

Guía sobre la calidad de la onda en las redes eléctricas

UNESA
COMITÉ DE DISTRIBUCIÓN - COMISIÓN TÉCNICA

Índice

	Antecedentes	— pág 3 —
1	Introducción	— pág 5 —
2	Variaciones de frecuencia	— pág 9 —
3	Variaciones lentas de tensión	— pág 15 —
4	Fluctuaciones de tensión y Flicker	— pág 21 —
5	Huecos de tensión y cortes breves	— pág 27 —
6	Impulsos de tensión	— pág 35 —
7	Distorsión armónica	— pág 43 —
8	Desequilibrios de tensión	— pág 51 —
9	Sistemas de corrección de perturbaciones	— pág 57 —
10	Selección del Punto de Conexión Común (PCC)	— pág 69 —
	Glosario de términos más usados	— pág 72 —

Antecedentes

Desde hace unos años, se está registrando en todos los países industrializados una creciente sensibilidad hacia la “calidad del producto electricidad” o, dicho de otra forma, hacia la “calidad de la onda de tensión”.

Las alteraciones de la “calidad de la onda” tienen lugar en los propios procesos de producción, transporte y distribución, así como en su utilización por determinados tipos de receptores. Son, por lo tanto, inevitables. Sin embargo, sólo en los últimos años se están convirtiendo en un motivo de preocupación. Y ello, por dos causas:

- Por un lado, los procesos industriales requieren, de día en día, una mayor calidad de todos los productos utilizados y, en particular, de la electricidad, haciéndose más sensibles a las alteraciones que puedan existir.
- Por otro lado, la creciente utilización de receptores que generan perturbaciones hace que el nivel de contaminación general de las redes eléctricas esté aumentando, lo que puede así incidir en el normal funcionamiento de los demás receptores a ellas conectados y, en definitiva, extendiendo el problema.

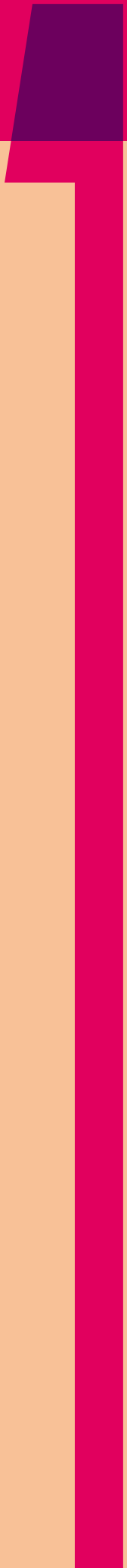
Consciente de ello, el Comité de Distribución de UNESA encomendó al Grupo de Trabajo “Calidad de la Onda” la elaboración de unos documentos divulgativos que dieran a conocer esta situación más allá del grupo de especialistas que la estudia. Así, se podrá profundizar en el conocimiento de este tema y, por tanto, fomentar el diálogo entre todas las partes implicadas para buscar soluciones a los problemas que se presenten, las cuales, en cualquier caso, deberán surgir del esfuerzo conjunto de todas ellas.

Las propias empresas eléctricas han de intentar reducir en lo posible el impacto de las alteraciones existentes, asesorando a sus clientes sobre la forma más correcta de utilizar la energía eléctrica, especialmente en receptores que generan perturbaciones.

Los fabricantes de aparatos y receptores tienen que diseñarlos y fabricarlos para que su utilización no altere la compatibilidad electromagnética entre la red a la que se van a conectar y los equipos a ella conectados.

Los propios usuarios tienen que preparar y explotar sus instalaciones teniendo en cuenta las características de la red a la que se van a conectar, su entorno electromagnético y los requerimientos de inmunidad de sus propias instalaciones.

Finalmente, las Administraciones Públicas competentes deberán organizar el marco legal adecuado que regule las relaciones entre todos ellos.



Introducción

La energía eléctrica es suministrada en la forma de un sistema trifásico de tensiones de naturaleza sinusoidal.

Hay cuatro parámetros que caracterizan a la onda de tensión y que permiten medir su grado de pureza:

- Frecuencia
- Amplitud
- Forma
- Simetría

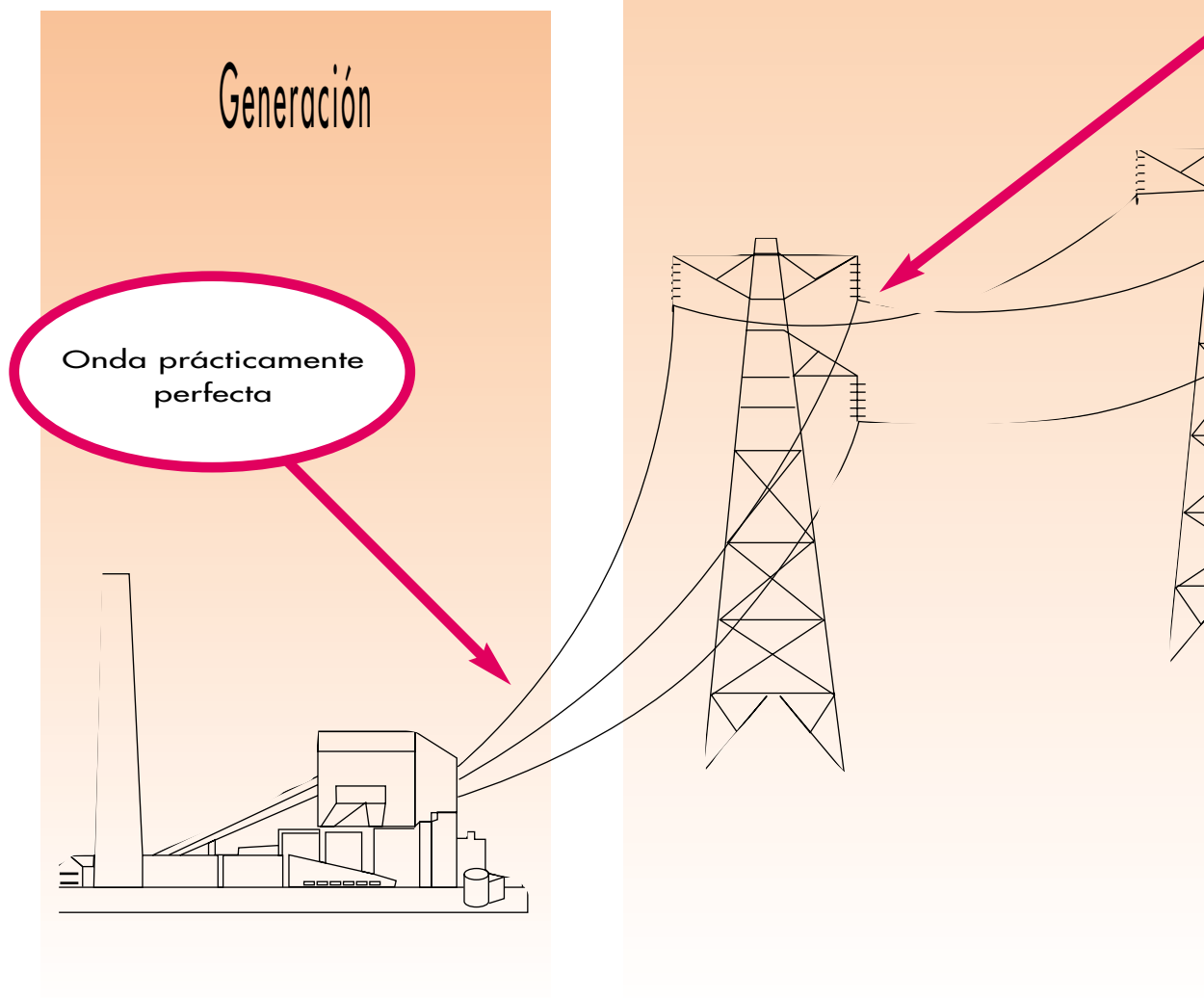
Las centrales eléctricas producen una onda sinusoidal de 50 ciclos por segundo prácticamente perfecta, por lo que, desde el punto de vista del suministro al cliente, los parámetros mencionados se

consideran constantes en la generación.

Sin embargo, en el proceso de transporte y distribución de la energía desde las centrales hasta los puntos de consumo final, que tiene lugar a través de las redes eléctricas, estas magnitudes sufren alteraciones que pueden afectar a determinados usuarios.

