MARIO MAINARDIS

CENTRALI ELETTRICHE

GENERALITÀ - IMPIANTI IDROELETTRICI - CENTRALI IDROELETTRICHE - CENTRALI TERMOELETTRICHE - MACCHINARIO ELETTRICO DELLE CENTRALI - STABILITÀ DI FUNZIONAMENTO IN PARALLELO E REGOLAZIONE DEI GENERATORI SINCRONI DELLE CENTRALI - APPARECCHIATURA DI MISURA, DI MANOVRA E DI PROTEZIONE DEL MACCHINARIO - CONDUTTORI, ISOLATORI, OLI, IMPIANTI AUSILIARI, TRASPORTI E MONTAGGI - COSTO COSTRUZIONE IMPIANTI IDROELETTRICI E TERMOELETTRICI E COSTO PRODUZIONE ENERGIA ELETTRICA - NORME PER L'ORDINAZIONE, IL COLLAUDO, L'ESERCIZIO E LA MANUTENZIONE DEL MACCHINARIO DELLE CENTRALI ELETTRICHE

214 ILLUSTRAZIONI

Ing. Conte Antonio Sardagna

EDITORE ULRICO HOEPLI MILANO

MARIO MAINARDIS

CENTRALI ELETTRICHE

GENERALITÀ - IMPIANTI IDROELETTRICI - CENTRALI IDROELETTRICHE - CENTRALI TERMOELETTRICHE - MACCHINARIO ELETTRICO DELLE CENTRALI - STABILITÀ DI FUNZIONAMENTO IN PARALLELO E REGOLAZIONE DEI GENERATORI SINCRONI DELLE CENTRALI - APPARECCHIATURA DI MISURA, DI MANOVRA E DI PROTEZIONE DEL MACCHINARIO - CONDUTTORI, ISOLATORI, OLI, IMPIANTI AUSILIARI, TRASPORTI E MONTAGGI - COSTO COSTRUZIONE IMPIANTI IDROELETTRICI E TERMOELETTRICI E COSTO PRODUZIONE ENERGIA ELETTRICA - NORME PER L'ORDINAZIONE, IL COLLAUDO, L'ESERCIZIO E LA MANUTENZIONE DEL MACCHINARIO DELLE CENTRALI ELETTRICHE

214 illustrazioni

EDITORE ULRICO HOEPLI MILANO
1949

INDICE DELLA MATERIA

Pag.

Prefazione V

Indice delle figure del testo XIII

CAPITOLO I

GENERALITÀ 1

§ 1 – Lo sviluppo degli impianti idroelettrici italiani 1

§ 2 – Diagrammi tipici della produzione e della richiesta dell'energia 5

§ 3 – Funzione dei serbatoi stagionali, delle centrali termiche e delle industrie stagionali agli effetti della integrale utilizzazione delle disponibilità idrologiche 10

§ 4 – Grandi sistemi idrolettrici italiani 12

Sistema idroelettrico del Piave 15

Sistema idroelettrico del Vomano 22

Sistema idroelettrico della Sila 24

§ 5 – Statistiche dei consumi dell'energia elettrica 26

§ 6 – Sistemi di produzione, di trasporto e di distribuzione dell'energia elettrica 30

CAPITOLO II

IMPIANTI IDROELETTRICI 35

§ 7 – Terminologia impianti idroelettrici 35

Salto e portata 35

Potenza - Produzione - Produttività 39

§ 8 – Concetti costruttivi degli impianti idroelettrici agli effetti della determinazione del salto e della portata di massima convenienza 42

§ 9 – Elementi costitutivi di un impianto idroelettrico 44

Pag.

