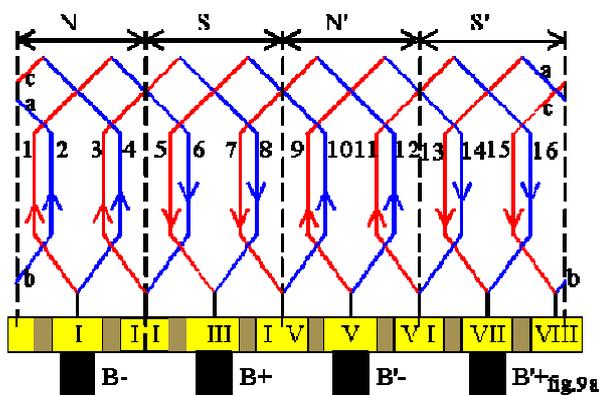


Physique appliquée

BTS 1 Electrotechnique



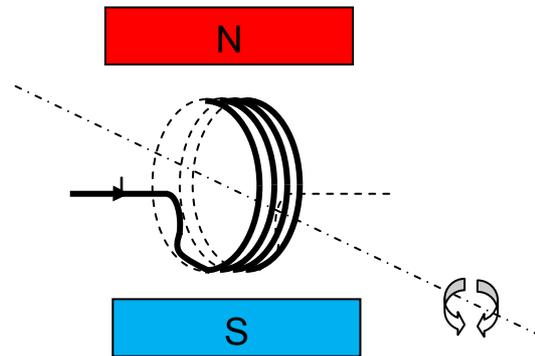
Le moteur à courant continu

| | | |
|------|---|----|
| 1. | Le principe de fonctionnement du moteur à courant continu..... | 3 |
| 1.1. | Phénomène d'interaction entre le moment magnétique d'une spire et un champ magnétique d'un stator. | 3 |
| 1.2. | Bobinage de l'induit. | 5 |
| 1.3. | Construction industrielle. | 6 |
| 1.4. | Les deux modes d'excitation retenues..... | 6 |
| 1.5. | Fonctionnement en génératrice..... | 7 |
| 2. | Le modèle de la Machine à courant continu..... | 8 |
| 2.1. | Montage des deux types d'excitation. | 8 |
| 2.2. | Le modèle en régime transitoire en moteur et en génératrice..... | 9 |
| 2.3. | Le modèle en régime permanent en moteur et en génératrice. | 9 |
| 2.4. | Expression du couple moteur en régime établi pour une excitation indépendante.. | 10 |
| 2.5. | Expression du couple moteur en régime établi pour une excitation série. | 13 |
| 3. | Exercices d'entraînement sur les moteurs à courant continu: | 18 |

1. Le principe de fonctionnement du moteur à courant continu

1.1. Phénomène d'interaction entre le moment magnétique d'une spire et un champ magnétique d'un stator.

On alimente une bobine composée de N spires.



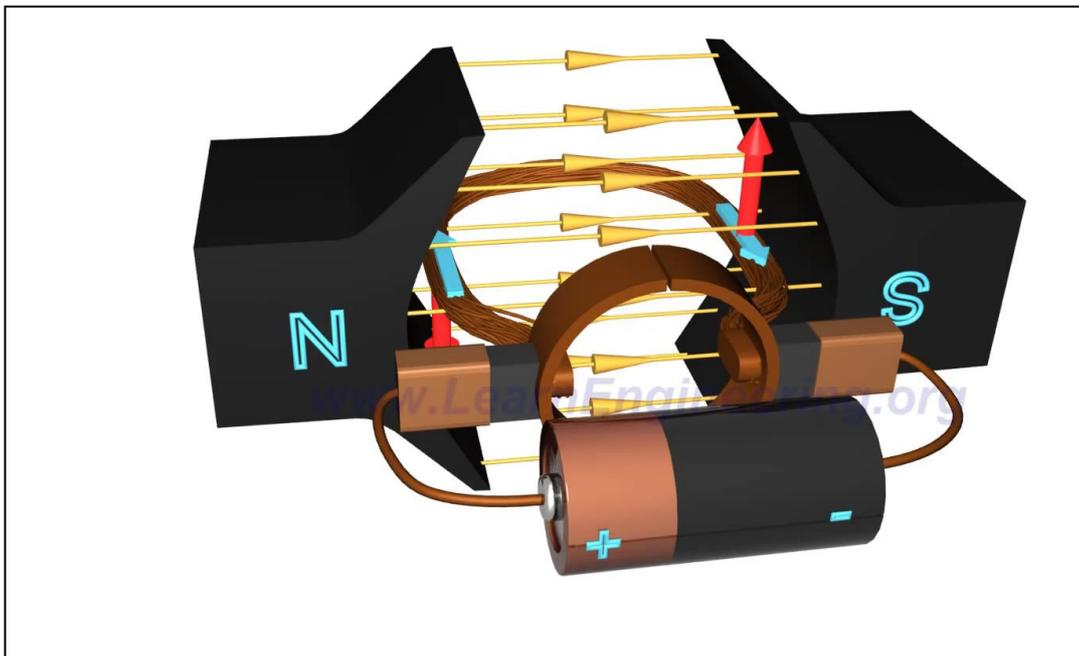
La relation donnant le couple exercé sur la spire est : $\vec{T} = \vec{M} \wedge \vec{B}$

