

LP20 – CONVERSION ÉLECTROMÉCANIQUE DE PUISSANCE

24 mars 2016

"*Tout le monde est dans Laplace*"
DJ RORO

Romain BERTHELARD & Paul EPRON

Niveau : L2

2015 Il est souhaitable de préciser le rôle de l'énergie magnétique lors de l'étude des convertisseurs électromécaniques constitués de matériaux ferromagnétiques linéaires non saturés.

2013 Dans cette leçon, le plus grand soin dans la définition des orientations et des conventions de signe s'impose. Les applications doivent occuper une place significative dans la présentation. Ce ne sont pas les machines de technologie complexe qui illustrent le mieux les idées en jeu. Les notions de base sur l'induction sont supposées connues.

Commentaires du jury

Bibliographie

- ⚡ *Dictionnaire de la physique*, Taillet, Villain, Febvre → Définitions
- ⚡ *Électrotechnique PSI, Les nouveaux précis* → tout y est
- ⚡ *Physique tout-en-un PSI-PSI**, Dunod → complémentaire au précédent

Prérequis

- ✓ Électromagnétisme
- ✓ Principe de l'induction
- ✓ Force de Lorentz/Laplace

Expériences

- ☞ Rails de Laplace
- ☞ Aiguille de boussole dans un champ tournant

Table des matières

1	Les rails de Laplace :	2
1.1	Expérience :	2
1.2	Modèle des rails de Laplace	3
1.3	Bilan de puissances	3
1.4	Modèle des rails de Laplace en fonctionnement moteur	4
2	La machine à courant continue	4
2.1	Structure et principe de fonctionnement	5
2.2	Modes de fonctionnement	6
2.3	Bilan de puissance du moteur à courant continue	7
3	Les machines alternatives	8
3.1	Principe de fonctionnement des machines alternatives	8
3.2	Machine synchrone	9
3.3	La moteur asynchrone	10

Introduction

Rappelons quelques dates essentielles dans l'histoire de la conversion électromécanique de puissance. En 1821, Michaël Faraday (1791-1867) montre la possibilité d'extraire de l'énergie mécanique à partir d'une énergie électrique : c'était le premier moteur. En 1822, Peter Barlow (1776-1862) lui adjoint une roue dentée, la célèbre "roue de Barlow". En 1832, Hippolyte Pixii met en œuvre les principes de l'induction énoncés par Faraday, et réalise une machine formée d'un aimant en fer à cheval tournant devant une bobine de cuivre : il s'agit de la première génératrice, qui fournit un courant alternatif. André-Marie Ampère (1775-1836) suggère par la suite un dispositif de redressement mécanique permettant de produire un courant continu. Enfin, en 1869 Zénobe Théophile Gramme (1826-1901) invente la dynamo (génératrice à courant continu) et perçoit la possibilité d'en inverser le fonctionnement.

1 Les rails de Laplace :

Les rails de Laplace sont les prémices de la conversion électromécanique de puissance et vont nous permettre d'introduire les notions et conventions du domaine.

1.1 Expérience :

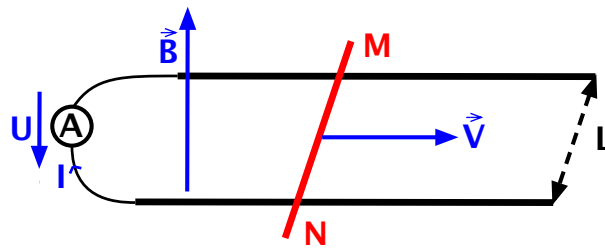


FIGURE 1 – Schéma des rails de Laplace en génératrice

Les rails de Laplace sont constitués de deux barres de conducteur fixes, parallèles et espacées d'une distance L avec une barre de conducteur mobile dessus se déplaçant à la vitesse $\vec{V}$ dans le référentiel R . Le circuit est fermé avec un ampèremètre et est immergé dans un champ magnétique constant $\vec{B}$ perpendiculaire aux barres. On notera U la différence de potentiel entre les conducteurs fixes.

