

Table des matières

CHAPITRE I : INTRODUCTION	1
1. Présentation des alimentations à découpage	1
1.1. Evolution des systèmes d'alimentations	1
1.2. Principes	1
1.2.1. Alimentations à régulation linéaire	1
1.2.2. Alimentations à découpage	2
1.3. Intérêts et limitations du découpage	2
1.3.1. Composants à semi-conducteurs	2
1.3.2. Transformateur	3
1.3.3. Impact de la fréquence de découpage	3
1.3.3.1. Dimensionnement des filtres	3
1.3.3.2. Limitations du découpage	4
1.4. Comparaison des deux systèmes existants	4
2. Introduction aux convertisseurs d'énergie	5
2.1. Les sources	6
2.2. Principes fondamentaux	8
2.3. Les interrupteurs	8
2.3.1. Caractéristiques statiques	8
2.3.2. Changements d'état d'un interrupteur	9
2.3.3. Classification des interrupteurs	10
2.3.3.1. Interrupteurs à deux segments	10
2.3.3.2. Interrupteurs à trois segments	11
2.3.3.3. Interrupteurs à quatre segments	12
2.4. La commutation	12
2.4.1. La cellule de commutation	13
2.4.2. Détermination des caractéristiques statiques	13
2.4.3. La notion de commutation naturelle	14
2.4.4. Influence de v_e et i sur la nature des commutations	15
2.4.5. Influence de la commutation sur la nature des interrupteurs d'une cellule	17
2.5. Règles de la dualité	18
2.5.1. Définitions	18
2.5.2. Application aux interrupteurs	19
2.5.3. Application aux convertisseurs	20
2.6. Eléments de synthèse d'un convertisseur	20
2.7. Remarques générales	23

A COMMUTATION COMMANDEE	25
1. Convertisseurs continu-continu sans isolement galvanique.....	25
1.1. Introduction	25
1.2. Hacheur série (type BUCK)	27
1.2.1. Principe de fonctionnement en conduction continue	27
1.2.2. Principales relations et contraintes sur les composants	28
1.2.2.1. Ondulations de courant et de tension	28
1.2.2.2. Contraintes	30
1.2.2.3. Facteurs de dimensionnement.....	30
1.2.3. Fonctionnement en conduction discontinue.....	30
1.3. Hacheur parallèle (type BOOST)	32
1.3.1. Principe de fonctionnement	32
1.3.2. Fonctionnement en conduction discontinue.....	33
1.3.3. Principales relations et contraintes sur les composants	34
1.3.3.1. Contraintes	34
1.3.3.2. Facteurs de dimensionnement.....	34
1.3.3.3. Ondulations de courant et de tension	34
1.4. Hacheur à stockage inductif (type BUCK-BOOST)	35
1.4.1. Principe de fonctionnement	35
1.4.2. Fonctionnement en conduction discontinue.....	36
1.4.3. Principales relations et contraintes sur les composants	38
1.4.3.1. Ondulations	38
1.4.3.2. Contraintes	38
1.4.3.3. Facteurs de dimensionnement.....	38
1.5. Hacheur à stockage capacitif (hacheur de CUK)	38
1.5.1. Principe de fonctionnement	38
1.5.2. Fonctionnements en conduction discontinue	40
1.5.2.1. Régime discontinu de courant.....	40
1.5.2.2. Régime discontinu de tension	41
1.5.3. Principales relations et contraintes sur les composants	42
1.5.3.1. Ondulations	42
1.5.3.2. Contraintes	43
1.5.3.3. Facteurs de dimensionnement.....	43
1.5.4. Couplage magnétique des inductances	43
1.5.5. Hacheurs dérivés du hacheur de Cuk	44
1.5.5.1. Hacheur SEPIC (Single-Ended Primary Inductor Converter).....	44
1.5.5.2. Hacheur ZETA	45
1.6. Choix du rapport cyclique.....	45
1.6.1. Influence des résistances parasites	45
1.6.2. Facteurs de dimensionnement	46
1.7. Tableaux récapitulatifs.....	47
1.8. Modes de commande.....	48

