

Leçon de Physique n°10 Induction électromagnétique

Niveau : CPGE 1ère année

Programme :

Notions et contenus

Capacités exigibles

1.7.3. Lois de l'induction

Flux d'un champ magnétique

Flux d'un champ magnétique à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté.

Évaluer le flux d'un champ magnétique uniforme à travers une surface s'appuyant sur un contour fermé orienté plan.

Loi de Faraday

Courant induit par le déplacement relatif d'une boucle conductrice par rapport à un aimant ou un circuit inducteur. Sens du courant induit.

Décrire, mettre en œuvre et interpréter des expériences illustrant les lois de Lenz et de Faraday.

Loi de modération de Lenz.

Utiliser la loi de Lenz pour prédire ou interpréter les phénomènes physiques observés.

Force électromotrice induite, loi de Faraday.

Utiliser la loi de Faraday en précisant les conventions d'algébrisation.

1.7.4. Circuit fixe dans un champ magnétique qui dépend du temps

Auto-induction

Flux propre et inductance propre.

Différencier le flux propre des flux extérieurs. Utiliser la loi de modération de Lenz. Évaluer et citer l'ordre de grandeur de l'inductance propre d'une bobine de grande longueur.

Mesurer la valeur de l'inductance propre d'une bobine.

Étude énergétique.

Réaliser un bilan de puissance et d'énergie dans un système siège d'un phénomène d'auto-induction en s'appuyant sur un schéma électrique équivalent.

Cas de deux bobines en interaction

Inductance mutuelle entre deux bobines.

Déterminer l'inductance mutuelle entre deux bobines de même axe de grande longueur en « influence totale ».

Mesurer la valeur de l'inductance mutuelle entre deux bobines et étudier l'influence de la géométrie.

Circuits électriques à une maille couplés par le phénomène de mutuelle induction en régime sinusoïdal forcé.

Citer des applications dans le domaine de l'industrie ou de la vie courante.

Établir le système d'équations en régime sinusoïdal forcé en s'appuyant sur des schémas électriques équivalents.

Transformateur de tension.

Établir la loi des tensions.

Étude énergétique.

Réaliser un bilan de puissance et d'énergie.

Livres : Gié électromagnétisme, Faroux Renault, Perez Electromagnétisme, H Prépa *Electronique 2ème année PSI 2004 (Electromagnétisme 2ème année?)*, tout en un DUNOD PCSI 2021, Bellier montages de physique, Donnini & Quaranta Dictionnaire de physique Tome IV Electricité

Pré-requis :

Intro : Perez EM

I – Le phénomène d'induction électromagnétique

1) Mise en évidence expérimentale *Tout en un DUNOD PCSI 2021 ou 2016*

- Expérience de Faraday : il espérait mesurer un courant continu dans un circuit soumis à un champ B permanent créée par un circuit parcouru par i continu, il y en a déduit que c'était la variation de i dans ce circuit qui produit du courant détecté dans le second
- expérience de l'aimant que l'on déplace dans une bobine (utiliser l'oscillo en monocoup)

Interprétation :

La condition pour voir un phénomène d'induction dans un circuit est que le champ magnétique « traversant le circuit » varie dans le temps. Cette variation peut avoir deux causes :

1. le circuit est plongé dans un champ magnétique variable,
2. le circuit se déplace dans un champ magnétique.

2) Flux magnétique et loi de Faraday *Tout en un DUNOD PCSI 2021 ou 2016*

équation régissant le phénomène d'induction = loi de Faraday

- Définition du flux magnétique :

Soit une spire plane de forme qcq dans un champ magnétique \mathbf{B} uniforme, flux magnétique traversant la spire $\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}$ (rappel règle de la main droite pour \mathbf{S} dont le sens se déduit du sens conventionnel positif du courant)

unité du flux en weber (Wb) = $\text{T} \cdot \text{m}^2 = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$

3 exemples avec $\mathbf{B} // \mathbf{S}$, $\mathbf{B} \perp \mathbf{S}$, \mathbf{B} qui fait un angle α avec \mathbf{S}

- Loi de Faraday : le courant induit dans le circuit est égal à celui que produirait un générateur fictif de fem induite e telle que $e = -d\Phi/dt$ où Φ est le flux magnétique à travers le circuit.