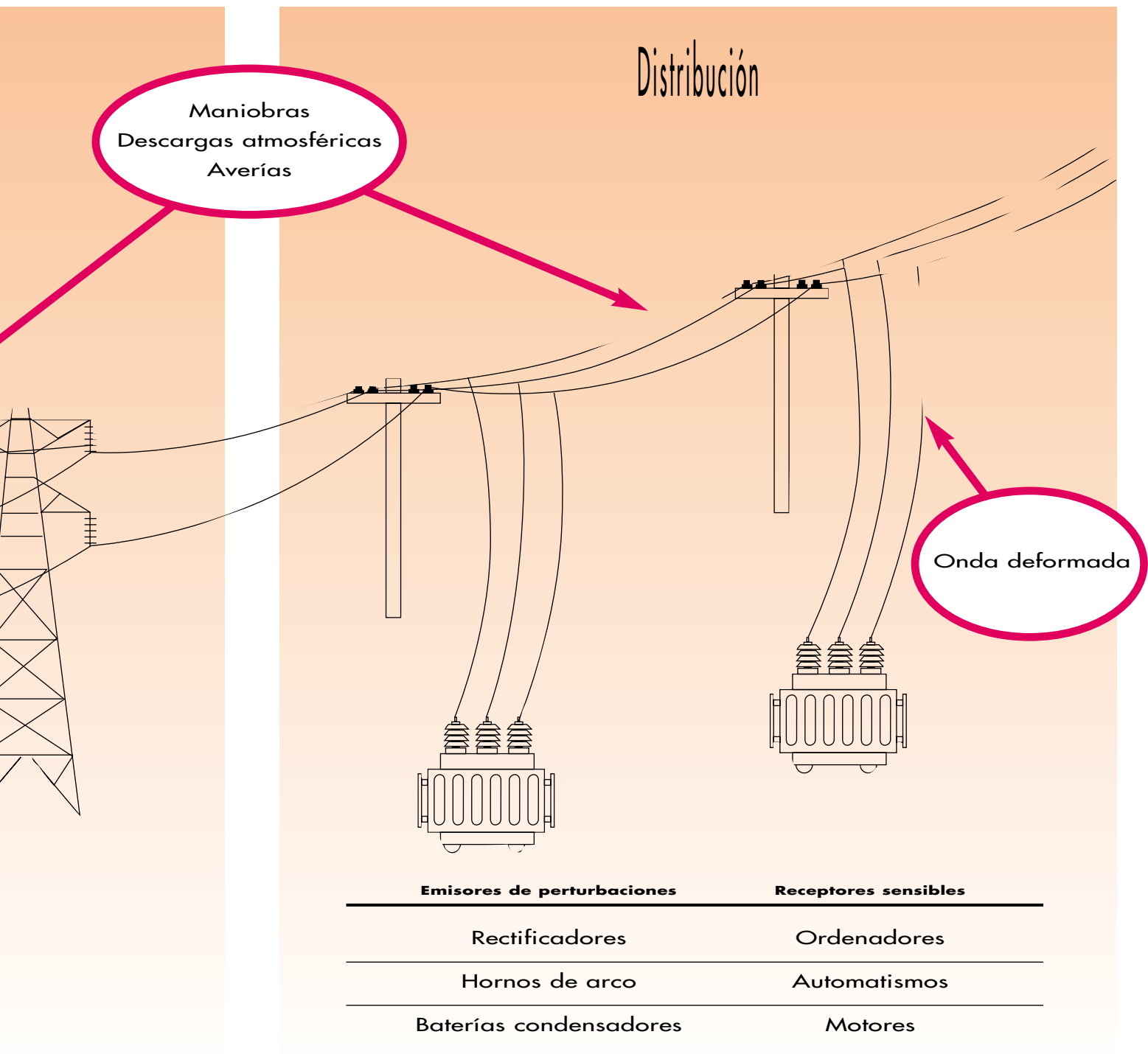
Figura 1.1

Generación
de electricidad
y transmisión
de perturbaciones



Estas alteraciones tienen su origen en las propias instalaciones eléctricas –como consecuencia de maniobras, averías, etc.–, en fenómenos naturales–descargas atmosféricas– y en el funcionamiento normal de determinados receptores –puentes rectificadores, hornos de arco, etc.– que las transmiten a los demás receptores a través de la red eléctrica.

Su eliminación completa resulta, por lo tanto, imposible. Por ello, es necesario adecuar los receptores, con el fin de disminuir al máximo las emisiones que generen y que pueden afectar al funcionamiento de otros receptores, así como reducir en lo posible las repercusiones que pueden tener dichas alteraciones sobre su propio funcionamiento normal.



En el análisis de las alteraciones de la onda de tensión, sus consecuencias y las medidas de corrección y prevención, cumple un papel fundamental el concepto de Compatibilidad Electromagnética. Se denomina Compatibilidad Electromagnética (CEM) la aptitud de un aparato o de un sistema para funcionar de manera satisfactoria en su entorno electromagnético y sin producir él mismo perturbaciones electromagnéticas intolerables para todo lo que se encuentre en dicho entorno.

Asociado a este concepto, está el de nivel de CEM, que es el nivel especificado de perturbación en un entorno electromagnético,

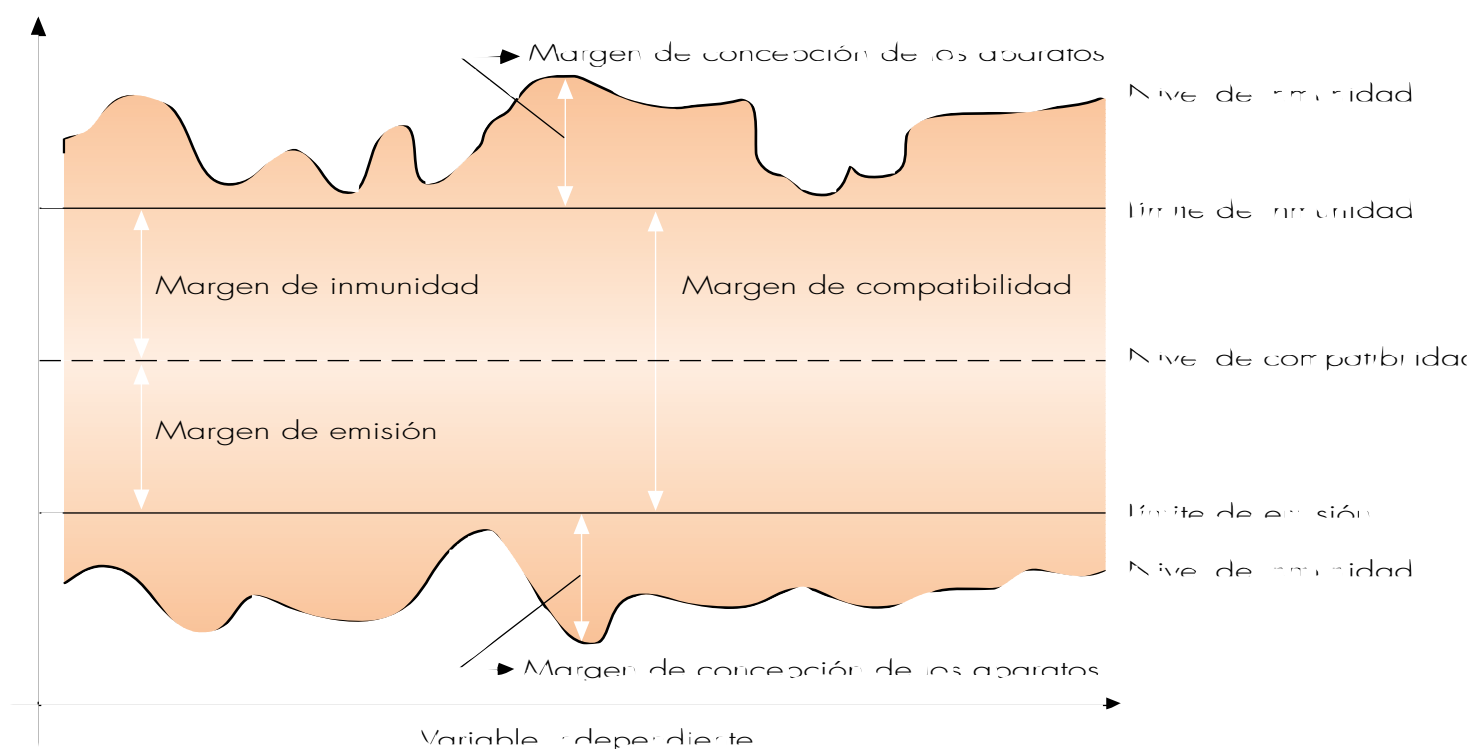
para el cual existe una elevada probabilidad de CEM.

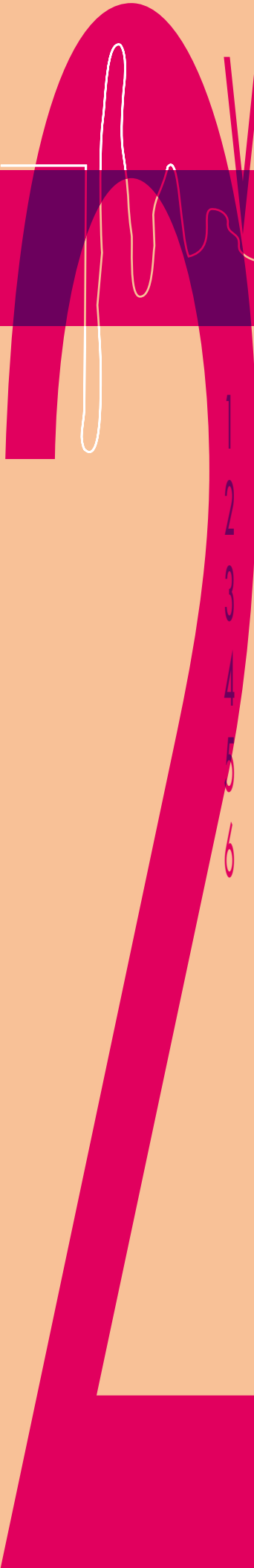
En aquellos casos en los que, por las características especiales de los receptores, no se den las condiciones de CEM, se puede proceder a la inmunización de los equipos, recurriendo a los llamados sistemas de corrección de perturbaciones.

