

# SOMMAIRE

## CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS & RAPPELS FONDAMENTAUX

<b>1 ÉQUATIONS DE BASE DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME</b> -----	<b>9</b>
1.1 Les relations constitutives -----	9
1.2 Les équations de Maxwell -----	14
1.3 Les équations de Laplace et de Poisson -----	18
1.4 Conditions aux limites à la surface de séparation de deux milieux -----	20
1.5 Relation d'Oumov-Poynting -----	22
1.6 Cas d'un champ sinusoïdal -----	24
<b>2 APPLICATIONS A L'ÉLECTROTECHNIQUE</b> -----	<b>27</b>
2.1 Application du théorème d'Ampère à une seule source magnétique -----	27
2.2 Circuits magnétiques et énergie associée -----	29
2.3 Application de la loi de Lenz-Faraday -----	34
2.4 Actions magnétiques : force de Laplace, force portante d'un aimant -----	36
<b>3 PARTICULARITÉS DES MATÉRIAUX FERROMAGNÉTIQUES</b> -----	<b>40</b>
3.1 Matériaux ferromagnétiques -----	41
3.2 Etude d'une bobine à noyau ferromagnétique sous régime périodique -----	45
3.3 Etude des circuits couplés à noyaux: le transformateur -----	53
3.4 Equations établies à partir des inductances et mutuelles-inductances -----	56
<b>4 NOTIONS ÉLÉMENTAIRES D'ÉLECTROMÉCANIQUE</b> -----	<b>57</b>
4.1 Rôle des machines tournantes -----	57
4.2 Notions de paramètres nominaux et caractéristiques des machines -----	57
4.3 La puissance électrique -----	58
4.4 La puissance mécanique -----	59
4.5 Entraînement des machines -----	60
<b>5 EXERCICES RÉSOLUS</b> -----	<b>66</b>

## CHAPITRE II : FMM ET FEM DANS LES MACHINES TOURNANTES À COURANT ALTERNATIF

<b>1 PRINCIPES GÉNÉRAUX</b> -----	<b>75</b>
1.1 Champ créé par une bobine, dans l'entrefer d'une machine tournante -----	76
1.2 Champ créé par plusieurs bobines dans l'entrefer -----	79
1.3 Cas particulier d'une alimentation triphasée-Champ tournant -----	80
<b>2 CONSTITUTION DES ENROULEMENTS</b> -----	<b>83</b>
2.1 Aspect descriptif bobines dans l'entrefer -----	84
2.2 Définitions -----	85
2.3 Réalisation du bobinage d'un enroulement régulier à une couche -----	87
2.4 Enroulement à nombre fractionnaire d'encoches par pôle et phase -----	90
2.5 Enroulement à deux couches -----	91
<b>3 FACTEUR DE BOBINAGE</b> -----	<b>93</b>
3.1 Hypothèses et outils de travail -----	93
3.2 Distribution du champ dans l'entrefer d'une bobine diamétrale -----	93
3.3 Facteur de distribution -----	96
3.4 Facteur de raccourcissement -----	98
3.5 Facteur d'inclinaison (vrillage) -----	101
3.6 Coefficient de bobinage ou facteur d'enroulement -----	102
<b>4 FMM CRÉÉES PAR UNE ARMATURE TRIPHASÉE</b> -----	<b>103</b>
4.1 Fmm d'une armature monophasée -----	103
4.2 Fmm d'une armature triphasée -----	103
4.3 Champs tournants harmoniques -----	109