§ 10 – Schemi impianti idroelettrici tipici 47

§ 11 – Condotte forzate metalliche 53
Tracciato e piano di posa 54
Numero delle tubazioni 55
Diametri delle tubazioni 57
Tipi di tubazioni forzate in ferro 60
Dispositivi di chiusura e di sicurezza 63
Accessori 69
Qualità dei materiali 73
Norme per il calcolo delle tubazioni forzate 74
Norme costruttive delle tubazioni forzate 76
Prove e collaudi delle tubazioni forzate 77

§ 12 – Dispositivi di manovra e di regolazione degli impianti idroelettrici 79
Apperecchi di chiusura 79
Dispositivi di modulazione della portata e di regolazione del 82
battente 82
Limitatori di pressione 85

CAPITOLO III

CENTRALI IDROELETTRICHE 89

§ 13 – Concetti costruttivi delle centrali idroelettriche 89

§ 14 – Progressi realizzati nella tecnica costruttiva delle turbine idrauliche 105

§ 15 – Scelta del tipo di turbina idraulica 112

§ 16 – Scelta della potenza più conveniente dei gruppi negli impianti idroelettrici 118

§ 17 – Installazione delle turbine idrauliche 123
Diffusori 129
Coefficiente di cavitazione 134

§ 18 – Fenomeni di depressione nei tubi diffusori delle turbine 136

§ 19 – Fondazione dei gruppi generatori sincroni 138

§ 20 – Centrali idroelettriche automatiche 146
Centrali automatiche sincrone 147
Centrali automatiche asincrone 149

§ 21 – Impianti di pompaggio 153

CAPITOLO IV

CENTRALI TERMOELETTRICHE 159

§ 22 – Cicli termici centrali termoelettriche 159

Pag.

§ 23 – Centrali termoelettriche con turbine a vapore 165
Pressione e temperatura del vapore 167
Temperatura dell'aria comburente e dei prodotti della combustione 170
Schemi di installazione 171
Caldaie a vapore 173
Turboalternatori 184
Alimentazione servizi ausiliari 189

§ 24 – Centrali termoelettriche con turbine a gas 194
Turbine a ciclo aperto 197
Turbine a ciclo chiuso 199
Turbine a ciclo misto 200

§ 25 – Centrali termoelettriche con gruppi elettrodiesel 202

§ 26 – Centrali termoelettriche a ricupero 209

CAPITOLO V

MACCHINARIO ELETTRICO DELLE CENTRALI 215

§ 27 – Generatori sincroni per turbine idrauliche 215

§ 28 – Generatori sincroni per turbine a vapore 229

§ 29 – Sistemi di eccitazione dei generatori sincroni 232
Costante di tempo e risposta nominale 240

§ 30 – Ventilazione alternatori 241

§ 31 – Trasformatori 249
Generalità costruttive 251
Scelta tra unità monofasi e trifasi 254
Scelta dello schema di collegamento 255
Scelta della classe di isolamento 256
Scelta del tipo di raffreddamento 257
Funzionamento in parallelo 263
Perdite e rendimenti 264
Installazione dei trasformatori 267
Messa a terra del neutro dei trasformatori 267

CAPITOLO VI

STABILITÀ DI FUNZIONAMENTO IN PARALLELO E REGOLAZIONE DEI GENERATORI SINCRONI DELLE CENTRALI IDROELETTRICHE 271

§ 32 – Generalità 271

§ 33 – Cause di instabilità di origine meccanica 273
Regolatori automatici di velocità 276

Pag.

§ 34 – Cause di instabilità di origine idraulica 282
Caratteristica dell'impianto 283
Vasche di oscillazione 284
Formula di Thoma 286

§ 35 – Cause di instabilità di origine elettrica 293

§ 36 – Autoeccitazione generatori sincroni 298

§ 37 – Regolazione delle potenze attive e reattive agli effetti della stabilità 305

CAPITOLO VII

APPARECCHIATURA DI MISURA, DI MANOVRA E DI PROTEZIONE DEL MACCHINARIO DELLE CENTRALI ELETTRICHE 315

§ 38 – Schemi elettrici 315

§ 39 – Apparecchiature di manovra 327
Sezionatori 327
Interruttori 327
Calcolo della corrente di corto circuito 342

§ 40 – Apparecchiatura di protezione 344

§ 41 – Relè 345

§ 42 – Dispositivi di protezione degli alternatori 349
Protezione contro i sovraccarichi 349
Protezione contro i corti circuiti esterni 350
Protezione contro le sopraelevazioni di tensione 351
Regolatori di tensione 352
Regolatori di tensione B.B. 353
Regolatori di tensione C.G.E. 356
Rototrol Westinghouse 357
Regolatori elettronici 359
Protezione differenziale 360
Protezione contro i contatti a massa statore 363
Protezione contro i contatti spire statore 366
Protezione contro i contatti a massa rotore 367
Protezione contro i ritorni di energia 368
Protezione circolazione olio e acqua raffreddamento 369

§ 43 – Dispositivi di protezione dei trasformatori 370
Protezioni da sovraccarichi e corti circuiti 370
Protezione Buchholz 372
Protezione circolazione olio e acqua 375

§ 44 – Sovratensioni e dispositivi di protezione del macchinario delle centrali 375
Scaricatori 379

Pag.

