

CONVERSION DE PUISSANCE

CP1 : MILIEUX FERROMAGNETIQUES DANS L'ARQS MAGNETIQUE

1. Milieux magnétiques dans l'ARQS magnétique

- 1.1. Vecteur aimantation $\vec{M}$. Densité de courant d'aimantation $\vec{j}_{lié} = \text{rot}\vec{M}$.
- 1.2. Vecteur excitation magnétique $\vec{H}$. Reformulation de l'équation de Maxwell-Ampère.
- 1.3. Les équations locales de l'électromagnétisme des milieux magnétiques dans l'ARQS magnétique.
- 1.4. Les 3 équations intégrales
 - Flux de $\vec{B}$ conservatif
 - Théorème d'Ampère pour $\vec{H}$
 - Loi de Faraday

2. Milieux ferromagnétiques

- 2.1. Courbe de première aimantation et cycle d'hystérésis
- 2.2. Milieux durs : aimants permanents
- 2.3. Milieux doux non saturé : perméabilité magnétique

3. Circuit magnétique sans entrefer : bobine à noyau de fer doux.

- 3.1. Bobine enroulée sur un circuit magnétique : lignes de champ.
- 3.2. Excitation magnétique en fonction du courant
- 3.3. Relation liant la tension et le champ magnétique
- 3.4. Milieu doux non saturé : inductance propre et énergie magnétique.
- 3.5. Milieu doux non saturé : canalisation des lignes de champ.
- 3.6. Pertes fer en régime alternatif
- 3.7. Relevé expérimental du cycle d'hystérésis

4. Circuit magnétique avec entrefer : électroaimant.

- 4.1. Conservation du flux de $\vec{B}$: champ dans l'entrefer.
- 4.2. Exploitation du théorème d'Ampère
- 4.3. Modèle à perméabilité infinie
- 4.4. Electroaimant de section variable

CAPACITES EXIGIBLES :

- Définir le champ d'aimantation d'un milieu magnétique.
- Associer à une distribution d'aimantation une densité de courants liés équivalente $\vec{j}_{lié} = \text{rot}\vec{M}$ (relation admise).

- Définir l'excitation magnétique $\vec{H}$ et écrire l'équation de Maxwell-Ampère dans un milieu magnétique.
- En déduire qualitativement que les sources de $\vec{H}$ sont les courants électriques libres, et que les sources de $\vec{B}$ sont les courants électriques libres et l'aimantation.
- Représenter l'allure des cycles d'hystérésis (H, M) et (H, B) d'un milieu ferromagnétique. Distinguer milieu dur et milieu doux, citer des exemples.
- Modéliser un milieu doux par une relation constitutive linéaire. Définir la perméabilité relative et donner un ordre de grandeur.
- Établir l'expression de l'inductance propre de la bobine à noyau, vérifier l'expression de l'énergie magnétique $E_{mag} = \iiint \frac{B^2}{2\mu_0\mu_r} d\tau$.
- **Tracer le cycle d'hystérésis d'un milieu ferromagnétique.**
- Décrire l'allure des lignes de champ dans un circuit magnétique sachant que les lignes de champ sortent orthogonalement à l'interface dans un entrefer.
- En appliquant le théorème d'Ampère et la conservation du flux magnétique, exprimer le champ magnétique produit dans l'entrefer d'un électroaimant.

CP2 : PUISSANCE ELECTRIQUE EN REGIME SINUSOÏDAL

1. Puissance électrique reçue par un dipôle

- 1.1. *Puissance instantanée. Puissance moyenne.*
- 1.2. *Valeurs efficaces*
- 1.3. *Dipôles linéaires usuels : puissance moyenne consommée en régime périodique.*

2. Puissance en régime sinusoïdal

- 2.1. *Impédance et admittance complexes. Représentation de Fresnel.*
- 2.2. *Puissance moyenne (ou active) absorbée par une impédance. Facteur de puissance.*
- 2.3. *Expression de la puissance moyenne en fonction de $\underline{Z}$ ou $\underline{Y}$. Cas d'un dipôle purement réactif.*

3. Distribution de l'énergie électrique et facteur de puissance d'une installation

- 3.1. *Pertes en ligne*
- 3.2. *Relèvement du facteur de puissance*

4. Le traitement de l'énergie électrique

- 4.1. *Production, transport et utilisation*
- 4.2. *Typologie des modes de conversion de puissance*
- 4.3. *Ordres de grandeur des puissances mises en jeu*

CAPACITES EXIGIBLES :

- Définir le facteur de puissance, faire le lien avec la représentation des tensions et des courants sur un diagramme de Fresnel.
- Citer et exploiter la relation $P = U_{eff} I_{eff} \cos \varphi$.
- Citer et exploiter les relations $P = \Re(\underline{Z}) I_{eff}^2$ et $P = \Re(\underline{Y}) U_{eff}^2$. Justifier qu'un dipôle purement réactif n'absorbe aucune puissance en moyenne.
- Expliquer l'avantage d'un facteur de puissance élevé.