El objetivo de esta publicación es analizar los aspectos técnicos fundamentales de las alteraciones de la onda de tensión, exponiendo las causas que las originan, los efectos que producen y las acciones que se pueden aplicar para prevenirlas y corregirlas.

Figura 1.2

Nivel de CEM





Variaciones de frecuencia

- 1 Definición
- 2 Valores de referencia
- 3 Causas que las originan
- 4 Efectos que producen
- 5 Acciones de prevención y corrección
- 6 Referencias técnicas

1 Definición

Se dice que existen variaciones de frecuencia en un sistema eléctrico de corriente alterna cuando se produce una alteración del equilibrio entre carga y generación.

La frecuencia, en un sistema eléctrico de corriente alterna, está directamente relacionada con la velocidad de giro, es decir, con el número de revoluciones por minuto de los alternadores¹. Dado que la frecuencia es común a toda la red, todos los generadores conectados a ella girarán de manera síncrona, a la misma velocidad angular eléctrica.

2 Valores de referencia

La frecuencia nominal de la tensión es de 50 Hz. En condiciones normales de operación, el valor promedio de la frecuencia fundamental en los sistemas de distribución, durante 10 segundos, es, según la EN 50.160:

- Con conexión síncrona y sistema interconectado:

—50 Hz $\pm$ 1% (49,5... 50,5 Hz) durante el 95% de una semana.

—50 Hz - 6%, +4% (47... 52 Hz) durante el 100% de una semana.

- Con conexión asíncrona aislada de un sistema interconectado (por ejemplo, los sistemas de interconexión en ciertas islas):

—50 Hz $\pm$ 2% (49... 51 Hz) durante el 95% de una semana.

—50 Hz $\pm$ 15% (42,5... 57,5 Hz) durante el 100% de una semana.

3 Causas que las originan

En condiciones normales de funcionamiento, la capacidad de generación conectada a una red eléctrica es superior al consumo. Para ello, se mantiene una reserva de energía rodante, es decir, una capacidad no utilizada que puede compensar las variaciones bruscas de carga y mantener la frecuencia dentro de un margen de tolerancia.

No obstante, son posibles condiciones excepcionales en las que se produzca un desequilibrio importante entre la generación y la carga, dando lugar a una variación de la frecuencia.

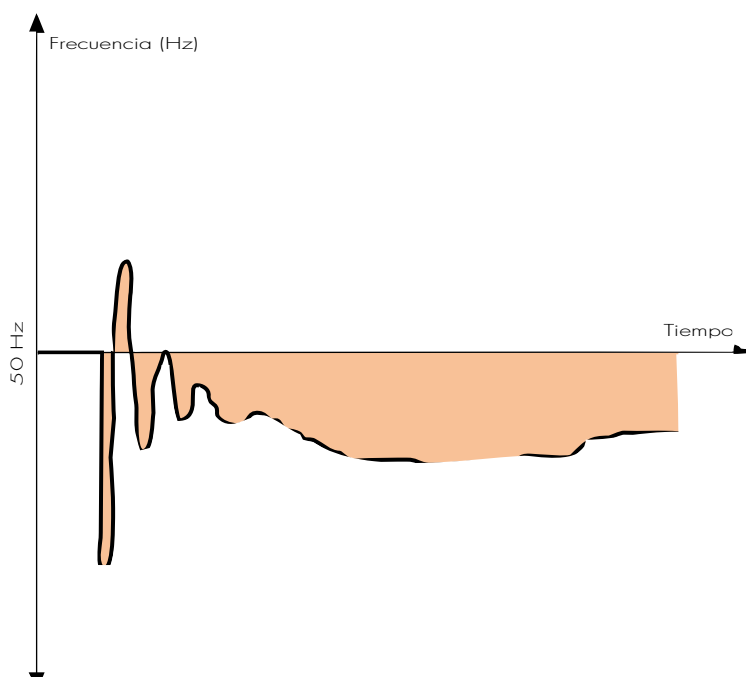
Pueden darse los dos casos siguientes:

- **La carga es superior a la generación.** En este caso, la frecuencia disminuye. Su velocidad de caída dependerá:

¹
 $2f = pN/60$,
 expresión en la que
 N = revoluciones por
 minuto; y p = número
 de pares de polos
 del alternador.

Figura 2.1

Simulación de un transitorio de frecuencia



- De la reserva de energía rodante.
- De la constante de inercia del conjunto de los generadores conectados a la red.

En tales condiciones, si la disminución de la frecuencia se sitúa por encima del margen de tolerancia y los sistemas de regulación no son capaces de responder de forma suficientemente rápida para detener la caída de la misma, puede llegar a producirse un colapso en el sistema.

La recuperación del mismo se lograría mediante un deslastre rápido, selectivo y temporal de cargas.

Asimismo, un incremento brusco de la carga hará que los alternadores pierdan algo de velocidad. En tales casos, los sistemas de regulación de los alternadores detectan esas variaciones de velo-

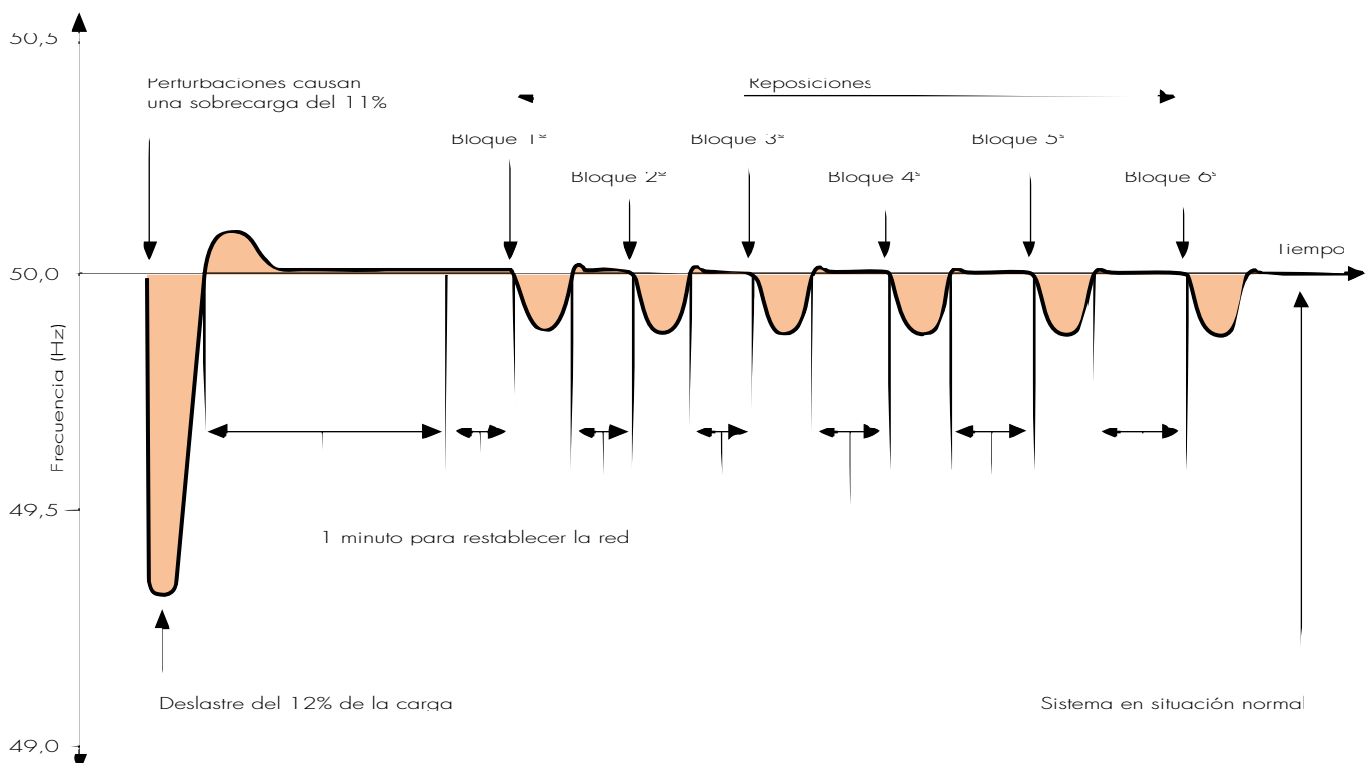
cidad y suministran energía mecánica adicional a las turbinas. Así, el incremento de carga se reparte entre todos los generadores conectados a la red y se alcanza un nuevo equilibrio entre carga y generación.

- **La carga es inferior a la generación.** En este caso, la frecuencia aumenta. El equilibrio se restablece mediante un proceso análogo al anterior, actuando sobre los sistemas de regulación de los alternadores para disminuir su capacidad de generación. El equilibrio se alcanza de forma mucho más sencilla que en el caso anterior.

