

SUBESTACIONES Y TÉCNICAS DE ALTA TENSIÓN

27 de enero de 2011

Índice general

1. Definiciones. Terminología.	16
1.1. Generales.	16
1.2. Subestaciones.	17
1.2.1. Clases de subestaciones. Configuraciones.	17
1.2.2. Subestaciones. Material.	18
1.3. Aisladores.	19
1.3.1. Términos generales.	19
1.4. Aparamenta.	20
2. Subestaciones eléctricas. Introducción.	21
2.1. Clasificación de tensiones y categorías de las redes.	22
2.2. Función de las subestaciones.	22
3. Subestaciones eléctricas. Esquemas unifilares.	26
3.1. Características	26
3.2. Tipos de esquemas y secuencia de operación.	26
3.3. Acople por barras.	28
3.3.1. Único juego de barras o barra simple.	28
3.3.2. Simple juego de barras con by-pass.	28
3.3.3. Único juego de barras partidas.	29
3.3.4. Doble juego de barras.	29
3.3.5. Doble juego de barras con by-pass.	30
3.3.6. Triple juego de barras.	30
3.3.7. Juego de barras con un juego de barras de transferencia.	30
3.3.8. Doble juego de barras más juego de barras de transferencia.	31
3.3.9. Esquemas en H.	31
3.4. Acople por interruptores.	32
3.4.1. Embarrado en anillo	32
3.4.2. Esquemas en anillo doble, anillos múltiples.	32
3.4.3. Esquema de interruptor y medio	33
3.4.4. Esquema de doble interruptor.	33
3.5. Comparación de configuraciones.	34

4. Componentes de las Subestaciones eléctricas.	35
4.1. Sistemas relacionados con el sitio.	36
4.2. Elementos de una subestación.	37
4.3. Características principales de los equipos principales.	38
4.3.1. Embarrado	38
4.3.2. Transformador de potencia.	38
4.3.3. Interruptor.	38
4.3.4. Seccionador.	39
4.3.5. Seccionador de puesta a tierra.	41
4.3.6. Transformadores de medida.	41
4.3.7. Pararrayos, descargadores o autoválvulas.	41
4.3.8. Condensador de acoplamiento.	41
4.3.9. Bobina de bloqueo.	42
4.3.10. Aisladores.	42
4.3.11. Obra civil	42
4.4. Características generales de los equipos.	43
4.4.1. Las especificaciones de los equipos.	43
4.5. Edificios. Función.	44
4.5.1. Construcciones. Clasificación.	44
4.6. Sistemas de control y protección.	45
5. Niveles de aislamiento.	46
5.1. Definiciones de tensiones.	47
5.2. Clasificación de tensiones y sobretensiones.	48
5.3. Formas de tensión normalizadas.	49
5.4. Clasificación de las sobretensiones por su origen.	50
5.5. Otras definiciones.	50
5.6. Tensiones y sobretensiones representativas.	51
5.7. Elección de los niveles de aislamiento normalizado.	51
5.7.1. Niveles de aislamiento asignado.	52
5.7.2. Gamas de la tensión más elevada para el material.	52
5.7.3. Elección de los niveles de aislamiento normalizados	52
5.8. Ensayos normalizados.	54
5.9. Progación de las ondas de sobretensión. Ondas errantes.	54
5.9.1. Propagación.	57
5.9.2. Reflexión y refracción de las ondas viajeras.	58
5.9.2.1. Reflexión y refracción en una terminación de línea.	59
5.9.2.2. Punto de transición.	60
5.9.2.3. Punto de bifurcación.	61
5.9.3. El diagrama reticular.	61