<b>5 FLUX ET FORCES ÉLECTROMOTRICES -----</b>	<b>112</b>
5.1 Relation entre le flux par pôle et les inductions moyenne et fondamentale -----	113
5.2 Fem créée dans une spire plongée dans un champ non sinusoïdal tournant -----	114
5.3 Fem créée dans une section plongée dans un champ non sinusoïdal -----	116
5.4 Fem créée par pôle dans le cas d'un champ non sinusoïdal -----	116
5.5 Fem créée par phase dans le cas d'un champ non sinusoïdal -----	116
5.6 Application : calcul de la matrice-inductance d'une machine à pôles lisses -----	117
<b>6 EXERCICES RÉSOLUS -----</b>	<b>123</b>
 <b>CHAPITRE III : MACHINES ASYNCHRONES</b>	
<b>1 DESCRIPTION -----</b>	<b>137</b>
1.1 Allure globale -----	137
1.2 Principaux éléments de la machine -----	138
1.3 Principaux types de rotor -----	139
1.4 Boite à bornes -----	140
1.5 Plaque signalétique -----	141
<b>2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT EN MOTEUR -----</b>	<b>141</b>
2.1 Création du champ tournant -----	141
2.2 Création du couple au rotor -----	142
2.3 Glissement -----	143
2.4 Pulsations des courants rotoriques, vitesses relatives des deux champs -----	143
<b>3 LES ÉQUATIONS ÉLECTRIQUES DE LA MACHINE -----</b>	<b>144</b>
3.1 Equation électrique au stator -----	144
3.2 Equation électrique au rotor -----	145
3.3 Equation des Ampères-tours -----	145
3.4 Schéma équivalent du moteur ramené au stator -----	147
<b>4 DIAGRAMME ÉNERGÉTIQUE ET PUISSANCES MISES EN JEU -----</b>	<b>148</b>
4.1 La puissance mécanique à partir du schéma équivalent -----	148
4.2 Bilan énergétique total et rendement -----	150
<b>5 DÉTERMINATION DU COUPLE ÉLECTROMAGNÉTIQUE -----</b>	<b>150</b>
5.1 Couple électromagnétique et couple utile -----	150
5.2 Caractéristique $\Gamma_{em}(g)$ à $E_{r1}$ constant -----	151
5.3 Caractéristique $\Gamma_{em}(g)$ à $V_s$ constant -----	153
5.4 Couples instantané et moyen à partir de la force de Laplace -----	154
<b>6 CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DU MOTEUR ASYNCHRONE -----</b>	<b>156</b>
6.1 Principaux paramètres de fonctionnement -----	156
6.2 Couple utile -----	156
6.3 Courant absorbé -----	157
6.4 Facteur de puissance -----	157
6.5 Rendement -----	157
<b>7 DÉMARRAGES DU MOTEUR ASYNCHRONE -----</b>	<b>158</b>
7.1 Problématique du démarrage -----	158
7.2 Démarrages des moteurs à rotors bobinés (rotor à bagues) -----	158
7.3 Démarrage direct des rotors à cage -----	159
7.4 Démarrages indirects des rotors à cage -----	164
<b>8 VARIATION DE LA VITESSE -----</b>	<b>165</b>
8.1 Principes -----	165
8.2 Action sur le nombre de paires de pôles -----	166
8.3 Action sur le glissement -----	167
8.4 Action sur la fréquence -----	167
<b>9 FONCTIONNEMENT EN GÉNÉRATRICE ET EN FREIN -----</b>	<b>172</b>
9.1 Principe de fonctionnement en génératrice -----	172

9.2 Autres types de fonctionnement en génératrice -----	173
9.3 Fonctionnement en frein (freinage à contre-courant) -----	174
9.4 Fonctionnement de la machine à g entre - $\infty + \infty$ -----	177
<b>10 ESSAIS DES MOTEURS ASYNCHRONES -----</b>	<b>177</b>
10.1 Introduction -----	177
10.2 Essais directs en charge avec mesure du couple utile -----	177
10.3 Essais en charge avec évaluation des pertes -----	179
10.4 Essais à puissance réduite -----	180
<b>11 UTILISATION DU DIAGRAMME DU CERCLE -----</b>	<b>181</b>
11.1 Introduction -----	181
11.2 Schéma équivalent en $\Gamma$ et diagramme du cercle -----	182
11.3 Exploitation du diagramme -----	183
<b>12 LE MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASÉ -----</b>	<b>185</b>
12.1 Introduction -----	185
12.2 Description -----	185
12.3 Principe -----	186
12.4 Equations -----	187
12.5 Performances et démarrage -----	188
<b>13 EXERCICES RÉVOLUS -----</b>	<b>189</b>
 <b>CHAPITRE IV : MACHINES SYNCHRONES</b>	
<b>1 NOTATIONS ET CONVENTIONS -----</b>	<b>213</b>
<b>2 DESCRIPTION -----</b>	<b>214</b>
2.1 Le stator -----	214
2.2 Le rotor -----	214
<b>3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT -----</b>	<b>217</b>
3.1 Fonctionnement en alternateur -----	217
3.2 Fonctionnement en moteur -----	217
<b>4 ALTERNATEURS À PÔLES LISSES EN RÉGIME LINÉAIRE -----</b>	<b>219</b>
4.1 Expression de la fem induite à vide -----	219
4.2 Réaction d'induit -----	220
4.3 Sens de la fem en charge au stator -----	221
4.4 Courant induit et flux résultant selon la charge -----	221
4.5 Expression de la fem en charge en régime linéaire -----	225
4.6 Coefficient d'équivalence pour une machine à pôles lisses -----	226
4.7 Equation électrique en régime linéaire -----	227
4.8 Détermination de la réactance synchrone : méthode de Behn-Eschenburg -----	228
<b>5 ALTERNATEURS À PÔLES LISSES EN RÉGIME SATURÉ -----</b>	<b>230</b>
5.1 Diagramme de Behn-Eschenburg en régime saturé -----	230
5.2 Diagramme de Potier -----	231
5.3 Méthode de Potier pour la détermination de $\alpha$ et $\ell\omega$ -----	233
5.4 Détermination des coefficients de Potier -----	234
<b>6 ALTERNATEURS À PÔLES SAILLANTS EN RÉGIME LINÉAIRE -----</b>	<b>236</b>
6.1 Champ inducteur et réaction d'induit : diagramme à deux réactions -----	236
6.2 Expression de la fem en charge en régime linéaire -----	238
6.3 Coefficients d'équivalence $\alpha d$ et $\alpha q$ -----	238
6.4 Equation électrique en régime linéaire -----	240
6.5 Détermination expérimentale de $X_d$ et $X_q$ -----	240
6.6 Détermination du courant d'excitation pour un régime donné -----	241
<b>7 ALTERNATEURS À PÔLES SAILLANTS EN RÉGIME SATURÉ -----</b>	<b>242</b>
<b>8 CARACTÉRISTIQUES DES ALTERNATEURS AUTONOMES -----</b>	<b>244</b>