La relación entre la variación de carga y la variación de frecuencia depende del número y capacidad de los generadores conectados a la red. Es más desfavorable en sistemas aislados, que en grandes redes interconectadas.

Figura 2.2

Comportamiento de la frecuencia durante el deslastre y reposición de cargas



Así, en el sistema interconectado europeo en el que se encuentra integrada la red española, se obtienen valores del orden de 12.000 MW/Hz, es decir, hace falta un cambio de carga de 1.200 MW para que se produzca una variación de frecuencia de 0,1 Hz. En un sistema aislado de 120 MVA, este valor sería del orden de 60 MW/Hz.

4 Efectos que producen

En los márgenes normales de tolerancia, el principal efecto de las variaciones de frecuencia es el cambio en la velocidad de las máquinas rotativas.

En tales condiciones, pueden producirse los siguientes fenómenos:

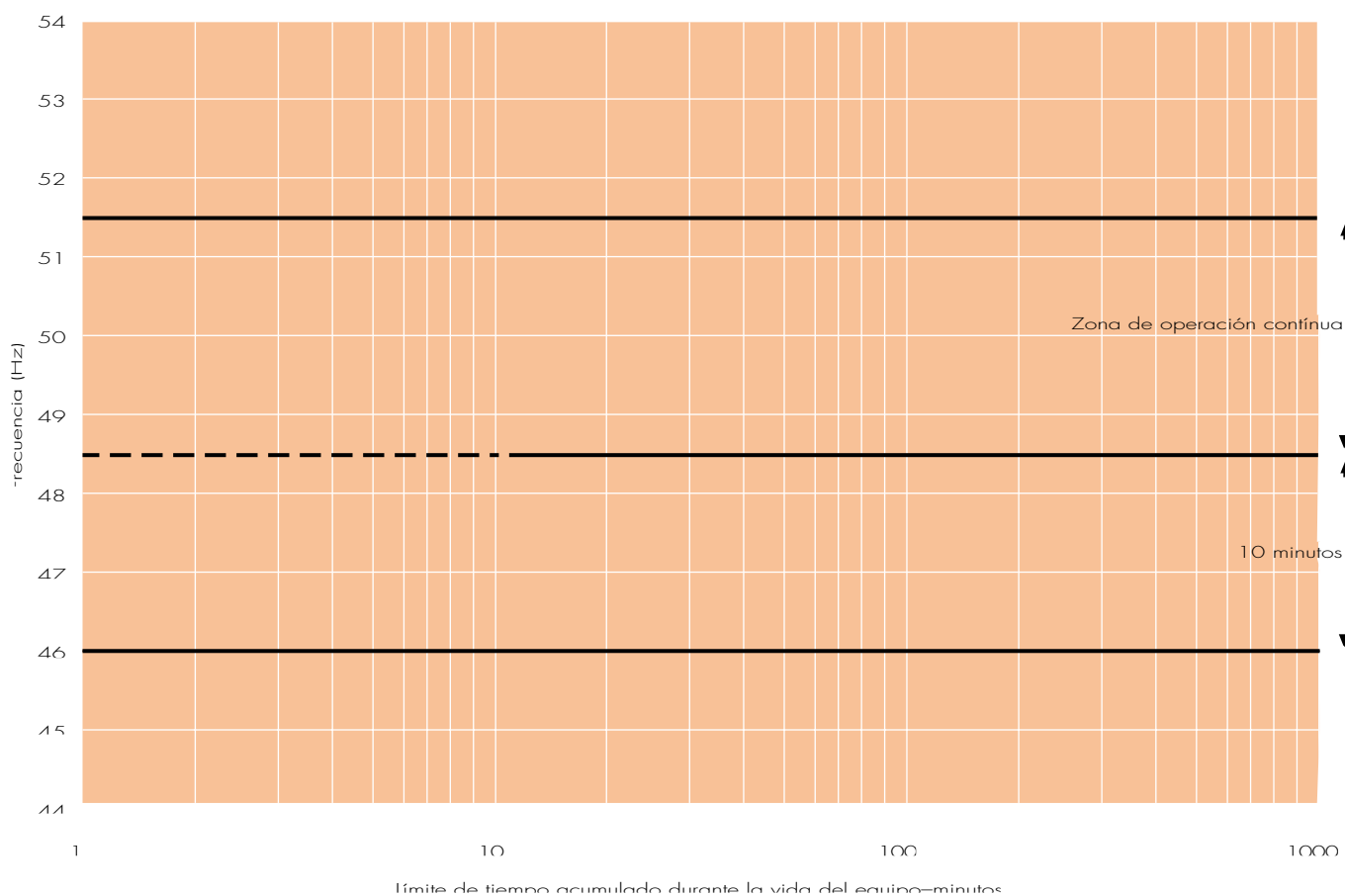
- Los motores transmiten más o menos potencia.
- Los relojes eléctricos sincronizados con red, atrasan o adelantan.

También tienen efecto sobre otros equipos:

- Los filtros de armónicos sufren un efecto distorsionador.
- Los equipos electrónicos que utilizan la frecuencia como referencia de tiempo se ven alterados.
- Las turbinas de las centrales eléctricas se encuentran sometidas a fuertes vibraciones que suponen un severo esfuerzo de fatiga. (ver Figura 2.3)
- Posibles problemas en el funcionamiento de instalaciones de autogeneración.

Figura 2.3

Límites de frecuencia de funcionamiento de turbinas



5 Acciones de prevención y corrección

Para prevenir fuertes variaciones transitorias de frecuencia que pudieran afectar gravemente a los equipos conectados a una red eléctrica, se recomienda disponer de un sistema de deslastre por frecuencia.

En el caso de un autogenerador, esto es, de una instalación industrial que cuenta con una fuente autónoma de energía, cabe distinguir situaciones diferentes que aconsejan medidas de prevención asimismo diferentes:

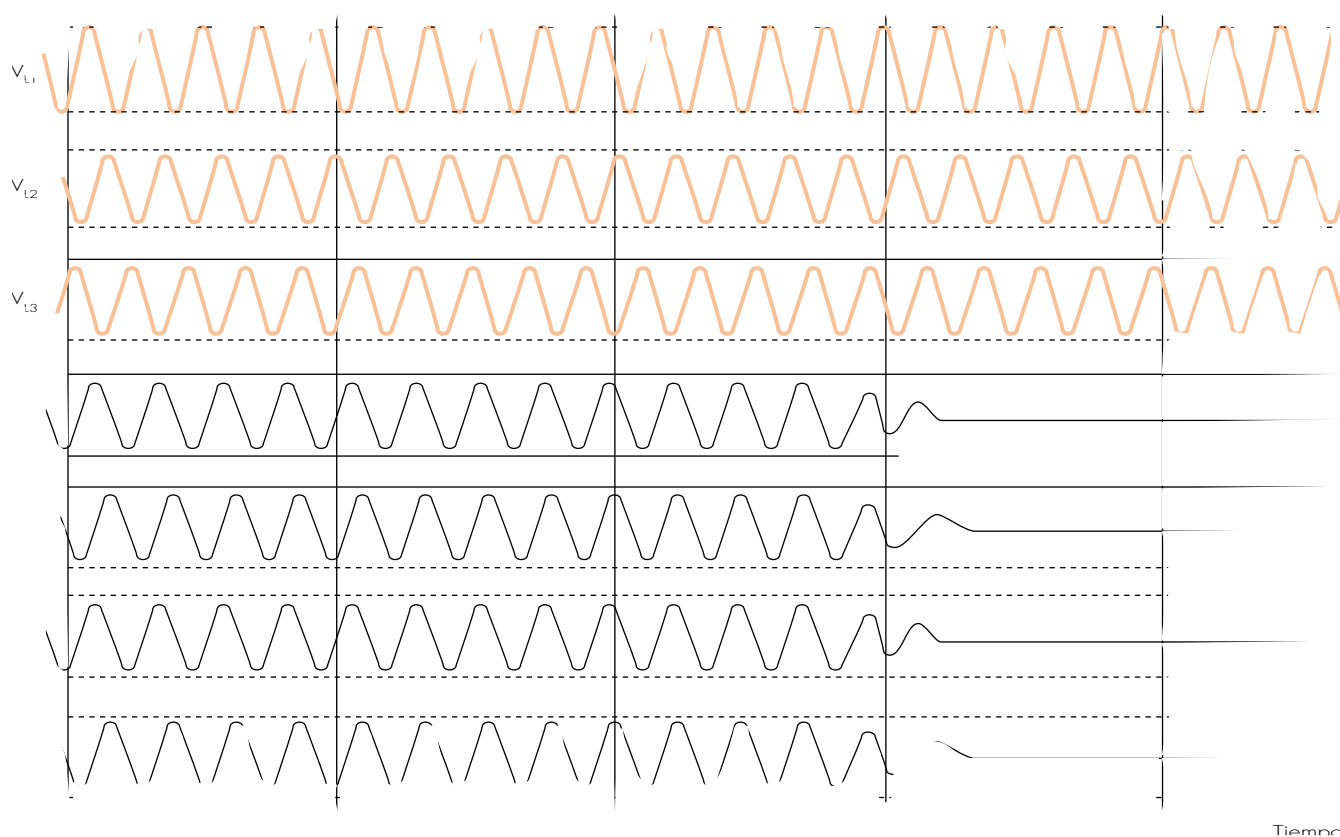
- Cuando la instalación funciona acoplada a la red de distribución y se produce el disparo del interruptor de interconexión,

quedando la instalación en isla, lo normal es que se produzca un desequilibrio transitorio entre carga y generación que, si no es compensado rápidamente por el regulador del generador, dará lugar a un disparo de éste, (ver Figura 2.4). En este caso, es esencial que el sistema de regulación del grupo de generación esté adecuadamente diseñado y ajustado para esta circunstancia.