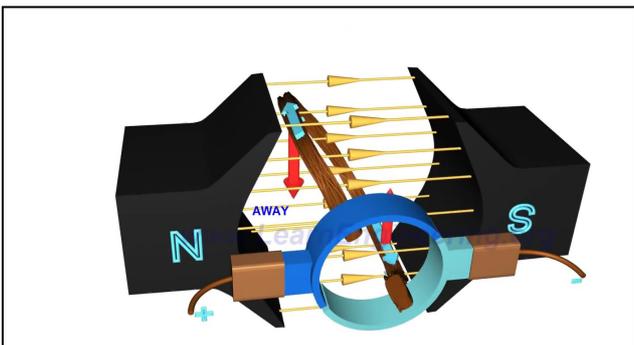
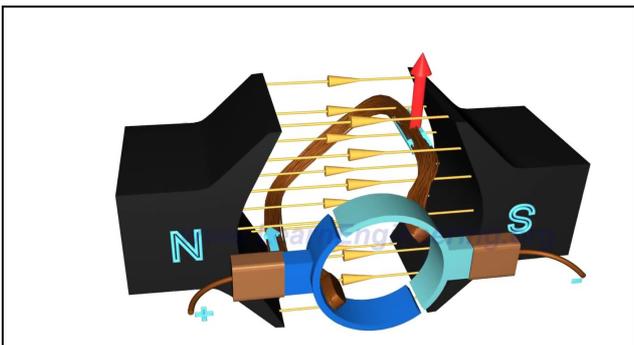
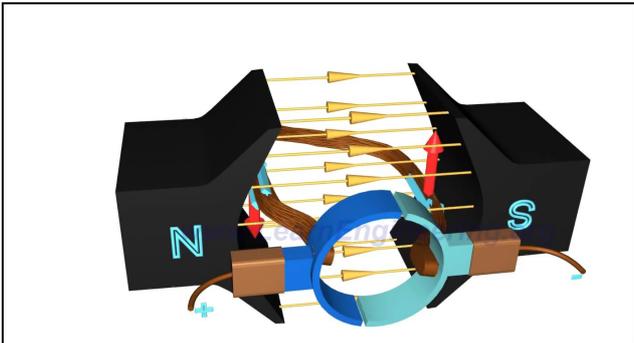
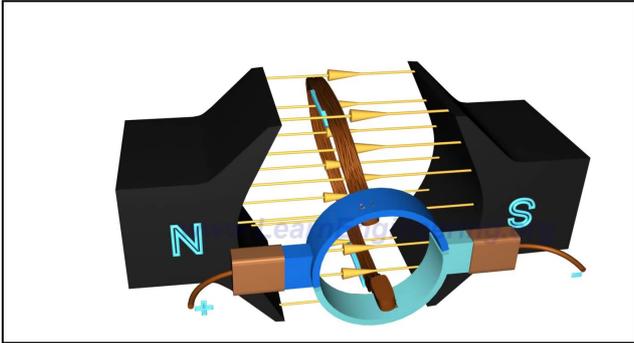
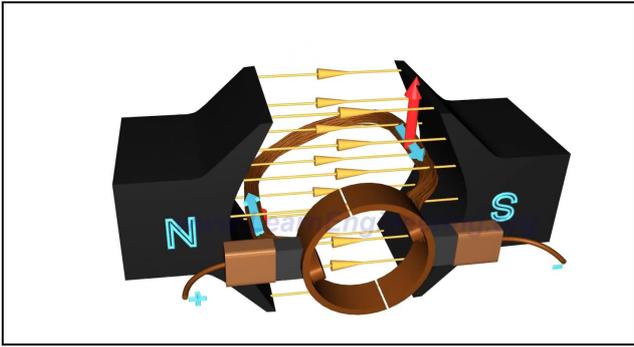
La norme du vecteur couple est : $\|\vec{T}\| = \|\vec{M}\| \cdot \|\vec{B}\| \cdot \sin(\alpha)$

C'est à partir de cette relation qu'on exprime la force de Laplace :

force de Laplace $\vec{F} = I \cdot \vec{l} \wedge \vec{B}$.

Utilité du collecteur pour entretenir le couple moteur :

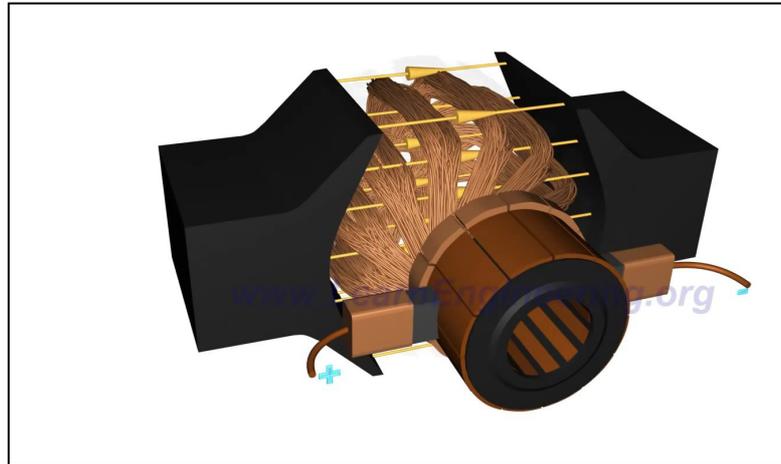




ant continu

1.2. Bobinage de l'induit.

Si on utilise une seule bobine pour propulser l'induit en rotation, lorsque la bobine est perpendiculaire au champ inducteur, le couple instantané est nul, on place alors des bobines réparties sur l'ensemble de la circonférence de l'induit de manière à diminuer les variations du couple moteur.



Sur la description précédente, on observe une paire de pôles à l'induit et à l'inducteur.

Des machines sont munies de plusieurs paires de pôles et de plusieurs voies d'enroulement :

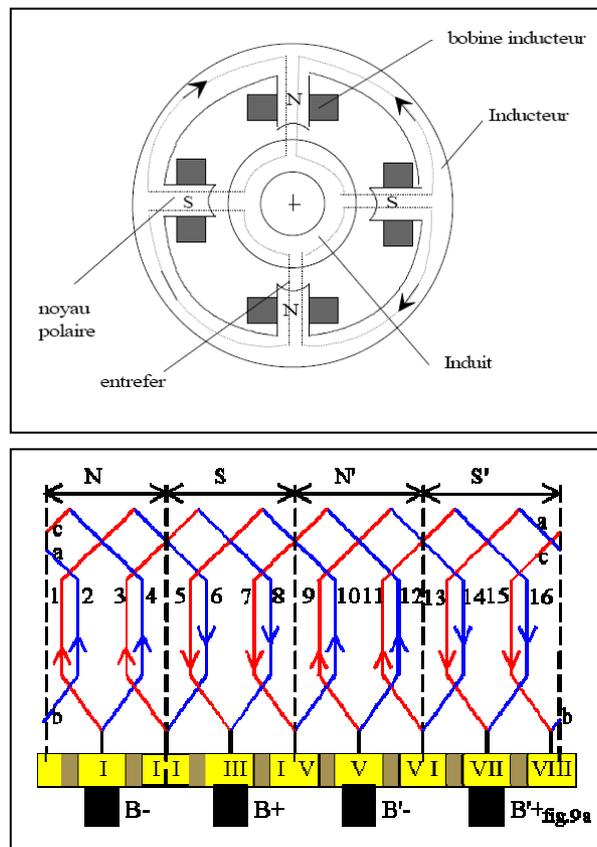
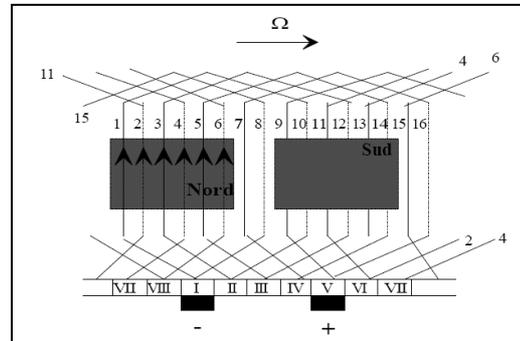
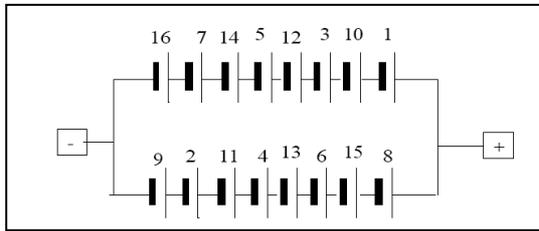
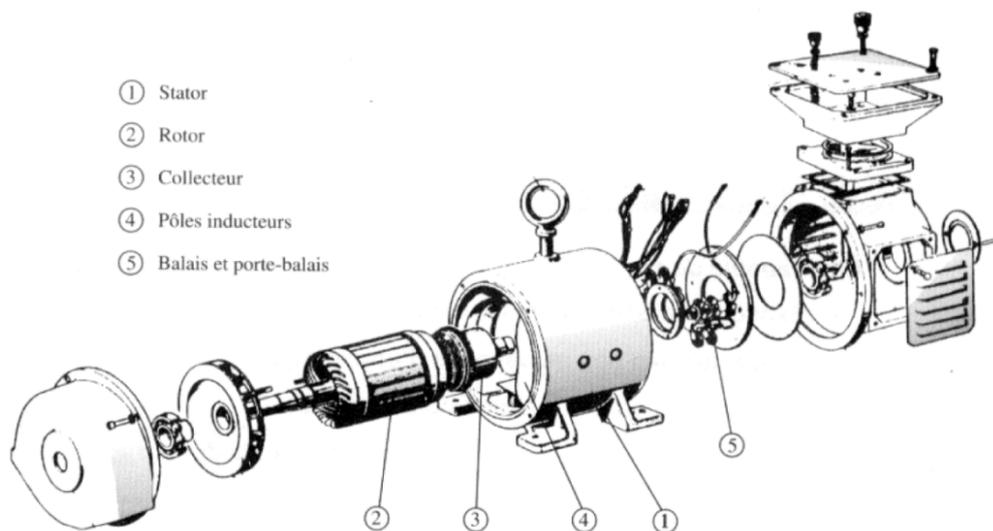


