BTS CIM : Cours de Physique appliquée :

Chapitre 10 : Le moteur à courant continu .

1. Organisation de la machine à courant continu :

Description générale :

La machine à courant continu est une machine électromagnétique.

Le **STATOR**, fixe, porte le bobinage inducteur qui crée le flux dans le circuit magnétique de la machine. Le stator(fer + bobines) constitue l'**inducteur** .

Le **ROTOR** porte le bobinage induit c'est à dire celui dans lequel sont engendrées les forces électromotrices. Le rotor (fer + bobinage) constitue l'**induit** .

Le bobinage de l'induit est alimenté par un commutateur mécanique qui est formé par des balais appuyant sur un collecteur , de telle façon que le courant passe dans un sens lorsqu'un conducteur est sous un pôle Nord et dans l'autre sens lorsqu'il est sous un pôle Sud.Le collecteur est fixé sur le rotor et relié au bobinage induit.

2. L'inducteur :

L'inducteur crée un flux magnétique qui est fixe dans le fer statorique qui peut être massif.

L'inducteur comporte (voir figure 1) :

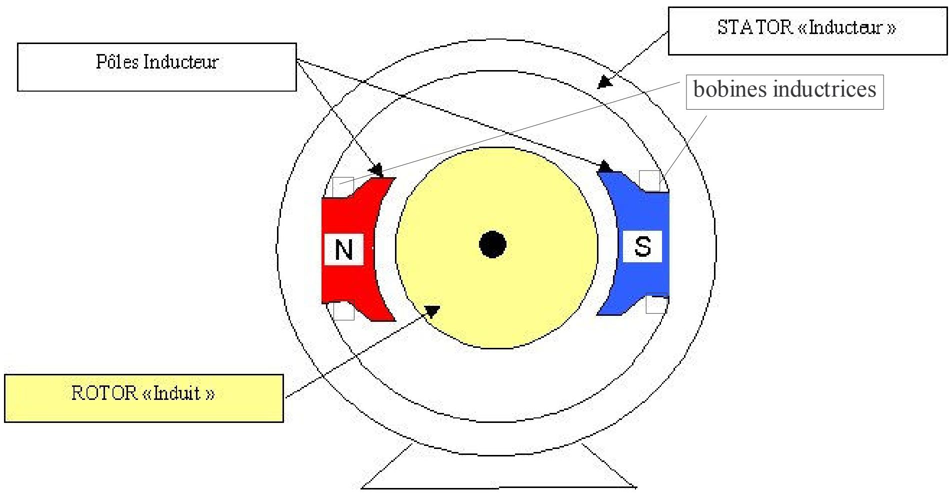
- la culasse en acier coulé; elle porte les pattes de fixation.,
- les noyaux polaires autour desquelles se trouvent les bobines inductrices,
- les pièces polaires ou épanouissements polaires qui élargissent la section de passage du flux dans l'entrefer.

Le courant qui passe dans le circuit inducteur est appelé **courant d'excitation** de la machine.

Dans la pratique, on rencontre trois cas :

- faible intensité et grand nombre de spires (excitation séparée ou shunt),
- forte intensité et petit nombre de spires (excitation série et enroulement série des machines à excitation composée),

Dans les micromoteurs à courant continu, l'inducteur est constitué par un aimant permanent. Il n'y a dans ce cas aucun courant d'excitation. Et le flux magnétique peut être considéré comme constant



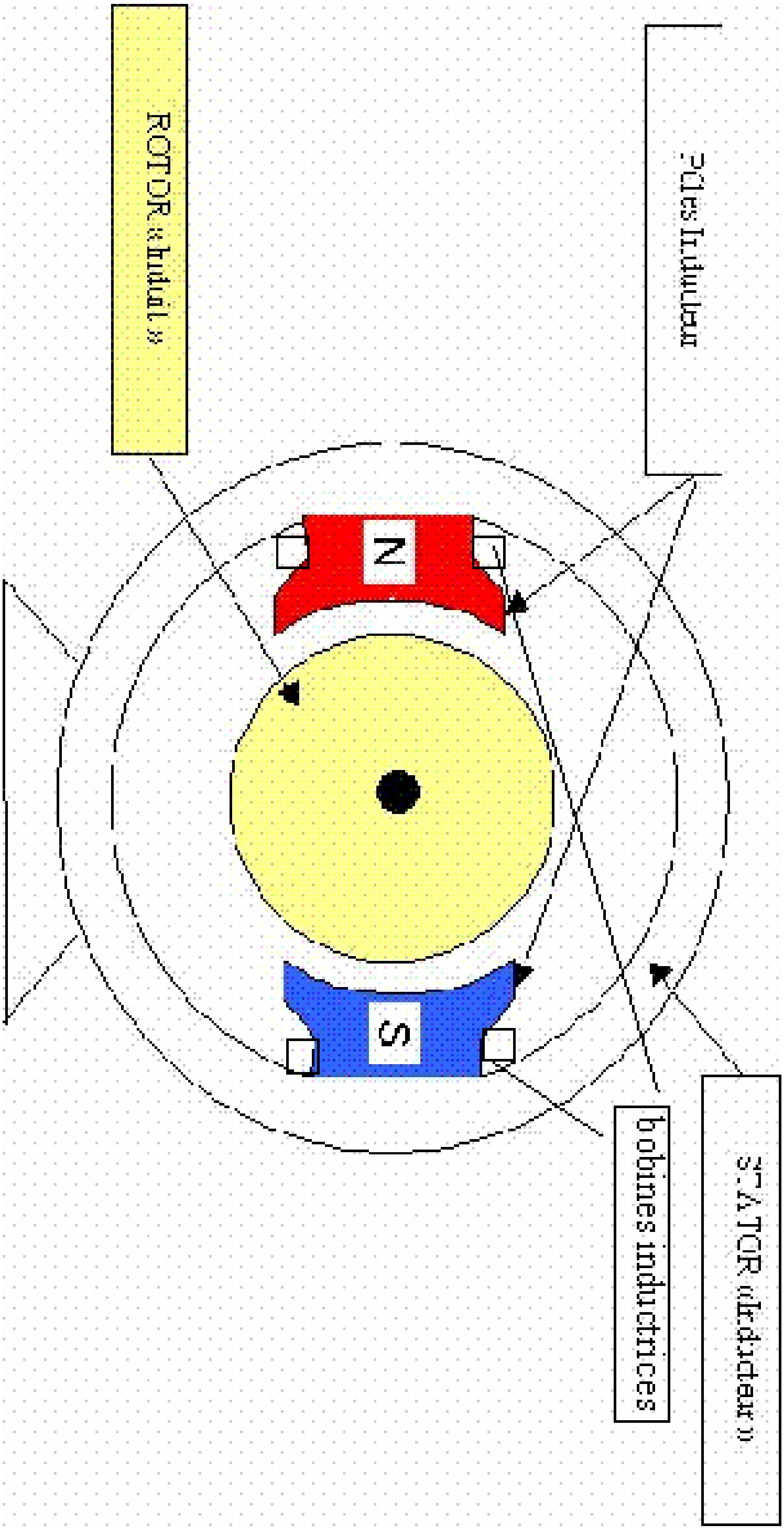
3. L'induit :

3.1 Constitution :

Le rotor tourne dans un champ magnétique fixe. Il est donc constitué de tôles en fer au silicium, à cycle d'hystérésis mince pour limiter les pertes par hystérésis .Les tôles sont minces et isolées entre elles pour limiter les pertes par courants de Foucault. Le fer de l'induit comporte des encoches à la périphérie . C'est dans ces encoches qu'est logé le bobinage de l'induit .

