

LP21 : Induction électromagnétique

Armél JOUAN, Géraud DUPUY

Leçons annexes :

- Induction, auto-induction

Niveau : L1

Prérequis :

- Electrocinétique (conventions générateur/récepteur, bobine, loi des mailles)
- Champ magnétique (aimant, spire, bobine, règle de la main droite, ...)

Introduction

Manip (1) mettant en évidence le phénomène d'induction. Faire bouger un aimant (variations d'un champ B) dans une bobine (circuit électrique), observer l'apparition d'une fem induite à ses bornes.

1 Lois de l'induction [1] chap 30

1.1 Paramétrisation du problème

- On se donne un conducteur plongé dans un champ B
- On définit le flux du champ B (unité Weber)
- Rq sur le signe du flux B (grandeur algébrique) imposé par le choix d'orientation de la spire (règle de la main droite ou du tire-bouchon)

1.2 Loi de Faraday (1831)

- Donner la loi de Faraday (antérieure aux équations de Maxwell !)
- Expliquer la création d'une fem
- Ajouter une source fictive de tension au circuit dans la représentation électrique (avec la bonne convention)

1.3 Loi de modération de Lenz

- Donner l'énoncé
- Exemple sur une expérience (2) avec un aimant ([1] chap 30 1.2)
- Enoncé très général qui englobe tout les autres résultats

Transition : intéressons-nous de plus près au lien entre B et i .

2 Auto et mutuelle induction [1] chap 31

2.1 Auto-induction

- Donner l'exemple d'une spire parcourue par un courant. On a création d'un champ B , donc un flux non nul
- Le flux est proportionnel à B , qui est proportionnel à i
- Donc on pose $\phi = Li$, on définit L , l'auto induction. Donner l'unité (Henry)
- Pour une bobine, qu'on modélise comme un solénoïde, on a une champ B créé de la forme: $\vec{B} = \mu_o \frac{N}{l} i \vec{u}$
- Le flux est donné par: $\phi = N \cdot \vec{B} \cdot \vec{S} = \mu_o \frac{N^2}{l} S i = L i$
- Faire l'application numérique pour une bobine (si possible celle utilisée, comparer à la valeur attendue). Donner les ODG typiques d'inductances.

2.2 Mutuelle induction

- Poser le problème : deux circuits 1 et 2, parcourus par des courants i_1 et i_2 , créant ainsi des champs B_1 et B_2 ayant des flux non nuls dans l'autre circuit respectivement $\phi_{1 \rightarrow 2}$ et $\phi_{2 \rightarrow 1}$
- On peut alors écrire (comme en 2.1) que le flux est proportionnel à i : $\phi_{1 \rightarrow 2} = M_{1 \rightarrow 2} i_1$ et $\phi_{2 \rightarrow 1} = M_{2 \rightarrow 1} i_2$ avec $M_{1 \rightarrow 2}$ et $M_{2 \rightarrow 1}$ s'exprimant en Henry (homogène à une inductance)
- On admet (théorème de Neumann) que : $M_{1 \rightarrow 2} = M_{2 \rightarrow 1} = M$ où M est **l'inductance mutuelle** entre les deux circuits, qui caractérise le couplage inductif entre les deux circuits.
- Montrer que la mutuelle d'une bobine 2 dans une bobine 1 est de la forme : $M = \mu_0 \frac{N_1 N_2}{l_1} S_2$

- **Application :** recharge d'objets électroniques (brosse à dents, téléphone, voiture électrique - à creuser pour étayer un peu)
- (Rq : cas du transfo avec un couplage parfait : $M = \sqrt{L_1 L_2}$)

Transition : voyons désormais comment on peut utiliser ce couplage flux du champ - fem : peut-on de façon inverse à l'exemple inductif (1), faire varier le courant et obtenir une action mécanique ?