CP3 : CONVERSION ELECTROMAGNETIQUE STATIQUE

LE TRANSFORMATEUR

1. Constitution et modèle du transformateur idéal

- 1.1. *Constitution*
- 1.2. *Conventions d'orientation ; bornes homologues.*
- 1.3. *Hypothèses du modèle du transformateur idéal*
- 1.4. *Loi de transformation des tensions en alternatif (μ_r a priori fini)*
- 1.5. *Loi de transformation des courants en charge (μ_r infini)*
- 1.6. *Transfert idéal de puissance instantanée (μ_r infini) ou moyenne (μ_r fini)*

2. Applications pratiques

- 2.1. *Le problème de la composante continue*
- 2.2. *Transformateur d'isolement*
- 2.3. *Transfert d'impédance entre primaire et secondaire*
- 2.4. *Transformateur abaisseur ou élévateur de tension. Transport de l'énergie électrique.*

3. Pertes

- 3.1. *Pertes fer et pertes cuivre*
- 3.2. **Mesure expérimentale du rendement sur charge résistive**
 - Essai à vide : pertes fer.
 - Essai en court-circuit : pertes cuivre.
 - Essai en charge : rendement.

CAPACITES EXIGIBLES :

- Citer les hypothèses du transformateur idéal. Établir les lois de transformation des tensions et des courants du transformateur idéal, en respectant l'algébrisation associée aux bornes homologues.
- Relier le transfert instantané et parfait de puissance à une absence de pertes et à un stockage nul de l'énergie électromagnétique.
- Expliquer le rôle du transformateur pour l'isolement.
- Établir le transfert d'impédance entre le primaire et le secondaire.

- Expliquer l'intérêt du transport de l'énergie électrique à haute tension afin de réduire les pertes en ligne.
- Citer les pertes cuivre, les pertes fer par courant de Foucault et par hystérésis. Décrire des solutions permettant de réduire ces pertes.
- **Mettre en œuvre un transformateur et étudier son rendement sur charge résistive.**

CP4 : CONVERSION ELECTRONIQUE STATIQUE

1. Continu ou alternatif ?

- 1.1. *Forme alternative de l'énergie électrique. Exemples.*
- 1.2. *Forme continue de l'énergie électrique. Exemples.*
- 1.3. *Les 4 types de convertisseurs électroniques statiques*
- 1.4. *De la nécessité de commuter...*
- 1.5. *Les ingrédients d'un convertisseur électronique statique : interrupteurs et dipôles purement réactifs.*

2. Sources de tension ou de courant

- 2.1. *Sources idéales de tension ou de courant.*
- 2.2. *Source de tension imparfaite et dipôle type source de tension. Amélioration par un condensateur de lissage en parallèle.*
- 2.3. *Source de courant imparfaite et dipôle type source de courant. Amélioration par une bobine de lissage en série.*
- 2.4. *Réversibilité d'une source*
- 2.5. *Règles d'interconnexion*
- 2.6. *Convertisseur direct : cellule de commutation élémentaire.*

3. Interrupteurs

- 3.1. *Interrupteur idéal*
- 3.2. *Fonction de commutation spontanée : la diode de puissance idéale.*
- 3.3. *Fonction de commutation commandée : le transistor de puissance idéal.*
- 3.4. *Réalisation d'un interrupteur bidirectionnel en courant.*

4. Convertisseur continu – continu : hacheur direct.

- 4.1. *Hacheur série (ou dévolteur) : phase de traction.*
- 4.2. *Identification des interrupteurs*
- 4.3. *Commande d'un moteur à courant continu*
- 4.4. *Hacheur parallèle (ou survolteur) : phase de récupération (freinage).*
- 4.5. *Hacheur réversible en courant*

5. Convertisseur continu – alternatif : onduleur de tension autonome à commande symétrique sur charge (r, L).

- 5.1. *Architecture à 4 interrupteurs en pont : séquences de commutation permises.*