Attention à la convention : a est comptée positive dans le sens conventionnel positif du courant c'est-à-dire en convention générateur (faire schéma)

Conditions d'application de la loi de Faraday

3) Loi de Lenz *Tout en un DUNOD PCSI 2021 ou 2016*

Il s'agit d'une loi empirique qualitative.

Énoncer la loi de Lenz

Exemple : revenir avec expérience avec aimant qu'on approche

Exemple :

rails de Laplace ? Ou exercice sur l'influence du champ terrestre sur un téléphone portable
Tout en un DUNOD PCSI 2016

II - Circuit fixe dans un champ magnétique variable *Tout en un DUNOD PCSI 2021 ou 2016*

1) Auto-induction

Voir explication *Tout-en-un*

Définir le flux propre et L

Remarques :

- $L > 0$ (règle de la main droite)

- unité de L : henry $H = m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$

Exemple : bobine de N spires de surface S sur une longueur l

rappel : $\mathbf{B} = \mu_0 N i / l \mathbf{u}$

Calculer le flux à travers un spire $\rightarrow \Phi_1$

Flux total : $\Phi_P = N \Phi_1 = L i \Rightarrow$ on en déduit L

Faire application numérique

Force électromotrice auto-induite : $e_P = -d\Phi_P/dt = -L di/dt$ (hypothèse : L ne dépend pas du temps \Rightarrow le circuit ne se déforme pas)

Faire schéma équivalent en convention générateur et récepteur

Application : vérification de la loi de modération de Lenz

Si $di/dt > 0$, alors $e_P < 0$ donc d'après le schéma cette f.é.m. induite s'oppose à l'augmentation de courant.

Expérience : *Tout-en-un ou Bellier*

mesure de l'inductance L d'une bobine en série avec une résistance R_0 et un GBF qui fournit une tension crête-à-crête. On observe la tension délivrée par le GBF sur la voie 1 et la tension aux bornes de R_0 sur la voie 2.

Ecrire la loi des mailles et la loi d'Ohm $\Rightarrow L/R_0 dv(t)/dt + v(t) = e_g(t) \Rightarrow \tau = L/R_0$ (méthode temps de montée à 63%)

Remarque : on peut aussi passer par la fonction de transfert, entre les tension v et e où $\tau = L/R_0 \Rightarrow$ passe-bas au 1^{er} ordre

ou expérience *Donnini & Quaranta Dictionnaire de physique Tome IV Electricité*

Bilan de puissance : schéma

$(u_g(t) = Ri(t) + L di(t)/dt) \times i(t)$

$\Rightarrow P_g = u_g(t) \cdot i(t)$: puissance cédée au circuit par le générateur

$\Rightarrow Ri^2(t)$: puissance dissipée par effet Joule dans la résistance R

\Rightarrow reste $d(\frac{1}{2}Li^2(t))/dt \Rightarrow \frac{1}{2}Li^2(t) + cste$: énergie magnétique (cste=0 car s'annule quand $i=0$)

2) Induction mutuelle

Explications \rightarrow *Tout-en-un*

On ajoute une spire 2 \Rightarrow le champ B a un flux non nul à travers le circuit 2 $\Rightarrow \Phi_{1 \rightarrow 2} = M_{1 \rightarrow 2} i_1$
 $M_{1 \rightarrow 2}$ coefficient qui s'exprime en henry.