3.2 Le bobinage de l'induit :

Il est formé de sections . Une section est un groupe de spires isolées entre elles d'où ne sort que le début de la première spire et la fin de la dernière spire.


ROTOR
N
S
bobines inductrices

L'écart entre deux côtés de sections autour de l'induit doit être d'une distance polaire (pour une machine bipolaire l'écart est de 180°).On réunit les sections entre elles en série et on termine le bobinage en réunissant la fin de la dernière section au début de la première. Chaque soudure d'une section avec la suivante est reliée à une lame du collecteur.
Dans l'exemple de la figure 2, on a un enroulement dit "imbriqué" pour lequel le courant a deux voies pour passer d'un balai à l'autre, en passant toujours dans le même sens sous le même pôle (I/2 dans chaque voie) .

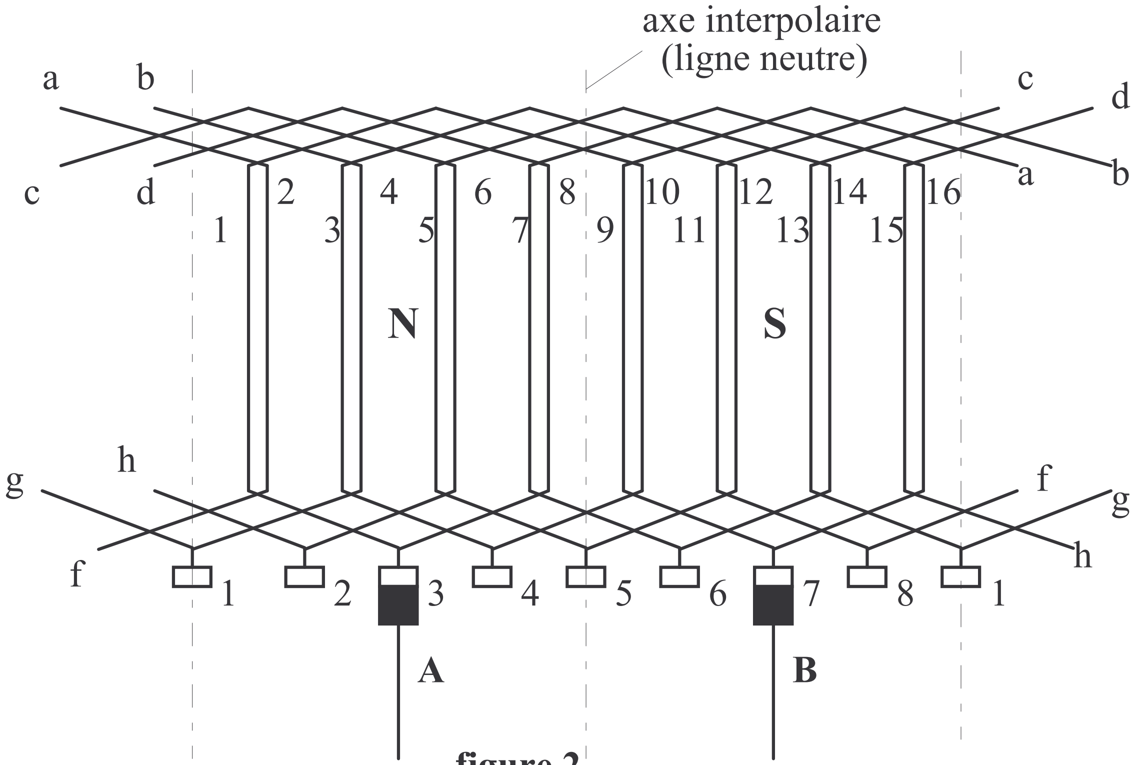


figure 2

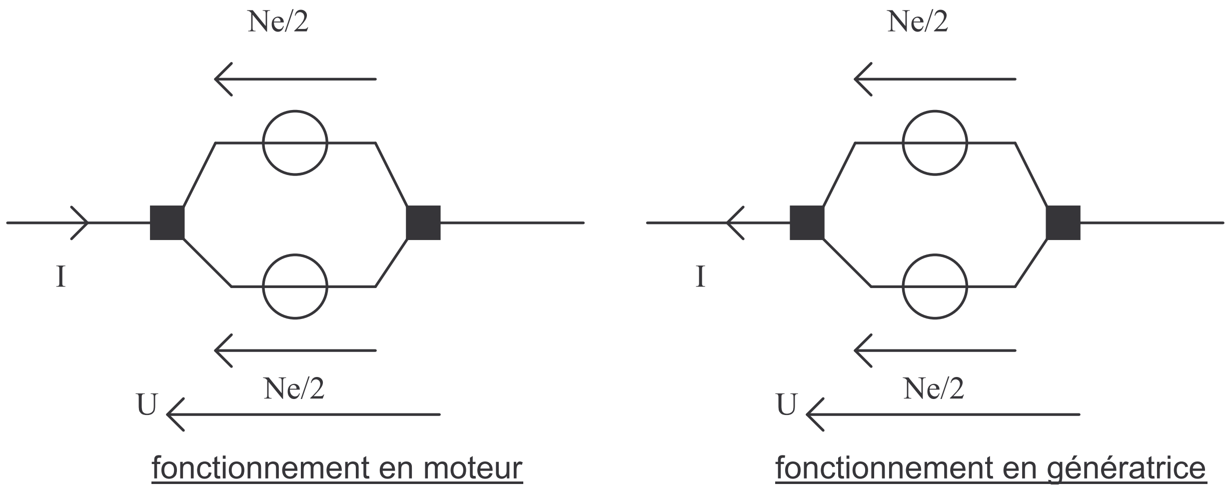
enroulement imbriqué en tambour : il y a **8 sections** dont les côtés de section sont :
1-10 2-9 3-12 4-11 5-14 6-13 7-16 8-15 .

Dans le fonctionnement en moteur, le courant i et la force électromotrice e apparaissant dans chaque conducteur sont de sens contraires.

Dans le fonctionnement en génératrice, i et e sont de même sens.
Le sens de la f.e.m. dans chaque conducteur ne dépend que du sens du flux et du sens de rotation du rotor, quel que soit le mode de fonctionnement (moteur ou génératrice).
Le couple électromagnétique est moteur pour le fonctionnement en moteur, résistant pour le fonctionnement en génératrice.

3.3 Rôle du collecteur; commutation :
Lorsque le rotor tourne, le balai, fixe, entre en contact avec la lame suivante du collecteur. Sur la figure 2, le balai A passe de la lame 3 à la lame 4 et le balai B passe de la lame 7 à la lame 8.
Le courant change de sens dans les conducteurs qui traversent la ligne neutre, c'est à dire les sections 1-10 et 9-2. Ce phénomène est appelé une commutation.
Après la commutation, la distribution des courants reste la même sous chaque pôle.

3.4 <u>Schéma équivalent de l'induit</u> :
Dans l'exemple étudié, le courant dispose de deux voies pour passer d'un balai à l'autre.
Le schéma équivalent de l'induit se présente donc ainsi pour les deux modes de fonctionnement: (l'exemple choisi est celui d'une machine bipolaire à deux voies d'enroulement).



résistance de l'induit:
Si r est la résistance de tous les conducteurs de l'induit mis bout à bout, les deux voies en parallèle ont chacune une résistance égale à r/2 .
La résistance totale de l'induit, de balai à balai est donc R = r/4.