- Cuando se trata de grandes grupos, en general, hay protecciones que tienen por misión eliminar rápidamente la aportación de energía del autogenerador ante una falta en su línea de alimentación, protegiendo el grupo de generación frente a los problemas derivados de la pérdida de

Figura 2.4

Cero de tensiones de autogeneradores



En isla V_{L1} , V_{L2} , V_{L3} tensiones de compañía suministradora

estabilidad. Estas protecciones específicas se calculan y ajustan tomando como base procesos de simulación dinámica.

- Cuando una apertura momentánea del interruptor de interconexión hace que el generador se acelere o ralentice, queda fuera de sincronismo respecto de la red de la distribución. En esta

situación, el reenganche del interruptor de cabecera da lugar a un acoplamiento fuera de sincronismo que dañará seriamente el eje de la turbina y los devanados del generador. Para hacer frente a esta situación, se prevé la instalación de protecciones de teledesconexión de máxima y mínima frecuencia.

6 Referencias técnicas

- “Regulación de la frecuencia y de la potencia en los sistemas eléctricos”. J. Belio Arto. Revista Electrotécnica. Agosto-Septiembre-Octubre, 1968.
- “Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems”. EN 50160 Noviembre 1994.
- “O.M. 19.384/85”.

Variaciones lentas de tensión

1 Definición

2 Valores de referencia

3 Causas que las originan

4 Efectos que producen

5 Acciones de prevención y corrección

6 Referencias técnicas

1 Definición

Se produce una variación de tensión cuando hay una alteración en la amplitud y, por lo tanto, en el valor eficaz de la onda de tensión. Una variación de tensión tiene:

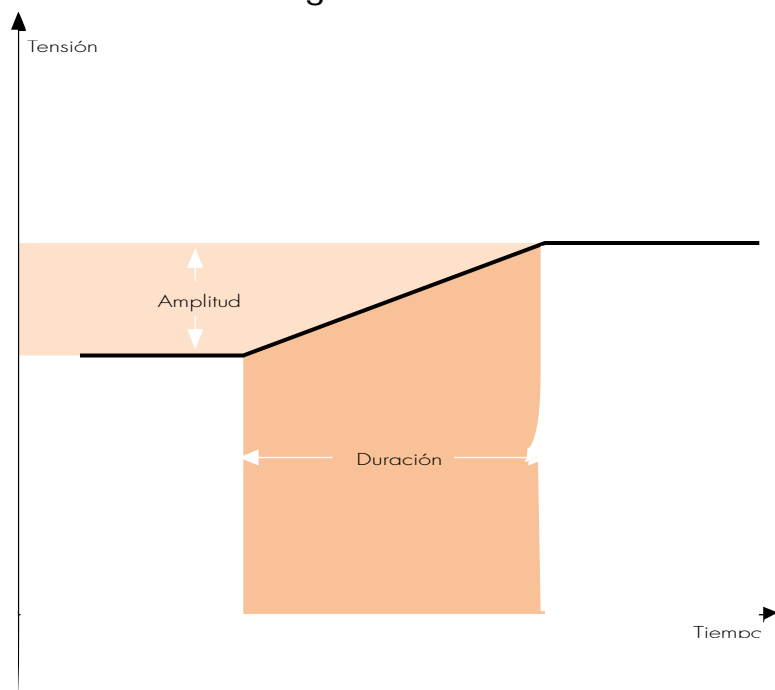
- un valor de partida
- un valor final
- una duración, es decir, el tiempo que emplea en pasar del valor inicial al valor final (ver Figura 3.1).

En otras palabras, amplitud y duración son los parámetros característicos de una variación de tensión. Pues bien, se considera una variación lenta de tensión a aquella cuya duración es superior a 10 segundos.

Cabe distinguir aquí entre las variaciones lentas y las fluctuaciones que se estudian en el capítulo 4. La diferencia estriba en que, en estas últimas, la duración va desde varios milisegundos hasta los 10 segundos.

Figura 3.1

Esquema de una variación de tensión



En una red eléctrica ideal, la tensión de suministro debería tener un valor concreto y constante igual al de la tensión nominal. Sin embargo, en la práctica, no hay redes ideales, por lo que la tensión de servicio puede presentar valores diferentes en un período de tiempo determinado, si bien cabe esperar que éstos se encuentren casi siempre dentro de unos márgenes razonables de variación respecto de la tensión nominal.

2 Valores de referencia

Por lo que se refiere a la normativa legal vigente, el Reglamento de Verificaciones Eléctricas y Regularidad en el Suministro de Energía establece un margen admisible del $\pm 7\%$ respecto de la tensión nominal.

En cuanto a la normativa técnica, los valores pueden quedar así resumidos para BT:

• Tensión nominal:

- 230 V entre fases para sistemas a tres hilos en sistemas trifásicos.
- 230 V entre fase y neutro, y 400 V entre fases, para sistemas a cuatro hilos en sistemas trifásicos.

- **Variación de tensión.** En condiciones normales de funcionamiento, se recomienda que la tensión en los terminales de suministro no difiera de la nominal en más de $\pm 10\%$.

La tensión nominal existente 220/380 V deberá evolucionar hacia un valor estándar de 230/400 V. El período de transi-

ción ha de ser lo más corto posible y no prolongarse, en cualquier caso, más allá del año 2003.

Desde el punto de vista técnico, un receptor que cumpla las normas CEI 38, CENELEC HD 471 S1 y UNE 21-127 debe funcionar correctamente dentro de los márgenes indicados.

En MT se sustituye el concepto de tensión nominal por el de tensión declarada, aplicándose los mismos márgenes de variación que para la BT.

3 Causas que las originan

Para analizar las causas que originan las variaciones lentas de tensión, es útil determinar los factores de los cuales depende el valor de la tensión de una red.

Desde el punto de vista de la conexión de un receptor, el sistema de distribución de energía eléctrica puede quedar represen-

tado mediante el esquema indicado en la Figura 3.2

En este circuito, la tensión en los terminales del receptor responderá a la expresión:

$$U = \frac{Z_r}{Z_r + Z_{th}} U_{th}$$

En consecuencia, el valor de la tensión U en el receptor depende de los siguientes factores:

- La tensión del generador (U_{th})
- La impedancia en serie de la red (Z_{th})
- El valor de la impedancia del receptor (Z_r)

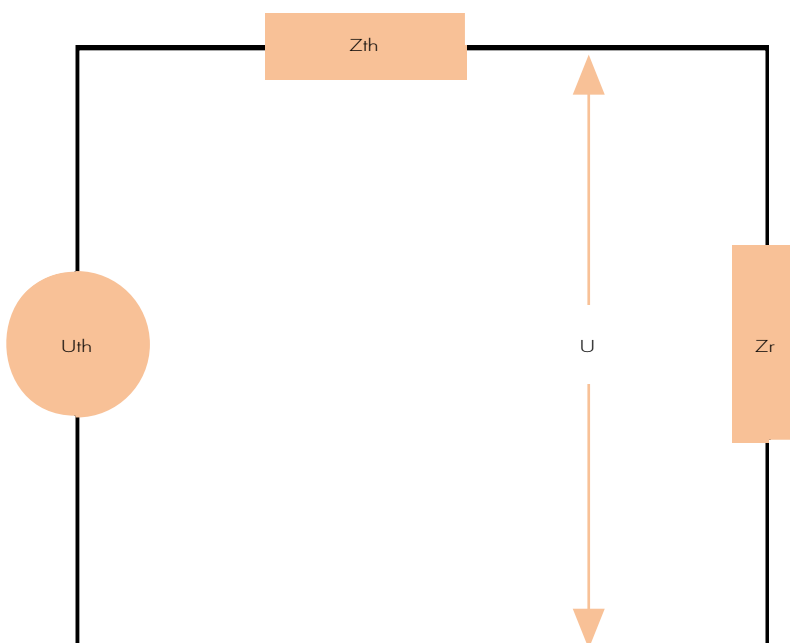
De todos los factores que influyen en las variaciones de tensión, el más importante es la impedancia del receptor, que depende a su vez de la carga conectada. Esta puede variar por diversas razones, entre las cuales cabe destacar las siguientes:

- El consumo de energía no se realiza de forma constante. A lo largo del día, hay períodos de consumo intenso, a los que se denomina "horas punta", y períodos de bajo consumo, a los que se llaman "horas valle".
- Los receptores no son iguales y sus diferencias condicionan asimismo las características del consumo. Así, no es lo mismo que el consumo se concentre en una zona con una importante componente industrial, a que lo haga en una mayoritariamente residencial.

