

Moteurs et génératrices électriques



L'étude de l'électromagnétisme des régimes quasi permanents a permis de mettre en évidence un couplage entre la mécanique et l'électricité, via l'induction et les forces de Laplace. Nous nous proposons d'examiner ici plus spécifiquement la conversion de puissance électromécanique en traitant le cas des moteurs et des génératrices.

Les moteurs électriques ont plusieurs avantages :

- leur rendement est important,
- ils sont moins polluants et moins bruyants que les moteurs thermiques,
- ils démarrent seuls et facilement (pas de boîte de vitesse),
- ils sont faciles d'emploi,
- il est possible d'inverser leurs sens de rotation sans intervention de dispositifs mécaniques.

Les moteurs électriques sont désormais utilisés dans toutes les gammes de puissances, du sèche-cheveux à la motrice de TGV (et ceci dû en partie à l'avènement de l'électronique de puissance), en passant par les vélos et les voitures électriques.

1 Conversion électromécanique de puissance

1.1 Action mécanique sur un dipôle magnétique

1. Rappeler l'expression de la force de Lorentz pour une distribution volumique de charges.
2. À partir de la force de Lorentz s'exerçant sur un ensemble de porteurs de charges, donner l'expression de la force de Laplace.
3. Donner l'expression du travail des forces de Laplace pour un circuit filiforme, rigide, à courant constant. On fera apparaître la notion de "flux coupé".
4. Rappeler l'expression du couple mécanique subit par un moment magnétique \vec{M} plongé dans un champ magnétique \vec{B} .
5. Comment exploiter ce couple mécanique dans le contexte des moteurs ?

1.2 Bilan de puissance

On considère un circuit électrique filiforme. Donner l'expression de la puissance mécanique de la force de Laplace, et l'interpréter en faisant apparaître le champ électromoteur $\vec{E}_m \equiv \vec{V} \wedge \vec{B}$, où \vec{V} est la vitesse locale du circuit considéré.

2 Machines à champ magnétique tournant

2.1 Création d'un champ magnétique tournant

Dans le référentiel du laboratoire un champ magnétique tournant \vec{B} a pour coordonnées :

$$\vec{B} = B_S \cos(\omega_S t) \vec{u}_x + B_S \sin(\omega_S t) \vec{u}_y. \quad (1)$$

Un tel champ tournant peut être réalisé en faisant tourner un aimant permanent (ou une bobine) ou bien en positionnant correctement deux bobines statiques, la première sur l'axe (Ox) parcourue par un courant $I_x = I_0 \cos(\omega_S t)$, la seconde sur (Oy) parcourue par $I_y = I_0 \sin(\omega_S t)$. Toutefois le système diphasé décrit n'est pas celui utilisé en pratique puisque la distribution d'électricité par EDF est effectuée en réseau monophasé (domestique) ou triphasé.

Alimentation triphasée : La distribution d'électricité par EDF se fait le plus fréquemment sous forme de courants alternatifs triphasés, de même amplitude et de phase $\varphi_1 = 0$, $\varphi_2 = \frac{2\pi}{3}$ et $\varphi_3 = \frac{4\pi}{3}$. Montrez qu'en disposant trois bobines sur 3 axes séparés d'un angle $\frac{2\pi}{3}$, alimentées par le courant triphasé d'EDF, on peut produire un champ magnétique tournant.

Alimentation monophasée : Montrer qu'un champ magnétique de la forme :

$$\vec{B} = B_S \cos(\omega_S t) \vec{u}_x \quad (2)$$

peut être considéré comme la superposition de deux champs tournants.

2.2 Vocabulaire

Dans le contexte général des moteurs et des génératrices électrique, définir : un stator, un rotor, un induit, un inducteur.

3 Machine synchrone

3.1 Cas simple : machine bipolaire

On considère un moment magnétique \vec{M} plongé dans un champ magnétique tournant \vec{B} . On note \vec{u}_S la direction du champ (dit statorique) et \vec{u}_R la direction du moment magnétique (rotor). On suppose que le rotor tourne à la fréquence angulaire ω_R alors que le champ tourne à ω_S .