4 .<u>Expression de la force électromotrice</u>:

Nous étudions le cas général .
On appelle N le nombre de conducteurs actifs de la périphérie de l'induit.
n est la fréquence de rotation de l'induit (en tr/s),
ϕ est le flux sous un pôle de la machine (en Wb),
p est le nombre de paires de pôles de la machine ,
a est le nombre de paires de voies de l'enroulement entre les deux balais.
(pour une machine bipolaire, p=1 et a=1).
Dans un enroulement comportant 2a voies pour aller d'un balai à l'autre, il y a N/2a conducteurs dans chaque voie. La force électromotrice équivalente est donc E = Ne/2a, e étant la f.e.m. moyenne apparaissant dans chaque conducteur.
L'expression de cette f.e.m. moyenne e lorsque l'induit effectue 1/2p tour pour balayer le flux sous un pôle de l'inducteur est égale à :
$e = \Delta\Phi/\Delta t$ où $\Delta\Phi$ est le flux balayé par le conducteur et Δt le temps nécessaire.
Or, le flux balayé est égal au flux sous un pôle : $\Delta\Phi = \phi$. Et le temps nécessaire Δt est égal à: $\Delta t = 1/2np$. D'où la force électromotrice totale :

$$E = Ne/2a = N (\Delta\Phi/\Delta t)/ 2a = N (\phi / (1/2np))/2a = N\phi\, 2np/2a = (p/a)\, N\, n\, \phi$$

$$\boxed{\mathbf{E = (p/a)\, N\, n\, \phi}}$$

V tr/s Wb

<u>Autre expression de la force électromotrice</u>:

$E = (p/2\pi a)\, N\, \phi\, \Omega$ ou encore : $\boxed{\mathbf{E = K\,\phi\,\Omega}}$ avec $\boxed{K = Np/2\pi a}$.

V Wb rad/s

5. Expression du couple électromagnétique :

La puissance électromagnétique P , c'est à dire la partie de la puissance absorbée qui est transformée est égale à :

$P = E\,.\,I = T\,.\,\Omega$.

Le moment du couple électromagnétique T est donc égal à :

$T = E.I / \Omega = K\,\phi\,\Omega\,.\,I / \Omega = K\,\phi\,I$.

$$\boxed{\mathbf{T = E\,I / 2\,\pi\,n = K\,\phi\,I}}$$

N.m V A tr/s Wb A

remarque : le K qui intervient dans cette formule est le même que celui qui intervient dans la formule donnant la force électromotrice E.

Autre expression de T :

T peut s'écrire également, en remplaçant K par sa valeur :

$$\boxed{\mathbf{T = (Np/2\pi a)\,\phi\,I}}$$

N.m Wb A

6. Rappel des formules fondamentales suivant le type de fonctionnement:

Une machine à courant continu est une machine électromagnétique réversible. Elle est susceptible de fonctionner en moteur ou en génératrice :

Quand elle fonctionne **en moteur**, elle absorbe de la puissance électrique et fournit de la puissance mécanique .La relation entre la tension la force électromotrice et , la résistance de l'induit et l'intensité du courant qui traverse l'induit est alors :

$$\boxed{\mathbf{U = E + R\,.\,I}}$$

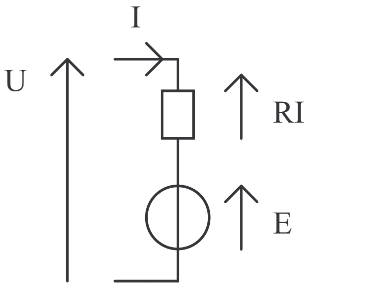
V V Ω A

Quand elle fonctionne **en génératrice** , elle absorbe de la puissance mécanique et fournit de la puissance électrique .

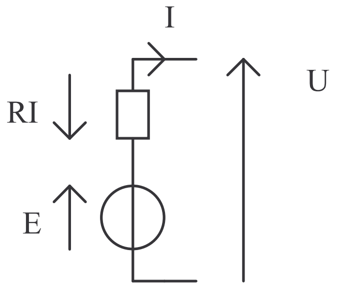
La relation entre la tension la force électromotrice et , la résistance de l'induit et l'intensité du courant qui traverse l'induit est alors :

$$\boxed{\mathbf{U = E - R\,.\,I}}$$

Si on fait intervenir la vitesse angulaire de rotation $\Omega = 2\,\pi\,n$, cette expression devient :



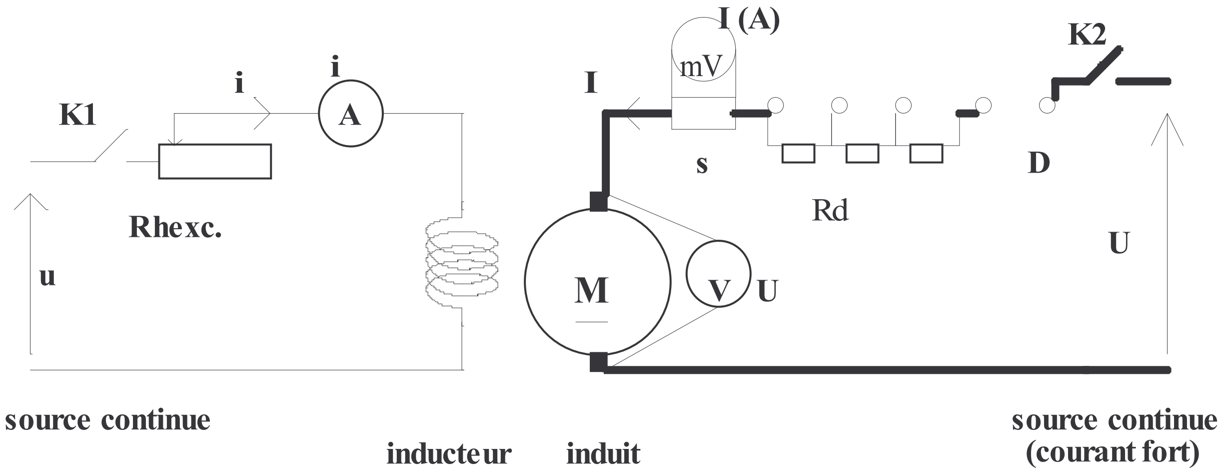
moteur : U = E + RI



génératrice : U = E - RI

7. Moteur à courant continu à excitation séparée fonctionnant sous tension d'induit constante :

7.1. Montage :



Le circuit de l'induit et celui de l'inducteur sont indépendants.

7.2 Démarrage:

Le **démarrage** du moteur s'effectue de la manière suivante: **l'ordre des opérations est impératif:**

1. Mettre sous tension le circuit de l'inducteur en fermant K1 ; le rhéostat d'excitation doit être court-circuité de manière à ce que le courant d'excitation soit maximal au démarrage du moteur.

2. S'assurer que le curseur du rhéostat de démarrage Rd est sur le plot mort D. Mettre alors sous tension le circuit de l'induit en fermant K2.

3. Démarrer le moteur en poussant le curseur du rhéostat de démarrage.

7.3 Arrêt:

L'arrêt s'effectue dans l'ordre inverse, impérativement :
Ouvrir K2 : le moteur s'arrête. On peut alors ouvrir K1.