La variación del consumo en un tiempo determinado recibe el nombre de curva de carga. Las

Figura 3.2

Esquema
de un sistema
de distribución



variaciones de tensión se encuentran estrechamente ligadas a ella, de forma que es de esperar que la tensión de la red sea mayor en los momentos de bajo consumo, que en los de alto.

Si partimos de un conjunto de valores de tensión y tiempo, la evolución de una variación lenta de tensión puede presentar el aspecto que se indica en la Figura 3.3. Como se ve, los valores correspondientes a cada instante de tiempo se enlazan entre sí formando un perfil de tensiones en el que cada punto representa el valor real de la tensión en el instante de realizar la medida.

4 Efectos que producen

Para estudiar los efectos de las variaciones lentas de tensión sobre los receptores, conviene tener en cuenta los posibles estados de funcionamiento: normal, anómalo, no funcionamiento y avería (ver Figura 3.4). Los tres primeros estados pueden

evolucionar entre sí, mientras que el último, el de avería, es fijo y no permite el paso a ninguno de los demás de manera normal. Los receptores deben estar dotados de protecciones que eviten el paso al estado de avería.

Una vez definida una tensión nominal y su margen de tolerancia, pueden darse dos tipos de variaciones de tensión:

- Las que se sitúen por debajo de dicho margen o "tensión baja".
- Las que se sitúen por encima del mismo o "tensión alta".

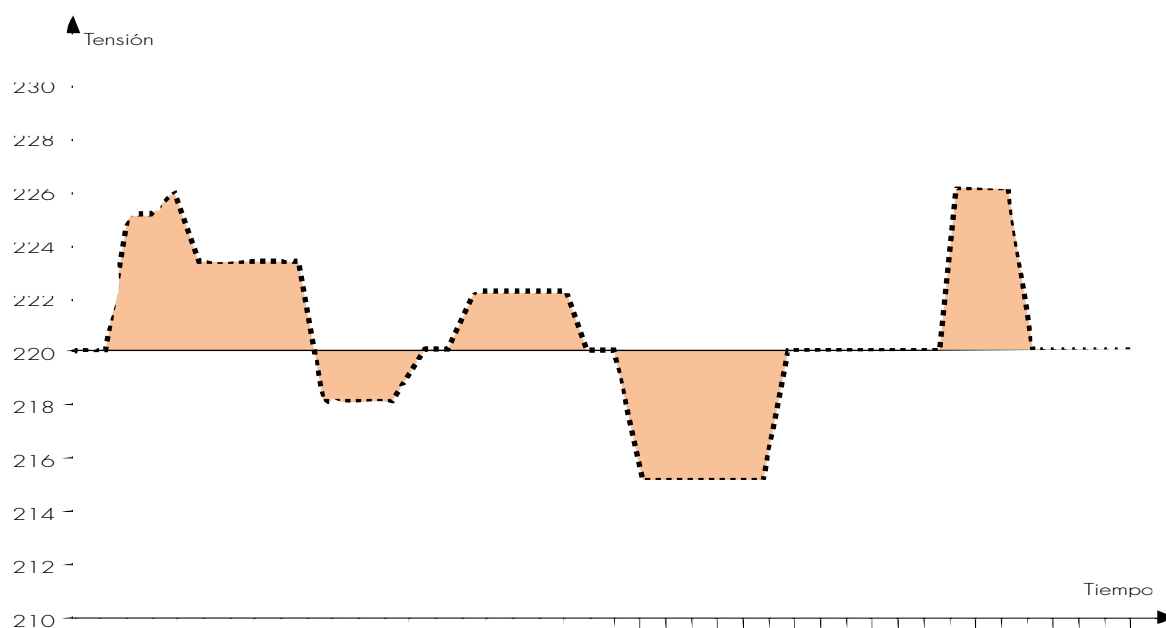
Veamos a continuación los efectos ligados a unas y otras.

4 1 Efectos de tensión baja

La mayor parte de los receptores pasan de un estado de funcionamiento normal a uno "anómalo" o a uno de "no funcionamiento" cuando se ven sometidos a una tensión baja, recuperando el estado "normal" cuando el valor de la tensión vuelve a situarse

Figura 3.3

Ejemplo de evolución de la tensión



dentro de los márgenes de tolerancia. Así, en la mayoría de los casos, los efectos no suelen ser especialmente perjudiciales. Cabe citar algunos ejemplos:

- En el momento del arranque, un motor no podrá iniciar el giro si la tensión no es suficiente para proporcionar el par mecánico que requiere el eje. Sufrirá un calentamiento que podría provocar su avería.

- En las lámparas incandescentes, se observa una disminución en la intensidad lumínica. Las que funcionan en base a descarga de gases pueden llegar a no cebarse en el momento de la conexión, permaneciendo apagadas. Si se encontraran funcionando, podrían apagarse y no se encenderían hasta que la tensión volviera a los límites de funcionamiento.
- Contactores o relés pueden producir actuaciones incorrectas, afectando al proceso que estén controlando.

Figura 3.4

Estados de funcionamiento de un receptor

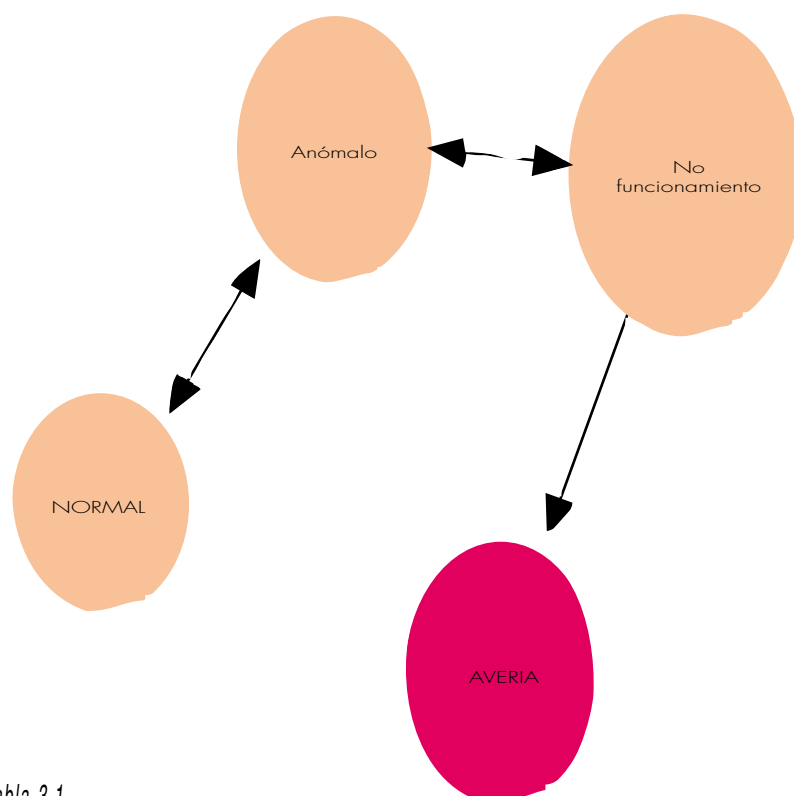


Tabla 3.1

Detección de los efectos de las variaciones de tensión

RECEPTOR	TENSION BAJA	TENSION ALTA
Lámparas incandescentes	Menor intensidad lumínica	Intensidad lumínica elevada
Lámparas de descarga	No se ceban en su conexión	Intensidad lumínica similar
Motores	Sin par de arranque	Calentamiento
Relés, contactores	Posible desconexión	Calentamiento

4.2 Efectos de tensión alta

La tensión alta produce fundamentalmente un efecto de calentamiento de los receptores. En determinadas circunstancias, este calentamiento puede ocasionar la avería de los equipos si se supera el límite térmico que toleran.

Es más difícil detectarla, ya que los receptores no dejan de funcionar instantáneamente y no es fácil apreciar de inmediato su sobrecalentamiento.

5 Medidas de corrección y prevención

Entre las medidas que se pueden adoptar para la corrección y prevención de los efectos de las variaciones lentas de tensión se encuentran:

- La utilización de reguladores en los transformadores de alta a media tensión y de tomas variables en los transformadores de media a baja tensión.
- Que los receptores tengan una tensión nominal igual a la de la red a la que van a ser conectados y su funcionamiento sea normal dentro de los márgenes de variaciones especificados en la normativa técnica.

- Instalación de protecciones de máxima y mínima tensión temporizadas para la protección térmica de los equipos.

En los receptores cuyos márgenes en la tensión de funcionamiento sean menores que los admitidos para las variaciones de la tensión de la red, habrá que aplicar elementos de corrección, entre los que cabe citar (ver Capítulo 9):

- Reguladores de tensión.
- Acondicionadores de red
- Conjunto motor generador
- Sistema de alimentación ininterrumpida (S.A.I.)