1. Donner l'expression des angles $\theta_R(t)$ (resp. $\theta_S(t)$) du rotor (resp. du stator) par rapport à une direction fixe (par exemple \vec{u}_x) au cours du temps. On prendra comme conditions initiales $\theta_S(0) = \theta$ et $\theta_R(0) = \alpha - \theta$, où α est le retard de phase du rotor et θ la coordonnée cylindrique.
2. En déduire l'expression du couple mécanique instantané Γ_z exercé sur le rotor, où \vec{u}_z est la direction de rotation du rotor. Que peut-on en déduire pour le fonctionnement d'une machine synchrone? Justifier alors le terme de *synchrone*.
3. On suppose désormais que le synchronisme est assuré (*i.e.* $\omega_R = \omega_S$), pour un rotor soumis à un couple résistif $\vec{\Gamma}_r = -\Gamma_r \vec{u}_z$. Donner les différents points de fonctionnement possible du système, et étudier leur stabilité.
4. Que peut-on dire du démarrage d'un moteur synchrone?

Facultatif: Sur la branche stable de fonctionnement, étudier les petites oscillations du rotor autour du point de fonctionnement. Ce phénomène, appelé "pompage" du moteur synchrone, provient de l'excitation par les fluctuations du couple résistif et en pratique est amorti par des enroulements spécifiques.

3.2 Alternateur

Désormais, on considère la même géométrie, mais le stator n'est plus alimenté. En revanche, un couple extérieur entraîne le rotor à fréquence angulaire constante. Décrire, sans calcul, ce qu'il se passe. Application? Quel est le signe de α ?

4 Machine asynchrone

Le moteur asynchrone est un moteur à champ tournant, possédant un certain nombre de similitudes avec le moteur synchrone, mais dans lequel le rotor a une fréquence de rotation légèrement inférieure à celle du champ tournant. Pour avoir une

première approche de ce phénomène considérons un disque métallique (sans propriétés magnétiques) pouvant tourner sur un pivot. La rotation d'un aimant placé au dessus de ce disque provoque sa mise en rotation mais celui-ci tourne plus lentement. En effet, la variation de flux magnétique que subit ce conducteur induit l'apparition de courant de Foucault, ceux-ci, d'après la loi de Lenz, s'opposent à la cause qui les a créés, cette cause étant le déplacement relatif de l'aimant par rapport au disque. Un couple moteur entraîne alors le disque en rotation. De plus, si le disque tournait à la même vitesse que l'aimant il y aurait immobilité relative, donc flux constant, les courants de Foucault seraient supprimés, le couple moteur inexistant. Nous avons là le principe du moteur asynchrone.

Il n'est donc pas nécessaire dans les machines asynchrones d'alimenter le rotor. Il pourra être constitué de une ou plusieurs bobines en court-circuit ou bien d'une cage d'écureuil (voir figure 1).

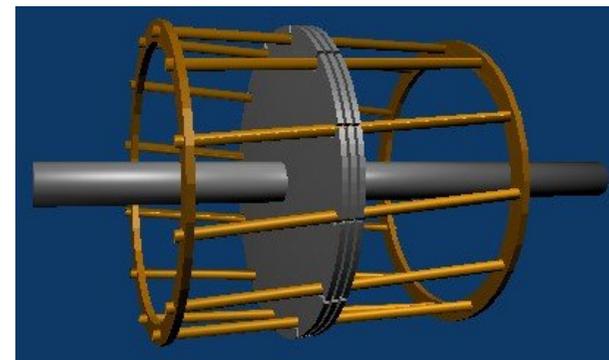


FIGURE 1 – Rotor cage d'écureuil.

4.1 Étude électrique du rotor

On considère un rotor simplifié, constitué d'une spire de surface Σ_R . L'angle que fait cette spire avec une direction fixe (par exemple \vec{u}_x) est $\theta_R(t) = \omega_R t$, de vecteur unitaire $\vec{u}(\theta_R)$. Le stator produit un champ magnétique tournant de la même forme que précédemment.

1. Donner l'expression du flux $\Phi(t)$ traversant la bobine rotorique. On notera $\omega_g = \omega_S - \omega_R$ (vitesse dite de "glissement").

