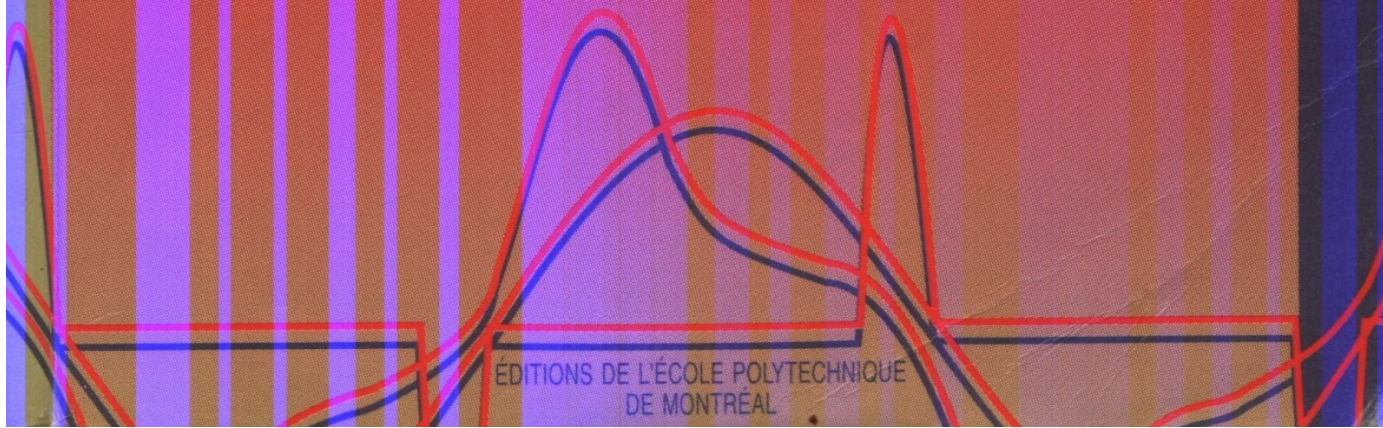
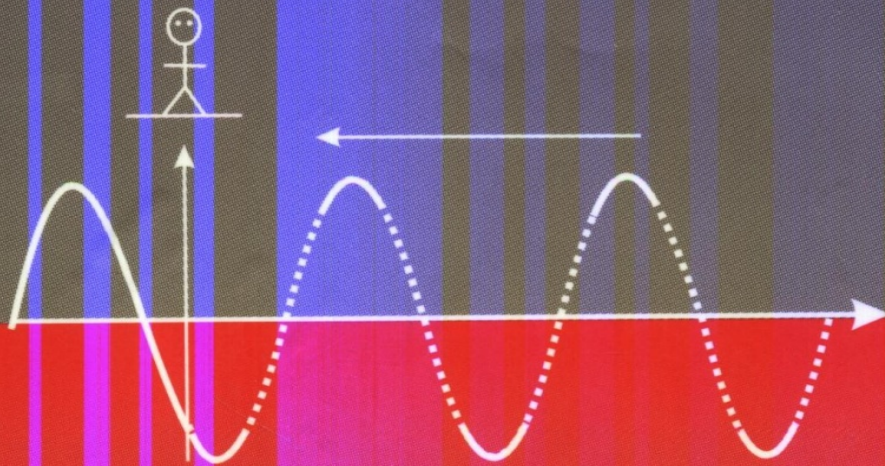