- 5.2. *Onduleur pleine onde à commande symétrique*
- 5.3. *Courant et tensions alternatifs obtenus*
- 5.4. *Identification des interrupteurs*
- 5.5. *Difficulté du filtrage de la tension*
- 5.6. *Puissance*

6. Convertisseur continu – alternatif : onduleur pleine onde à MLI sur charge (r, L).

- 6.1. *Principe de la MLI*
- 6.2. *Courant quasi-sinusoïdal et tension alternative obtenus*
- 6.3. *Filtrage de la tension*
- 6.4. *Puissance*

CAPACITES EXIGIBLES :

- Citer des exemples illustrant la nécessité d'une conversion de puissance électrique.
- Décrire l'architecture générale d'un convertisseur électronique de puissance : générateur, récepteur, processeur de puissance utilisant des interrupteurs électroniques, commande des fonctions de commutation.
- Définir les notions de sources de courant et de tension. Expliquer le rôle des condensateurs et des bobines comme éléments de stockage d'énergie assurant le lissage de la tension ou de l'intensité à haute fréquence.
- Caractériser les sources par leur réversibilité en tension, en intensité, en puissance. Citer des exemples.
- Citer les règles d'interconnexions entre les sources.
- Expliquer le fonctionnement d'une cellule élémentaire à deux interrupteurs assurant le transfert d'énergie entre une source de courant et une source de tension.
- Décrire la caractéristique idéale courant-tension de la diode.
- Décrire la caractéristique idéale courant-tension du transistor.
- Tracer des chronogrammes, exploiter le fait que la moyenne d'une dérivée est nulle en régime périodique établi, calculer des moyennes de fonctions affines par morceaux, utiliser un bilan de puissance moyenne pour établir des relations entre les tensions et les intensités.
- Justifier le choix des fonctions de commutation pour un hacheur série assurant l'alimentation d'un moteur à courant continu à partir d'un générateur idéal de tension continue. Exprimer les valeurs moyennes des signaux. Calculer l'ondulation en intensité dans l'approximation d'un hachage haute fréquence réalisant une intensité affine par morceaux.
- Décrire la structure en pont à quatre interrupteurs et les séquences de commutation (onduleur).
- Etudier, pour un générateur de tension continue et une charge (R, L), la réalisation d'une intensité quasi sinusoïdale par modulation de largeur d'impulsion.
- **Mettre en œuvre un convertisseur statique.**

CP5 : CONVERSION ELECTRO-MAGNETO-MECANIQUE

FONDEMENTS

1. Convertisseur électromécanique en translation

- 1.1. *Description du dispositif*
- 1.2. *Energie magnétique*
- 1.3. *Force électromagnétique $F = + \left(\frac{\partial \mathcal{E}_{\text{mag}}}{\partial x} \right)_i$*
- 1.4. *Applications*

2. Machines tournantes à pôles lisses : couple électromagnétique.

- 2.1. *Constitution d'une machine tournante à pôles lisses : stator, rotor, entrefer.*
- 2.2. *Hypothèse fondamentale : champ magnétique radial à répartition sinusoïdale dans l'entrefer.*
- 2.3. *Energie magnétique stockée dans l'entrefer*
- 2.4. *Couple électromagnétique $\mathcal{T} = \left(\frac{\partial \mathcal{E}_{\text{mag}}}{\partial \theta_r} \right)_{i_s, i_r}$*

CAPACITES EXIGIBLES :

- Exprimer l'énergie magnétique d'un enroulement enlaçant un circuit magnétique présentant un entrefer variable.
- Calculer la force électromagnétique s'exerçant sur une partie mobile en translation en appliquant l'expression fournie $F = + \left(\frac{\partial E}{\partial x} \right)_i$.
- Sur l'exemple du relais, expliquer le fonctionnement d'un contacteur électromagnétique.
- Exprimer l'énergie magnétique totale stockée dans l'entrefer en fonction de la position angulaire du rotor.
- Calculer le moment électromagnétique s'exerçant sur le rotor en exploitant l'expression fournie $\Gamma = \frac{\partial E}{\partial \theta}$.