Mise en évidence du fonctionnement générateur des rails de Laplace

 2 mins

On utilise un aimant en U pour générer le champ "permanent" et on ferme le circuit avec un micro-ampèremètre de précision. En déplaçant la barre mobile sur les rails on voit l'apparition d'un courant dans le circuit grâce à l'ampèremètre.

Ce phénomène s'explique qualitativement grâce à la loi de Lenz. En effet en déplaçant le conducteur mobile on modifie la surface du circuit et donc le flux de $\vec{B}$ à travers le circuit, ce qui engendre l'apparition d'une force électromotrice (noté f.é.m) et donc d'un **courant** dans le circuit. Ce courant crée à son tour un champ magnétique $\vec{B}'$ qui s'oppose au champ magnétique qui lui a donné naissance.

↓ *Modélisons maintenant ce phénomène plus quantitativement.*

1.2 Modèle des rails de Laplace

Définition : Champ électromoteur

Une portion de conducteur, mobile à la vitesse $\vec{V}$ dans le référentiel d'étude $\mathbf{R}$ soumis à un champ magnétique permanent $\vec{B}$ est le siège d'un champ électromoteur $\vec{E}_m$ dont la circulation sur le conducteur est la f.é.m induite :

$$\vec{E}_m = \vec{V} \wedge \vec{B}$$

Pour donner le modèle électrique équivalent au conducteur mobile dans cette expérience, orientons le conducteur de M vers N afin d'obtenir une f.é.m positive et orienté dans le sens de I c'est la **convention générateur** :

$$E = \int_{MN} \vec{E}_m \cdot d\vec{l} = \int_{MN} (\vec{V} \wedge \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

Comme tout conducteur ohmique, le conducteur mobile possède une résistance $\mathbf{R}$. Ce qui nous permet de proposer le modèle électrique équivalent :

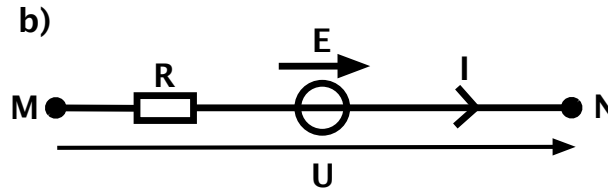


FIGURE 2 – Modèle électrique équivalent des rails de Laplace en fonctionnement génératrice

↓ Ainsi le mouvement du conducteur mobile dans un champ permanent donne bien naissance à un courant dans le circuit. Montrons maintenant la réversibilité de ce phénomène grâce à un bilan de puissance.

1.3 Bilan de puissances

Considérons qu'il y a une densité de charge ρ dans le conducteur mobile. Notons $\vec{v}$ leur vitesse d'ensemble dans le référentiel d'étude $\mathbf{R}$ et I le courant parcourant le circuit. Exprimons la puissance dP de la force de Lorentz volumique $\vec{f} = -\rho (\vec{v} + \vec{V}) \wedge \vec{B}$ exercée sur les porteurs de charge contenu dans un volume $d\tau$ de conducteur :

$$dP = \vec{f} \cdot (\vec{v} + \vec{V}) d\tau = (\rho (\vec{v} + \vec{V}) \wedge \vec{B}) \cdot (\vec{v} + \vec{V}) d\tau = 0$$

En développant, il vient :

$$dP = (\rho (\vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{V}) d\tau + (\rho (\vec{V} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{v}) d\tau + (\rho (\vec{V} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{V}) d\tau + (\rho (\vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{v}) d\tau$$

Les deux derniers terme étant nul on a :

$$dP = (\rho (\vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{V}) d\tau + (\rho (\vec{V} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{v}) d\tau$$

Or comme $\rho d\tau \vec{v} = I d\vec{l}$ on a :

$$dP = (I d\vec{l} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{V} + (\vec{V} \wedge \vec{B}) \cdot I d\vec{l}$$

Le premier terme de l'expression précédente, $dP_m = (\vec{I} d\vec{l} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{V}$ représente la puissance de la force élémentaire de Laplace $d\vec{F}_L = \vec{I} d\vec{l} \wedge \vec{B}$ colinéaire à $\vec{V}$.

