

# CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	XV
1. CALIDAD DE POTENCIA	1
1.1 Normas relativas a la CP	2
1.2 Norma EN50160	2
1.2.1 Fenómenos continuos	4
1.2.1.1 Frecuencia	5
1.2.1.2 Variación de la tensión de alimentación	5
1.2.1.3 Variaciones rápidas de tensión	5
1.2.1.3.1 Parpadeo (flicker)	5
1.2.1.4 Desequilibrios de tensión	5
1.2.1.5 Tensiones armónicas e interarmónicas	6
1.2.1.6 Transmisión de señales	6
1.2.2 Eventos de tensión	7
1.2.2.1 Interrupciones de larga duración	7
1.2.2.2 Interrupciones breves y huecos de tensión	7
1.2.2.3 Sobretensiones temporales	11
1.2.2.4 Sobretensiones transitorias	13
1.3 Norma EN61000-2-4	15
1.4 ¿Medir o monitorizar?	16
1.4.1 Elección de la localización y el tipo de analizadores	17
1.4.1.1 Comunicación	18
1.5 Ahorro energético e ISO50001	20
ANEXOS	21
A1.1 Protección Diferencial de Corriente Residual (CR)	21
A1.2 Esquemas de conexión o régimen del neutro	21
2. INTRODUCCIÓN A LOS ARMÓNICOS	26
2.1 Las ondas periódicas	26
2.2 Desarrollo de Fourier	28
2.3 Clasificación de los armónicos	29
2.3.1 Secuencia de los armónicos	30
2.4 Definiciones más comunes relativas a armónicos	32
2.5 Distinción entre armónicos de corriente y tensión	36
2.5.1 ¿Cómo se deforman las ondas de tensión?	38

2.6 ¿Cómo medir los armónicos?	38
2.6.1 Monitorización y registro	40
ANEXOS	43
A2.1 Una pincelada histórica: el legado de Fourier	43
A2.2 Coeficientes del desarrollo de Fourier para señales muestreadas	45
A2.3 Los armónicos triples	48
A2.3.1 Incidencia del tercer armónico en los transformadores	52
3. ELECTRÓNICA DE POTENCIA	55
3.1 Convertidores c.a.-c.c.	55
3.1.1 Rectificador puente monofásico	56
3.1.2 Rectificador puente trifásico	58
3.1.3 Rectificador puente trifásico controlado	61
3.1.3.1 Fenómeno de conmutación	62
3.1.3.2 Factor de potencia	63
3.1.4 Armónicos generados por los rectificadores de 6 pulsos	64
3.1.5 Rectificadores multipulso	69
3.1.6 Otras alternativas para reducción de armónicos	71
3.1.6.1 Filtro pasivo de amplio espectro LLCL	71
3.1.6.2 Condensador reducido	73
3.1.6.3 Rectificador Activo (Active Front-End, AFE)	74
3.2 Convertidores c.c.-c.a.	75
ANEXOS	77
A3.1 Regulación de velocidad de motores	77
A3.1.1 Regulación de velocidad de motores de c.c.	77
A3.1.2 Regulación de velocidad de motores de c.a.	79
4. EFECTOS CAUSADOS POR LOS ARMÓNICOS	82
4.1 Pérdidas de energía causadas por los armónicos	84
4.1.1 Pérdidas por corrientes armónicas en transformadores	84
4.1.2 Factor de reducción	86
4.1.2.1 Factor de desclasificación según IEEE57110	87
4.1.2.2 Factor de desclasificación según normas europeas	88
4.1.3 Utilidad del «K-Factor» definido por Underwriters Laboratories (UL)	90
4.1.4 Pérdidas por corrientes armónicas en cables	91
4.1.4.1 Determinación de la resistencia	91
4.1.4.2 Pérdidas y dimensionado del conductor neutro	93
4.2 Efecto de los armónicos en los motores de c.a.	95
4.3 Generadores síncronos sometidos a cargas no lineales	95
4.4 Efecto en los condensadores	97

5. ANALISIS DE REDES CON ARMÓNICOS	100
5.1 Modelación de la red y sus componentes	101
5.2 Análisis de la red	103
5.2.1 Resonancia	107
ANEXOS	112
A5.1 Métodos de análisis de armónicos	112
A5.1.1 Tensiones preexistentes	115
A5.1.2 Consideración de los diferentes niveles de tensión y de los desfases de los transformadores	117
A5.1.3 Resonancias en redes complejas	119
6. NORMAS RELATIVAS A ARMÓNICOS	122
6.1 Normas sobre niveles de compatibilidad de tensiones armónicas en la red	123
6.2 Normas sobre límites de emisión	126
6.2.1 Límites de emisión para equipos a conectar en redes de baja tensión	126
6.2.2 Límites de emisión para instalaciones a conectar en redes de baja tensión	130
6.2.3 Límites de emisión para instalaciones de BT, MT y AT según IEEE 519-2014	130
6.2.4 Límites de emisión para MT y AT según IEC/TR61000-3-6	134
6.2.5 Análisis con la guía UNESA	136
6.3 Normas sobre técnicas de medida	137
6.3.1 Norma IEC61000-4-30	137
6.3.2 Norma IEC61000-4-7	140
ANEXOS	141
A6.1 Criterios estadísticos de los límites de armónicos establecidos por IEEE519-2014	141
A6.2 Recomendaciones de IEEE519-2014 que permiten incrementar los límites de corrientes armónicas	142
A6.3 Límites de emisión de interarmónicos	142
A6.4 Límites de muescas de conmutación o notches	144
A6.5 Influencia de los armónicos de la red eléctrica en los sistemas de telefonía	146
7. POTENCIAS Y FACTOR DE POTENCIA	148
7.1 Potencias en régimen senoidal	149

