

# SOMMAIRE

<b>Chapitre 1 – Outils mathématiques</b> .....	<b>9</b>	<b>Chapitre 3 – Puissance en alternatif</b> .....	<b>68</b>
1.1. Valeur moyenne, valeur efficace, termes associés.....	9	3.1. Définitions.....	68
1.1.1. Valeur moyenne.....	9	3.1.1. Puissance instantanée.....	68
1.1.2. Valeur efficace.....	10	3.1.2. Puissance moyenne.....	69
1.1.3. Taux d'ondulation et Facteur de forme.....	11	3.1.3. Puissance apparente.....	70
1.2. Vecteurs de Fresnel.....	12	3.1.4. Facteur de puissance.....	70
1.3. Fonctions périodiques. Décomposition de Fourier.....	13	3.2. Application au régime harmonique.....	70
1.3.1. Séries de Fourier.....	13	3.2.1. Premiers résultats.....	70
1.3.2. Cas particuliers importants.....	14	3.2.2. Puissance complexe.....	75
1.3.3. Utilisation des complexes pour le calcul des coefficients.....	16	3.3. Utilisation et interprétation de la puissance réactive.....	76
1.3.4. Taux de distorsion harmonique (noté $T_{dh}$ ou THD ou TDH).....	18	3.3.1. Exemples de détermination de Q.....	76
1.4. Équations différentielles.....	19	3.3.2. Théorème de Boucherot.....	77
1.4.1. Équations différentielles du premier ordre.....	19	3.3.3. Applications.....	78
1.4.2. Équations différentielles du second ordre (à coefficients constants).....	20	3.3.4. Puissance réactive : concept théorique ou réalité physique ?.....	80
1.5. Grandeurs réduites.....	24	3.4. Puissance en régime non sinusoïdal.....	83
Exercices.....	27	3.4.1. Puissance active ou puissance moyenne.....	83
Solutions.....	34	3.4.2. Puissance apparente et facteur de puissance.....	84
<b>Chapitre 2 – Régimes transitoires et régimes permanents</b> .....	<b>38</b>	3.4.3. Extension de la notion de puissance réactive.....	84
2.1. Circuits électriques du premier ordre.....	38	3.4.4. Cas des régimes périodiques quelconques.....	88
2.1.1. Circuit R, L série, fém. continue.....	38	3.5. Puissance en triphasé.....	90
2.1.2. Circuit [R,C] parallèle, source de courant constant.....	39	3.5.1. Régime harmonique équilibré.....	90
2.1.3. Circuit du premier ordre [R,C] série, fém. constante.....	40	3.5.2. Régime triphasé sinusoïdal déséquilibré.....	93
2.1.4. Circuit du premier ordre R,L parallèle.....	41	Exercices.....	95
2.1.5. Circuit du premier ordre, source variable avec le temps.....	42	Solutions.....	101
2.2. Circuits électromécaniques du premier ordre.....	43	<b>Chapitre 4 – Introduction à l'électronique de puissance</b> .....	<b>108</b>
2.3. Circuits électriques du deuxième ordre.....	46	4.1. Avant-propos.....	108
2.3.1. Circuit R, L, C série, fém. constante.....	46	4.2. Définitions.....	109
2.3.2. Circuit L, R et C en parallèle.....	50	4.3. Les applications de l'électronique de puissance.....	110
2.4. Circuits électromécaniques du second ordre.....	52	4.3.1. Charges alimentées en continu.....	110
2.5. Régime transitoire de circuits magnétiquement couplés.....	56	4.3.2. Charges alimentées en alternatif.....	110
Exercices.....	60	4.3.3. Différentes formes de l'énergie électrique.....	111
Solutions.....	64	4.3.4. Proposition de classification des convertisseurs statiques.....	111
		4.4. Les acteurs de l'électronique de puissance.....	112
		4.4.1. Propriétés du dipôle interrupteur.....	114
		4.4.2. Propriétés du dipôle condensateur.....	115
		4.4.3. Propriétés du dipôle inductance.....	118