6. Disposición física de las subestaciones.	63
6.1. Consideraciones generales.	63
6.2. El dimensionamiento en las subestaciones.	64
6.3. Cálculo de las distancias eléctricas de cebado en aire.	66
6.3.1. Ejemplos cálculo probabilidad descarga aisladores en paralelo.	67
6.3.2. Comportamiento del aislamiento en el aire ante las sobretensiones a frecuencia industrial.	68
6.3.3. Comportamiento del aislamiento en el aire ante las sobretensiones de frente lento.	69
6.3.4. Comportamiento del aislamiento en el aire ante las sobretensiones de frente rápido.	70
6.3.5. Influencia de la altitud.	70
6.4. Distancias eléctricas de diseño.	71
6.4.1. Distancias en el aire para asegurar una tensión soportada a impulsos especificada en una instalación.	71
6.4.1.1. Gama I.	72
6.4.1.2. Gama II.	72
6.4.2. Distancias mínimas bajo condiciones especiales.	73
6.4.3. Elección de las distancias de diseño.	73
6.4.3.1. Distancias entre barras.	73
6.4.3.2. Distancias de seguridad en el aire por barreras u obstáculos.	74
6.4.3.3. Distancias de seguridad en el aire por cercados.	75
6.4.3.4. Altura mínima de las barras sobre el nivel del suelo.	75
6.4.3.5. Altura mínima de la llegada de líneas a subestaciones.	76
6.4.3.6. Pasillos.	76
6.4.3.7. <u>Distancias de seguridad en el aire respecto a los edificios.</u>	76
6.4.3.8. Distancias de seguridad de cara al mantenimiento de la instalación.	78
6.5. Esquema físico y disposición del equipo.	80
6.5.1. Selección del esquema de barras.	81
6.5.2. El perfil de la subestación.	81
6.5.2.1. Separación entre equipos	83
6.5.3. Ejemplo perfil subestación simple barra	88
6.5.4. Ejemplo perfil subestación doble barra	89
6.5.5. Ejemplo perfil subestación interruptor y medio	91
6.5.6. Ejemplo perfil subestación media tensión	91
6.5.7. Disposición física de subestaciones de media tensión de interior.	94
7. Coordinación de aislamiento. Definiciones, principios y reglas.	99
7.1. Definiciones para la coordinación de aislamiento	99
7.2. Procedimiento para la coordinación de aislamiento	101
7.3. Determinación de las tensiones representativas (U_{rp}).	103
7.4. Determinación de las tensiones soportadas de coordinación (U_{cw}).	103
7.5. Determinación de las tensiones soportadas especificadas (U_{rw}).	104
7.6. Elección del nivel de aislamiento asignado.	105
7.7. Requisitos para los ensayos de tensión soportada normalizada.	106
7.7.1. Ensayos normalizados de tensión soportada de corta duración a frecuencia industrial.	106
7.7.2. Ensayos normalizados de tensión soportada a los impulsos.	106
7.7.3. Ensayos normalizados de tensión soportada de aislamiento entre fases y de aislamiento longitudinal para el material de la gama I.	106
7.7.4. Ensayos normalizados de tensión soportada de aislamiento entre fases y de aislamiento longitudinal para el material de la gama II.	107

8. Sobretensiones representativas en coordinación de aislamiento.	108
8.1. Tensiones permanentes.	108
8.2. Sobretensiones temporales.	108
8.2.1. Sobretensiones temporales debidas a fallos fase-tierra (faltas a tierra).	108
8.2.2. Sobretensiones temporales debidas a pérdidas de carga.	110
8.2.3. Sobretensiones temporales por resonancia y ferresonancia.	110
8.2.4. Sobretensiones longitudinales durante la sincronización.	110
8.2.5. Sobretensiones temporales debidas a la conexión de líneas en vacío.	111
8.2.6. Sobretensiones temporales y pararrayos.	111
8.3. Sobretensiones de frente lento.	112
8.3.1. Sobretensiones debidas a la conexión y reenganche de la línea.	113
8.3.1.1. Sobretensiones fase-tierra.	115
8.3.1.2. Sobretensiones fase-fase.	116
8.3.1.3. Sobretensiones longitudinales.	116
8.3.1.4. Causas que provocan la aparición de sobretensiones de frente lento.	116
8.3.1.5. Sobretensiones máximas previstas.	117
8.3.1.6. Anexo D (norma coordinación de aislamiento). CARACTERÍSTICA DEL AISLAMIENTO.	117
8.3.2. Sobretensiones debida a causa de faltas y su eliminación.	119
8.3.3. Sobretensiones debidas a la pérdida de carga.	119
8.3.4. Sobretensiones debidas a la maniobra de corrientes inductivas y capacitivas.	120
8.3.5. Sobretensiones tipo rayo de frente lento.	120
8.3.6. Limitación de las sobretensiones de frente lento.	121
8.3.6.1. Funcionamiento de una pararrayos limitador de sobretensiones.	122
8.4. Sobretensiones de frente rápido.	123
8.4.1. Sobretensiones debidas a maniobras y defectos.	123
8.4.2. Sobretensiones tipo rayo que afectan a líneas aéreas.	123
8.4.3. Sobretensiones debidas al rayo en subestaciones.	123
8.5. Sobretensiones de frente muy rápido.	124
9. Sobretensiones debidas al rayo.	125
9.1. Descripción física del rayo. Parámetros.	125
9.1.1. Mecanismo de formación del rayo.	125
9.1.1.1. Trueno	127
9.1.2. Forma de onda de la corriente de un rayo.	127
9.2. Función de probabilidad de una descarga.	128
9.2.1. Funciones de probabilidad para la corriente máxima de un rayo.	128
9.2.1.1. Función densidad de probabilidad.	128
9.2.1.2. Función de distribución acumulada	128
9.2.2. Función de probabilidad para el tiempo de frente de la onda de corriente de un rayo.	129
9.2.2.1. Función densidad de probabilidad	129
9.2.2.2. Datos de las amplitudes de las descargas y la pendiente del frente según IEEE.	129
9.2.3. Datos representativos de un rayo.	130
9.2.4. Densidad de descargas a tierra.	131