ÉLECTROTECHNIQUE

RÉAL-PAUL BOUCHARD
GUY OLIVIER



ÉDITIONS DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE
DE MONTRÉAL

Table des matières

| | |
|---|-----|
| Avant-propos | III |
| Liste des symboles | XV |
| Chapitre 1 | |
| ÉLÉMENTS DE CIRCUIT EN COURANT ALTERNATIF | 1 |
| 1.1 Introduction | 1 |
| 1.2 Notions de base et définitions | 2 |
| 1.3 Convention des lettres | 3 |
| 1.4 Comportement des éléments passifs en régime sinusoïdal | 3 |
| 1.4.1 Résistance | 4 |
| 1.4.2 Inductance | 6 |
| 1.4.3 Condensateur | 7 |
| 1.5 Phaseurs | 11 |
| 1.6 Représentation temporelle | 12 |
| 1.7 Réactances complexes | 13 |
| 1.8 Impédance et admittance | 15 |
| 1.9 Circuits en régime sinusoïdal | 16 |
| 1.10 Puissance dans une résistance | 26 |
| 1.11 Puissance dans une inductance | 27 |
| 1.12 Puissance dans un condensateur | 28 |
| 1.13 Puissance réactive | 29 |
| 1.14 Puissance dans une impédance | 30 |
| 1.15 Puissance dans une source | 31 |
| 1.16 Puissance apparente | 31 |
| 1.17 Facteur de puissance | 32 |
| 1.18 Amélioration du facteur de puissance | 34 |
| 1.19 Mesure de la puissance | 35 |
| 1.20 Notions d'algèbre complexe | 44 |
| 1.20.1 Opérateur j | 44 |
| 1.20.2 Représentation d'un nombre complexe | 44 |
| 1.20.3 Formes d'écriture d'un nombre complexe | 45 |
| 1.20.4 Opérations sur les nombres complexes | 45 |
| 1.20.5 Conjugué de \bar{A} , noté \bar{A}^* | 45 |
| 1.20.6 Relation d'Euler | 45 |
| Exercices | 46 |

Chapitre 2

| | |
|---|-----------|
| CIRCUIT MAGNÉTIQUE | 59 |
| 2.1 Introduction | 59 |
| 2.2 Analogie entre circuit électrique et circuit magnétique | 59 |
| 2.3 Relation de base | 61 |
| 2.4 Loi d'Ampère | 62 |
| 2.5 Calculs de circuits magnétiques | 62 |
| 2.6 Effet de frange | 68 |
| 2.7 Effet de coin | 69 |
| 2.8 Circuit avec entrefer et arrangement série-parallèle | 70 |
| 2.9 Flux de fuite | 71 |
| 2.10 Pertes par hystérésis | 72 |
| 2.11 Pertes par courants induits | 74 |
| 2.12 Relais | 76 |
| Exercices | 82 |

Chapitre 3

| | |
|--|-----------|
| TRANSFORMATEUR | 85 |
| 3.1 Introduction | 85 |
| 3.2 Principales applications | 85 |
| 3.3 Classification des transformateurs | 86 |
| 3.3.1 Milieu réfrigérant | 86 |
| 3.3.2 Types de construction | 87 |
| 3.4 Transformateur idéal | 90 |
| 3.5 Pertes dans le cuivre | 92 |
| 3.6 Réactance de fuite | 92 |
| 3.7 Courant de magnétisation | 93 |
| 3.8 Courant d'appel | 97 |
| 3.9 Transformateur en charge ✕ | 101 |
| 3.10 Circuit équivalent | 104 |
| 3.11 Circuit équivalent simplifié | 107 |
| 3.12 Fonction de transfert | 108 |
| 3.13 Impédance d'entrée | 109 |
| 3.14 Plaque signalétique | 109 |
| 3.15 Réponse en fréquence | 110 |
| 3.15.1 Basse fréquence | 110 |
| 3.15.2 Moyenne fréquence | 110 |
| 3.15.3 Haute fréquence | 111 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 3.16 | Rendement | 112 |
| 3.17 | Chute de tension interne | 113 |
| 3.18 | Essais sur les transformateurs | 114 |
| 3.18.1 | Essais à vide | 114 |
| 3.18.2 | Impédance équivalente | 119 |
| 3.18.3 | Essai en charge | 121 |
| 3.18.4 | Essai en opposition | 122 |
| 3.19 | Valeurs normalisées | 126 |
| 3.20 | Transformateurs à plusieurs enroulements | 131 |
| 3.21 | Transformateurs en parallèle | 133 |
| 3.22 | Autotransformateur | 139 |
| 3.23 | Transformateurs d'instrumentation | 144 |
| 3.23.1 | Transformateur de potentiel | 144 |
| 3.23.2 | Transformateur de courant | 145 |
| 3.24 | Appareils standard de mesure | 146 |
| | Exercices | 147 |