§ 45 - Quadri di manovra delle centrali elettriche 381
Strumenti indicatori e registratori da quadro 382
Trasformatori di misura 383

§ 46 – Pericoli della corrente elettrica e collegamenti di terra 387
Impianti di terra 389

CAPITOLO VIII

CONDUTTORI - ISOLATORI - OLI - IMPIANTI AUSILIARI - TRASPORTI E MONTAGGI 395

§ 47 – Installazioni tipiche, scelta e dimensioni dei conduttori 395
Tipi di conduttori 399
Dimensioni e resistenza meccanica dei conduttori 401
Resistenza ohmica dei conduttori 405
Reattanza dei conduttori 406

§ 48 – Scelta della tensione - Isolamento coordinato - Isolatori 412
Coordinamento degli isolamenti 413

§ 49 – Oli isolanti per trasformatori e interruttori 416
Regole per la manutenzione dell'olio 419

§ 50 – Oli lubrificanti e impianti di lubrificazione del macchinario delle centrali elettriche 420
Impianti olio lubrificazione 423

§ 51 – Impianti di illuminazione delle centrali 425
Impianti illuminazione di riserva 429

§ 52 – Impianti di telecomunicazione al servizio delle centrali elettriche 432

§ 53 – Impianto acqua raffreddamento macchinario 438

§ 54 – Impianti per la prevenzione, la protezione e lo spegnimento degli incendi nelle centrali elettriche 441

§ 55 – Trasporto e montaggio del macchinario delle centrali elettriche . 444
Trasporto 444
Montaggio 449

CAPITOLO IX

COSTO COSTRUZIONE IMPIANTI IDROELETTRICI E COSTO PRODUZIONE ENERGIA ELETTRICA 457

§ 56 – Generalità 457

§ 57 – Costo di costruzione degli impianti idroelettrici 460

Pag.

Fig. 24 – Paratoie con diaframma circolare 64
» 25 – Valvole a saracinesca 64
» 26 – Valvole a farfalla 65
» 27 – Valvole tipo sferico ad otturatore rotante 65
» 28 – Valvole a fuso interno (tipo Jonson) 66
» 29 – Apparecchio automatico di chiusura per eccesso di velocità . 67
» 30 – Dispositivo automatico di uscita e di rientrata d'aria 68
» 31 – Selle di appoggio a lamiera curvata 69
» 32 – Selle di appoggio a pieducci e rotaie 70
» 33 – Passo d'uomo 71
» 34 – Giunti di dilatazione 71
» 35 – Ancoraggi 72
» 36 – Giunti di smontaggio 73
» 37 – Paratoie 80
» 38 – Dispositivi automatici di regolazione della portata e del battente 83
» 39 – Pozzi piezometrici 85
» 40 – Valvole sincrone 86
» 41 – Deviatori sincroni 87

Cap. III – **Centrali idroelettriche.**

Fig. 42 – Centrale 4° salto Pescara 92
» 43 – Centrale Cotilia (Vomano) 93
» 44 – Centrale di Cimena 95
» 45 – Centrale del Ledra 96
» 46 – Centrale di Chancy-Pougny 97
» 47 – Centrale di Mockfjiards 98
» 48 – Schema idraulico della centrale di Soverzene 99
» 49 – Centrale di Ampezzo (Lumiei) 100
» 50 – Centrali in caverna della Società Adriatica di Elettricità . . 101
» 51 – Centrale di Innertkirchen 102
» 52 – Centrale di Soverzene (220.000 kW) 103
» 54 – Centrale di Bressanone 104
» 55 – Ruota Kaplan impianto Tornavento (Tosi) 106
» 56 – Ruota Pelton impianto Vomano (Tosi) 107
» 57 – Ruota Francis impianto Piave (Riva) 108
» 58 – Ruote Escher-Wyss 109
» 59 – Diagramma numero giri specifici 115
» 60 – Diagramma a conchiglia o collinare 117
» 61 – Normogramma per la scelta del tipo di turbina 119
» 62 – Installazione tipica turbina Kaplan (Escher-Wyss) 124
» 63 – Installazione tipica turbina Francis (Tosi) 124
» 64 – Installazione tipica turbina Pelton ad asse orizzontale . . . 125
» 65 – Installazione tipica turbina Pelton ad asse verticale 126
» 66 – Triangolo delle velocità all'uscita della ruota 127

Pag.