Cependant comme les porteurs de charge sont liés au réseau cristallin constituant le conducteur mobile, il ne peuvent s'extraire. Ainsi d'après la troisième loi de Newton, la quantité de mouvement associée à $d\vec{F}_L$ est transférée au réseau. Ce qui se traduit par un mouvement macroscopique du conducteur. Il y a eut transfert d'une **énergie de nature électrique** (mouvement des électrons dans le conducteur) en une **énergie de nature mécanique** (mouvement de la barre mobile) : C'est la **conversion électromécanique de puissance**.

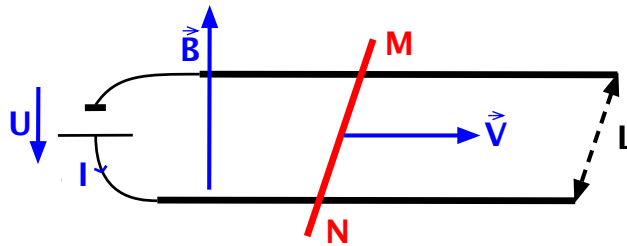
Le second terme de l'expression de la puissance, $dP_e = (\vec{V} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{I} d\vec{l} = I dE$ représente la puissance élémentaire fournie par la f.é.m d'induction. Cette force met en mouvement les porteurs de charges et donne lieu à une puissance de nature électrique or elle est due au mouvement macroscopique du conducteur qui est de nature mécanique. Ainsi on a transferts d'une **énergie de nature mécanique** en une **énergie de nature électrique** : C'est la **conversion électromécanique de puissance**.

Finalement le bilan de puissance sur tout le conducteur s'écrit : $P_m + P_e = 0$

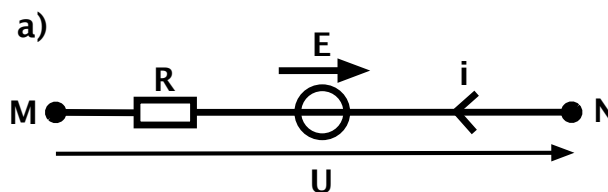
En d'autre terme la puissance mécanique créée P_m provient de la puissance électrique $P_e = EI$ perdue par les porteurs de charge et inversement. Elle traduit la conservation de l'énergie. Et la conversion électromécanique de puissance est donc réversible.

Comme nous venons de le voir la conversion électromécanique illustrée par le rails de Laplace est réversible. Étudions donc l'autre facette de la conversion électromécanique toujours sur l'exemple des rails de Laplace : le moteur.

1.4 Modèle des rails de Laplace en fonctionnement moteur



En fonctionnement moteur l'ampèremètre est remplacé par une source de tension continue U . Or pour que la force de Laplace entraîne le conducteur mobile dans la direction de $\vec{V}$ il faut que le courant I soit dans le sens opposé du fonctionnement générateur ainsi la f.é.m E sera dans le sens opposé au courant I dans ce mode de fonctionnement, c'est la **convention récepteur**. Dans cette convention la puissance P_e devient : $P_e = -EI$ car $-E$ et I sont orientés dans le même sens. Le schéma électrique équivalent des rails de Laplace en fonctionnement moteur est :

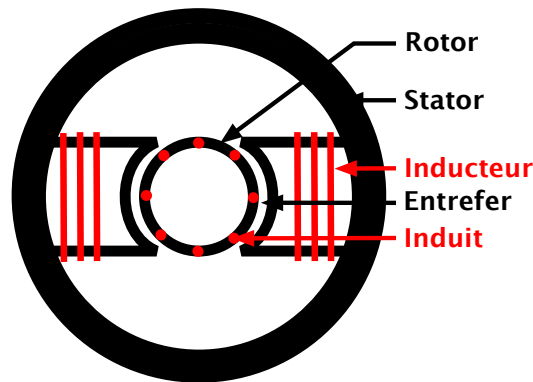


Au travers de l'étude des rails de Laplace nous avons acquis les connaissances nécessaires à l'étude de la machine à courant continu.

