faut que le couple soit élevé donc que le flux soit alors maximum (I_e maximum).

NOTA : On peut aussi limiter le courant en utilisant un limiteur électronique; d'autre part, si le démarrage s'opère sous tension variable U , il suffira de faire croître U progressivement.

3.4.2 Moteur à excitation séparée (ou dérivée)

On alimente en parallèle sous la tension continue U l'induit et l'inducteur comme le montre la figure 3.26

On étudiera les caractéristiques pour $U = cte$ et $I_e = cte$. On charge le moteur en lui opposant un couple résistant et on étudie : $C_e = f(I)$; $N = f(I)$; $C_e = f(N)$.

COUPLE :

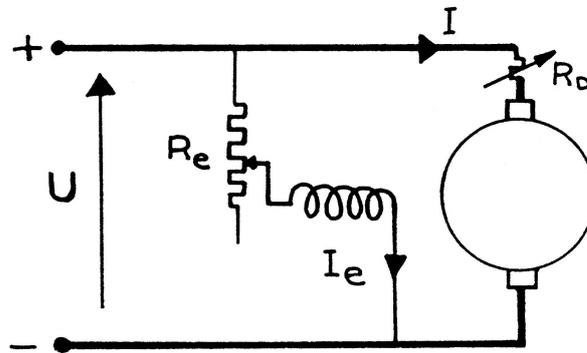


FIGURE 3.26 – Machine à courant continu à excitation séparée.

$$C_e = \frac{k}{2\pi} I \Phi(I_e) = \frac{E(N_0, I_e)}{2\pi N_0} I$$

Pour chaque valeur de I_e , le couple est donc proportionnel au courant d'induit I . La formule ci-dessus permet, en utilisant la caractéristique à vide, de calculer la pente de cette droite. On remarque que le courant ne dépend que du couple.

On peut remarquer qu'au démarrage : $C_D = \frac{k}{2\pi} I_D \Phi(I_e) = \frac{E(N_0, I_e)}{2\pi N_0} I_D$

VITESSE :

La loi d'Ohm appliquée à l'induit s'écrit :

$$U = E + RI \text{ ou } E = U - RI = kN\Phi(I_e)$$

D'où :

$$N = \frac{U - RI}{k\Phi(I_e)}$$

ou, en reprenant la caractéristique à vide (formule quantitative) :

$$\frac{N}{N_0} = \frac{E(N, I_e)}{E(N_0, I_e)} = \frac{U - RI}{E(N_0, I_e)}$$

Pour chaque valeur de I_e , le dénominateur est constant et N est donc fonction linéaire du courant I . Pour un courant nul (donc pour un couple nul), on obtient la vitesse à vide N_V :

$$N_V = N_0 \frac{U}{E(N_0, I_e)}$$

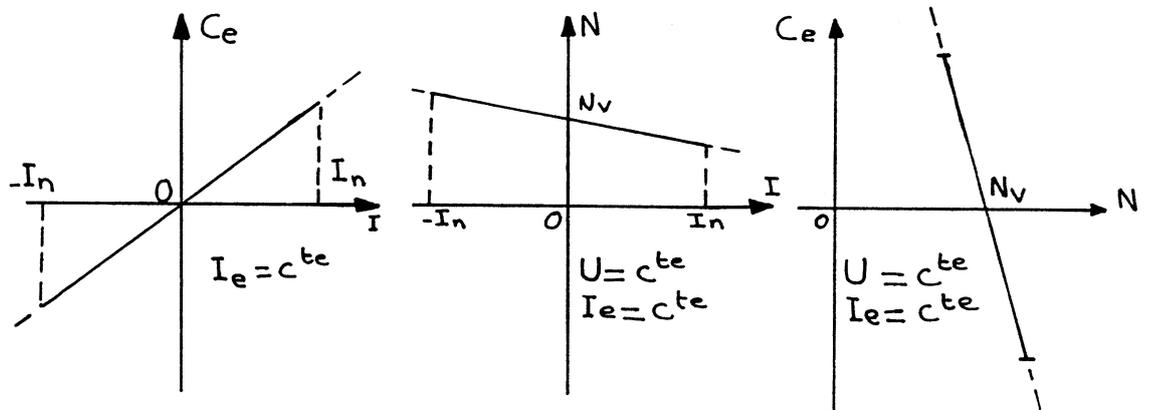


FIGURE 3.27 – Caractéristique mécanique d'une machine à courant continu à excitation séparée.

En charge, la vitesse diminue légèrement, car, en pratique, on aura $RI \leq RI_n \ll U$.

CARACTÉRISTIQUE MÉCANIQUE :

On élimine le courant entre les expressions précédentes :

$$N = \frac{U}{k\Phi(I_e)} - \left[\frac{R}{k\Phi(I_e)} \frac{2\pi}{k\Phi(I_e)} \right] C_e$$

Pour chaque valeur de I_e , la vitesse est une fonction linéaire du couple.

Le fonctionnement *moteur* correspond à C_e et N de même sens.

Lorsque C_e et I sont ici négatifs, il s'agit d'un freinage : la charge est alors motrice (ou entraînée) et le courant est envoyé vers le réseau.

REMARQUES :

- Si I_e *augmente* le flux augmente, la vitesse *diminue*.
- Si I_e diminue au contraire, la vitesse augmente et si I_e tend vers zéro, la vitesse à vide tend vers l'infini : *en l'absence d'excitation, le moteur s'emballe*. Il ne faut donc jamais couper ce circuit.
- Si la tension U *augmente*, la vitesse *augmente* proportionnellement.

3.4.3 Moteur à excitation série

On utilise un moteur dont l'inducteur, réalisé en conducteur de forte section, peut-être mis en série avec l'induit (voir figure 3.28). On impose donc :

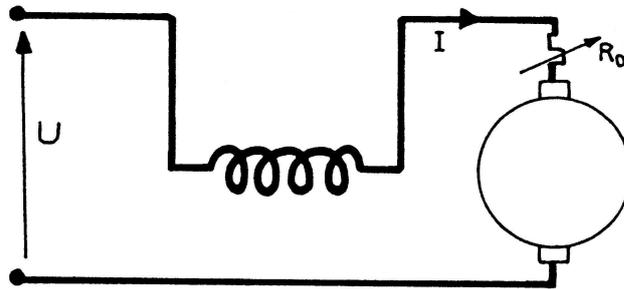


FIGURE 3.28 – Schéma d'une machine à courant continu à excitation série.

$I = I_e$, ce qui modifie les propriétés du moteur. On étudiera les caractéristiques sous tension constante U .

COUPLE :

$$C_e = \frac{k}{2\pi} I \Phi(I) = \frac{E(N_0, I)}{2\pi N_0} I$$

Pour les faibles valeurs de I , le flux est proportionnel à I et le couple est donc proportionnel au carré du courant d'induit ; en posant : $E(N_0, I) = k' N_0 I$, on a en effet :

$$C_e = \frac{k'}{2\pi} I^2$$

Lorsque I augmente, le circuit magnétique se sature, le flux croît moins fortement, de même que le couple. On trace la courbe point par point à partir des valeurs de la caractéristique à vide. On remarque ici encore que le courant d'induit est lié au couple.

NOTA : Au démarrage : $C_{eD} = \frac{k}{2\pi} I_D \Phi(I_D) = \frac{E(N_0, I_D)}{2\pi N_0} I_D$ Ce couple pourra donc être très élevé ($I_D > I_n$).

VITESSE : En notant R_s la résistance de l'inducteur série, la loi d'Ohm s'écrit :

$$E = U - (R + R_s)I = kN\Phi(I)$$

$$\text{D'où : } N = \frac{U - (R + R_s)I}{k\Phi(I)}$$

ou, en reprenant la caractéristique à vide :

$$\frac{N}{N_0} = \frac{E(N, I)}{E(N_0, I)} = \frac{U - (R + R_s)I}{E(N_0, I)}$$

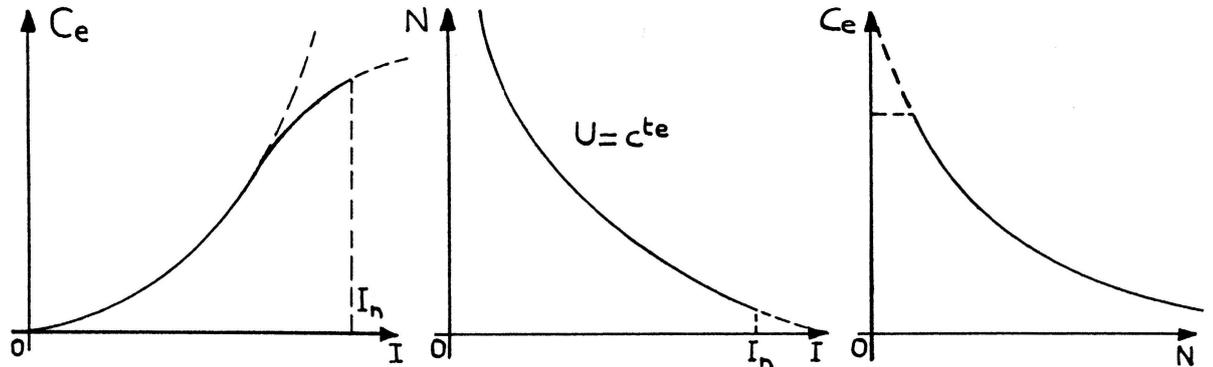


FIGURE 3.29 – Caractéristiques mécaniques d'une machine à courant continu à excitation série.

Le dénominateur dépend fortement de I . En particulier pour les faibles valeurs de I , on peut poser :

$$E(N_0, I) = k' N_0 I$$

Soit :

$$\frac{N}{N_0} = \frac{U - (R + R_s)I}{k' N_0 I}$$

Lorsque I tend vers zéro (fonctionnement à vide, $C_e = 0$) la vitesse tend vers l'infini : il y a *emballement à vide*. La courbe présente une allure hyperbolique et la vitesse est nulle pour un courant $I = \frac{U}{R+R_s} I_n$, voir figure 3.29.

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES : Il faut éliminer I entre les expressions du couple et de la vitesse. Comme I intervient dans la f.é.m., il faut procéder point par point. Pour un couple nul, on trouve un courant nul et une vitesse infinie ; l'allure de la courbe est hyperbolique. On n'envisage pas $C_e < 0$ car il faut passer par $N = \infty$ pour atteindre ce domaine, voir figure 3.29.

REMARQUES :

1. Si U augmente, le couple reste inchangé et la vitesse augmente proportionnellement à U .
2. Le moteur série peut être utilisé en courant alternatif car le couple est proportionnel au carré du courant, donc toujours de même signe. Le circuit magnétique doit être entièrement feuilleté pour réduire les pertes fer et le moteur utilisable en alternatif ou en continu porte le nom de *moteur universel*. Il est très utilisé pour les petites puissances car sa vitesse n'est pas liée à la fréquence du réseau.

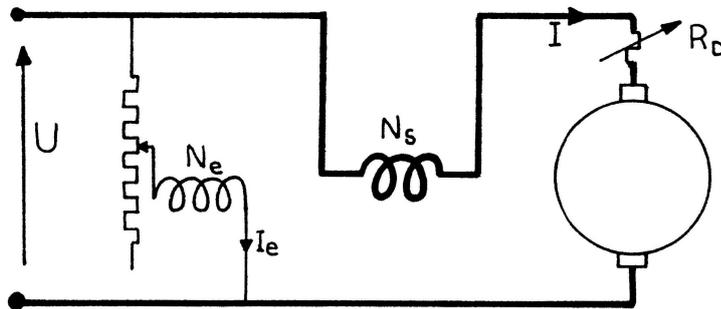


FIGURE 3.30 – Schéma d'une machine à courant continu à excitation composée.

3.4.4 Moteur à excitation composée

Le moteur à excitation séparée ne s'emballé pas à vide et répercute sur le courant I tout accroissement de couple ; le moteur série s'emballé, mais réduit les appels de courant lors d'une augmentation de couple $I \sim \sqrt{C}$. Pour concilier les avantages, on utilise un moteur comportant sur les pôles deux inducteurs :

- l'un *dérivé*, comportant N_e spires, branché en parallèle et parcouru par le courant I_e ;
- l'autre *série*, comportant N_s spires, branché en série, parcouru par le courant I .

La force magnétomotrice est donc $N_e I_e \pm N_s I$, le signe dépendant des sens relatifs des enroulements : \oplus montage *additif* \ominus montage *soustractif*.

Il est commode de considérer un courant fictif I'_e , qui, circulant *seul* dans l'inducteur *dérivé* produirait le même flux :

$$N_e I'_e = N_e I_e \pm N_s I$$

soit :

$$I'_e = I_e \pm \alpha I$$

ou α est le rapport d'équivalence.

Ce courant équivalent permet de toujours se ramener à la caractéristique à vide tracée en excitation séparée en fonction de I_e seul. On obtient le schéma équivalent de la figure 3.31, dans laquelle on inclut dans R' la résistance R_s de l'inducteur série :

$$R' = R_s + R$$

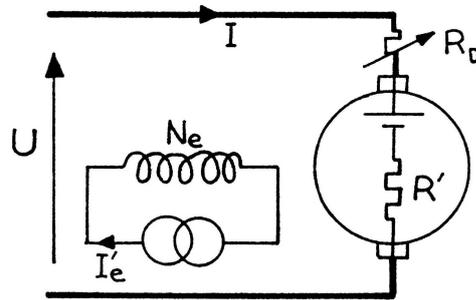


FIGURE 3.31 – Schéma équivalent d'une machine à courant continu à excitation composée.

On étudie les courbes pour $U = cste$; $I_e = cste$.

COUPLE :

$$C_e = \frac{k}{2\pi} I \Phi(I'_e) = \frac{E(N_0, I'_e)}{2\pi N_0} I$$

On trace point par point la courbe de couple : si le montage est additif, I'_e augmente avec I et le couple est supérieur à celui obtenu en excitation séparée seule.

VITESSE :

$$E = U - R'I = kN\Phi(I'_e)$$

et

$$\frac{N}{N_0} = \frac{U - R'I}{E(N_0, I'_e)}$$

A vide, le couple et I sont nuls : $I'_e = I_e$. On retrouve la même vitesse N_v qu'en excitation séparée (l'enroulement série est sans effet).

Si le montage est additif, le flux étant accru par le courant I , la vitesse est plus faible qu'en excitation séparée.

Si le montage est soustractif, la réduction de flux due au courant entraîne un accroissement de la vitesse en charge pouvant conduire à l'emballement : le montage soustractif est à proscrire ($N \rightarrow \infty$ si $I'_e \rightarrow 0$).

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES :

On l'obtient en éliminant graphiquement I entre les courbes précédentes, voir figure 3.32.

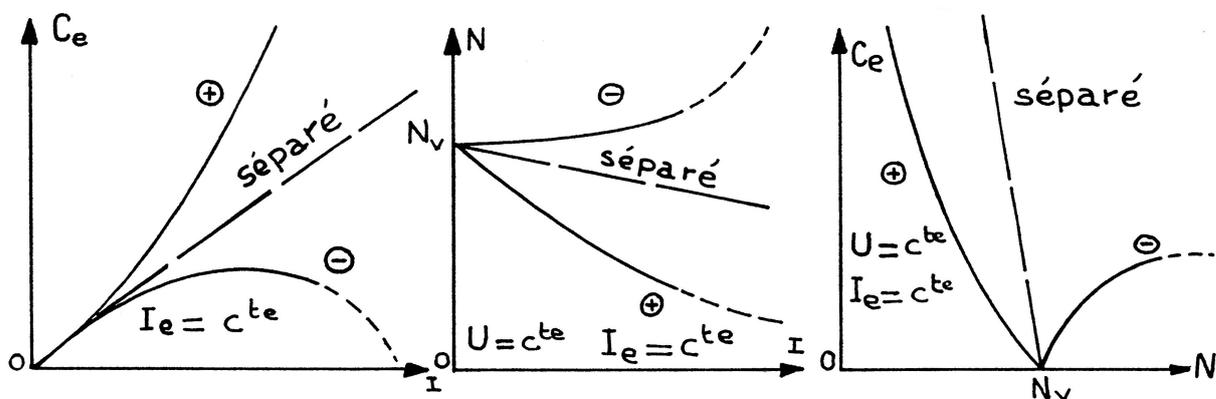


FIGURE 3.32 – Caractéristiques mécaniques d'une machine à courant continu à excitation composée.

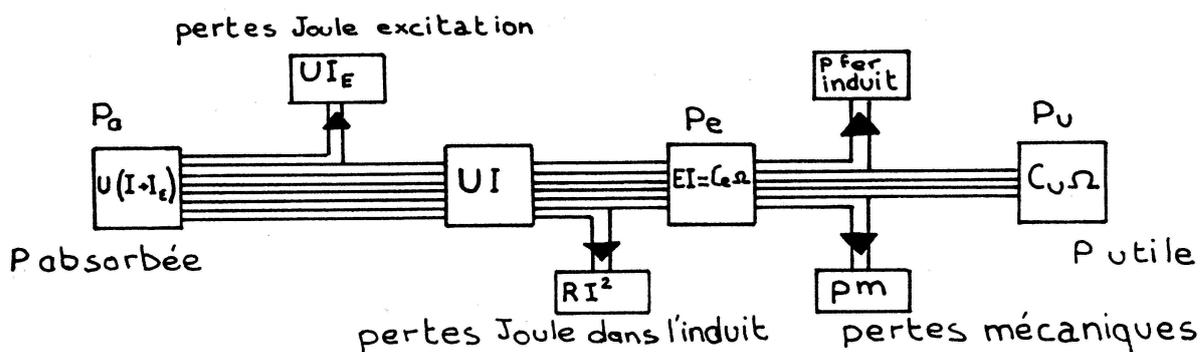


FIGURE 3.33 – Diagramme des pertes d'une machine à courant continu à excitation séparée.

Comme, en pratique, α est faible, il est inutile de comparer ces courbes à celles du même moteur en excitation séparée seule. on voit que la courbe $C_e = f(N)$ du montage additif se rapproche de celle du moteur série sans en présenter l'inconvénient de l'emballement à vide. On bénéficie en outre du réglage de la vitesse à vide N_v par action sur I_e .

3.4.5 Rendement d'un moteur - couple utile

On peut localiser sur un diagramme les diverses pertes de puissances survenant dans un moteur. Par exemple, pour un moteur à excitation dérivée, on aura le diagramme de la figure 3.33.

Le rendement s'écrira :

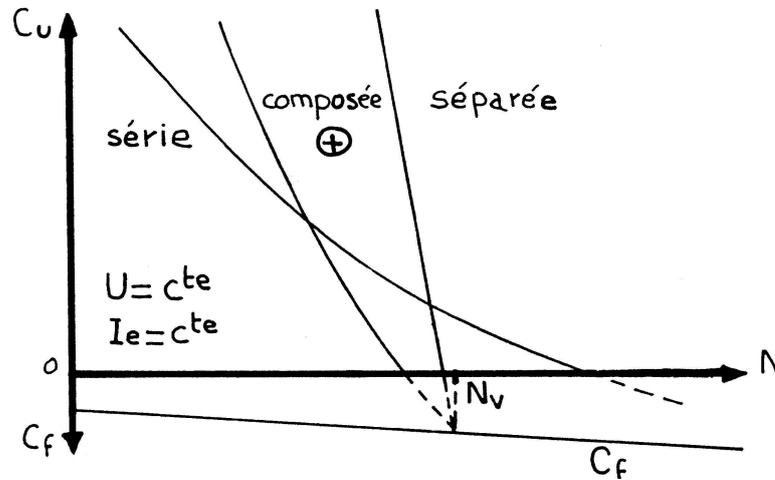


FIGURE 3.34 – Couple utile d'une machine à courant continu en fonction du mode d'excitation.

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{absorbée}}} = \frac{P_u}{P_u + \text{pertes}}$$

On remarque en particulier que :

$$P_u = C_u \Omega = P_e - p_f - p_m = C_e \Omega - p_f - p_m$$

soit : $C_u = C_e - \frac{p_f - p_m}{\Omega} = C_e - C_f$ où C_f est le couple de frottement du moteur ; il croît légèrement avec la vitesse de rotation.

En partant des caractéristiques mécaniques, on obtient le couple utile en retranchant le couple de frottement. La figure 3.34 donne les couples utiles dans les trois modes d'excitation. L'importance du couple de frottement a été exagérée sur la figure.

3.4.6 Mise en œuvre des moteurs

3.4.6.1 Vitesse de rotation

La vitesse de rotation obtenue dépend des courbes couple-vitesse du moteur et de la charge entraînée : le régime permanent ($N = cste$) est obtenu lorsque le couple utile est égal au couple résistant.

On trace sur un même graphe les deux caractéristiques mécaniques et on lit la vitesse obtenue à l'intersection ; par exemple à la figure 3.35, treuil, hélice

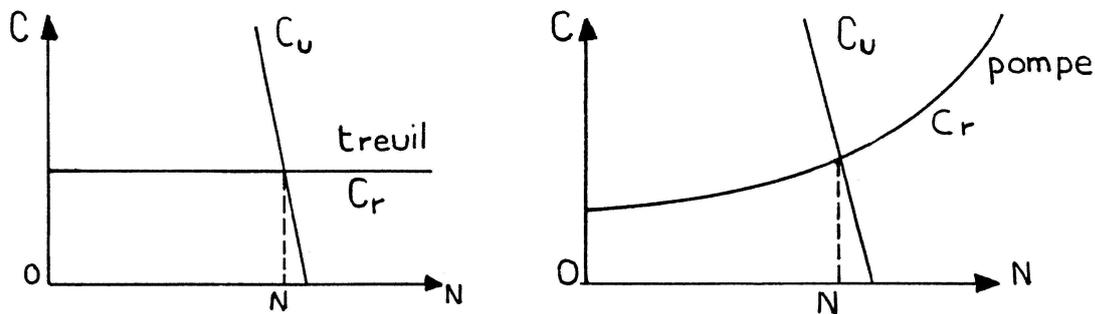


FIGURE 3.35 – Vitesse de rotation d'une machine à courant continu lue sur les caractéristiques mécaniques.

ou pompe, entraînés par un moteur à excitation dérivée.

3.4.6.2 Modes de fonctionnement

Comme l'étude générale l'a montré, le fonctionnement des machines est réversible. Les variables mécaniques sont le couple utile C_u et la vitesse de rotation N . On distingue quatre quadrants de fonctionnements comme le montre la figure 3.36.

Dans les quadrants 1 et 3, le couple et la vitesse sont de même sens : la puissance électrique est transformée en puissance mécanique fournie à la charge. Le quadrant 1 correspond au fonctionnement moteur en marche avant, tandis que le 3 correspond à un fonctionnement moteur en marche arrière.

Dans les quadrants 2 et 4, le couple est opposé à la vitesse. La puissance mécanique est fournie par la charge qui est alors entraînée, le moteur se comporte en frein convertissant la puissance mécanique en puissance électrique qui sera soit renvoyée vers l'alimentation (récupération) soit dissipée dans des résistances (freinage rhéostatique).

On n'obtient pas toujours tous les quadrants de fonctionnement en raison :

- du type de moteur (séparé ou série) ;
- du mode de réglage (action sur I_e ou sur U) ;
- du type d'alimentation (réversible ou non).

Une alimentation *réversible* en courant peut fournir ou absorber du courant, donc de la puissance. Si l'alimentation n'est pas réversible en courant, le courant est toujours de même sens et aucune puissance ne peut être reçue par l'alimentation ce qui interdit tout freinage avec récupération. C'est le cas des génératrices entraînées par moteur thermique ou par des montages redresseurs à diodes.

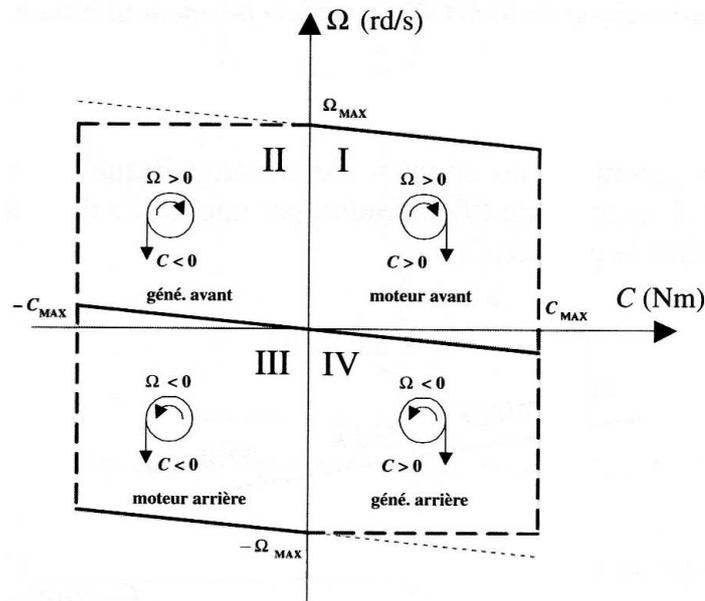


FIGURE 3.36 – Les quatre quadrants de fonctionnement d'une machine électrique tournante.

Si l'on souhaite obtenir une grande précision sur la vitesse, on associera aux montages un asservissement de vitesse.

3.4.6.3 Moteur à excitation séparée

ACTION SUR LE COURANT D'EXCITATION I_e

Si I_e décroît, la vitesse augmente, mais le couple diminue. La puissance nécessaire à l'excitation étant faible devant la puissance utile, ce réglage est simple à réaliser (rhéostat par exemple). La gamme de variation de vitesse obtenue reste limitée : l'accroissement de I_e devient sans effet lorsque la saturation apparaît et une réduction de I_e conduit, compte tenu du courant d'induit nominal, à une réduction prohibitive du couple admissible (quadrant 1).

Si l'alimentation est réversible en courant, le couple peut changer de sens et on aura freinage par récupération (quadrants 1 et 4 de la figure 3.37).

En inversant les connexions de l'induit, on passe au quadrant 3 (inversion du sens de marche) et si l'alimentation est réversible aux quadrants 3 et 2 de la figure 3.37).

ACTION SUR LA TENSION D'ALIMENTATION U

La vitesse, à couple constant, est liée linéairement à U .

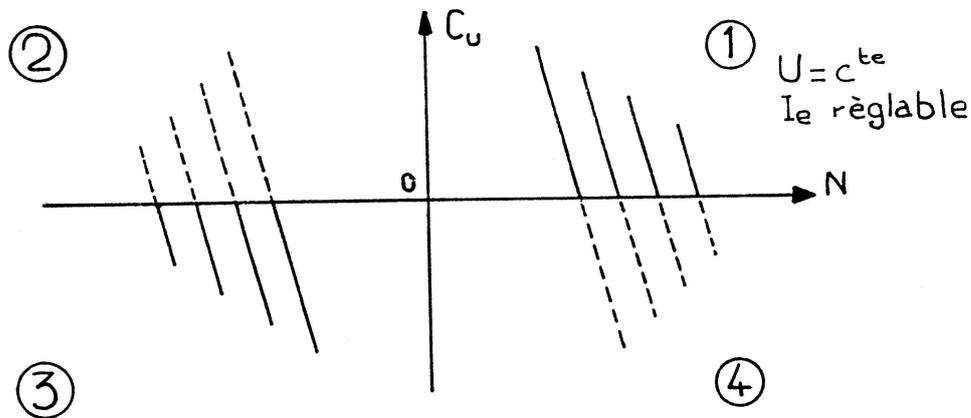


FIGURE 3.37 – Action sur le courant d'excitation d'une machine à courant continu à excitation séparée.

Si U est positive, on obtiendra le quadrant 1 et, si l'alimentation est réversible, le quadrant 4, voir la figure 3.38. Si U change de signe, sans que l'alimentation ne soit réversible, on obtient les quadrants 1 et 2 de de la figure 3.38. Par changement de sens du courant dans l'induit, on aura respectivement les quadrants 3, 3-2, 3-4.

Le fonctionnement $U = 0$ correspond à un fonctionnement en génératrice à excitation séparée en court-circuit ; c'est un cas particulier de freinage rhéostatique.

Si l'alimentation est réversible en tension et courant, on pourra obtenir les quatre quadrants.

Exemples d'alimentation à tension variable :

Ward Léonard : On alimente le moteur par une dynamo génératrice entraînée à vitesse constante N_0 par un moteur asynchrone ou synchrone. En faisant varier l'excitation I_e de la génératrice, on règle la tension U aux bornes du moteur comme on peut le voir sur la figure 3.39.

Le moteur est excité par un courant constant. En négligeant les chutes de tension dans les induits et la saturation, on peut écrire, E_G et E_M étant les f.é.m. dans les deux machines : $E_G = E_M$ $E_G = kI_e$ $E_M = k'N$

Soit : $N = \frac{k}{k'} I_e$ La vitesse est proportionnelle au courant d'excitation de la génératrice.

Le montage est parfaitement réversible et fonctionne dans les quatre quadrants. La génératrice joue le rôle d'amplificateur de puissance. Ce montage, très souple, était utilisé pour les variations de vitesse dans le cas de puissance très élevée malgré son mauvais rendement (70 %).

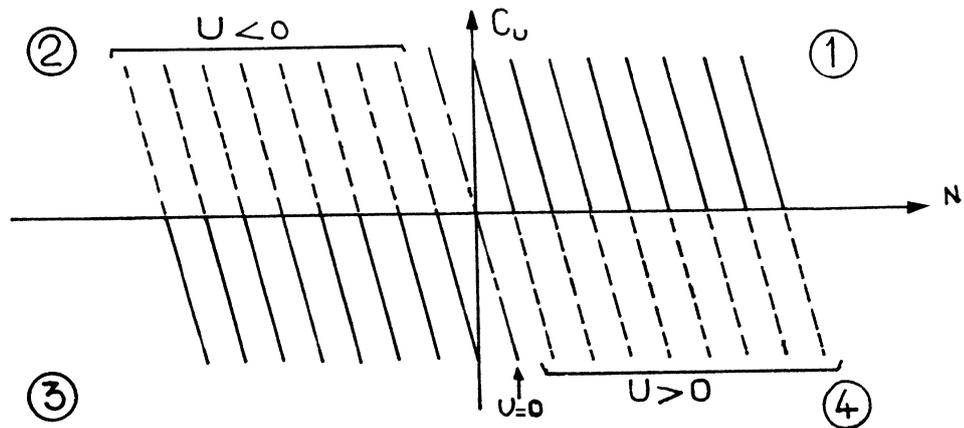


FIGURE 3.38 – Action sur la tension d'alimentation d'une machine à courant continu à excitation séparée.

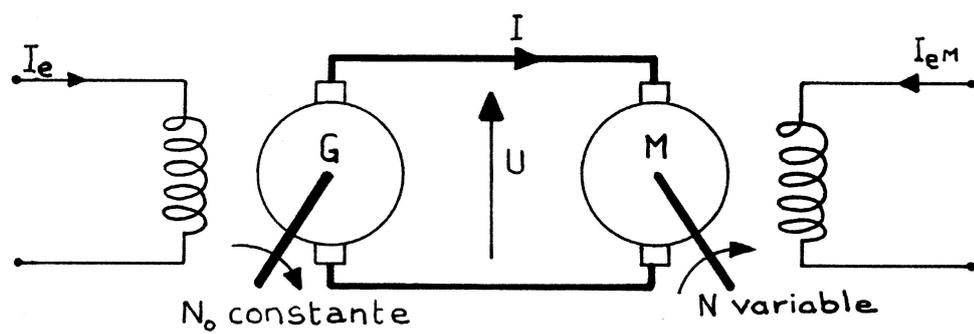


FIGURE 3.39 – Schéma de principe du Ward Léonard.

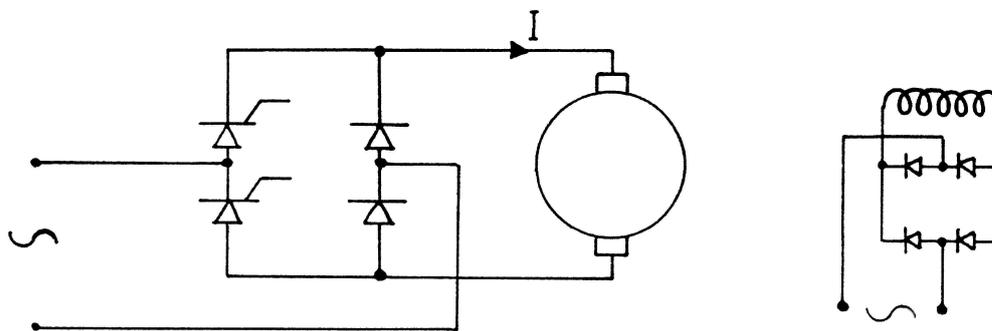


FIGURE 3.40 – Pont mixte alimentant une machine à courant continu à excitation séparée.