9.2.5. Velocidad de retorno del rayo.	131
9.3. Efectos provocados por el rayo	132
9.4. Sobretensiones producidas por el rayo en líneas aéreas.	133
9.4.1. Sobretensiones originadas por rayos directos.	134
9.4.1.1. Impacto en un cable de tierra.	134
9.4.1.2. Impacto en un conductor de fase.	137
9.4.1.3. Limitación sobretensiones causadas por caídas de rayo directos en conductores de líneas aéreas.	137
9.4.2. Sobretensiones atmosféricas en subestaciones.	138
9.5. Modelo electromagnético.	138
9.5.1. Tasa de fallos de apantallamiento y distancias de exposición de los conductores de fase y de los cables de tierra.	140
10. Dispositivos de protección contra las sobretensiones.	145
10.1. Las protecciones primarias externas.	145
10.1.1. Protección de subestaciones.	146
10.1.1.1. Apantallamiento de subestaciones mediante cables de tierra o guarda.	147
10.1.1.2. Apantallamiento de subestaciones mediante puntas Franklin.	148
10.1.1.3. Apantallamiento de subestaciones especiales.	152
10.1.1.4. Ejemplos.	153
10.2. Protecciones secundarias.	160
10.2.1. Explosores	161
10.2.2. Autoválvulas o pararrayos.	161
10.2.2.1. Pararrayos a resistencia variable y explosores.	162
10.2.2.2. Pararrayos de óxido de zinc (Z_nO).	163
10.2.2.3. Funcionamiento de un pararrayos.	169
10.2.2.4. Criterios de selección.	172
10.2.3. Utilización de los pararrayos.	176
10.2.3.1. Protección contra las sobretensiones de frente lento.	176
10.2.3.2. Protección contra las sobretensiones de tipo rayo.	177
10.3. Protecciones de tercer nivel.	180
11. Guía de aplicación coordinación de aislamiento.	182
11.1. Tensión soportada de coordinación.	182
11.1.1. Criterio de comportamiento.	182
11.1.2. Procedimientos de coordinación de aislamiento para tensión permanente.	183
11.1.3. Procedimientos de coordinación de aislamiento para la sobretensión temporal.	184
11.1.3.1. Método determinista.	184
11.1.3.2. Método estadístico.	184
11.1.4. Procedimientos de coordinación de aislamiento para sobretensiones de frente lento.	184
11.1.4.1. Método determinista	184
11.1.5. Procedimiento de coordinación de aislamiento para sobretensiones de frente rápido.	185
11.1.5.1. Método determinista	185
11.1.5.2. Método estadístico.	186

11.2. Tensión soportada especificada	186
11.2.1. Corrección atmosférica.	186
11.2.2. Factores de seguridad.	187
11.3. Tensión soportada normalizada y procedimientos de ensayo.	187
11.3.1. Factores de conversión de ensayos.	187
11.3.1.1. Gama I.	187
11.3.1.2. Gama II	187
11.3.2. Elección del nivel de aislamiento normalizado.	187
11.3.3. Distancias en el aire.	188
11.4. Consideraciones generales para las líneas aéreas.	188
11.5. Consideraciones especiales para las subestaciones.	189
12. Ejemplos guía de coordinación de aislamiento.	190
12.1. Guía para la coordinación de aislamiento en líneas.	190
12.1.1. Datos de partida.	190
12.1.2. Tensiones representativas (U_{rp}).	190
12.1.3. Tensiones soportadas de coordinación (U_{cw}).	191
12.1.4. Tensión soportada requerida (U_{rw}).	193
12.1.5. Elección de la cadena de aisladores.	193
12.1.6. Cálculo de las distancias de aislamiento.	194
12.1.6.1. Distancias conductor-apoyo.	195
12.1.6.2. Distancia conductor-conductor.	195
12.1.6.3. Distancia conductor-terreno.	196
12.1.7. Elección del número y posición de los hilos de tierra.	196
12.2. Guía para la coordinación de aislamiento en subestaciones de distribución (hasta 36 kV).	196
12.2.1. Datos de partida.	196
12.2.2. Etapa 1. Tensiones representativas (U_{rp}).	197
12.2.3. Etapa 2. Tensiones soportadas de coordinación (U_{cw}).	197
12.3. Guía para la coordinación de aislamiento en subestaciones gama I.	199
12.3.1. Determinación de las sobretensiones representativas (U_{rp}).	199
12.3.1.1. Tensión a frecuencia industrial.	199
12.3.1.2. Sobretensiones temporales.	200
12.3.1.3. Sobretensiones de frente lento.	200
12.3.1.4. Sobretensión de frente rápido.	201
12.3.2. Determinación de las tensiones soportadas de coordinación (U_{cw}).	201
12.3.2.1. Sobretensiones temporales.	201
12.3.2.2. Sobretensiones de frente lento.	201
12.3.2.3. Sobretensiones de frente rápido.	202
12.3.3. Determinación de las tensiones soportadas especificadas (U_{rw}).	202
12.3.4. Conversión hacia las tensiones soportadas normalizadas para la gama I.	203
12.3.5. Selección de valores tensiones soportadas normalizadas.	204
12.3.6. Organigrama.	205
12.4. Guía para la coordinación de aislamiento en subestaciones gama II.	209