1.8.1. Commande à Temps de conduction fixe et Fréquence variable.....	49
1.8.2. Commande en Fourchette	49
1.8.3. Commande en mode courant.....	51
1.8.4. Commande auto-oscillante.....	51
2. Alimentations à découpage asymétriques	52
2.1. Introduction	52
2.2. Alimentation à découpage FLYBACK.....	52
2.2.1. Principe de fonctionnement en régime continu	53
2.2.2. Principales relations et contraintes sur les composants	54
2.2.2.1. Ondulations	54
2.2.2.2. Contraintes sur les composants	54
2.2.2.3. Facteur de dimensionnement de l'interrupteur.....	54
2.2.3. Alimentation FLYBACK en régime auto-oscillant	54
2.2.4. Structures FLYBACK entrelacées	56
2.3. Alimentation à découpage FORWARD.....	58
2.3.1. Principe de fonctionnement en régime continu	58
2.3.2. Principales relations et caractéristiques	61
2.3.2.1. Contraintes sur les composants	61
2.3.2.2. Ondulations	62
2.3.2.3. Facteur de dimensionnement - Choix de m'	62
2.3.3. Variantes du montage FORWARD	62
2.3.3.1. Démagnétisation par réseau RCD	62
2.3.3.2. Démagnétisation par pont asymétrique	63
2.3.3.3. Alimentations Forward entrelacées (montage push-push).....	63
2.4. Convertisseur à stockage capacitif isolé galvaniquement	64
2.4.1. Principe de fonctionnement	64
2.4.2. Contraintes	65
2.4.3. Variante à couplage magnétique total	65
3. Alimentations à découpage symétriques	66
3.1. Définition	66
3.2. Montage Push-Pull.....	66
3.2.1. Fonctionnement à vide.....	66
3.2.2. Fonctionnement en charge	67
3.2.3. Principales relations et caractéristiques	69
3.2.3.1. Contraintes sur les composants	69
3.2.3.2. Facteur de dimensionnement	69
3.3. Montage en demi-pont	69
3.4. Montage en pont	69
3.4.1. Fonctionnement.....	69
3.4.2. Principales relations et caractéristiques	71

3.4.2.1. Contraintes sur les composants	71
3.4.2.2. Facteur de dimensionnement	71
3.5. Problèmes inhérents aux structures symétriques	71
3.5.1. Polarisation du transformateur	71
3.5.2. Mise en oeuvre des interrupteurs	72
4. Influence des inductances de fuite sur le transfert de puissance - Exemple du Forward	72
5. Alimentations multi-voies	74
5.1. Présentation du problème technique	74
5.2. Post-régulation magnétique	75
5.3. Commandes mixtes	79
6. Alimentations à absorption sinusoïdale	80
6.1. La correction du facteur de puissance	80
6.1.1. Introduction	80
6.1.2. Définitions	80
6.1.3. La norme EN 61000-3-2	81
6.1.4. Le redressement classique	82
6.1.4.1. Fonctionnement en conduction continue : L de valeur élevée	83
6.1.4.2. Fonctionnement en conduction discontinue : L de valeur faible	83
6.2. Topologies de convertisseurs à absorption sinusoïdale	84
6.3. Exemple du hacheur parallèle	86
6.3.1. Fonctionnement et définition de la loi de commande	86
6.3.2. Dimensionnement des composants	88
6.3.2.1. Dimensionnement des composants à semi-conducteurs	88
6.3.2.2. Dimensionnement du condensateur et de l'inductance	89
6.3.3. Modes de commande	90
6.3.3.1. Fonctionnement en conduction continue	90
6.3.3.2. Fonctionnement en conduction discontinue	91
6.4. Exemple de l'alimentation FLYBACK	93
6.4.1. Analyse en conduction continue	94
6.4.2. Analyse en conduction discontinue	95