Schéma électrique vue entre les balais et notion de voies d'enroulement :



1.3. Construction industrielle.



1.4. Les deux modes d'excitation retenues.

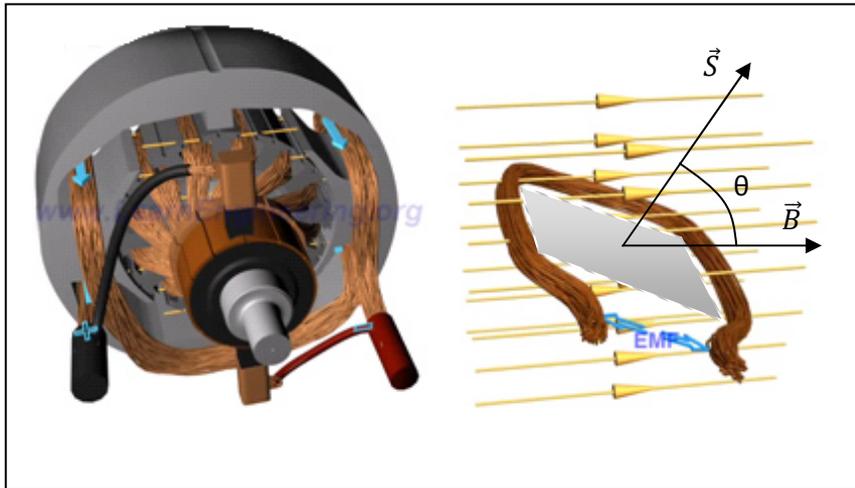
Dans notre cours nous étudierons les deux modes d'excitation qui sont les plus souvent rencontrés actuellement :

- L'excitation indépendante. (Utiliser dans les applications avec variateur de vitesse)

- L'excitation série. (Spécialement prévue pour les applications de traction électrique, le couple est très fort à basse vitesse, c'est-à-dire au démarrage)

1.5. Fonctionnement en génératrice.

Lorsqu'on entraîne l'arbre de la machine, l'ensemble des spires évolue à la vitesse de rotation Ω en rad.s^{-1} .



La spire va couper les lignes de champs magnétiques à travers sa surface S .

On fait tourner la spire d'un angle $\theta = \Omega \cdot t$.

La loi de Lentz s'applique et donne :

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d(\vec{B} \cdot \vec{S})}{dt} = -\frac{d(B \cdot S \cdot \cos(\theta))}{dt} = -B \cdot S \frac{d(\cos(\Omega \cdot t))}{dt} = B \cdot S \cdot \Omega \cdot \sin(\Omega \cdot t)$$

On remarque que la fem est alternative sinusoïdale et grâce au collecteur qui jouera le rôle de redresseur mécanique, on va redresser le signal pour que sa valeur moyenne soit non nulle.

En multipliant le nombre de spires, le signal redressé sera très proche d'un signal continu.

Pour une machine de :

- P_p : paires de pôle.
- A_a : paires de voie d'enroulement.
- N : nombre de pires constituant une voie d'enroulement.
- Φ : Flux sous un pôle dépend de $i_{\text{excitation}}$.

On notera la relation donnant la valeur moyenne de la Fem induite :

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot N \cdot \Phi \cdot \Omega$$

$$E = k' \cdot \Phi \cdot \Omega$$

$$\text{avec } k' = \frac{p}{a} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot N$$

Ou

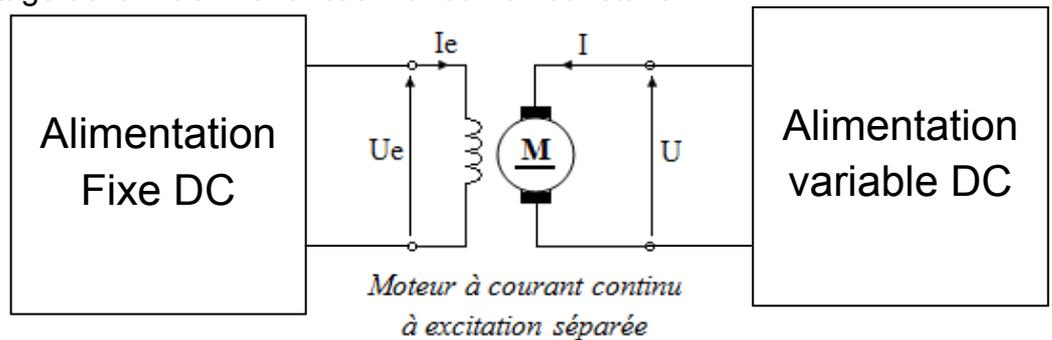
$$E = k \cdot \Omega$$

Avec $k = \frac{p}{a} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot N \cdot \Phi$ dans le cas ou le flux est constant

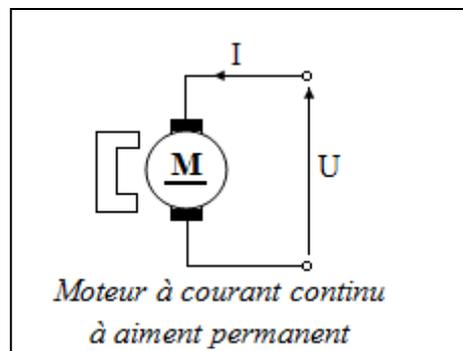
2. Le modèle de la Machine à courant continu.