6 Referencias técnicas

- "Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en centrales eléctricas, subestaciones y centros de transformación" e instrucciones técnicas complementarias, RD 3275/1982.
- "Tensiones nominales de las redes eléctricas de distribución pública en baja tensión". UNE 21-301-91. 1991.
- "Tensiones normales". UNE 21-127-92. 1992.
- Su tensión sin tensiones. UNESA, 1985.
- "Nominal voltages for low voltage public electricity supply systems". HD 472 S1. Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (CENELEC), 1989.
- "Standard voltages". CEI 38. Comisión Electrotécnica Internacional (CEI), 1983.
- "Disturbances in supply systems caused by household appliances and similar electrical equipment. Part 1: Definitions". CEI 555-1. Comisión Electrotécnica Internacional (CEI), 1982.
- "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems". EN 50160. Noviembre, 1994.

Fluctuaciones de tensión y Flicker

1

Definición

2

Valores de referencia

3

Causas que las originan

4

Efectos que producen

5

Acciones de prevención y corrección

6

Referencias técnicas

1 Definición

1.1 Fluctuaciones de tensión

Se dice que hay **fluctuaciones de tensión** cuando se producen variaciones periódicas o series de cambios aleatorios en la tensión de la red eléctrica. A su vez, las variaciones de tensión se definen como las variaciones del valor eficaz o valor de pico de tensión entre dos niveles consecutivos que se mantienen durante un tiempo finito no especificado.

Su duración va desde varios milisegundos hasta unos 10 segundos y con una amplitud que no supera el $\pm 10\%$ del valor nominal.

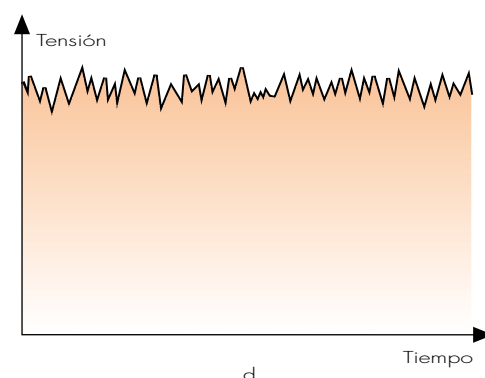
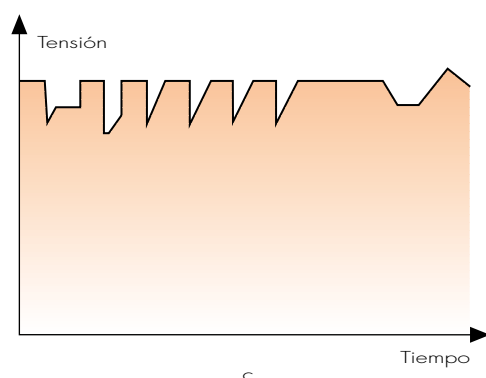
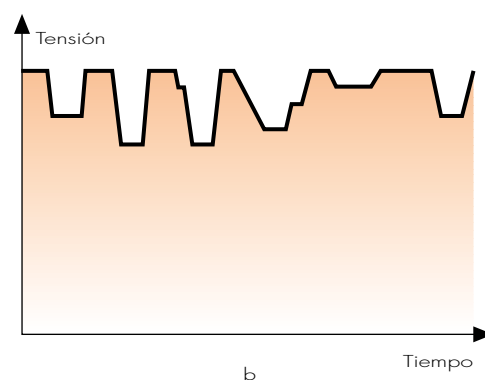
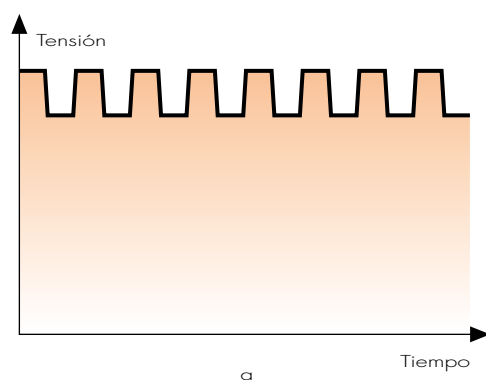
La Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) clasifica las

fluctuaciones de tensión en cuatro tipos:

- **Tipo a:** Variaciones rectangulares de tensión de período constante. Por ejemplo, las ocasionadas por interrupciones de cargas resistivas.
- **Tipo b:** Escalones de tensión que se presentan de forma irregular en el tiempo y cuya magnitud varía tanto en sentido positivo, como negativo.
- **Tipo c:** Cambios en la tensión claramente separados que no siempre llevan aparejados escalones de tensión. Por ejemplo, las originadas por acoplamientos de cargas no resistivas.
- **Tipo d:** Series de fluctuaciones esporádicas o repetitivas. Por ejemplo, las producidas por cambios cíclicos o aleatorios de cargas.

Figura 4.1

Tipos de fluctuaciones de tensión



1 2 "flicker"

El "flicker" es la percepción de la variación de la luminosidad de una lámpara, ocasionada por fluctuaciones de tensión en la red de alimentación eléctrica. Origina en quien lo percibe una sensación desagradable.

El "flicker" depende fundamentalmente de la amplitud, frecuencia y duración de las fluctuaciones de tensión que lo causan. Estas oscilan entre los 0,5 Hz y los 30 Hz de frecuencia.

2 Valores de referencia

2 1 Medida del "flicker": el "flickermetro"

La Unión Internacional de Electrotermia (UIE) ha elaborado un criterio de evaluación de "flicker" y un medidor de "flicker" o "flickermetro" para su aplicación que ha sido adoptado por la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI).

Este medidor permite conocer el nivel de sensación que experimentaría un observador medio en el punto de la red en el que se conecte el medidor. Para ello, se emplea un algoritmo que traduce las fluctuaciones eléctricas existentes en ese punto, en las sensaciones equivalentes que serían percibidas por el sistema ojo-cerebro del observador.

El "flickermetro" proporciona sus medidas en unidades de perceptibilidad (p.u.), siendo el límite admisible de percepción $P = 1$ (p.u.).

2 2 Índices para la evaluación de "flicker"

Hay dos índices básicos que se emplean para evaluar la severidad del "flicker", es decir, la intensidad de la molestia que éste produce, definida de acuerdo con los criterios de la UIE y de la CEI antes mencionados:

- **Pst.** Evalúa la severidad del "flicker" en períodos cortos de tiempo, con intervalos de observación de diez minutos. El valor de Pst se expresa en unidades p.u., de modo que, para valores de Pst superiores a 1, se considera que el "flicker" es perceptible y afecta, por tanto, a la visión.
- **Plt.** Evalúa la severidad del "flicker" a largo plazo, con intervalos de observación de dos horas. Se calcula a partir de doce valores consecutivos de Pst de acuerdo con esta expresión:

$$Plt = \frac{\sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} P_{st\ i}^3}}{12}$$

La evaluación de la severidad del "flicker" se puede hacer a partir de dos criterios basados en las medidas de un día o de una semana, respectivamente. Los resultados se obtienen mediante tratamiento estadístico de los valores registrados en los índices Pst y Plt.

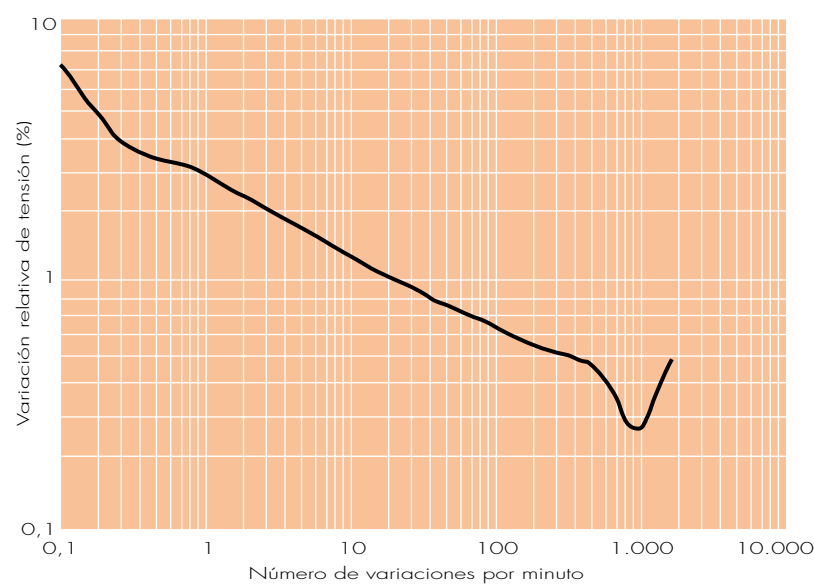
2 3 Niveles de compatibilidad

Por lo que se refiere a los valores que van a ser expuestos a continuación, se considera que el nivel de Compatibilidad Electromagnética (CEM) no debe superar una probabilidad del 95%.

- **Fluctuaciones de tensión.** Los valores del nivel de CEM dependen del valor de la tensión del sistema de distribución. Actualmente, los niveles de CEM están referidos a variaciones de tensión rectangulares con diferentes tasas de repetición (ver Figura 4.2). Es posible, no obstante, relacionar los efectos de las variaciones de tensión no rectangulares con dicha curva, utilizando un “flickermetro” o los factores de conversión que se indican en la norma UNE 21806-3 ó en la UNE EN 61000-3-3.

Figura 4.2

Niveles de CEM para diferentes tasas de repetición



- **“Flicker”.** La Tabla 4.1 recoge los valores establecidos del índice de severidad del “flicker” en redes de baja, media y alta tensión, tanto para el intervalo de observación base de diez minutos (Pst), como para períodos largos (Plt).