2. En déduire que la f.e.m. induite dans le rotor est de la forme

$$e_R(t) = \omega_g \Phi_0 \sin(\omega_g t). \quad (3)$$

On introduit la résistance R et l'inductance L de la bobine rotorique. À la fréquence de glissement, l'impédance complexe s'écrit $Z_R = R + jL\omega_g = |Z| e^{j\gamma}$.

3. Exprimer le courant $I_R(t)$ qui parcourt la bobine. En déduire que

$$\vec{M} = \frac{\omega_g \Phi_0}{|Z|} \sin(\omega_g t - \gamma) \Sigma_R \vec{u}_R(\theta_R) \quad (4)$$

Ce moment magnétique induit varie à la fois à cause de la rotation à ω_R , et de la modulation de I_R à ω_g .

4.2 Étude mécanique

Ce moment magnétique induit est soumis à un champ magnétique tournant, et donc à un couple mécanique Γ_z .

1. Donner l'expression du couple mécanique instantané et moyenne.
2. Tracer l'allure de la courbe $\Gamma_z(\omega_g)$.
3. On considère que le rotor est également soumis à un moment résistif Γ_r . Discuter des différents points de fonctionnement en régime établi en fonction de Γ_r , en particulier leur stabilité.
4. Comment démarrer un moteur asynchrone ?

5 Machine à courant continu

Les moteurs continus sont fondés sur une stratégie différente de celle des machines triphasées. Elle consiste, dans un champ statorique constant, à utiliser la rotation pour commuter les courants dans les conducteurs rotoriques, de telle sorte qu'il existe toujours des moments magnétiques \vec{M} (associés à ces circuits) qui soient non colinéaires au champ statorique. Pour produire ce champ constant on peut utiliser un aimant ou un électro-aimant alimenté en continu créant un champ permanent.

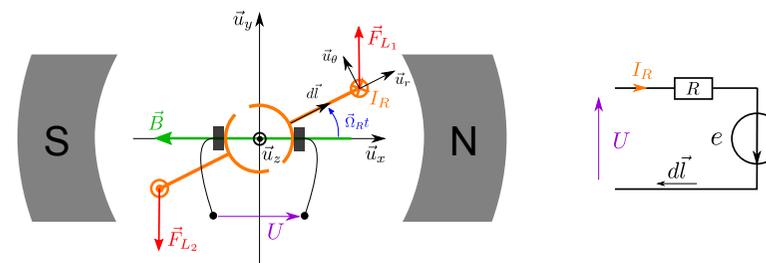


FIGURE 2 – Schéma de principe d'un moteur à courant continu.

5.1 Principe général

Une nouvelle fois, intéressons nous au cas simple où le rotor ne comporte qu'une seule spire rectangulaire de largeur $2a$ (a rayon du rotor) et de longueur h . Si cette spire est parcourue par un courant continu I_R , plongée dans un champ magnétique \vec{B} elle subira un couple créé par les forces de Laplace (voir figure 2). Or le champ magnétique, qui est approximativement radial, change de signe au cours de la rotation (côté Nord et côté Sud), donc le couple également. Pour maintenir un couple de signe constant il faut inverser le sens du courant qui circule dans la spire au moment où le champ \vec{B} change de signe, c'est le rôle du collecteur. Il s'agit, dans le cas d'une seule spire, d'une simple bague divisée en deux, les balais qui assurent le contact sont reliés chacun à une borne fixe, comme le montre la figure 3.

Si on veut que B_r varie sinusoidalement avec θ , on impose $\vec{B} = -B_S \vec{u}_x$. Montrer que :

$$\langle \Gamma_z \rangle = \frac{2}{\pi} 2ahB_S I_R = \frac{2}{\pi} \Phi_S I_R.$$

Le couple est donc proportionnel au courant appliqué dans le rotor. Si l'on suppose B de forme non sinusoidale, on introduit un facteur de forme K tel que $\langle \Gamma_z \rangle = K \Phi_S I_R$.

5.2 Aspect électrique

La spire en mouvement est soumise à une force électromotrice induite. Montrer que $e = -2ah\Omega B_r$.