Montage à pont redresseur :

L'inducteur est alimenté sous tension constante par un pont de diodes. L'induit est alimenté par un pont redresseur comportant des thyristors qui permettent de régler la tension moyenne d'alimentation. Le courant ne pouvant s'inverser, il ne peut y avoir de freinage du quadrant moteur. Si l'on souhaite un fonctionnement dans les quatre quadrants, on a recourt à un autre pont « tête bêche » ou à un inverseur de courant à quatre contacteurs. Dans le cas de la figure 3.40, le pont mixte n'autorise qu'un seul quadrant de fonctionnement.

Moteurs de faibles puissances :

Pour les moteurs utilisés dans certains asservissements (puissance inférieure au kW), on peut envisager :

- d'utiliser une excitation fixe, souvent par des aimants permanents, l'induit étant alors directement alimenté sous tension variable par un amplificateur de puissance à transistors ;
- d'alimenter l'induit par un courant constant, produit par une alimentation électronique à courant constant. On commande alors le couple par le courant d'excitation comme le montre la figure 3.41. Si le circuit n'est pas saturé, le couple est proportionnel à I_e .

3.4.6.4 Moteur à excitation série

On peut agir sur l'excitation en shuntant l'inducteur par une faible résistance. On réduit le flux et on augmente la vitesse. Comme pour le moteur à excitation séparée, l'amplitude de réglage est limitée. Par action sur la tension d'alimentation U on agit, à couple constant, linéairement sur la vitesse.

On n'envisage que les fonctionnements des quadrants 1 et 3, le passage de

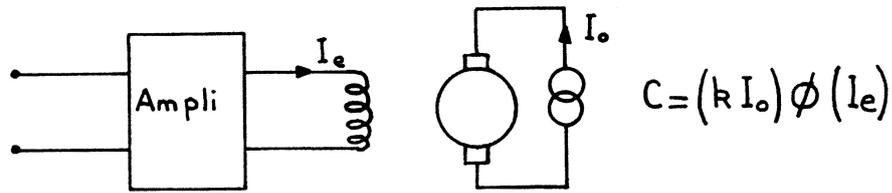


FIGURE 3.41 – Asservissement : commande de l'induit du moteur à courant continu par courant constant.

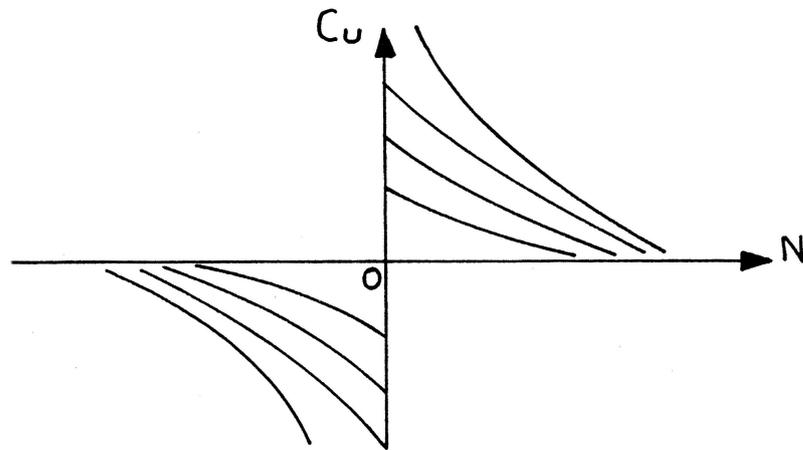


FIGURE 3.42 – Caractéristiques mécaniques du moteur à courant continu à excitation série, quadrant 1 et 3.

l'un à l'autre s'effectuant par commutation. Il est en effet exclu de freiner en récupération car, lorsque le couple s'annule avant de changer de signe, la vitesse doit passer par l'infini! (voir figure 3.42)

Dans ce cas aussi, on peut démarrer le moteur sans rhéostat de démarrage en réduisant la tension U . La variation de tension s'obtiendra en général en utilisant un pont redresseur à thyristors.

REMARQUES :

1. Lorsque plusieurs moteurs série sont mécaniquement accouplés à une même charge, on peut connecter en série ou en parallèle leurs circuits électriques et obtenir par ces couplages diverses gammes de vitesses.
2. Pour freiner en récupérant la puissance, on branche momentanément le moteur en excitation séparée en alimentant son inducteur par une source auxiliaire. On retrouve alors le fonctionnement du paragraphe précédent (quadrants 2 et 4).

3.5 Génératrices à courant continu

Ces génératrices sont de moins en moins utilisées pour produire des tensions continues. On les rencontre encore cependant comme étage de puissance réversible dans le Ward Léonard par exemple.

Nous avons d'autre part déjà observé qu'un moteur se comportait en génératrice lors des freinages avec récupération (quadrants 2 et 4) et il est inutile de reprendre ces études. Il reste cependant deux points importants :

- le freinage rhéostatique ;
- la mesure de vitesse.

3.5.1 Freinage rhéostatique

L'induit du moteur est déconnecté du réseau et refermé sur une résistance R_C . Le moteur est entraîné par sa charge à la vitesse N et sa f.é.m. fait circuler un courant I , négatif, dans R_C .

On aura :

$$E + (R + R_C)I = 0$$

$$E = kN\Phi(I_e) \quad C = \frac{k}{2\pi} I\Phi(I_e)$$

En éliminant E et I en fonction de N et C , il vient :

$$C = -\frac{k^2}{2\pi} \frac{(\Phi(I_e))^2}{R + R_C} N$$

On peut régler ce couple de freinage (opposé à N) en agissant sur R_C et sur I_e , voir la figure 3.44. Toute la puissance provenant du freinage est dissipée dans R et R_C . On ne peut obtenir le blocage ($N = 0 = C$) et il faut éventuellement, pour caler l'arbre, un frein mécanique.

Afin d'obtenir un freinage même en l'absence de distribution électrique (problème de sécurité), il est souvent préférable d'utiliser un montage auto-excité de la dynamo (dynamo dérivée).

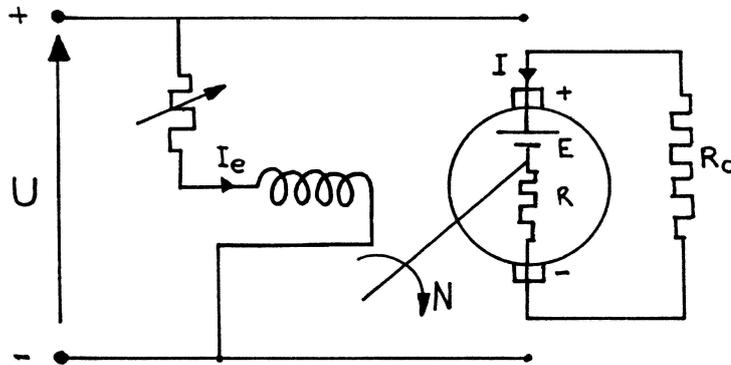


FIGURE 3.43 – Freinage rhéostatique d'un moteur à courant continu, schéma de principe.

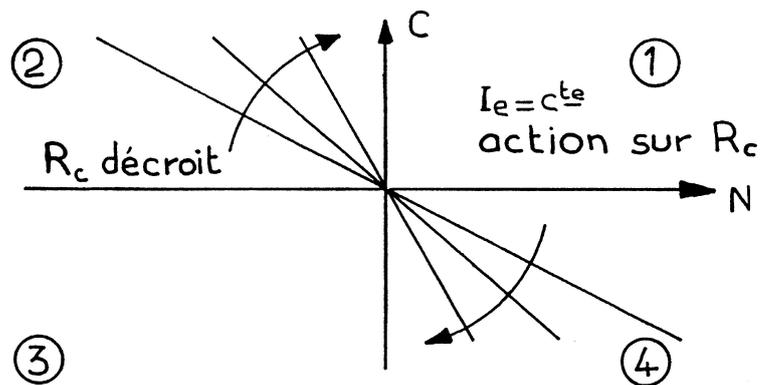


FIGURE 3.44 – Freinage rhéostatique d'un moteur à courant continu, action sur la résistance R_c .

3.5.2 Génératrice tachymétrique

On peut utiliser une dynamo pour mesurer la vitesse de rotation. La f.é.m. produite proportionnelle à la vitesse est ensuite introduite dans les chaînes d'asservissements.

Comme on recherche en général une grande précision, on utilise une machine spéciale comportant des aimants permanents comme inducteur, et qui ne doit débiter qu'un courant négligeable de telle sorte que la tension obtenue soit sensiblement égale à la f.é.m. . La construction en est particulièrement soignée pour que la f.é.m. soit exempte de bruits et de fluctuations.

3.5.3 Annexe : génératrices auto-excitées

Pour exciter une génératrice, il faut lui fournir un courant d'excitation I_e . On peut utiliser une source auxiliaire de courant continu (génératrice, ou moteur, à excitation séparée). la génératrice elle même peut fournir son propre courant d'excitation : la génératrice est dite « auto-excitée » et se trouve totalement autonome. Le courant d'excitation sera alors lié à la tension ou au courant délivré et les performances de la machine seront modifiées.

3.5.3.1 Génératrice à excitation dérivée

L'inducteur, en série avec un rhéostat d'excitation, est alimenté par la tension U , voir la figure 3.45. Si R_e est la résistance du circuit d'excitation :

$$U = R_e I_e$$

En appelant I' le courant débité :

$$U = E(N, I_e) - R(I' + I_e)$$

La dynamo étant entraînée à vitesse constante, on peut, connaissant la caractéristique à vide, résoudre graphiquement ce système d'équations et trouver la tension U en fonction de I' .

La chute de tension est importante : si I' augmente, U diminue à cause de la chute de tension dans R ; par suite I_e décroît ainsi que E ce qui renforce la diminution de U . On obtient par calcul, ou expérimentalement la courbe de la figure 3.46.

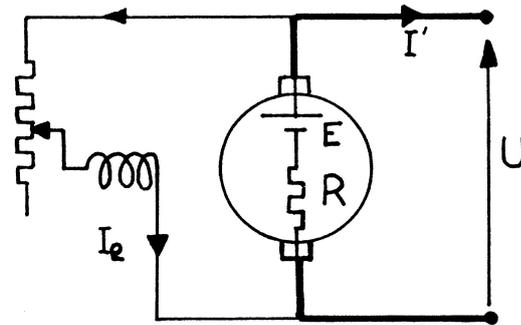


FIGURE 3.45 – Génératrice à excitation dérivée.

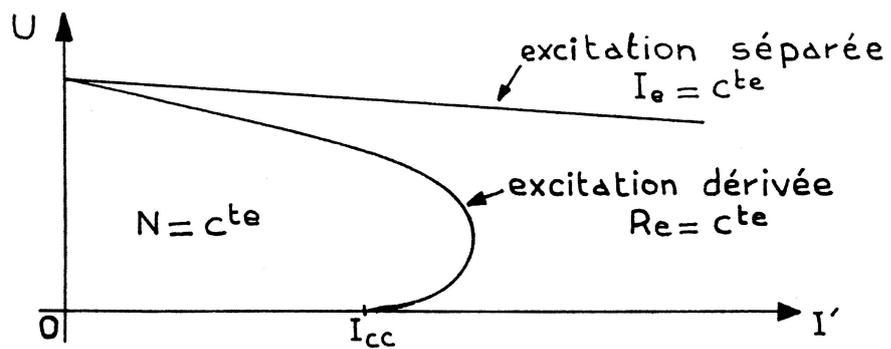


FIGURE 3.46 – Courbe tension/courant d'une génératrice à excitation dérivée.

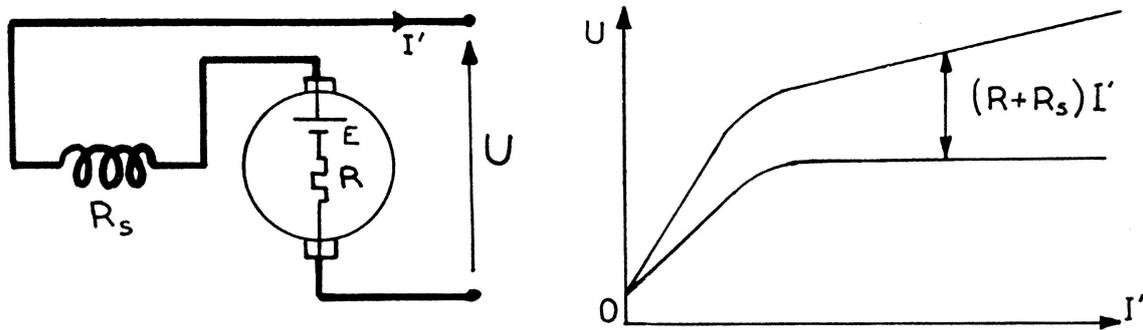


FIGURE 3.47 – Génératrice à excitation série.

En court-circuit, $U = 0$ ainsi que I_e ; la f.é.m. due au flux rémanent, engendre le courant de court-circuit. La caractéristique obtenue montre que ce générateur n'est pas « linéaire ».

3.5.3.2 Génératrice à excitation série

L'inducteur est parcouru par le courant débité I' , voir figure 3.47. Si R_s est sa résistance, on a :

$$U = E(N, I') - (R + R_s)I'$$

Ce montage est peu utilisé.

REMARQUE : On a longtemps construit des génératrices à excitation composée à deux ou trois enroulements permettant de produire des tensions ou des courants sensiblement constants; ces machines ne sont plus guère rencontrées. On préfère utiliser des régulations électroniques, soit associées à des redresseurs, soit éventuellement à des génératrices ordinaires.

3.5.3.3 Amorçage d'une génératrice auto-excitée

La dynamo fournissant elle-même son courant d'excitation, une tension ne peut apparaître que s'il subsiste un flux rémanent; sinon, pas de f.é.m. et pas de courant inducteur. Le flux rémanent engendre une f.é.m. rémanente qui fait circuler un petit courant inducteur. Suivant le sens de rotation de la dynamo et le sens des connexions de l'inducteur, deux cas sont possibles :

- le courant inducteur engendre un flux qui s'ajoute au flux rémanent : la

- f.é.m. croît, donc le courant inducteur et le flux croissent ; la tension s'établit (amorçage) ;
- le courant inducteur engendre un flux opposé au flux rémanent : la f.é.m. décroît et il ne peut y avoir amorçage. Il faut soit inverser les connexions de l'inducteur, soit changer le sens de rotation. Il faut enfin que la résistance du circuit inducteur ne soit pas trop élevée.

Chapitre 4

Machines synchrones

La machine synchrone est le plus souvent utilisée en générateur, on l'appelle alors *alternateur*. Les centrales de production d'énergie électrique sont équipées d'alternateurs triphasés. De l'alternateur de bicyclette délivrant seulement quelques watt à l'alternateur de centrale nucléaire fournissant 1,6 GW le principe de fonctionnement et les modélisations classiques sont relativement semblables.

Comme toutes les machines électriques tournantes, la machine synchrone est réversible et peut également fonctionner en moteur synchrone. Dans une première partie l'alternateur sera présenté de façon très simple. Les particularités du fonctionnement en moteur seront vues à la fin du chapitre.

4.1 Symboles

Les différents symboles utilisés pour représenter la machine synchrone, qu'elle fonctionne en moteur ou en génératrice (alternateur) sont donnés à la figure 4.1 page 140.

4.2 Construction - Principe

Quelque soit sa constitution et son nombre de pôles, une machine synchrone est constituée de deux circuits indépendants :

- **Le bobinage d'excitation** : il est constitué d'un bobinage enroulé sur le rotor et traversé par le courant continu « d'excitation » : I_e . C'est lui qui permet la création des pôles magnétiques dits « rotoriques » et l'instaura-

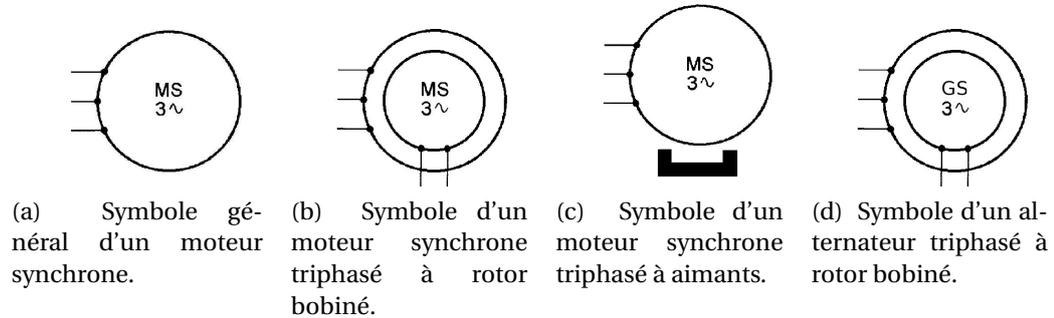


FIGURE 4.1 – Symboles de la machine synchrone.

tion d'un flux donné dans le circuit magnétique. Ce bobinage est parfois remplacé par des aimants permanents surtout dans le domaine des petites et moyennes puissances.

- **Le circuit d'induit** : il est constitué des trois bobinages triphasés, de constitution symétrique, pratiqué sur le stator de façon répartie, et par lesquels transite la puissance électrique de la machine.

Il est à noter que, si les enroulements statoriques sont fixes, celui de l'excitation est tournant.

4.2.1 Force électromotrice

Au chapitre 2 page 61 nous avons vu que l'on peut produire une tension sinusoïdale à l'aide d'un inducteur fixe et d'un induit mobile. Cette tension a pour valeur :

$$e = nN\phi \sin\theta_0 \cos\omega t$$

Cette tension est recueillie par des contacts glissants (bagues). Seul le déplacement relatif de l'induit par rapport à l'inducteur importe : on peut donc obtenir le même résultat en prenant un *induit fixe* et un *inducteur mobile*. la réalisation sera plus simple : seul le courant continu d'excitation de l'inducteur traversera des contacts glissants. L'induit pourra être plus complexe (induit triphasé) et parcouru par des courants plus élevés.

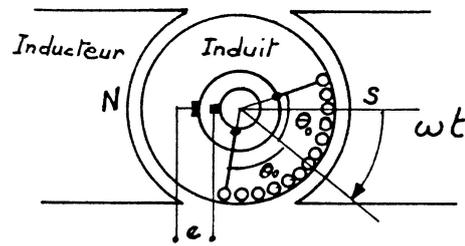


FIGURE 4.2 – Constitution d'une machine synchrone : induit tournant, inducteur fixe.

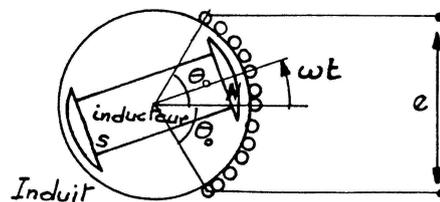


FIGURE 4.3 – Constitution d'une machine synchrone : induit fixe, inducteur tournant.

4.2.1.1 Exemple d'enroulement d'induit

On remarque que deux conducteurs de l'induit diamétralement opposés ont des forces électromotrices de même module, en opposition de phase. On réalisera donc un enroulement analogue à celui d'une dynamo à courant continu : la figure 4.4 montre un exemple pour 10 conducteurs.

On remarque que la f.é.m. est maximale quand les pôles sont perpendiculaires à l'axe de la bobine ainsi constituée.

NOTA : Le bobinage de l'inducteur ne présente aucune difficulté de principe : on dispose un certain nombre de spires autour des pôles du rotor. Cet inducteur sera alimenté en courant continu d'excitation par l'intermédiaire de deux bagues conductrices.

On peut utiliser un inducteur à pôles lisses (dont l'entrefer est constant) : les spires sont disposées dans des encoches comme le montre la figure 4.5, ou une machine à pôles saillants (dont l'entrefer est variables) comme le montre la figure 4.7.

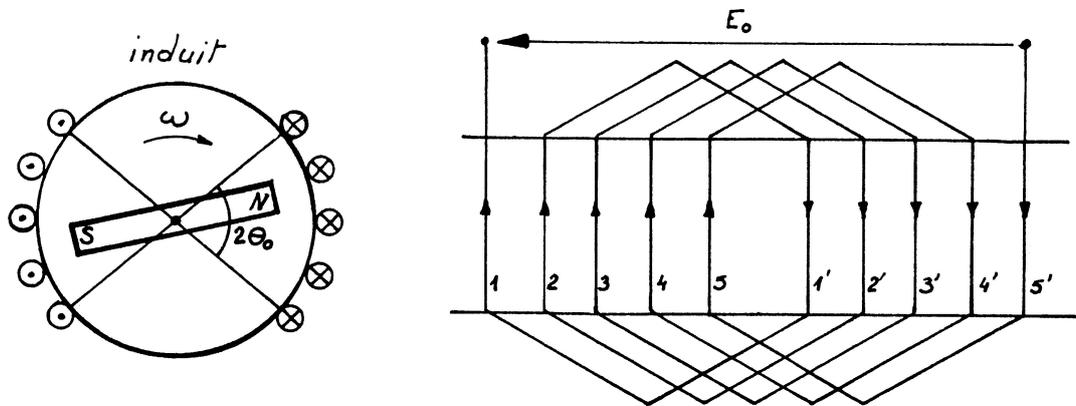


FIGURE 4.4 – Induit d'une machine synchrone à 10 conducteurs.

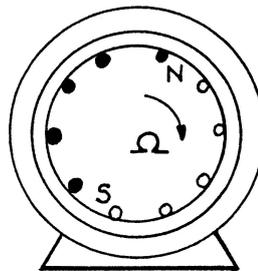


FIGURE 4.5 – Inducteur d'une machine synchrone à pôles lisses.

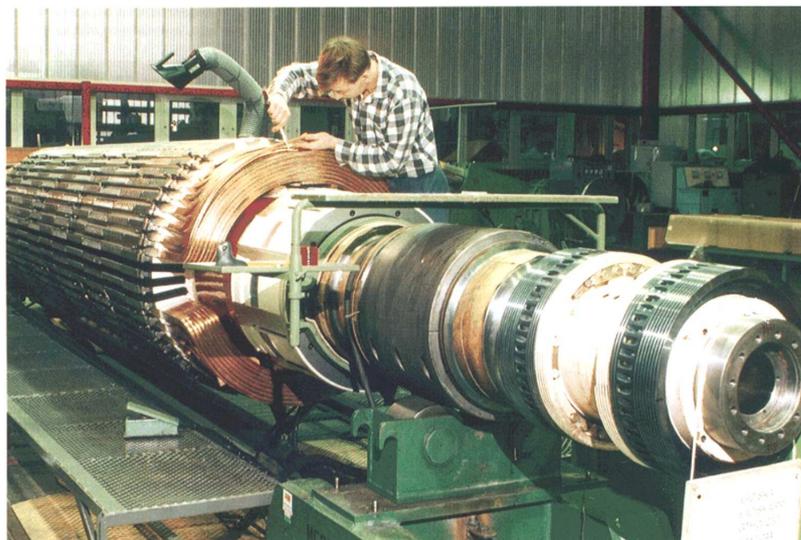


FIGURE 4.6 – rotor d'une machine synchrone à pôles lisses.

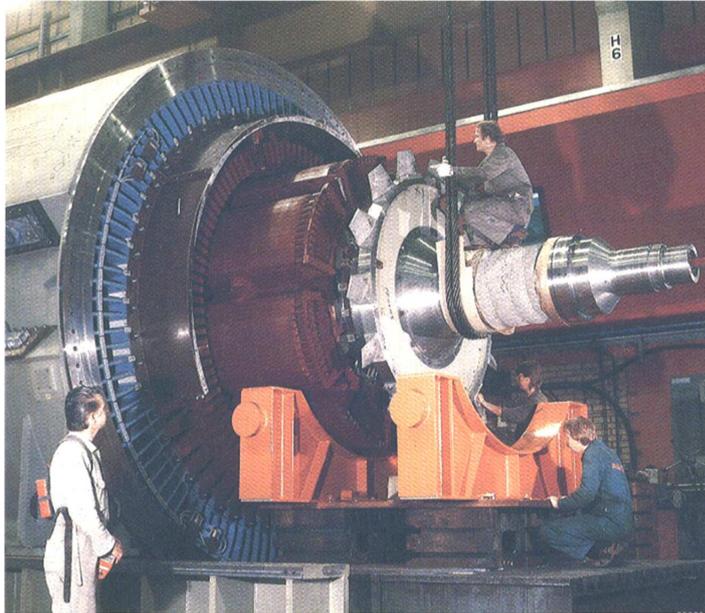


FIGURE 4.7 – rotor d'une machine synchrone à pôles saillants.

4.2.1.2 f.é.m.

Soit n_1 le nombre total de conducteurs mis en série (il est différent du nombre total n de conducteurs disposés sur l'induit) (dans l'exemple de la figure 4.4 $n_1 = 10$), on a :

$$n_1 = n \frac{4\theta_0}{2\pi} \text{ soit } n = \frac{\pi}{2\theta_0} n_1$$

La force électromotrice obtenue est d'autre part doublée par l'utilisation des conducteurs diamétralement opposés, soit finalement, en notant N_S la vitesse de rotation :

$$e = \frac{\pi n_1}{2\theta_0} \times 2 \times N_S \phi \sin \theta_0 \cos \omega t$$

$$e = \frac{\pi \sin \theta_0}{\theta_0} N_S n_1 \phi \cos \omega t$$

Cas général : alternateur à $2p$ pôles L'inducteur comporte $2p$ pôles, et l'induit comporte p fois le bobinage précédent : par exemple $p = 2$; $n_1 = 20$, voir la figure 4.8.

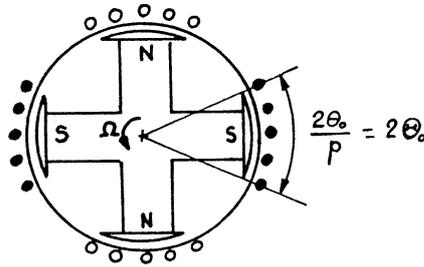


FIGURE 4.8 – Exemple de bobinage d'une machine synchrone à 2 paires de pôles et 20 conducteurs sur l'induit.

Cette machine est équivalente à une machine bipolaire pour laquelle : $\begin{cases} \omega = p\Omega_S \\ \theta = p\Theta \end{cases}$
 et comportant le même nombre n_1 de conducteurs. N_S devenant pN_S , la force électromotrice s'écrit donc :

$$e = \frac{\pi \sin \theta_0}{\theta_0} \times n_1 \times p \times N_S \times \phi \times \cos \omega t$$

avec $\theta_0 = p\Theta_0$

Sa valeur efficace E est telle que :

$$E = \left(\frac{\pi \sin \theta_0}{\sqrt{2}\theta_0} \right) \times n_1 \times p \times N_S \times \phi(I_e)$$

Le facteur entre parenthèses, appelé coefficient de Kapp, tient compte en particulier de la répartition des conducteurs à la périphérie du stator et donc des déphasages existant entre les f.é.m. qui y sont induites.

En introduisant un coefficient k lié à la construction, on aura finalement :

$$E = kN_S\phi(I_e)$$

avec : $e = E\sqrt{2}\cos \omega t$

$$\omega = p\Omega \text{ ou } f = pN_S$$

Cette dernière formule qui relie la fréquence, le nombre de pôles et la vitesse de rotation, est identique à la formule de Ferraris sur les inductions tournantes.

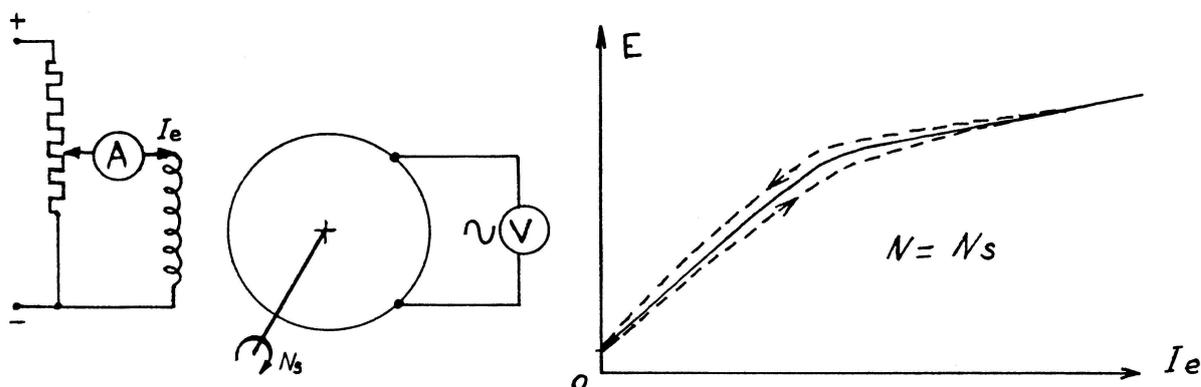


FIGURE 4.9 – Caractéristique à vide d'une machine synchrone.

4.2.1.3 Caractéristique à vide

La f.é.m. est proportionnelle à la vitesse de rotation et au flux magnétique. La fréquence étant en général imposée, on devra entraîner l'alternateur à vitesse constante N_s .

On relève expérimentalement la f.é.m. E en faisant varier le courant continu d'excitation I_e et on trace la caractéristique à vide, qui, à un facteur près, est la courbe d'aimantation du circuit magnétique comme le montre la figure 4.9.

4.2.1.4 Alternateur triphasé

Le coefficient de Kapp est maximal pour $\theta_0 = 0$ (et vaut 2,22) ; il décroît si θ_0 augmente et ne vaut plus que 1,41 pour $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$. Comme les conducteurs, tous en série, ont les mêmes pertes Joule il est donc peu rentable de disposer les conducteurs sur toute la périphérie de l'induit. On peut prendre : $2\theta_0 = \frac{2\pi}{6}$. Le facteur de Kapp vaut encore 2,12 et la bobine ainsi constituée n'occupe que le tiers de l'induit.

On peut alors disposer deux autres enroulements identiques, électriquement indépendants comme le montre la figure 4.10.

Ces enroulements présenteront des f.é.m. de même valeur E , de même pulsation ω , mais déphasées de $\frac{2\pi}{3}$ en raison de leur disposition dans le stator :

$$\begin{cases} e_1 = E\sqrt{2} \cos(\omega t) \\ e_2 = E\sqrt{2} \left(\cos \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ e_3 = E\sqrt{2} \left(\cos \omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{cases}$$

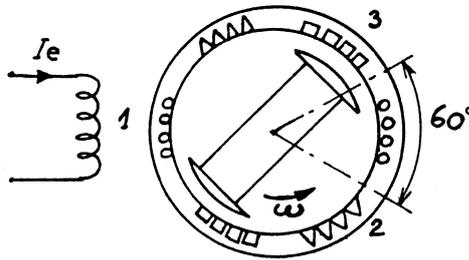


FIGURE 4.10 – Alternateur triphasé : répartition des trois enroulements de l'induit.

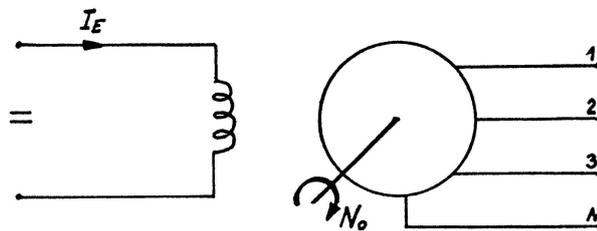


FIGURE 4.11 – Alternateur triphasé : schéma de principe.

On pourra ensuite coupler en étoile ou en triangle les trois enroulements. Tout le stator est utilisé. Dans la suite du cours, nous n'étudierons que des alternateurs triphasés en rapportant les grandeurs à une phase (en ramenant le montage en étoile si nécessaire par la transformation de Kennelly). Le schéma de principe d'un tel alternateur est donné à la figure 4.11.

