

ECT 15
N° 91

COURS d'électrotechnique

2. traitement de l'énergie électrique (convertisseurs statiques)

nouvelle édition, augmentée de problèmes corrigés

BTS, IUT
écoles d'ingénieurs
maîtrise EEA

Jean-Louis Dalmasso

Ancien élève de l'École Normale Supérieure
de l'Enseignement Technique
Agrége de l'Université
Professeur au Lycée technique Rouvière
à Toulon

3455 $\frac{1}{1}$



TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	7
Bibliographie	8

P R E M I E R E P A R T I E

SYSTEMES TRIPHASES ET TRANSPORT DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

I.A. ETUDE DES GRANDEURS TRIPHASEES	11
I.A.I. ETUDE CINETIQUE DES SYSTEMES TRIPHASES EQUILIBRES	11
1. Définitions 11.- 2. Représentation des systèmes triphasés 12.	
3. Ligne triphasée 15.- 4. Générateurs et récepteurs triphasés 18.	
5. Couplage d'une source ou d'une charge sur une ligne 18.	
I.A.II. ETUDE ENERGETIQUE DES SYSTEMES TRIPHASES	24
1. Rappel des définitions en monophasé 24. - 2. Expression des puissances en triphasé 27.- 3. Mesure de la puissance active 33.- 4. Mesure de la puissance réactive 36.- 5. Mesure du facteur de puissance 41.	
Annexe 1 : Règle de Brillinsky	44
Annexe 2 : Puissance fluctuante en triphasé	44
I.A.III. ETUDE DES SYSTEMES DESEQUILIBRES	46
1. Etude cinétique des systèmes déséquilibrés 46.- 2. Détermination des composantes symétriques 49.- 3. Mesure des composantes symétriques et applications 53.- 4. Etude énergétique des dispositifs triphasés déséquilibrés 61.	
I.B. PRODUCTION, TRANSPORT ET DISTRIBUTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE	64
1. Intérêt des systèmes triphasés 64.- 2. Production et transport de l'énergie électrique 66.- 3. L'interconnexion 70.	

D E U X I E M E P A R T I E

CONVERTISSEURS MAGNETIQUES

II.A. BOBINES D'INDUCTION EN ALTERNATIF	77
II.A.I. BOBINES A CIRCUIT MAGNETIQUE NON SATURABLE	77
1. Rappel des définitions 77.- 2. Fonctionnement en régime permanent sinusoïdal 82.	
II.A.II. BOBINES A NOYAU DE FER	85
1. Equations du fonctionnement 85.- 2. Allures du flux d'induction et de l'intensité du courant 85.- 3. Bobine alimentée à tension efficace constante 91.- 4. Pertes ferromagnétiques 92.- 5. Schéma électrique équivalent en régime sinusoïdal 97.- 6. Calcul d'un enroulement 102.	
II.A.III. BOBINES TRIPHASEES	104
1. Constitution 104.- 2. Inductances propres et mutuelles 105.	
3. Inductances cycliques 106.- 4. Inductances homopolaires 108.	