2 La machine à courant continu

Nous présenterons la structure et le principe de fonctionnement d'une machine à courant continu simplifiée en dehors de toute considération technologique.

2.1 Structure et principe de fonctionnement



Circuits magnétique

- ★ **Le stator** : partie fixe de la machine qui est suffisamment massive pour ne pas être mis en mouvement par l'action de la partie mobile.
- ★ **Le rotor** : partie mobile solidaire de l'arbre mécanique sur laquelle est bobiné le circuit induit.
- ★ **L'entrefer** : espacement présent entre l'inducteur et l'induit qui sont en regard. Il doit être suffisamment faible pour limiter les pertes de flux magnétique (de l'ordre du millimètre au centimètre au plus).

Circuits électriques

- ★ **L'induit** : circuit électrique soumis au champ magnétique et placé sur la partie mobile.
- ★ **L'inducteur** : il constitue la source de champ magnétique dans la machine. Il peut être réalisé soit à partir d'aimant permanents, soit à l'aide d'un second bobinage.
- ★ **Balai et lame** : permet l'alimentation de l'induit par un circuit externe.

Nous allons illustrer le principe de fonctionnement de la machine à courant continu grâce à une machine simplifiée en considérant la machine bipolaire où l'on ne considère qu'un brin de l'induit qui sont des spires ouverte. Le circuit est fermé et alimenté par un des balais et des lames. Ces lames sont circulaires et frottent chacune sur un balai. Ce dispositif est indispensable au mouvement du rotor puisque lorsqu'un conducteur de l'induit traverse la ligne neutre le champ magnétique de l'inducteur change de sens et alors la force de Laplace s'inverserait et deviendrait résistante mais grâce au dispositif le courant dans le brin est inversé au passage de la ligne neutre et la force de Laplace ne change pas. Tout ceci permet de maintenir le sens de rotation de la machine.

Ce sont les forces de Laplace qui sont responsable du mouvement du rotor et seuls les conducteurs PO et NM les subissent. Leur résultante est nulle car les conducteur sont de même longueur et parcourus par des courants de même intensité et de sens opposé : $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{O}$, ces force sont appelé couple de force électromagnétique. On note que le champ magnétique est radial au voisinage des pôles ce qui correspond à un module des force maximal.

Remarque

Sur les machines réelles chaque encoche contient plusieurs conducteurs et le rotor contient plusieurs encoches. De plus le bobinage est très différent de celui proposé.

↓ Nous allons maintenant étudier le fonctionnement de la machine à courant continu à excitation indépendante, c'est à dire que l'induit et l'inducteur sont indépendant du point de vu électrique.

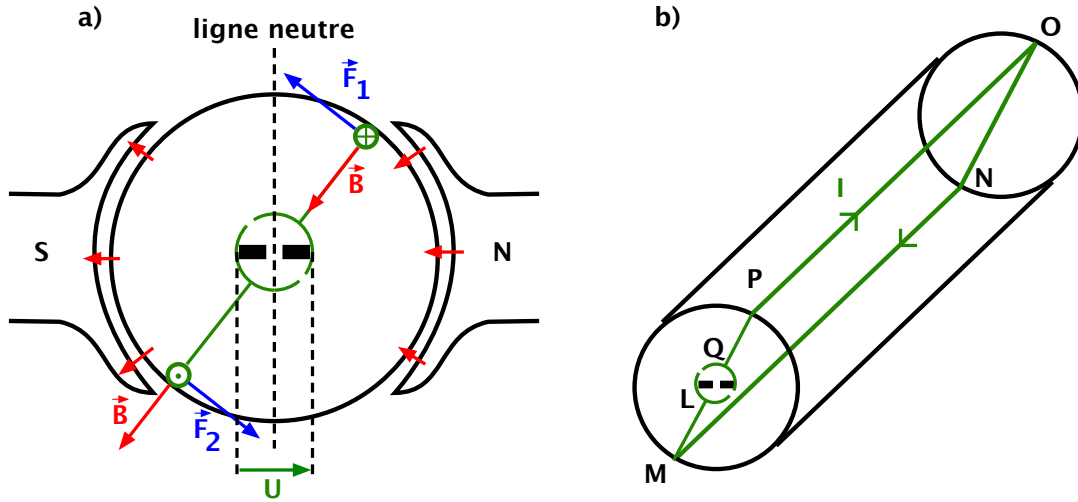


FIGURE 3 – Schémas du principe de fonctionnement de la machine à courant continu : a) vue de face ; b) en perspective