3 Couplage inductif électromécanique

3.1 Force de Laplace [1] chap 29

- On suppose la forme des forces de Laplace
- Bien faire la paramétrisation

3.2 Freinage d'une luge [2]

3.2.1 Approche qualitative

- On modélise la luge comme un rectangle conducteur (Longueur $L = 1\text{ m}$, hauteur $l = 50\text{ cm}$), qui au niveau de l'arrivée (alors qu'elle va environ à 100 km/h) va passer dans des zones de champ constant $|\vec{B}| = 1\text{ T}$ de longueur plus grande que L . De plus ce cadre présente une faible résistance $R_c = 10^{-3}\ \Omega$
- Quand la luge rentre dans la zone de champ, la surface du rectangle dans la zone de champ constant augmente, donc le flux augmente, donc l'induction crée un champ contraire, donc on a des courants induits donnés par la règle de la main droite, et on vérifie que la force de Laplace $i d\vec{l} \wedge \vec{B}$ est résistive : elle ralentit la luge
- Quand la luge est entièrement dans la zone, rien ne se passe (le flux ϕ est constant)
- Quand la luge ressort, on fait la même étude que dans elle rentre, sauf qu'ici le flux diminue, donc le champ augmente, ce qui fait apparaître des courants induits dans l'autre sens, mais vu que ce coup ci le segment de conducteur dans le champ n'est plus le même, on se retrouve aussi à freiner.

3.2.2 Approche quantitative

- Montrer que dans une phase d'entrée, la fem est donnée par : $e = -lvb$
- De fait on a des courants de la forme $i = -\frac{lvb}{R_c}$

- Poser la loi de Laplace, remarquer que dans les parties horizontales ça se compense, mais vu qu'on a qu'une seule partie verticale, ça se met sous la forme $\vec{F}_{Lap} = -\frac{l^2 B^2}{R_c} v \vec{u}_x$
- On trouve une expression de force de freinage fluide
- Poser le PFD, poser le temps $\tau = \frac{m R_c}{l^2 B^2} = 0.4 \text{ s}$
- Soit poser la solution directe $v(t) = v_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$ et $x(t) = \tau v_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$
- Calculer le temps T où une phase de décélération dure (attention, erreur dans l'énoncé) $T = -\tau \ln \left(1 - \frac{L}{\tau v_0}\right) \simeq 35 \text{ ms}$
- On calcule la vitesse à la fin de la phase $v(T) = v_0 - \frac{L}{\tau}$
- On montre qu'on a $\Delta v = -\frac{L}{\tau} = -2.5 \text{ m/s}$. Le freinage ne dépend que de paramètres constants et sera donc le même sur chaque phase
- Combien de zones de champ il faut: Suffisamment pour faire passer de $100 \text{ km/h} \simeq 25 \text{ m/s}$ à 0. On baisse de 2.5 m/s à chaque phase de décélération, soit 5 m/s par zone, donc 5 zones de 1 m, espacées chacune de zones de 1 m, donc une dizaine de mètres au total
- Petit commentaires possible sur le fait que l'accélération max vaut $a_{max} \sim \frac{V_0}{T} \sim 7g$, commentaire: c'est violent, mais supportable, d'autant plus que c'est très court.

Conclusion

Ouverture vers d'autres applications/phénomènes inductifs

Autres exemples

- Rails de Laplace
- LVDT
- Transformateur
- Haut-parleur
- Machines tournantes (machine synchrone), dynamo
- Freinage d'un aimant dans un tube (cf MP20)
- Four et plaque à induction

Bibliographie

[1] **Physique Tout-en-un PCSI, Dunod :**

- chap 29 : force de Laplace
- chap 30 : lois de Faraday et Lenz
- chap 31 : Circuit fixe dans un champ magnétique variable
- chap 32 : Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire

[2] Cours Etienne Thibierge pour le freinage d'une luge :

- énoncé :
http://www.etienne-thibierge.fr/ds-dm-2020/dm12b_induction_enonce.pdf
- corrigé :
https://www.etienne-thibierge.fr/ds-dm-2020/dm12b_induction_corrige.pdf

[3] **BFR EM 3 Induction** : chap 5 (pour aller plus loin)

[4] **PUF Mauras EM** : chap 11 (pour aller plus loin)

Manipulations, ressources

(1) Manip introductive : mise en évidence d'une fem induite

- aimant permanent
- bobine
- oscilloscope

(2) Illustration de la loi de Lenz ([1] chap 30 1.2)