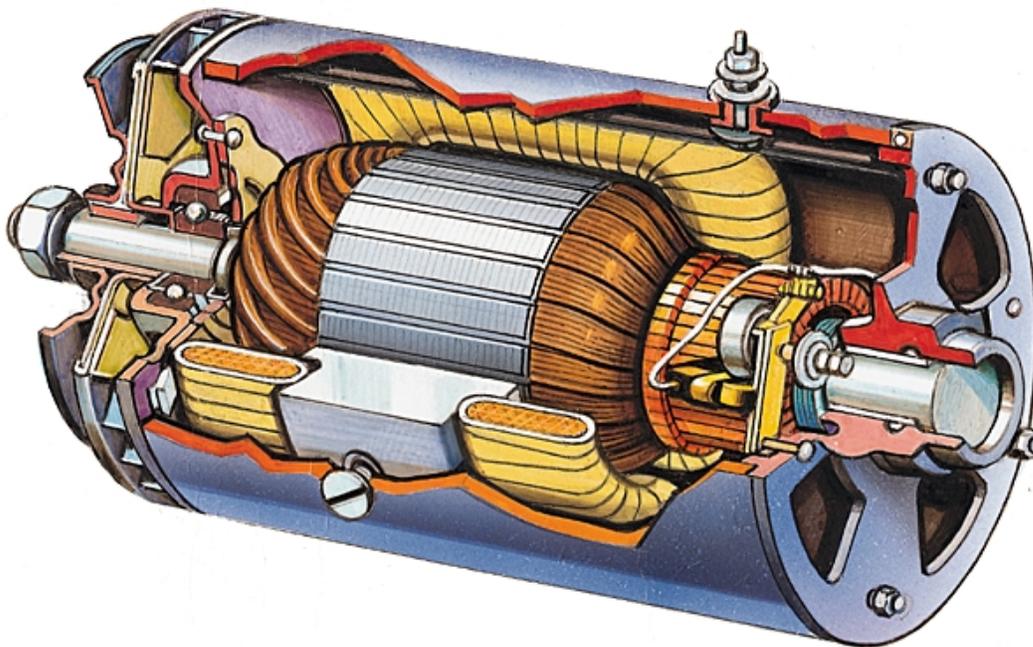


MACHINES À COURANT CONTINU

Cours et Problèmes

Claude CHEVASSU
[site mach elec](#)



21 septembre 2014

Table des matières

1	Machines à courant continu	1
1.1	Symboles	1
1.2	Constitution d'une machine à courant continu	2
1.2.1	L'inducteur	2
1.2.2	L'induit	3
1.2.3	Collecteurs et balais	7
1.3	Équation générale	15
1.3.1	Force électromotrice à vide	15
1.3.2	Étude en charge	18
1.4	Moteur à courant continu	23
1.4.1	Démarrage d'un moteur	24
1.4.2	Moteur à excitation séparée (ou dérivée)	25
1.4.3	Moteur à excitation série	27
1.4.4	Moteur à excitation composée	29
1.4.5	Rendement d'un moteur - couple utile	32
1.4.6	Mise en œuvre des moteurs	33
1.5	Génératrices à courant continu	40
1.5.1	Freinage rhéostatique	41
1.5.2	Génératrice tachymétrique	42
1.5.3	Annexe : génératrices auto-excitées	42
1.6	Exercices et problèmes sur la machine à courant continu	45

1.6.1	Machine à excitation indépendante entraînant un treuil . .	45
1.6.2	Machine à excitation dérivée	46
1.6.3	Treuil entraîné par machine à courant continu : montée et descente	46
1.6.4	Variation de vitesse d'une machine à courant continu . . .	48
1.6.5	Entraînement d'un treuil par une machine à courant continu : montée et descente	49
1.6.6	corrigé de l'exercice 1.6.1 page 45	50
1.6.7	corrigé de l'exercice 1.6.2 page 46	50
1.6.8	corrigé de l'exercice 1.6.3 page 46	51
1.6.9	corrigé de l'exercice 1.6.4 page 48	53
1.6.10	corrigé de l'exercice 1.6.5 page 49	55

Chapitre 1

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.

1.1 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.

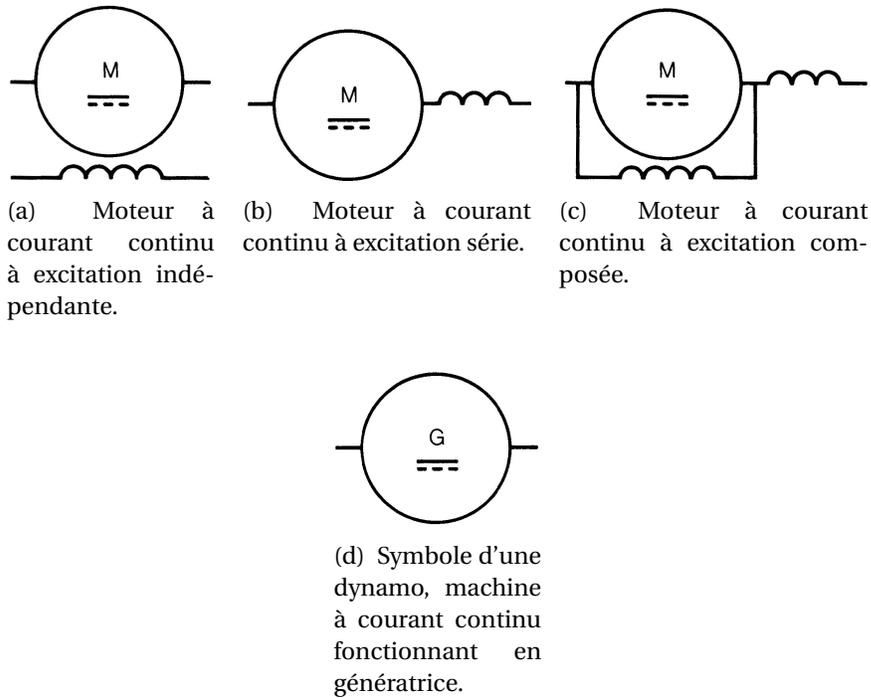


FIGURE 1.1 – Symboles de la machine à courant continu.

1.2 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.

1.2.1 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 1.3 page suivante et 1.4 page 5.

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.

1.2.2 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 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 1.6 page 7.

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 1.8 page 8. Pour résister aux forces centrifuges, ils sont maintenus

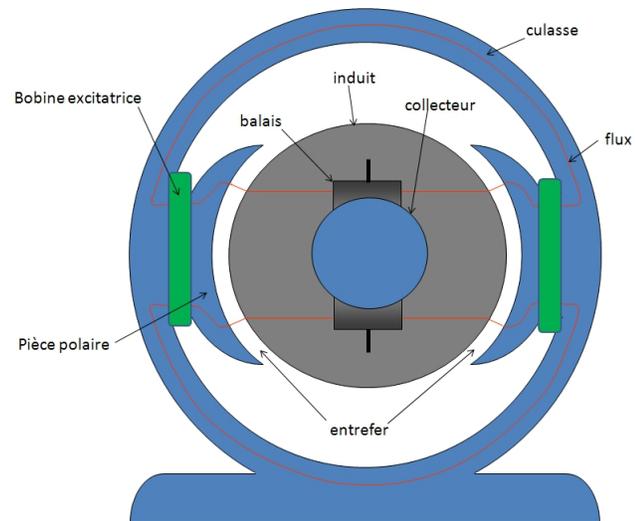


FIGURE 1.2 – Constitution d'une machine à courant continu.



FIGURE 1.3 – Culasse, circuit magnétique statorique d'une machine à courant continu.



FIGURE 1.4 – Culasse, circuit magnétique statorique d'une machine à courant continu.



FIGURE 1.5 – mise en place des bobines sur le circuit magnétique statorique d'une machine à courant continu.



FIGURE 1.6 – Encoche sur l'induit destinée à recevoir les conducteurs dits actifs.



FIGURE 1.7 – Mise en place des conducteurs d'induit dans les encoches et soudure de ceux-ci sur le collecteur.

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.

1.2.3 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



FIGURE 1.8 – Mise en place des conducteurs d'induit dans les encoche et soudure de ceux-ci sur le collecteur.

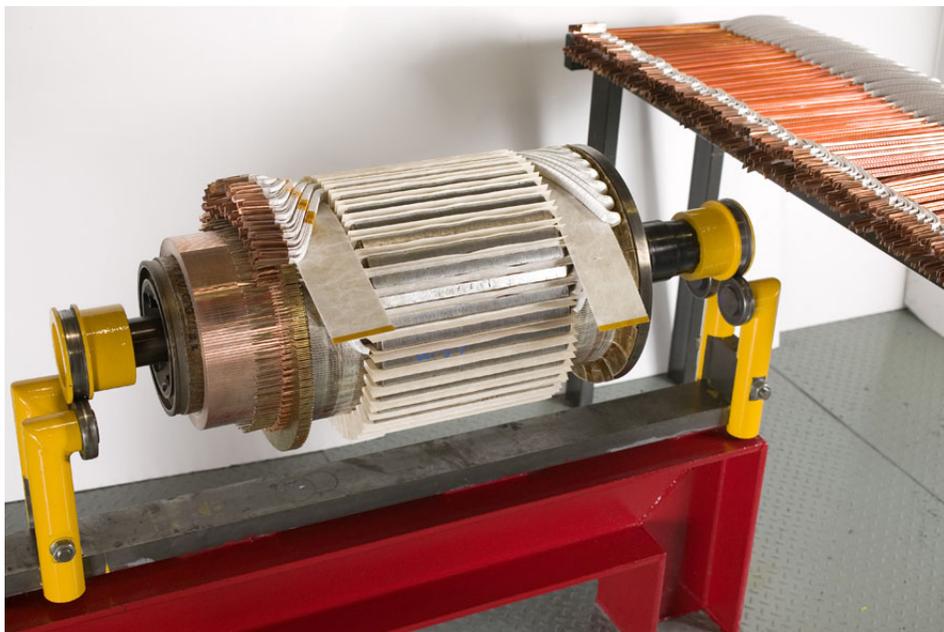


FIGURE 1.9 – Mise en place des conducteurs d'induit dans les encoche et soudure de ceux-ci sur le collecteur.