2.2 Modes de fonctionnement

Couple électromagnétique

Notons l la longueur des conducteurs actifs MN et OP traversés par un courant d'intensité I et R le rayon du rotor. Dans le repère cylindrique $(\vec{u}_r, \vec{u}_\theta, \vec{u}_z)$ d'axe z l'axe du rotor on a :

$$\vec{\Gamma} = R\vec{u}_r \wedge \vec{F}_1 + (-R\vec{u}_r \wedge \vec{F}_2)$$

Or $\vec{F}_1 = I d\vec{l} \wedge \vec{B} = -\vec{F}_2$ d'où :

$$\vec{\Gamma} = 2RI l B \vec{u}_z$$

On s'intéresse en particulier au module de ce couple noté C et appelé moment du couple électromagnétique. De plus on remarque que $2RI l B$ est homogène à un flux de champ magnétique que l'on notera Φ_0 . On a donc que le couple des forces de Laplace qui s'exerce sur le brin est : $C = \Phi_0 I$

Remarque

On constate que quand le terme Φ_0 est constant, le couple électromagnétique C est directement proportionnel à l'intensité du courant I , ce qui est une stratégie de commande du couple électromagnétique C . En pratique c'est bien le cas si le courant dans l'inducteur est constant. D'autre part, en régime permanent c'est la charge mécanique qui impose le couple résistant C_R et donc le couple C .

F.é.m d'induction E

En notant $\vec{\Omega} = \Omega \vec{u}_z$ la vitesse angulaire de rotation du rotor nous avons :

$$P_m = \vec{\Gamma} \vec{\Omega} = C \Omega = \Psi_0 I \Omega \text{ et } P_e = EI$$

On en déduit que la f.é.m d'induction E est donnée par : $E = \Phi_0 \Omega$

Remarque

On remarque que en négligeant la chute ohmique dans l'induit on a : $U \approx \Phi_0 \Omega$. Ainsi la vitesse de rotation Ω est proportionnel à la tension U au borne de l'induit, ce qui est une stratégie de commande de la vitesse de rotation Ω .