CHAPITRE III : ALIMENTATIONS A DECOUPAGE

A COMMUTATION NATURELLE.....	97
1. Introduction	97
2. Alimentations à découpage quasi-résonnantes	98
2.1. Interrupteurs résonnants	99
2.2. Hacheurs quasi-résonnants	99
2.2.1. Principes de synthèse	100
2.2.2. Fonctionnement - exemple des hacheurs série	101
2.2.2.1. Hacheur série HSRA1	101
2.2.2.2. Hacheur série HSRA2	105
2.2.2.3. Hacheur série HSRBI	107
2.2.2.4. Hacheur série HSRB2	111
2.2.3. Eléments de généralisation (caractéristiques - contraintes)	112
2.2.3.1. Caractéristiques de sortie	112
2.2.3.2. Contraintes et facteurs de dimensionnement	113
2.2.4. Application aux hacheurs à stockage inductif HIRA	115
2.2.5. Régime discontinu-exemple du hacheur série HSRA2	117
2.3. Alimentations à découpage quasi-résonnantes	119
2.3.1. Alimentation FORWARD de type RA1	120
2.3.1.1. Principe de fonctionnement	120
2.3.1.2. Principales relations et contraintes sur les composants	121
2.3.2. Alimentation FORWARD de type RA2	122
2.3.2.1. Principe	122
2.3.2.2. FORWARD RA2 avec démagnétisation résonnante.....	123
2.3.3. Alimentation FLYBACK de type RA2	127
2.3.3.1. Principe de fonctionnement	127
2.3.3.2. Principales relations et contraintes sur les composants	128
3. Alimentations à découpage à résonance.....	129
3.1. Principes	129
3.1.1. Rappels des propriétés des circuits résonnants	129
3.1.2. Structures de base - modes de commutation	130
3.1.2.1. Onduleurs de tension à commutation monotype - circuits série	130
3.1.2.2. Onduleurs de tension à commutation mixte - circuits série	131
3.1.2.3. Onduleurs de courant à commutation monotype - circuits parallèles	132
3.2. Convertisseur à résonance série - $F > F_0$	133

3.2.1. Fonctionnement pour $F > F_0$	134
3.2.2. Analyse au 1er harmonique	136
3.2.3. Eléments de dimensionnement - contraintes.....	137
3.2.3.1. Dimensionnement	137
3.2.3.2. Influence des condensateurs d'aide à la commutation.....	138
3.2.3.3. Contraintes sur les composants - facteurs de dimensionnement	139
3.2.4. Caractéristiques générales - avantages et inconvénients.....	139
3.3. Convertisseur à résonance série - $F < F_0$	140
3.3.1. Fonctionnement pour $F_0/2 < F < F_0$	141
3.3.1.1. Fonctionnement en régime continu	141
3.3.1.2. Fonctionnement en régime discontinu	141
3.3.2. Fonctionnement pour $F < F_0/2$	142
3.3.3. Contraintes sur les composants - facteurs de dimensionnement.....	144
3.4. Caractéristiques de transfert des convertisseurs à résonance série.....	144
3.5. Convertisseur à résonance parallèle	145
3.6. Convertisseur à résonance série - parallèle	146
3.6.1. Eléments de dimensionnement - contraintes.....	148
3.6.1.1. Dimensionnement	148
3.6.1.2. Contraintes sur les composants - facteurs de dimensionnement	149

CHAPITRE IV : LES COMPOSANTS A SEMI-CONDUCTEURS ET LEUR ENVIRONNEMENT DANS LES ALIMENTATIONS A DECOUPAGE

1. Eléments sur les composants de puissance.....	151
1.1. Les diodes.....	151
1.1.1. Les diodes PIN	152
1.1.1.1. Caractéristiques statiques.....	152
1.1.1.2. Comportement dynamique	153
1.1.1.3. Quelques ordres de grandeurs à propo des diodes PIN rapides	155
1.1.2. Les diodes shottky	156
1.2. Les composants commandés	156
1.2.1. Le transistor bipolaire	156
1.2.1.1. Caractéristiques statiques.....	157
1.2.1.2. Comportement dynamique	158
1.2.1.3. Aires de sécurité en commutation	161
1.2.1.4. Quelques ordres de grandeurs à propos des transistors bipolaires	162