2.1. Montage des deux types d'excitation.

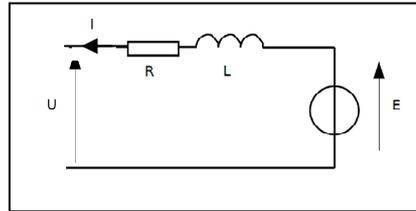
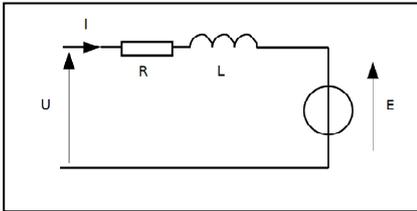
Schéma de montage de la machine fonctionnant à flux constant :



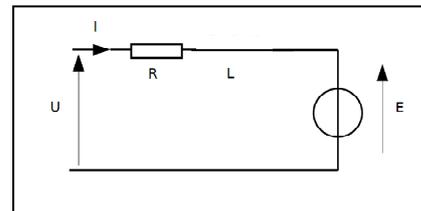
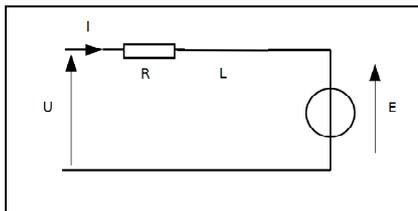
Pour les puissances modestes, on utilisera des aimants permanents :



2.2. Le modèle en régime transitoire en moteur et en génératrice.



2.3. Le modèle en régime permanent en moteur et en génératrice.



Exercices 1 :

Soit un moteur de puissance utile 3 kW tourne à 1500 tr.min^{-1} . Calculer le couple utile en Nm.

Exercices 2 :

La force électromotrice d'une machine à excitation indépendante est de 210 V à 1500 tr.min^{-1} . Calculer la fem pour une fréquence de rotation de 1000 tr/min, le flux étant constant.

Exercices 3 :

Un moteur à excitation indépendante alimenté sous 220 V possède une résistance d'induit de $0,8 \Omega$. A la charge nominale, l'induit consomme un courant de 15 A.

1. Calculer la f.e.m. E du moteur.
2. La machine est maintenant utilisée en génératrice (dynamo). Elle débite un courant de 10 A sous 220 V. En déduire la f.e.m.

Exercices 4 :

Une génératrice à excitation indépendante fournit une fem de 220 V pour un courant d'excitation de 3,5 A. La résistance de l'induit est de $90 \text{ m}\Omega$.

Calculer la tension d'induit U lorsqu'elle débite 56 A dans le circuit de charge.

2.4. Expression du couple moteur en régime établi pour une excitation indépendante.

En fonctionnement moteur, la loi des mailles nous donne :

$$U = E + RI \quad (1)$$

$$T = \frac{E \cdot I}{\Omega} \quad (2)$$

$$E = K \cdot \Omega \quad (3)$$

En remplaçant (3) dans (2) on peut écrire que :

$$T_{em} = \frac{K \cdot \Omega \cdot I}{\Omega}$$

$$T_{em} = K \cdot I \quad (2bis)$$

En utilisant l'expression (1) et (3), on peut écrire que :

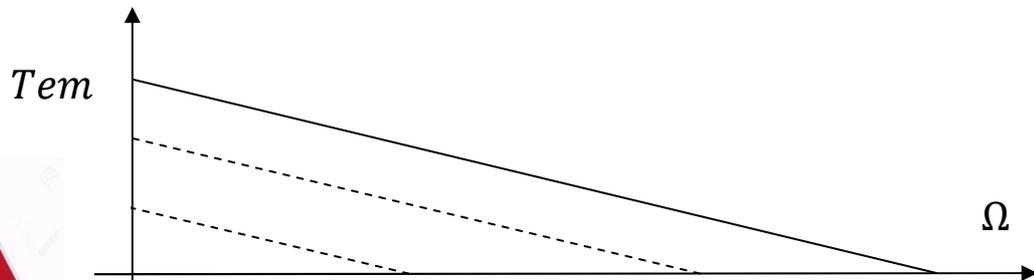
$$I = \frac{U - E}{R} = \frac{U - K \cdot \Omega}{R} \quad (1bis)$$

En remplaçant (1bis) dans (2bis), on trouve :

$$T_{em} = K \cdot \left(\frac{U - K \cdot \Omega}{R} \right) \quad (2bis)$$

$$T_{em} = - \frac{K^2}{R} \cdot \Omega + \frac{K \cdot U}{R} \quad (2bis)$$

Le couple électromagnétique est une fonction affine de la vitesse angulaire de la machine.



Attention, la vitesse augmente si le flux diminue, en cas de coupure de l'excitation, le moteur peut s'emballer.

$$\Omega = \frac{E}{k \cdot \Phi}$$

Emballement d'une MCC

<https://www.youtube.com/watch?v=1gofJ7zXhRc>

Application sur le couple moteur en fonction de la charge mécanique :

Exercice 5 :

Soit un moteur à courant continu de 2 paires de pôles et de deux paires de voies d'enroulement.

Sa résistance vaut $R=0,5\Omega$.

Pour une vitesse de $1500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$, on relève une fem $E = 240\text{V DC}$.