4.2.1.5 Excitation de la machine synchrone

L'inducteur doit être alimenté en tension continue. on peut utiliser :

- Une génératrice à courant continu auto-excitée.
- Un petit alternateur dont on redresse la tension. On peut dans ce cas se passer de balais : l'alternateur d'excitation est à induit tournant ; sa tension, redressée par des diodes, excite l'inducteur tournant de l'alternateur principal comme le montre la figure 4.12. Le courant i_e est fourni par un régulateur électronique chargé de maintenir la tension de sortie constante, l'alternateur d'excitation sert en outre d'amplificateur de puissance.
- Des redresseurs, commandés ou non, utilisant une tension alternative. Dans le cas d'un fonctionnement en alternateur, on peut utiliser la tension alternative produite ; on obtient un montage auto-excité qui obéit

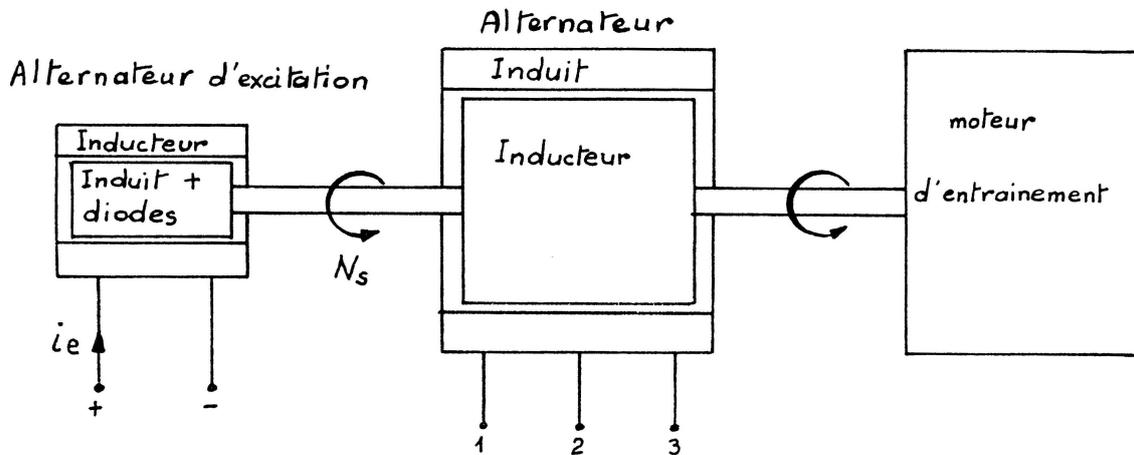


FIGURE 4.12 – Schéma de principe d'un alternateur triphasé sans bagues ni balais.

aux mêmes conditions d'amorçage que les génératrices à courant continu (présence de flux rémanent en particulier).

4.2.2 Fonctionnement en charge

Lorsque des courants triphasés équilibrés parcourent l'induit, ils engendrent (théorème de Ferraris) une induction tournante à p paires de pôles, dont la vitesse N_s est égale à celle du rotor.

On aura donc simultanément dans une machine synchrone deux inductions tournantes, à la vitesse N_s :

- l'induction B_R créée par l'inducteur tournant ;
- l'induction B_S engendrée par le stator.

Le décalage angulaire entre ces deux inductions dépend du déphasage entre la f.é.m. induite E et le courant d'induit I dans une phase.

Si E et I sont déphasés de Ψ , le décalage, en angle électrique, de B_R et B_S est $(\frac{\pi}{2} + \Psi)$.

En effet, nous avons vu que l'induction B_S était dans l'axe d'une bobine quand le courant y était maximum alors que la f.é.m. était maximale quand l'induction B_R était normale à l'axe (voir la figure 4.16).

Si la machine n'est pas saturée, on peut superposer les effets des deux inducteurs et l'étude est particulièrement simple : c'est la méthode de Behn-

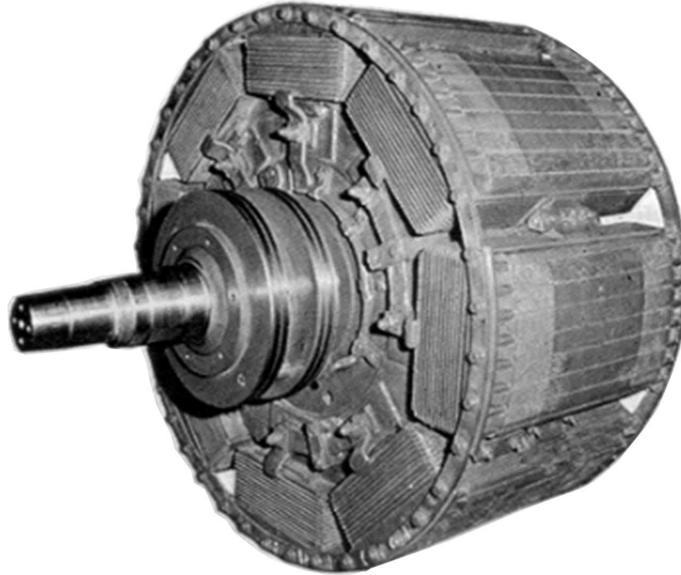


FIGURE 4.13 – rotor d'un moteur de locomotive BB 15055 de puissance 5,6 MW, on distingue les bagues permettant l'injection du courant continu.

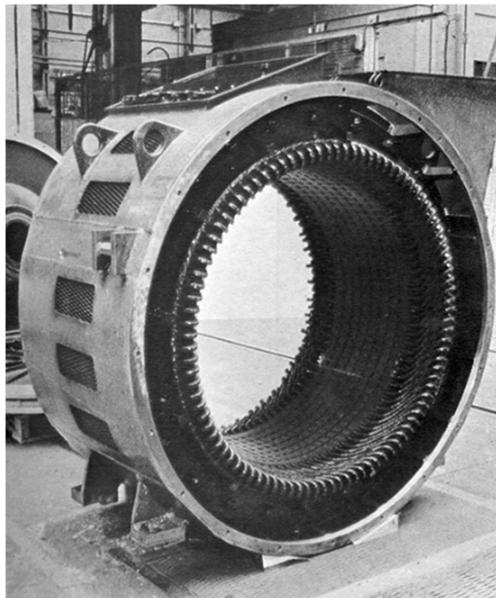


FIGURE 4.14 – stator d'un moteur de locomotive BB 15055 de puissance 5,6 MW.

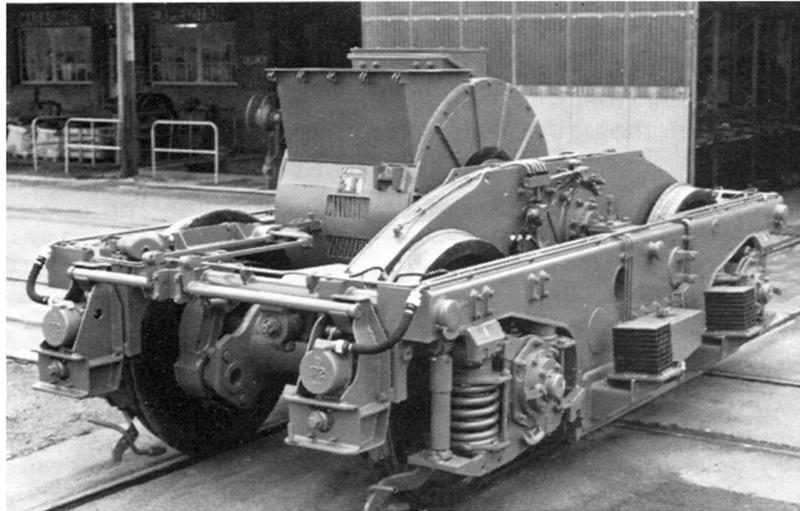


FIGURE 4.15 – moteur monté sur un bogie d'une locomotive BB 15055.

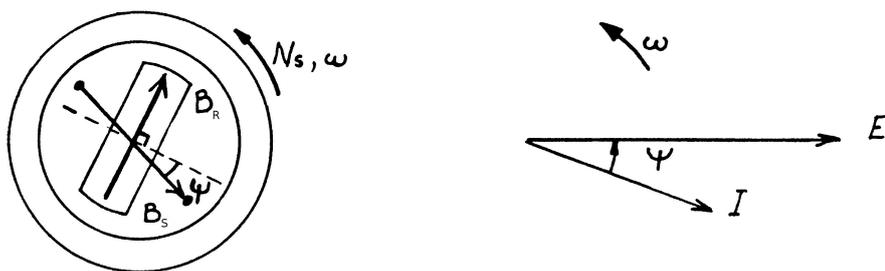


FIGURE 4.16 – Décalage des inductions statorique et rotorique.

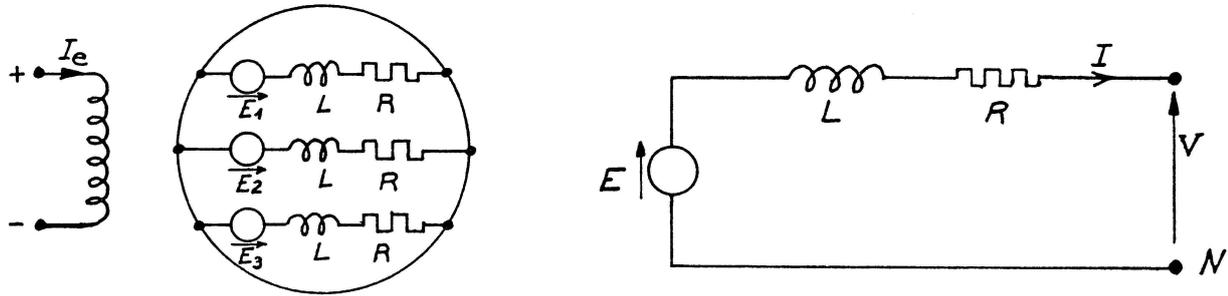


FIGURE 4.17 – Schéma équivalent de la machine synchrone.

Eschenburg¹ qui permet de définir le schéma équivalent et le couple.

4.2.2.1 Schéma équivalent

Comme nous l'avons vu au chapitre 2, la création de l'induction B_S correspond à l'existence d'une inductance synchrone L par phase de l'induit.

D'autre part, chaque enroulement présente une résistance R . Le schéma équivalent est donc celui de la figure 4.17.

On aura, par phase, en supposant un courant débité I , avec un déphasage $\varphi = (\vec{V}, \vec{I})$:

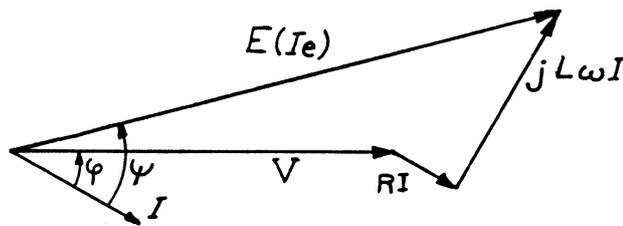


FIGURE 4.18 – Diagramme de Behn-Eschenburg de la machine synchrone.

$\underline{E}(I_e) = \underline{V} + R\underline{I} + jL\omega\underline{I}$: c'est l'équation de maille qui donne le diagramme de

1. Hans Behn-Eschenburg est né le 10 janvier 1864 à Obertrass (aujourd'hui Zurich), il meurt le 18 mai 1938 à Küsnacht. Il fait des études de mathématiques et de physique à Zurich et Berlin entre 1886 et 1890. Behn-Eschenburg travaille dès 1892 à la fabrique de machines Oerlikon, où il devient chef électricien (1897-1911), directeur (1911-1913), directeur technique général (1913-1928) et conseiller d'administration (1919-1938). Il se distingue dans la construction des moteurs monophasés à collecteur pour la traction. Il a donné son nom au diagramme à une réactance de la machine synchrone.

Behn-Eschenburg qui ressemble à celui de Kapp pour le transformateur. Mais ici, en raison de l'entrefer, nous aurons : $R \ll L\omega$.

Méthode de Potier Lorsque l'alternateur est saturé, on ne peut plus, en toute rigueur, utiliser la méthode précédente. Il faut composer les forces magnétomotrices tournantes dues à l'inducteur, au rotor, ξ_R , et à l'induit, au stator, ξ_S , déphasées, elles aussi, de $\frac{\pi}{2} + \Psi$.

On en déduit la force magnétomotrice résultante ξ_r qui, compte tenu de la caractéristique d'aimantation, conduit au flux et à la f.é.m. résultante E_r :

$$\underline{\xi_r} = \underline{\xi_R} + \underline{\xi_S}$$

En divisant cette expression par le nombre de spires de l'inducteur à courant continu, on fait apparaître :

- $I_e = \frac{\xi_R}{n}$ courant inducteur (continu) ;
- $I_{er} = \frac{\xi_r}{n}$ courant inducteur résultant de l'inducteur et de l'induit ;
- $\alpha I = \frac{\xi_S}{n}$ courant continu équivalent à l'induit.

$I_{er} = I_e + \alpha I$ avec α paramètre fixe.

La f.é.m. en charge E_r est donnée par la caractéristique à vide, pour la valeur I_{er} du courant d'excitation. L'induit présente en outre une inductance de fuites favorisée par l'entrefer, λ , constante.

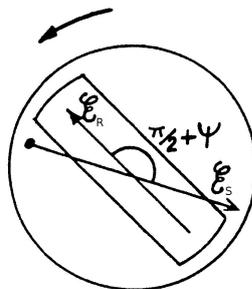


FIGURE 4.19 – Forces magnétomotrices pour l'établissement du diagramme de Potier de la machine synchrone.

Partant de V, I, φ , on construit E_r . On lit I_{er} sur la caractéristique à vide et on le porte avec 90° d'avance sur E_r (décalage des f.é.m. déjà étudié). On construit (αI) en phase avec I et on obtient I_e .

On peut compléter le diagramme en plaçant E , en retard de 90° sur I_e , ce qui fait apparaître l'angle Ψ .

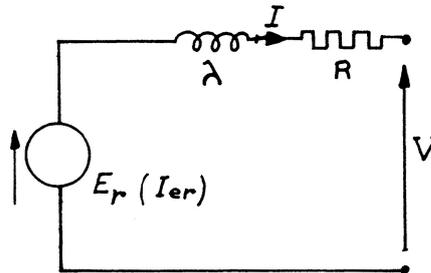


FIGURE 4.20 – Modèle de Potier de la machine synchrone.

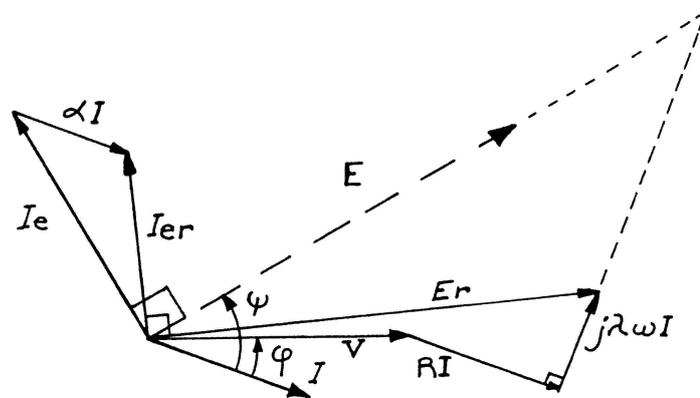


FIGURE 4.21 – Diagramme de Potier de la machine synchrone.

La méthode de Potier, plus rigoureuse quand les machines sont saturées, conduit à des calculs plus longs et plus difficiles à exploiter.

Dans le cadre de ce cours, nous en resterons à la méthode de Behn-Eschenburg. On notera que l'inductance de fuites λ est incluse dans l'inductance synchrone L .

4.2.2.2 Détermination des éléments du schéma équivalent

La f.é.m. $E(I_e)$ est connue par la caractéristique à vide. On mesure, en courant continu, la résistance R de chaque enroulement. On pourrait mesurer directement L ou $L\omega$ (mesure d'impédance) mais on préfère utiliser les méthodes suivantes :

Essai en court-circuit sous excitation réduite On mesure I_e et I_{cc} . On peut tracer la caractéristique $I_{cc}(I_e)$.

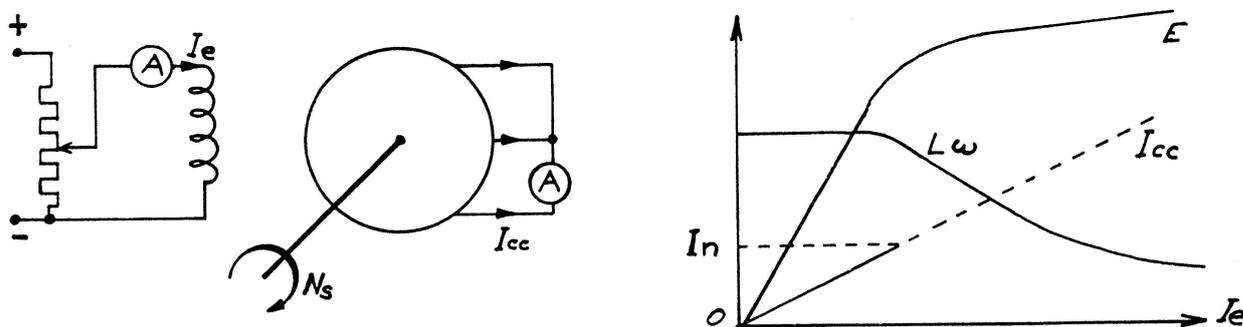


FIGURE 4.22 – Essai en court-circuit de la machine synchrone.

Le flux résultant étant très faible, la machine n'est pas saturée et la caractéristique en court-circuit est rectiligne. On obtient ainsi l'impédance interne d'une phase de l'alternateur :

$$|R + jL\omega| = \frac{E(I_e)}{I_{cc}(I_e)} \text{ puisque } V = 0; \underline{E} = (R + jL\omega) \underline{I}_{cc}$$

On en déduit $L\omega$. Par ce calcul, on voit que $L\omega$ est constant tant qu'il n'y a pas saturation (machine linéaire).

NOTA : On vient en fait d'appliquer le théorème de Thévenin à un générateur triphasé linéaire.

Essai sur inductance On fait débiter la machine sur des inductances pures. Le diagramme devient alors celui de la figure 4.24.

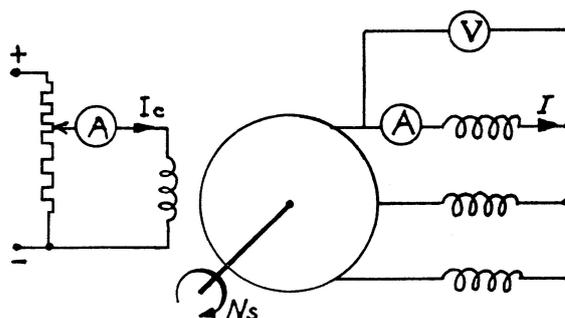


FIGURE 4.23 – Essai de la machine synchrone : débit sur des inductances pures.

Compte tenu des ordres de grandeur, on a : $L\omega I \simeq E - V$

On mesure donc $V(I_e)$ et par comparaison avec la courbe à vide, on a $(L\omega I)$ et $(L\omega)$. Cette méthode, plus coûteuse, car il faut des inductances importantes, donne de meilleurs résultats car $L\omega$ est mesuré dans des conditions de flux

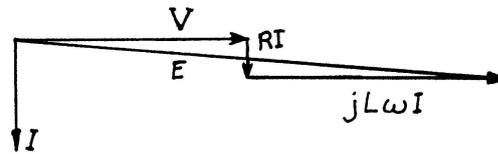


FIGURE 4.24 – Débit sur des inductances pures : diagramme de Kapp.

plus normales qu'en court-circuit. Cela revient, en fait, à tenir compte implicitement de la non linéarité en mesurant $L\omega$ au voisinage des conditions normales de fonctionnement (proches de la saturation). $L\omega$ est alors un paramètre, fonction de I_e , défini autour d'un point moyen, un peu comme les paramètres dynamiques en électronique (résistance d'une diode).

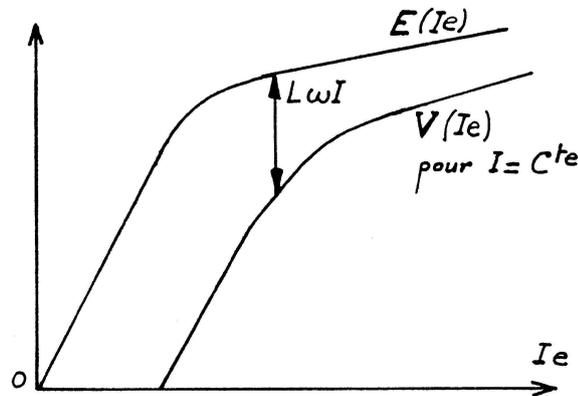


FIGURE 4.25 – Essai de la machine synchronisée : débit sur des inductances pures.

4.2.2.3 Couple électromagnétique

L'interaction entre B_R et B_S engendre un couple électromagnétique C_e . Il est facile de calculer son expression à partir du schéma équivalent.

Si la machine fournit les courants triphasés I , sous les tensions simples V , avec un déphasage φ , on aura :

$$\text{Puissance électrique fournie : } P = 3VI \cos \varphi.$$

$$\text{Pertes Joule dans l'induit : } P_J = 3RI^2.$$

La somme de ces deux puissances provient du moteur d'entraînement qui fournit en outre les pertes mécaniques p_m : $P_{\text{méca fournie}} = P + P_J + p_m$.

La puissance électromagnétique P_e , correspondant au couple électromagnétique C_e s'écrit :

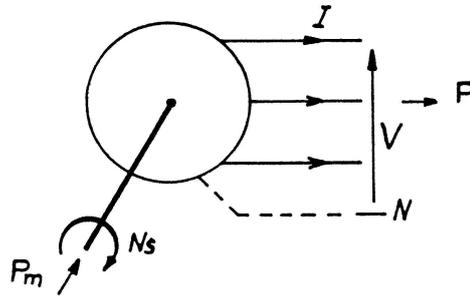


FIGURE 4.26 – Grandeurs servant au calcul du couple électromagnétique de la machine synchrone.

$$P_e = P + P_J = P_{\text{méca fournie}} - p_m = C_e \Omega_s$$

On obtient ainsi une expression précise du couple, mais peu utilisable pour un raisonnement général. Si on néglige les pertes (ce qui suppose un rendement égal à un), on aura :

$$P_e = C_e \Omega \simeq 3VI \cos \varphi$$

Dans cette hypothèse, le diagramme de Behn-Eschenburg se simplifie (RI est négligeable) comme on le voit sur la figure 4.27 :

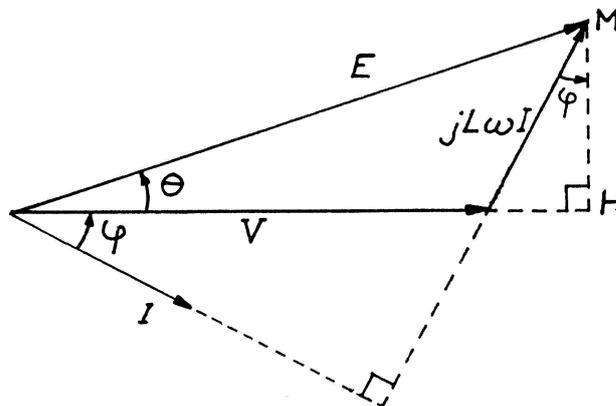


FIGURE 4.27 – Diagramme de Behn-Eschenburg simplifié pour le calcul du couple électromagnétique de la machine synchrone.

Or :

$$HM = L\omega I \cdot \cos \varphi = E \sin \theta$$

D'où :

$$P_e \simeq \frac{3V}{L\omega} \times \overline{HM}$$

et le couple peut s'écrire :

$$C_e = \frac{3V}{L\omega\Omega_s} \times \overline{HM}$$

Ou, enfin, compte tenu de $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$:

$$C_e = \frac{P_e}{\Omega_s} \simeq \left(\frac{3p}{L\omega^2} \right) VE \sin\theta$$

Compte tenu des conventions de signes utilisées, il s'agit ici d'un couple *résistant* (opposé à N_s) que le moteur d'entraînement doit vaincre. Si θ se trouve être négatif, C_e est alors négatif et donc moteur.

4.3 Alternateur autonome

La machine synchrone, entraînée à N_s par un moteur (thermique en général), alimente un récepteur triphasé de facteur de puissance $\cos\varphi$. Si on veut assurer une tension U imposée, pour un débit I et un déphasage φ , on construit le diagramme de Behn-Eschenburg qui donne la f.é.m. E nécessaire et par suite le courant d'excitation I_e .

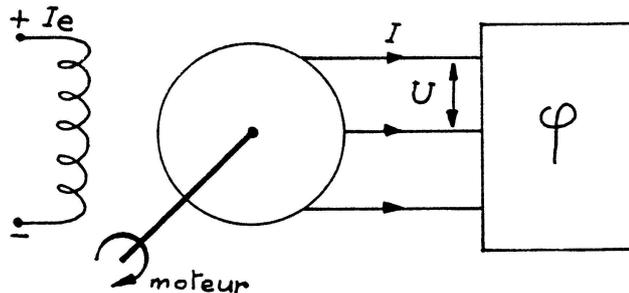


FIGURE 4.28 – Alternateur autonome.

Inversement, si I_e , donc E , est fixé, on peut calculer, par ce diagramme, la tension obtenue pour un débit I et un $\cos\varphi$ donnés :

$$\underline{E} = \underline{V} + R\underline{I} + jL\omega\underline{I}$$

On construit $R\underline{I}$ et $jL\omega\underline{I}$. On connaît φ et donc la direction de V : on connaît $|\underline{E}|$. On en déduit la solution graphique de la figure 4.29.

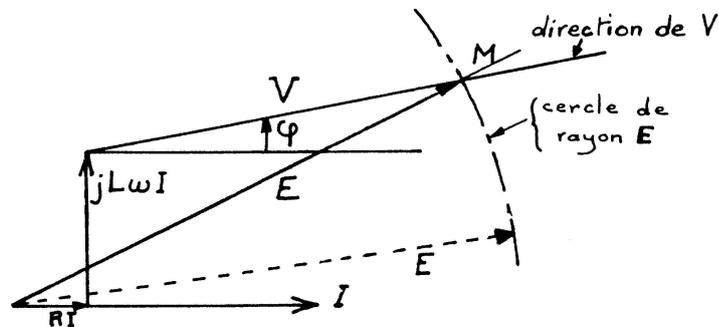


FIGURE 4.29 – Alternateur autonome : diagramme de Behn-Eschenburg pour le calcul de E .

Ces deux types d'études conduisent aux courbes suivantes :

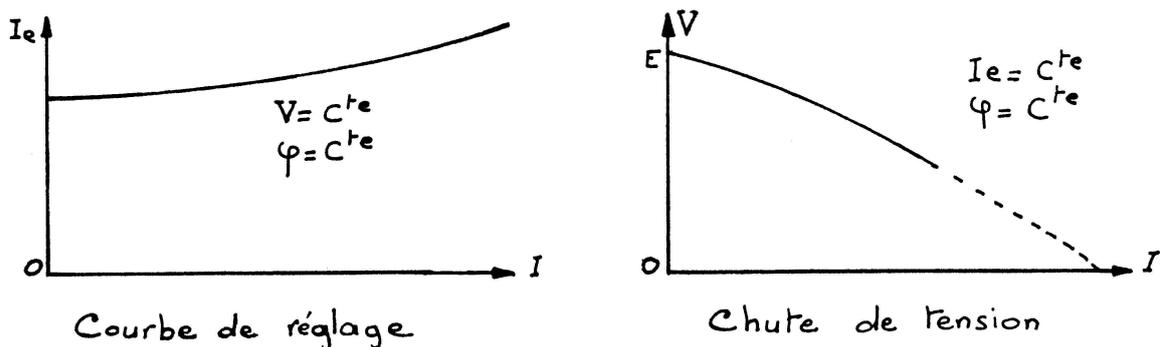


FIGURE 4.30 – Courbe de réglage et de la chute de tension de la machine synchrone en alternateur autonome.

4.3.1 Machine synchrone couplée au réseau

On couple une machine synchrone à un réseau triphasé afin, soit :

- de fournir une puissance supplémentaire à ce réseau : la machine synchrone se comporte alors en *alternateur* ;
- de produire de la puissance mécanique : la machine synchrone se comporte alors en *moteur synchrone*.

Ces fonctionnements sont parfaitement réversibles et nécessitent tous deux les mêmes opérations de *couplage*.

4.3.1.1 Couplage

On ne peut brancher directement le stator d'une machine synchrone sur un réseau : les courants seraient trop intenses (limités seulement par l'impédance interne $R + jL\omega$) et si la vitesse du rotor diffère de N_s , il ne pourrait y avoir de couple : les inductions B_R et B_S tournant à des vitesses différentes, le couple produit serait oscillatoire et de valeur moyenne nulle.

Pour réaliser un couplage optimal d'une machine synchrone, il faut :

- l'entraîner à une vitesse N proche de N_s par un moteur auxiliaire ;
- l'exciter pour produire des f.é.m. égales aux tensions du réseau ;
- coupler quand les f.é.m. et les tensions correspondantes du réseau sont en phase.

Il ne circule alors aucun courant dans l'induit. Le montage pratique est celui de la figure 4.31.

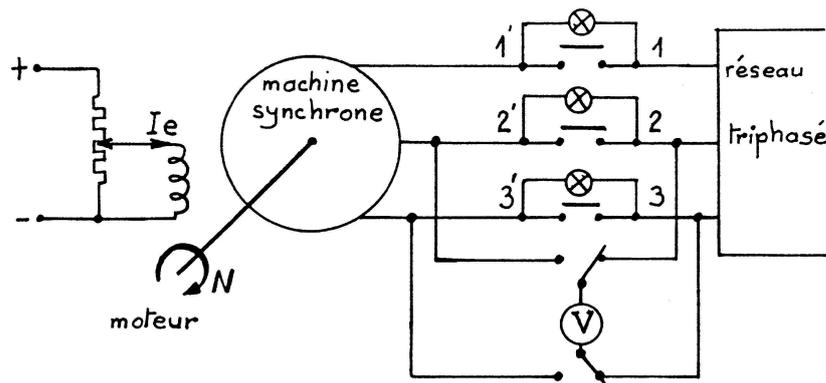


FIGURE 4.31 – Couplage d'une machine synchrone sur un réseau : montage pratique.

Pour vérifier :

- la vitesse : $N = N_s$;
- l'ordre de succession des phases (1, 2, 3 pour le réseau et 1', 2', 3' pour la machine synchrone) ;
- l'égalité des phases : $\arg \underline{E} = \arg \underline{V}$

On utilise des lampes de couplage qui sont placées en parallèle sur le disjoncteur de couplage. Ces lampes sont alimentées sous les tensions : $\underline{U}' = \underline{V} - \underline{E}$ comme le montre la figure 4.32.

En agissant sur I_e , on règle l'égalité $|E| = |V|$ à l'aide du voltmètre.

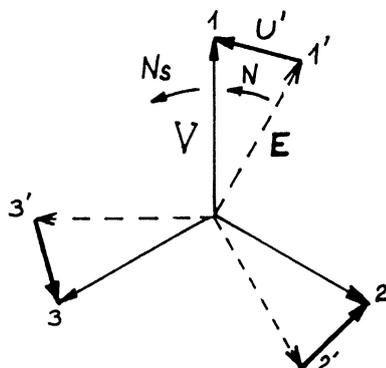


FIGURE 4.32 – Tensions du réseau et de la machine synchrone pendant le couplage.

Comme N est différent de N_s , les trois tensions U' varient à la fréquence $|N_s - N|$.

Si l'ordre des phases est correct les trois tensions U' varient simultanément et les trois lampes s'allument ou s'éteignent ensemble.

NOTA : Si l'ordre des phases est incorrect, on vérifiera que les lampes s'éteignent puis s'allument successivement : il faut alors intervertir deux phases.

On ajuste la vitesse N en agissant sur le régulateur du moteur d'entraînement (+ vite - vite) afin que l'éclat des lampes varie lentement et *on couple à l'extinction des lampes*. On a alors $\underline{E} = \underline{V}$.

NOTA : On peut utiliser un synchronoscope dont l'aiguille tourne à une vitesse égale à $|N_s - N|$ et passe par zéro quand \underline{V} et \underline{E} sont en phase.

4.3.1.2 Effet du couple appliqué à la machine synchrone

A l'issue du couplage, le courant est nul et si on néglige les pertes, le couple mécanique C_m fourni par le moteur d'entraînement est lui aussi négligeable. On a donc, pour une phase, le diagramme de la figure 4.33 où $\underline{V} = \underline{E}$.

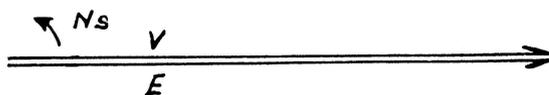


FIGURE 4.33 – Diagramme de Behn-Eschenburg de la machine synchrone juste après le couplage.

Si on augmente le couple C_m fourni par le moteur, le rotor accélère et les

f.é.m. se décalent en avance par rapport aux tensions V . Il apparaît alors des courants triphasés I tels que : $\underline{E} = \underline{V} + jL\omega I$ (en négligeant RI). Le diagramme est alors celui de la figure 4.34 et montre que la machine synchrone oppose alors un couple électromagnétique résistant C_e , proportionnel à $\sin\theta$. L'équilibre dynamique est atteint pour un angle θ tel que : $C_e = C_m$. θ devient fixe et on a alors : $N = N_s$. Le rotor tourne exactement à la vitesse du champ tournant. La puissance fournie par le moteur est transmise au réseau : la machine synchrone fonctionne en *alternateur*.