1.2.2. Le transistor à effet de champ et grille isolée (MOSFET).....	162
1.2.2.1. Caractéristiques statiques.....	162
1.2.2.2. Comportement dynamique	163
1.2.2.3. Quelques ordres de grandeurs à propos des transistors MOSFET	166
1.2.3. Le transistor "IGBT"	167
1.2.3.1. Caractéristiques statiques.....	167
1.2.3.2. Comportement dynamique	168
1.2.3.3. Quelques ordres de grandeurs à propos des IGBT	169
2. Commutation et environnement	169
2.1. Forme générale de la commutation commandée	169
dans une cellule interrupteur-diode	169
2.1.1. Approche simplifiée des principaux phénomènes	170
2.1.1.1. Fermeture.....	170
2.1.1.2. Ouverture	172
2.1.1.3. Pertes par commutation	173
2.1.2. Influence du phénomène de recouvrement des diodes à la fermeture	174
2.1.3. Influence de l'inductance de maille à l'ouverture	176
2.1.4. Bilan sur le problème énergétique de la commutation commandée	176
2.2. Impact des techniques de commutation naturelle.....	177
2.2.1. Commande de fermeture.....	177
2.2.2. Commande d'ouverture	178
2.3. Circuits d'Aide à La Commutation (CALC)	179
2.3.1. Principe des circuits d'aide à la fermeture	179
2.3.2. Principe des circuits d'aide à l'ouverture	182
2.3.3. Association des circuits d'aide	183
2.3.4. Exemple de circuits non dissipatifs	185
2.3.4.1. CALC non dissipatif dans une cellule de commutation	185
2.3.4.2. CALC non dissipatif dans une alimentation mono-interrupteur - exemple du Forward.....	187
3. Circuits d'écrêtage dans les alimentations à découpage	189
3.1. Ecrêtage dans les structures non isolées - exemple de la cellule de commutation	189
3.2. Ecrêtage dans les structures isolées	192
3.2.1. Cas du FORWARD	192
3.2.2. Cas du FLYBACK	196
3.2.2.1. Influence des inductances de fuite.....	196
3.2.2.2. Introduction d'écrêteurs	196

3.2.2.3. Enroulement auxiliaire	198
3.2.3. Influence des circuits d'aide à l'ouverture	201
3.2.3.1. Cas du Forward	201
3.2.3.2. Cas du Flyback	202

CHAPITRE V : LES COMPOSANTS PASSIFS DANS LES ALIMENTATIONS A DECOUPAGE

205

1. Les composants magnétiques	205
1.1. Introduction	205
1.2. Les circuits magnétiques	205
1.2.1. Quelques caractéristiques des matériaux utilisables en HF	206
1.2.1.1. Les ferrites	206
1.2.1.2. Les matériaux à entrefer réparti à poudres métalliques	207
1.2.1.3. Les matériaux amorphes	208
1.3. Les bobinages	209
1.3.1. Résistance d'un conducteur en régime alternatif	209
1.3.2. Résistance des bobinages de transformateur en régime alternatif	214
1.3.3. Choix des conducteurs	219
1.3.3.1. Cas des transformateurs	220
1.3.3.2. Cas des inductances	221
1.4. Techniques de dimensionnement	222
1.4.1. Principes fondamentaux	222
1.4.1.1. Transformateurs de tension	222
1.4.1.2. Inductances	224
1.4.1.3. Volume d'un composant magnétique	225
1.4.2. Limites théoriques à une procédure rigoureuse	226
1.4.3. Proposition d'une méthode simplifiée	227
1.4.3.1. Etapes 1 à 5 - Choix de J et des conducteurs	229
1.4.3.2. Etapes 6 à 8 - choix de BM - calcul de A et choix du noyau	229
1.4.3.3. Etapes 9 à 11 - détermination des bobinages	230
1.4.3.4. Calcul de l'entrefer dans le cas des inductances	230
1.5. Etudes de cas	231
1.5.1. Transformateurs de tension - exemple du FORWARD	231
1.5.2. Inductances	233
1.5.2.1. Inductances de lissage	233
1.5.2.2. Inductances de résonance	233
1.5.3. Cas particulier de l'inductance couplée du FLYBACK	233