La force électromotrice e est redressée par le collecteur et possède donc une valeur moyenne :

$$E \equiv -\langle e \rangle = \frac{2}{\pi} \Phi_S \Omega$$

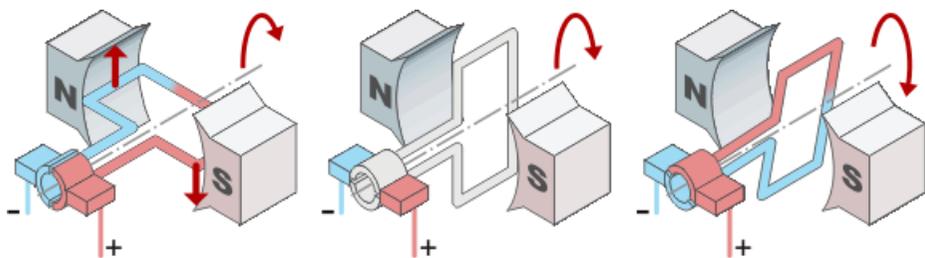


FIGURE 3 – Schéma de principe pour le collecteur.

(ou bien dans un cas plus général : $E = K\Phi_S\Omega$). Cette force contre-électromotrice (f.c.e.m.) est opposée au courant I_R parcourant la spire et responsable du couple moteur. La puissance électrique correspondante (en négligeant toutes pertes) est $P_e = EI_R = K^2\Phi_S I_R\Omega$. On vérifie bien la conversion électromécanique puisque la puissance mécanique fournie est $P_m = \Gamma_z\Omega = K^2\Phi_S I_R\Omega$. Par ailleurs, si U est la tension aux bornes de l'induit (le rotor), et R sa résistance, on peut écrire $U = E + RI_R$.

Cette f.e.m. induite est à la base de la dynamo, génératrice de courant continu. Le rotor n'est alors pas connecté à un générateur mais à une charge. La force électromotrice e engendre alors un courant circulant dans son sens. Ce courant provoque à son tour un couple résistif.

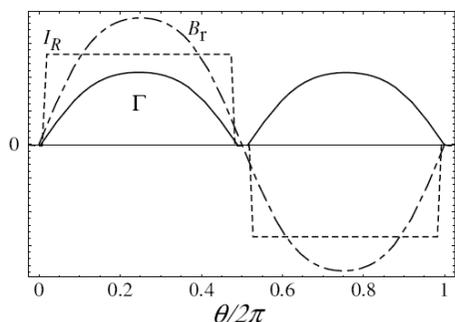
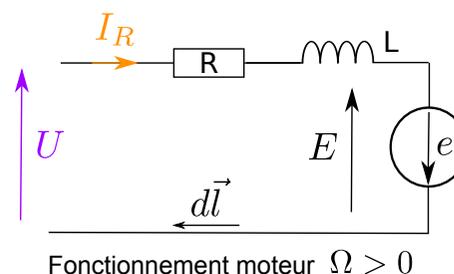


FIGURE 4 – Champ radial, courant et couple, en fonction de l'angle pour un moteur à une spire.



Fonctionnement moteur $\Omega > 0$

FIGURE 5 – Schéma électrique équivalent du moteur à courant continu.

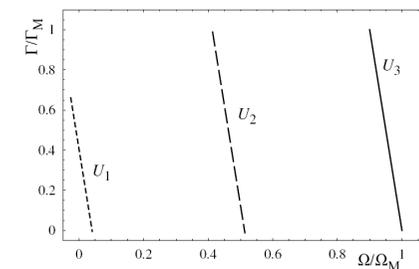


FIGURE 6 – Caractéristiques mécaniques du moteur à courant continu.

5.3 Caractéristiques de fonctionnement

La résistance R de l'induit, bien que très faible, affecte les propriétés mécaniques du moteur.

1. A partir du schéma électrique figure 5, montrer que :

$$\Omega = \frac{U}{K\Phi} - \frac{RI_R}{K\Phi}$$

Toutefois, Ω n'est pas imposé par la charge mais par la tension d'alimentation U , ce qui fait tout l'intérêt du moteur à courant continu : il est aisé de l'asservir en vitesse.

2. Par ailleurs, en remplaçant I_R par son expression en fonction du couple. Montrer que :

$$\Gamma_z = \frac{K^2\Phi^2}{R} \left(\frac{U}{K\Phi} - \Omega \right)$$

L'allure de $\Gamma_z(\Omega)$ pour différente tension U est donnée sur la figure (6).