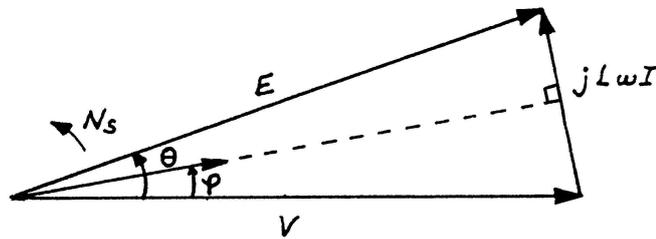


FIGURE 4.34 – Diagramme de Behn-Eschenburg de la machine synchrone : après le couplage et une augmentation du couple moteur.

Si le couple appliqué est négatif, c'est à dire si on remplace le moteur par une charge mécanique, le rotor ralentit et les f.é.m. se décalent en arrière. On obtient un fonctionnement symétrique : le couple de la machine synchrone change de signe, comme θ , et devient moteur. A l'équilibre on a : $C_e = C_m$ et $N = N_s$.

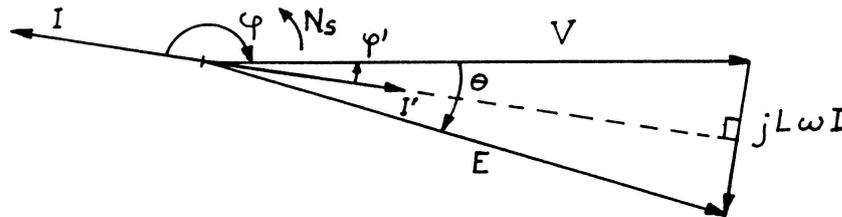


FIGURE 4.35 – Diagramme de Behn-Eschenburg de la machine synchrone en fonctionnement moteur.

La puissance reçue par la charge provient du réseau : la machine synchrone fonctionne en *moteur synchrone*.

Avec les conventions utilisées (I fourni), on voit que $\cos\phi$ est négatif (puissance « fournie » négative). Il sera plus commode de considérer les courants absorbés I' par le moteur synchrone :

$$\underline{I}' = -\underline{I}$$

et de parler de la puissance *absorbée* : $P = 3VI' \cos \varphi$.

Le fonctionnement alternateur ou moteur dépend uniquement du sens du couple mécanique appliqué. En régime établi, la vitesse de rotation est égale à celle des inductions tournantes : $N = N_S$.

Le couple électromagnétique tend à maintenir le rotor à la vitesse des champs tournants : on l'appelle *couple synchronisant*.

REMARQUES :

- Les couples applicables sont limités car θ est solution de :

$$C_m = C_e = \left(\frac{3p}{L\omega^2} \right) VE \sin \theta$$

Ici, V et E ont même module et il n'y aura de solution que si : $|C_m| < \left(\frac{3p}{L\omega^2} \right) V^2$. Si C_m sort de ces limites, le couple délivré par la machine synchrone ne peut plus retenir le rotor : il y a *décrochage* du rotor. Les courants deviennent très intenses et comme N et N_S sont devenus très différents, il n'y a plus qu'un couple électromagnétique alternatif, nul en moyenne. Cet incident brutal et dangereux doit donc être évité.

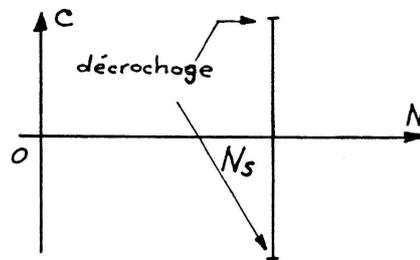


FIGURE 4.36 – Caractéristique mécanique de la machine synchrone, limites de décrochage.

- La vitesse du rotor est constante en régime établi, mais, lors de l'application d'un couple C_m , comme le rotor se *décale* d'un angle θ , sa vitesse instantanée doit fluctuer avant de reprendre la valeur N_S . On obtient en général une oscillation amortie de la vitesse :
- L'utilisation en moteur synchrone suppose l'emploi d'un moteur auxiliaire de petite puissance permettant le démarrage et le couplage à puissance nulle. Les dispositifs d'électronique de puissance permettent désormais de démarrer en alimentant le stator par des tensions de fréquence très faible.

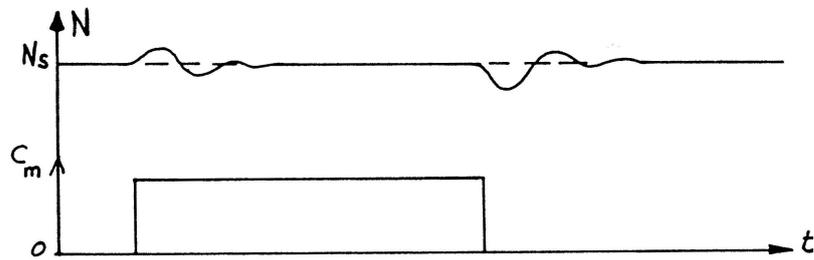


FIGURE 4.37 – Oscillation de vitesse lors de l'application brutale d'un couple résistant.

4.3.2 Diagramme de Blondel

4.3.2.1 Diagramme de Blondel

On suppose que le réseau est à tension V et fréquence constante. Pour étudier l'influence du couple et du courant d'excitation de la machine synchrone on utilise le diagramme de Behn-Eschenburg dans lequel le vecteur V est invariant. Pour simplifier l'étude, on négligera les pertes Joule : $RI \ll L\omega I$.

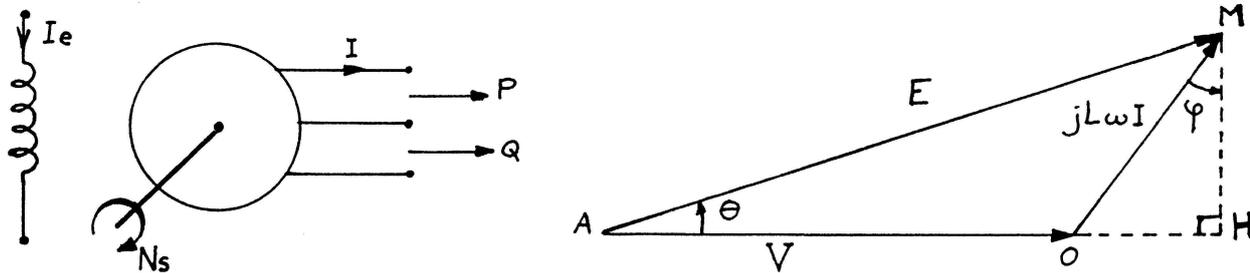


FIGURE 4.38 – Diagramme de Blondel de la machine synchrone.

Au paragraphe 4.2.2.3, nous avons vu que \overline{HM} est proportionnel à la puissance électrique fournie ($P \approx P_e$) et au couple électromagnétique C_e , si V est constant.

$$\text{On a de même : } \overline{OH} = L\omega I \cdot \sin\varphi = L\omega \cdot \frac{Q}{3V}.$$

\overline{OH} et \overline{HM} mesurent les puissances active et réactive fournie au réseau : on peut donc lire directement ces puissances en mesurant les projections de \overline{OM} sur deux axes orthogonaux gradués en puissances actives et réactives avec :

$$P = \frac{3V}{L\omega} \times \overline{HM} = C_e \Omega_S$$

$$Q = \frac{3V}{L\omega} \times \overline{OM}$$

On lit directement l'angle φ : $\varphi = (OP; OM)$. Enfin OM est proportionnel au courant I .

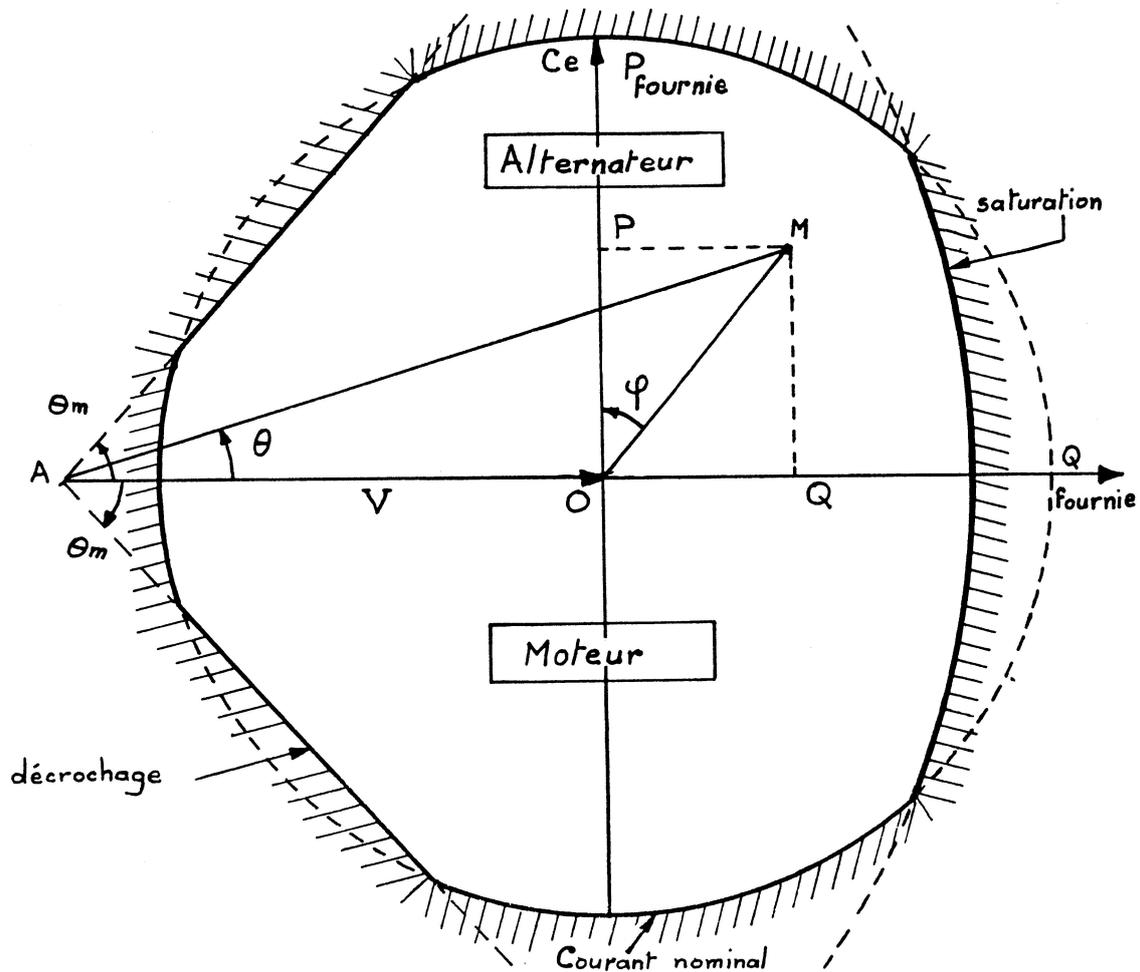


FIGURE 4.39 – Diagramme de Blondel de la machine synchrone, diverses limitations.

Si P est positive, le fonctionnement est alternateur, si P est négative, le fonctionnement est moteur.

On peut limiter ce diagramme à sa portion utile :

- la f.é.m. est limitée, par la saturation, à une valeur E_m : cercle centré en A et de rayon E_m ;
- le courant débité doit être inférieur ou égal à sa valeur nominale I_n : cercle centré en O et de rayon $L\omega I_n$;

- l'angle θ doit être inférieur à 90° . Pour conserver une marge de sécurité et éviter le décrochage, on fixe en général une limite inférieure : $|\theta| < \theta_m$.

REMARQUES :

- Dans ce diagramme, on suppose $L\omega$ constant ;
- si l'on tient compte de R , le diagramme de Blondel est plus compliqué mais obéit aux mêmes principes.

4.3.2.2 Utilisation du diagramme

Le diagramme comprend quatre quadrants. Lorsque le vecteur $jL\omega \vec{I}$ se situe au-dessus du vecteur \vec{V} , la machine fonctionne en alternateur comme le montre les figures 4.40 et 4.41. Lorsque le vecteur $jL\omega \vec{I}$ se situe en-dessous du vecteur $jL\omega \vec{I}$, la machine fonctionne en moteur comme le montre les figures 4.42, 4.43 et 4.44. La puissance change bien évidemment de signe lorsque la machine passe d'alternateur à moteur ou inversement, il en résulte que la projection du vecteur $jL\omega \vec{I}$ sur la verticale, donnant un segment de longueur proportionnel à la puissance active, change de signe elle aussi.

Selon la valeur de l'excitation, on peut avoir un alternateur qui fournit de la puissance réactive ou qui en absorbe ainsi qu'un moteur synchrone qui absorbe ou produit de la puissance réactive.

REMARQUE : La machine synchrone est la seule machine que l'on sache faire fonctionner en moteur à $\cos \varphi = 1$.

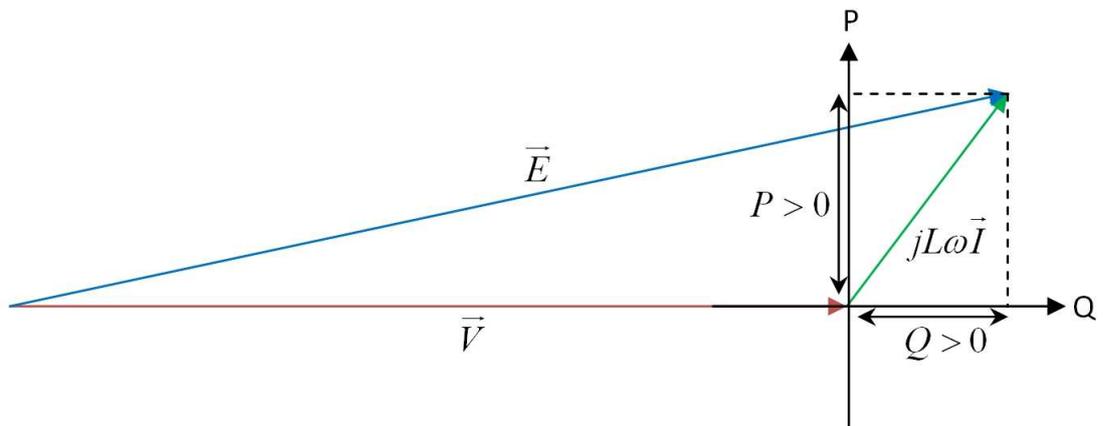


FIGURE 4.40 – Diagramme de Blondel de la machine synchrone fonctionnant en alternateur sur-excité fournissant à la fois de la puissance active et de la puissance réactive au réseau.

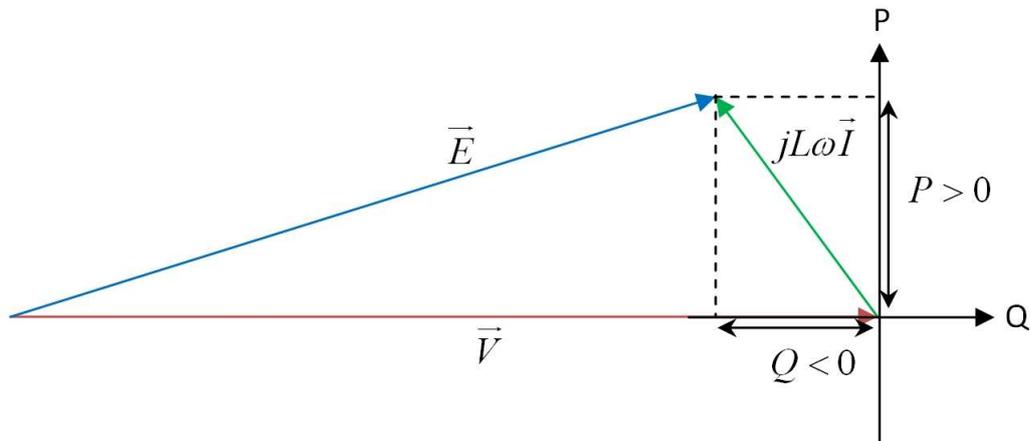


FIGURE 4.41 – Diagramme de Blondel de la machine synchrone fonctionnant en alternateur sous-excité fournissant la puissance active et de la puissance au réseau et absorbant de la puissance réactive sur ce même réseau.

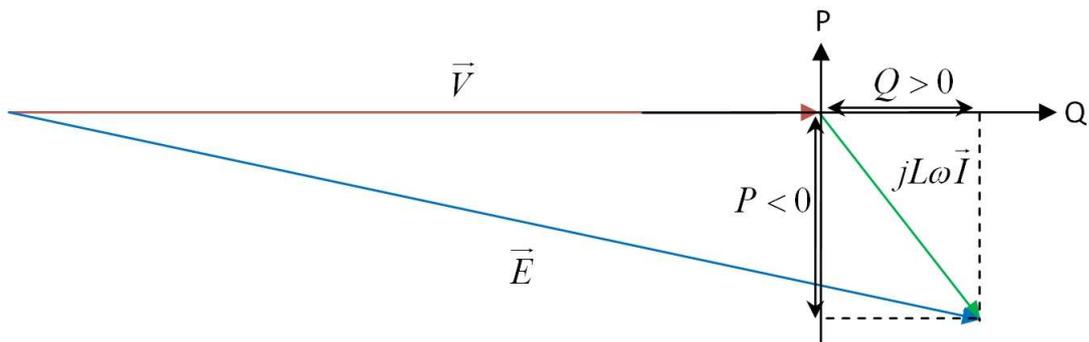


FIGURE 4.42 – Diagramme de Blondel de la machine synchrone fonctionnant en moteur sur-excité absorbant de la puissance active sur le réseau tout en lui fournissant de la puissance réactive.

Nous avons déjà vu l'influence du couple appliqué à la machine synchrone. Il reste à étudier l'influence de I_e .

Supposons que l'on applique, après le couplage, un couple mécanique moteur : la machine synchrone oppose, à l'équilibre, un couple C_e et fournit au réseau une puissance active P . Le point M vient en M_1 , d'ordonnée P .

Si on fait varier I_e , E varie. Si le couple appliqué reste constant, le point M se déplace sur la droite d'ordonnée P .

Si I_e augmente, E croît, le point se déplace vers la droite. On obtient par exemple M_2 : pour ce point, l'alternateur fournit de la puissance réactive au

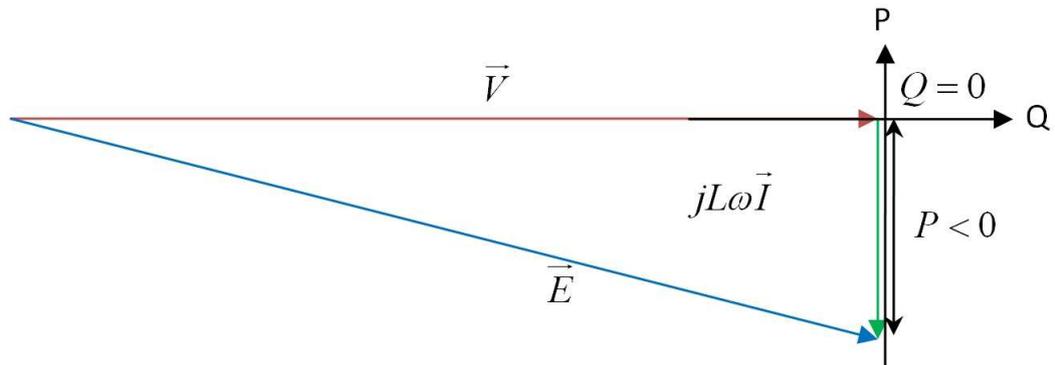


FIGURE 4.43 – Diagramme de Blondel de la machine synchrones à l'excitation « normale » fonctionnant en moteur n'absorbant que de la puissance active sur le réseau.

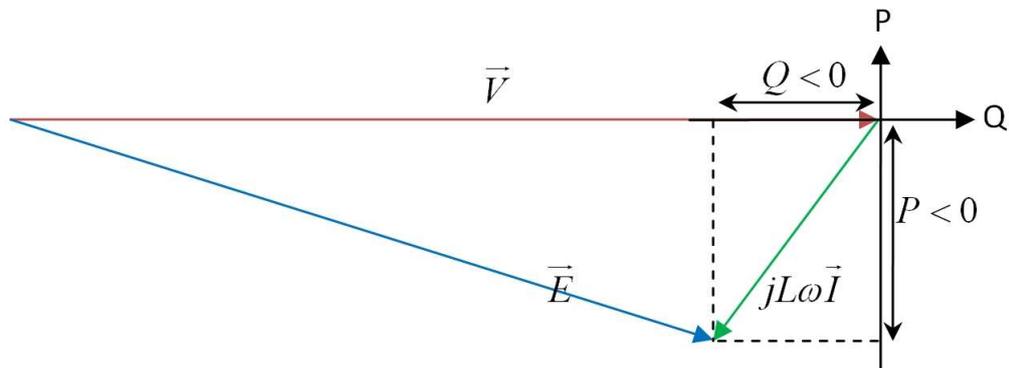


FIGURE 4.44 – Diagramme de Blondel de la machine synchrones fonctionnant en moteur sous-excité absorbant à la fois de la puissance active et de la puissance réactive sur le réseau.

réseau.

Si I_e diminue, le point vient par exemple en M_3 : l'alternateur fournit toujours P mais absorbe cette fois de la puissance réactive.

- le couple appliqué détermine la puissance active échangée ;
- le courant d'excitation détermine la puissance réactive échangée.

On voit aussi que le courant d'excitation permet de régler la valeur du déphasage φ .

Du diagramme précédent on déduit aussi le courant I fourni, proportionnel à OM . On voit que si I_e est faible (cas M_3), OM_3 et donc I est élevé.

Si I_e est élevé (cas M_2), le courant est à nouveau élevé. Le courant I passe

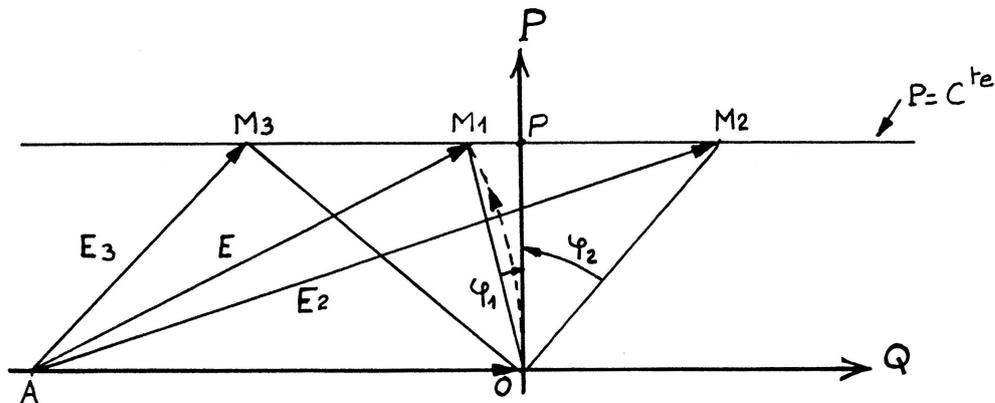


FIGURE 4.45 – Diagramme de Blondel : déplacement du point de fonctionnement sur une droite d'équipuissance.

par un minimum lorsque OM est porté par l'axe OP ($\varphi = 0$; $Q = 0$).

On peut représenter I en fonction de I_e à puissance P constante. on obtient un réseau de courbes en V , ce sont les courbes de Mordey de la figure 4.46. Ces courbes sont en particulier limitées par la saturation et par les risques de décrochage. Ces caractéristiques illustrent le comportement d'un alternateur couplé sur un réseau beaucoup plus puissant que lui et entraîné par un diesel ou une turbine à puissance constante. Le réseau lui impose la tension et la fréquence. Chaque valeur du débit de fluide, eau ou vapeur pour une turbine, ou du « cran de pétrole » pour un diesel correspond à une valeur de la puissance absorbée et donc de la puissance utile. Si, à débit ou cran de pétrole constant, on modifie l'intensité du courant d'excitation I_e , on ne change pas la puissance active qui ne dépend que de la turbine ou du diesel, mais on change la puissance réactive échangée entre l'alternateur et le réseau.

On peut relever directement ces courbes ou les prédéterminer en écrivant : $P_u = 3VI \cos \varphi = \text{cte}$.

Pour le moteur synchrone, on obtient le même réseau de courbes : **le moteur synchrone présente un facteur de puissance réglable** : sous-excité (I_e faible), il absorbe de la puissance réactive ; sur-excité, il fournit de la puissance réactive.

C'est la seule machine électrique dont le facteur de puissance est réglable lorsqu'elle fonctionne en récepteur.

REMARQUES : Dans le fonctionnement à puissance active nulle (couple mécanique nul), la machine synchrone ne peut qu'échanger de la puissance réactive avec le réseau : sous-excité, elle en absorbe et se comporte comme une inductance réglable ; sur-excité, elle en fournit et se comporte comme un

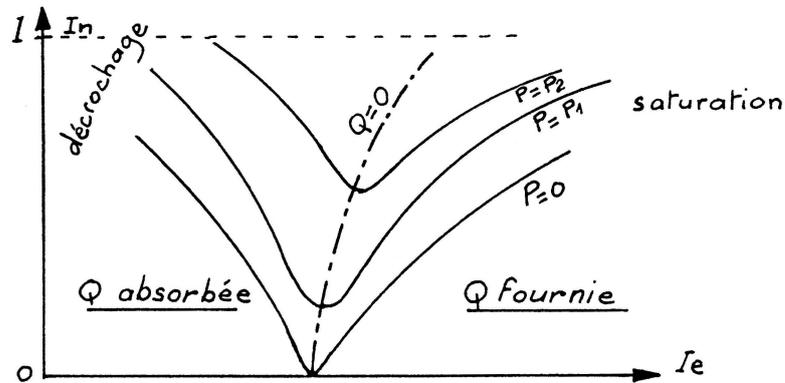


FIGURE 4.46 – Courbe de Mordey.

condensateur réglable. Dans ce cas elle peut servir à relever le facteur de puissance d'une installation (compensateur synchrone).

4.4 Couplage des alternateurs

A bord des navires, la centrale de production de l'énergie électrique est équipée de plusieurs alternateurs plutôt que d'un seul dont la puissance serait suffisante pour alimenter tout le bord. Ce choix permet :

- de limiter les effets provoqués par la panne d'un alternateur (un unique alternateur en panne priverait le navire de toute puissance électrique) et de réduire la puissance de la machine de secours à prévoir ;
- de répartir la puissance demandée par le bord entre plusieurs alternateurs fonctionnant au voisinage de leurs puissances nominales et donc au voisinage du rendement maximum ;
- de simplifier les problèmes de réalisation et d'exploitation des alternateurs.

La marche en parallèle de plusieurs alternateurs pose deux problèmes :

- la régulation de tension de chaque alternateur ;
- la régulation de fréquence de chaque machine et donc la régulation de vitesse de la machine qui entraîne l'alternateur.

Le premier problème est résolu par le fonctionnement *en parallèle*, chaque alternateur se voit imposer la tension du réseau sur lequel il est couplé. La régulation de la tension du réseau ainsi constitué devient un *problème d'ensemble*, il convient d'agir sur toutes les machines du réseau et non sur l'une d'entre elles seulement.

Il en est de même pour le problème de la régulation de fréquence : un alternateur couplé sur un réseau voit sa fréquence, et donc sa vitesse de rotation $\Omega_S = \frac{2\pi f}{p}$, imposé par le réseau à moins qu'il ne soit capable d'entraîner tous les autres alternateurs du réseau à la fréquence qu'il imposerait. La régulation de fréquence est à résoudre au niveau de l'ensemble des machines.

La mise en service d'un alternateur résout les problèmes suivant :

- couplage de l'alternateur sur le réseau ;
- répartition des puissances entre cette machine et le réseau (répartition des puissances actives et réactives entre deux alternateurs en parallèle) ;
- répartition optimale des puissances ;
- stabilité du fonctionnement de l'alternateur.

Le couplage en série n'est pas utilisé car il conduit à un fonctionnement instable. En effet le graphe vectoriel des f.é.m. (en prenant le courant commun à deux alternateurs comme origine des phases) serait celui de la figure 4.47. Si l'alternateur n°1 prenait de l'avance, l'angle ψ_1 deviendrait plus grand. La puissance électromagnétique $E_1 I \cos \psi_1$ de cet alternateur deviendrait plus petite et il opposerait au diesel ou à la turbine qui l'entraîne un couple résistant plus faible, cause d'un nouvel accroissement de vitesse. La marche en série est donc instable et par conséquent inutilisable Sauf le cas très rare de deux alternateurs mécaniquement accouplés (les angles ψ_1 et ψ_2 sont alors liés entre eux). Le couplage série servirait à obtenir des tensions élevées mais c'est ce que permet le transformateur statique.

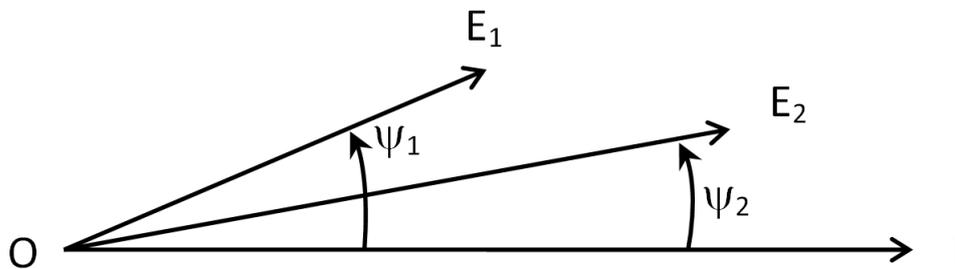


FIGURE 4.47 – Couplage en série de deux alternateurs.

4.4.1 Condition préalable au couplage

Employons une analogie mécanique pour bien comprendre la nécessité du couplage : l'embrayage à *crabots* (voir figure 4.48), très employé dans les boîtes de vitesse. Pour que la liaison mécanique s'établisse, les cannelures mâles doivent s'enfoncer dans les cannelures femelles. Pour ce faire, la différence de vitesse

entre les deux disques portant les cannelures doit être très faible sinon chaque partie comportant des cannelures – qu’elles soient mâles ou femelles – a l’impression d’avoir en face d’elle un disque plein uniforme et l’embrayage est impossible. Même si la différence de vitesse est suffisamment faible, l’embrayage ne sera possible que si chaque partie est *en phase* avec l’autre, c’est à dire si les cannelures mâles sont bien en face des femelles. On comprend bien que si les cannelures mâles (respectivement femelles) d’un disque sont en face des cannelures mâles (respectivement femelles) de l’autre disque, l’embrayage sera, là aussi, impossible.

Cet exemple mécanique montre la nécessité :

- d’avoir les deux axes à des vitesses très proches ;
- d’avoir un déphasage quasi nul

On peut assimiler le champ statorique et le champ rotorique aux deux disques portant des cannelures d’un embrayage à crabots. Pour que ces deux champs se couplent, il est nécessaire que leur vitesse relative soit faible et qu’ils soient à peu près en phase.

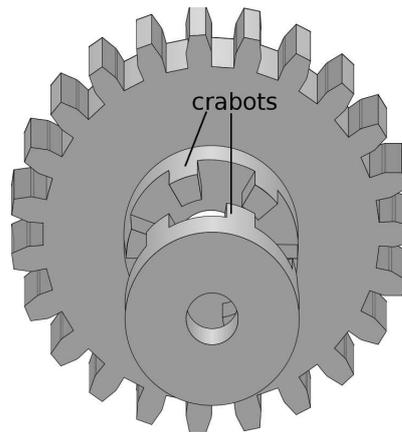


FIGURE 4.48 – Embrayage à crabots.

Soit un générateur G débitant dans un réseau extérieur quelconque. Soit U la tension entre les bornes de couplage. Désignons par E , la f. é. m. du générateur G , par Z son impédance interne. Suivant que cette f. é. m. E sera supérieure ou inférieure à U au moment où nous fermerons l’interrupteur de couplage, la machine G , fonctionnera comme génératrice ou réceptrice et sera parcourue par un courant I donné par la relation :

$$\underline{E} = \underline{U} + \underline{ZI} \Rightarrow \underline{I} = \frac{\underline{E} - \underline{U}}{\underline{Z}} \text{générateur}$$

$$\underline{E} = \underline{U} - \underline{Z}I \Rightarrow \underline{I} = \frac{\underline{U} - \underline{E}}{\underline{Z}} \text{moteur}$$

Comme l'impédance Z du générateur G , est généralement très petite, le courant I peut prendre, pour une différence assez faible entre E et U , une valeur assez importante et cela brusquement au moment où l'on ferme le disjoncteur de couplage.