<b>Chapitre 5 – Sources et charges en ENPU.....</b>	<b>121</b>
5.1. Notion de sources .....	121
5.2. Caractérisation des sources .....	121
5.2.1. Comportement statique .....	121
5.2.2. Comportement dynamique .....	123
5.2.3. Exemples de sources .....	123
5.3. Règles d'interconnexion des sources .....	125
5.3.1. Liaisons permises .....	125
5.3.2. Liaisons interdites .....	125
<b>Chapitre 6 – Fonctionnement des interrupteurs et cellule de commutation élémentaire.....</b>	<b>127</b>
6.1. Caractéristique statique .....	127
6.2. Les modes de commutation .....	128
6.3. Extension à la cellule de commutation .....	130
6.4. Notions de fonction de modulation .....	134
6.5. Principes de conversion de la structure élémentaire .....	135
6.5.1. Conversion continu/continu (hacheur) .....	135
6.5.2. Conversion continu/alternatif (onduleur) .....	135
6.5.3. Conversion alternatif/continu (redresseur) .....	136
6.5.4. Conversion alternatif/alternatif (gradateur) .....	138
<b>Chapitre 7 – Les composants utilisés en ENPU .....</b>	<b>140</b>
7.1. La diode .....	140
7.2. Le transistor MOS .....	142
7.3. Le transistor IGBT .....	144
7.4. Le thyristor .....	147
7.5. Les associations de semi-conducteurs .....	149
7.6. Les composants passifs .....	151
7.6.1. Le transformateur .....	153
7.6.2. L'inductance .....	158
7.6.3. Le condensateur .....	161
<b>Chapitre 8 – Conversion DC / DC .....</b>	<b>164</b>
8.1. Introduction .....	164
8.1.1. Définitions générales .....	165
8.1.2. Les 4 montages fondamentaux .....	166
8.2. Hacheurs un quadrant .....	173
8.2.1. Hacheur série (type BUCK) .....	173
8.2.2. Hacheur élévateur (type BOOST) .....	182
8.2.3. Hacheur à stockage inductif (type BUCK-BOOST) .....	189
8.3. Hacheurs deux quadrants .....	194
8.3.1. Hacheur réversible en courant .....	194
8.3.2. Hacheur réversible en tension .....	199
8.4. Hacheurs quatre quadrants .....	207
8.4.1. Description du fonctionnement .....	207
8.4.2. Nature technologique des interrupteurs .....	209
8.4.3. Techniques de commande d'un pont complet .....	210
8.4.4. Analyse de la réversibilité .....	212
8.5. Montages dérivés avec isolation galvanique .....	213
8.5.1. Montage FLYBACK .....	213
8.6. Étude de cas : évolution de l'alimentation des $\mu\text{P}$ .....	218
8.6.1. Position du problème .....	218
8.6.2. Hacheur multicellulaire à inductances indépendantes .....	222
8.6.3. Hacheur multicellulaire à inductances couplées .....	227
Exercices .....	237
Solutions .....	242
<b>Chapitre 9 – Conversion AC / DC à interrupteurs mono-commandables .....</b>	<b>244</b>
9.1. Structures fondamentales de conversion .....	244
9.1.1. Montage monophasé non commandable, non réversible en puissance .....	244
9.1.2. Montage monophasé mono-commandable, réversible en puissance .....	249
9.1.3. Montage monophasé mono-commandable, non réversible en puissance .....	253
9.1.4. Extension au montage triphasé .....	254
9.2. Redressement monophasé à diodes .....	261
9.2.1. Redressement à filtrage capacitif .....	261
9.2.2. Redressement à correction du facteur de puissance .....	266
9.3. Redressement triphasé .....	275
9.3.1. Fonctionnement à $\psi_{135} = 0$ et $\psi_{462} = 0$ .....	276
9.3.2. Fonctionnement à $0 \leq \psi_{135} \leq \pi$ et $\psi_{462} = 0$ .....	282
9.3.3. Fonctionnement à $0 \leq \psi_{135} \leq \pi$ et $0 \leq \psi_{462} \leq \pi$ .....	289
9.3.4. Prise en compte des imperfections .....	296
9.4. Étude de cas : Transport de l'énergie électrique ; liaison HVDC .....	302
9.4.1. Intérêt du transport en courant continu .....	302
9.4.2. Exemples de réalisation .....	305
9.4.3. Étude du montage dodécaphasé .....	306
9.4.4. Filtrage passif des courants réseau .....	309
Exercices .....	311
Solutions .....	325