7.4 Conséquence du non-respect des consignes:

Au démarrage: si on met l'induit sous tension alors que l'inducteur n'est parcouru par aucun courant : le flux Φ est faible . Donc le couple de démarrage est très faible . Le moteur ne démarre pas. De ce fait la f.e.m. reste nulle et le courant **I devient excessif** : ça disjoncte dans le meilleur des cas. Sinon l'induit risque d'être détérioré...ou les fusibles de l'alimentation continue.

A l'arrêt, si on coupe le courant dans l'inducteur avant le courant dans l'induit, par suite de la diminution du flux Φ , la f.e.m. E diminue brusquement, le courant $I = (U- E) /R$ augmente brutalement, ainsi que le couple et le **moteur s'emballe .** (au pire, le moteur peut exploser.)

7.5 Nécessité du rhéostat de démarrage:

Au démarrage la vitesse n est nulle. La force électromotrice $E = (p/a)\ N\ n\ \phi$ est donc nulle. En conséquence, l'induit est équivalent à une résistance pure de résistance R . Le courant de démarrage direct Idd est donc $Idd = U/R$. Dans la majorité des cas, c'est excessif .
Ex : pour un moteur de caractéristiques nominales U =220 V; I= 15 A; R = 0.4 Ω, le courant de démarrage direct serait : Idd = U/R = 220/0,4= **550 A !!! .** En conséquence, pour

réduire cette intensité au démarrage, il faut intercaler en série un rhéostat de démarrage , de résistance Rd.Pour réduire l'intensité de démarrage à 2 fois l'intensité nominale, il faut prendre pour Rd la valeur :
Id = U/(R+Rd), soit R + Rd = U/ Id ; soit Rd = U/Id - R= 220/ 30 - 0,4 = 6,93 Ω .

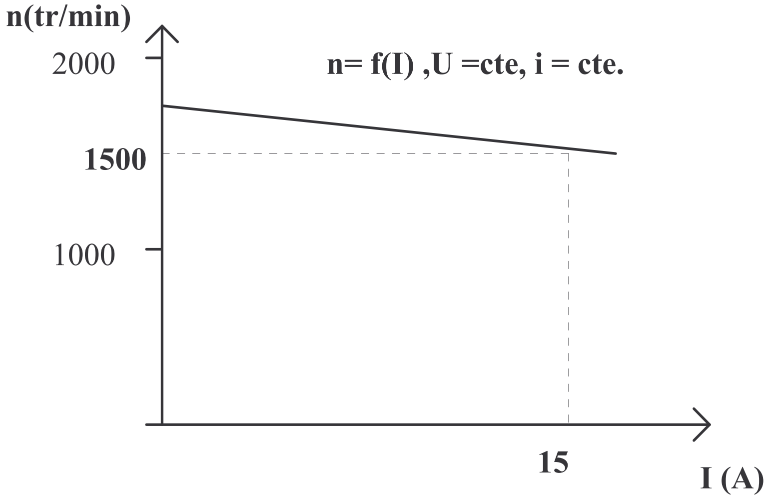
7.6 <u>Fonctionnement en charge</u> :

7.6.1 . <u>Fréquence de rotation</u> :

On a toujours U = E +RI = (p/a)Nnϕ + RI . Donc $\boxed{\mathbf{n = (U- RI)/ ((p/a)N\phi)}}$.

tr/s V Wb

Cette expression montre que la vitesse peut être réglée par la tension U et qu'elle dépend aussi du courant I absorbé par l'induit et du flux sous un pôle de la machine (donc du courant d'excitation i).Pour un fonctionnement à <u>tension constante et à flux constant</u> , on obtient la **caractéristique électromécanique de fréquence : n= f (I) .**

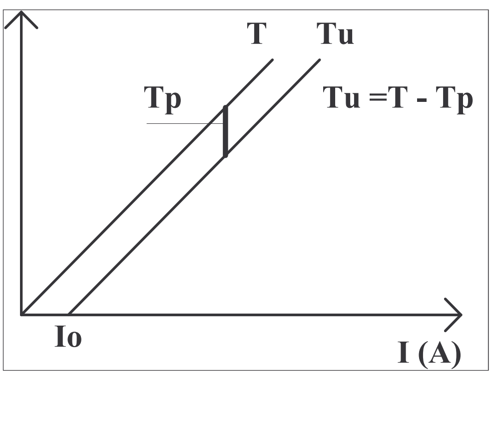


On constate que **la vitesse diminue un peu lorsque le courant absorbé augmente**, c'est à dire lorsque le couple du moteur augmente .

7.6.2 <u>Couple moteur</u> :

Le couple électromagnétique est égal à **T = (Np/2πa) ϕ I** = EI/2πn .
Le couple utile Tu est un peu inférieur au couple électromagnétique :
Tu = (EI -pc)/ 2πn où pc représente les pertes collectives du moteur, c'est à dire la somme des pertes mécaniques et des pertes magnétiques dans l'induit du moteur : **pc = pm + pf** .
On a donc :

Tu = EI/2πn - pc/2πn = T - Tp , où Tp représente le couple de pertes :
Tp = pc/2πn . Si on considère que le couple de pertes est constant, les caractéristiques électromécaniques de couple T = f (I) et Tu = f(I) se présentent ainsi :

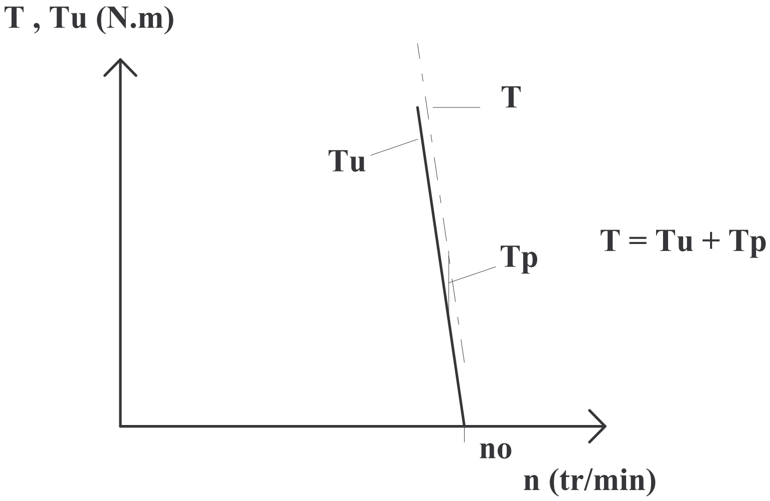


La caractéristique T = f(I) est une droite qui passe par l'origine, à cause de la relation
T = (Np/2πa) ϕ I .
Tu se déduit de T par soustraction de Tp.
<u>Lorsque le moteur fonctionne à vide</u>,
Tu = 0 et I = Io .
Alors, **T =Tp** et **pc = Eo.Io** et :

$$\boxed{T_p = \frac{pc}{2\pi n_0} = \frac{Eo.Io}{2\pi n_0}}$$

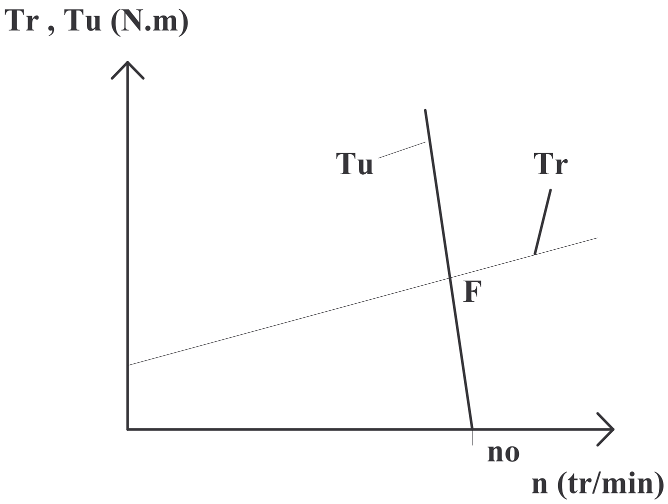
7.6.3 <u>Caractéristiques mécaniques</u> :