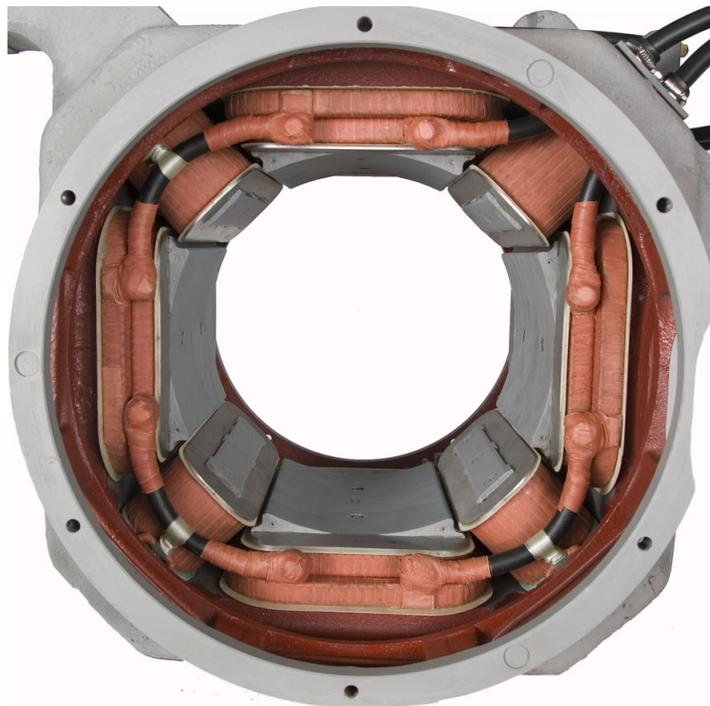


FIGURE 1.10 – Inducteur complet d'une machine à courant continu.



FIGURE 1.11 – Collecteur d'une machine à courant continu de faible puissance.

et le circuit extérieur. La construction du collecteur relève de la mécanique de précision, voir figure [1.12 page suivante](#) page suivante. 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 [1.13 page 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 ressorts ajustables. Pour les intensités très importantes, on utilise plusieurs balais connectés en parallèle, voir figure [1.14 page 14](#).



FIGURE 1.12 – Collecteur d'une machine à courant continu de forte puissance.



FIGURE 1.13 – Balais des premières machines à courant continu.

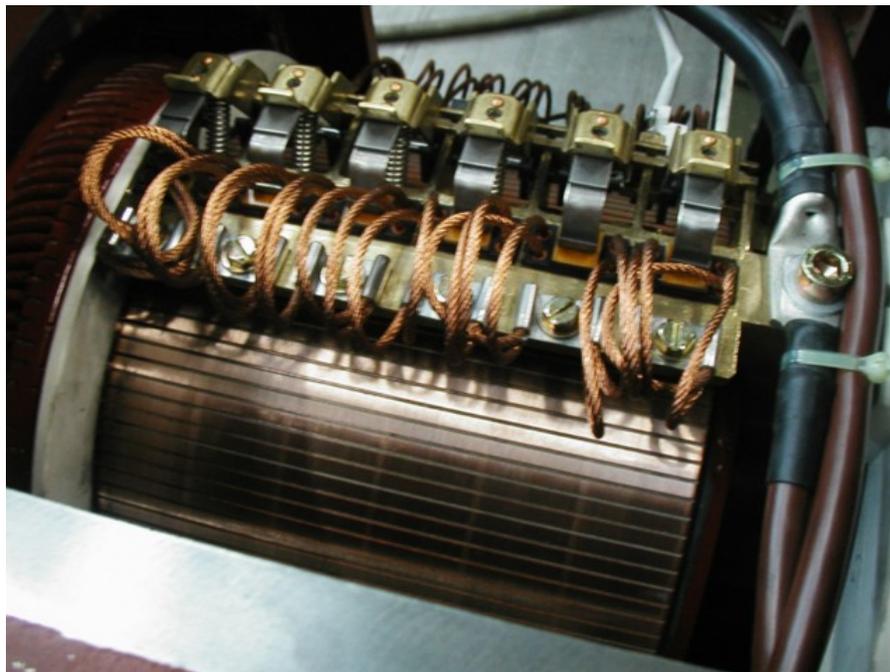


FIGURE 1.14 – Détails de la ligne des balais d'une machine à courant continu de forte puissance.

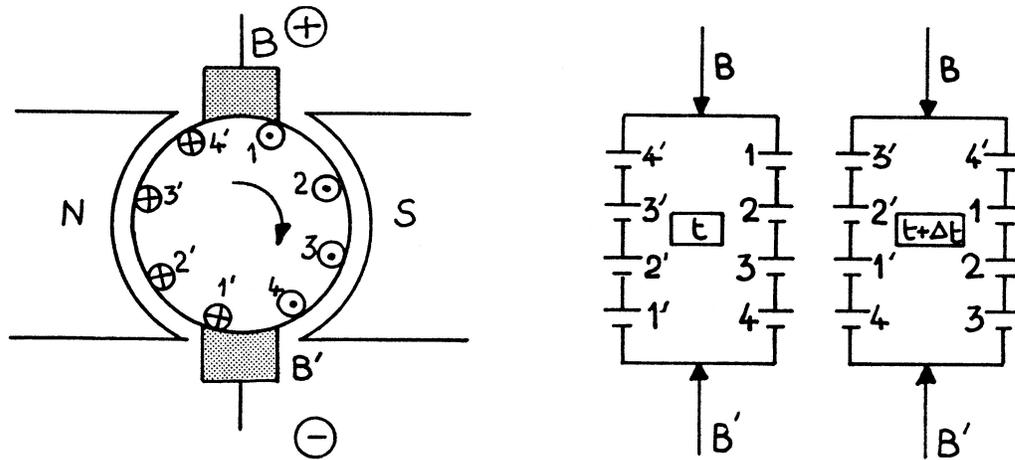


FIGURE 1.15 – F.é.m. produite dans une machine à courant continu.

1.3 Équation générale

1.3.1 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.

1.3.1.1 f.é.m. réellement obtenue

Prenons par exemple un induit comportant 8 conducteurs comme le montre la figure 1.15 ($n = 8$) 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 1.15 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.

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

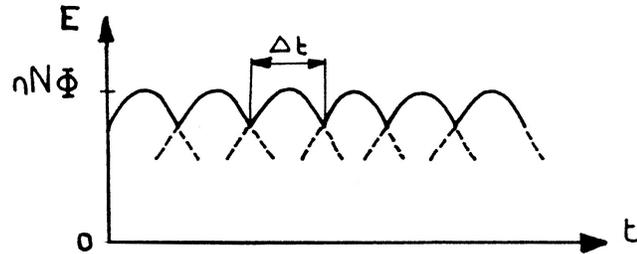


FIGURE 1.16 – Tension ondulée produite par une machine à courant continu.

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 1.16. 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.

1.3.1.2 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 1.17 page suivante 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 en série représentée sur la figure 1.17 page ci-contre, 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 1.18 page suivante.

1.3.1.3 Formule générale de la force électromotrice

On a donc : $E = nN\Phi$

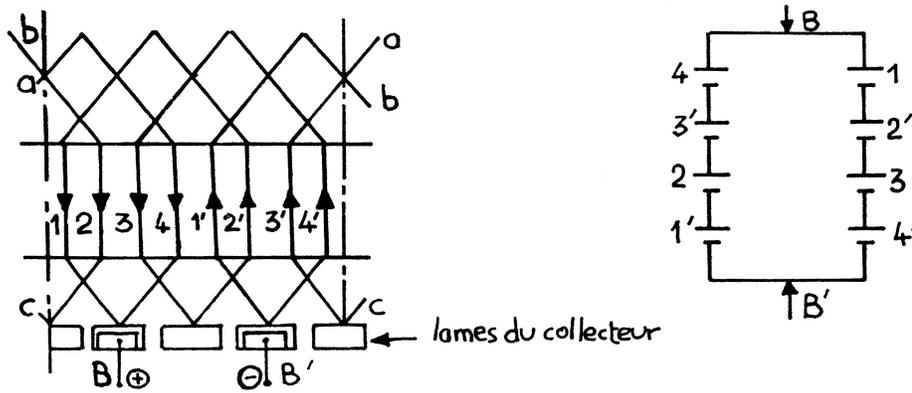


FIGURE 1.17 – Exemple de bobinage de l'induit d'une machine à courant continu.

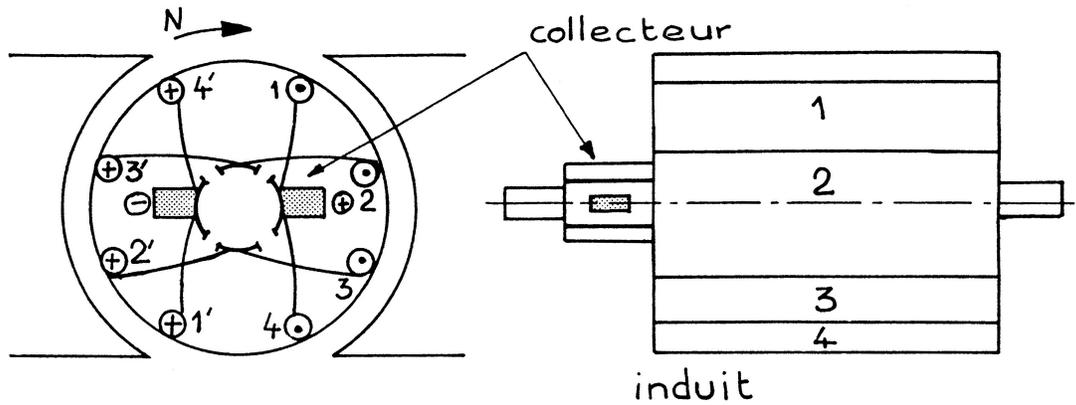


FIGURE 1.18 – Position des balais par rapport à l'induit d'une machine à courant continu.

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 :

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

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

$$E = k N \Phi(I_e)$$

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 .

1.3.2 Étude en charge

1.3.2.1 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.