Ce courant détermine un brusque couple résistant ($E > U$) ou un brusque couple moteur ($E < U$). Dans les deux cas, le groupe subit un à coup préjudiciable à sa bonne tenue mécanique. C'est pourquoi, lorsqu'on couple un générateur sur des bornes AB (en parallèle avec d'autres), on donne préalablement à sa f.é.m. E (tension entre bornes à vide) une valeur égale à la tension U entre A et B .

En courant alternatif, les tensions et f.é.m. sont périodiques. Les conditions ci-dessus doivent être réalisées à tout instant de leurs périodes ; autrement dit la courbe de la f.é.m. $e(t)$ de l'alternateur à coupler doit se superposer à la courbe de la tension $u(t)$ entre les barres desquelles sont déjà connectés les autres alternateurs. Or, pour que deux sinusoïdes se superposent, il faut :

- Un même ordre de succession des phases ;
- l'égalité de leurs valeurs maximales, donc de leurs valeurs efficaces ;
- l'égalité de leurs fréquences ;
- l'égalité des phases (un déphasage nul entre elles).

Le dispositif de la figure 4.49 permet de vérifier que ces conditions sont remplies. Le même ordre de succession des phases se traduit par des « feux battants », l'égalité des fréquences et des phases par l'extinction permanente des lampes. Il est toutefois préférable de vérifier l'égalité des tensions à l'aide du voltmètre situé sur le tableau de couplage. En pratique, on réglera la fréquence de l'alternateur à coupler à une valeur légèrement supérieure à celle du réseau. Les lampes clignoteront lentement, passant toutes ensemble par des phases de luminosité maximum (opposition de phase) et d'extinction. Si une phase d'extinction dure environ 3 secondes, les fréquences seront suffisamment proches pour que l'on puisse envisager de coupler. On estimera le milieu d'une phase d'extinction (déphasage nul) et on donnera l'ordre de couplage à cet instant.

On peut améliorer la précision du couplage en utilisant le dispositif (b) de la figure 4.50 où les feux sont dits « tournants ». Le couplage sera commandé à l'extinction de L_1 et à l'égalité de luminosité de L_2 et L_3 . Cela peut s'apprécier plus finement que le milieu de la phase d'extinction des lampes connectées à feux battants.

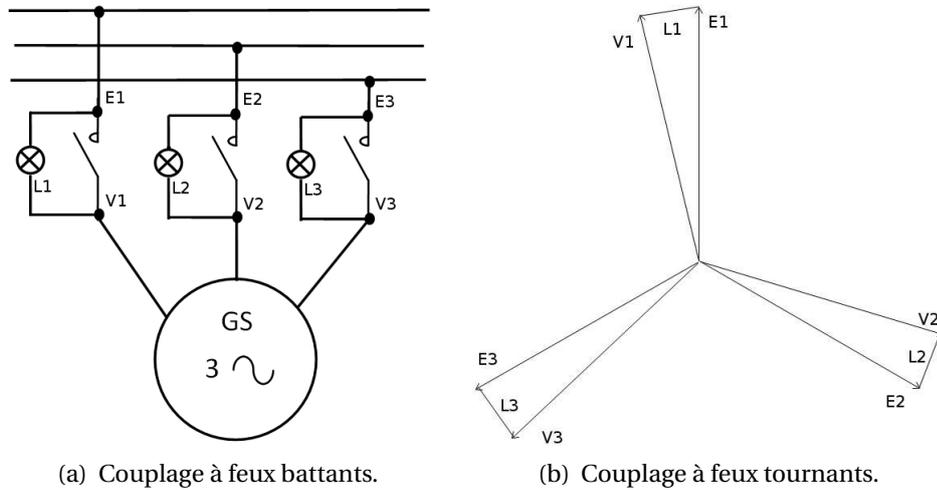


FIGURE 4.49 – Dispositifs de détermination du déphasage à feux battants.

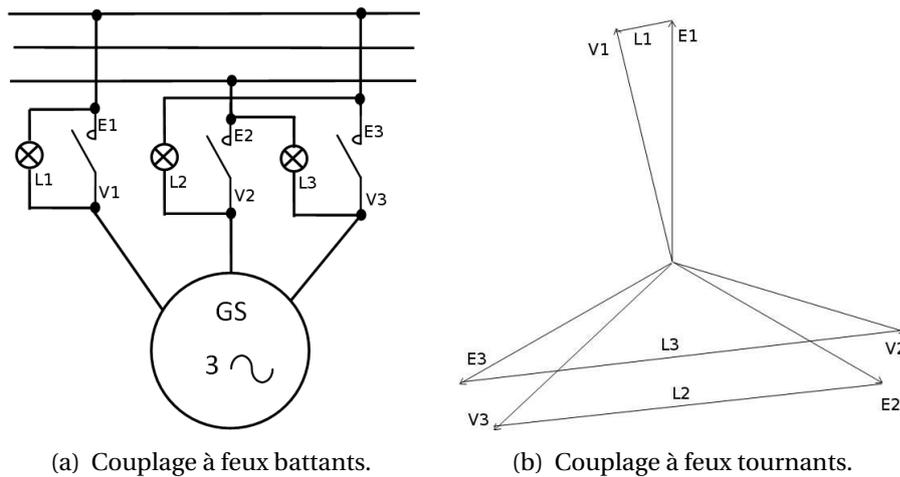


FIGURE 4.50 – Dispositifs de détermination du déphasage à feux tournants.

Pour une précision accrue, il est conseillé d'utiliser un synchronoscope lorsque celui-ci est présent sur le tableau de couplage. Il s'agit d'un petit moteur asynchrone monophasé alimenté par une phase du réseau et par la phase homologue de l'alternateur à coupler. Le moteur est à phase auxiliaire diphasé comme le montre la figure 4.51, il est à l'arrêt lors de l'égalité des fréquences et il indique le signe de l'écart de fréquence par son sens de rotation (alternateur à coupler de fréquence supérieure à celle du réseau si la rotation a lieu dans le sens des aiguilles d'une montre). Plus l'aiguille du synchronoscope tourne vite, plus l'écart de fréquence est important. En pratique, il faut que l'aiguille du syn-

chronoscope tourne suffisamment lentement (un tour en 4 ou 5 secondes minimum), on donne l'ordre de fermeture du disjoncteur de couplage vers « midi moins cinq ou moins dix » selon la taille du disjoncteur de couplage et donc selon le temps mis par les pôles à se fermer.

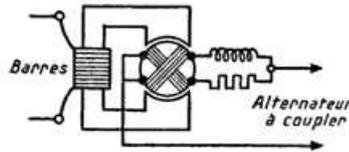


FIGURE 4.51 – Principe d'un synchronoscope.

4.4.2 Répartition des puissances entre deux alternateurs

On a déjà envisagé (4.3.2.2) le cas d'un alternateur couplé sur un réseau et nous en avons tiré les conclusions suivantes :

- la puissance active fournie au réseau par l'alternateur ne dépend que de la machine d'entraînement (turbine ou diesel) puisque la vitesse de rotation est imposée par la fréquence du réseau ;
- la puissance réactive fournie au réseau est aussi fonction du courant d'excitation I_e .

On peut en déduire les manœuvres à effectuer pour répartir les puissances actives et réactives entre deux ou plusieurs alternateurs :

- on répartie la puissance active demandée par le réseau (en laissant inchangé le courant d'excitation des alternateurs) en agissant sur l'admission du fluide dans les turbines ou en agissant sur le cran de pétrole des diesels qui entraînent les alternateurs ;
- on répartie la puissance réactive demandée par le réseau en modifiant les courants d'excitations I_e .

On peut visualiser ces opérations en adoptant des diagrammes de Behn-Eschenburg simplifiés (on néglige R devant la réactance synchrone $L\omega$).

On part d'un alternateur fournissant P_t et Q_t comme le montre la figure 4.52. Ensuite, juste après la fermeture des pôles du disjoncteur de couplage de l'alternateur n°2, le diagramme de Behn-Eschenburg devient celui de la figure 4.53.

On commande, par l'intermédiaire du « plus vite », le cran de pétrole du diesel ou le débit dans la turbine de l'alternateur n°2 jusqu'à ce que cet alternateur fournisse la même puissance que l'alternateur n°1. Simultanément, on agit sur

le « moins vite » de l'alternateur n°1 pour qu'il fournisse moins de puissance. Sans cela, la fréquence du réseau augmenterait. Les extrémités des vecteurs E_1 et E_2 décrivent des arcs de cercle, l'extrémité de E_1 descend, celle de E_2 monte, comme le montre la figure 4.54. On surveille les wattmètres des alternateurs sur le tableau de couplage afin de s'assurer que les puissances débitées par les deux alternateurs deviennent identiques, égales à la moitié de celle que demande le réseau.

Ensuite, on surexcite l'alternateur n°2 pendant que l'on désexcite le n°1. L'alternateur n°2 va fournir de la puissance réactive pendant que le n°1 en fournit moins. On surveille des varmètres ou, à défaut, les ampèremètres des alternateurs, afin de s'assurer de l'égalité des puissances réactives débitées par chacun des deux alternateurs (égalité des intensités affichées par les ampèremètres). Pendant cette opération, les extrémités des vecteurs E_1 et E_2 se déplacent sur des droites horizontales d'équipuissance ($P_t/2$) comme le montre la figure 4.55.

4.4.3 Conséquences des fautes de couplage

Les limites admissibles des écarts de tension, de fréquence, de déphasage sont :

- tensions : $\pm 5\%$;
- fréquences : de 0,1 à 0,5 Hz, et avant le couplage on choisit $f_{\text{alternateur}} > f_{\text{réseau}}$;
- phase : 5° max.

En dehors de ces limites, trois fautes peuvent être commises lors du couplage d'un alternateur sur des barres :

Inégalité des tensions : si les vecteurs U , représentant la tension entre les barres, et E sont en phase mais inégaux, le courant dans l'alternateur A (courant représenté par la différence de ces deux vecteurs) sera entièrement réactif. Ce courant ne produira aucun couple sur l'alternateur au moment du couplage, mais s'il est excessif, il pourra déterminer dans les enroulements de dangereuses forces électrodynamiques.

Différence de phases : (entre la f.é.m. de l'alternateur et la tension U entre barres), elle donne lieu entre l'alternateur et les barres à un courant qui est surtout actif et qui correspond à un couple moteur ou résistant suivant que E est déphasé en arrière ou en avant de U . Si ce couple, qui se produit brusquement à la fermeture de l'interrupteur de couplage, est important (grand déphasage entre E et U), il peut déterminer une détérioration de

l'accouplement entre le moteur et l'alternateur ou, plus grave, une rupture d'arbre.

Différence des fréquences : dans ce cas la roue polaire parcourt un certain angle jusqu'à ce que sa vitesse soit exactement égale à la vitesse de synchronisme. Si l'alternateur tourne trop vite avant le couplage, il prendra rapidement de la charge, ce qui pourra provoquer, par décalage en arrière des roués polaires des autres alternateurs, la marche en moteur de certains d'entre eux et par conséquent le fonctionnement intempestif de relais à retour d'énergie. Par ailleurs, si la roue polaire s'avance d'un angle excessif, l'alternateur risque de se décrocher. Signalons enfin que les conséquences d'un mauvais couplage par différence de phases ou de fréquences sont aggravées par les oscillations pendulaires auxquelles ces fautes donnent lieu.

4.4.4 Répartition optimale des puissances

L'ensemble des deux alternateurs identiques en parallèle présente des pertes Joule *minimales* lorsque les puissances active et réactive des deux alternateurs sont égales.

Désignons par :

- I_1, I_2, I , les courants des alternateurs et celui du réseau ;
- I_{r1}, I_{r2}, I_r , les composantes réactives de ces courants ;
- I_{a1}, I_{a2}, I_a , les composantes actives de ces courants.

Les pertes Joule dans l'ensemble des deux alternateurs supposés identiques de résistance statorique R s'exprime par :

$$P_J = 3R(I_1^2 + I_2^2) = 3R(I_{a1}^2 + I_{r1}^2 + I_{a2}^2 + I_{r2}^2) = 3R[(I_{a1} + I_{a2})^2 - 2I_{a1}I_{a2} + (I_{r1} + I_{r2})^2 - 2I_{r1}I_{r2}]$$

Comme le courant du réseau alimenté est supposé sans changement :

$$I_{a1} + I_{a2} = I_a = \text{cte} \quad \text{et} \quad I_{r1} + I_{r2} = I_r = \text{cte}$$

Le minimum de P_J correspondra aux égalités : $I_{a1} = I_{a2}$ et $I_{r1} = I_{r2}$, en effet :

$$dP_J = \frac{\partial P_J}{\partial I_{a1}} + \frac{\partial P_J}{\partial I_{a2}} + \frac{\partial P_J}{\partial I_{r1}} + \frac{\partial P_J}{\partial I_{r2}}$$

Or :

$$\frac{\partial P_J}{\partial I_{a1}} = 2I_{a1} - 2I_{a2}$$

$$\frac{\partial P_J}{\partial I_{a2}} = 2I_{a2} - 2I_{a1}$$

$$\frac{\partial P_J}{\partial I_{r1}} = 2I_{r1} - 2I_{r2}$$

$$\frac{\partial P_J}{\partial I_{r2}} = 2I_{r2} - 2I_{r1}$$

Si P_J est minimum, alors $dP_J = 0 \Rightarrow \frac{\partial P_J}{\partial I_{a1}} = \frac{\partial P_J}{\partial I_{a2}} = \frac{\partial P_J}{\partial I_{r1}} = \frac{\partial P_J}{\partial I_{r2}} = 0 \Rightarrow I_{a1} = I_{a2}$ et $I_{r1} = I_{r2}$. Cela correspond, puisque la tension U est la même pour les deux alternateurs, à l'égalité de leurs puissances actives et réactives.

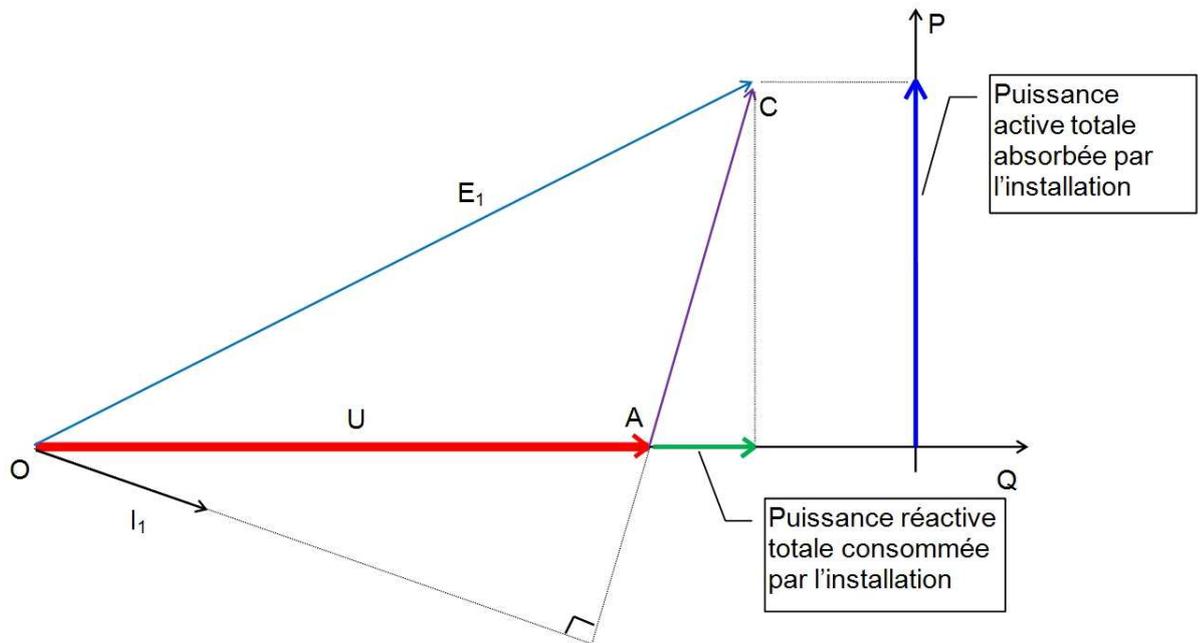


FIGURE 4.52 – Diagramme de Behn-Eschenburg montrant la répartition des puissances : avant le couplage du deuxième alternateur .

4.4.4.1 Mode opératoire du couplage d'un alternateur sur un réseau alimenté

Dégrossissage de la vitesse : on agit sur la consigne du régulateur de vitesse du moteur d'entraînement et on règle ainsi la fréquence (contrôle par le fréquencemètre).

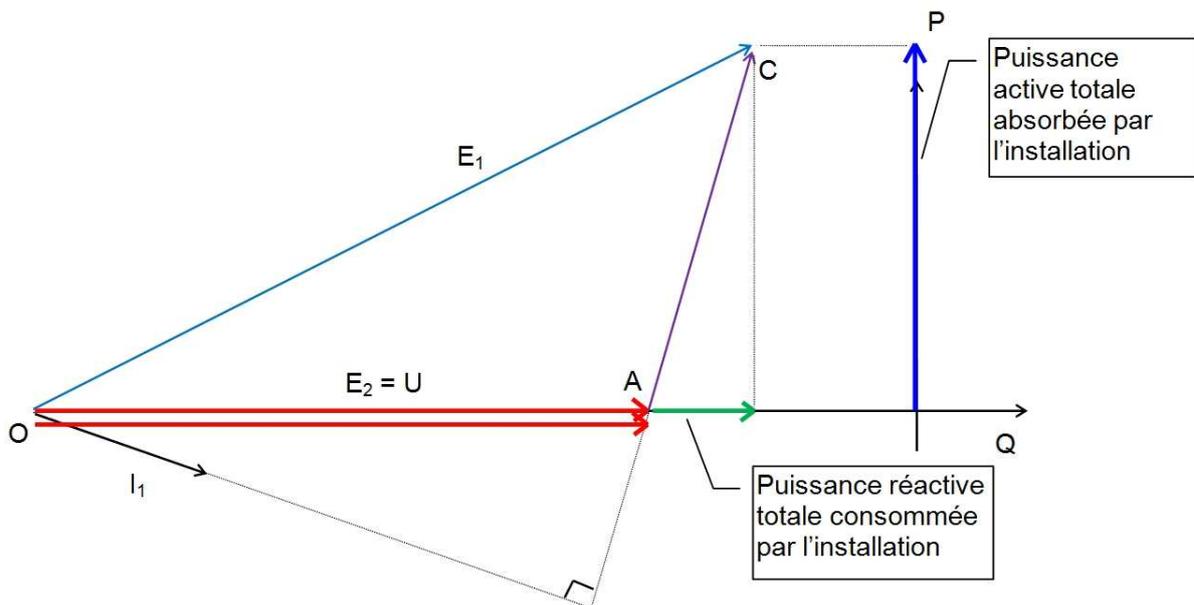


FIGURE 4.53 – Diagramme de Behn-Eschenburg montrant la répartition des puissances : le deuxième alternateur vient juste d'être couplé .

Réglage de l'excitation à vide : on agit sur la consigne du régulateur de tension de manière à régler la f.é.m. à vide. On prendra E légèrement supérieure à la tension U du réseau (contrôle par le voltmètre).

Vérification de la concordance des phases et mise au synchronisme : on exerce une action fine sur le régulateur de vitesse (contrôle par le synchronoscope et/ou par les lampes de synchronisation).

Couplage proprement dit : ordre de fermeture du disjoncteur dès que le synchronisme est atteint :

- à *feux battant* : lorsque les lampes sont éteintes (pendant des intervalles de temps supérieures à 3 secondes) ;
- à *feux tournant* : lorsqu'elles sont au maximum de luminosité (pendant des intervalles de temps supérieures à 3 secondes) ;
- au synchronoscope : lorsque l'aiguille tourne dans le sens des aiguilles d'une montre (vitesse légèrement supérieure à la vitesse de synchronisme du réseau) et passe par midi moins 10, moins 5.

Charge de l'alternateur, répartition des puissances actives : on fait débiter l'alternateur sur le réseau de manière à le charger progressivement (contrôle par l'ampèremètre). Ceci se fait en agissant sur la consigne du régulateur de vitesse du moteur d'entraînement (+ vite et - vite). Il y a lieu d'agir simultanément sur tous les régulateurs de vitesse afin de maintenir la fré-

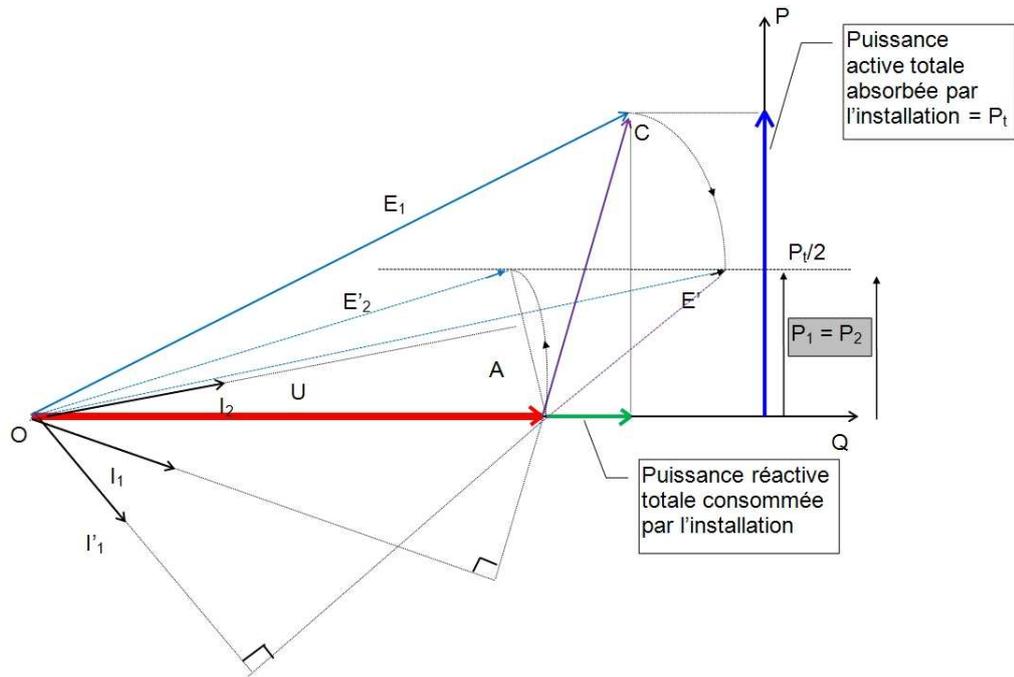


FIGURE 4.54 – Diagramme de Behn-Eschenburg montrant la répartition des puissances : pendant et après l'égalisation des puissances actives.

quence du réseau à sa valeur nominale. On répartit de cette manière, les puissances actives entre les alternateurs (contrôle par les wattmètres).

Répartition des puissances réactives : on réduit les courants de circulation entre alternateurs (courant déwatté) par action sur les consignes de tension (égalisation des facteurs de puissance) de manière à se rapprocher du fonctionnement optimum. Il y a lieu d'agir simultanément sur tous les régulateurs de tension afin de maintenir la tension du réseau à sa valeur nominale. Le contrôle des facteurs de puissance se fait en utilisant les varmètres ou en observant les ampèremètres (égalité des courants débités lorsque les puissances actives et réactives sont les mêmes).

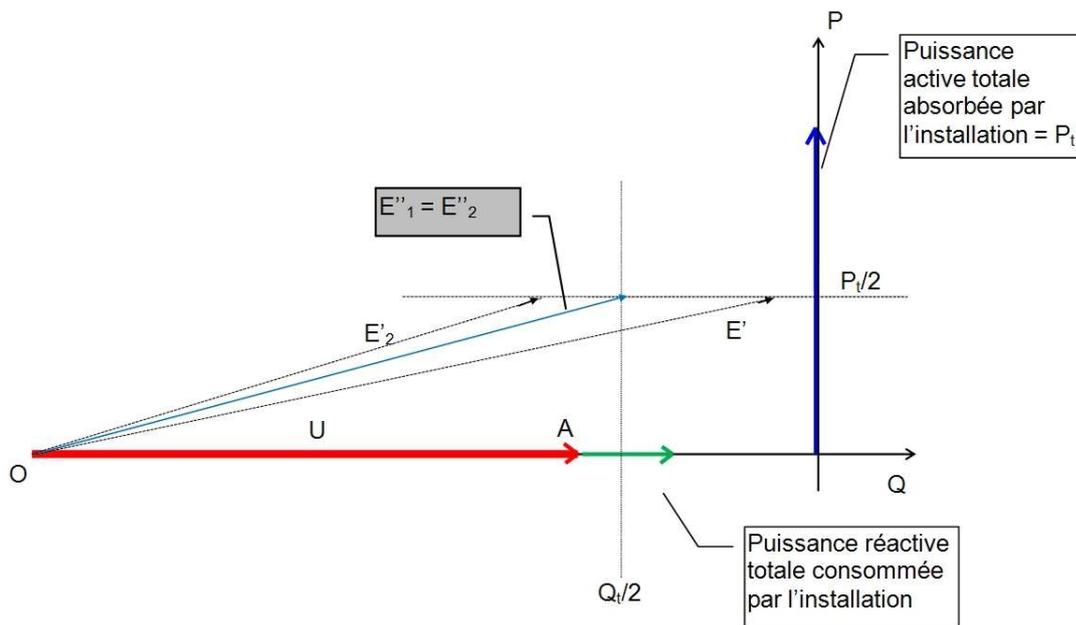


FIGURE 4.55 – Diagramme de Behn-Eschenburg montrant la répartition des puissances : pendant et après l'égalisation des puissances réactives.

Chapitre 5

Machines asynchrones

Les machines asynchrones sont très utilisées (on estime que 80% des moteurs de la planète sont des moteurs asynchrones) car leur coût est inférieur à celui des autres machines, de plus ces machines sont robustes . Comme les autres machines, la machine asynchrone est réversible et de très nombreuses génératrices asynchrones de puissance inférieure à quelques 5 MW fournissent un surplus d'énergie active aussi bien sur des réseaux terrestres qu'à bord des navires.

La gamme de puissance couverte par les machines asynchrones est très étendue : de quelques 5 watts pour des moteurs asynchrones monophasés à bagues de déphasage aux 36,8 MW des moteurs à cage d'écureuil des futurs porte-avions britannique de la classe « HMS Queen Elisabeth », en passant par les 24 MW des moteurs asynchrones à cage d'écureuil assurant la propulsion de la série de paquebots « Norwegian Epic ».

5.1 Symboles

Voici les différents symboles employés pour représenter la machine asynchrone :

5.2 Structure - Principes de fonctionnement

5.2.1 Structure

Une machine asynchrone comprend généralement :

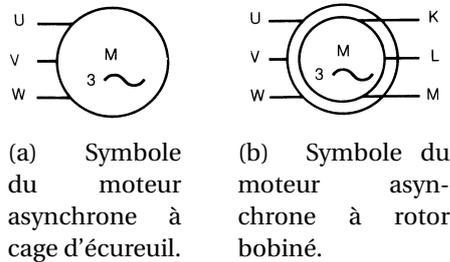


FIGURE 5.1 – Symboles du moteur asynchrone.

- un stator triphasé comportant p paires de pôles par phase, identique à celui d'une machine synchrone;
- un rotor constitué de conducteurs mis en circuit fermé. On rencontre deux types de rotor :
 - rotor bobiné : l'enroulement, semblable à celui du stator, comporte p paires de pôles par phase ; les trois paires sont reliées à trois bagues qui permettent d'insérer un rhéostat dans le circuit rotorique. Ce moteur est aussi nommé moteur à bagues.
 - rotor à cage : le rotor est constitué de barreaux de cuivre ou d'aluminium reliés aux deux extrémités par deux couronnes conductrices. Ce modèle (en forme de cage d'écureuil) peu coûteux et très robuste est le plus répandu.

Afin d'éviter l'affaiblissement du champ magnétique statorique dû à une trop grande réluctance, le rotor est rempli de disques de tôles d'acier de faible épaisseur (2 à 3 dixième de millimètre) et isolés électriquement par traitement chimique de la surface (phosphatation). Pour mémoire, le fer est le matériau le moins réluctant.

Les enroulements du stator sont connectés aux phases d'alimentation par les branchements effectués sur la *plaque à bornes*. Les trois ensembles de p bobines par phase sont connectés aux 6 bornes de la plaque à bornes de la manière indiquée par la figure 5.8.

C'est au niveau de la plaque à bornes que l'on peut modifier le couplage de la machine. La figure 5.9 montre comment effectuer un couplage en étoile grâce aux barrettes de cuivre effectuant la liaison entre les six bornes. La figure 5.10 montre comment effectuer un couplage en triangle.

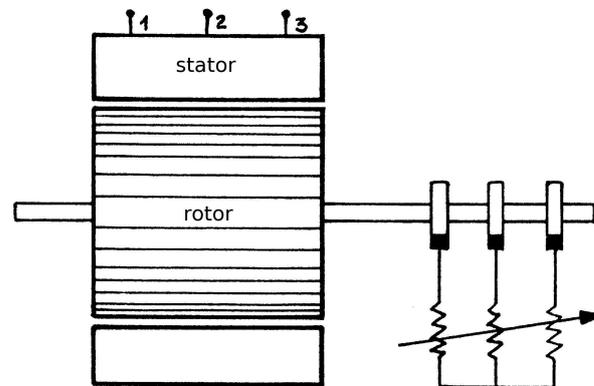


FIGURE 5.2 – machine asynchrone à rotor bobiné.

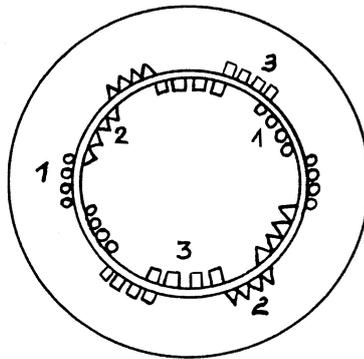


FIGURE 5.3 – machine asynchrone à rotor bobiné.

5.2.2 Principes de fonctionnement

Le stator, alimenté par un réseau de fréquence f , crée une induction tournante B_S de vitesse N_S , telle que $N_S = \frac{f}{p}$.

Supposons le rotor immobile : il est balayé par cette induction et des forces électromotrices sont engendrées dans les conducteurs (loi de Faraday $e = \frac{d\varphi}{dt}$).

Comme les circuits rotoriques sont *fermés*, des courants rotoriques prennent naissance. Il apparaît des forces électromotrices dues à l'action de l'induction statorique sur les courants rotoriques. En vertu de la loi de Lenz, ces forces tendent à entraîner le rotor dans le sens des inductions tournantes. Il existe un *couple de démarrage*, le rotor se met à tourner si le couple est suffisant.

Pour qu'il y ait couple, il faut donc :

- que les circuits rotoriques soient fermés, sinon les courants rotoriques

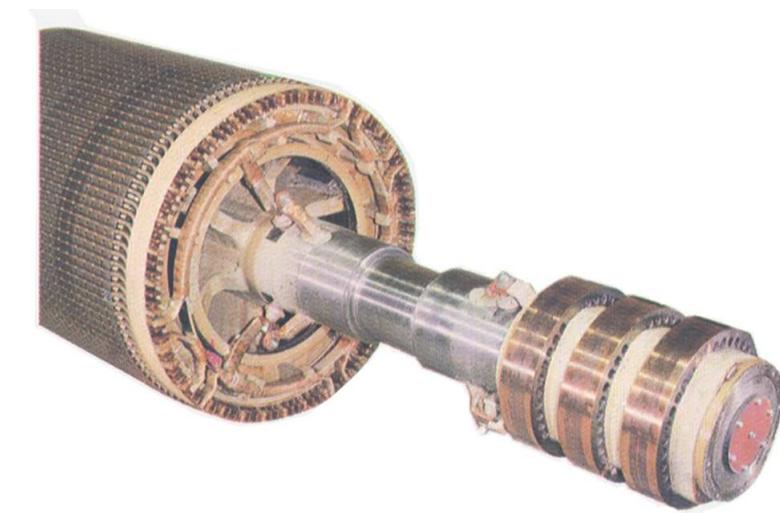


FIGURE 5.4 – les trois bagues de l'arbre moteur d'une machine asynchrone à rotor bobiné.