Fig. 67 – Diffusore verticale 127
» 68 – Diagramma altezza percentuale perduta per effetto della velocità all'inizio del tubo aspirante 128
» 69 – Tubo aspirante turbina Francis ad asse orizzontale 129
» 70 – Diffusore Riva 129
» 71 – Diffusori White-Moody-Kaplan 130
» 72 – Curva di Rogers e Moody e curva coefficiente di cavitazione 131
» 73 – Fondazioni gruppi ad asse orizzontale 139
» 74 – Sollecitazioni per eccentricità masse rotanti 140
» 75 – Sollecitazioni per reazione ruota 141
» 76 – Fondazioni gruppi ad asse verticale 143
» 77 – Moto oscillatorio verticale 144
» 78 – Moto oscillatorio orizzontale 145
» 79 – Fraccia albero gruppo 146
» 80 – Schema avviamento lato turbina gruppi centrali sincrone . . 148
» 81 – Schema avviamento lato turbina gruppi centrali asincrone . . 150
» 82 – Schema avviamento lato alternatore gruppi centrali asincrone 151
» 83 – Bilancio energia impianto di pompaggio 155
» 84 – Pompa impianto Ponale 156

Cap. IV – **Centrali termoelettriche.**

Fig. 85 – Ciclo Carnot 160
» 86 – Ciclo Ericson 160
» 87 – Diagramma di Rankine 161
» 88 – Ciclo a rigenerazione termica del vapore 161
» 89 – Ciclo teorico a gas 163
» 90 – Ciclo teorico Diesel 164
» 91 – Impianti termici « da monte » 170
» 92 – Schemi disposizione caldaie e turboalternatori 172
» 93 – Schemi tubazioni vapore e acqua 173
» 94 – Evoluzione caldaie multitubolari 174
» 95 – Caldaia a due camere di combustione 178
» 96 – Centrale con caldaie Sulzer 179
» 97 – Caldaie con focolare a ciclone 180
» 98 – Schema impianto preparazione dell'acqua di alimento . . . 182
» 99 – Turbina a vapore Escher Wyss 184
» 100 – Turbina Tosi da 50.000 kW 185
» 101 – Turbina Westinghouse da 50.000 kW 186
» 102 – Turboalternatore Brown Boveri da 50.000 kW a due cilindri 187
» 103 – Turbina Ljunström-Ansaldo 188
» 104 – Schemi alimentazione elettrica servizi ausiliari 191
» 105 – Sala caldaie centrale termica di Marghera 193
» 106 – Ciclo turbine a gas con riscaldatore d'aria a ricupero 195
» 107 – Diagramma rendimento termico in funzione del rapporto di compressione e della superficie del riscaldatore d'acqua . 196

Pag.

Fig. 108 – Ciclo turbina a gas con ricupero calore gas espansi 197
» 109 – Ciclo turbina a gas con più stadi di compressione 197
» 110 – Ciclo turbina a gas con surriscaldamenti interni 197
» 111 – Ciclo turbina a gas con più stadi di compressione e con surriscaldamenti intermedi 197
» 112 – Schema turbina a gas Brown Boveri a un gruppo 198
» 113 – Schema turbina a gas Brown Boveri a due gruppi 198
» 114 – Schema turbina a gas Escher Wyss 200
» 115 – Schema turbina a gas Sulzer 201
» 116 – Centrale elettrodiesel da 20.000 kW (Fiat) 205
» 117 – Schema impianto con turbina a contropressione 209
» 118 – Schema impianto con turbine a contropressione e accumulatore di vapore 210
» 119 – Diagramma stereometrico turbine a contropressione 211
» 120 – Diagramma potenza in funzione pressione e quantità vapore per turbine a contropressione 212
» 121 – Bilancio termico impianto con turbina a contropressione e pompa di calore 213