12.4.1. Etapa 1. Determinación de las sobretensiones representativas-valores de U_{rp} .	209
12.4.1.1. Tensión de servicio continuo:	209
12.4.1.2. Sobretensiones temporales.	209
12.4.1.3. Sobretensiones de frente lento.	210
12.4.1.4. Sobretensiones de frente rápido.	212
12.4.2. Etapa 2. Determinación de la tensión soportada de coordinación-valores de U_{cw} .	213
12.4.2.1. U_{cw} para un aislamiento interno.	213
12.4.2.2. U_{cw} para un aislamiento externo.	214
12.4.3. Etapa 3: determinación de las tensiones soportadas especificadas-valores de U_{rw} .	214
12.4.3.1. Sobretensiones temporales.	214
12.4.3.2. Sobretensiones de frente lento en los equipos al lado de línea.	215
12.4.3.3. Sobretensiones de frente lento en los equipos de la subestación.	215
12.4.3.4. Sobretensiones de frente rápido	215
12.4.4. Etapa 4: conversión en tensión soportada a impulso tipo maniobra (SIW).	215
12.4.5. Etapa 5: elección de niveles de aislamiento normalizados.	215
12.4.5.1. Aislamiento interno.	216
12.4.5.2. Aislamiento externo.	216
12.4.6. Etapa 6: niveles de aislamiento.	216
12.4.6.1. Equipos del lado de línea.	216
12.4.6.2. Equipos de la subestación.	216
12.4.6.3. Intervalo de aire.	217

13. Conductores. Tipos y selección. 218

13.1. Tipos de conductores.	218
13.2. Conductores rígidos.	218
13.3. Conductores flexibles.	218
13.3.1. Conductores de cobre.	219
13.3.2. Conductores de aluminio y acero.	220
13.3.2.1. Temperaturas de servicio del conductor	224
13.3.3. Conductores de tierra con fibra óptica.	225
13.3.4. Conductores en forma de haz.	225
13.3.5. Cables.	225
13.3.5.1. Cable aislado unipolar y multipolar.	225
13.3.5.2. Cable aislado multipolar trenzado.	226
13.3.5.3. Cables para líneas subterráneas.	226
13.4. Líneas de transmisión aisladas en gas SF_6 .	232
13.5. Empalmes, conexiones, terminaciones.	233
13.5.1. Líneas aéreas	233
13.5.2. Líneas subterráneas.	234
13.6. Selección conductores en las subestaciones.	235
13.6.1. Selección conductores rígidos.	235
13.6.1.1. Seleccionar el material y el tamaño de los conductores.	235
13.6.1.2. Verificación del diámetro. Campo eléctrico. Efecto corona.	245