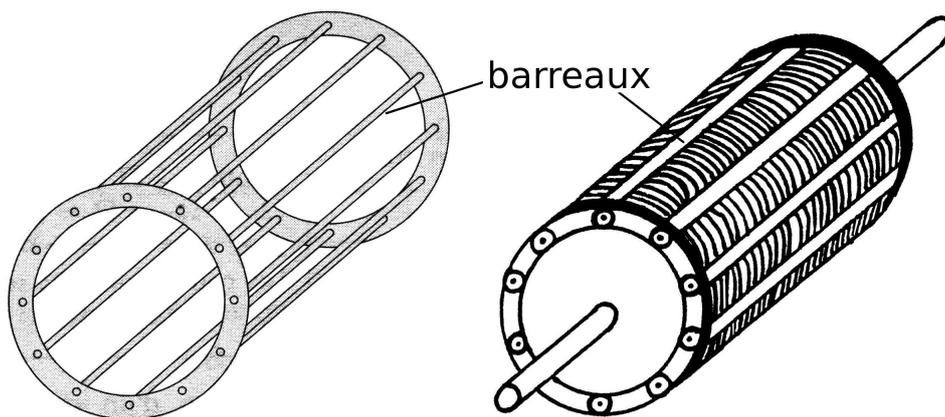


FIGURE 5.5 – rotor à cage d'écureuil, la cage vide de fer à gauche et emplie de rondelles de fer à droite.

sont nuls ;

- que la vitesse N prise par le rotor soit différente de la vitesse N_S de l'induction. Si $N = N_S$, les conducteurs tournent à la vitesse de l'induction statorique, aucune f.é.m. n'est induite, et par conséquent aucun courant ne circule dans le rotor : il ne peut y avoir de couple.

On obtient donc un résultat très différent de celui de la machine synchrone pour laquelle il n'y avait de couple qu'au synchronisme. Pour la machine synchrone :

- si $N < N_S$ couple moteur ;

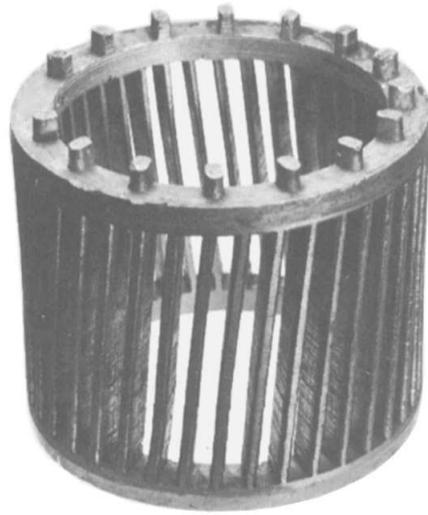


FIGURE 5.6 – rotor à cage d'écureuil, le rotor est en aluminium injecté et moulé sous pression sur les rondelles de fer ; celles-ci ont été éliminées avec de l'acide afin de rendre la cage d'écureuil parfaitement visible.

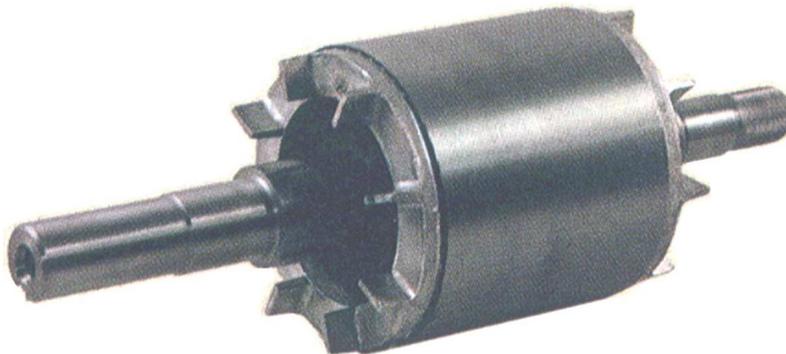


FIGURE 5.7 – L'aspect extérieur d'un rotor à cage ne permet pas de distinguer la cage d'écureuil pourtant bien présente à l'intérieur.

- si $N = N_S$ couple nul ;
- si $N > N_S$ couple de freinage.

REMARQUES :

- Le nombre de pôles doit être le même au rotor et au stator. Dans le cas de la cage d'écureuil, ce résultat est automatique. La répartition des f.é.m. dans les barreaux de la cage est imposée par les pôles de l'inducteur statorique fictif : deux barreaux distants de $180^\circ/p$ ont des f.é.m. opposées et constituent une « spire » dans laquelle circule le courant rotorique. Le nombre de pôles rotoriques est donc égal à p .

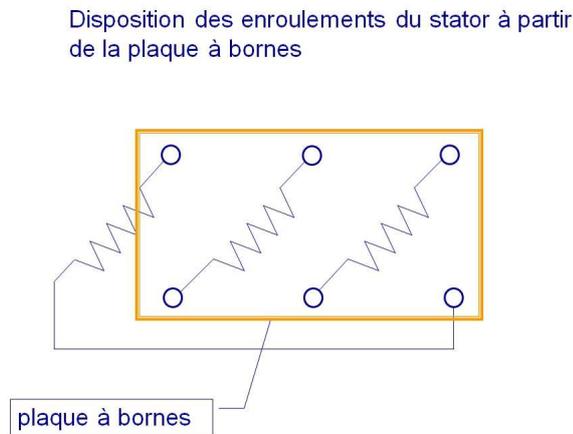


FIGURE 5.8 – Plaque à bornes d’une machine asynchrone triphasée.

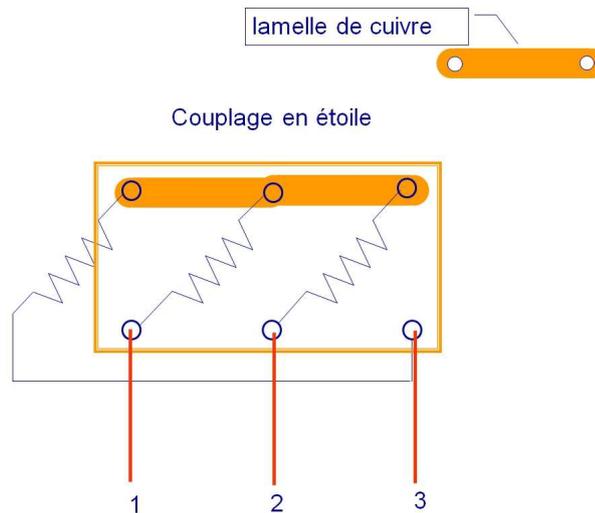


FIGURE 5.9 – Couplage du stator en étoile d’une machine asynchrone triphasée.

- Démarrage en asynchrone d’un moteur synchrone : on place souvent une cage d’écuréuil sur l’inducteur d’un moteur synchrone. Cette cage s’oppose aux déplacements relatifs du rotor par rapport à l’induction tournante du stator et par suite amortit le mouvement de décalage du rotor lors des phénomènes transitoires dus aux variations brusques de couple (amortisseur Leblanc).

Comme pour le moteur asynchrone, le démarrage est alors possible en l’absence d’excitation continue. Si le moteur est à vide, il atteindra presque la vitesse de synchronisme et on pourra alors le synchroniser en l’excitant. Ce mode de démarrage, très simple, ne convient qu’aux moteurs

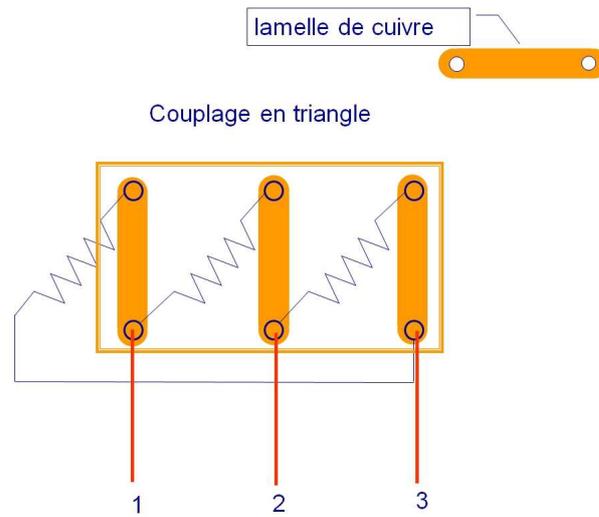


FIGURE 5.10 – Couplage du stator en triangle d’une machine asynchrone triphasée.

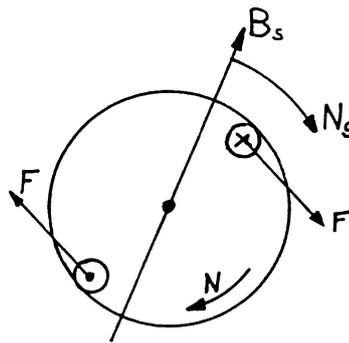


FIGURE 5.11 – Principe de fonctionnement d’une machine asynchrone.

synchrones de faible puissance en raison du courant et du couple élevés lors de la synchronisation.

5.2.3 Glissement - fréquences rotoriques

5.2.3.1 Glissement

L’origine des courants rotoriques réside dans la différence des vitesses N_s et N . On introduit une grandeur fondamentale, sans dimension, le glissement g définit par :

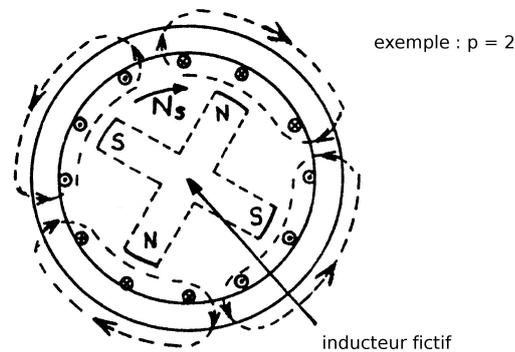


FIGURE 5.12 – Une machine asynchrone comporte le même nombre de pôles au rotor et pour une phase statorique.

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

Notons que :

$N = 0$	$g = 1$	démarrage
$N = N_s$	$g = 0$	synchronisme
$0 < N < N_s$	$0 < g < 1$	moteur
$N > N_s$	$g < 0$	génératrice

5.2.3.2 Fréquences rotoriques

La vitesse relative de l'induction statorique par rapport au rotor est :

$$N_s - N = gN_s$$

Par suite, le rotor ayant p paires de pôles, la fréquence des f.é.m. et des courants est donc :

$$f_R = p(gN_s) \text{ et comme } N_s = \frac{f}{p}$$

$$f_R = gf$$

La fréquence des grandeurs rotoriques est proportionnelle au glissement. En général, le glissement sera faible et la fréquence rotorique sera faible elle aussi (quelques hertz).

APPLICATION : On peut mesurer directement le glissement en mesurant la fréquence rotorique f_R . Comme g est faible, la précision obtenue est meilleure

qu'en mesurant N_S , N et en faisant la différence. Dans le cas du moteur à rotor bobiné, il est facile d'accéder à une tension détectable (entre deux bagues par exemple). Pour le moteur à cage, on peut, si nécessaire, détecter les faibles tensions induites entre les extrémités de l'arbre.

5.2.3.3 Inductions tournantes

Les courants rotoriques, de fréquence f_R , engendrent à leur tour une induction rotorique qui tourne à la vitesse $\frac{f_R}{p} = \frac{gf}{p} = gN_S$

L'induction rotorique tourne donc, elle aussi, à la vitesse N_S par rapport au stator :

$$gN_S + N = N_S$$

Quelle que soit la vitesse du rotor, les inductions statoriques et rotoriques ont toujours la vitesse N_S . De leur composition provient le couple électromagnétique C_e qui est produit à la vitesse N_S comme dans une machine synchrone et transmis au rotor. Les lois de la dynamique impliquent qu'en régime permanent ($N = \text{constante}$), ce couple soit égal au couple mécanique résistant C_m opposé au rotor.

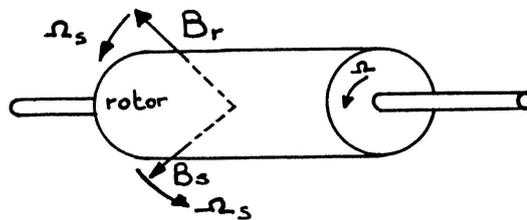


FIGURE 5.13 – Les champs rotoriques et statoriques d'une machine asynchrone tournent à la même vitesse.

5.2.3.4 Bilan de puissance

On peut regrouper sur un diagramme les diverses pertes de puissance active du moteur :

- Puissance absorbée : $P_a = 3V_1 I_1 \cos \varphi_1$.
- Pertes Joule du stator : si R_1 est la résistance d'une phase statorique, alors $P_{JS} = 3R_1 I_1^2$.

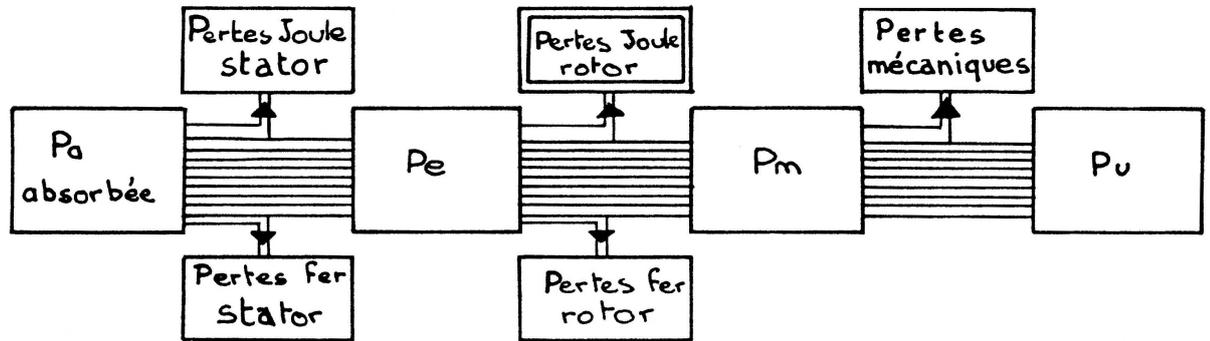


FIGURE 5.14 – Diagramme de bilan de puissance d'une machine asynchrone.

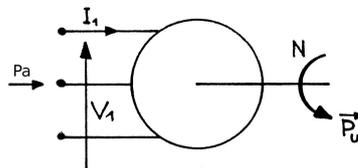


FIGURE 5.15 – Diagramme de bilan de puissance d'une machine asynchrone.

- Pertes fer stator : comme pour le transformateur, elles seront liées au carré de la tension : P_f .
- Puissance électromagnétique P_e , c'est la puissance transmise du stator au rotor par les inductions tournantes à la vitesse N_S : $P_e = C_e 2\pi N_S$.
- Pertes Joule rotor : si R_2 est la résistance d'une phase rotorique et I_2 le courant rotorique, on aura : $P_{JR} = 3R_2 I_2^2$. Pour une cage, on définit une résistance et un courant équivalent en assimilant la cage à un enroulement polyphasé.
- Pertes fer rotoriques : elles sont faibles en fonctionnement normal car la fréquence rotorique est petite. On les négligera en pratique devant les pertes joule dans les conducteurs du rotor.
- La puissance mécanique est fournie par le rotor à la vitesse N : $P_m = C_m 2\pi N = C_m \Omega$.
- Les pertes mécaniques correspondent à un couple de frottement C_f .
- La puissance utile, délivrée sur l'arbre de sortie du moteur, s'écrit en introduisant le couple utile : $P_u = C_u 2\pi N = C_u \Omega$.

On a évidemment : $C_u = C_m - C_f$. L'équilibre dynamique du rotor implique l'égalité des couples C_e et C_m . Il en résulte une propriété remarquable du mo-

teur :

$$P_e = C_e 2\pi N_S = P_m + P_{JR} = C_e 2\pi N + P_{JR}$$

$$P_{JR} = C_e 2\pi (N_S - N) = C_e 2\pi g N_S = g P_e$$

$$P_{JR} = g P_e = g C_e \Omega_S$$

En négligeant les pertes fer rotor, on voit que les pertes Joule rotor sont directement liées à la production de puissance électromagnétique. Si C_e n'est pas nul, comme g est nécessairement différent de zéro, il faut qu'il y ait des pertes Joule rotor. Cette constatation, spécifique des machines asynchrones, implique une incidence directe sur le rendement. On a :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_m} \times \frac{P_m}{P_e} \times \frac{P_e}{P_a} < \frac{P_m}{P_e}$$

$$\text{Or : } \frac{P_m}{P_e} = \frac{N}{N_S} = 1 - g$$

$$\text{Donc : } \eta < \frac{N}{N_S}$$

Le rendement est directement lié à la vitesse de rotation. Ainsi, par exemple :

- si $N = \frac{N_S}{2}$, le rendement sera inférieur à 0,5 ;
- si $N = 0,9 \cdot N_S$, le rendement sera inférieur à 0,9.

Il faudra donc, en pratique, limiter le fonctionnement du moteur aux faibles glissements, sinon le rendement devient faible et l'échauffement du rotor important.

5.3 Équations - Schéma équivalent

5.3.1 Équations

Le fonctionnement étant en régime triphasé équilibré, on étudie que les grandeurs relatives à une phase. Soit I_1 le courant d'une phase statorique et I_2 celui d'une phase rotorique. Ces courants engendrent des forces magnétomotrices tournantes de vitesse N_S : $n'_1 I_1$ et $n'_2 I_2$. n'_1 et n'_2 étant les nombres de spires de chaque enroulement corrigés par les coefficients de Kapp pour tenir compte de leur disposition géométrique à la périphérie de l'entrefer.

En prenant la même convention de signe que pour le transformateur, la relation de Hopkinson permet d'obtenir le flux Φ engendré par le stator et le rotor, \mathcal{R} étant la réluctance du circuit magnétique :

$$n'_1 \underline{I}_1 - n'_2 \underline{I}_2 = \mathcal{R} \Phi$$

$n'_1 \underline{I}_1$ est en phase avec $B_{\text{statorique}}$ et $n'_2 \underline{I}_2$ en opposition avec $B_{\text{rotorique}}$

Comme pour le transformateur, on peut introduire le courant magnétisant \underline{I}_{10} correspondant au flux Φ et ajouter le courant \underline{I}_{1F} représentant les pertes fer du circuit magnétique :

$$n'_1 \underline{I}_{10} = \mathcal{R} \Phi$$

$$n'_1 \underline{I}_1 - n'_2 \underline{I}_2 = n'_1 \underline{I}_{10} + n'_1 \underline{I}_{1F}$$

ou :

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{10} + \underline{I}_{1F} + \frac{n'_2}{n'_1} \underline{I}_2$$

La loi d'Ohm Faraday appliquée à un enroulement statorique donne, en notant R_1 la résistance de la phase et ℓ_1 son inductance de fuites :

$$\underline{V}_1 = j n'_1 \omega \Phi + j \omega \ell_1 \underline{I}_1 + R_1 \underline{I}_1$$

Au rotor, le flux Φ a la même valeur efficace mais il tourne, par rapport au rotor, à une vitesse apparente ($g \Omega_s$) et la pulsation rotorique est donc $g \omega = \omega_r$.

On aura donc, en notant R_2 la résistance d'un enroulement et ℓ_2 son inductance de fuites :

$$\underline{V}_2 = j n'_2 (g \omega) \Phi - j (g \omega) \ell_2 \underline{I}_2 - R_2 \underline{I}_2$$

Comme les phases du rotor sont en court-circuit, on aura : $V_2 = 0$; si on utilise un rhéostat rotorique, on inclut sa résistance dans R_2 .

En divisant par g l'expression précédente, on obtient, compte tenu de $V_2 = 0$:

$$0 = j n'_2 \omega \Phi - j \omega \ell_2 \underline{I}_2 - \frac{R_2}{g} \underline{I}_2$$

On peut interpréter aisément cette expression en considérant un courant \underline{I}_2 , de même valeur efficace que le courant rotorique réel \underline{I}_2 , mais de pulsation ω au lieu de ($g \omega$).

5.3.1.1 Schéma équivalent

Ces équations conduisent à un schéma équivalent de transformateur dont le primaire est le stator et le secondaire le rotor. Avant de diviser l'équation de maille du rotor par g , on a le schéma de la figure 5.16.

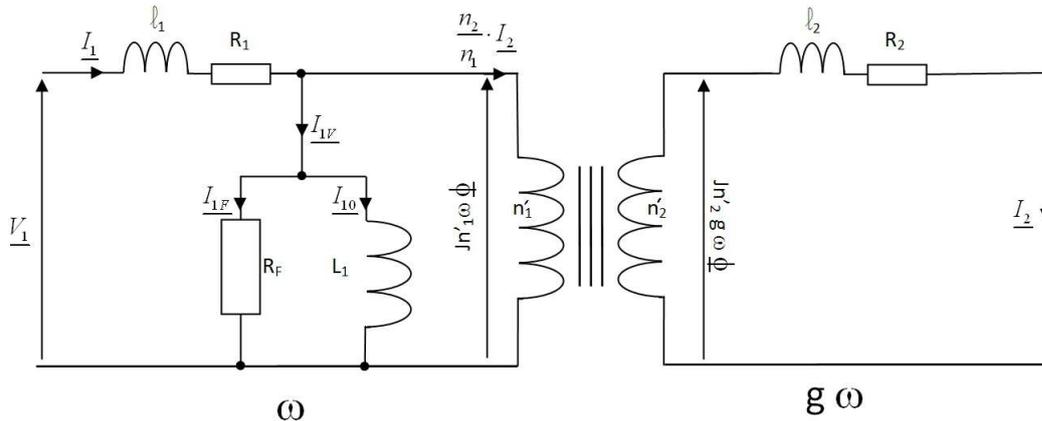


FIGURE 5.16 – Schéma équivalent d'une machine asynchrone, stator et rotor sont à des pulsations différentes.

En divisant l'équation 5.3.1 par g , on fait apparaître un schéma équivalent 5.17 où stator et rotor sont à la même pulsation ω :

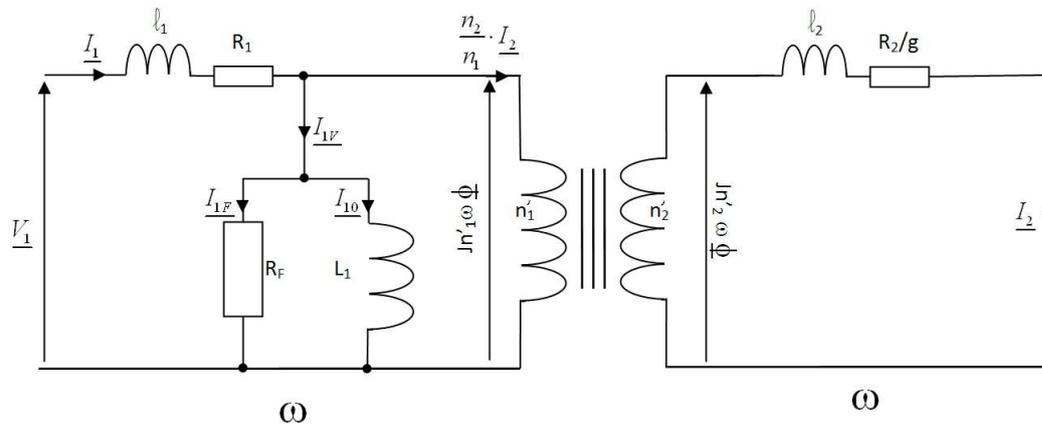


FIGURE 5.17 – Schéma équivalent d'une machine asynchrone, stator et rotor sont à la même pulsation ω .

Bien que le courant I_{10} soit relativement plus élevé, en raison de l'entrefer, que dans le cas du transformateur, on peut cependant négliger la chute de tension supplémentaire due à ce courant dans R_1 et l_1 et transformer le schéma ainsi que le montre la figure

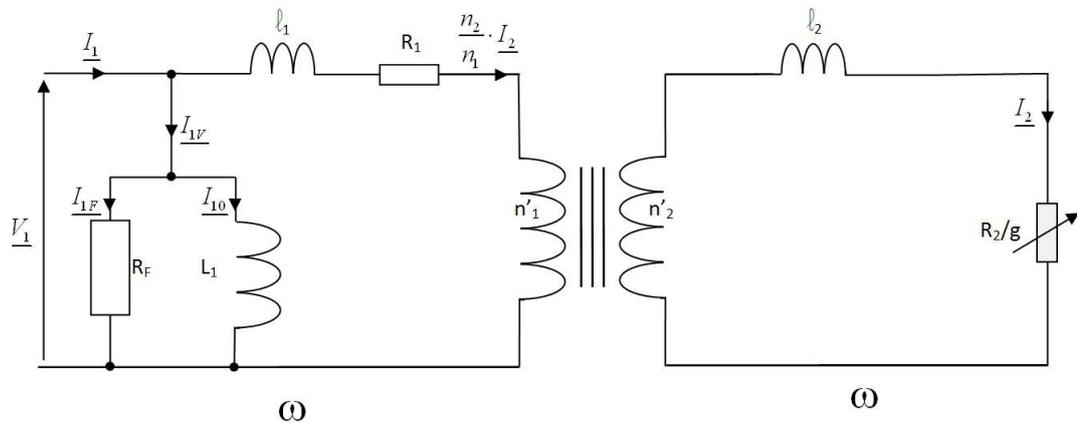


FIGURE 5.18 – Schéma équivalent d'une machine asynchrone, stator et rotor sont à la même pulsation ω .

Ou en ramenant tout au rotor, on obtient le schéma de la figure 5.19 :

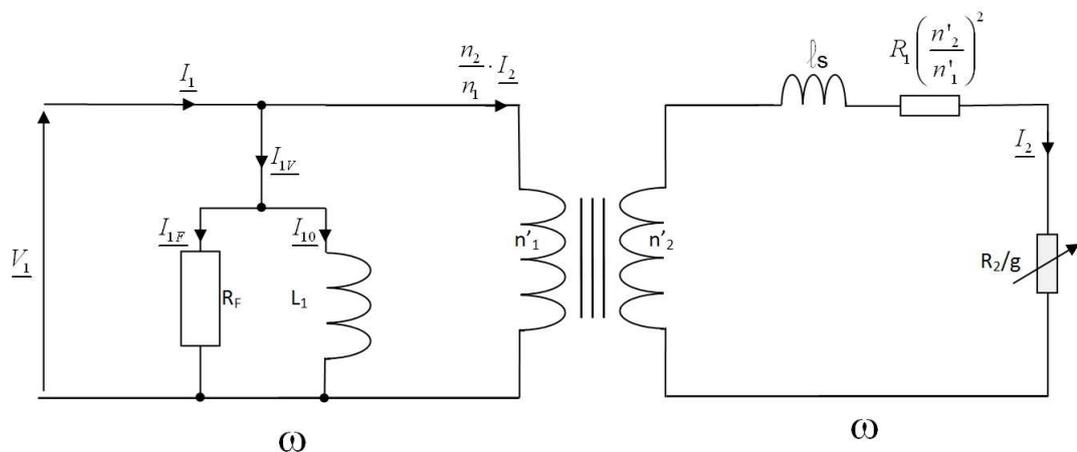


FIGURE 5.19 – Schéma équivalent d'une machine asynchrone, stator et rotor sont à la même pulsation ω .

avec : $l_s = l_2 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 l_1$ inductance de fuite ramenée au rotor.

Ce dernier schéma (voir figure 5.19) représente convenablement les propriétés du moteur asynchrone. On remarque que le glissement et la résistance rotorique n'interviennent que couplés dans le rapport $\left(\frac{R_2}{g}\right)$.

$\frac{R_2}{g}$ est une résistance *fictive*, fonction de la vitesse de rotation N , on l'appelle

*résistance motionnelle*¹.

En particulier, pour $g=0$ ($N = N_S$), le courant I_2 est nul puisque $\frac{R_2}{g}$ est infini, on retrouve les résultats de l'étude préliminaire. Le courant statorique comprend uniquement I_{10} et I_{1F} . Ce fonctionnement correspond au couple électromagnétique nul et le courant absorbé est alors nommé *courant à vide* I_{1V} :

$$\underline{I_{1V}} = \underline{I_{10}} + \underline{I_{1F}}$$

Le moteur à vide est équivalent à l'inductance L_1 du stator (le rotor, sans courants, n'intervient pas) :

$$\underline{V_1} = j\omega L_1 \underline{I_{10}} \text{ avec } L_1 = \frac{(n'_1)^2}{\mathcal{R}}$$

On peut, en outre, retrouver le bilan des puissances actives ; la puissance absorbée se retrouve :

- en pertes fer stator dans la résistance R_F ;
- en pertes Joule stator dans la résistance R_1 ;
- en puissance électromagnétique P_e correspondant à la puissance dissipée dans $\frac{R_2}{g}$:

$$P_e = 3 \times \frac{R_2}{g} \times I_2^2$$

Or, les pertes Joule rotor s'écrivent toujours :

$$P_{JR} = 3R_2 I_2^2 = gP_e$$

La différence $P_e - P_{JR}$ est donc la puissance mécanique P_m et le rendement est inférieur à : $\eta < \frac{P_m}{P_e} = 1 - g$

5.3.1.2 Couple et courant à glissement faible

L'utilisation normale du moteur asynchrone correspond aux faibles glissements g ($g < 0,1$) et les calculs étant alors particulièrement simples, il est utile de commencer par cette étude.

On suppose donc : $\frac{R_2}{g} \gg \ell_S \omega$ ou $g \ll \frac{R_2}{\ell_S \omega}$

1. motionnelle : du latin motio : mouvement, penser à l'anglais « motion picture » littéralement « images en mouvement » qui veut dire film

$\left(R_1 \left(\frac{n'_2}{n'_1}\right)^2\right)$ étant à priori négligé.

La notion de glissement faible est toute relative car elle dépend de la valeur de R_2 devant $l_s \omega$. Le schéma équivalent est alors celui de la figure 5.20

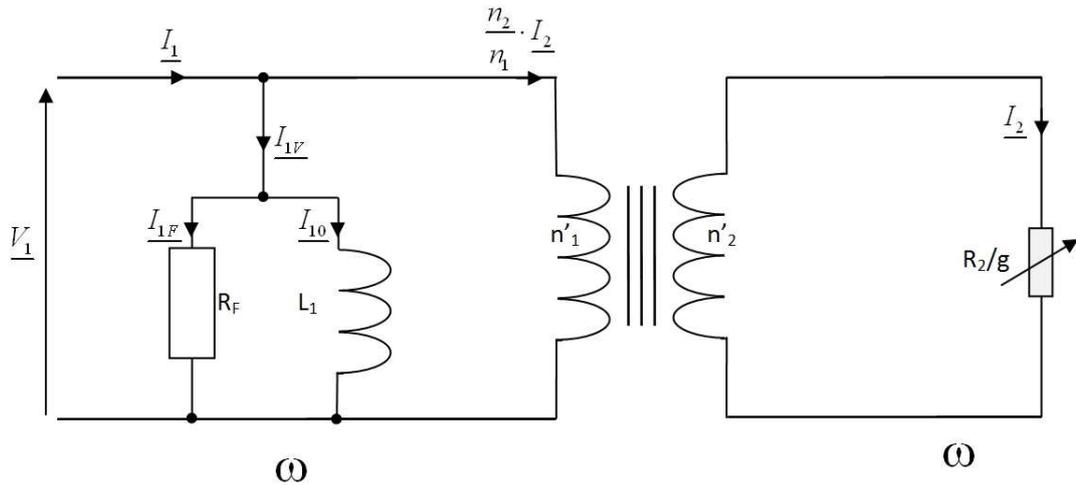


FIGURE 5.20 – Schéma équivalent d'une machine asynchrone à glissement faible.

On obtient :

$$\underline{I}_2 = \frac{n'_2}{n'_1} \underline{V}_1 \frac{g}{R_2}$$

Soit : $\underline{I}_1 = \underline{I}_{1V} + \left(\frac{n'_2}{n'_1}\right)^2 \underline{V}_1 \frac{g}{R_2}$

Dans cette relation, \underline{I}_{1V} est constant. Le second terme, proportionnel au glissement, est en phase avec \underline{V}_1 et on obtient le diagramme vectoriel de la figure 5.21 qui donne I_1 et φ_1 :

Lorsque la vitesse N varie, le point M se déplace sur la droite Δ . Pour $N = N_S$ ($g=0$), il est en A. La puissance électromagnétique P_e et le couple C_e sont tels que :

$$P_e = 3 \frac{R_2}{g} I_2^2 = 3 \frac{R_2}{g} \left(\frac{n'_2}{n'_1}\right)^2 \frac{g^2}{R_2^2} V_1^2 = C_e \Omega_S$$

Soit : $C_e = \frac{3}{\Omega_S} \left(\frac{n'_2}{n'_1}\right)^2 V_1^2 \frac{g}{R_2}$ ou $C_e = k V_1^2 \frac{g}{R_2}$

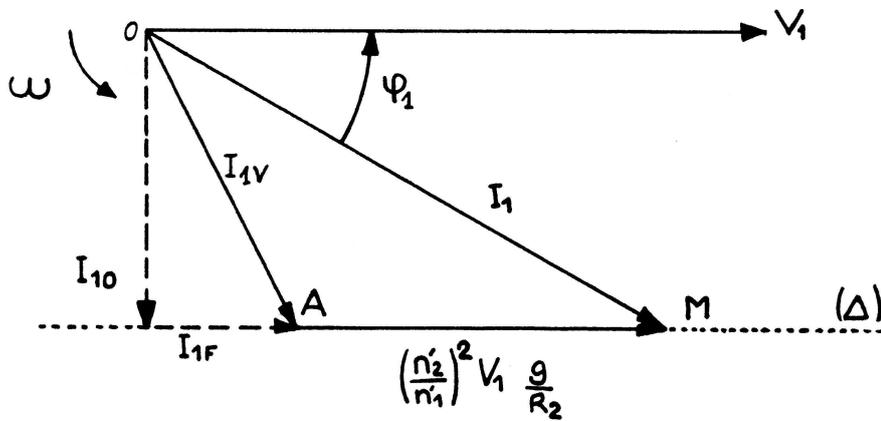


FIGURE 5.21 – Diagramme vectoriel d'une machine asynchrone à glissement faible.