CP6 : MACHINES TOURNANTES A POLES LISSES 1

1. Machine synchrone

- 1.1. *Constitution d'une machine synchrone à pôles lisses et à excitation séparée*
- 1.2. *Champ magnétique créé par une phase du stator : obtention d'une répartition sinusoïdale dans l'entrefer.*
- 1.3. *Stator diphasé : champ statorique glissant dans l'entrefer*
- 1.4. *Champ rotorique glissant*
- 1.5. *Couple et condition de synchronisme.*
- 1.6. *Moteur ou alternateur ?*

2. Machine à courant continu

- 2.1. *Constitution d'une machine à courant continu à pôles lisses et excitation séparée*
- 2.2. *Champ statorique moyen*
- 2.3. *Le collecteur : synchronisme et perpendicularité des champs statorique et rotorique moyens.*
- 2.4. *Couple. Moteur ou génératrice ?*

CAPACITES EXIGIBLES :

- Décrire la structure d'un moteur synchrone diphasé et bipolaire : rotor, stator, induit, inducteur.
- Pour une machine de perméabilité infinie à entrefer constant, exprimer le champ magnétique dans l'entrefer généré par une spire passant dans deux encoches opposées. Expliquer qualitativement comment obtenir un champ dont la dépendance angulaire est sinusoïdale dans l'entrefer en associant plusieurs spires décalées.
- Justifier l'existence d'un champ glissant statorique lorsque les deux phases sont alimentées en quadrature.
- Justifier l'existence d'un champ glissant rotorique associé à la rotation de l'inducteur.
- Justifier la condition de synchronisme entre le champ statorique et le champ rotorique afin d'obtenir un moment moyen non nul.
- Décrire la structure d'un moteur à courant continu bipolaire à excitation séparée : rotor, stator, induit, inducteur.
- Par analogie avec le moteur synchrone, expliquer que le collecteur établit le synchronisme entre le champ statorique stationnaire et le champ rotorique quelle que soit la position angulaire du rotor.
- Citer l'expression du moment du couple $\Gamma = \Phi i$.

CP7 : MACHINES TOURNANTES A POLES LISSES 2

1. Moteur synchrone

- 1.1. *Problème du démarrage d'un moteur synchrone. Machine synchrone autopilotée.*
- 1.2. *Point de fonctionnement et stabilité du fonctionnement en moteur*
- 1.3. *Modèle électrique de l'induit statorique d'un moteur synchrone*
- 1.4. *Convertisseur électromécanique parfait*
- 1.5. *Bilan de puissance. Rendement d'un moteur synchrone.*

2. Moteur à courant continu

- 2.1. *Couple et fcém : convertisseur électromécanique parfait.*
- 2.2. *Modèle électrique de l'induit rotorique d'un moteur à courant continu*
- 2.3. *Fonctionnement moteur d'une machine à courant continu. Caractéristique (Γ, Ω) en régime permanent.*
- 2.4. *Moteur entraînant une charge en régime permanent. Point de fonctionnement et*

stabilité.

2.5. *Démarrage. Analyse du régime transitoire.*

2.6. *Bilan de puissance et rendement d'un moteur à courant continu*

3. Générateurs électromécaniques

3.1. *Alternateur*

3.2. *Génératrice à courant continu*

4. Machines synchrones vs MCC : avantages, inconvénients, applications.

CAPACITES EXIGIBLES :

- Identifier la difficulté du démarrage d'un moteur synchrone, décrire qualitativement le principe de l'autopilotage.
- Discuter qualitativement la stabilité du système en fonction du déphasage entre les deux champs glissants.
- En admettant les expressions des coefficients d'inductance, établir les équations électriques vérifiées par les phases de l'induit et donner les représentations de Fresnel associées.
- À l'aide d'un bilan énergétique où seules les pertes cuivre sont envisagées, justifier l'égalité entre la puissance électrique absorbée par les f_{cem} et la puissance mécanique fournie.
- Etablir l'expression de la f_{cem} induite $e = \Phi\Omega$ par un argument de conservation énergétique.
- Décrire qualitativement les pertes existant dans une machine réelle : pertes cuivre, pertes fer, pertes mécaniques.
- Établir les équations électrique et mécanique. Tracer la caractéristique (Ω, Γ) à tension d'induit constante. Analyser le démarrage d'un moteur entraînant une charge mécanique exerçant un moment $-f\Omega$.
- **Mettre en œuvre un moteur à courant continu.**
- Décrire les conditions d'utilisation de la machine synchrone en alternateur.
- Décrire les conditions d'utilisation de la machine à courant continu en génératrice. Choisir des conventions d'orientation adaptées.
- Citer des exemples d'application de la machine synchrone.
- Citer des exemples d'application de la machine à courant continu.