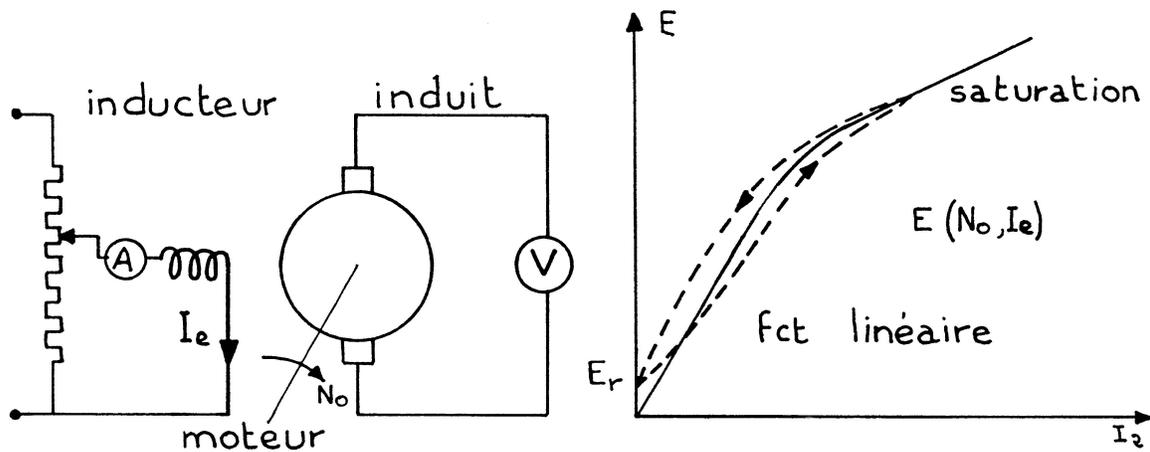


FIGURE 1.19 – Essai à vide et caractéristique à vide d’une machine à courant continu.

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

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 1.21 page suivante.

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 :

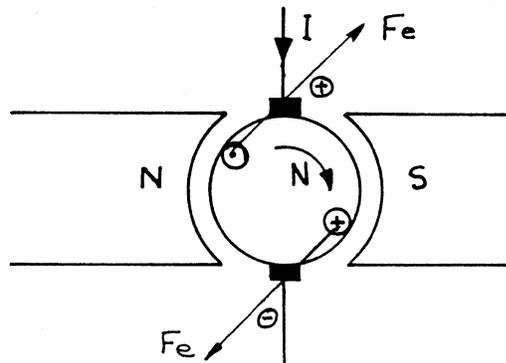


FIGURE 1.20 – Forces de Laplace s'exerçant sur l'induit d'une machine à courant continu.

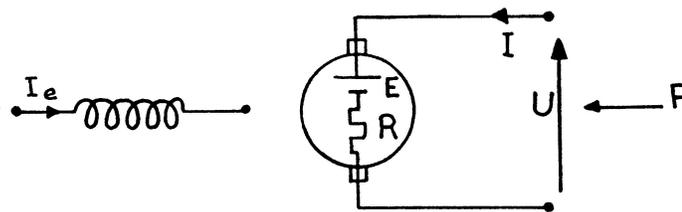


FIGURE 1.21 – Schéma équivalent de Thévenin d'une machine à courant continu.

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

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.

1.3.2.2 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 1.22 page suivante. 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 1.23 page suivante.

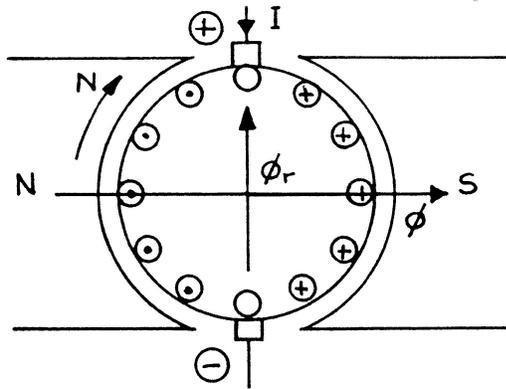


FIGURE 1.22 – Réaction magnétique de l'induit d'une machine à courant continu.

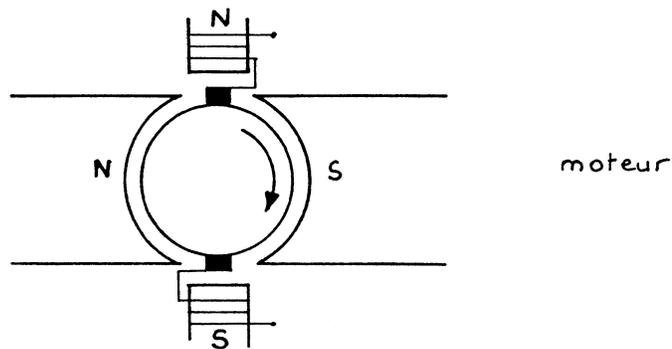


FIGURE 1.23 – Pôles auxiliaires d'une machine à courant continu.

- 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.

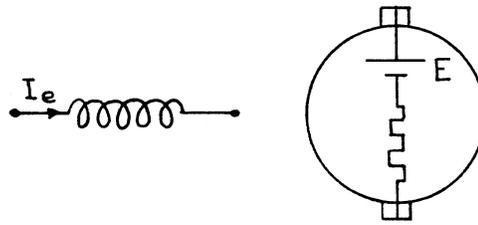


FIGURE 1.24 – Schéma équivalent d'une machine à courant continu.

1.3.2.3 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 :

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

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 1.24.

1.4 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.

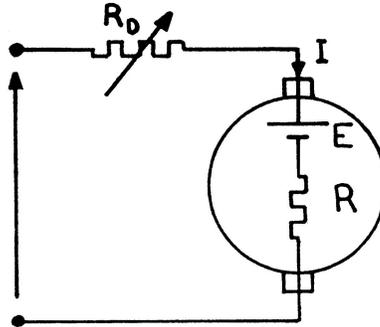


FIGURE 1.25 – Rhéostat de démarrage d'une machine à courant continu.

1.4.1 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 ;
- 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.

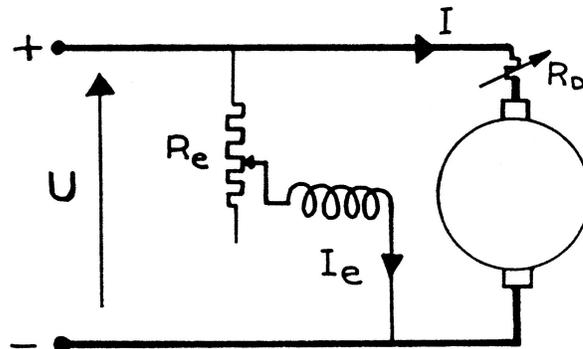


FIGURE 1.26 – Machine à courant continu à excitation séparée.

1.4.2 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 1.26.

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 :

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

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 :

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

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

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.

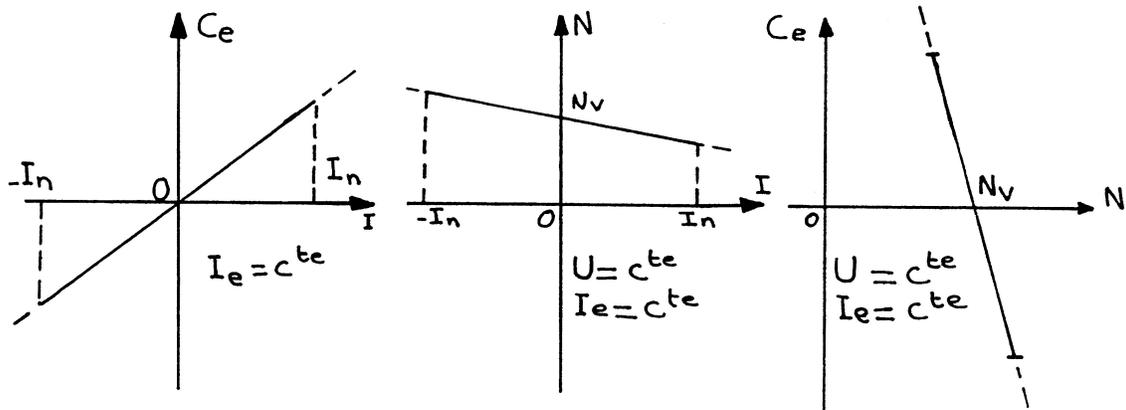


FIGURE 1.27 – Caractéristique mécanique d'une machine à courant continu à excitation séparée.

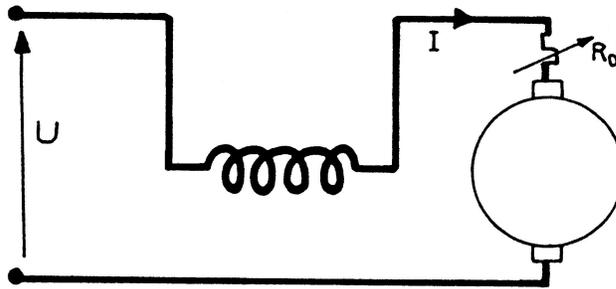


FIGURE 1.28 – Schéma d'une machine à courant continu à excitation série.

1.4.3 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 1.28). On impose donc : $I = I_e$, 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 :

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

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 1.29 page ci-contre.

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 ;

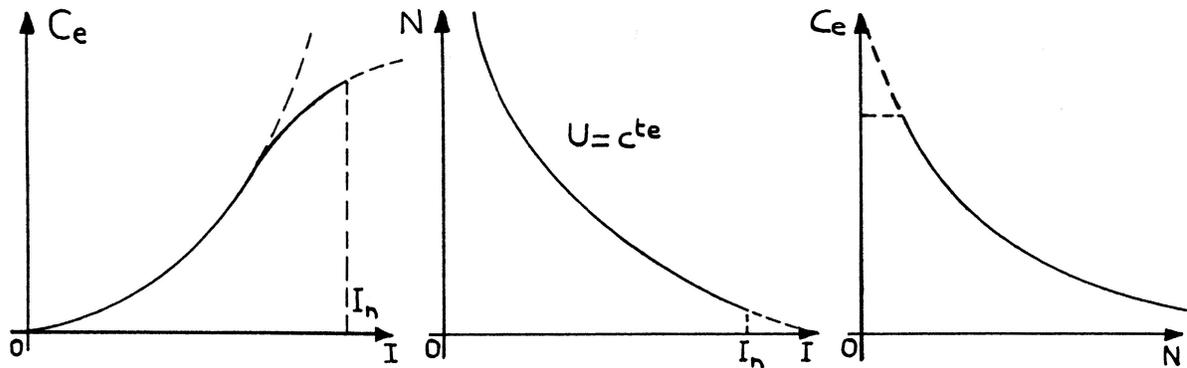


FIGURE 1.29 – Caractéristiques mécaniques d'une machine à courant continu à excitation série.

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 1.29.