3. Expliquer pourquoi tous les points de fonctionnement de cette caractéristique sont stables.

Ces caractéristiques, très différentes de celles obtenues pour les machines à champ magnétique tournant, permettent un contrôle indépendant de la vitesse (par U) et du couple (par la charge), et font tout l'intérêt des moteurs à courant continu.

Transformateurs électriques



Ce TD a pour but de détailler le fonctionnement et les principales propriétés des transformateurs électriques. Ceux-ci sont par exemple utilisés par EDF en bout de ligne, d'un côté pour élever la tension électrique de la tension de production (6000 V) à la tension de transport (300 kV), puis à l'autre extrémité pour abaisser successivement cette tension jusqu'à la tension d'utilisation (230 V ou 380 V). Nous utilisons également des transformateurs pour charger les batteries (téléphones et ordinateurs portables par exemple), ils convertissent la tension du secteur de 230 V à 12 V.

1 Le transformateur électrique

Le transformateur est constitué d'un matériau ferromagnétique (le noyau) sur lequel sont bobinés deux conducteurs en cuivre :

- *circuit primaire* : n_1 spires, tension u_1 , intensité i_1 ,
- *circuit secondaire* : n_2 spires, tension u_2 , intensité i_2

Le noyau est un matériau ferromagnétique présentant la perméabilité relative μ_r la plus élevée possible. *Pourquoi ?*

2 Équations de fonctionnement

2.1 Hypothèses simplificatrices

Nous considérerons dans un premier temps que :

- le noyau est de perméabilité μ_r , supposé linéaire, homogène et isotrope (milieu LHI). *Rappeler la relation entre \vec{B} et \vec{H} ,*
- l'enroulement en cuivre est supposé parfaitement conducteur (*i.e.* pas de pertes par effet Joule),
- le noyau magnétique est torique et sans fuites magnétiques (les lignes de champs sont assimilables à des cercles concentriques). De plus, on suppose que le diamètre de la section (Σ) du tore est très inférieur au rayon R de ce dernier, de façon à considérer les champs uniformes sur une section.

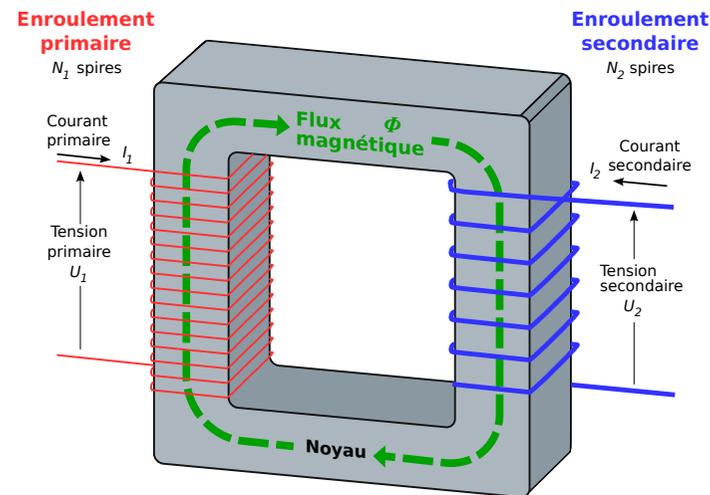


FIGURE 7 – Transformateur torique et conventions d'orientation.

2.2 Questions

1. Donnez la relation entre u_1 et u_2 . On notera $m = n_2/n_1$.
2. A l'aide du théorème d'Ampère, donnez une relation entre i_1 , i_2 et $H = \|\vec{H}\|$.
3. Montrez alors que le flux magnétique ϕ à travers toute section du tore est de la forme :

$$\phi = \frac{n_1 i_1 + n_2 i_2}{2\pi R} \mu_r \mu_0 \Sigma. \quad (5)$$

4. Donner alors les équations donnant u_1 et u_2 . Quelles grandeurs caractéristiques des enroulements retrouve-t-on ?

3 Le transformateur parfait

On suppose que $\mu_r \rightarrow +\infty$ mais que ϕ reste fini.