13.6.1.3. Determinar la carga total sobre los conductores de la barra, debidas al peso, viento, hielo.	245
13.6.1.4. Calcular el máximo vano de la barra o separación de los apoyos.	246
13.6.1.5. Elongación del embarrado.	247
13.6.2. Diseño de las barras flexibles en las subestaciones.	247
13.6.2.1. Seleccionar el material y el tamaño de los conductores.	247
13.6.2.2. Calcular la flecha máxima del conductor.	248
13.6.2.3. Acciones sobre los conductores.	249
13.6.2.4. Compensadores para conductores flexibles.	252
13.6.3. Conductores flexibles cortos.	252
13.7. Cables de control.	252
14. Estudios en los sistemas eléctricos.	253
14.1. Cálculo de corrientes de cortocircuito (norma UNE-EN-60909).	254
14.1.1. Características de las corrientes de cortocircuito.	254
14.1.2. Método de cálculo.	255
14.2. Impedancias de cortocircuito de los equipos eléctricos.	257
14.2.1. Redes de alimentación.	257
14.2.2. Transformadores.	258
14.2.2.1. Transformadores de dos devanados.	258
14.2.2.2. Transformadores de tres devanados.	259
14.2.2.3. Factores de corrección impedancia transformadores (válido para las impedancias de secuencia directa, inversa y homopolar).	259
14.2.3. Esquemas de circuitos equivalentes de transformadores de secuencia directa (inversa) y homopolar.	260
14.2.4. Líneas aéreas.	261
14.2.4.1. Impedancia de secuencia cero.	262
14.2.5. Cables trifásicos.	263
14.2.6. Embarrados en instalaciones de distribución.	264
14.2.7. Reactancias limitadoras de cortocircuito.	264
14.2.8. Máquinas síncronas.	264
14.2.8.1. Alternadores síncronos.	264
14.2.8.2. Compensadores síncronos y motores.	264
14.2.9. Grupos de generación.	265
14.2.9.1. Grupos de generación con cambiador de tomas en carga.	265
14.2.9.2. Grupos de generación sin cambiador de tomas en carga.	265
14.2.10. Motores asíncronos.	265
14.2.11. Convertidores estáticos.	266
14.3. Cálculo de la corriente de cortocircuito.	266
14.4. Cálculo corriente cortocircuito simétrica inicial, I_k''	266
14.4.1. Cortocircuito trifásico.	266
14.4.1.1. Cortocircuitos con alimentación única.	267
14.4.1.2. Cortocircuito alimentados por redes no malladas.	268
14.4.1.3. Corrientes de cortocircuito en un grupo de generación con cambiador de tomas en carga.	268

14.4.1.4. Corrientes de cortocircuito en un grupo de generación sin cambiador de tomas en carga.	269
14.4.1.5. Cortocircuitos en redes malladas.	269
14.4.1.6. Ejemplo cálculo de un cortocircuito trifásico en un grupo de generación conectado a la red.	269
14.4.2. Cortocircuito bifásico.	270
14.4.3. Cortocircuito bifásico a tierra.	270
14.4.4. Cortocircuito monofásico a tierra.	271
14.4.4.1. Ejemplo cálculo de un cortocircuito monofásico en un grupo de generación conectado a la red.	272
14.5. Cálculo valor de cresta de la corriente cortocircuito i_p	273
14.5.1. Cortocircuito trifásico en redes no malladas.	273
14.5.2. Cortocircuito trifásico en redes malladas.	273
14.5.3. Cortocircuito bifásico.	274
14.5.4. Cortocircuito bifásico a tierra.	274
14.5.5. Cortocircuito monofásico a tierra.	274
14.6. Corriente de cortocircuito simétrica de corte i_b	274
14.6.1. Cortocircuito alejado de un alternador.	274
14.6.2. Cortocircuito próximo a un alternador con alimentación única.	274
14.6.3. Cortocircuito próximo a un alternador en redes no malladas.	275
14.6.4. Cortocircuito trifásico próximo a un alternador en redes malladas.	275
14.7. Corriente de cortocircuito permanente I_k	275
14.7.1. Corriente permanente máxima y mínima de un cortocircuito trifásico de un grupo de generación.	275
14.7.2. Corriente permanente en redes no malladas.	276
14.7.3. Corriente permanente en redes malladas.	276
14.7.4. Corriente permanente en cortocircuitos desequilibrados.	276
14.8. Ejemplos.	276
14.8.1. Ejemplo en B.T.	276
14.8.2. Ejemplo red mallada.	277
14.9. Datos de los equipos eléctricos para el cálculo de las corrientes de cortocircuito de acuerdo con la norma UNE-60909.	277
14.10. Corrientes de cortocircuito durante dos cortocircuitos monofásicos a tierra simultáneamente y separados y corrientes parciales de cortocircuito circulando a través de tierra.	278
14.10.1. Corrientes durante dos cortocircuitos monofásicos a tierra y separados.	278
14.10.1.1. Valor de cresta de la corriente de cortocircuito, corriente de cortocircuito simétrica de corte y corriente de cortocircuito permanente.	279
14.11. Corrientes parciales de cortocircuito circulando a través de tierra en el caso de un cortocircuito desequilibrado.	279
14.11.1. Cortocircuito monofásico a tierra en el exterior de una instalación.	281
14.11.2. Cortocircuito monofásico a tierra en las inmediaciones de una instalación.	282