Cap. V – **Macchinario elettrico delle centrali.**

Fig. 122 – Alternatore Ansaldo da 17.500 kVA-750 giri 217
» 123 – Alternatore Brown Boveri da 19.500 kVA - 75 giri 218
» 124 – Aumento percentuale peso alternatore in funzione del momento di inerzia 219
» 125 – Aumento percentuale peso alternatore in funzione della velocità di fuga 220
» 126 – Alternatore orizzontale accoppiato a due turbine Pelton . . 221
» 127 – Aumento percentuale peso alternatore in funzione del rapporto di corto circuito e della reattanza di dispersione 223
» 128 – Generatore da 26.000 kVA 10.000 V, 42/50 p/s, 504/600 giri/min. Mezze carcasse in lavorazione 227
» 129 – Rotore alternatore Brown Boveri da 25.000 kVA 228
» 130 – Schemi eccitazione generatori sincroni 233
» 131 – Interno centrale in caverna di Doblari (1° salto Isonzo) . . 238
» 132 – Interno centrale in caverna di Ponte Gardena (3° salto Isarco) 239
» 133 – Ventilazione semplice in circuito aperto per alternatori di piccola potenza 241
» 134 – Ventilazione in circuito aperto con canalizzazione separata per l'introduzione dell'aria fredda e per lo scarico dell'aria calda 242
» 135 – Sistema ventilazione in circuito aperto con canalizzazioni separate 243
» 136 – Sistema di raffreddamento con due ventilatori separati . . . 244
» 137 – Installazione periferica refrigeranti alternatore ad asse orizzontale 245

Pag.
Fig. 138 – Installazione periferica refrigeranti alternatore ad asse verticale 246
» 139 – Installazione refrigeranti per turboalternatori 247
» 140 – Installazione tipica refrigeranti per turboalternatori 248
» 141 – Installazione tipica refrigeranti per turboalternatori 248
» 142 – Sbarre di smistamento generatori sincroni e trasformatori . . 250
» 143 – Trasformatore corazzato con nucleo centrale sistema Brown Boveri 252
» 144 – Nucleo magnetico trasformatore a cinque colonne (C.G.E.) . 253
» 145 – Speciali sagomature cassoni trasformatori di elevata potenza per trasporti ferroviari 254
» 146 – Confronto dimensioni nuovi e vecchi tipi trasformatori . . . 255
» 147 – Trasformatore con refrigeranti ad aria soffiata addossati al cassone 259
» 148 – Trasformatore con batteria refrigeranti ad aria soffiata installata a parte 261
» 149 – Trasformatore con refrigeranti ad acqua addossati al cassone 262
» 150 – Connessioni riduttori e relè differenziali per trasformatori trifasi 266

Cap. VI – **Stabilità di funzionamento in parallelo e regolazione dei generatori sincroni delle centrali idroelettriche.**

Fig. 151 – Schema funzionale regolatore di velocità 277
» 152 e 153 – Schema regolatore ad asservimento esterno e schema regolatore ad asservimento interno. 279
» 154 e 155 – Schema a stabilizzazione accelerometrica e schema regolatore a stabilizzazione per intervento cedevole 280
» 156 – Schema regolatore elettrico tipo Brown Boveri 281
» 157 – Rappresentazione funzionamento distributore regolatore alle variazioni di livello delle vasche di oscillazione 288
» 158 – Rappresentazione fenomeno surregolazione per insufficiente dimensionamento delle vasche di oscillazione 289
» 159 – Schema idraulico Centrale Doblari 290
» 160 – Schema vasche a smorzamento e a canna interna tracimante 292
» 161 – Schema vettoriale angolo polare 293
» 162 – Curva di stabilità 294
» 163 – Determinazione grafica del limite di stabilità con il metodo della uguaglianza delle aree 296
» 164 – Procedimento per la determinazione della caratteristica di autoeccitazione 300
» 165 – Rapporto di corto circuito in funzione lunghezza linea 305
» 166 – Schema regolatore di tensione B. B. a regolazione statica compensata 311
» 167 – Schema regolatore di tensione B. B. a regolazione ipercompoundata 311
» 168 – Schema regolatore di tensione C.G.E. ad azione ultrarapida 312

Cap. VII – Apparecchiatura di misura di manovra e di protezione del macchinario delle centrali elettriche.