1.6. Transformateurs d'intensité	235
1.6.1. Relations caractéristiques	235
1.6.2. Eléments de dimensionnement	238
1.7. Modèles électriques simplifiés d'un composant magnétique	240
1.7.1. Modèle inductif	240
1.7.1.1. Composant à deux enroulements	240
1.7.1.2. Composants à trois enroulements	242
1.7.1.3. Détermination des inductances de fuite	245
1.7.1.4. Influence de la fréquence sur les inductances de fuite	252
1.7.2. Capacités parasites	254
1.7.2.1. Localisation	254
1.7.2.2. Détermination des capacités propres	255
1.7.3. Modèle réactif global	259
2. Les condensateurs	260
2.1. Caractéristiques principales des condensateurs	260
2.1.1. Schéma équivalent	260
2.1.2. Limitations d'un condensateur	261
2.1.2.1. Problèmes thermiques	261
2.1.2.2. Problèmes liés à l'inductance série	262
2.1.2.3. Problèmes liés aux courants impulsionsnels	262
2.2. Emploi des condensateurs	262
2.2.1. Condensateurs de filtrage	263
2.2.2. Condensateurs de commutation et de résonance	263
2.3. Technologies employées	266
2.3.1. Les condensateurs électrolytiques	266
2.3.2. Les condensateurs céramiques	267
2.3.3. Les condensateurs films	268
CHAPITRE VI : MODELISATION	
DES ALIMENTATIONS A DECOUPAGE	271
1. Principes généraux de modélisation	271
1.1. Classification des convertisseurs	271
1.2. Méthode des schémas équivalents moyens	272
1.2.1. Mise en équations	272
1.2.2. Modèle équivalent moyen	272
1.2.3. Exemple	273
1.2.4. Exploitation de la méthode	275
1.3. Méthode des générateurs équivalents moyens	276
1.3.1. Principe de la modélisation	276
1.3.2. Exemple du hacheur série en conduction discontinue	276

2. Modélisation des alimentations à commutation commandée.....	278
2.1. Alimentation FORWARD.....	278
2.1.1. Fonctions de transfert en conduction continue.....	278
2.1.2. Commande en amplitude.....	279
2.1.3. Fonctionnement en conduction discontinue.....	284
2.2. Alimentation FLYBACK.....	285
3. Modélisation des alimentations à commutation naturelle.....	288
3.1. Modélisation des convertisseurs quasi-résonnants.....	288
3.1.1. Principe de la modélisation.....	288
3.1.2. Application au FLYBACK RA2.....	288
3.2. Modélisation du convertisseur à résonance série.....	290
3.2.1. Méthode du générateur équivalent moyen.....	290
3.2.2. Modélisation dynamique au 1er harmonique.....	292
3.3. Modélisation du convertisseur à résonance série-parallelé.....	294

**ANNEXE A : CALCUL DU FONCTIONNEMENT STATIQUE
DE L'ALIMENTATION A RESONANCE SERIE.....** 297

1. Fonctionnement pour $F > F_0$	297
1.1. Calcul du courant moyen redressé.....	299
1.2. Détermination de la tension de sortie V_s en fonction de la fréquence F et de la charge R	300
2. Fonctionnement pour $F_0/2 < F < F_0$	301
2.1. Conduction continue.....	301
2.2. Conduction discontinue.....	302
3. Fonctionnement pour $F < F_0/2$	303

**ANNEXE B : FONCTIONS DE TRANSFERT
DES PRINCIPAUX HACHEURS.....** 305

1. Fonctions de transfert du hacheur série.....	305
1.1. Fonctions de transfert en conduction continue.....	306
1.2. Fonctions de transfert en conduction discontinue.....	306
2. Fonctions de transfert du hacheur parallelé.....	306
2.1. Fonctions de transfert en conduction continue.....	307
2.2. Fonctions de transfert en conduction discontinue.....	307
3. Fonctions de transfert du hacheur à stockage inductif.....	307
3.1. Fonctions de transfert en conduction continue.....	308
3.2. Fonctions de transfert en conduction discontinue.....	308
3.3. Fonctions de transfert en régime auto-oscillant.....	308

4. Fonctions de transfert du hacheur à stockage capacitif.....	309
BIBLIOGRAPHIE.....	311
INDEX.....	317

Contenu protégé par copyright