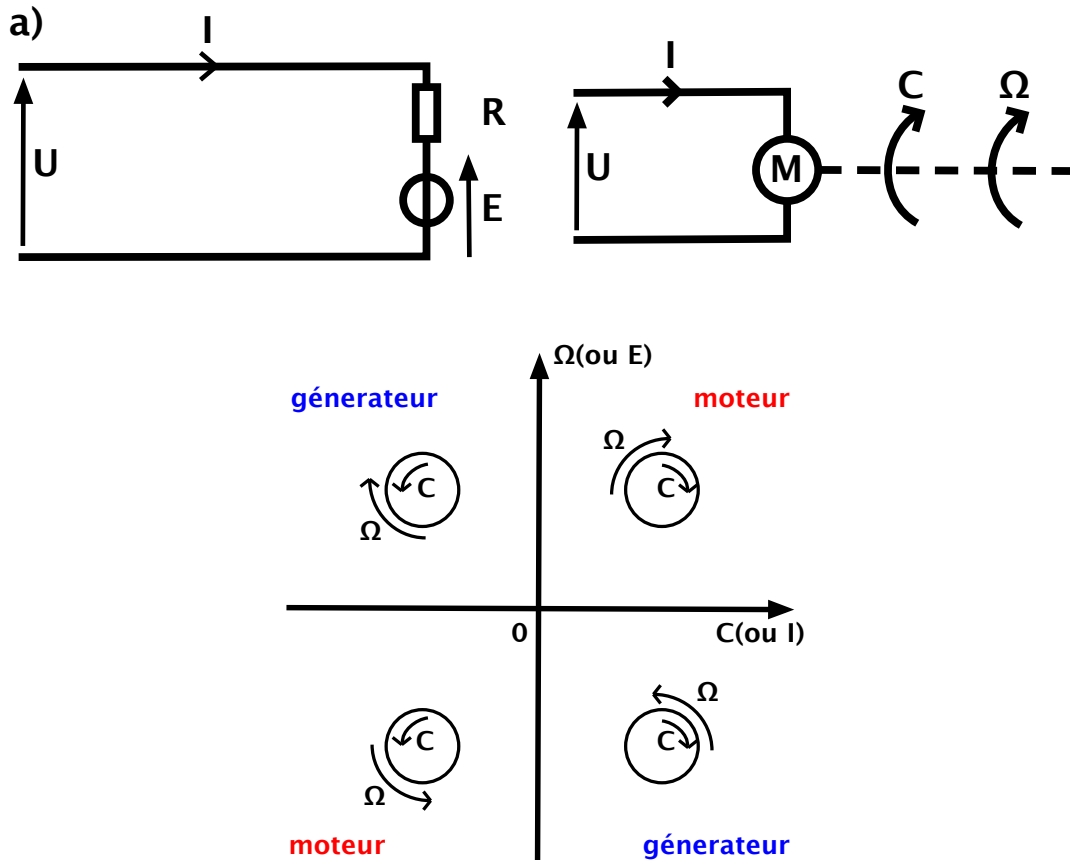


FIGURE 4 – Modes de fonctionnement de la machine à courant continu

Modèle électromécanique équivalent

On peut facilement transposer le modèle électrique du rail de Laplace au circuit de l'induit. Ce modèle électrique définit également les signes positifs des grandeurs mécaniques.

Modes de fonctionnement de la machine

En conservant les mêmes conventions (ici convention récepteur) lorsque $EI > 0$ alors $C\Omega > 0$, la machine fournit de la puissance mécanique et fonctionne en moteur. À contrario, lorsque $EI = C\Omega < 0$ la machine reçoit de la puissance mécanique et fonctionne donc en génératrice. Ce que l'on représente dans les quatre quadrants de la machines à courant continu.

2.3 Bilan de puissance du moteur à courant continu

La machine absorbe la puissance électrique UI absorbée à l'induit (en convention récepteur), ajouté à celle éventuellement absorbée par l'inducteur $U_e I_e$, lorsqu'il est bobiné. Cette puissance étant entièrement dissipé par effet Joule.

La puissance absorbée à l'induit s'écrit $UI = (E + RI) I = EI + RI^2$. On voit qu'une puissance RI^2 est aussi dissipé par effet Joule par l'induit.

La puissance alors disponible est $P_e = EI = C\Omega$. Cependant nous avons pour l'instant pas pris en compte les éventuels pertes mécaniques (frottement) et magnétiques (hystérésis et courant de Foucault). Ces pertes sont mesurable expérimentalement et on les regroupe dans les pertes collectives que l'on note P_C . Ainsi la puissance effectivement disponible sur l'axe de la machine est nommée puissance utile P_U tel que : $P_e = P_U + P_C$.

Définition :

Le rendement η d'un moteur est le rapport de la puissance mécanique utile sur la puissance électrique totale absorbée :

$$\eta = \frac{P_U}{P_U + P_C + RI^2 + R_e I_e^2}$$

Les machines à courant continu ont l'avantage de pouvoir être commandées assez facilement cependant elles nécessitent un entretien particulier ce qui les rend coûteuses. Elles ne sont plus vraiment utilisées en fonctionnement génératrice mais continuent à l'être en fonctionnement moteur dans les locomotives de train par exemple. Pour un fonctionnement génératrice on leur préférera une machine alternative que dont nous allons décrire le principe de fonctionnement.