Ce sont les courbes T = f (n) et Tu = f(n) pour U et i constants. On construit ces caractéristiques à partir des caractéristiques électromécaniques n = f(I) et T , Tu = f(I) .
Ces caractéristiques ont l'allure suivante:



7.6.4 : <u>Point de fonctionnement</u> :

Lorsqu'un moteur de couple moteur Tu entraine une machine de couple résistant Tr, le point de fonctionnement F est donné par le point d'intersection des caractéristiques mécaniques Tu = f(n) et Tr = f(n):



Les coordonnées du point F donnent la fréquence de rotation et le couple de fonctionnement du groupe en régime établi, c'est à dire lorsque la fréquence de l'ensemble s'est stabilisée après le démarrage du moteur.

7.7 <u>Bilan énergétique ; rendement</u> :

Puissances absorbées : Pa = U.I + u.i = puissances absorbées respectivement par l'induit et l'inducteur.

pertes: pJI = pertes par effet Joule dans l'Induit = $R.I^2$.

pJe = pertes par effet Joule dans l'inducteur (excitation) = u.i = (r. Rh).i^2 .

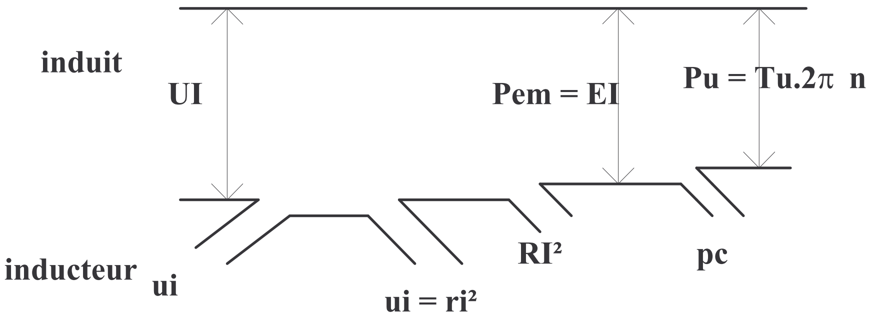
pc = pertes collectives = pm + pf = pertes mécaniques + pertes magnétiques dans l'induit .pc = Tp . Ω ;

Puissance utile = Pu = Tu . Ω = Tu . 2πn . On a Pa = Pu + pc+ pJI +pJe .

D'autre part, la puissance électromagnétique Pem = E.I = T. Ω = U.I - $R.I^2$.

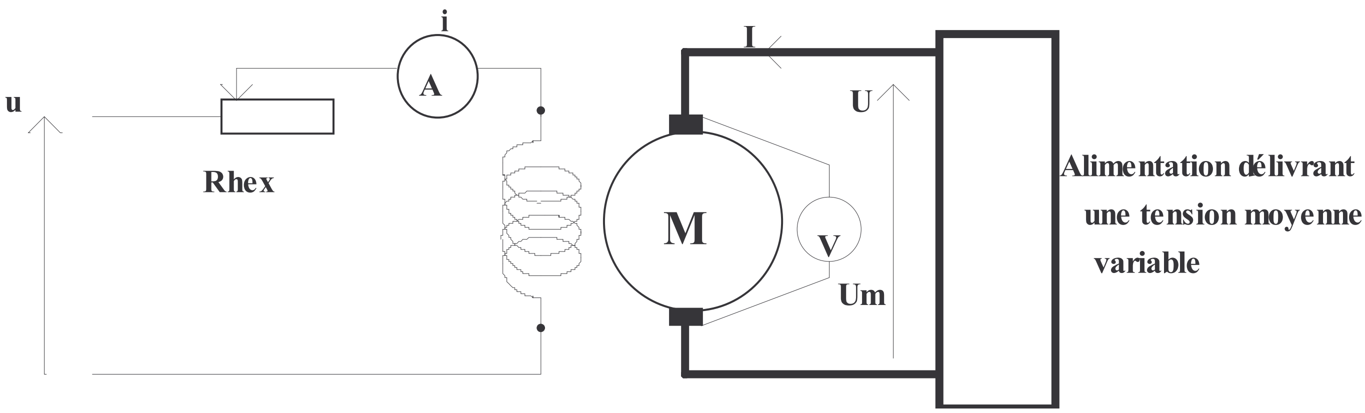
Et Pu = Pem-pc.

D'où l'expression du rendement : $\boxed{\eta = Pu / Pa = (E.I - pc) / (UI + u.i)}$



8. Moteur à excitation indépendante fonctionnant sous tension d'induit variable :

8.1 Montage :



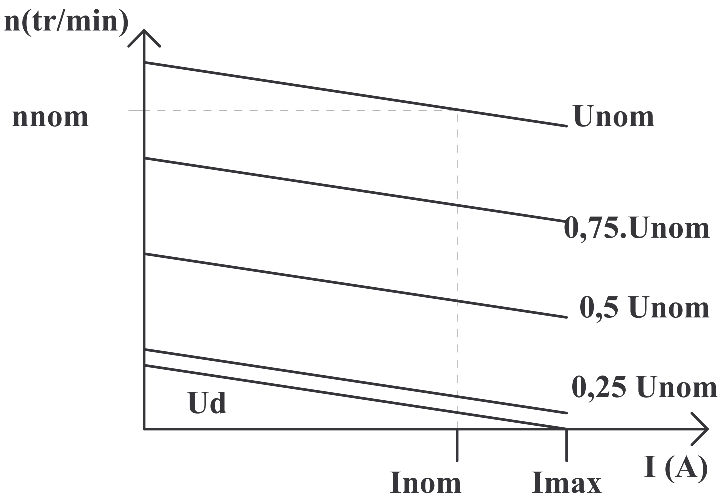
8.2 Vitesse :

Supposons un courant d'excitation **i constant** .

Pour l'induit, on a toujours $U = E + RI = (p/a)\ N\ n\ \Phi + RI$.

Soit $\boxed{n = (U - RI) / (p/a)(N\ \Phi)}$

D'où l'allure des caractéristiques électromécaniques de vitesse n = f (I) pour des valeurs différentes de la tension d'alimentation U :

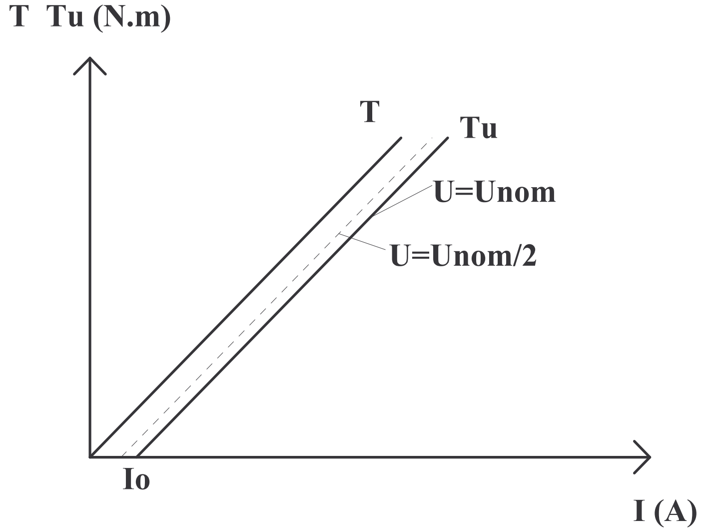


8.3 Couple :

On a toujours $\mathbf{T = EI / 2\pi n = (p/2\pi a) . N \Phi I}$.