Chapitre 4

| | | |
|-------|--|-----|
| | CIRCUITS TRIPHASÉS ÉQUILIBRÉS | 151 |
| 4.1 | Introduction | 151 |
| 4.2 | Définitions | 154 |
| 4.3 | Généralités | 154 |
| 4.4 | Connexion en étoile | 155 |
| 4.5 | Tensions de ligne et de phase | 157 |
| 4.6 | Connexion en triangle | 158 |
| 4.7 | Nomenclature usuelle | 161 |
| 4.7.1 | Connexion en étoile | 161 |
| 4.7.2 | Connexion en triangle | 162 |
| 4.8 | Charges équilibrées | 163 |
| 4.9 | Relations entre un circuit en étoile et un circuit en triangle | 164 |
| 4.10 | Mesure de la puissance dans un circuit triphasé | 168 |
| 4.11 | Méthode des deux wattmètres | 171 |
| 4.12 | Vérification du facteur de puissance dans un circuit équilibré | 179 |
| 4.13 | Puissance instantanée dans un circuit triphasé équilibré | 180 |
| 4.14 | Wattmètre à double élément | 181 |
| 4.15 | Wattmètre à trois éléments | 182 |
| 4.16 | Wattmètre à 2 1/2 éléments | 182 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.17 | Énoncé d'une charge | 184 |
| 4.18 | Simplification en circuits équilibrés | 185 |
| 4.19 | Charges triphasées équilibrées en parallèle | 189 |
| 4.20 | Correction du facteur de puissance | 193 |
| 4.21 | Facturation industrielle | 194 |
| | Exercices | 195 |

Chapitre 5

| | | |
|-----|---|-----|
| | CIRCUITS TRIPHASÉS DÉSÉQUILIBRÉS | 199 |
| 5.1 | Introduction | 199 |
| 5.2 | Circuits déséquilibrés avec fil neutre | 199 |
| 5.3 | Circuits déséquilibrés sans fil neutre | 202 |
| 5.4 | Séquencemètre | 207 |
| | Exercices | 213 |

Chapitre 6

| | | |
|------|---|-----|
| | COMPOSANTES SYMÉTRIQUES | 215 |
| 6.1 | Introduction | 215 |
| 6.2 | Génération d'un système déséquilibré à l'aide de systèmes équilibrés | 215 |
| 6.3 | Théorème de Fortescue | 216 |
| 6.4 | Composantes symétriques appliquées aux circuits triphasés | 217 |
| 6.5 | Système original déséquilibré | 217 |
| 6.6 | Système de séquence directe | 217 |
| 6.7 | Système de séquence inverse | 218 |
| 6.8 | Système de séquence homopolaire | 218 |
| 6.9 | Opérateur «a» | 219 |
| 6.10 | Réduction d'un système déséquilibré en ses composantes symétriques | 220 |
| | 6.10.1 Méthode algébrique | 221 |
| | 6.10.2 Méthode géométrique ou méthode graphique | 224 |
| 6.11 | Relations ligne-phase | 226 |
| 6.12 | Composantes symétriques appliquées aux courants | 229 |
| 6.13 | Composantes symétriques appliquées aux impédances | 230 |
| 6.14 | Résumé des principaux cas particuliers | 231 |
| 6.15 | Relations entre les tensions, les courants et les impédances des diverses séquences | 231 |

| | | |
|--------|--------------------------------------|-----|
| 6.16 | Mesure des courants de séquence | 237 |
| 6.16.1 | Courants de séquence homopolaire | 237 |
| 6.16.2 | Courants de séquence inverse | 237 |
| 6.16.3 | Courants de séquence directe | 238 |
| 6.17 | Puissance en régime déséquilibré | 239 |
| 6.18 | Pertes dans une ligne équilibrée | 246 |
| 6.19 | Facteur de puissance généralisé | 248 |
| 6.20 | Correction du facteur de puissance | 253 |
| 6.20.1 | Correction du facteur de déplacement | 253 |
| 6.20.2 | Source de courant homopolaire | 253 |
| 6.20.3 | Compensateur de séquence inverse | 255 |
| | Exercices | 263 |