3 Les machines alternatives

Le yougoslave Nikola Tesla (1856-1943) fabriqua, en 1883, la première machine asynchrone et déposa quantité de brevets en 1888 concernant les machines alternatives. L'évolution de ces machines est fortement liée à l'évolution des technologies de l'électronique de puissance. En effet, ces machines, bien que plus robustes et moins coûteuses que les machines à courant continu, sont très délicates à commander ce qui limita leur utilisation. Aujourd'hui, les évolutions de l'électronique de puissance permettent le développement de ces machines, notamment dans la traction ferroviaire. Cette partie a pour but d'introduire les principes de fonctionnement des machines synchrones et asynchrones.

3.1 Principe de fonctionnement des machines alternatives

Rotation d'une aiguille de boussole dans un champ magnétique tournant

 2 mins

On dispose une aiguille de boussole au centre de trois bobines contenant le même nombre de spires et alimentées par un courant de même intensité mais déphasé de $\frac{2\pi}{3}$ et de fréquence 50 Hz. On remarque que si l'aiguille est initialement au repos alimentées les bobines ne font pas tourner l'aiguille mais si on la lance alors alimentées les bobines augmentent sa vitesse de rotation puis la maintiennent.

Essayons de modéliser ce phénomène.

Considérons trois paires de bobines dont les axes sont décalés de $\frac{2\pi}{3}$. Les bobinages sont parcourus par des courants de la forme :

$$\begin{aligned} i_1(t) &= I \cos(\omega t) \\ i_2(t) &= I \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ i_3(t) &= I \cos(\omega t + \frac{4\pi}{3}) \end{aligned}$$

Le champ magnétique créé au centre d'une paire est de la forme :

$$\vec{B} = k i(t) \vec{u} \text{ où } \vec{u} \text{ est un vecteur unitaire de l'axe de cette paire.}$$

Les champs résultants sont donc :

$$\begin{aligned} \vec{B}_1 &= k I \cos(\omega t) \vec{u}_x \\ \vec{B}_2 &= k I \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \left(\cos(\frac{2\pi}{3}) \vec{u}_x + \sin(\frac{2\pi}{3}) \vec{u}_y \right) \\ \vec{B}_3 &= k I \cos(\omega t + \frac{4\pi}{3}) \left(\cos(\frac{4\pi}{3}) \vec{u}_x + \sin(\frac{4\pi}{3}) \vec{u}_y \right) \end{aligned}$$

Or le champ résultant $\vec{B}$ au centre des bobines est tel que : $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3$. D'où après quelques étapes de calcul de trigonométrie on a :

$$\vec{B} = \frac{3kI}{2} (\cos(\omega t) \vec{u}_x + \sin(\omega t) \vec{u}_y)$$

C'est la forme d'un champ magnétique tournant.

L'aiguille de boussole peut être modélisé par un moment magnétique $\vec{M}$ dirigé selon l'axe de l'aiguille. Or un moment magnétique plongé dans un champ magnétique $\vec{B}$ subit un couple de moment :

$$\vec{T} = \vec{M} \wedge \vec{B}$$

Dans l'expérience de l'aiguille $\vec{M}$ et $\vec{B}$ sont dans le plan horizontal et donc $\vec{T}$ est dirigé selon l'axe de rotation de l'aiguille ce qui explique en partie le phénomène. En effet ceci ne permet pas de comprendre pourquoi l'aiguille ne se met pas à tourner quand on alimente les bobines.

Une machine alternative utilise l'interaction entre un moment magnétique engendré par le rotor (aimant permanent, électroaimant ou induction) et un champs magnétique tournant engendré par le stator.

3.2 Machine synchrone

En fonctionnement moteur

Dans ce mode de fonctionnement le champ tournant est créé par les enroulements du stator. Le rotor est assimilé à un moment magnétique $\vec{M}$ avec lequel le champ tournant interagit. Le champ tournant est noté :

$$\vec{B} = B_0 \cos(\omega t + \theta_0) \vec{u}_x + B_0 \sin(\omega t + \theta_0) \vec{u}_y$$

où θ_0 représente l'angle entre le champ tournant et le moment magnétique $\vec{M}$ à l'instant $t = 0$.