$\mathbf{Tu = T - Tp = T - pc / 2\pi n}$. **Tp** est le couple de pertes.

D'où les caractéristiques électromécaniques de couple T et Tu = f (I):



Remarque: Le couple de pertes et les pertes collectives peuvent être calculées à l'aide d'un **essai à vide**: en effet, à vide la puissance absorbée par l'induit est égal à :

$Po = UIo = pc + R\, Io^2$.

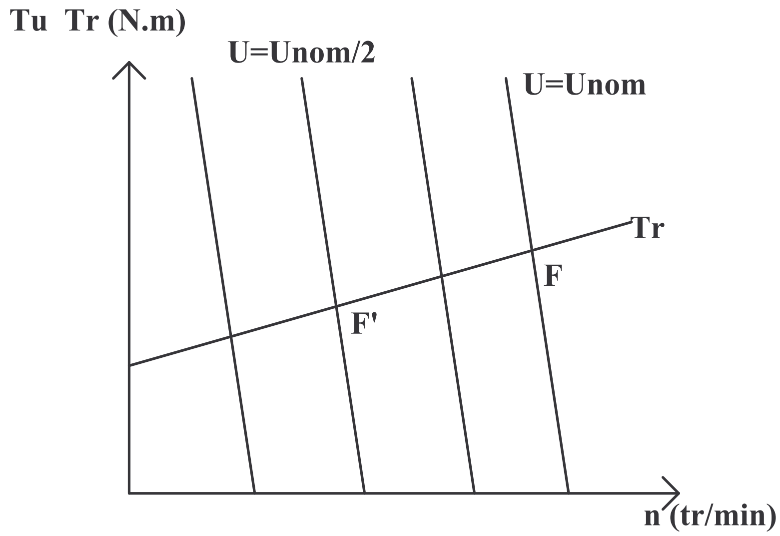
$pc = UIo - RIo^2 = (U-RIo).Io = Eo.Io$.

D'où **pc = Eo.Io**

$\mathbf{Tp = Eo.Io / 2\pi n}$.

8.4 Caractéristique mécanique Tu = f (n) .:

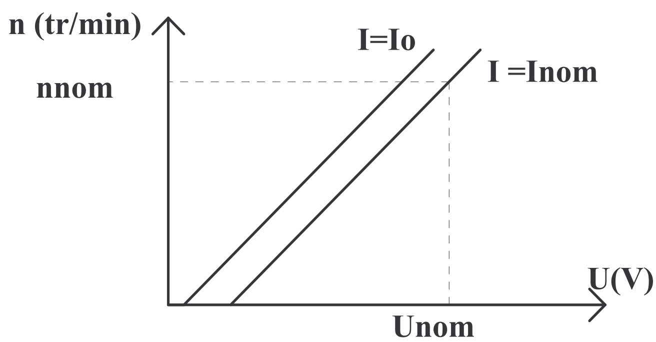
On la déduit des caractéristiques électromécaniques de couple et de vitesse, pour différentes valeurs de la tension d'alimentation.



On remarque que compte-tenu de la charge mécanique entraînée, la vitesse varie en fonction de la tension d'alimentation . C'est là le principal intérêt de l'alimentation d'un moteur à courant continu sous tension variable.

8.5 Variation de la vitesse en fonction de la tension à I donné :

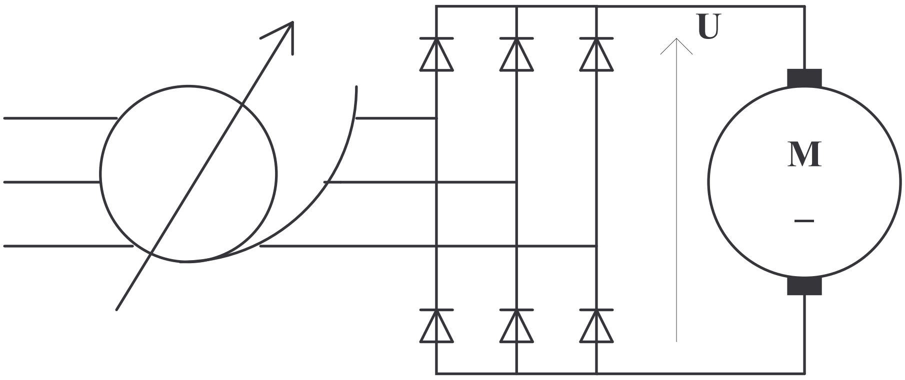
Si le moteur est à flux constant et s'il fonctionne à couple constant, c'est à dire à courant constant, la courbe donnant la fréquence en fonction de la tension a l'allure suivante:



8.6 Réalisation de la tension variable :

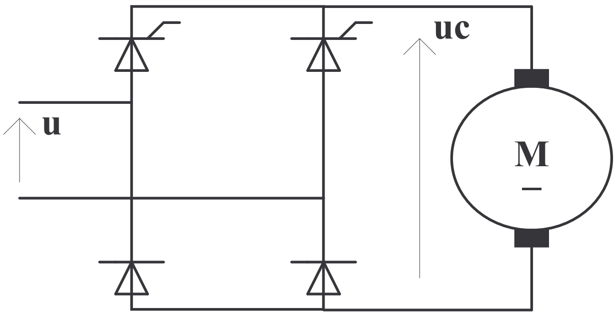
Plusieurs solutions sont possibles:

8.6.1 Autotransformateur à réglage progressif de la tension suivi d'un redresseur :



Pour faire varier la tension redressée **U** il suffit de faire varier progressivement la tension de sortie de l'autotransformateur triphasé.

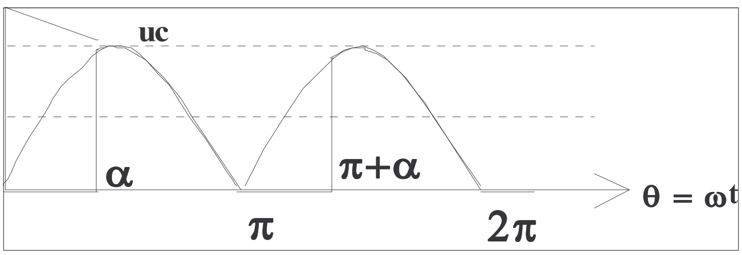
8.6.2 Utilisation d'un pont mixte monophasé (redressement commandé) :

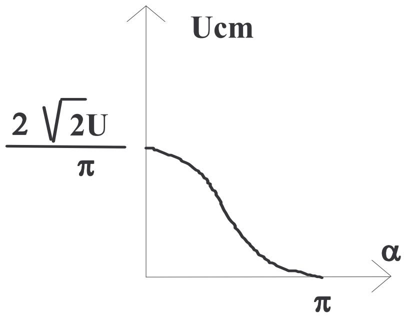


La tension redressée **uc** a une valeur moyenne **Ucm** dont la valeur dépend de l'angle de retard α à l'amorçage des thyristors. Si U est la valeur efficace de la tension d'alimentation du pont u, la valeur moyenne de uc a pour expression :

$$\mathbf{Ucm = (\sqrt{2}.U/\pi).(1 + Cos\ \alpha)}$$

On peut faire varier la tension moyenne Ucm en modifiant l'angle d'amorçage α des thyristors.