Pour un réseau donné (V_1 et Ω_s constantes), le couple est proportionnel au glissement si R_2 est constante.

On en déduit la caractéristique mécanique $C_e = f(N)$, en traçant tout d'abord $C_e = f(g)$ et en effectuant le changement d'origine comme le montre la figure 5.22

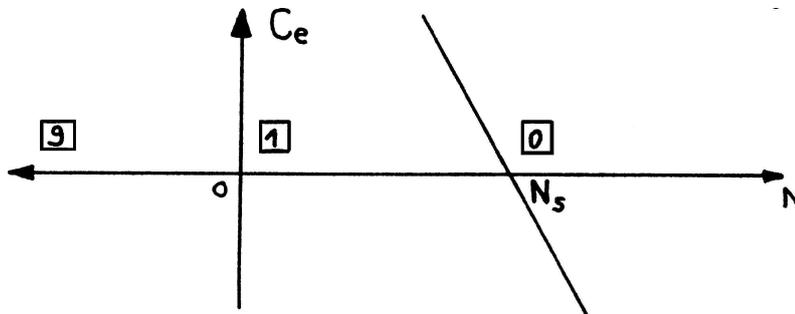


FIGURE 5.22 – Caractéristique mécanique d'une machine asynchrone à glissement faible.

REMARQUE : Si la tension V_1 est constante, on peut transformer le diagramme de courants en diagramme de puissances, en projetant le point M sur deux axes orthogonaux comme le montre la figure 5.23

$$\overline{OH} = I_1 \cos \varphi_1$$

$$P_a = 3V_1 I_1 \cos \varphi_1 = 3V_1 \overline{OH}$$

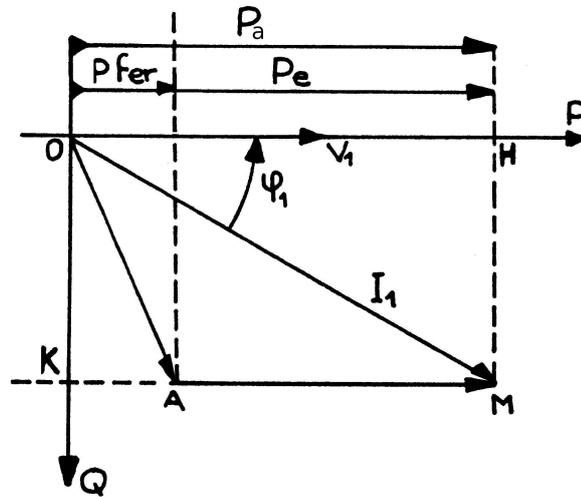


FIGURE 5.23 – Diagramme des puissances d'une machine asynchrone à glissement faible.

$$Q_a = 3V_1 I_1 \sin \varphi_1 = 3V_1 \overline{OK}$$

On peut donc graduer les axes en P et Q.

On a : $\overline{KA} = I_{1F}$.

Comme : $p_F = 3V_1 I_{1F} = 3V_1 \overline{KA}$, à la même échelle \overline{KA} représente les pertes fer stator.

\overline{AM} représente donc, toujours à la même échelle, la puissance électromagnétique (donc aussi le couple).

$$P_e = 3V_1 I_1 \cos \varphi_1 - 3V_1 I_{1F} = 3V_1 \overline{AM} = C_e \Omega_s$$

On retrouve le bilan de puissance sur le graphe de la figure 5.23.

5.4 Étude du courant et du couple

Si on ne néglige plus les fuites, ni la résistance du stator, on a d'après le schéma équivalent de la figure 5.20 :

$$\underline{I_2} = \frac{n'_2}{n'_1} V_1 \frac{1}{R_1 \left(\frac{n'_2}{n'_1}\right)^2 + \frac{R_2}{g} + j\omega l_s}$$

Cette expression, correcte, facilement utilisable pour des calculs ponctuels, conduit à une étude générale assez complexe. Pour permettre une étude complète simple, nous négligerons, comme dans le cas de la machine synchrone, la résistance statorique. Même si le glissement est élevé, cette hypothèse reste approximativement vérifiée si $R_1 \left(\frac{n'_2}{n'_1}\right)^2 \ll \omega l_s$. On a alors :

$$\underline{I_2} = \frac{n'_2}{n'_1} V_1 \frac{1}{\frac{R_2}{g} + j\omega l_s}$$

5.4.1 Courant absorbé - Diagramme du cercle

5.4.1.1 Courant absorbé

On a :

$$\underline{I_1} = \underline{I_{1V}} + \left(\frac{n'_2}{n'_1}\right)^2 V_1 \frac{1}{\frac{R_2}{g} + j\omega l_s}$$

ou :

$$\underline{I_1} = \underline{I_{1V}} + \underline{I'_1}$$

Lorsque la vitesse varie, seule la composante $\underline{I'_1}$ varie.

Soit : $\underline{I'_{1\infty}}$, la valeur de $\underline{I'_1}$ quand $g = \infty$

$$\underline{I'_{1\infty}} = \left(\frac{n'_2}{n'_1}\right)^2 \frac{V_1}{j\omega l_s}$$

Ce courant, limité par l'inductance de fuites, est déphasé de 90° sur V_1 et il est constant (indépendant de g).

$$\underline{I'_1} = \underline{I'_{1\infty}} \cdot \frac{1}{\frac{R_2}{jg\omega l_s} + 1} = \underline{I'_{1\infty}} \cdot \frac{1}{1 - j \frac{R_2}{g\omega l_s}}$$

Soit :

$$\underline{I'_{1\infty}} = \underline{I'_1} - j \frac{R_2}{g\omega l_s} \cdot \underline{I'_1}$$

Cette somme correspond au diagramme de Fresnel suivant de la figure 5.24

Comme I'_{∞} est constant, le point M, extrémité de I'_1 , décrit un cercle de diamètre $AB = I'_{\infty}$. La tangente de l'angle α est directement proportionnelle au glissement si R_2 est constante :

$$\tan \alpha = \frac{\omega l_s}{R_2} \cdot g$$

Si $g = 0$, M est en A ; $g = \infty$, M est en B.

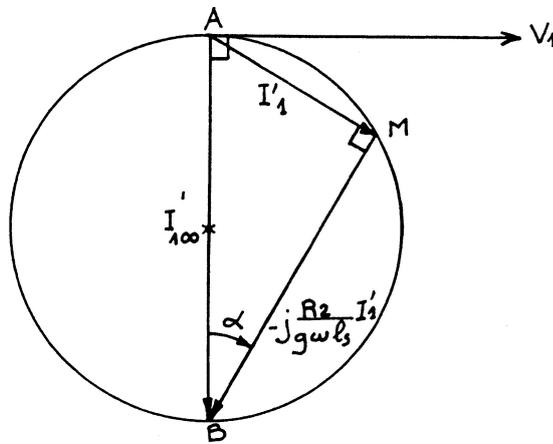


FIGURE 5.24 – Diagramme de Fresnel d'une machine asynchrone : diagramme du cercle.

Compte tenu du courant absorbé à vide, I_{1V} , on aura pour I_1 le diagramme définitif de la figure 5.25

NOTA : Le diagramme simplifié du paragraphe 5.3.1.2 correspond à la tangente au cercle en A (droite Δ). Si le glissement est faible (α faible), les deux lieux se confondent.

5.4.1.2 Détermination expérimentale

Un des intérêts de ce diagramme est qu'il ne nécessite que deux essais expérimentaux pour déterminer le cercle : le centre étant sur une normale à V_1 passant par A, on détermine deux points de ce cercle.

Essai à vide pour $N = N_s$ ($g = 0$)

Le rotor est entraîné à la vitesse N_s par un moteur auxiliaire. Le couple électromagnétique est nul. En pratique, on laisse le moteur tourner à vide, comme les

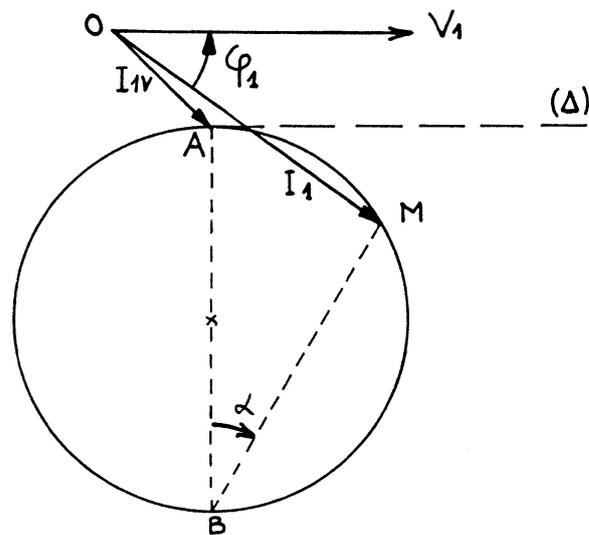


FIGURE 5.25 – Diagramme du cercle d'une machine asynchrone.

frottements sont faibles, le glissement est pratiquement nul. On mesure I_{1V} , la puissance P_{1V} qui est alors égale aux pertes fer stator :

$$P_{1V} = 3V_1 I_1 \cos \varphi_{1V}$$

$$P_{1V} = 3V_1 I_{1F}$$

On peut donc tracer le vecteur \vec{I}_{1V} .

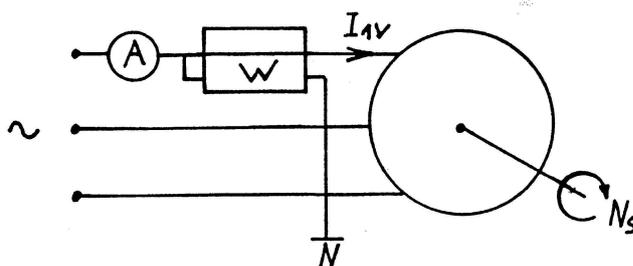


FIGURE 5.26 – Essais à vide pour la détermination du diagramme du cercle.

Essai à rotor bloqué pour $N = 0$ ($g = 1$)

Le second essai correspond au démarrage. Comme les courants sont trop élevés, il faut réduire la tension d'alimentation V_1 pour cet essai, le courant mesuré

étant alors réduit dans le même rapport m ; le rotor doit être mécaniquement bloqué.

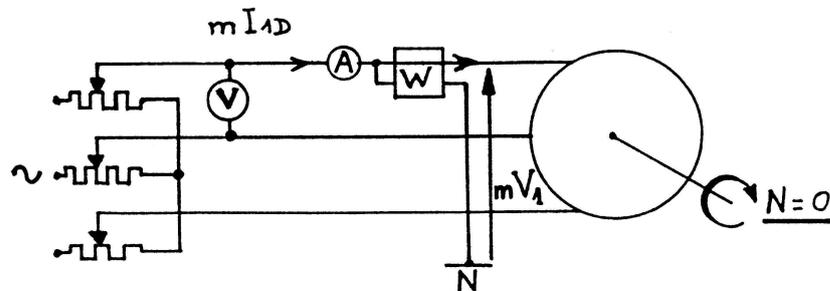


FIGURE 5.27 – Essais à rotor bloqué pour la détermination du diagramme du cercle.

L'ampèremètre mesure mI_{1D} , le voltmètre mU . On en déduit I_{1D} , tandis que le wattmètre permet de calculer le déphasage. On porte alors le vecteur \vec{I}_{1D} et on construit le cercle. On connaît A et D, le centre C du cercle est sur la normale à V_1 et sur la médiatrice de AD comme le montre la figure 5.28

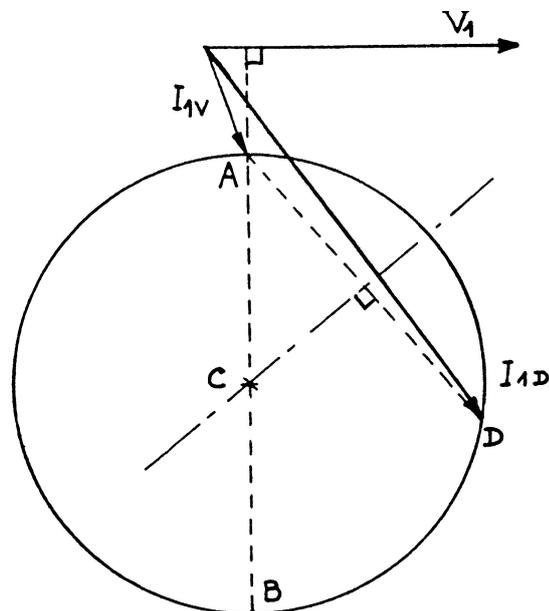


FIGURE 5.28 – Construction du cercle suite aux deux essais à vide et à rotor bloqué.

REMARQUES :

- On peut déterminer le cercle par trois points : $g = 0$, $g = 1$ et $g = 2$; ce dernier point est obtenu, sous tension réduite, en faisant tourner le moteur à la vitesse N_S en sens inverse du champ tournant.
- La détermination expérimentale, point par point, du cercle montre que son centre n'est pas exactement sur la normale à V_1 et d'autre part que le point correspondant à $g = \infty$ n'est pas diamétralement opposé à A. Ces différences proviennent en particulier de la résistance du stator négligée ici.

5.4.2 Échelle de glissement - Puissances

5.4.2.1 Échelle de glissement

La figure 5.29 montre une construction simple permet de lire directement sur le diagramme le glissement correspondant à un point M et, par suite, la vitesse.

Nous avons vu que la tangente de l'angle α était, à R_2 constante, proportionnelle au glissement. Pour matérialiser le glissement, il suffit donc de placer une droite (G) quelconque normale à AB : le glissement est proportionnel au segment (og). Cette échelle étant linéaire, il suffit, pour la graduer, d'en connaître deux points :

- $g = 0$, M est en A : o est l'origine de la graduation ;
- $g = 1$, M est en D : BD coupe (G) en un point correspondant à un glissement $g = 1$.

(G) étant graduée, on lira le glissement pour un point M à l'intersection de BM et de (G). On pourra ainsi suivre l'évolution de I_1 et de φ_1 en fonction de g , donc de la vitesse.

Puissances

Comme dans le cas du diagramme simplifié, on peut joindre à ce diagramme des échelles de puissances (voir figure 5.29). On projette le point M sur OP et OQ :

$$\text{Puissance active absorbée : } P_a = 3V_1 I_1 \cos \varphi_1 = 3V_1 \overline{OH}$$

$$\text{Puissance réactive absorbée : } Q_a = 3V_1 I_1 \sin \varphi_1 = 3V_1 \overline{OK}$$

En retranchant les pertes fer stator on fait apparaître la puissance électromagnétique P_e sur l'axe OP :

$$p_F = 3V_1 I_{1F} = 3V_1 \overline{OA'} \quad P_e = P_a - p_F$$

En résumé, comme l'illustre la figure 5.30, le graphe donne, pour un point M :

- le glissement (échelle G) ;
- le courant I_1 ;
- le déphasage φ_1 ;
- la puissance absorbée P_a ;
- la puissance électromagnétique P_e et par suite le couple ;
- les pertes Joule rotor ;
- la puissance mécanique P_m .

On retrouve directement le bilan de puissances (à l'exclusion des pertes Joule stator qui ont été négligées et des pertes mécaniques qui interviennent ensuite).

On notera que la puissance mécanique est nulle en A ($g = 0$; $N = N_S$; $C_e = 0$) et en D ($g = 1$; $N = 0$; $C_e = C_{eD}$).

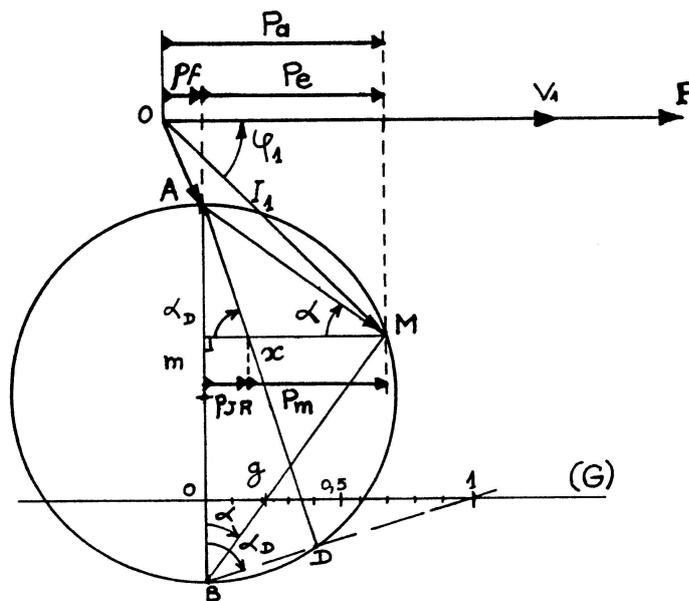


FIGURE 5.30 – Toutes les informations fournies par le diagramme du cercle.

5.4.3 Étude directe du couple

L'étude du couple peut se déduire du diagramme du cercle puisque \overline{mM} est proportionnel au couple. On peut aussi, comme dans l'étude simplifiée, en faire une étude directe :

$$P_e = \frac{3R_2}{g} \cdot I_2^2 = 3 \cdot \frac{R_2}{g} \cdot \left(\frac{n'_2}{n'_1}\right)^2 \cdot V_1^2 \cdot \frac{1}{\left(\frac{R_2}{g}\right)^2 + \omega^2 l_s^2} = C_e \Omega_S$$

Soit aussi :

$$C_e = \frac{3}{\Omega_S} \cdot \left(\frac{n'_2}{n'_1}\right)^2 \cdot V_1^2 \cdot \frac{1}{\omega l_s} \cdot \frac{1}{\frac{R_2}{g\omega l_s} + \frac{g\omega l_s}{R_2}}$$

Si le réseau est à fréquence fixe, on aura :

$$C_e = K \cdot V_1^2 \cdot \frac{1}{\frac{g_0}{g} + \frac{g}{g_0}} \text{ avec } g_0 = \frac{R_2}{\omega l_s}$$

L'étude de cette expression montre que le couple passe par un maximum pour $g = g_0$: $C_{e_{max}} = \frac{KV_1^2}{2}$.

$$- g \ll g_0 : C_e \simeq K \cdot V_1^2 \cdot \frac{g}{g_0}$$

$$- g \gg g_0 : C_e \simeq K \cdot V_1^2 \cdot \frac{g_0}{g}$$

Ces remarques permettent de tracer la courbe de la figure 5.31 que l'on pourra aussi reconstituer en reprenant le diagramme du cercle.

5.5 Mise en œuvre de la machine asynchrone

5.5.1 Caractéristiques du moteur asynchrone

Les calculs précédents permettent de représenter le courant I'_1 , le facteur de puissance, le couple en fonction de la vitesse N . Sur la figure 5.32 on trouvera en traits pleins les résultats de l'étude approchée et en traits pointillés les résultats de l'étude complète.

Couple électromagnétique

Le couple est proportionnel au carré de la tension et fonction du rapport $\left(\frac{R_2}{g}\right)$. Pour un même couple, si on augmente R_2 , le glissement augmente dans le même rapport (le couple maximum reste inchangé) comme le montre la figure 5.32.

$$C_e = \text{cste} \Leftrightarrow \frac{g}{R_2} = \frac{g'}{R'_2} \text{ (affinité parallèle à l'axe des abscisses).}$$

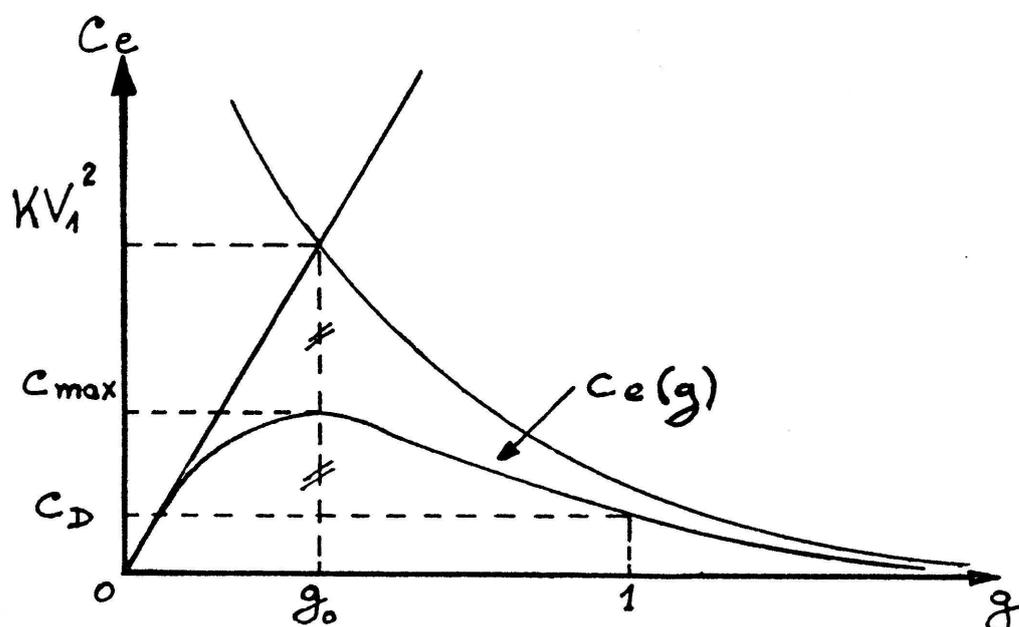


FIGURE 5.31 – Caractéristique mécanique de la machine asynchrone en fonction du glissement.

Pour g fixé, le courant est proportionnel à la tension. Il est fonction, lui aussi, du rapport $\frac{R_2}{g}$ comme le montre la figure 5.33. La valeur du courant minimum est proche de celle du courant magnétisant I_{10} et elle correspond à un glissement négatif ($N > N_s$).

La figure 5.34 montre le $\cos \varphi_1$ fonction de $\frac{R_2}{g}$. Il passe par un maximum lorsque I_1 est tangent au cercle.

Le facteur de puissance est en pratique faible (au maximum voisin de 0,8) : la machine asynchrone consomme toujours une puissance réactive importante.

REMARQUE : Les résultats précédents supposent que R_2 et l_s

sont des paramètres fixes. Ceci est vrai pour les moteurs à rotor bobiné et pour les moteurs à cage formée de barreaux de faible section. Si la section des barreaux est grande ou si les barreaux s'enfoncent profondément dans le rotor, la répartition des courants à l'intérieur de ces conducteurs dépend de la fréquence rotorique (effet de peau), il en résulte une variation de R_2 et de l_s en fonction de g . Le cercle du diagramme se transforme en une figure plus

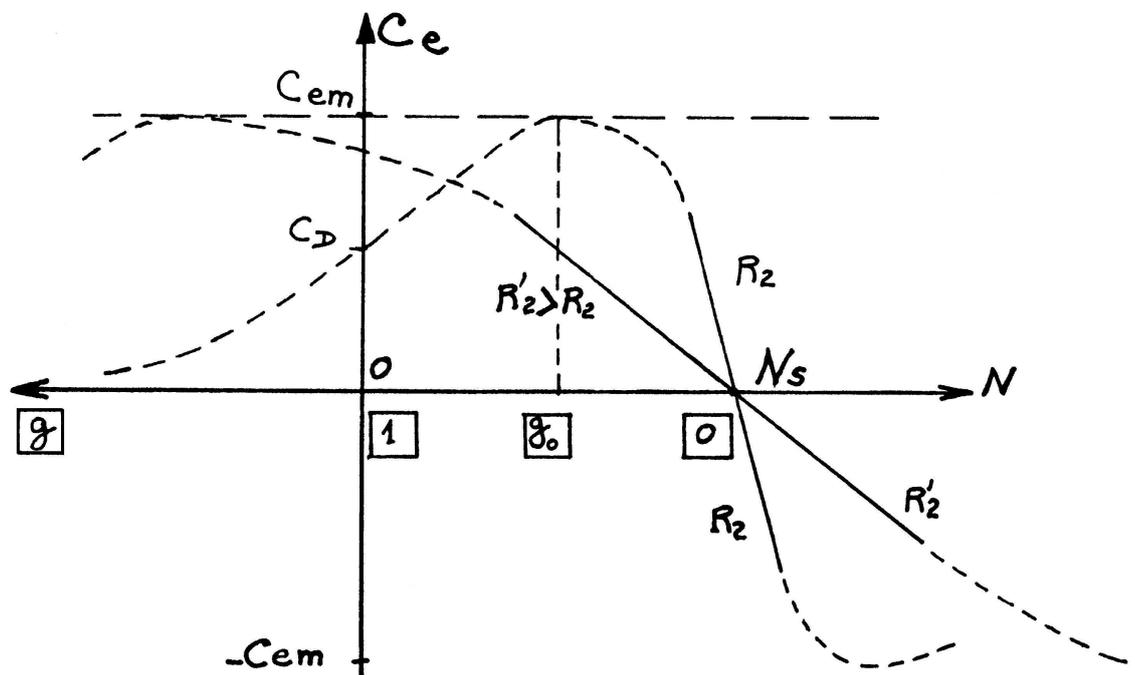


FIGURE 5.32 – Caractéristique mécanique de la machine asynchrone en fonction de la vitesse du rotor.

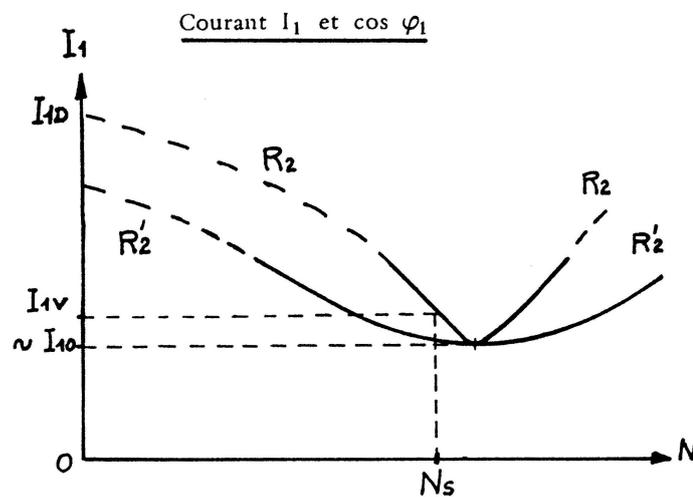


FIGURE 5.33 – Courant absorbé par une machine asynchrone en fonction de la vitesse du rotor.

complexe. La courbe de couple peut alors présenter plusieurs extrémums (voir figure 5.35), ce qui peut être souhaitable.

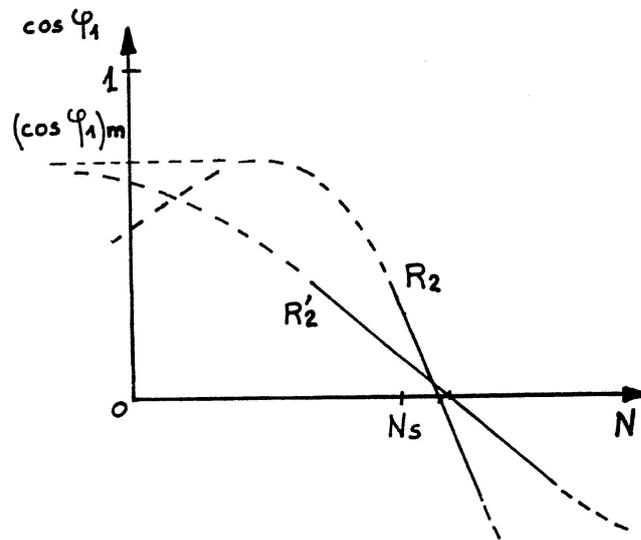


FIGURE 5.34 – $\cos \varphi$ d'une machine asynchrone en fonction de la vitesse du rotor.

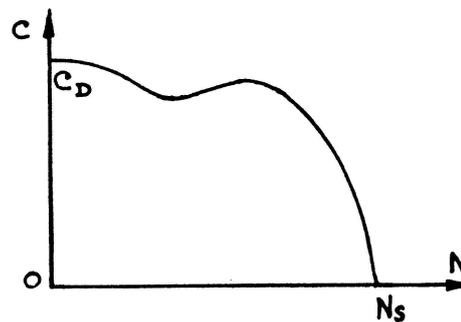


FIGURE 5.35 – Caractéristique mécanique d'une machine asynchrone à rotor à encoches profondes présentant plusieurs extrémums.

5.5.2 Démarrage du moteur asynchrone

5.5.2.1 Démarrage direct

Si le réseau le permet, on peut démarrer un moteur en le branchant directement à l'aide d'un contacteur sur le réseau. Le courant de pointe au démarrage, I_D , est alors de 6 à 7 fois le courant nominal. Sur des réseaux où l'absorption d'un tel courant de démarrage peut entraîner un creux de tension préjudiciable (réseau peu « puissant » du type de ceux des navires) il est nécessaire de prévoir des dispositifs de démarrage dont le but est de réduire le courant absorbé lors du démarrage.

5.5.2.2 Démarrage étoile-triangle

On utilise un moteur qui doit être normalement couplé en triangle sur le réseau. Un commutateur permet de brancher, pendant le démarrage, le stator en étoile. Chaque enroulement, placé sous la tension $V = \frac{U}{\sqrt{3}}$ absorbe un courant divisé par $\sqrt{3}$. Du fait du couplage, le courant de ligne est divisé par 3 par rapport au cas précédent.

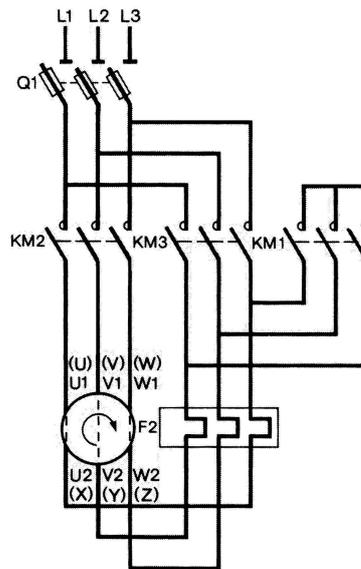


FIGURE 5.36 – Démarrage étoile-triangle d'une machine asynchrone.

Comme la tension aux bornes d'un enroulement est divisé par $\sqrt{3}$, le couple est lui aussi divisé par 3 comme le montre la figure 5.37. Il faut donc que le couple obtenu au démarrage reste supérieur au couple résistant.

A la fin du démarrage en étoile, on obtient la vitesse N_y ; on commute les enroulements en triangle et la vitesse tend vers N_d . Ce mode de démarrage est très simple mais conduit à un faible couple au démarrage et à un brutal régime transitoire lors du passage d'étoile à triangle.

5.5.2.3 Démarrage par impédances statoriques

On réduit la tension stator en insérant, lors du démarrage, des résistances ou des inductances en série avec les enroulements du stator comme le montre la figure 5.38. Le couple au démarrage est réduit dans un rapport réglable. Ce mode de démarrage est plus souple : on peut fractionner les impédances et les court-circuiter progressivement.

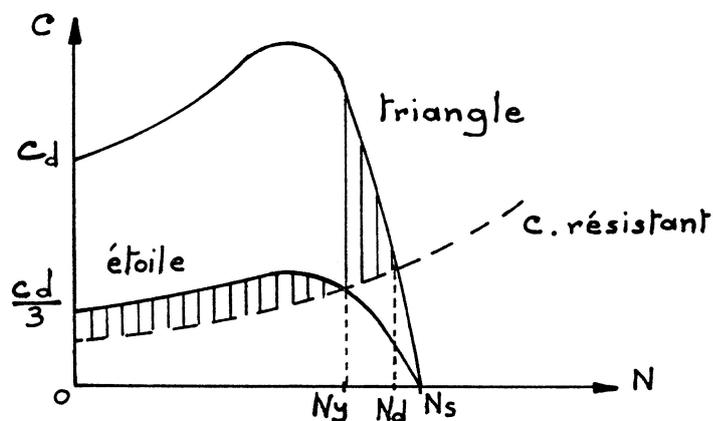


FIGURE 5.37 – Caractéristique mécanique lors d'un démarrage étoile-triangle.