<b>Chapitre 10 – Conversion AC / DC à interrupteurs bi-commandables.....</b>	<b>334</b>
10.1. Onduleurs monophasés .....	338
10.1.1. Principe de fonctionnement .....	338
10.1.2. Stratégies de commande du pont complet monophasé.....	339
10.1.3. Cas particuliers : onduleurs à deux interrupteurs .....	353
10.2. Fonctionnements particuliers .....	357
10.2.1. Absorption sinusoïdale de courant au réseau .....	357
10.2.2. Filtre actif monophasé .....	366
10.2.3. Onduleur monophasé à commutation douce .....	370
10.3. Onduleurs triphasés .....	378
10.3.1. Commande pleine onde .....	379
10.3.2. Commande à modulation de largeur d'impulsions .....	382
10.3.3. Commande avec injection d'homopolaire .....	384
10.4. Étude de cas : onduleur à trois niveaux .....	387
10.4.1. Principe de fonctionnement .....	387
10.4.2. Structure et formes d'ondes en triphasé .....	391
10.4.3. La réalité industrielle .....	392
10.4.4. La technologie industrielle.....	394
Exercices .....	395
Solutions .....	404

<b>Chapitre 11 – Problématique de gestion des réseaux.....</b>	<b>411</b>
11.1. Les éléments constituant le réseau .....	411
11.1.1. Les lignes .....	411
11.1.2. Transformateurs .....	421
11.1.3. Machine synchrone .....	429
11.2. Différents types de réseaux et problèmes connexes .....	443
11.2.1. Les différents types de réseau .....	443
11.2.2. Fonctionnement d'un réseau de transport.....	446

<b>Chapitre 12 – L'électronique de puissance au service des réseaux.....</b>	<b>460</b>
12.1. Liaisons en courant et tension continus .....	460
12.1.1. Introduction.....	460
12.1.2. Liaisons CCHT (SVDC) de type CSC .....	463
12.1.3. Liaisons VSC HVDC.....	468
12.2. FACTS ( <i>Flexible Alternating Current Transmission Systems</i> ).....	494
12.2.1. Introduction.....	494
12.2.2. Les FACTS de type parallèle .....	495
12.2.3. Les FACTS de type série.....	501
12.2.4. Compensation série parallèle ou contrôleur universel de puissance .....	504

<b>Chapitre 13 – Étude de cas.....</b>	<b>506</b>
13.1. Étude de cas 1 : Compensation de puissance réactive .....	506
13.1.1. 1 <sup>re</sup> partie : Influence de la puissance réactive sur le réseau .....	507
13.1.2. 2 <sup>e</sup> partie : Compensation de la puissance réactive par batteries de condensateurs .....	509
13.1.3. 3 <sup>e</sup> partie : Compensation de la puissance réactive par stato-compensateur .....	516
13.2. Étude de cas 2 : Alimentation réseau SNCF 25 kV .....	521
13.2.1. 1 <sup>re</sup> partie : Pont monophasé asymétrique .....	521
13.2.2. 2 <sup>e</sup> partie : Compensation de la puissance réactive par condensateur .....	527
13.2.3. 3 <sup>e</sup> partie : Compensation de la puissance réactive par statocompensateur .....	529
13.2.4. 4 <sup>e</sup> partie : Compensation de la puissance réactive par gradateur MLI.....	532
13.2.5. 5 <sup>e</sup> partie : Compensation de la puissance réactive par onduleur de tension.....	539