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.

1.4.4 Moteur à excitation composée

Le moteur à excitation séparée ne s'emballe pas à vide et répercute sur le courant I tout accroissement de couple ; le moteur série s'emballe, 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 .

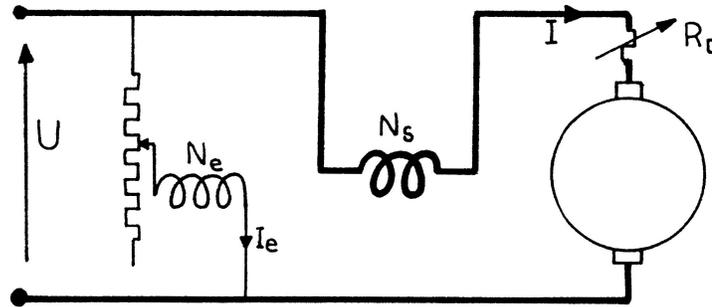


FIGURE 1.30 – Schéma d'une machine à courant continu à excitation composée.

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 1.31 page ci-contre, dans laquelle on inclut dans R' la résistance R_s de l'inducteur série :

$$R' = R_s + R$$

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

COUPLE :

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

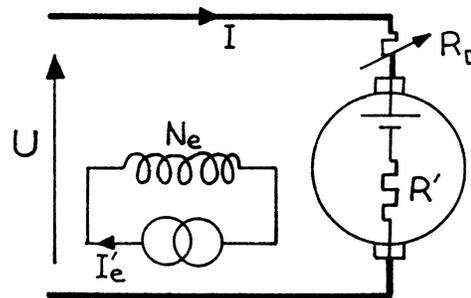


FIGURE 1.31 – Schéma équivalent d'une machine à courant continu à excitation composée.

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 1.32 page suivante.

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

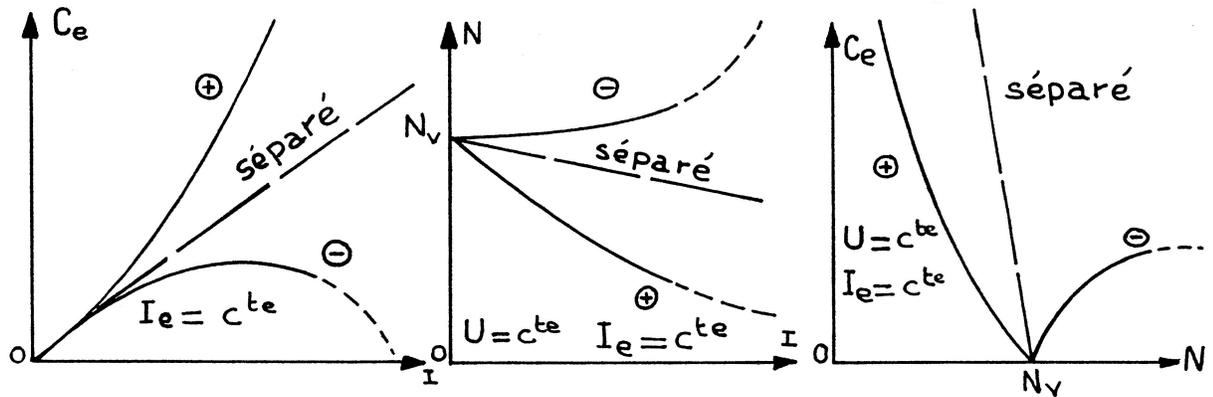


FIGURE 1.32 – Caractéristiques mécaniques d'une machine à courant continu à excitation composée.

$C_e = f(N)$ 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 .

1.4.5 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 1.33 page ci-contre.

Le rendement s'écrira :

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

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 1.34 page 34 donne les couples

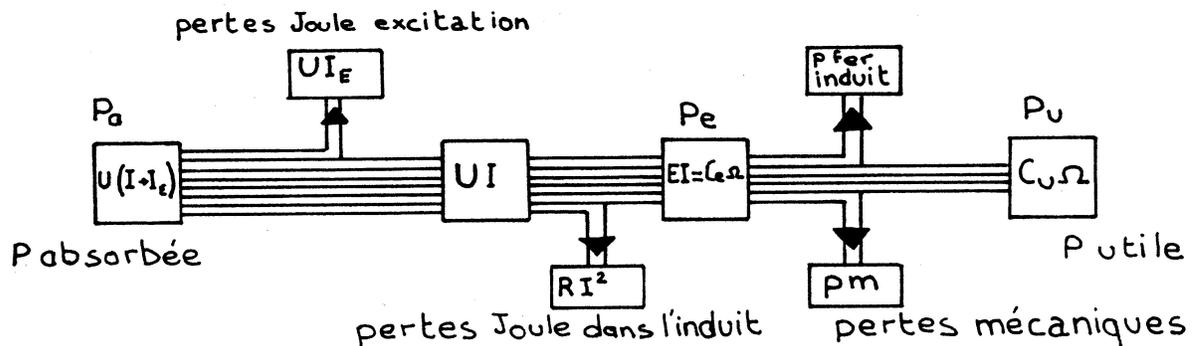


FIGURE 1.33 – Diagramme des pertes d'une machine à courant continu à excitation séparée.

utiles dans les trois modes d'excitation. L'importance du couple de frottement a été exagérée sur la figure.

1.4.6 Mise en œuvre des moteurs

1.4.6.1 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 1.35 page suivante, treuil, hélice ou pompe, entraînés par un moteur à excitation dérivée.

1.4.6.2 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 1.36 page 35 .

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.

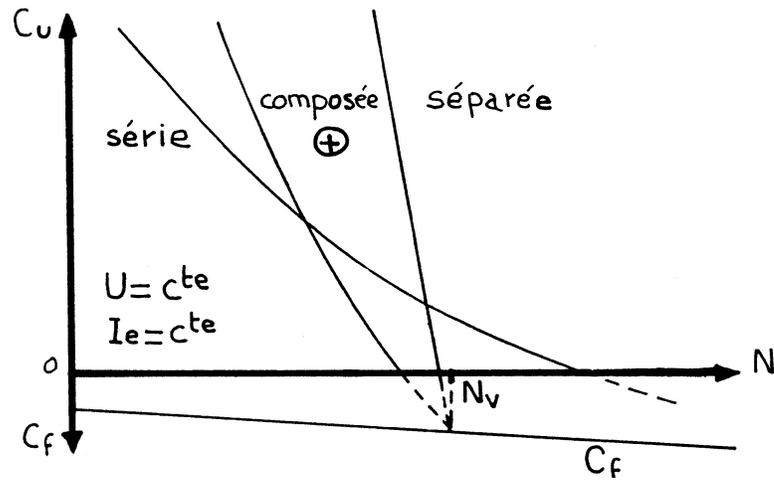


FIGURE 1.34 – Couple utile d'une machine à courant continu en fonction du mode d'excitation.

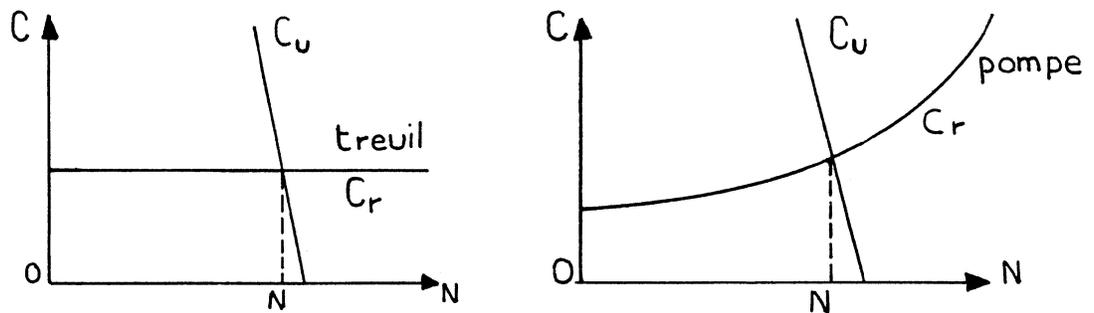


FIGURE 1.35 – Vitesse de rotation d'une machine à courant continu lue sur les caractéristiques mécaniques.

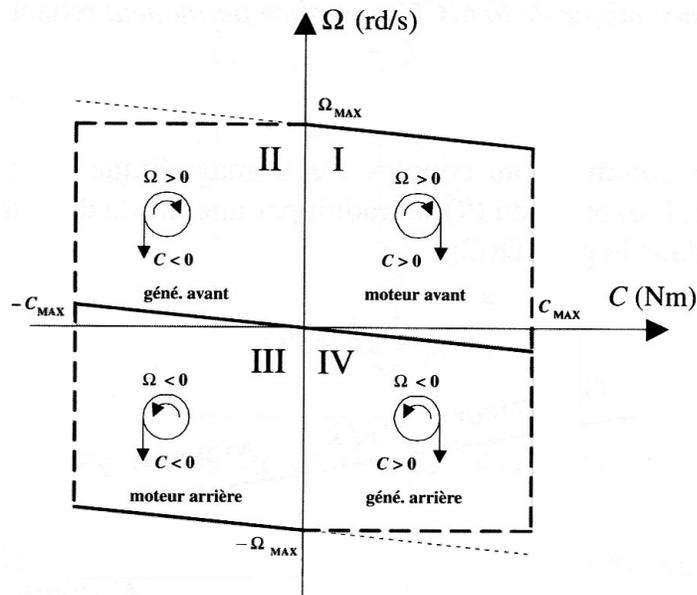


FIGURE 1.36 – Les quatre quadrants de fonctionnement d'une machine électrique tournante.

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

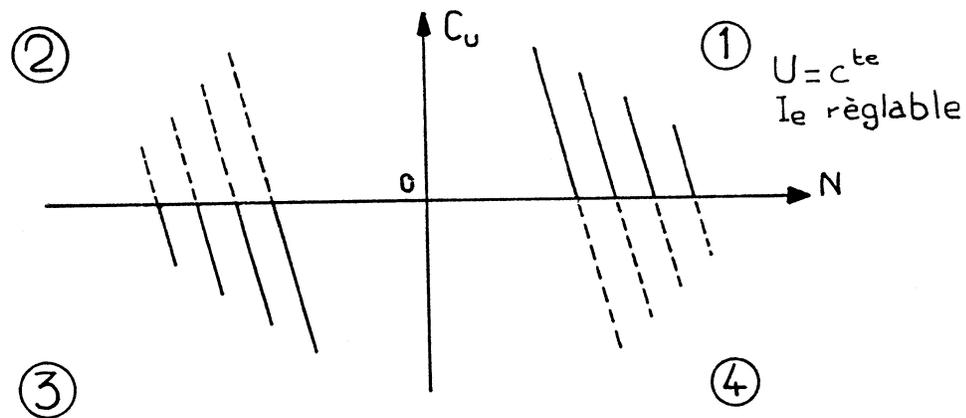


FIGURE 1.37 – Action sur le courant d'excitation d'une machine à courant continu à excitation séparée.