8.6.3 Utilisation d'un hacheur :

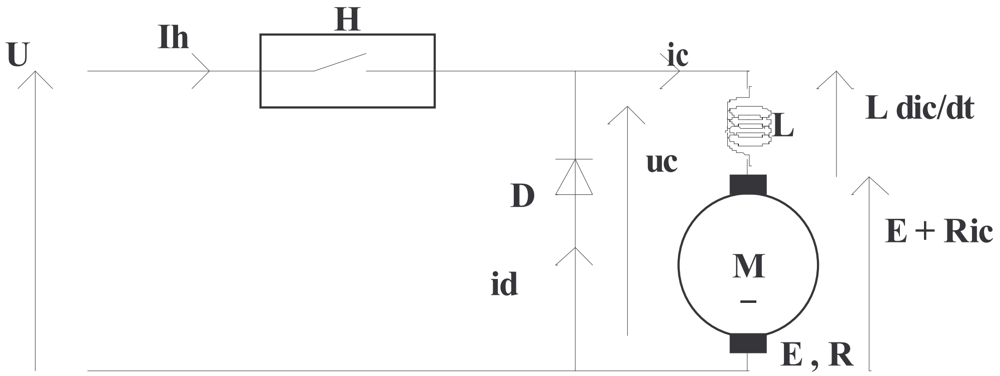
Si on dispose de l'énergie sous forme continue, on peut utiliser un hacheur: C'est un interrupteur électronique dont on peut faire varier la séquence de commande . On définit le rapport cyclique de fonctionnement du hacheur comme étant le rapport

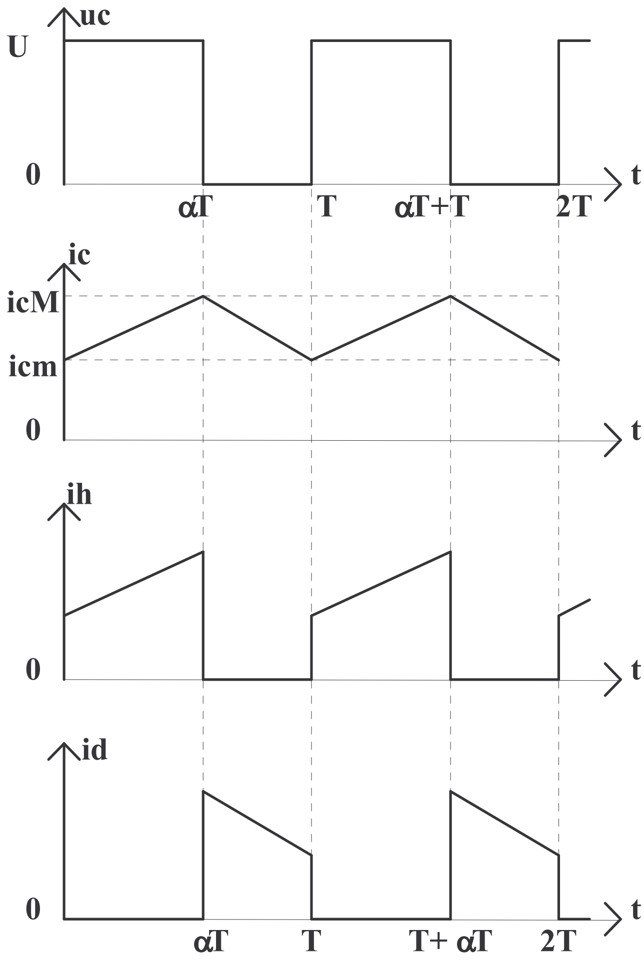
$$\alpha = \frac{\textbf{durée de fermeture}}{\textbf{période}}$$

L'interrupteur électronique peut être un transistor ou un thyristor.

La tension moyenne aux bornes de la charge est donnée par la relation : **Ucm =** α **. U**

On peut faire varier Ucm en faisant varier le rapport cyclique α .





Le hacheur est fermé entre $t = 0$ et $t = \alpha T$, puis ouvert entre $t = \alpha T$ et $t = T$. Lorsque le hacheur est ouvert, la diode D assure la continuité du courant, grâce à l'énergie emmagasinée dans la bobine de lissage L.

A tout instant, on a la relation :

uc = E + R.ic + L dic/dt .

Lorsqu'on passe aux valeurs moyennes, il vient :

Ucm = E + RIcm + 0 .

En effet, en régime permanent établi, la valeur moyenne de Ldic/dt sur une période est nulle . On en déduit la relation :

$$\boxed{\alpha U = E + RIcm .}$$

Pour un moteur à flux constant, et entraînant une machine dont le couple est constant (Icm constant), on a E = kn et donc ;

$$\boxed{\alpha U = kn + RIcm}$$

On voit que la commande de la vitesse se fait par variation du

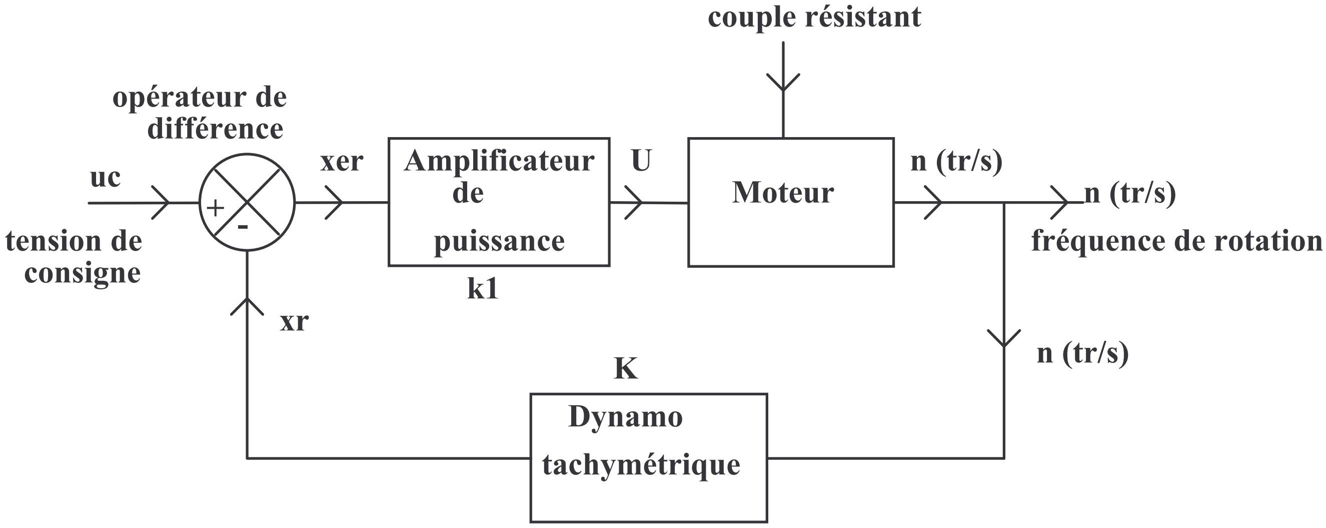
Remarques : La valeur moyenne de ic, notée Icm, est égale dans l'exemple choisi à la moyenne des valeurs instantanées maximale icM et minimale icm:

$$\boxed{Icm = (icM + icm) / 2 .}$$

Les courbes donnant les courants en fonction du temps sont assimilables à des segments de droite. C'est le cas lorsque la période de fonctionnement du montage est faible par rapport à la constante de temps électrique du montage, **τ = L /R** .