<b>9 DIAGRAMME ÉNERGÉTIQUE DE LA MACHINE SYNCHRONE</b> -----	<b>245</b>
9.1 Bilan des puissances en jeu -----	245
9.2 Bilan de puissance pour le fonctionnement en alternateur -----	246
9.3 Bilan de puissance pour le fonctionnement en moteur -----	247
9.4 Mesures du rendement : Méthode des trois essais -----	247
<b>10 MACHINE SYNCHRONE COUPLÉE A UN RÉSEAU PUISSANT</b> -----	<b>248</b>
10.1 Introduction -----	248
10.2 Procédures de couplage -----	249
10.3 Diagramme bipolaire et lecture des puissances -----	250
10.4 Diagramme bipolaire simplifié : couple électromagnétique et angle interne -----	253
10.5 Caractéristiques en charge de la MS couplée au réseau -----	254
10.6 Particularité de la machine à pôles saillants couplée au réseau -----	257
<b>11 STABILITÉ ET OSCILLATIONS DES MS COUPLÉES AU RÉSEAU</b> -----	<b>259</b>
11.1 Stabilité statique -----	259
11.2 Stabilité dynamique -----	259
11.3 Couple synchronisant pour les petites oscillations -----	260
11.4 Équation du mouvement sans amortissement -----	261
11.5 Équation du mouvement avec amortissement -----	263
11.6 Stabilité pour les grandes variations de l'angle interne -----	264
11.7 Oscillations forcées -----	266
<b>12 DÉMARRAGE ET VARIATION DE VITESSE DU MOTEUR SYNCHRONE</b>	<b>268</b>
12.1 Démarrage en asynchrone -----	268
12.2 Démarrage avec un variateur de fréquence -----	269
12.3 Moteur synchrone autopiloté -----	269
<b>13 EXERCICES RÉSOLUS</b> -----	<b>269</b>
 <b>CHAPITRE V : NOTIONS DE CONVERSION ÉLECTROMÉCANIQUE DE L'ÉNERGIE</b>	
<b>1 CONVERTISSEUR ÉLECTROMAGNÉTIQUE À UNE EXCITATION</b> -----	<b>295</b>
1.1 Energie et co-énergie d'un circuit magnétique non déformable -----	295
1.2 Energie et co-énergie d'un circuit magnétique déformable -----	297
1.3 Couple électromagnétique -----	298
1.4 Interprétation graphique -----	299
1.5 Application aux convertisseurs non saturés -----	300
1.6 Equations dynamiques du convertisseur non saturé -----	300
<b>2 CONVERTISSEUR ÉLECTROMAGNÉTIQUE A N EXCITATIONS</b> -----	<b>301</b>
2.1 Couple électromagnétique d'un système à n excitations -----	301
2.2 Equations dynamiques d'un système à n excitations -----	303
<b>3 MODÉLISATION DES MACHINES TOURNANTES USUELLES</b> -----	<b>303</b>
3.1 Eléments de la matrice-inductance de la machine à pôles lisses -----	303
3.2 Eléments de la matrice-inductance de la machine à pôles saillants -----	305
<b>4 EXEMPLES D'APPLICATIONS</b> -----	<b>307</b>
4.1 Convertisseur à quatre circuits couplés à pôles lisses -----	307
4.2 Machine à réluctance variable élémentaire -----	311
<b>5 EXERCICES RÉSOLUS</b> -----	<b>316</b>
<b>ANNEXES</b> -----	<b>325</b>
<b>INDEX</b> -----	<b>347</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> -----	<b>351</b>