à diodes.

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

1.4.6.3 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 1.37).

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 1.37).

ACTION SUR LA TENSION D'ALIMENTATION U

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

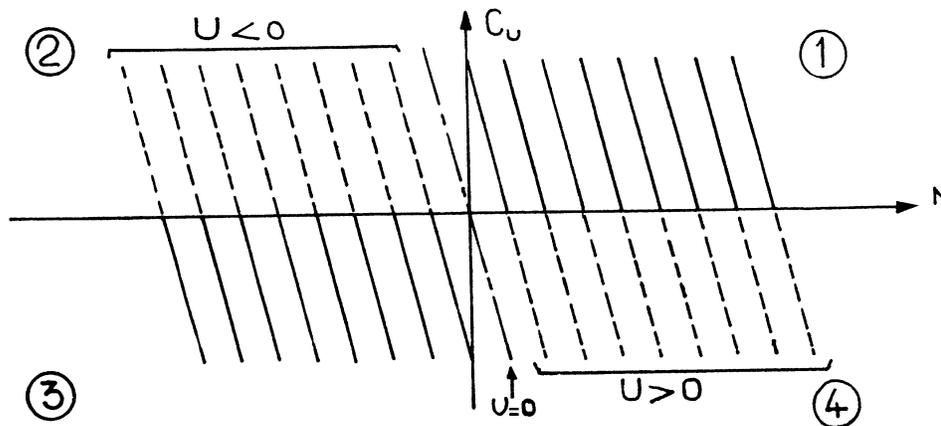


FIGURE 1.38 – Action sur la tension d'alimentation d'une machine à courant continu à excitation séparée.

Si U est positive, on obtiendra le quadrant 1 et, si l'alimentation est réversible, le quadrant 4, voir la figure 1.38. Si U change de signe, sans que l'alimentation ne soit réversible, on obtient les quadrants 1 et 2 de de la figure 1.38. 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 1.39 page suivante.

Le moteur est excité par un courant constant. En négligeant les chutes de tension dans les inducts 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.

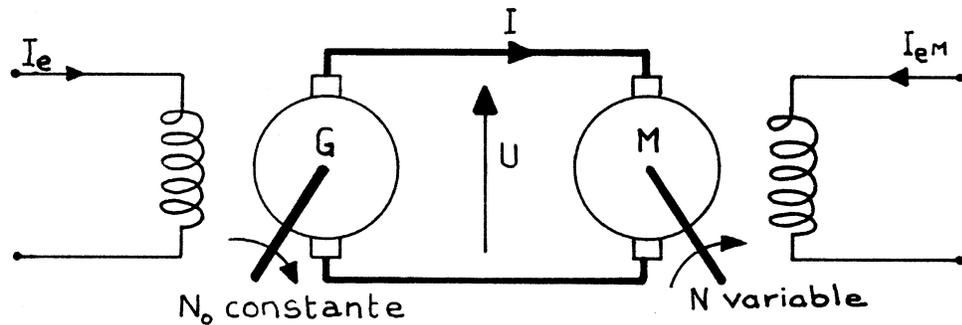


FIGURE 1.39 – Schéma de principe du Ward Léonard.

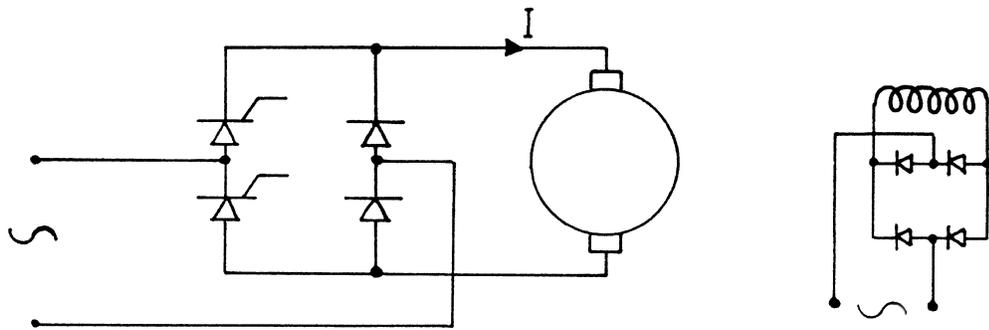


FIGURE 1.40 – Pont mixte alimentant une machine à courant continu à excitation séparée.

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 %).

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 1.40, le pont mixte n'autorise qu'un seul quadrant de fonctionnement.

Moteurs de faibles puissances :

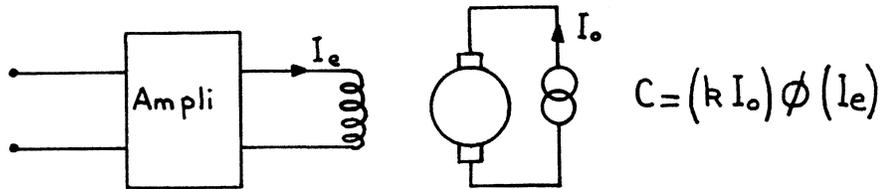


FIGURE 1.41 – Asservissement : commande de l’induit du moteur à courant continu par courant constant.

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 1.41. Si le circuit n’est pas saturé, le couple est proportionnel à I_e .

1.4.6.4 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 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 1.42 page suivante)

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 :

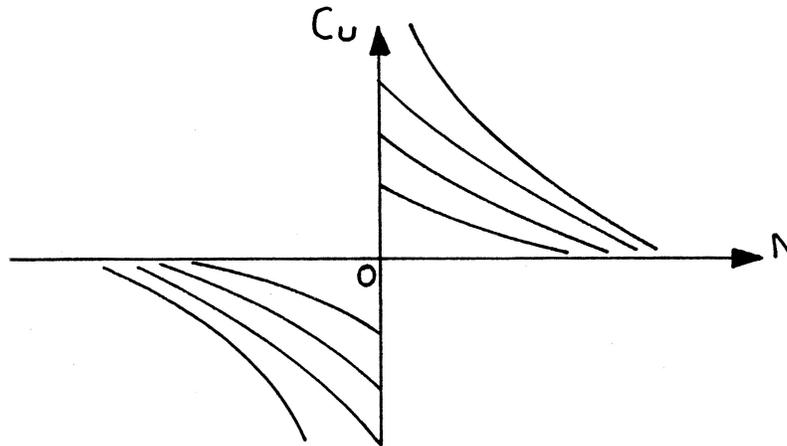


FIGURE 1.42 – Caractéristiques mécaniques du moteur à courant continu à excitation série, quadrant 1 et 3.

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).

1.5 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.

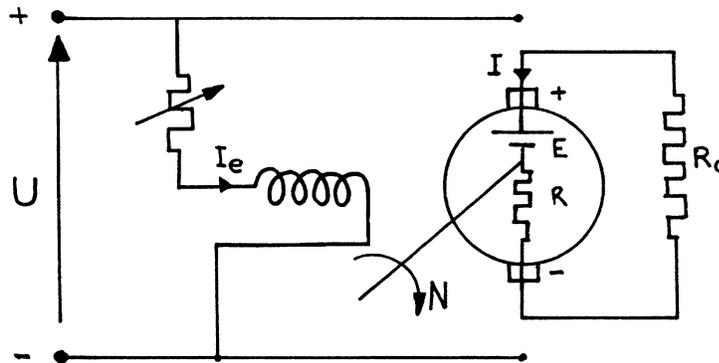


FIGURE 1.43 – Freinage rhéostatique d'un moteur à courant continu, schéma de principe.

1.5.1 Freinage rhéostatique

L'induit du moteur est déconnecté du réseau et rebranché 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 :

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

On peut régler ce couple de freinage (opposé à N) en agissant sur R_C et sur I_e , voir la figure 1.44 page suivante. 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).

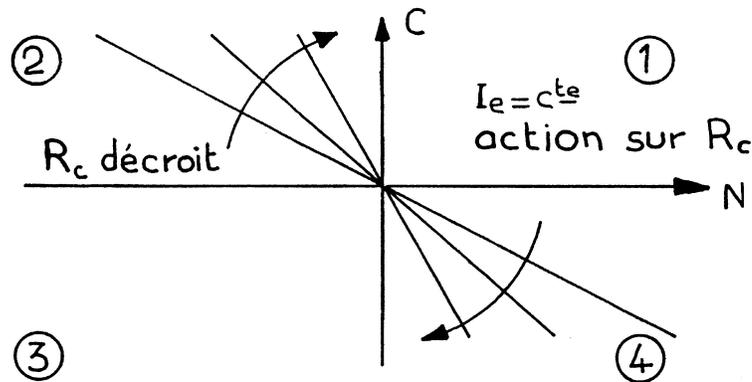


FIGURE 1.44 – Freinage rhéostatique d'un moteur à courant continu, action sur la résistance R_C .

1.5.2 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.

1.5.3 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.

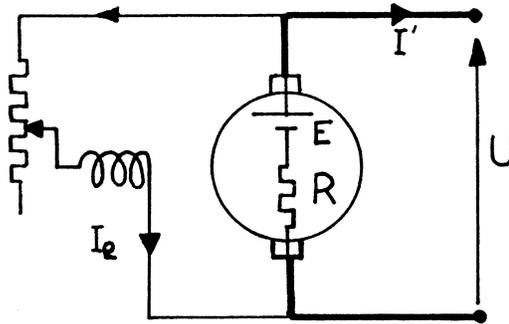


FIGURE 1.45 – Génératrice à excitation dérivée.

1.5.3.1 Génératrice à excitation dérivée

L'inducteur, en série avec un rhéostat d'excitation, est alimenté par la tension U , voir la figure 1.45. 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 1.46 page suivante.

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 ».