Le moteur est couplé à une ventilation qui demande un couple :

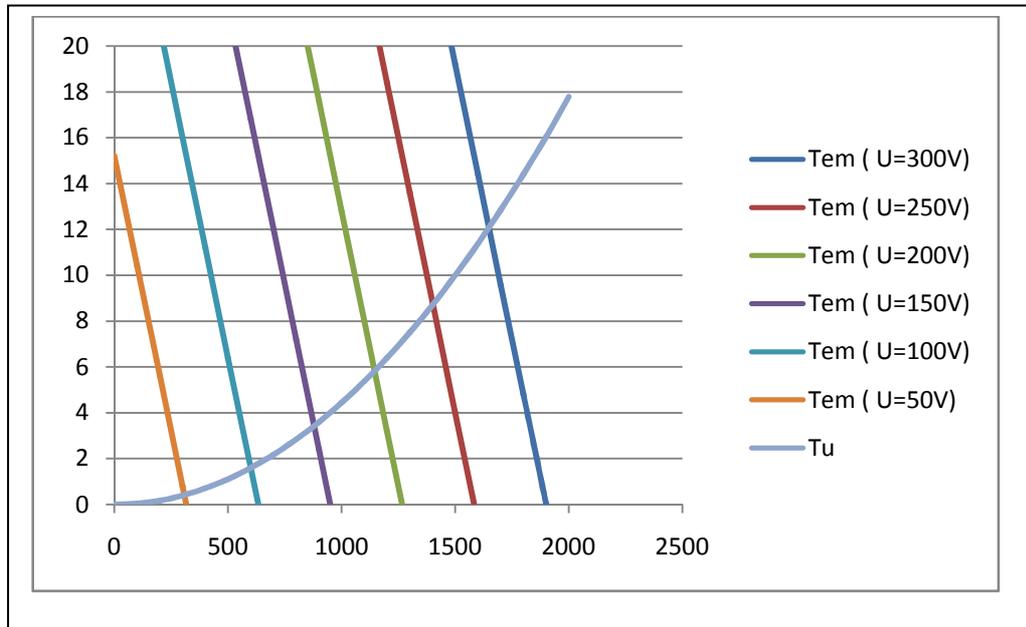
$$T_u = 16 \cdot 10^{-3} \cdot n^2 \quad (\text{avec } n \text{ en } \text{Tr} \cdot \text{s}^{-1})$$

- Calculer la valeur de K en $\text{V} \cdot \text{S} \cdot \text{rad}^{-1}$.
- En utilisant l'équation donnant le couple électromagnétique en fonction de Ω :

$$T_{em} = - \frac{K^2}{R} \cdot \Omega + \frac{K \cdot U}{R}$$

Faire l'application numérique pour $U=300\text{V}$ et tracer la droite $TU=f(\Omega)$.

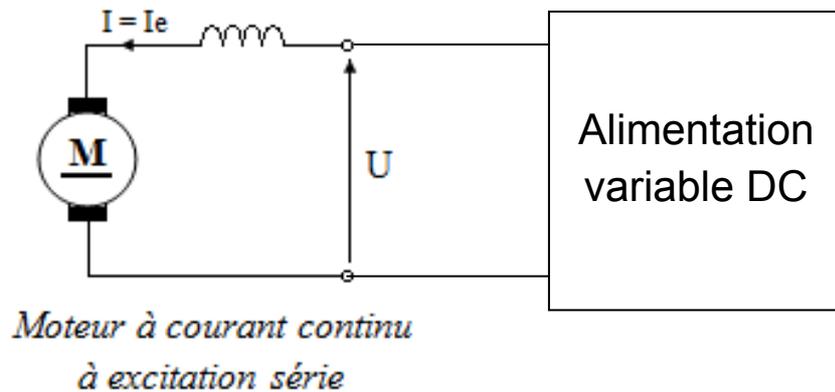
On donne le graphique avec une échelle adaptée à la courbe de couple $T_u=f(n)$:



- En considérant que $T_{em}=T_u$ en régime établi, déterminer les points de fonctionnement pour $N=500$; 1000 et 1500 tr.min^{-1} .
- Déterminer graphiquement pour les trois points de fonctionnement, la tension U correspondant aux tensions d'induit permettant d'entraîner la ventilation aux trois vitesses $N=500$; 1000 et 1500 tr.min^{-1} .
- Déterminer par calcul pour un point de fonctionnement, la tension U correspondant à la tension d'induit permettant d'entraîner la ventilation à la vitesse $N=1000$ tr.min^{-1} .

2.5. Expression du couple moteur en régime établi pour une excitation série.

Schéma de montage de la machine :



En fonctionnement moteur, la loi des mailles nous donne :

$$U = E + RI \quad (1)$$

$$T = \frac{E \cdot I}{\Omega} \quad (2)$$

$$E = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{p}{a} \cdot N \cdot \phi_{(I)} \cdot \Omega = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{p}{a} \cdot NK' \cdot I \cdot \Omega = K_{série} \cdot I \cdot \Omega \quad (3)$$

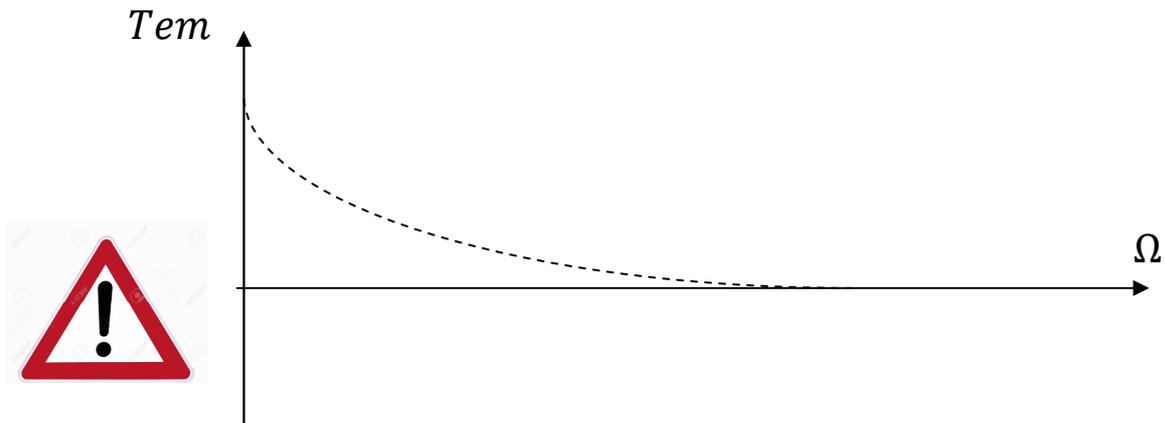
En utilisant l'expression (1) et (3), on peut écrire que :

$$I = \frac{U}{K_{série} \cdot \Omega + R} \quad (1bis)$$

$$T_{em} = \frac{E \cdot I}{\Omega} = \frac{K_{série} \cdot I \cdot \Omega \cdot I}{\Omega} = K_{série} \cdot I^2 \quad (2bis)$$

En remplaçant (1bis) dans (2bis), on trouve :

$$T_{em} = K_{série} \cdot I^2 = K_{série} \cdot \left(\frac{U}{K_{série} \cdot \Omega + R} \right)^2$$



Attention, à vide et au démarrage, le moteur à tendance à s'emballer.

On utilise principalement ce moteur dans le cas d'une traction électrique ou la charge ne peut pas être nulle.