15.Esfuerzos dinámicos y térmicos.	284
15.1. Esfuerzos dinámicos en los embarrados rígidos.	284
15.1.1. Calcular las fuerzas máximas debidas a la corriente de cortocircuito.	284
15.1.1.1. Valor de cresta de la fuerza entre conductores principales durante un cortocircuito trifásico.	285
15.1.1.2. Valor de cresta de la fuerza entre conductores principales durante un cortocircuito bifásico.	285
15.1.1.3. Valor de cresta de la fuerza entre subconductores coplanarios durante un cortocircuito trifásico.	285
15.1.2. Cálculo de las tensiones mecánicas en conductores rígidos y fuerzas en soportes.	286
15.1.3. Tensión mecánica admisible en un conductor.	287
15.1.3.1. Conductor único.	288
15.1.3.2. Varios conductores.	288
15.1.4. Fuerzas ejercidas sobre los soportes de los conductores rígidos.	289
15.1.5. Cálculo considerando la oscilación de los conductores.	289
15.1.6. Ejemplo.	290
15.1.6.1. Caso 1: Sin reenganche automático.	290
15.1.6.2. Caso 1: Con reenganche automático.	291
15.2. Esfuerzos dinámicos en los embarrados flexibles.	292
15.2.1. Efectos sobre el conductor principal.	292
15.2.1.1. Fuerza de tracción de un cortocircuito.	293
15.2.1.2. Fuerza de caída después de un cortocircuito.	294
15.2.1.3. Desplazamiento horizontal del vano (b_h) y distancia mínima en el aire (a_{min}).	294
15.2.2. Fuerza de tracción F_{pi} causada por el efecto de pinzado.	295
15.2.2.1. Dimensiones y parámetros característicos.	295
15.2.2.2. Fuerza de tracción en caso de entrechocar en los subconductores.	296
15.2.2.3. Fuerza de tracción en caso de no entrechocar los subconductores.	296
15.2.3. Carga de diseño para los aisladores de apoyo, sus soportes y conectores.	297
15.2.4. Ejemplo 1.	297
15.2.5. Ejemplo 2.	300
15.2.5.1. Distancia entre subconductores: $a_s = 0,1 m$	300
15.2.5.2. Distancia entre subconductores: $a_s = 0,4 m$	302
15.3. Efectos térmicos sobre conductores desnudos y sobre el equipo eléctrico.	303
15.3.1. Cálculo de la corriente térmica equivalente de corta duración.	304
15.3.2. Cálculo del calentamiento y del valor asignado de la densidad de corriente soportada de corta duración.	304
15.3.3. Cálculo de la resistencia térmica al cortocircuito.	305
16.Aisladores y pasatapas.	307
16.1. Materiales empleados en los aisladores.	307
16.2. Definiciones.	307
16.3. Tipos de aisladores.	308
16.4. Aisladores de cadena.	309
16.4.0.1. Aisladores de cadena tipo caperuza y vástago de material cerámico o de vidrio.	309

16.4.0.2. Aisladores de cadena, tipo de bástón de material cerámico o de vidrio.	311
16.4.0.3. Aisladores de cadena compuestos.	314
16.5. Aisladores de apoyo.	315
16.5.1. Aisladores de apoyo de interior y exterior de tipo cerámico o de vidrio.	315
16.5.1.1. Características mecánicas.	316
16.5.1.2. Características dimensionales.	317
16.5.1.3. Características especificadas.	317
16.5.2. Aisladores de apoyo compuestos rígidos de peana.	320
16.5.2.1. Momento de flexión equivalente resultante de cargas combinadas.	321
16.6. Aisladores huecos de alta tensión.	322
16.7. Aisladores especiales	323
16.8. Ensayos de aisladores	323
16.9. Elección de aisladores.	324
16.9.1. Contaminación.	324
16.9.2. Elección desde el punto de vista eléctrico.	326
16.9.2.1. Coordinación de aislamiento.	326
16.9.2.2. Partiendo del nivel de aislamiento elegido.	327
16.9.3. Elección desde el punto de vista mecánico.	327
16.10 Pasatapas.	327

17. Herrajes, pórticos y apoyos. 328

17.1. Herrajes.	328
17.2. Pórticos.	329
17.3. Apoyos.	329
17.3.1. Apoyos de madera.	329
17.3.2. Apoyos de hormigón armado.	330
17.3.2.1. Poste de hormigón armado vibrado.	331
17.3.2.2. Poste de hormigón armado centrifugado.	331
17.3.2.3. Poste de hormigón armado pretensado	332
17.3.3. Apoyos metálicos.	332
17.3.3.1. Poste metálico tubular.	333
17.3.3.2. Poste metálico de perfiles laminados.	333
17.3.3.3. Poste metálico de celosía.	333

18. EL arco eléctrico y los interruptores. 334

18.1. El arco eléctrico.	334
18.1.1. Extinción del arco eléctrico.	336
18.2. Clasificación de interruptores.	338
18.2.1. Interruptores de tanque muerto y vivo.	338
18.2.2. Medios de extinción.	339
18.2.2.1. El corte en aceite.	339
18.2.3. Interruptores neumáticos.	341
18.2.3.1. Interruptores de aire a presión atmosférica.	342