De même, il y a $\Phi_{2 \rightarrow 1} = M_{2 \rightarrow 1} i_2$

On admet que $M_{2 \rightarrow 1} = M_{1 \rightarrow 2} = M$ (vient du théorème de Neumann) avec M inductance mutuelle

Exemple de calcul d'une inductance mutuelle :

2 bobines d'une dans l'autre, l'une de N_1 spires, l'autre de N_2 spires

$$\mathbf{B}_1 = \mu_0 N_1 i_1 / l_1 \mathbf{u}$$

Flux de \mathbf{B}_1 à travers 1 spire de la bobine 2 : $\Phi_{1,1 \rightarrow 2} = \mu_0 N_1 i_1 S_2 / l_1$

Flux à travers toute la bobine : $\Phi_{1 \rightarrow 2} = \mu_0 N_1 N_2 i_1 S_2 / l_1 = M i_1 \Rightarrow M$

Remarque : signe de M

F.é.m induites dans les deux circuits : 2 circuits couplés par mutuelle induction : il faut additionner le flux propre et le flux du champ du 2ème circuit :

$$e_1(t) = -d\Phi_1/dt = -L_1 di_1/dt - M di_2/dt$$

$$e_2(t) = -d\Phi_2/dt = -L_2 di_2/dt - M di_1/dt$$

Faire schéma électrique correspondant avec $e_1(t)$ et $e_2(t)$ en convention générateur et récepteur

Etude de 2 circuits couplés

équations électriques : 2 méthodes en passant via le schéma en convention générateur ou en convention récepteur

\Rightarrow 2 équations couplées

Supposer que le générateur délivre une tension sinusoïdale de pulsation $\omega \Rightarrow$ notation complexe

Bilan de puissance :

Loi des mailles \Rightarrow 2 équations \Rightarrow on en multiplie une par i_1 et l'autre par i_2 et on les additionne.

On retrouve la puissance fournie par le générateur : $P = e_g \cdot i_1$ et la puissance dissipée par effet Joule dans les 2 circuits : $P = R_1 i_1^2 + R_2 i_2^2$

On en déduit la puissance magnétique stockée par les deux circuits couplés par inductance mutuelle.

Expérience : Mesure de M *Donnini & Quaranta Dictionnaire de physique Tome IV Electricité (« Induction »)*

Exemple : table de cuisson à induction (voir exercice *Tout-en-un*)

3) Transformateur

Loi d'ohm généralisée *H Prépa Electronique 2ème année PSI 2004*

application au transformateur *Gié, EDF Perez*

But : modifier l'amplitude de tensions et de courants alternatifs

Constitution : une carcasse ferromagnétique (pour canaliser les lignes de champ \Rightarrow le champ n'existe qu'à l'intérieur du circuit magnétique formé par le matériau) et deux enroulements (fils de cuivre) : avec un enroulement primaire (1) soumis à 1 tension alternative et un secondaire (2). *Schéma*

hypothèse : r internes aux bobinages très faibles $\Rightarrow r_i$ négligeable devant f.é.m.

(remarque pour les questions : $r = l / (\gamma s)$ avec l la longueur du fil déroulé, γ sa conductivité et s la section du fil)

Dunod (transformateur idéal) : $e_1 = -d\Phi_1/dt = -N_1 S dB/dt$ et $e_2 = -d\Phi_2/dt = -N_2 S dB/dt$ puis on écrit u_1 et u_2

$\Rightarrow u_2/u_1 = N_2/N_1 = m$ (rapport de transformation)

Pérez : à partir de L_1 , L_2 et M

Remarque pour les questions : les pertes par courants de Foucault sont supprimées dans un transformateur en feuilletant le matériau ferromagnétique.

Principale utilisation : abaisser ou élever les tensions alternatives.

Exemples :

- transfo EDF qui transforment la moyenne tension 20kV en tension domestique 230V
- diminuer le coût du transport du courant en augmentant la tension jusqu'à 400kV (pour limiter la dissipation d'énergie sous forme d'effet Joule)
- transfo des chargeurs de portables.

Permet aussi d'isoler électriquement deux circuits => transfo d'isolement ($m=1$)

Laisser la partie « Circuit mobile dans un champ magnétique stationnaire » et donc l'application au freinage par induction pour la leçon sur la conversion de puissance électromécanique.