Pag.

Fig. 169 – Simboli convenzionali schemi centrali elettriche 316
» 170 – Schemi elettrici tipici di centrali elettriche 318
» 171 – Installazioni tipiche per 10÷15 kV 319
» 172 – Installazioni tipiche per 10÷15 kV 320
» 173 *a* – Installazione tipica per 50 kV all'interno 321
» 173 *b* – Installazioni tipiche per 50 kV all'interno 322
» 174 – Installazioni tipiche per alte tensioni all'interno 323
» 175 *a* – Installazione tipica per 130 kV (Centrale Ampezzo) 324
» 175 *b* – Installazione tipica per 130 kV (Centrale Ampezzo) 325
» 176 – Installazione tipica per 220 kV (Centrale Soverzene) 326
» 177 – Sezionatori (dimensioni in mm) 329
» 178 – Processo interruzione di un circuito elettrico 331
» 179 – Schemi dei principali tipi di interruttori 334
» 180 – Confronto dimensioni interruttori a grande e a piccolo volume olio 335
» 181 – Interruttore a piccolo volume d'olio Galileo 336
» 182 – Interruttore ad aria compressa C.G.E. a 220 kV 338
» 183 – Interruttore pneumatico ultrarapido B. B. 150 kV 339
» 184 – Diagrammi tempo funzionamento relè 346
» 185 *a* – Schemi inserzione regolatore di tensione B. B. 354
» 185 *b* – Schemi inserzione regolatore di tensione B. B. 355
» 186 – Schema inserzione regolatore di tensione C.G.E. 357
» 187 – Schema protezione differenziale semplice B. B. 360
» 188 – Schema protezione differenziale compensata B. B. 361
» 189 – Schema protezione contro i contatti a massa dello statore B. B. 364
» 190 – Schema protezione contro i contatti tra spire di una stessa fase B. B. 366
» 191 – Schema protezione contro contatti a massa del rotore . . . 367
» 192 – Schema di protezione differenziale di un trasformatore a 3 avvolgimenti col collegamento stella-stella-triangolo (C.G.E.) 371
» 193 – Schema protezione Buchholz 373
» 194 – Schema generale relè di protezione gruppo alternatore-trasformatore 374
» 195 – Schema generale degli apparecchi di sicurezza di un alternatore trifase ad asse verticale 376
» 196 – Scaricatore Brown Boveri 379
» 197 – Sala quadri centrale in caverna di Bressanone 385
» 198 – Sala quadri centrale in caverna della Stanga 386

Cap. VIII – Conduttori - Isolatori - Oli - Impianti ausiliari - Trasporti e montaggi.

Fig. 199 – Disposizione sbarre a 10 kV per due gruppi 396
» 200 – Disposizione sbarre a 10 kV per tre gruppi 397

Pag.

Fig. 201 – Disposizione sbarre a 10 kV per quattro gruppi 398
» 202 – Sbarre in alluminio (tipo applicato nella centrale di Soverzene) 408
» 203 – Tipi di isolatori impiegati nelle centrali 415
» 204 – Schema circuiti ausiliari a c. a. e a c. c. 431
» 205 – Schemi impianti dell'acqua di raffreddamento 440
» 206 – Dispositivo di protezione contro gli incendi di un alternatore con raffreddamento a circuito aperto (B. B.) 442
» 207 – Rimorchio per trasporto stradale del macchinario (Maniero-Conselve) 446
» 208 – Capra a 4 paranchi con martinetti equilibratori per sollevamento macchinario 448
» 209 – Dimensioni fondamentali della gru a ponte 451
» 210 – Fasi montaggio rotore 454

Cap. IX – **Costo costruzione impianti idroelettrici e termoelettrici e costo produzione energia elettrica.**

Fig. 211 – Installazione ad asse verticale 468
» 212 – Installazione ad asse orizzontale 468
» 213 – Installazione ad asse orizzontale 468
» 214 – Installazione ad asse orizzontale 468