Exercice 6 :

On considère un moteur à courant continu à excitation série :

1. Donner le schéma électrique équivalent d'un moteur à courant continu à excitation série.

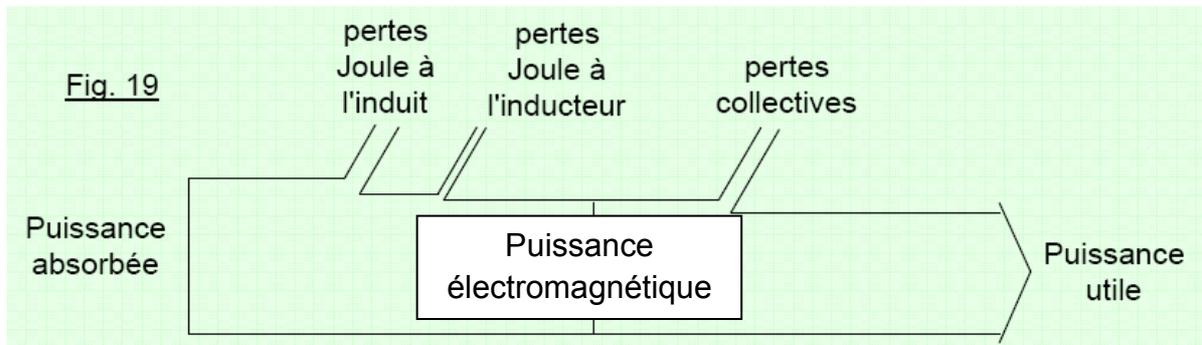
On donne :

- la tension d'alimentation du moteur : $U = 200 \text{ V}$
- résistance de l'inducteur : $r = 0,5 \Omega$
- résistance de l'induit : $R = 0,2 \Omega$
- courant consommé : $I = 20 \text{ A}$
- vitesse de rotation : $n = 1500 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$

Calculer :

2. La f.e.m. du moteur.
3. La puissance absorbée, la puissance dissipée par effet Joule et la puissance utile si les pertes collectives sont de 100 W (Voir synoptique 2.6).
4. En déduire le moment du couple utile et le rendement.
5. Au démarrage, le courant doit être limité à $I_d = 40 \text{ A}$, calculer la valeur de la résistance du rhéostat à placer en série avec le moteur.

2.6. Expression du rendement :



$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{absorbée}}}$$

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

Exercice 7 :

La plaque signalétique d'un moteur à courant continu à excitation indépendante indique : 1,12 kW 1200 tr/min induit 220 V 5,7 A excitation 220 V 0,30 A 57 kg.

1. Calculer le couple utile nominal (en Nm).
2. Calculer le rendement nominal.

Exercice 8 :

Sur la plaque signalétique d'un moteur à courant continu, le constructeur indique les caractéristiques suivantes :

- Tension d'alimentation : **$U = 48 \text{ V}$**
- Résistance interne : **$r = 16 \ \Omega$**
- Courant de démarrage : **$I_0 = 3 \text{ A}$**
- Puissance absorbée à vide à 2100 tr.min^{-1} : **4.8 W**
- Intensité du courant à vide : **100 mA**
- Puissance nominale absorbée à 1500 tr.min^{-1} : **43 W**
- Intensité nominale absorbée à 1500 tr.min^{-1} : **900 mA**
- Puissance nominale utile à 1500 tr.min^{-1} : **27 W**

Remarque : « à vide » signifie que le moteur n'entraîne rien (aucune charge).

1. Ecrivez l'expression littérale de la tension aux bornes d'un moteur à courant continu en indiquant les unités et la signification de chacune des grandeurs.
2. En utilisant les données du constructeur, montrez que lors du démarrage la force électromotrice du moteur est nulle. Interprétez ce fait en donnant la valeur de la vitesse de rotation Ω lors du démarrage.
3. Calculez la puissance P_A absorbée par le moteur dans les conditions nominales et comparez votre résultat aux données du constructeur.
4. Calculez la puissance P_J perdue par effet Joule en régime nominal.
5. Calculez la puissance électromagnétique P_E absorbée par les actions mécaniques en régime nominal.

On admet que la puissance mécanique P_M absorbée par les actions mécaniques internes est égale à la puissance électromécanique P_E absorbée à vide : à vide **$P_M = P_E$** car **$P_U = 0 \text{ W}$**

6. Calculez la puissance mécanique P_M absorbée par les actions mécaniques internes en régime nominal.
7. Calculez la puissance mécanique P_M absorbée par les actions mécaniques internes à vide.
8. Déduisez des deux questions précédentes l'évolution de la puissance mécanique P_M absorbée par les actions mécaniques internes, en fonction de la vitesse :
 - Si la vitesse Ω du moteur augmente, P_M augmente, diminue, ou reste constante ?
 - Si la vitesse Ω du moteur diminue, P_M augmente, diminue, ou reste constante ?
9. Calculez la valeur du rendement η du moteur en régime nominal.
10. Calculez la valeur du couple électromagnétique **CE** du moteur en régime nominal.

Exercice 9 :

On se propose d'étudier le système de ventilation forcée d'une automobile

– Étude du moteur entraînant la ventilation

Pour actionner le ventilateur on utilise un moteur à courant continu à aimants permanents.

1. Représenter le modèle électrique équivalent à l'induit du moteur.

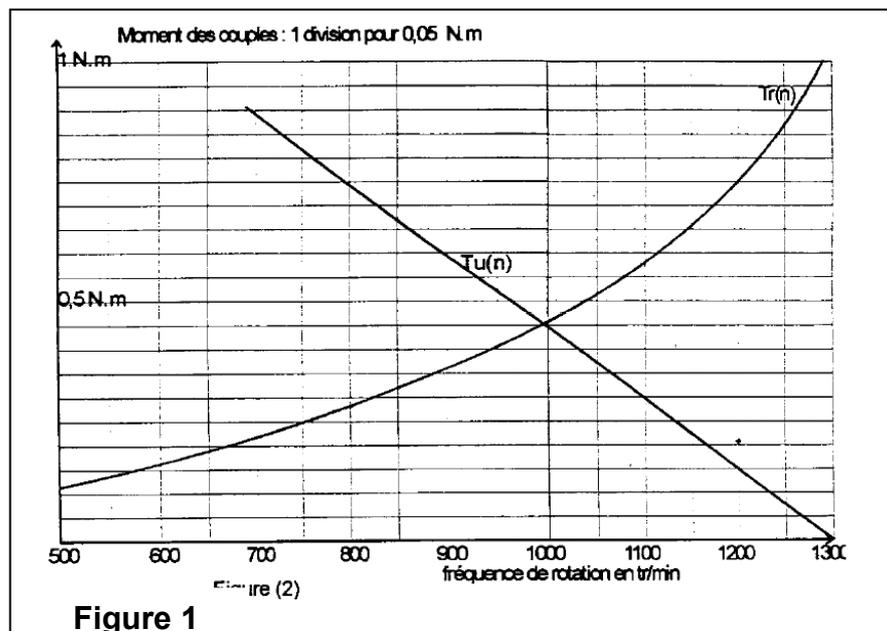
Un essai du moteur sous tension réduite, rotor bloqué est fait. L'intensité I est alors de 15,0 A et la tension U est égale à 6,7 V

2. Quelle est la valeur de la force électromotrice E lorsque le rotor du moteur est bloqué ?
3. En déduire la valeur de la résistance de l'induit.