9. Asservissement de vitesse d'un moteur à courant continu :

Principe: On veut stabiliser la vitesse d'un moteur à courant continu . Pour cela , on réalise un système bouclé, où la grandeur de sortie est la vitesse du moteur et la grandeur d'entrée une tension de consigne . Il y a nécessité d'élaborer une grandeur proportionnelle à la tension de sortie. Cela est souvent réalisé à l'aide d'une dynamo tachymétrique qui délivre une tension proportionnelle à la vitesse. D'où le schéma fonctionnel :



Les relations entre ces différentes grandeurs sont les suivantes :

xer est le signal d'erreur : **xer = uc - xr .**

U est la tension d'alimentation du moteur délivrée par un amplificateur de puissance qui délivre une tension de sortie U proportionnelle à xer : **U = k1.xer .**

Le moteur à courant continu que l'on suppose à flux constant est soumis à un couple résistant supposé constant . La force électromotrice E est donc proportionnelle à la vitesse et le courant dans l'induit est constant. Si R est la résistance de l'induit, on a :

U = E + R.I = k2.n + R.I .

La dynamo tachymétrique délivre une tension de sortie xr (grandeur de retour) proportionnelle à la fréquence de rotation du moteur:

xr = K.n .

Le dispositif doit permettre de diminuer la variation de vitesse du moteur entre le fonctionnement à vide et le fonctionnement en charge.

A.N. : Prenons les valeurs numériques suivantes :

Sans asservissement :

A vide : uc = 2 V , k1= 110 , xr = 0, xer = uc, U = 220 V I ~ 0

n0 = 1500 tr/min = 25 tr/s .

R= 1 Ω . U ~ E . D 'où k2 = E/n = 220/25 = 8,8 V/tr/s .

En charge, supposons que le courant appelé est de 20 A . Alors, si la tension est maintenue constante, E = U - RI = 220 - 1.20 = 200 V .

n = E/ k2 = 200/ 8,8 = 22,7tr/s = 1364 tr / min . **n = 1364 tr / min .** La diminution relative de vitesse est de (1500-1364)/1500 = **9,1 %** .

Avec asservissement :

A vide : Supposons que K = 0,4 V/tr/s . Voyons quelle doit être la tension de consigne pour que **n0 (à vide)** soit égale à **1500tr/min** : I~ 0 .

U = 220 V = E . xr = K n = 0,4 . 25 = 10 V . xer = U/k1 = 220 / 110 = 2 V.

uc = xer +xr = 12 V . **uc = 12 V.**

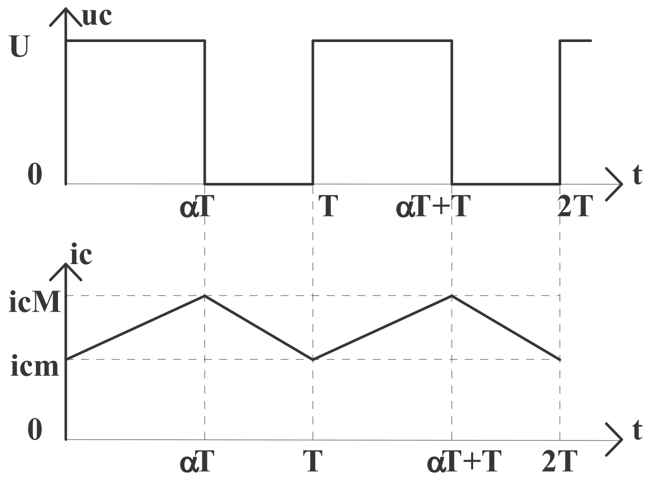
<u>En charge</u>, gardons la même tension de consigne : uc = 12 V .
Supposons que le courant appelé devienne égal à I = 20 A.
Nous avons les relations suivantes :

xer = 12 - xr ; U = 110 xer ; U = 8,8 n + 1.20 ; xr = 0,4 n . Cela conduit à :
110 (12 - xr) = 8,8 n +20 et xr = 0,4 n ,
Soit : 110 (12 - 0,4 n) = 8,8 n +20 soit : 110.12-20 = (8,8+110.0,4) n , soit :
n = (110.12-20)/(8,8+44) = 24,62 tr/s = 1477tr/min .
n = 1477 tr/min .

Nous constatons que la diminution de vitesse est beaucoup plus faible que sans asservissement . La diminution relative de vitesse est de (1500-1477)/1500 = **1,5%** .
Les autres grandeurs sont les suivantes :
xr = 0,4.n = 0,4 .24,62= 9,848V
xer = 12 - xr = 12 - 9,848 = 2,152V .
U = 110 xr = 110.2,152 = 236,7 V . On voit que l'asservissement se traduit par une augmentation automatique de la tension d'alimentation du moteur qui "corrige" la chute de tension due à l'augmentation du courant lorsque la charge mécanique du système augmente .

<u>ANNEXE : Compléments sur le hacheur</u> :

Nous avons vu (p 11) que les courbes représentatives des courants lors du fonctionnement du hacheur étaient assimilables à des segments de droite . C'est le cas lorsque la constante de temps électrique du montage, $\tau = L/R$ est grande par rapport à la période de fonctionnement du hacheur .



L'égalité reliant uc et les autres grandeurs est :
$uc = E + R.ic + L\, dic/dt$. Si τ est plus grande que T, la quantité Ric devient négligeable par rapport aux autres termes et il reste :
$uc = E + L\, dic/dt$.
Soit pour **$0 < t < \alpha T$** :
$U = E + L\, dic/dt$. Toutes les grandeurs L, E, U ,étant constantes, il vient , dic/ dt est constante :
$dic/dt = (U - E)/ L > 0$.
C'est pourquoi ic = f(t) est un segment de droite de coefficient directeur positif.

Par contre pour **$\alpha T < t < T$** , on a **$0 = E + L\, dic/dt$** , ce qui donne :
$dic/dt = - E / L < 0$. La dérivée dic/dt est une constante négative. La courbe ic = f(t) est un segment de droite de coefficient directeur négatif . De ces résultats, on peut tirer plusieurs conséquences . En particulier on peut calculer l'ondulation du courant , c'est à dire la quantité définie par : **$\Delta Ic = (IcM - Icm)$.**En effet, il vient :
$dic/dt = \Delta Ic / \Delta t$, soit : **$(U - E)/ L = \Delta Ic / \alpha T$.** D'autre part ,le fait d'avoir négligé Ric entraine en régime établi la relation : **$Ucm = \alpha U = E$** , car la valeur moyenne de Ldic/ dt sur une période est nulle . En conséquence, il vient :
$(U - \alpha U)/ L = \Delta Ic / \alpha T$, soit : $(1 - \alpha) U / L = \Delta Ic / \alpha T$ ou encore :

$$\boxed{\Delta Ic = \frac{(1 - \alpha)\alpha T\ U}{L}}$$

On constate que l'ondulation est d'autant plus faible que T est faible. Elle est minimale pour **$\alpha = 0,5$**