1. Donnez alors la relation entre i_1 et i_2 .
2. Quel est le rendement du transformateur parfait ?
3. On considère une impédance de charge Z_2 , connectée au secondaire. Comment est vue cette impédance depuis le primaire. Intérêt ?

4. On suppose qu'on alimente le primaire par une source de tension sinusoïdale d'amplitude e_0 et de résistance interne r . Le secondaire alimente une charge résistive R . Quelle valeur de m maximise la puissance dissipée dans la charge ?

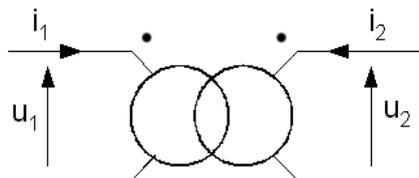


FIGURE 8 – Schéma équivalent du transformateur parfait.

4 Le transformateur réel

Dans cette section, on se propose d'étudier les différents écarts d'un transformateur réel à un transformateur idéal.

4.1 Perméabilité du matériau (modèle linéaire)

Supposons que la perméabilité magnétique μ_r est finie. On obtient alors :

$$n_1 i_1 + n_2 i_2 = \frac{2\pi R}{\mu_r \mu_0 \Sigma} \phi. \quad (6)$$

1. Donner la relation entre $u_1^{(0)}$ et $i_1^{(0)}$, tension et courant primaires lorsque le secondaire est en circuit ouvert. Commentaires.
2. Donner alors un schéma équivalent à ce transformateur réel en utilisant le symbole du transformateur parfait.
3. Quelles sont les autres déviations à ce modèle que l'on doit prendre en compte ? Quelles en sont les causes ? Est-il possible de les rendre aussi faibles que possible ? Donner alors un schéma électrique équivalent à un tel transformateur.

4.2 Non-linéarités du noyau ferromagnétique

Un milieu ferromagnétique est non-linéaire lorsque les champs sont "suffisamment importants" (par rapport à quoi ?). On observe alors un comportement hystérique et des courants non sinusoïdaux apparaissent. À quoi sont reliées les pertes par hystérésis ? Quelle propriété doit présenter le milieu magnétique pour les minimiser ?

5 Détermination expérimentale des pertes

Pour déterminer expérimentalement le rendement d'un transformateur, on dispose d'une méthode efficace dite *des pertes séparées*. Les pertes sont de deux sortes :

- les pertes cuivres \mathcal{P}_c : pertes par effet Joule dans les bobinages primaires et secondaires,
- les pertes fer \mathcal{P}_f : pertes par hystérésis.

Pour \mathcal{P}_1 et \mathcal{P}_2 les puissances respectivement au primaire et au secondaire, on a la relation :

$$\mathcal{P}_2 = \mathcal{P}_1 - \mathcal{P}_c - \mathcal{P}_f. \quad (7)$$

L'obtention du rendement consiste donc en pratique à la détermination de \mathcal{P}_c et \mathcal{P}_f , dans les conditions les plus proches de celle du point de fonctionnement considéré.

- Les pertes fer ne dépendent que de \vec{B} , et donc uniquement de u_1 , indépendamment de la charge. En effet, on peut considérer que le champ magnétique dans le noyau ne dépend que de la tension du primaire

$$u_1 = \frac{d\phi}{dt} \approx n_1 \Sigma \frac{dB}{dt} \approx n_1 \Sigma \omega B \sin(\omega t), \quad (8)$$

dans la limite linéaire. Donc en fixant u_1 à sa valeur prise en charge, mais secondaire ouvert, la puissance dissipée par le primaire est bien \mathcal{P}_f , en supposant que le courant magnétisant est faible et que par conséquent la dissipation par effet joule qu'il génère est négligeable.

- En ce qui concerne les pertes cuivre, il suffit de mesurer les résistances des bobinages primaires et secondaires à l'ohmmètre. Attention toutefois à se rapprocher le plus possible des conditions de fonctionnement. Il existe une méthode plus précise qui consiste à court-circuiter le secondaire et ajuster l'alimentation du primaire pour donner à i_1 la valeur souhaitée. La puissance dissipée au primaire est alors \mathcal{P}_c .