Le rotor est considéré en rotation dans le plan (Oxy). Notons :

$$\vec{M} = M_0 \cos(\Omega t) \vec{u}_x + M_0 \sin(\Omega t) \vec{u}_y$$

où Ω est la vitesse de rotation du rotor.

Le moment magnétique $\vec{M}$ et donc le rotor subit un couple engendré par le champ tournant de la forme $\vec{T} = \vec{M} \wedge \vec{B}$, soit ici :

$$\begin{aligned} \vec{T} &= M_0 B_0 (\cos(\Omega t) \sin(\omega t + \theta_0) - \sin(\Omega t) \cos(\omega t + \theta_0)) \vec{u}_z \\ &= M_0 B_0 \sin((\omega + \Omega)t + \theta_0) \vec{u}_z \end{aligned}$$

Cependant expérimentalement on voit que si le moteur à l'arrêt est alimenté par une tension de 50 Hz, il ne démarre pas. Alors qu'en réduisant la fréquence, le moteur démarre pour des fréquences faible, puis en augmentant progressivement la fréquence jusqu'à 50 Hz le moteur continue de tourner sans s'arrêter.

La constante de temps mécanique τ du moteur est très grande devant la période de la tension d'alimentation, T . Ce qui fait que la machine n'ai en faite sensible qu'au valeur moyenne des grandeur électrique. Ainsi lorsque le moteur est à l'arrêt ($\Omega = 0$ et $\omega = 100\pi \text{ rad.s}^{-1}$) :

$$\langle \vec{T} \rangle = M_0 B_0 \langle \sin(\omega t + \theta_0) \rangle \vec{u}_z = 0$$

La machine ne démarre pas. Alors que si T se rapproche de τ , à partir d'un certain seuil, le rotor est sensible à la valeur instantané du couple et la machine démarre.

En régime permanent, le couple électromagnétique moyen exercé sur le rotor s'écrit :

$$\langle \vec{T} \rangle = M_0 B_0 \sin(\theta_0) \vec{u}_z$$

car le moteur tourne en synchronisme avec le champ tournant ($\omega = \Omega$) d'où le noms de machine synchrone.

En fonctionnement génératrice

Par souci de simplicité nous allons étudier une machine constituées d'un rotor et d'un stator bipolaire. Le champ magnétique tournant engendré par le rotor de la génératrice synchrone, appelée aussi alternateur, est assimilable à celui créé par un aimant permanent en rotation autour de sont axe. Le rotor est placé au coeur d'un système de bobinages (stator) dans lesquels apparaissent des f.é.m induites.

Considérons donc un moment magnétique permanent $\vec{M}$ en rotation autour d'un axe passant par un point fixe O et placé près d'une bobine comportant N spires, de section droite S et d'axe (Ox).

Ce moment magnétique engendre un champ tournant de la forme :

$$\vec{B} = B_0 \cos(\omega t) \vec{u}_x + B_0 \sin(\omega t) \vec{u}_y$$

Cette bobine est siège d'une f.é.m calculé par la loi de Faraday et nous obtenons :

$$e = \omega N S B_0 \sin(\omega t + \theta_0)$$

Les alternateurs sont utilisés par exemple en sortie des centrales électriques vers le réseau.

3.3 La moteur asynchrone

Le moteur asynchrone est constitué d'un rotor bobiné en court-circuit qui, placé dans le champ tournant, est siège d'une f.é.m induite. Celle-ci crée un courant induit dans le bobinage du rotor donnant ainsi naissance à un champ magnétique. Le rotor peut donc être assimilé à un moment magnétique permanent $\vec{M}$ en rotation dans un champ magnétique en rotation, comme avec l'expérience de la boussole. Les machines asynchrones n'ont pas besoin de système de bagues et de balais. Elle réclame donc moins d'entretiens.

Conclusion

Dans cette leçon nous avons vu comment l'induction électromagnétique permettait la conversion électromagnétique de puissance. Il existe d'autre type système de conversion électromécanique comme les haut parleur par exemple qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique sous forme d'onde sonore.

Questions et commentaires