1.5.3.2 Génératrice à excitation série

L'inducteur est parcouru par le courant débité I' , voir figure 1.47 page suivante. Si R_s est sa résistance, on a :

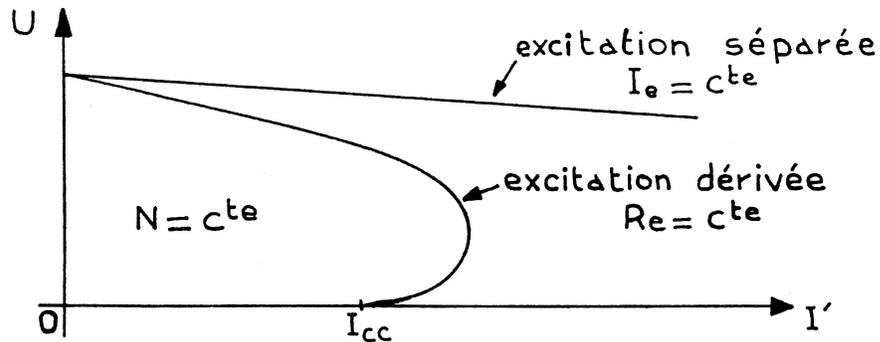


FIGURE 1.46 – Courbe tension/courant d'une génératrice à excitation dérivée.

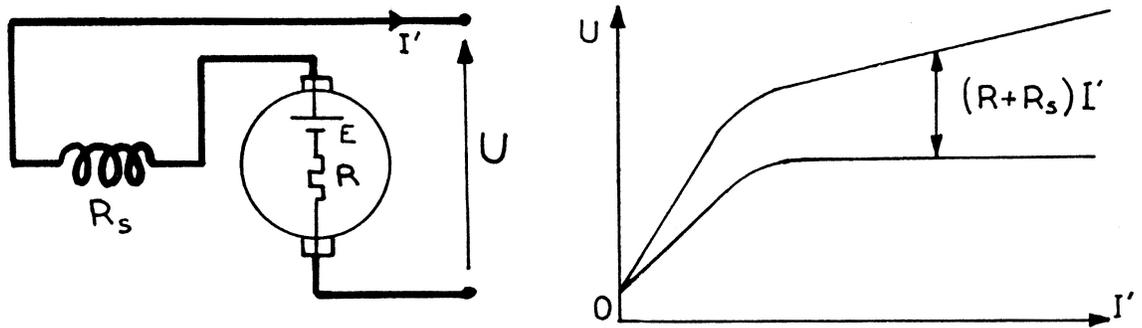


FIGURE 1.47 – Génératrice à excitation série.

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

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.

1.6. EXERCICES ET PROBLÈMES SUR LA MACHINE À COURANT CONTINU⁴⁵

1.5.3.3 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.

1.6 Exercices et problèmes sur la machine à courant continu

1.6.1 Machine à excitation indépendante entraînant un treuil

L'énergie d'un treuil est fournie par un moteur à courant continu à excitation indépendante dont l'induit et l'inducteur sont alimentés sous une tension $U = 230\text{V}$. En charge, le treuil soulevant verticalement une charge à la vitesse de 4 m/s , le moteur tourne à une vitesse de 1200 tr/min et son induit absorbe une puissance électrique de $17,25\text{ kW}$. La résistance de l'induit est de $0,1\ \Omega$; celle de l'inducteur de $46\ \Omega$; les pertes constantes ont pour valeur 1 kW ; l'accélération de la pesanteur sera prise égale à $g = 10\text{ m/s}^2$; le rendement du treuil est de $0,75$.

1. Calculer les courants absorbés par l'induit et l'inducteur.
2. Calculer la force électromotrice du moteur.
3. Calculer la puissance utile du moteur.
4. Calculer le couple utile du moteur.
5. Calculer le rendement du moteur.

6. Calculer le rendement global de l'équipement.
7. Calculer la masse soulevée par le treuil.

Voir le corrigé page page 50

1.6.2 Machine à excitation dérivée

Un moteur à excitation dérivée est alimenté sous une tension constante de 200 V. Il absorbe un courant $I = 22\text{ A}$. La résistance de l'inducteur est $R_e = 100\Omega$, celle de l'induit $R_a = 0,5\Omega$. Les pertes constantes sont de 200 W.

1. Calculer les courants d'excitation et d'induit.
2. Calculer la force contre-électromotrice.
3. Calculer les pertes par effet Joule dans l'inducteur et dans l'induit.
4. Calculer la puissance absorbée, la puissance utile et le rendement global.
5. On veut limiter à 30 A l'intensité dans l'induit au démarrage. Calculer la valeur de la résistance du rhéostat de démarrage.
6. On équipe le moteur d'un rhéostat de champ. Indiquer son rôle. Dans quelle position doit se trouver le rhéostat de champ au démarrage? Justifier votre réponse.

Voir la correction page page 50.

1.6.3 Treuil entraîné par machine à courant continu : montée et descente

Un moteur à courant continu à excitation indépendante entraîne un treuil soulevant verticalement une charge de masse M kg suspendue à l'extrémité d'un filin enroulé sur le tambour du treuil, de rayon supposé constant égal à 0,1 m. La vitesse de rotation du tambour est égale au vingtième de la vitesse de rotation du moteur. L'induit du moteur de résistance intérieure $0,5\Omega$ est connecté aux bornes d'une source d'énergie fournissant une tension réglable de $U = 0\text{ V}$ à $U_n = 240\text{ V}$ = tension nominale du moteur.

On donne : $g = 10\text{ m/s}^2$. On adoptera les hypothèses simplificatrices suivantes :

1.6. EXERCICES ET PROBLÈMES SUR LA MACHINE À COURANT CONTINU 47

- rendement du treuil = 1 ;
 - négliger toutes les pertes du moteur sauf celle par effet Joule dans l'induit ou dans la résistance de démarrage ;
 - négliger la réaction d'induit et la saturation des circuits magnétiques.
1. Le courant inducteur est réglé à sa valeur maximum admissible $I_e = 5 \text{ A}$. On constate alors que le treuil hisse la charge $M = \frac{4800}{\pi} \text{ kg}$ à la vitesse $v = \frac{11 \cdot \pi}{60} \text{ m/s}$ alors que la puissance absorbée par l'induit est de 9,6 kW et que la tension appliquée à l'induit est égale à la tension nominale.
 - 1.1. Calculer l'intensité du courant absorbé par l'induit du moteur.
 - 1.2. Calculer la force contre-électromotrice du moteur.
 - 1.3. Calculer la puissance utile du treuil.
 - 1.4. Calculer le couple utile du moteur.
 - 1.5. Calculer la vitesse de rotation du moteur.
 2. La charge M et le courant d'excitation gardant les valeurs définies précédemment.
 - 2.1. Calculer l'intensité absorbée par l'induit lorsque, alimenté sous la tension U_c , celui-ci développe un couple moteur permettant de maintenir la charge M décollée et immobile.
 - 2.2. Calculer la valeur de la tension U_c précédente.
 - 2.3. Calculer la valeur de la tension U_d de démarrage que l'on peut appliquer brusquement à l'induit pour décoller la charge M et lui communiquer une vitesse constante sans que la pointe de courant dans l'induit dépasse 60 A.
 - 2.4. Calculer la vitesse stabilisée du moteur à la fin de la première phase du démarrage définie précédemment.
 - 2.5. Calculer la valeur de la résistance de démarrage qu'il serait nécessaire de monter en série avec l'induit du moteur pour limiter à 60 A la pointe de courant dans l'induit lorsque la tension fournie par la source n'est plus réglable mais garde la valeur maximum de 240 V.
 3. La charge hissée n'étant plus que les 4/5 de la charge précédente, à quelles valeurs faut-il régler simultanément la tension appliquée à l'induit, sans résistance de démarrage d'une part, et le courant inducteur d'autre part,

de telle façon que la vitesse de hissage soit la plus élevée possible sans qu'en régime établi l'intensité du courant dans l'induit excède 40 A ? Calculer cette vitesse.

Voir la correction page page 51.

1.6.4 Variation de vitesse d'une machine à courant continu

Soit une machine à courant continu à excitation indépendante parfaitement compensée. Sa résistance d'induit est : $R_a = 0,3 \Omega$. Les pertes constantes seront supposées nulles. On donne à 1200 tr/min :

$I_{excitation}$ (A)	0,5	1	1,5	2	2,5
E (V)	156	258	308	328	338

- La machine étant à vide et le courant d'excitation étant de 1,5 A, on alimente le rotor par une source de tension, supposée idéale, de 400 V.
 - Calculer la vitesse du rotor en tr/min.
- La machine absorbe un courant de 40 A, le courant inducteur est maintenant de 2,5 A et la tension d'alimentation de 300 V.
 - Calculer la vitesse du rotor en tr/min .
- Le rotor est entraîné par un moteur thermique à la vitesse de 1000 tr/min, le courant d'excitation est de 2 A.
 - Calculer la f.é.m. de la machine n° 1 à vide.
- La machine débite sur une machine à courant continu n° 2 parfaitement identique et elle aussi excitée par un courant de 2 A. Cette seconde machine fonctionne à vide.

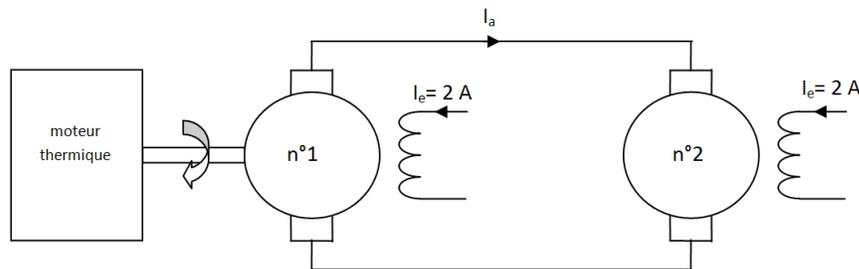


FIGURE 1.48 – Dispositif de l'exercice 1.6.4.

1.6. EXERCICES ET PROBLÈMES SUR LA MACHINE À COURANT CONTINU 49

- 4.1. Calculer le courant débité par la machine n° 1 .
- 4.2. Calculer la vitesse de la machine n° 2.
5. On réduit le courant d'excitation à 1 A sur la machine n° 2.
 - 5.1. Calculer la nouvelle vitesse du rotor.
6. Le courant d'excitation des machines 1 et 2 est à nouveau réglé à 2 A. La machine n° 2 entraîne une pompe et ce faisant absorbe une puissance de 2 kW. On admettra l'hypothèse simplificatrice selon laquelle le rendement des deux machines est de 1.
 - 6.1. Calculer le couple résistant opposé par la machine n° 1 au moteur thermique dont la vitesse est toujours de 1000 tr/min.
 - 6.2. Calculer le courant débité par la machine n° 1.
 - 6.3. Calculer la vitesse de rotation de la machine n° 2.