Chapitre 7

| | | |
|-------|---|-----|
| | TRANSFORMATEURS EN TRIPHASÉ | 265 |
| 7.1 | Introduction | 265 |
| 7.2 | Types de construction | 265 |
| 7.3 | Types de connexions et conventions | 267 |
| 7.4 | Connexion triangle-triangle (Dd0) | 268 |
| 7.4.1 | Régime équilibré | 270 |
| 7.4.2 | Régime déséquilibré | 271 |
| 7.5 | Connexion en V | 272 |
| 7.6 | Connexion triangle-étoile (Dy1 et Dy11) | 273 |
| 7.7 | Connexion étoile-triangle (Yd1 et Yd11) | 276 |
| 7.8 | Connexion étoile-étoile (Yy0) | 278 |
| 7.9 | Connexion étoile-étoile-triangle (Ydy0) | 280 |
| 7.10 | Connexion zigzag (Dz0 et Dz10) | 282 |
| 7.11 | Connexion Scott | 289 |
| 7.12 | Connexion en T (Tt11, Tt1 et Tt0) | 292 |
| 7.13 | Transformateurs de mise à la terre | 300 |
| 7.14 | Courants de magnétisation en triphasé | 303 |
| 7.15 | Sommaire des connexions triphasées de transformateurs | 305 |
| 7.16 | Compensateurs de séquence homopolaire | 310 |
| | Exercices | 316 |

Chapitre 8**HARMONIQUES**

| | | |
|------|--|-----|
| | 321 | |
| 8.1 | Introduction | 321 |
| 8.2 | Courants harmoniques | 321 |
| 8.3 | Analyse de Fourier | 328 |
| 8.4 | Puissance en régime déformé | 334 |
| 8.5 | Coefficient de distorsion, facteur de crête et facteur K | 338 |
| 8.6 | Composantes symétriques en régime déformé | 343 |
| 8.7 | Transformateurs triphasés en régime déformé | 345 |
| 8.8 | Courant de neutre | 351 |
| 8.9 | Transformateurs de type K | 353 |
| 8.10 | Transformateurs déphaseurs | 354 |
| 8.11 | Facteur de puissance généralisé en régime déformé | 358 |
| 8.12 | Solutions | 360 |

Chapitre 9**MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ**

| | | |
|------|--|-----|
| | 363 | |
| 9.1 | Introduction | 363 |
| 9.2 | Stator | 365 |
| 9.3 | Rotor | 365 |
| | 9.3.1 Rotor bobiné (à bagues) | 365 |
| | 9.3.2 Rotor à cage d'écureuil | 366 |
| 9.4 | Champ tournant | 367 |
| 9.5 | Vitesse synchrone | 367 |
| 9.6 | Principe de fonctionnement | 368 |
| 9.7 | Circuit équivalent | 370 |
| 9.8 | Théorème de Thévenin appliqué au stator | 376 |
| 9.9 | Production du couple | 380 |
| 9.10 | Couple de démarrage | 382 |
| 9.11 | Couple maximal développé | 382 |
| 9.12 | Caractéristiques couple-glissement | 384 |
| 9.13 | Influence de la résistance du circuit du rotor | 385 |
| 9.14 | Essais sur un moteur asynchrone triphasé | 386 |
| | 9.14.1 Mesure de la résistance du stator | 387 |
| | 9.14.2 Essai à vide | 387 |
| | 9.14.3 Essai à rotor calé | 389 |
| | 9.14.4 Essai en charge | 392 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 9.15 | Classification des rotors à cage d'écureuil | 393 |
| 9.15.1 | Moteur à couple et à courant de démarrage normaux | 393 |
| 9.15.2 | Moteur à couple normal et à courant de démarrage faible | 394 |
| 9.15.3 | Moteur à couple élevé et à courant de démarrage faible | 394 |
| 9.15.4 | Moteur à couple et à glissement élevés | 395 |
| 9.15.5 | Moteur à couple de démarrage faible | 396 |
| 9.16 | Plaque signalétique | 397 |
| 9.17 | Problèmes de démarrage | 398 |
| 9.17.1 | Démarrage à tension réduite | 398 |
| 9.17.2 | Démarrage d'un moteur à rotor bobiné à l'aide de résistances externes | 399 |
| 9.18 | Moteurs à haut rendement | 401 |
| 9.19 | Opération à vitesse variable | 402 |
| 9.20 | Moteur en régime déséquilibré | 404 |
| | Exercices | 415 |