ANEXOS	156
A7.1 Sistemas trifásicos desequilibrados	156
A7.1.1 Uso de componentes simétricas	158
A7.2 Sistemas no sinusoidales	158
A7.2.1 Sistemas monofásicos no senoidales	159
A7.2.1.1 Método de Budeanu	159
A7.2.1.2 Método de IEEE1459-2010	160
A7.3 Sistema trifásico no sinusoidal y desequilibrado	163
A7.3.1 Método de Budeanu extendido	163
A7.3.2 Método de IEEE1459-2010	164
A7.4 ¿Cómo y qué miden los equipos de medida?	166
A7.4.1 Métodos de cálculo de los equipos de medida digitales	166
A7.5 Ejemplo a título de recapitulación: El caso del panadero	168
8. COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA	175
8.1 Necesidad de compensación	175
8.2 Inconvenientes de la energía reactiva	175
8.2.1 Pérdidas en la red	175
8.2.2 Disminución de la capacidad disponible	176
8.2.3 Caída de tensión	177
8.3 Penalización por consumo de energía reactiva	179
8.4 Compensación de receptores	180
8.4.1 Compensación de transformadores	181
8.4.1.1 Limitaciones de la potencia de condensadores conectados de forma fija a bornes del transformador	184
8.4.2 Compensación de motores asíncronos	186
8.4.2.1 Compensación de motores con arrancadores convencionales con contactores	188
8.4.2.2 Compensación de motores alimentados a través de arrancadores o convertidores estáticos	189
8.4.3 Compensación de lámparas de descarga	190
8.4.4 Compensación de receptores alimentados por generadores síncronos	190
8.5 Compensación de instalaciones	193
8.5.1 Cálculo por valores medios de potencia activa	195
8.5.2 Cálculo por valores máximos de potencia activa	197
8.6 Reguladores para compensación de energía reactiva	199
8.6.1 Casos particulares de medición y control	201
8.7 Compensación con baterías autorreguladas en BT	202
8.7.1 Dimensionado de los componentes	205
8.7.2 Protección de condensadores	207
8.7.3 Protección de baterías	209
8.8 Compensación de energía reactiva en MT	210

8.8.1	Compensación de transformadores y motores	211
8.8.2	Baterías autorreguladas	212
8.8.3	Protección de condensadores y baterías de MT	212
8.8.3.1	Características de los condensadores de MT	213
8.8.3.2	Condensadores con fusibles externos, internos o sin fusibles (TFSF)	215
8.8.3.3	Protección de desequilibrio	217
8.8.3.4	Protección contra defectos externos	219
8.8.3.5	Protecciones de las configuraciones más habituales	220
ANEXOS		222
A8.1	Autoexcitación en motores de inducción	222
A8.2	Fenómenos transitorios asociados a la conmutación de condensadores	224
A8.2.1	Transitorio de conexión de un condensador aislado	225
A8.2.2	Transitorio de conexión de condensadores en paralelo	228
A8.2.3	Limitación de las corrientes de conexión	232
A8.2.3.1	Cálculo de las inductancias de limitación o de choque	232
A8.2.4	Transitorio de desconexión	234
A8.2.5	Elección de los interruptores para conmutación de condensadores de MT	234
A8.2.6	Problemas comunes asociados a la conmutación de condensadores	237
A8.2.6.1	Problemas derivados de la conexión de condensadores	237
A8.2.6.2	Descarga sobre una falta (cortocircuito)	241
A8.2.7	Limitación de las sobretensiones de conmutación	242
A8.2.7.1	Interruptores con dispositivos de limitación	243
9.	FILTROS DE ARMÓNICOS	246
9.1	Filtros pasivos característicos	246
9.1.1	Influencia de la red	247
9.1.2	Diseño de filtros resonantes	248
9.1.2.1	Procedimiento de cálculo	249
9.2	Filtros activos	252
9.2.1	Filtro activo paralelo (FAP)	253
9.2.1.1	Elección del FAP	256
9.2.1.2	Comportamiento del FAP	261
9.2.2	Filtro activo serie (FAS)	261
9.2.3	Filtros híbridos	262
9.2.4	Ejemplo de recapitulación	264
ANEXOS		274
A9.1	Resonancia de red con FP	274
A9.2	Comportamiento del FAP según el tipo de carga	276

A9.2.1	Compatibilidad entre FAP y baterías de condensadores (BC) o filtros pasivos (FP)	278
10.	CONTROL DE TENSIÓN Y POTENCIA REACTIVA CON COMPENSADORES ESTÁTICOS	281
10.1	Control de tensión y energía reactiva en las redes eléctricas	281
10.1.1	Curvas P-V	282
10.1.2	Relación entre tensión y potencia reactiva en líneas cortas	284
10.2	Compensación estática de energía reactiva	286
10.2.1	Compensadores estáticos SVC	286
10.2.2	Regulación de tensión con el SVC	289
10.2.3	Ejecuciones prácticas	293
10.3	Compensador estático STATCOM	293
10.3.1	Características V-I	296
10.3.2	Topologías para grandes potencias	297