Voir la correction page page [53](#).

1.6.5 Entraînement d'un treuil par une machine à courant continu : montée et descente

Un moteur à excitation indépendante à aimants permanents actionne un monte-charge. Il soulève une masse de deux tonnes à la vitesse d'un mètre par seconde. Le moteur est alimenté sous 1500 V, sa résistance d'induit est $R_a = 1,6\Omega$. Le rendement de l'ensemble du système est de 70 %. Dans tout le problème, on considérera que le moteur est parfaitement compensé et que le courant d'excitation est constant. On prendra $g \simeq 10\text{m/s}^2$.

1. Calculer la puissance absorbée par le moteur et le courant appelé lors de la montée.
2. Dans la phase de descente on veut limiter la vitesse à 1 m/s.
 - 2.1. Calculer le courant débité par la machine et la résistance X dans laquelle elle doit débiter.
3. L'induit est à présent court-circuité.
 - 3.1. Calculer la valeur du courant circulant dans l'induit.
 - 3.2. Calculer la vitesse de descente de la masse de deux tonnes.
 - 3.3. Calculer la valeur de E.
 - 3.4. Calculer la puissance dégagée dans le rotor.

Voir la correction page page [55](#).

1.6.6 corrigé de l'exercice 1.6.1 page 45

Il faut commencer par dessiner le modèle électrique de la machine, induit et inducteur en régime permanent.

1. $I_a = \frac{P_a}{U} = \frac{17,25 \cdot 10^3}{230} = 75 \text{ A}$, $I_e = \frac{230}{46} = 5 \text{ A}$;
2. L'équation de maille de l'induit permet d'écrire : $E = U - R_a \cdot I_a = 230 - 0,1 \times 75 = 222,5 \text{ V}$;
3. $P_u = P_e - P_{cte} = E \cdot I_a - P_{cte} = 222,5 \times 75 - 1 \cdot 10^3 \simeq 15,7 \text{ kW}$;
4. $C_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{15,7 \cdot 10^3}{\frac{1200}{60} \times 2\pi} \simeq 125 \text{ Nm}$;
5. $\eta = \frac{P_u}{P_{induit} + P_{inducteur}} = \frac{15,7 \cdot 10^3}{17,25 \cdot 10^3 + 230 \times 5} \simeq 0,85$;
6. $\eta_{global} = \eta_{MCC} \times \eta_{réducteur} = 0,85 \times 0,75 \simeq 0,64$;
7. $P_{treuil} = M \cdot g \cdot v \Rightarrow M = \frac{P_{treuil}}{g \cdot v} = \frac{P_{MCC} \times \eta_{réducteur}}{g \cdot v} = \frac{15,7 \cdot 10^3 \times 0,75}{10 \times 4} \simeq 300 \text{ kg}$.

1.6.7 corrigé de l'exercice 1.6.2 page 46

1. Courant inducteur : $I_e = \frac{200}{100} = 2 \text{ A}$, la loi des nœud donne le courant d'induit : $I_a = I_{total} - I_e = 22 - 2 = 20 \text{ A}$.
2. $E = U - R_a \cdot I_a = 200 - 0,5 \times 20 = 190 \text{ V}$.
3. $P_{jinducteur} = R_e \cdot I_e^2 = 100 \times 2^2 = 400 \text{ W}$, $P_{jinduit} = R_a \cdot I_a^2 = 0,5 \times 20^2 = 200 \text{ W}$.
4. $P_{abs} = U \cdot I = 200 \times 22 = 4400 \text{ W}$, $P_u = P_e - P_{cte} = E \cdot I_a - P_{cte} = 190 \times 20 - 200 = 3600 \text{ W}$, $\eta = \frac{P_u}{P_{abs}} = \frac{3600}{4400} \simeq 0,82$.
5. Lors du démarrage, le rotor ne tourne pas et l'induit n'est donc le siège d'aucune force contre électromotrice. Seule sa faible résistance limite le courant. Afin de limiter le courant à 30 A, il faut donc ajouter une résistance (rhéostat de démarrage) égale à : $U = (R_a + R_h) \times I_{dém} \Rightarrow R_h = \frac{U}{I_{dém}} - R_a = \frac{200}{30} - 0,5 = 6,16 \Omega$.

Un démarrage sans rhéostat conduirait à une intensité de démarrage égale à : $I_{dém} = \frac{U}{R_a} = \frac{200}{0,5} = 400 \text{ A}$. Cette intensité entraînerait des pertes Joule dans l'induit égale à : $P_J = R_a \cdot I_{dém}^2 = 0,5 \times 400^2 = 80 \text{ kW}$. Ces pertes Joule échaufferait énormément la machine qui risquerait d'être détruite (les vernis isolant recouvrant les conducteurs ne supportent guère plus de 150 °C).

1.6. EXERCICES ET PROBLÈMES SUR LA MACHINE À COURANT CONTINU 51

D'autre part, le couple mécanique fourni par la machine est proportionnel à l'intensité absorbée par l'induit. La très forte intensité absorbée au démarrage en l'absence de rhéostat conduirait à un couple trop important qui risquerait d'endommager voire de rompre l'accouplement mécanique entre le moteur et la charge qu'il entraîne.

6. Le rhéostat de champ se place en série avec l'inducteur. Son but est de faire varier le courant inducteur afin de faire varier le champ inducteur et donc de faire varier la vitesse de la machine comme l'indique la relation :

$$N = \frac{U - R_a \cdot I_a}{k \cdot \phi(I_e)}$$

Cette méthode particulièrement simple de variation de vitesse rencontre cependant des limites dans la plage de vitesses possibles. En effet, selon la charge entraînée, le couple nécessaire croît comme le carré ou le cube de la vitesse de rotation. Donc le courant absorbé par l'induit va croître d'autant plus vite que le flux inducteur a été diminué pour augmenter la vitesse et atteindre d'autant plus rapidement sa limite maximum que le flux inducteur aura été fortement diminué :

$$C_e = \frac{k \cdot \phi(I_e)}{2\pi} \cdot I_a \Rightarrow I_a = \frac{2\pi \cdot C}{k \cdot \phi(I_e)}$$

Au démarrage, on souhaite un couple important et donc un flux élevé. Le rhéostat de champ est réglé de tel sorte que sa résistance soit minimum afin que le courant inducteur et donc le flux soit élevé.

1.6.8 corrigé de l'exercice 1.6.3 page 46

1. 1.1. $I_a = \frac{P}{U} = \frac{9600}{240} = 40 \text{ A}$.
1.2. $E = U - R_a \cdot I_a = 240 - 0,5 \times 40 = 220 \text{ V}$.
1.3. $P_u = F \cdot v = Mg \cdot v = \frac{4800}{\pi} \times 10 \times \frac{11 \cdot \pi}{60} = 8800 \text{ W}$.
1.4. Afin de déterminer la vitesse de rotation du moteur, déterminons d'abord la vitesse de rotation du tambour du treuil. Lorsque la charge monte de V mètre en 1 seconde, le tambour du treuil tourne à une vitesse en radian par seconde égale à V divisé par le rayon du tambour
$$\Omega = \frac{v}{R} = \frac{\frac{11 \cdot \pi}{60}}{0,1} \approx 5,76 \text{ rad/s}$$
. Le moteur tourne 20 fois plus vite (le treuil

est un réducteur de vitesse qui permet d'augmenter le couple, c'est l'analogie d'un transformateur abaisseur de tension avec la tension grandeur analogue de la vitesse et l'intensité grandeur analogue du couple). Donc le moteur tourne à : $\Omega_{moteur} = 20 \times 5,76 \approx 115,2 \text{ rad/s}$ (ou 1100 tr/min).

$$\text{Soit } C_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{8800}{115,2} \approx 76,4 \text{ Nm.}$$

On aurait également pu calculer le couple résistant au niveau du tambour du treuil : $C_t = Mg \cdot R = \frac{4800}{\pi} \times 10 \times 0,1 \approx 1528 \text{ Nm}$. Le couple utile sur l'arbre moteur est 20 fois plus petit, soit 76,4 Nm.

- 1.5. Calcul fait à la question précédente : 1100 tr/min..
2. La charge M et le courant d'excitation gardant les valeurs définies précédemment.
 - 2.1. Afin de maintenir la même charge que précédemment immobile et décollée, il faut que le moteur fournisse le même couple moteur (la masse est la même, la gravité n'a pas changé, le rayon du tambour du treuil non plus). Le moteur appelle donc la même intensité de 40 A. On peut néanmoins effectuer le calcul du couple à l'aide de la formule : $C_e = \frac{k \cdot \phi}{2\pi} \cdot I_a$.
 Déterminons $K \cdot \phi$: $E = K \cdot \phi \cdot N \Rightarrow k \cdot \phi = \frac{E}{N} = \frac{220}{1100/60} = 12 \text{ SI}$.
 Ainsi : $C_e = \frac{k \cdot \phi}{2\pi} \cdot I_a = \frac{12}{2\pi} \cdot I_a \Rightarrow I_a = \frac{2\pi C_e}{12} = \frac{2\pi}{12} \cdot \left(\frac{4800}{\pi} \cdot 10 \cdot 0,1 \right) = 40 \text{ A}$.
 - 2.2. Le moteur ne tourne pas, donc : $E = 0 \text{ V}$. Donc $U = R_a \times I_a = 0,5 \times 40 = 20 \text{ V}$.
 - 2.3. On limite l'intensité de démarrage à 60 A. Il faut donc que la f.é.m. U devienne égale à : $U = R_a \cdot I_a = 0,5 \times 60 = 30 \text{ V}$.
 - 2.4. Le couple moteur va augmenter, devenir supérieur au couple résistant. Ainsi, d'après la relation fondamentale de la dynamique pour les systèmes en rotation : $C_{mot} - C_{résistant} = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$. L'accélération angulaire passe de 0 à une valeur positive, le moteur se met à tourner. Ce faisant, la f.é.m. E croît ce qui entraîne une diminution de l'intensité dans l'induit. Lorsque l'intensité a baissé de 60 à 40 A, la vitesse du moteur est à nouveau constante. Cette nouvelle vitesse dépend de la f.é.m. U appliquée aux bornes de l'induit. On a :

$$\frac{E_1}{N_1} = k\phi = \frac{E_2}{N_2} \Rightarrow N_2 = N_1 \times \frac{E_2}{E_1} = 1100 \times \frac{(30 - 40 \times 0,5)}{220} = 50 \text{ tr/min}$$

1.6. EXERCICES ET PROBLÈMES SUR LA MACHINE À COURANT CONTINU 53

2.5.

$$(R_h + R_a) = \frac{U}{I_a} \Rightarrow R_h = \frac{240}{60} - 0,5 = 3,5 \Omega$$

La puissance dissipée par effet Joule, au moment du démarrage, dans ce rhéostat est de $3,5 \times 60^2 = 12,6 \text{ kW}$! Le rhéostat doit donc être d'une taille certaine pour ne pas être volatilisé par le dégagement d'énergie.