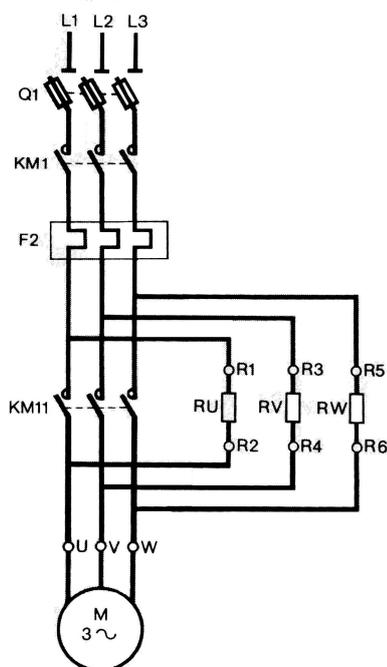


FIGURE 5.38 – Démarrage par insertion de résistances statoriques.

NOTA On peut aussi alimenter le moteur sous tension réduite par un auto-transformateur comme le montre la figure 5.39. Sur cette figure, le démarrage s'effectue généralement en trois temps :

1. KM3 est ouvert et KM1, KM2 sont fermés ce qui permet d'alimenter le stator sous tension réduite par l'intermédiaire de l'auto-transformateur ;
2. KM1 est ouvert, KM3 est toujours ouvert et KM2 fermé. L'auto-transformateur

ne fonctionne plus mais les impédances situées en amont des prises sur l'auto-transformateur font chuter la tension (dans une moindre mesure que l'abaissement de tension dû à l'auto-transformateur).

3. KM3 est fermé, le moteur est alimenté sous la tension du réseau.

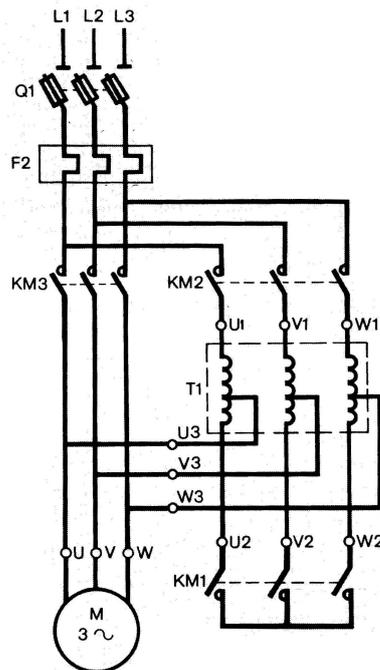


FIGURE 5.39 – Démarrage par auto-transformateur.

5.5.2.4 Démarrage par résistances rotoriques

Les procédés précédents étaient utilisables, que le moteur soit à cage ou à rotor bobiné. Dans ce dernier cas, on peut utiliser un rhéostat rotorique qui agit sur le glissement : si R_2 augmente, on peut alors augmenter le couple au démarrage et réduire l'appel du courant (voir la figure 5.40).

Les figures 5.42 et 5.41 montrent respectivement le dispositif de puissance d'un démarreur à insertion de résistances rotoriques à deux temps et la déformation de la caractéristique mécanique. Avec R_D on obtient la vitesse N_1 . En court-circuitant R_2 on atteint N_2 . Dans le cas de la figure 5.41, le démarrage direct n'aurait pas été possible car $C_{\text{démarrage}} < C_{\text{résistant}}$.

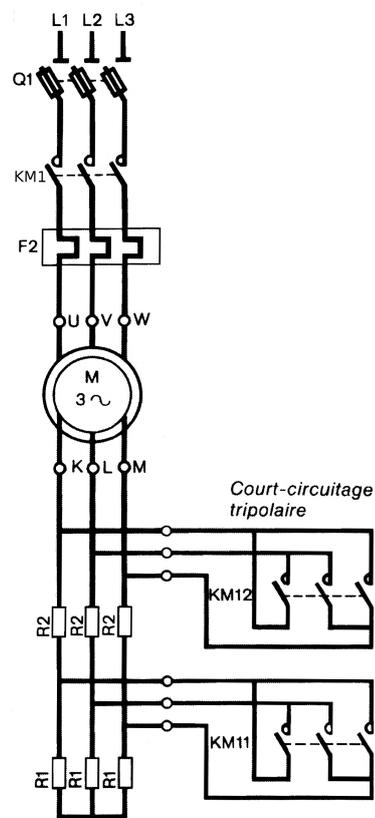


FIGURE 5.40 – Démarrage en trois temps par insertion de résistances rotoriques.

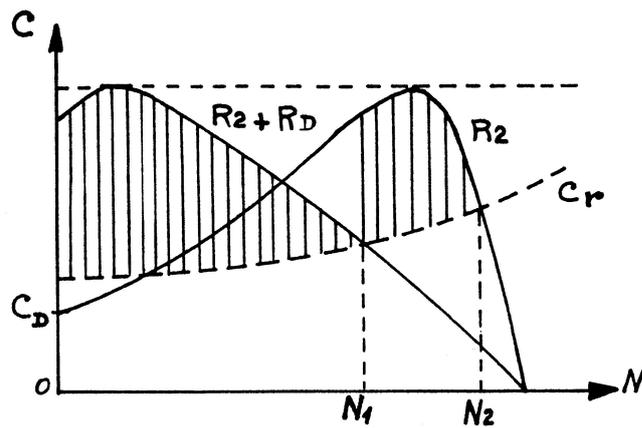


FIGURE 5.41 – Caractéristique mécanique lors d'un démarrage par insertion de résistances rotoriques.

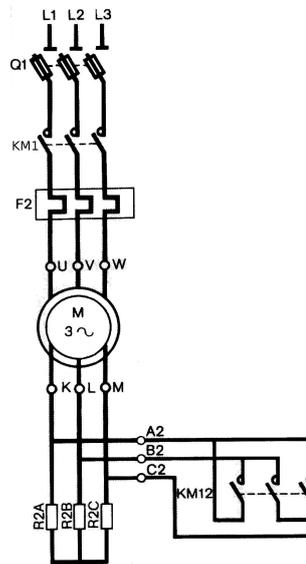


FIGURE 5.42 – Démarrage en deux temps par insertion de résistances rotoriques.

5.5.3 Réglage de la vitesse

5.5.3.1 Action sur le nombre de pôles

On peut construire un moteur à cage dont le stator comporte plusieurs enroulements à nombre de pôles différents. Selon le branchement réalisé, on obtient des vitesses de synchronisme N_s , et par suite N , différentes; les vitesses pourront être très éloignées (exemple : moteur 50 Hz; $p_1 = 2$; $p_2 = 12$).

Lorsque le rapport des vitesses désirées est égal à 2, on peut utiliser un seul enroulement statorique comportant des prises intermédiaires. Selon les branchements relatifs des deux demi-enroulements on obtient $2p$ ou $4p$ pôles, c'est le montage Dahlander illustré par les figures 5.43 et 5.44.

5.5.3.2 Action sur la résistance rotorique

Si le moteur est à bagues, on peut utiliser le rhéostat rotorique pour, à couple donné, augmenter le glissement. On réduit ainsi la vitesse, mais le rendement diminue ($\eta < \frac{N}{N_s}$). L'intérêt de ce réglage est d'être progressif.

REMARQUE : En utilisant des convertisseurs électroniques on peut prélever les courants rotoriques à la fréquence f_R , les mettre à la fréquence f et les renvoyer au réseau. Pour le moteur, tout se passe comme si on augmentait les

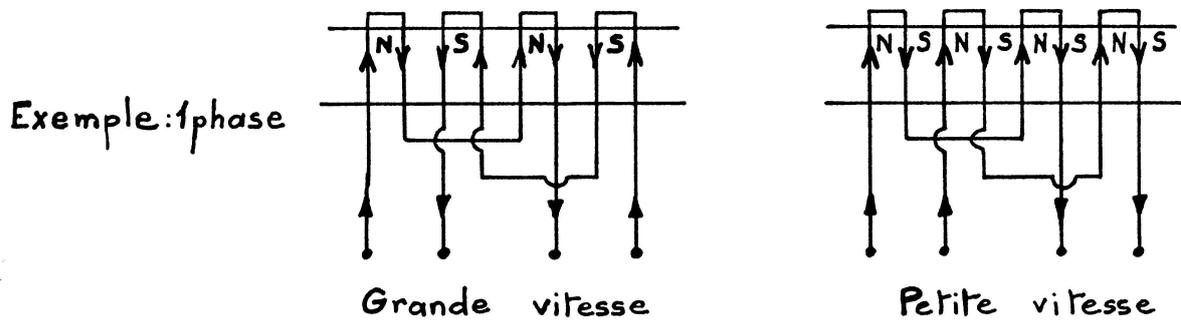


FIGURE 5.43 – Détail du montage Dahlander pour une phase.

Le branchement sera le suivant :

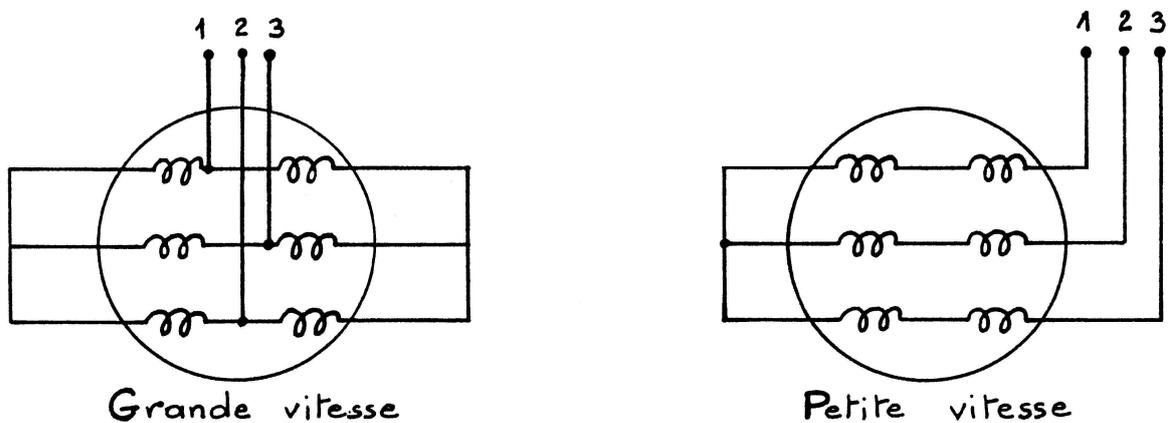


FIGURE 5.44 – Montage Dahlander : branchement du stator.

perles Joule rotor, le glissement augmente. Le rendement global reste en réalité acceptable puisque la différence entre les puissances P_e et P_m est renvoyée au réseau. Ce type de montage s'appelle *cascade hyposynchrone* et est illustré à la figure 5.45. La cascade hyposynchrone ne s'emploie plus guère aujourd'hui, son emploi était réservé aux machines de puissance supérieure à 500 kW.

5.5.3.3 Action sur la tension statorique

Que le moteur soit à cage ou à rotor bobiné, la variation de la valeur efficace de la tension statorique au moyen d'un gradateur déforme la caractéristique mécanique comme l'indique la figure 5.46. C'est un moyen simple de variation de vitesse, mais la plage de variation de vitesse est très réduite, limitée entre la vitesse permettant l'obtention du couple maximum et la vitesse de synchronisme. L'obtention de très faible vitesse n'est pas possible.

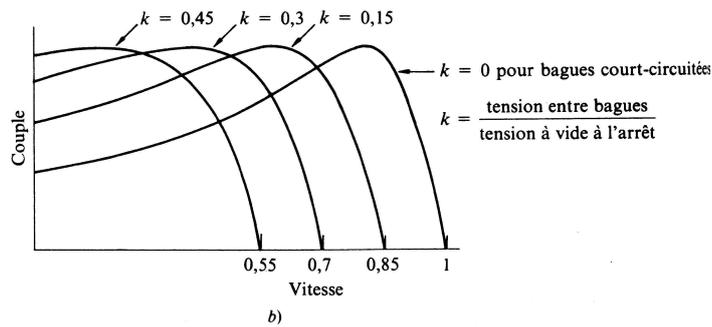
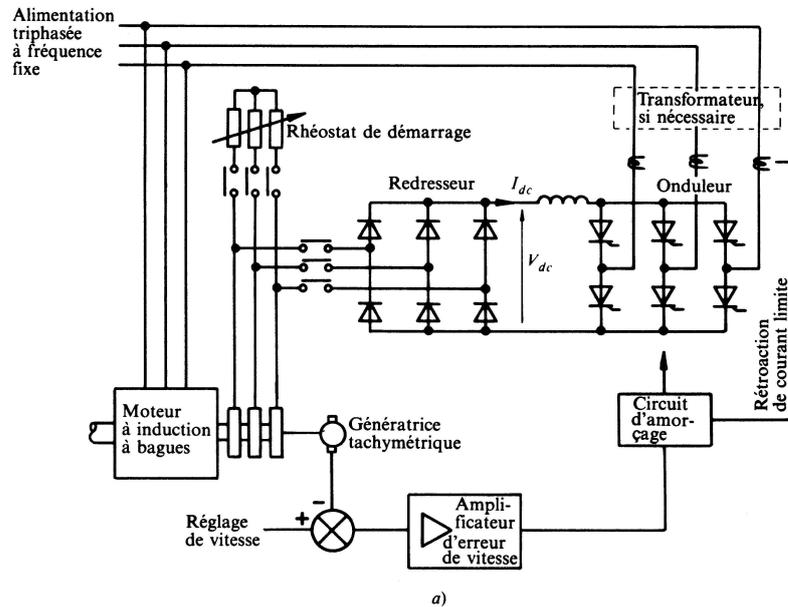


FIGURE 5.45 – a) Schéma de principe d'une cascade hyposynchrone b) déformation de la caractéristique mécanique due à l'action de la cascade hyposynchrone.

5.5.3.4 Action sur la fréquence

On peut enfin faire varier la vitesse en alimentant le moteur sous une fréquence f variable au moyen d'un cycloconvertisseur ou d'un onduleur autonome. La formule de Ferraris $N_s = \frac{f}{p}$ montre que la variation de f entraîne celle de N_s et donc de N . C'est le meilleur moyen d'obtenir une vitesse variable. La figure 5.47 montre comment se déforme la caractéristique mécanique sous l'effet de la variation de fréquence.

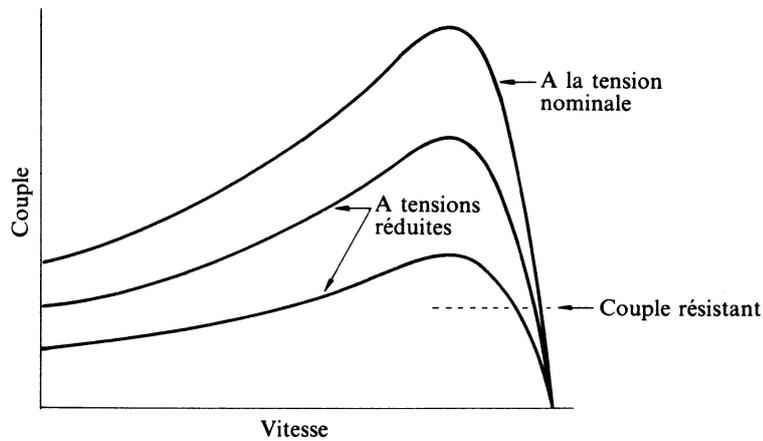


FIGURE 5.46 – Déformation de la caractéristique mécanique d’une machine asynchrone par modification de la tension statorique.

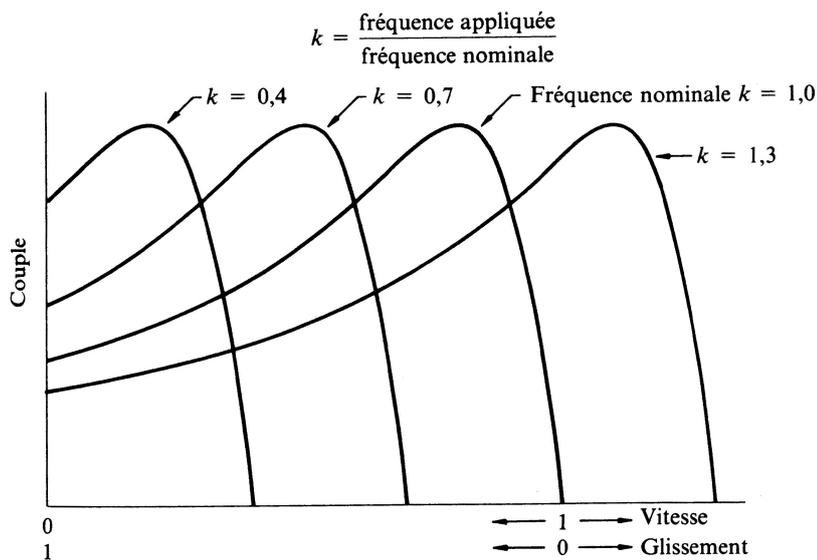


FIGURE 5.47 – Déformation de la caractéristique mécanique d’une machine asynchrone par modification de la fréquence statorique.

5.5.4 Réversibilité - Freinage

5.5.4.1 Réversibilité

Reprenons le diagramme du cercle, nous avons essentiellement considéré les glissements compris entre 1 et 0 ($0 \leq N \leq N_s$). Comme le montre la figure 5.48, le diagramme permet d’envisager les autres cas. Négligeons, pour simpli-

fier, les pertes fer stator, et étudions la distribution des puissances actives :

$$P_a \simeq P_e \sim \overline{mM}$$

$$P_m \sim \overline{xM}$$

$$P_{JR} \sim \overline{mx}$$

Moteur : $0 \leq g \leq 1$ ou $0 \leq N \leq N_S$: **arc AD** de la figure 5.48

$$\overline{mM} = \overline{mx} + \overline{xM}$$

Soit :

$$P_a = P_{JR} + P_m$$

Frein : $g > 1$ soit : $N < 0$; **arc DB** de la figure 5.48.

Le champ tournant statorique et le rotor tournent en sens inverses :

$$\overline{mx} = \overline{mM} + \overline{Mx}$$

Soit :

$$P_{JR} = P_a - P_m$$

La puissance mécanique fournie étant négative, le moteur freine la charge :
 $P_{JR} = P_a + |P_m|$.

Les pertes Joule rotor dissipent P_a et $|P_m|$. Ce fonctionnement ne pourra, en pratique, être obtenu que sous tension réduite en raison des courants trop élevés.

On peut envisager une analogie mécanique pour mieux comprendre ce fonctionnement. Il faut assimiler la machine synchrone à l'embrayage d'une automobile, le champ statorique étant le disque « menant » relié à la boîte de vitesse et le rotor le disque « mené » relié aux roues. Imaginons la voiture en marche avant, analogue au moteur synchrone en marche avant. Ce mode de freinage transposé à la voiture consisterait à débrayer, passer la marche arrière et rembrayer. On imagine sans peine la chaleur considérable dégagée par la

friction des deux disques (analogue à l'effet Joule rotor). Évidemment, il est fortement déconseillé d'essayer ce mode de freinage sur une automobile réelle, l'embrayage n'y survivrait sans doute pas !

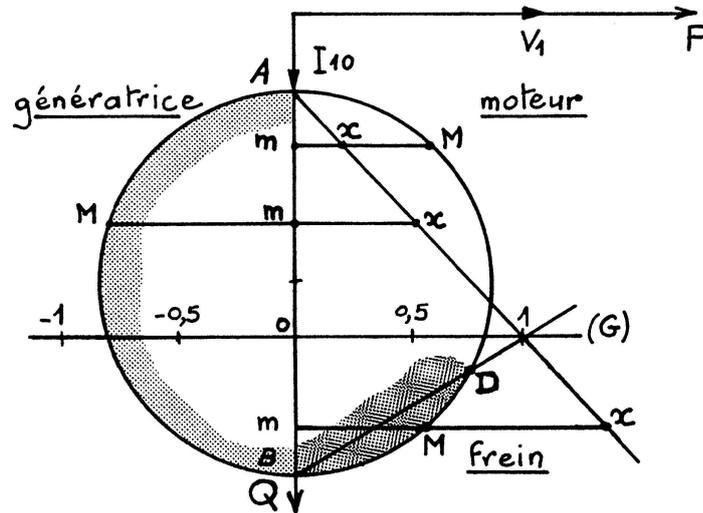


FIGURE 5.48 – Le diagramme du cercle permet de voir le fonctionnement en génératrice ou en freinage hypersynchrone.

Génératrice asynchrone : $g < 0$ soit $N > N_S$; **arc AB** de la figure 5.48.

On entraîne le moteur au-delà de la vitesse de synchronisme.

$$\overline{Mx} = \overline{Mm} + \overline{mx}$$

soit :

$$-P_m = -P_a + P_{JR}$$

P_m est négative, donc absorbée; de même P_a est négative, donc fournie au réseau :

$$|P_m| = |P_a| + P_{JR}$$

La machine asynchrone entraînée à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme fournit de la puissance au réseau; C_e apparaît alors comme un couple résistant, voir la figure 5.49. La génératrice asynchrone permet, sans problèmes de couplage et de régulation précise de vitesse (cf. alternateurs) de

fournir de l'énergie active à un réseau triphasé déjà alimenté par ailleurs par des machines asynchrones.

Le fonctionnement autonome de la génératrice ne peut exister : elle doit recevoir la puissance réactive engendrant l'induction tournante de référence.

La génératrice asynchrone, compte tenu de la simplicité de l'installation (absence de coupleur automatique, de régulation de vitesse), est assez répandue. Pratiquement toutes les petites centrales hydrauliques de moins de 5 MW sont constituées d'une génératrice asynchrone.

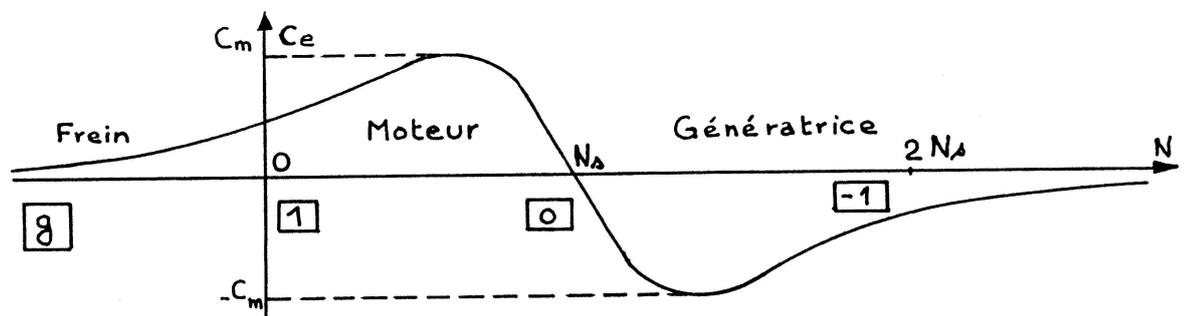


FIGURE 5.49 – Différents modes de fonctionnement de la machine asynchrone sur la caractéristique mécanique.

Freinage

- En survitesse : si la charge tend à entraîner le rotor à une vitesse supérieure à N_s , on obtient un fonctionnement en génératrice et donc un freinage.
- Si on inverse deux phases aux stator pour obtenir un champ tournant en sens inverse de la rotation du rotor, on obtient un couple de freinage. Si le rotor est bobiné, on peut régler l'intensité du freinage en modifiant la résistance rotorique comme le montre la figure 5.50.
- On peut aussi injecter du courant continu dans les enroulements statoriques. On crée un champ de direction fixe dans la machine, le rotor est freiné par un couple d'autant plus élevé que N est importante. L'impédance d'une phase rotorique étant beaucoup plus faible en continu qu'en alternatif, on abaisse la tension à une valeur de 40 à 50 V au moyen d'un transformateur avant de la redresser par un pont de diodes qui alimente deux phases du stator.

NOTA : Si on veut obtenir le blocage du rotor, il faut ajouter un frein mécanique.

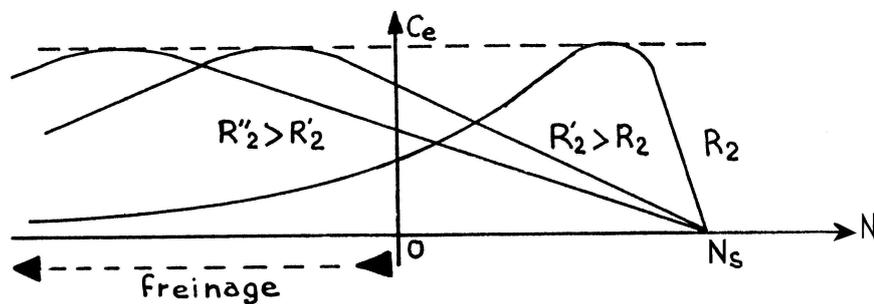


FIGURE 5.50 – Dosage de l'intensité du freinage hypersynchrone d'une machine asynchrone à rotor bobiné par action sur la résistance rotorique.

5.6 Moteur asynchrone monophasé

D'après le théorème de Leblanc, un enroulement monophasé produit deux inductions tournantes de vitesse $\pm \frac{\omega}{p} = \pm \Omega_S$.

Le rotor ne démarre pas seul car il est également sollicité dans les deux sens de rotation par chacune des deux inductions tournant en sens inverse l'une de l'autre.

On peut définir les glissements par rapport aux deux inductions tournantes :

$$g_1 = \frac{\Omega_S - \Omega}{\Omega_S} = 1 - \frac{\Omega}{\Omega_S}$$

$$g_2 = \frac{\Omega_S + \Omega}{\Omega_S} = 1 + \frac{\Omega}{\Omega_S} = 2 - g_1$$

En supposant la machine non saturée, on peut considérer que le couple résulte de la somme des couples C_1 et C_2 exercés sur le rotor par les deux inductions tournant en sens inverse comme le montre la figure 5.51.

Le moteur ne démarre pas seul, il faut le lancer dans un sens ou dans l'autre. Comme le montre la figure 5.52, le couple s'annule pour une vitesse inférieure à celle de synchronisme. La vitesse de synchronisme d'un moteur asynchrone monophasé est donnée par la même formule que pour une machine triphasée : $N_S = \frac{f}{p}$ avec f la fréquence des tensions et courants statoriques et p le nombre de pôles.

Pour lancer le moteur, on utilise une seconde phase, comportant le même nombre de pôles, placée en quadrature dans l'espace par rapport à l'autre et alimentée par un courant déphasé, lui aussi, de $\frac{\pi}{2}$ par un condensateur (voir la figure 5.53), on crée ainsi un champ tournant unique qui fait démarrer le rotor.

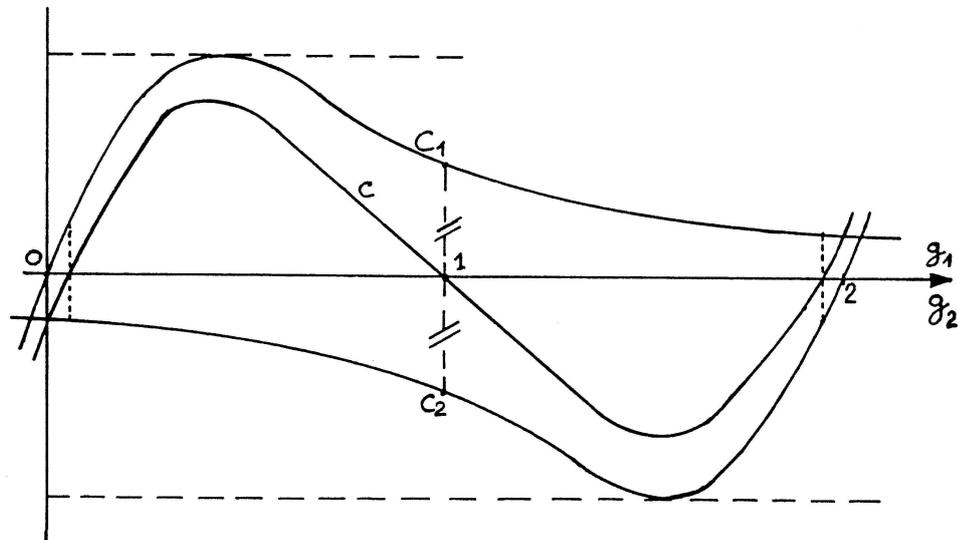


FIGURE 5.51 – Les deux couples créés par une machine asynchrone monophasé en fonction du glissement.

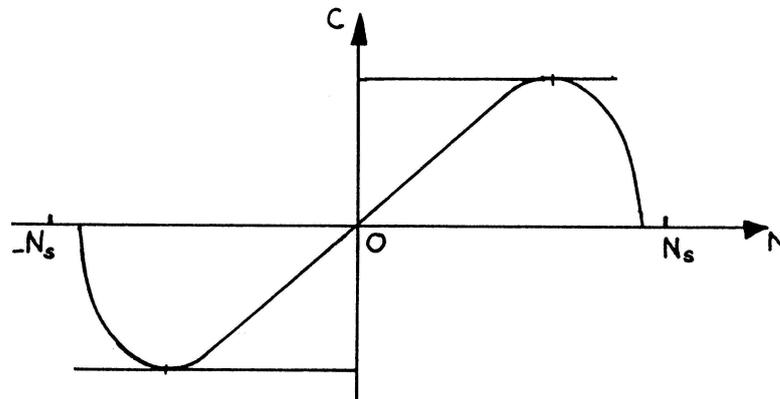


FIGURE 5.52 – Couple d'une machine asynchrone monophasé en fonction de la vitesse du rotor.

Un interrupteur centrifuge peut couper cette phase auxiliaire lorsque le rotor a atteint une certaine vitesse, le rotor « s'accrochera » au champ tournant dans le même sens.

REMARQUES :

- La phase auxiliaire peut rester connectée pendant tout le fonctionnement.
- En asservissement, on utilise de tels moteurs diphasés. Le principe est identique mais pour qu'en agissant sur une des tensions on modifie le

couple produit et pour qu'il y ait freinage on utilise des moteurs à fortes résistance rotorique ($g_0 > 1$).

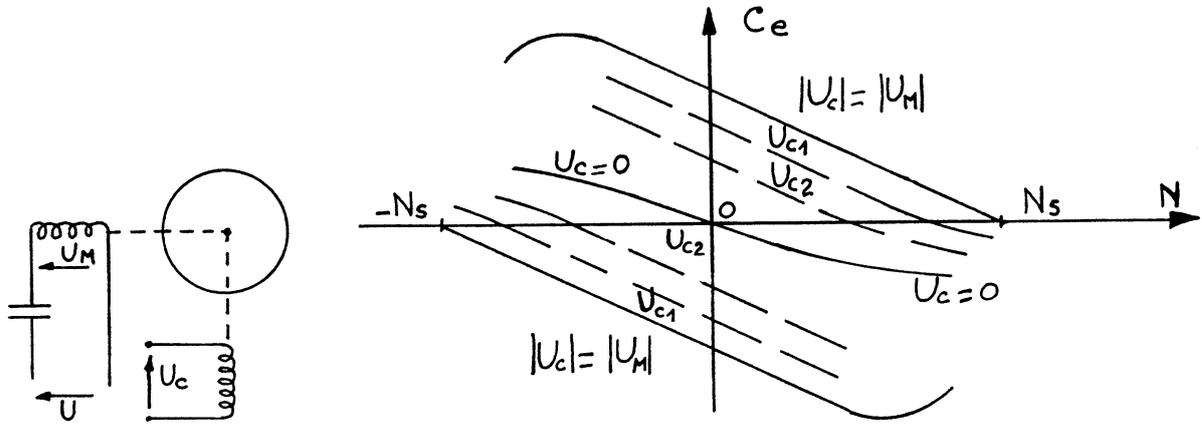


FIGURE 5.53 – Machine asynchrone monophasé, schéma de principe des deux phases en quadrature dans l'espace et dans le temps, caractéristique mécanique.

Si $U_c = U_M$, la courbe de couple est celle d'un moteur asynchrone. C_m étant obtenu pour $N > 0$.

Si $U_c = 0$, contrairement au moteur monophasé, le seul couple obtenu correspond à un freinage (ce résultat se retrouve si on fait la construction du paragraphe précédent à partir de courbes de couple dont le maximum correspond à un glissement g_0 supérieur à un).

Pour des valeurs intermédiaires de U_c , on obtient les courbes de la figure 5.53. Les deux sens de rotation correspondent aux deux sens de branchement de U_c . Par action sur la tension de commande U_c , on obtient les deux sens de rotation et le freinage.