Chapitre 10

| | | |
|------------------------------------|---|-----|
| MOTEUR ASYNCHRONE MONOPHASÉ | 423 | |
| 10.1 | Introduction | 423 |
| 10.2 | Principes de fonctionnement | 423 |
| 10.3 | Enroulement de démarrage | 425 |
| 10.4 | Moteurs à phase auxiliaire | 427 |
| 10.4.1 | Moteur à phase auxiliaire résistive | 427 |
| 10.4.2 | Moteur à phase auxiliaire capacitive | 428 |
| 10.4.3 | Moteur à phase auxiliaire avec condensateur permanent | 429 |
| 10.5 | Moteur à bagues de court-circuit | 430 |
| 10.6 | Circuit équivalent en marche normale | 431 |
| | Exercices | 436 |

Chapitre 11**IMPÉDANCES DES MACHINES
AUX COURANTS DE SÉQUENCE**

| | |
|---|-----|
| | 437 |
| 11.1 Introduction | 437 |
| 11.2 Machines tournantes | 439 |
| 11.2.1 Défaut triphasé symétrique | 444 |
| 11.2.2 Défaut entre deux lignes | 445 |
| 11.2.3 Défaut entre une ligne et la terre | 448 |
| 11.2.4 Défaut entre deux lignes et la terre | 451 |
| 11.3 Transformateurs | 457 |
| 11.3.1 Transformateurs monophasés | 457 |
| 11.3.2 Transformateurs triphasés | 458 |
| 11.4 Lignes de transport | 458 |
| Exercice | 460 |

Chapitre 12**BASES DE CALCUL**

| | |
|--------------------------------------|-----|
| | 461 |
| 12.1 Introduction | 461 |
| 12.2 Méthode de la base de tension | 462 |
| 12.3 Méthode de la base de puissance | 466 |
| 12.4 Valeurs en pourcentage | 471 |
| Exercice | 474 |

Chapitre 13**CALCUL DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT**

| | |
|---|-----|
| | 475 |
| 13.1 Introduction | 475 |
| 13.2 Précision dans les calculs des courants de court-circuit | 476 |

Chapitre 14**APPAREILS DE MESURE**

| | | |
|--------|-----------------------------------|-----|
| 14.1 | Introduction | 501 |
| 14.2 | Appareils à aimant permanent | 501 |
| 14.2.1 | Description physique | 501 |
| 14.2.2 | Principe de fonctionnement | 503 |
| 14.2.3 | Utilisation comme ampèremètre | 504 |
| 14.2.4 | Utilisation comme voltmètre | 506 |
| 14.2.5 | Utilisation en courant alternatif | 506 |
| 14.3 | Appareils à fer mobile | 507 |
| 14.3.1 | Description physique | 507 |
| 14.3.2 | Principe de fonctionnement | 509 |
| 14.4 | Appareils électrodynamiques | 511 |
| 14.5 | Capteur à effet Hall | 514 |
| 14.6 | Appareils numériques | 516 |

TEXTES DE TRAVAUX PRATIQUES

| | |
|---------------------------------------|-----|
| Charges passives | 519 |
| Circuit magnétique | 521 |
| Circuit magnétique à noyau saturable | 531 |
| Frein électromagnétique | 537 |
| Contacteurs magnétiques | 541 |
| Transformateur monophasé | 547 |
| Transformateur de courant | 551 |
| Transformateurs en parallèle | 555 |
| Transformateurs en circuits triphasés | 559 |
| Mesure de puissance en triphasé | 565 |
| Moteur asynchrone triphasé | 569 |

RÉPONSES AUX EXERCICES

573

RÉFÉRENCES

619