II.B. TRANSFORMATEURS MONOPHASES	110
II.B.I. TRANSFORMATEUR MONOPHASE PARFAIT	110
1. Définition 110.- 2. Conventions de signes 111.- 3. Equations du transformateur parfait 112.- 4. Schéma électrique équivalent et diagrammes vectoriels 115.- 5. Propriétés du transformateur parfait 115.	
II.B.II. TRANSFORMATEUR MONOPHASE REEL	118
1. Equations du transformateur réel 118.- 2. Schéma électrique équivalent 121.- 3. Schémas électriques simplifiés 122.- 4. Détermination des éléments des schémas équivalents 124.	
II.B.III. PREDETERMINATION DU FONCTIONNEMENT EN CHARGE	127
1. Diagrammes vectoriels 127.- 2. Diagramme de Kapp 129.- 3. Diagramme du triangle fondamental 131.- 4. Méthode de Boucherot 132.	
II.B.IV. ETUDE ENERGETIQUE DU TRANSFORMATEUR MONOPHASE	135
1. Bilan des pertes d'énergie active 135.- 2. Rendement du transformateur 136.- 3. Mesure du rendement 138.	
II.B.V. UTILISATION DES TRANSFORMATEURS MONOPHASES	140
1. Généralités 140.- 2. Réalisation d'un transformateur monophasé 142. 3. Mise sous tension d'un transformateur 143.	
II.C. TRANSFORMATEURS TRIPHASES	146
II.C.I. CONSTITUTION ET COUPLAGES	146
1. Constitution des transformateurs triphasés 146.- 2. Equations électriques du transformateur triphasé 148.- 3. Grandeurs caractéristiques d'un transformateur triphasé 151.- 4. Couplages du transformateur triphasé 153.	
II.C.II. ETUDE DU TRANSFORMATEUR EN REGIME DESEQUILIBRE	157
1. Principe général 157.- 2. Etude de quelques couplages particuliers 161.	
II.C.III. METHODE D'ETUDE DES TRANSFORMATEURS TRIPHASES	168
1. Prédéterminations en régime triphasé équilibré 168.- 2. Détermination expérimentale des éléments des schémas équivalents 170.- 3. Essais d'un transformateur triphasé 173.- 4. Détermination de l'indice horaire 176.	
II.C.IV. MARCHE EN PARALLELE DES TRANSFORMATEURS TRIPHASES	179
1. Principe 179.- 2. Diagrammes vectoriels et schéma équivalent 182. 3. Répartition des puissances 185.	
Annexe : Courants de circulation	190
II.D. TRANSFORMATEURS SPECIAUX	193
II.D.I. AUTOTRANSFORMATEUR	193
1. Définitions 193.- 2. Propriétés de l'autotransformateur monophasé parfait 194.- 3. Comportement énergétique de l'autotransformateur parfait 196.- 4. Autotransformateur réel. Schéma électrique équivalent 197.	
II.D.II. TRANSFORMATEURS DU NOMBRE DE PHASES	199
1. Montage Scott 200.- 2. Montage Leblanc 203.	
II.D.III. TRANSFORMATEURS DE MESURES	206
1. Généralités 206.- 2. Transformateur d'intensité (ou de courant) 207. 3. Transformateur de tension 211.- 4. Incertitude due aux transformateurs de mesures 214.	

II.E. TRANSDUCTEURS MAGNETIQUES	216
II.E.I. BOBINE A NOYAU SATURABLE (INDUCTANCE SATURABLE)	216
1. Définition 216.- 2. Fonctionnement sous tension alternative 217.	
II.E.II. TRANSDUCTEUR MAGNETIQUE SIMPLE	219
1. Principe 219.- 2. Fonctionnement en l'absence de commande 219.	
3. Rôle de la commande 220.- 4. Caractéristique de transducteur simple 222.	
II.E.III. AMPLIFICATEUR (TRANSDUCTEUR DOUBLE A AUTOSATURATION)	223
1. Principe 223.- 2. Caractéristiques d'un amplificateur magnétique 224.	
3. Applications de l'amplificateur magnétique 225.- 4. Avantages et inconvénients des transducteurs magnétiques 228.	

T R O I S I E M E P A R T I E

C O N V E R T I S S E U R S E L E C T R O N I Q U E S

III.A. GENERALITES SUR LES CONVERTISSEURS STATIQUES	231
III.A.I. DEFINITIONS	231
1. Rôle des convertisseurs statiques 231.- 2. Types de montages à redresseurs 232.- 3. Commutation des redresseurs 233.	
III.A.II. COMPOSANTS DE L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE	234
1. Caractéristiques générales 234.- 2. Calcul du refroidissement 236.	
3. Diodes (redresseurs non commandés) 237.- 4. Thyristors (redresseurs commandés) 240.- 5. Triacs 245.- 6. Transistors de puissance 245.	
III.B. REDRESSEMENT NON COMMANDE	249
III.B.I. MODES DE REDRESSEMENT	249
1. Redressement parallèle 249.- 2. Redressement parallèle double 251.	
3. Redressement série 253.- 4. Autres modes de redressement 254.	
III.B.II. GRANDEURS CARACTERISTIQUES D'UN MONTAGE REDRESSEUR	257
1. Etude de la tension redressée 257.- 2. Etude des courants 260.	
3. Facteurs de puissance secondaire et primaire 267.- 4. Tension inverse maximale aux bornes d'une diode 274.	
Annexe 1 : Redressement monophasé	275
Annexe 2 : Redressement double étoile à bobine médiatrice	279
Annexe 3 : Valeurs numériques caractéristiques de quelques redresseurs ...	281
III.B.III. PROBLEMES POSES PAR LES REDRESSEURS REELS	283
1. Commutation des diodes 283.- 2. Chute de tension en charge 287.	
3. Choix et couplage du transformateur 287.- 4. Tension redressée. Harmoniques. Filtrage 292.	
III.C. REDRESSEMENT COMMANDE	299
III.C.I. MONTAGES TOUT THYRISTORS	299
1. Fonctionnement. Allure de la tension continue idéale 299.- 2. Valeur moyenne de la tension redressée 302.- 3. Forme de la tension redressée. Harmoniques 305.- 4. Différence de potentiel aux bornes d'un thyristor 307.	
5. Courants. Puissances. Facteurs de puissance 308.- 6. Empiètement en commutation. Chute de tension en charge 311.	
Annexe : Montages redresseurs à conduction interrompue	313