3. Afin d'obtenir une vitesse maximum, il faut que la tension d'alimentation de l'induit soit maximum $N = \frac{U - R_a \cdot I_a}{k \cdot \phi}$. On choisira donc $U = 240 \text{ V}$. La masse étant réduite de $4/5$, le couple que doit fournir le moteur en régime permanent (vitesse constante) est lui aussi réduit de $4/5$. Si l'on désire imposer $I_a = 40 \text{ A}$, il faut que ϕ soit réduit de $4/5$ afin que le couple soit lui-même réduit de $4/5$.

On supposera que l'inducteur fonctionne dans la zone linéaire (le flux est proportionnel au courant inducteur). Donc : $\phi = k' \times I_e$. Pour réduire le flux de $4/5$ par rapport au flux créé précédemment, il faut un nouveau courant inducteur dont la valeur sera de : $I_e' = \frac{4}{5} \times 5 = 4 \text{ A}$.

La nouvelle constante $k' \cdot \phi$ de la machine devient donc : $k' \cdot \phi = \frac{4}{5} \cdot k \cdot \phi = \frac{4}{5} \times 12 = 9,6 \text{ SI}$.

La nouvelle vitesse de rotation est donc : $N' = \frac{E}{k' \cdot \phi} = \frac{240 - 0,5 \times 40}{9,6} = 22,9167 \text{ tr/s} = 1375 \text{ tr/min}$.

1.6.9 corrigé de l'exercice 1.6.4 page 48

- $I_e = 1,5 \text{ A} \Rightarrow E = 308 \text{ V}$ à $1200 \text{ tr/min} \Rightarrow k \cdot \phi = \frac{308}{1200}$.
À vide, $I_a = 0 \text{ A} \Rightarrow U = E \Rightarrow N = \frac{U}{k \cdot \phi} = \frac{400}{\frac{308}{1200}} \simeq 1560 \text{ tr/min}$.
- $I_e = 2,5 \text{ A} \Rightarrow E = 338 \text{ V}$ à $1200 \text{ tr/min} \Rightarrow k \cdot \phi = \frac{338}{1200}$.
 $E = U - R_a \cdot I_a = 300 - 0,3 \times 40 = 288 \text{ V} \Rightarrow N = \frac{E}{k \cdot \phi} = \frac{288}{\frac{338}{1200}} \simeq 1022 \text{ tr/min}$.
- $I_e = 2 \text{ A} \Rightarrow E = 328 \text{ V}$ à $1200 \text{ tr/min} \Rightarrow k \cdot \phi = \frac{328}{1200}$.
Comme le courant d'induit est nul, la f.é.m. à vide est :

$$U = E = k \cdot \phi \cdot N = \frac{328}{1200} \times 1000 \simeq 273 \text{ V}$$

4. 4.1. La seconde machine est à vide, comme les pertes constantes supposées nulles, la puissance électromagnétique est nulle elle aussi.

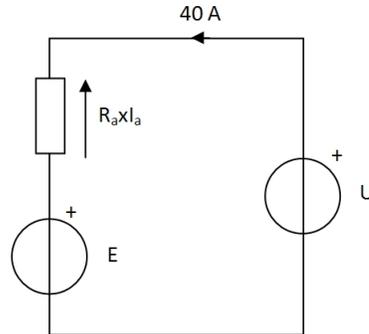


FIGURE 1.49 – Schéma équivalent pour la question 2.1 page 48 de l'exercice 1.6.4 page 48.

Donc aucun courant ne circule entre les deux machines : $I_{a1} = I_{a2} = 0$.

4.2. Pour la machine n° 2, on a donc :

$$N_2 = \frac{E_2}{k \cdot \phi} = \frac{U_1}{k \cdot \phi} = \frac{E_1}{k \cdot \phi} = 1000 \text{ tr/min}$$

5. L'excitation de la machine n° 2 étant réduite à un ampère, on a pour cette machine : $k \cdot \phi = \frac{258}{1200}$. La f.é.m. aux bornes n'a pas changé et est toujours imposée par la machine n° 1, soit 273 V. La vitesse de la machine n° 2 sera donc :

$$N_2 = \frac{E_2 = E_1}{k \cdot \phi} = \frac{273}{\frac{258}{1200}} \approx 1270 \text{ tr/min}$$

6. 6.1. Le rendement étant de 1, la machine n° 1 doit fournir 2 kW à la machine n° 2. Le couple résistant qu'oppose la machine n° 1 au moteur thermique est donc :

$$C_r = \frac{P}{\Omega} = \frac{2000}{(2\pi \times 1000/60)} = 19 \text{ Nm}$$

6.2.

$$C_e = \frac{k \cdot \phi}{2\pi} \times I_a \Rightarrow I_a = \frac{2\pi \times C_e}{k \cdot \phi} = \frac{2\pi \times 19}{16,4} = 7,28 \text{ A}$$

Ce courant est débité par la machine n° 1 (génératrice) est reçu la machine n° 2 qui est réceptrice, voir la figure 1.50 page suivante.

6.3. Calculons E_1 : $I_e = 2 \text{ A} \Rightarrow E = 328 \text{ V}$ à 1200 tr/min $\Rightarrow k \cdot \phi = \frac{328}{1200}$ SI $\Rightarrow E_1 = \frac{328}{1200} \times 1000 \approx 273,3 \text{ V}$.

1.6. EXERCICES ET PROBLÈMES SUR LA MACHINE À COURANT CONTINU 55

Une équation de maille nous donne : $E_2 = E_1 - 2 \times R_a \cdot I_a = 273,3 - 2 \times 0,3 \times 7,28 = 269\text{V}$.

On aura donc : $N_2 = \frac{E_2}{k \cdot \phi} = \frac{269}{\frac{328}{1200}} = 984 \text{ tr/min}$.

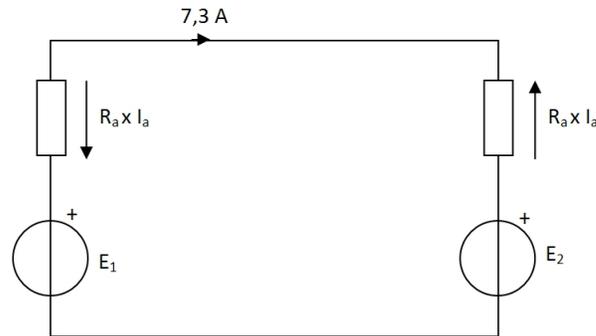


FIGURE 1.50 – Schéma équivalent pour la question 4.1 page 49 de l'exercice 1.6.4 page 48.

1.6.10 corrigé de l'exercice 1.6.5 page 49

1. Puissance utile fournie par le moteur : $P_u = M \cdot g \times v = 2 \cdot 10^3 \times 10 \times 1 = 20\text{kW}$.

Puissance absorbée par le moteur : $P_{abs} = \frac{P_u}{0,7} \approx 28,6\text{kW}$.

$$P_{abs} = U \cdot I_a \Rightarrow I_a = \frac{P_{abs}}{U} = \frac{28,6 \cdot 10^3}{1500} = 19\text{A}$$

2. La charge fournit une puissance : $P_u = 2 \cdot 10^3 \times 10 \times 1 = 20\text{kW}$. La puissance électrique fournie par la machine est $0,7 \times P_u$, car on considère que le rendement est identique à la montée et à la descente. $P_e = 20 \cdot 10^3 \times 0,7 = 14\text{kW}$. Cette puissance est dissipée dans la résistance de l'induit et dans la résistance X : $P_e = (R_a + X) \cdot I_a^2$.

Or, le couple étant identique à la montée et à la descente et l'excitation étant constante (aimants permanents) le courant dans l'induit ne change pas, on a en effet : $I_a = \frac{2\pi \times C_e}{k \cdot \phi}$. Donc $I_a = \text{cte} = 19\text{A}$.

Il en résulte : $X = \frac{P_e}{I_a^2} - R_a = \frac{14 \cdot 10^3}{19^2} - 1,6 \approx 37,2\Omega$. Le moteur à courant continu à excitation indépendante et constante entraîné à couple constant est un *générateur idéal de courant*, cette remarque est la clé permettant de résoudre la suite de ce problème.

3. 3.1. La masse de deux tonnes n'a pas changé, pas plus que la gravité ou l'excitation de la machine. On peut donc en déduire, comme précédemment, que le courant débité vaut toujours 19 A.
- 3.2. La puissance mécanique fournie à la machine est convertie en pertes Joule dissipées dans la résistance de l'induit : $M \cdot g \times v \times \eta = R_a \cdot I_a^2 \Rightarrow v = \frac{R_a \cdot I_a^2}{M \cdot g \times \eta} = \frac{1,6 \times 19^2}{2000 \times 10 \times 0,7} = 0,041 \text{ m/s}$.
- 3.3. $E \cdot I_a = R_a \cdot I_a^2 \Rightarrow E = R_a \times I_a = 1,6 \times 19 = 30,4 \text{ V}$.
- 3.4. La puissance dissipée dans le rotor est égal à la puissance fournie par la charge au rendement près, elle même égale aux pertes Joule dans la résistance de l'induit : $M \cdot g \times v \times \eta = R_a \cdot I_a^2 = 1,6 \times 19^2 = 577 \text{ W}$.

C'est le court-circuit qui permet le freinage maximum. En effet, si l'on insérait une résistance très grande, à la limite infinie (circuit ouvert), le courant induit serait nul ainsi que les forces de Laplace de freinage. La charge tomberait alors en chute libre (aux frottements du dispositif près).