Ce moteur à courant continu doit entraîner le ventilateur à différentes vitesses. Pour cela on applique à son induit une tension U réglable. La figure (1) donne la caractéristique mécanique du moteur pour $U = 10$ V.

Sur cette figure (2), on a aussi représenté la caractéristique mécanique du ventilateur $T_r = f(n)$.

4. Déterminer les valeurs T et n des coordonnées du point de fonctionnement en régime établi du groupe moteur-ventilateur pour $U = 10$ V.
5. En déduire la puissance utile fournie par le moteur.
6. L'intensité I_a du courant, pour ce fonctionnement vaut 10,5 A. En déduire la puissance P_a absorbée par le moteur.
7. Calculer le rendement du moteur.



3. Le moteur universel :

Les moteurs universels sont des moteurs bobinés de type série, dont les enroulements du rotor sont comparables à ceux des moteurs c.c. (**Figure 1**).

Le terme universel découle du fait qu'ils peuvent fonctionner indifféremment sous alimentation c.c. ou c.a.

Leur fonctionnement et leur construction ressemblent de près à ceux des moteurs c.c., leurs composantes étant cependant conçues pour un meilleur rendement lorsqu'ils sont alimentés en courant c.a. sous des fréquences allant jusqu'à la fréquence industrielle (50Hz).

Leur plage de vitesses de fonctionnement va normalement de 3 000 à 15 000 tr/min. Leur vitesse décroît à mesure que la charge augmente.

Ils se caractérisent par un rapport puissance-encombrement élevé.

Ils nécessitent davantage d'entretien par heure de fonctionnement que les autres types de moteurs en raison du montage balais/collecteur.

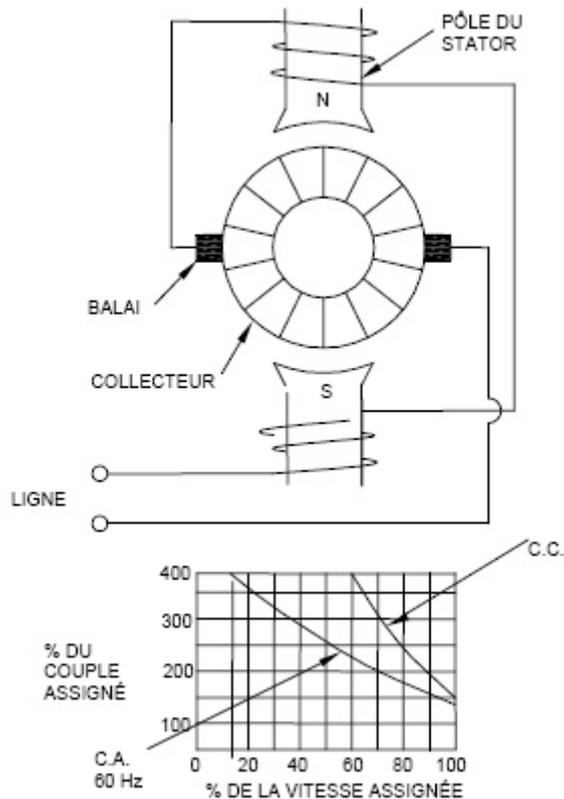
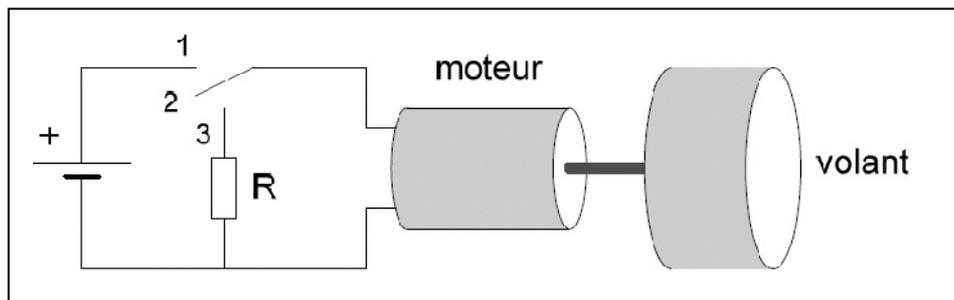


Figure 1 : Moteur universel

4. Exercices d'entraînement sur les moteurs à courant continu:

Exercice 10 :

Un moteur à courant continu à aimants permanents est couplé à un volant d'inertie (disque massif) :



1. On place le commutateur en position 1 : le moteur démarre et atteint sa vitesse nominale.

On place ensuite le commutateur en position 2 :

- Le moteur s'emballe
- Le moteur change de sens de rotation
- Le moteur s'arrête lentement
- Le moteur s'arrête rapidement

(Entourer la ou les bonnes réponses)

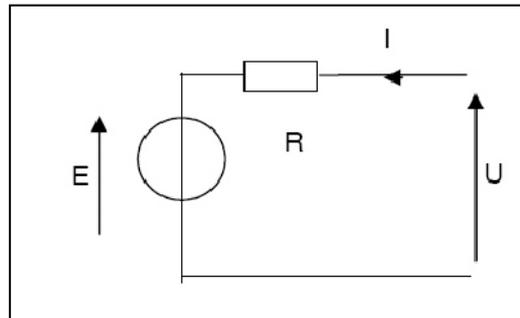
2. On place à nouveau le commutateur en position 1.

Puis on commute en position 3.

- 2.1. Que se passe-t-il ?
- 2.2. Que se passe-t-il si on diminue la valeur de la résistance R ?
- 2.3. Donner une application pratique.

Exercice 11 :

On utilise un moteur à aimants permanents donc à excitation indépendante. Le flux ϕ est constant. Le modèle de Thévenin de l'induit est donné :



E est la force électromotrice (f. é. m) de la machine à courant continu.

R est la résistance de l'induit. $R = 1,5 \Omega$.

1. Exprimer la tension d'alimentation U du moteur en fonction de E , R et I .
2. Quelle est la valeur de E lors du démarrage du moteur ? Justifier votre réponse.
3. Pour un courant d'induit $I = 2,0 \text{ A}$, calculer la valeur minimum de la tension U nécessaire pour faire démarrer le moteur.

Exercice 12 :

La plaque signalétique d'une génératrice à courant continu à excitation indépendante indique :

- $T_u = 11,2 \text{ Nm}$ 1500 tr/min.
- induit 220 V 8,6 A.
- excitation 220 V 0,26 A.
- masse 38 kg.