18.2.3.2. Interruptores de aire comprimido.	342
18.2.4. El corte en el vacío.	342
18.2.4.1. Mecanismo de corte en el vacío.	343
18.2.4.2. Las distintas tecnologías de corte en vacío.	344
18.2.4.3. Los campos de aplicación del corte en el vacío.	345
18.2.5. El mecanismo de corte en el SF_6	345
18.2.5.1. Propiedades del SF_6	345
18.2.5.2. El mecanismo de corte en el SF_6	346
18.2.5.3. Las distintas tecnologías de corte en el SF_6 y sus campos de aplicación.	347
18.3. Tipos de interruptores de SF_6	349
18.3.1. Interruptores de gran frío	350
18.3.2. Clasificación según el tipo de tanque (muerto o vivo).	350
18.3.2.1. Interruptores de tanque muerto.	350
18.3.2.2. Interruptores de tanque vivo.	351
18.3.3. Mecanismos de operación.	351
18.4. Ruptura de corrientes.	353
18.4.1. Ruptura de corrientes de cortocircuito.	353
18.4.2. Ruptura de corrientes de carga.	355
18.5. Características asignadas.	355
18.5.1. Definiciones.	356
18.5.2. Tensión asignada.	356
18.5.3. Nivel de aislamiento asignado.	356
18.5.4. Frecuencia asignada.	357
18.5.5. Corriente asignada en servicio continuo	357
18.5.6. Corriente de corta duración admisible asignada (I_k).	357
18.5.7. Valor de cresta de la corriente admisible asignada (I_p).	357
18.5.8. Tiempo de cortocircuito asignado (t_k).	357
18.5.9. Tensión asignada de alimentación y frecuencia de los dispositivos de cierre y apertura y de los servicios auxiliares.	357
18.5.10. Poder de corte asignable en cortocircuito.	358
18.5.11. Tensión transitoria de restablecimiento relativa al poder de corte asignado.	358
18.5.11.1. TTR de 4 parámetros.	359
18.5.11.2. TTR de 2 parámetros.	360
18.5.11.3. Valores normales de la TTR relativa al poder de cortocircuito asignado.	360
18.5.12. Poder de cierre asignado en cortocircuito.	363
18.5.13. Características para los defectos kilométricos.	363
18.6. Esfuerzos mecánicos.	365
19. Seccionadores.	368
19.1. Características.	368
19.1.1. Tipos de seccionadores	368
19.1.2. Mecanismos de operación.	371
19.2. Características asignadas.	372

20.Subestaciones blindadas	376
20.1. Subestaciones eléctricas aisladas en gas para alta tensión.	377
20.2. Módulo de juego de barras (barras principales o colectoras).	378
20.2.1. Módulo de interruptores	379
20.2.2. Módulo de seccionador.	380
20.2.3. Módulos de transformadores de medición.	380
20.2.4. Módulo descargador de sobretensiones.	381
20.2.5. Módulo de empalme.	381
20.2.6. Generalidades	383
20.3. Valores característicos.	384
20.4. Ensayos.	386
20.5. Montaje	387
20.6. Mantenimiento	389
20.7. OBRAS CIVILES	389
20.8. Subestaciones eléctricas aisladas en gas para media tensión.	391
21.Subestaciones de alta tensión. Modulares de exterior.	393
21.1. Introducción.	393
21.2. Módulos de ahorro de espacio.	394
21.3. Interruptor retirable.	394
21.4. Módulos con interruptores seccionables.	395
21.5. Subestaciones con módulos especiales.	399
21.5.1. Soluciones ABB.	399
21.5.2. Solución VATECH.	401
21.5.3. Solución Siemens.	402
22.Puesta a tierra	405
22.1. Introducción	405
22.2. Normas y marco legal.	407
22.3. Definiciones.	409
22.4. Parámetros que intervienen en el diseño de una puesta a tierra.	410
22.5. Resistividad del terreno.	411
22.5.1. Medición de la resistividad del terreno.	411
22.5.1.1. Método de Wenner.	411
22.5.1.2. Método simétrico o de Schlumberger.	412
22.5.1.3. Sondeo eléctrico vertical.	412
22.5.1.4. Interpretación de las curvas de resistividad aparentes.	412
22.5.1.5. Resistividad equivalente del terreno.	413
22.6. Gradiente de potencial alrededor de una toma de tierra.	413
22.7. Tensiones de paso y contacto.	414
22.7.1. Tensión de paso.	414
22.7.2. Tensión de contacto.	414
22.7.3. Tensiones de paso y contacto aplicadas:	415