III.C.II. ONDULEUR NON AUTONOME	315
1.Principe du fonctionnement 315.- 2. Problèmes particuliers de l'onduleur assisté 316.	
III.C.III. MONTAGES MIXTES EN PONT	318
1. Fonctionnement 318.- 2. Valeur moyenne de la tension redressée 320.	
3. Avantages et inconvénients du pont redresseur mixte 322.	
III.C.IV. EXEMPLES D'APPLICATIONS DES REDRESSEURS COMMANDES	322
1. Alimentation des moteurs à courant continu 322.- 2. Réglage de vitesse des machines asynchrones 324.	
III.D. HACHEURS ET ONDULEURS AUTONOMES	327
III.D.I. L'INTERRUPTEUR STATIQUE	327
1. Intérêt 327.- 2. Interrupteur statique à transistor 327.	
3. Interrupteur statique à thyristor 328.	
III.D.II. HACHEURS	333
1. Hacheur série (abaisseur de tension) 334.- 2. Hacheur parallèle (élevateur de tension) 336.- 3. Hacheurs à accumulation 338.	
4. Associations de hacheurs 340.	
III.D.III. ONDULEURS AUTONOMES	341
1. Onduleurs monophasés auto-commutés (à commutation forcée) 341.	
2. Onduleurs triphasés 349.- 3. Onduleurs à commutation par la charge (ou à circuit oscillant) 353.- 4. Applications des onduleurs 357.	
III.E. GRADATEURS ET CYCLOCONVERTISSEURS	358
1. Interrupteurs statiques 358.- 2. Gradateur monophasé 359.- 3. Gradateurs triphasés 361.- 4. Cycloconvertisseur 364.	
INDEX	365

PROBLEMES CORRIGES

1. Régime triphasé équilibré 370 .-2. Systèmes triphasés déséquilibrés 374.-3.I. Transformateur triphasé. Redressement (BTS 1984) 378 .3.II. Couplage étoile-zig-zag et redresseur (BTS 1984) 382 .-4.I. Transformateur triphasé. Calcul et fonctionnement en régime triphasé équilibré (Agrégation Physique Appliquée 1983) 385 .-4.II. Essais. Fonctionnement en charge. (Agrégation Physique Appliquée 1983) 390 .-5.I. Transformateur triphasé en régime déséquilibré (Agrégation Physique Appliquée 1983) 395 .-5.II. Court-circuit déséquilibré (Agrégation Physique Appliquée 1983) 397 .-5.III. Court-circuit déséquilibré et alimentation déséquilibrée (Agrégation Physique Appliquée 1983) 399 .-6.I. Transformateur triphasé : débit de courants non sinusoidaux. Redressement. (Agrégation Physique Appliquée 1983) 401 .-6.II. Montage redresseur à six thyristors (Agrégation Physique Appliquée 1983) 405 .-7.a. Ponts redresseurs monophasés (BTS 1982) 409 .-7.b. Pont mixte (BTS 1982) 411 .-7.c. Charge active, résistive et inductive (BTS 1982) 413 .-7.d. Conduction interrompue (BTS 1982) 416 .-8.a. Hacheurs (BTS Mesures électriques 1983) 416 .8.b. Hacheurs (BTS Mesures électriques 1983) 418 .-8.c. Hacheurs (BTS Mesures électriques 1983) 422 .-9. Hacheur à thyristors (de Jones) 424.