1. Calculer la puissance mécanique consommée au fonctionnement nominal.
2. Calculer la puissance consommée par l'excitation.
3. Calculer la puissance absorbée.
4. En déduire le rendement nominal.

Exercice 13 :

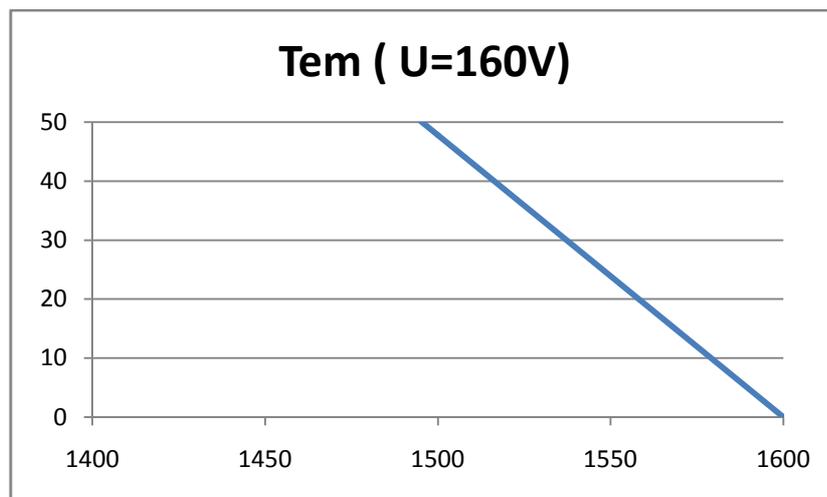
Un moteur à courant continu à excitation indépendante et constante a les caractéristiques suivantes :

- Tension d'alimentation de l'induit : $U = 160 \text{ V}$.
- Résistance de l'induit : $R = 0,2 \Omega$.

1. La fem E du moteur vaut 150 V quand sa vitesse de rotation est $n = 1500 \text{ tr/min}$. En déduire la relation entre E et n .
2. Déterminer l'expression de I (courant d'induit en A) en fonction de E .
3. Déterminer l'expression de T_{em} (couple électromagnétique en Nm) en fonction de I .
4. En déduire que : $T_{em} = 764 - 0,477.n$ avec n en tr.min^{-1} .
5. On néglige les pertes collectives du moteur. Justifier qu'alors :
 T_u (couple utile) = T_{em} .
6. Calculer la vitesse de rotation du moteur à vide.

Le moteur entraîne maintenant une charge dont le couple résistant varie proportionnellement avec la vitesse de rotation (20 Nm à 1000 tr/min).

7. Calculer la vitesse de rotation du moteur en charge :
 - par une méthode graphique



- par un calcul algébrique

8. En déduire le courant d'induit et la puissance utile du moteur.

Exercice 14 :

Un moteur à courant continu à excitation série est alimenté par une source de tension continue et constante $U = 220 \text{ V}$. $E = K_1 \cdot K_2 \cdot I \cdot \Omega = K_3 \cdot I \cdot \Omega$

Pour simplifier l'étude, nous négligerons les résistances de l'inducteur et de l'induit, ainsi que les pertes collectives.

1. Montrer que le couple du moteur est proportionnel au carré du courant qu'il consomme.
2. Montrer que le couple est inversement proportionnel au carré de la vitesse de rotation.
3. En déduire que le moteur s'emballe à vide.
4. D'après la question 1-2, on peut écrire que :

$$T_u = \frac{a}{n^2}$$

T_u : couple utile du moteur (en Nm)

n : vitesse de rotation (en tr/min)

a : constante

La plaque signalétique d'un moteur indique :

220 V 1200 tr/min 6,8 A

En déduire la valeur numérique de la constante a .

Par la suite, on prendra : $a = 20 \times 10^6 \text{ Nm}(\text{tr}/\text{min})^2$

5. Tracer l'allure de la caractéristique mécanique $T_u(n)$.

Le moteur entraîne un compresseur de couple résistant constant 10 Nm.

6. En déduire la vitesse de rotation de l'ensemble.

Le moteur entraîne un ventilateur dont le couple résistant est proportionnel au carré de la vitesse de rotation (15 Nm à 1000 tr/min).

7. En déduire la vitesse de rotation de l'ensemble.

Exercice 15 :

Une génératrice à excitation indépendante délivre une fem constante de 210 V pour un courant inducteur de 2 A. Les résistances des enroulements induit et inducteur sont respectivement 0,6 Ω et 40 Ω . Les pertes « constantes » sont de 400 W.

Pour un débit de 45 A, calculer :

1. La tension d'induit U .
2. La puissance utile P_u .
3. Les pertes Joule induit et inducteur.
4. La puissance absorbée P_a .
5. Le rendement η .

Exercice 16 :

Nous étudions dans ce problème, le principe d'une voiture électrique. Le moteur à courant continu utilise une électronique de puissance simple en sortie de batterie.

C'est la raison pour laquelle certains constructeurs décident d'équiper leur première génération de voiture de ce type de moteur.

Les caractéristiques du moteur sont les suivantes :

Machine à excitation indépendante la force électromotrice E est proportionnelle à la vitesse de rotation angulaire Ω (en rad/s) $E = K.\Omega$ avec $K = 1,31 \text{ V.s/rad}$.

La résistance du circuit d'induit $R = 0,15 \Omega$, le moment du couple de pertes magnétiques et mécaniques est négligé. $T_p=0$; la tension d'induit est constante $U = 260 \text{ V}$.

1. Le moteur est traversé par un courant d'intensité $I = 170 \text{ A}$

1.1 Représenter le modèle électrique équivalent de l'induit.

Calculer :

1.2. la force électromotrice E du moteur.

1. 3. la fréquence de rotation n du rotor en tr/min.

1. 4. les pertes P_j dissipées par effet Joule dans l'induit.

1. 5. la puissance utile P_u .

1. 6. le moment T_u du couple utile.

2. Le moteur entraîne le véhicule électrique.

2.1 Caractéristique mécanique du moteur.

Deux essais préalables du moteur ont été réalisés :

- un essai à vide pour lequel $n=1880 \text{ tr/min}$

- un essai en charge $n = 1700 \text{ tr/min}$ et $T_u = 234 \text{ N.m}$.

Tracer la caractéristique mécanique du moteur $T_u (n)$ sur le document réponse 1.

2.2 le véhicule roule en terrain plat

Le moteur de la voiture est soumis à un couple résistant dont le moment est lié à la fréquence de rotation par la caractéristique mécanique $T_r (n)$ donnée sur le document réponse 1.

2.2.1. Déterminer :

- le moment T_1 du couple résistant .

- la fréquence de rotation n_1 (en tr/min) du moteur.

2.2.2. Justifier que T_u est proportionnel à I . En déduire l'intensité I_1 du courant traversant l'induit de la machine.

Document réponse 1