22.7.4. Máximas tensiones de paso y contacto admisibles en la instalación	415
22.8. Conductores de tierra.	417
22.8.1. Conductores de conexión y conductores de protección.	417
22.8.2. Electrodo de tierra.	417
22.8.2.1. Picas	418
22.8.2.2. Placas.	418
22.8.2.3. Electrodo horizontal	419
22.8.2.4. Electrodo secundario.	419
22.8.2.5. Mallas de tierra.	419
22.8.3. Conexiones electrodo de tierra.	420
22.9. Red de tierras en centrales y subestaciones.	421
22.10. Diseño de sistema de puesta a tierra en instalaciones de media tensión de tercera categoría.	422
22.10.1. Procedimiento de cálculo.	423
22.10.2. Diseño puesta a tierra en subestaciones.	424
23. Transformadores de medida y protección.	431
23.1. Introducción	431
23.2. Transformadores de medida y protección. Definiciones.	431
23.2.1. Transformadores de medida de intensidad.	431
23.2.2. Transformadores de intensidad de protección.	432
23.2.3. Transformadores de tensión inductivos.	433
23.2.4. Transformadores de tensión de protección.	433
23.3. Transformadores de intensidad.	433
23.3.1. Uso en las redes eléctricas.	436
23.4. Características de los transformadores de intensidad.	437
23.4.1. Requisitos complementarios para los transformadores de intensidad para protección.	439
23.5. Transformadores de tensión.	441
23.5.1. Características de los transformadores de tensión de medida inductivos.	442
23.5.2. Transformadores de tensión capacitivos.	443
23.6. Transitorios en transformadores de corriente.	444
24. Protecciones.	446
24.1. Introducción.	446
24.2. Relés de protección.	447
24.2.1. Código ANSI.	449
24.2.2. Detección de fallos.	450
24.2.2.1. Cambios de nivel.	450
24.2.2.2. Comparación de magnitudes.	451
24.2.3. Tipos de relés.	451
24.2.3.1. Electromagnéticos.	451
24.2.3.2. De estado sólido.	452
24.2.3.3. Relés computacionales.	452
24.3. Funciones de protección.	455

24.3.1. Protección amperimétrica a máxima corriente de fase (50/51).	456
24.3.1.1. Selectividad.	456
24.3.2. Protección amperimétrica a máximo de corriente de fase con retención de tensión (50V/51V).	458
24.3.3. Protección amperimétrica a máximo de corriente a tierra (50N/51N-50G/51G ó 64).	458
24.3.4. Protección amperimétrica a mínimo de corriente de fase (37).	459
24.3.5. Protección amperimétrica a imagen térmica (49).	459
24.3.6. Protección amperimétrica de limitación del número de arranques (66).	462
24.3.7. Protección amperimétrica contra desequilibrios. Máximo de componente inversa (46).	463
24.3.8. Protección amperimétrica como bloqueos del rotor y arranque demasiados largos (48/51LR).	463
24.3.9. Protección voltimétrica de mínima tensión compuesta o de línea (27).	464
24.3.10. Protección voltimétrica de mínima tensión remanente (27R).	464
24.3.11. Protección voltimétrica de mínima tensión directa y control sentido de rotación de fases (27D-47).	464
24.3.12. Protección voltimétrica de máxima tensión compuesta (59).	465
24.3.13. Protección voltimétrica de máxima tensión residual u homopolar (59N/64).	465
24.3.14. Protección voltimétrica de máxima y mínima frecuencia (81M-81m).	465
24.3.15. Protección diferencial.	465
24.3.15.1. Protección diferencial de alta impedancia.	468
24.3.15.2. Aplicaciones.	471
24.3.16. Protección diferencial a porcentaje.	472
24.3.16.1. Aplicación: protección diferencial de transformador (87T).	473
24.3.17. Protección direccional.	473
24.3.17.1. Principio de detección.	475
24.3.17.2. Protección direccional de fase.	475
24.3.17.3. Protección direccional de tierra.	477
24.3.17.4. Protección direccional contra retornos de potencia activa (32P).	479
24.3.17.5. Protección direccional contra retornos de potencia reactiva o desexcitación (32Q/40).	480
24.4. Ejemplos de esquemas de protección de generadores, embarrados, transformadores,	481
25. Automatización y control en subestaciones.	491
25.1. Estructura general del sistema de control.	491
25.2. Comunicación en el entorno de subestaciones.	493
25.2.1. Sistemas de comunicación entre subestaciones.	493
25.2.2. Clasificación ISO de los mensajes.	494
25.2.3. Protocolos de comunicación en subestaciones.	495
25.3. Mapeado.	496
25.3.1. Comunicación vertical.	498
25.3.2. Comunicación horizontal.	498
25.4. Arquitecturas de comunicación.	499