Tabla 4.1

Niveles de compatibilidad de la severidad de “flicker” en redes de distribución

Nivel	Pst (p.u.)	Plt (p.u.)
Baja Tensión	1	0,80
Media Tensión	1	0,80
Alta tensión	0,80 a 0,90	0,65 a 0,80

Con una probabilidad igual o mayor al 95%, los valores reflejados en la Tabla 4.1 no deben ser superados durante un cierto período de tiempo. La normativa vigente no fija aún la duración del mismo, pero en general se recomienda que, como mínimo, sea de una semana.

2 4 Límites de emisión

La empresa eléctrica suministradora, de acuerdo con la normativa correspondiente, señala cuál es el nivel admisible de emisión de fluctuaciones de tensión para los consumidores individuales en el punto de conexión común (PCC) con la red de distribución. Este límite de emisión debe ser igual o menor que los niveles de CEM.

3 Causas que las originan

Las fluctuaciones de tensión son originadas por los receptores conectados a la red cuya demanda de potencia no es constante en el tiempo. En determinadas circunstancias, y dependiendo de su punto de conexión, pueden dar lugar a “flicker”.

Los principales dispositivos perturbadores son de tipo industrial:

- Máquinas de soldadura por resistencia.
- Molinos trituradores.
- Ventiladores de minas.
- Hornos de arco.
- Plantas de soldadura por arco.
- Compresores.
- Laminadoras.
- Máquinas herramientas.
- Cargas controladas por impulsos.

4 Efectos que producen

Las fluctuaciones de tensión pueden afectar a gran cantidad de consumidores que reciben suministro eléctrico de la misma red.

Estas fluctuaciones de tensión no suelen tener una amplitud superior a $\pm 10\%$, por lo que muchos equipos no se ven afectados por ellas. El “flicker”, que no se puede evitar, es el efecto más perjudicial.

Los aparatos que producen mayor “flicker” son:

- las lámparas de incandescencia y de descarga
- los monitores y receptores de televisión.

5 Acciones de prevención y corrección

Como acción preventiva más importante, se puede destacar la determinación de las condiciones de conexión de cargas (ver capítulo 10). Respecto de esta cuestión, se ha establecido un criterio general distribuido en tres etapas, de forma que, cuando las especificaciones requeridas en una de ellas no son

satisfechas, se ha de pasar a la siguiente.

- 1ª Etapa: Aceptación automática. Es el caso general para equipos cuya potencia es inferior a un límite establecido.
- 2ª Etapa: La aceptación depende de las condiciones de entorno en el PCC de la carga que se toma en consideración. Se asigna a cada consumidor conectado en dicho punto una parte de la potencia total disponible, sin que pueda rebasar dicho valor.
- 3ª Etapa: Requiere un estudio particular (por ejemplo, sobre la necesidad de emplear un compensador, etc.). Suele ser el caso de grandes cargas especiales, como los hornos de arco.

Entre las acciones correctoras que se pueden adoptar, cabe citar las siguientes (ver Capítulo 9):

- Aumentar la potencia de cortocircuito del PCC.
- Instalar compensadores que dan lugar a variaciones de signo opuesto a la carga fluctuante, tales como reactancias saturables y condensadores o reactancias controladas por tiristores. Suelen ir acompañados de filtros para armónicos. Es el caso de los SVC¹.
- Arrancar motores con estrella-triángulo o con autotransformador. También se pueden acoplar volantes de inercia.
- Instalar estabilizadores electrónicos o magnéticos de reactancia saturable.
- Conectar condensadores en serie, aumentando así artificialmente la potencia de cortocircuito. Es una solución que se

¹ Compensadores de Reactancia Estática (Static Var Compensators, en terminología anglosajona).

debe adoptar sólo en los puntos de menor tensión de una red.

- Evitar la simultaneidad de pulsaciones de las máquinas de soldadura con circuitos de control adecuados.

Merece una atención especial el caso de los hornos con arco, en los cuales el corrector más gene-

ralizado es el compensador SVC. También presenta ventajas la instalación de reactancias conectadas en serie con el transformador del horno.

Todas estas soluciones pueden servir tanto cuando se proyecta la instalación de un equipo nuevo, como cuando se trata de revisar y mejorar uno ya existente.

6 Referencias técnicas

- "Perturbaciones producidas en las redes de alimentación por los aparatos electrodomésticos y los equipos análogos. Fluctuaciones de tensión". UNE 21803 parte 3, 1990 y erratum 1991.
- "Medidor de "flicker", Especificaciones funcionales y de diseño".. UNE 21868, 1990.
- "Connection of fluctuating loads". UIE, 1988.
- "Connection of distortion loads. An international study". A Robert y J. Marquet. CIRED, 1991.
- "Limitación de fluctuaciones de tensión en las redes eléctricas españolas". G. Vargas y J. Ferrer. UNESA. Grupo de Trabajo de Calidad de Onda, 1992.
- "Compatibility levels for low frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems. EMC Part 2: Environnement. Section 2. CEI 1000-2-2, 1990.
- "Electromagnetic compatibility (EMC). Part 3. Limits-Section3: Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage supply systems for equipment with rated current ≤ 16 A". CEI 1000-3-3, 1994.
- "Assesing power quality with relation to harmonics, flicker and unbalance". A. Robert y J. Marquet. CIGRE. Doc. 36-203, 1992.
- "Guide to quality of electrical supply for industrial installations. Part 1: General introduction to electromagnetic compatibility, types or disturbances and relevant standards". UIE, 1994.
- "Report on EML coordination in electricity supply systems". UNIPEDE. Norcomp 88, Marzo 1994.

Huecos de tensión y cortes breves

1

Definición

2

Valores de referencia

3

Causas que los originan

4

Efectos que producen

5

Acciones de prevención y corrección

6

Referencias técnicas

1 Definición

1 Hueco de tensión

Se dice que ha tenido lugar un hueco de tensión en un punto de la red eléctrica cuando la tensión de una o más fases cae repentinamente por debajo de un límite establecido —generalmente, el 90%— y se recupera al cabo de un tiempo determinado, que oscila entre los 10 milisegundos y varios segundos.

El límite máximo de este período es el punto más controvertido en la definición de hueco de tensión:

- Si se atiende a la causa más típica que lo produce —la aparición y eliminación de faltas—, su duración debiera estar relacionada con el tiempo máximo de permanencia de la falta. Por consiguiente, en el caso de las faltas más habituales, sería razonable establecer ese valor máximo en unos pocos segundos.
- Sin embargo, hay faltas —como las que ocasionalmente se derivan del arranque directo de motores asíncronos— en las que el tiempo de recuperación de la tensión puede llegar a las decenas de segundos. Por ello, algunas definiciones consideran que existe hueco cuando la duración es de hasta un minuto.

1 2 Corte breve de tensión

Se dice que ha tenido lugar un corte breve de tensión cuando se

produce la desaparición total de la tensión de las tres fases durante un tiempo superior a 10 milisegundos e inferior a 1 minuto. Es equivalente a un hueco de tensión que afecte a las tres fases y tenga una profundidad del 100%.

2 Valores de referencia

2 1 Huecos de tensión

Las dos magnitudes que permiten clasificarlos, y que son de gran utilidad a la hora de estimar sus posibles repercusiones y las medidas preventivas que se pueden aplicar, son:

- Profundidad: Valor al que cae la tensión. En función de esta magnitud se suelen hacer tres grupos:

- Entre 10% y 30%
- Entre 30% y 80%
- Superior al 80%

- Duración: Tiempo que tarda en recuperarse la tensión. Se suelen dividir en dos grupos:

- Entre 0,01 segundos y 1 segundo
- Entre 1 segundo y varios segundos

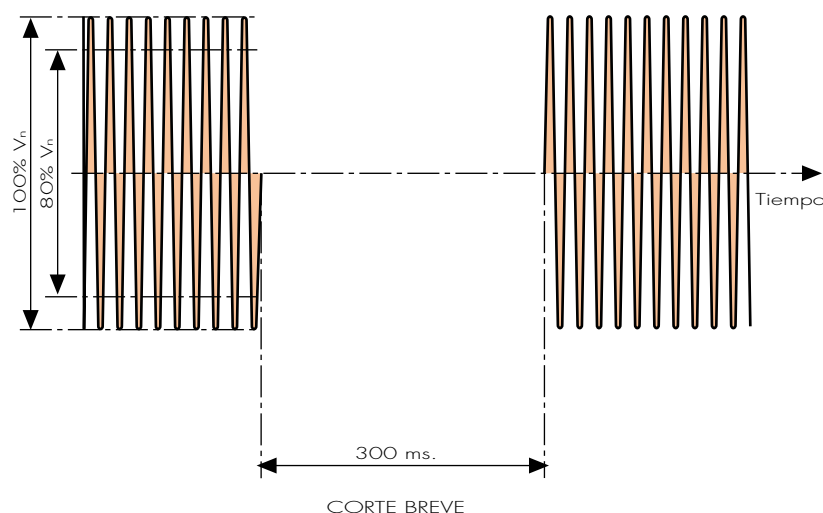
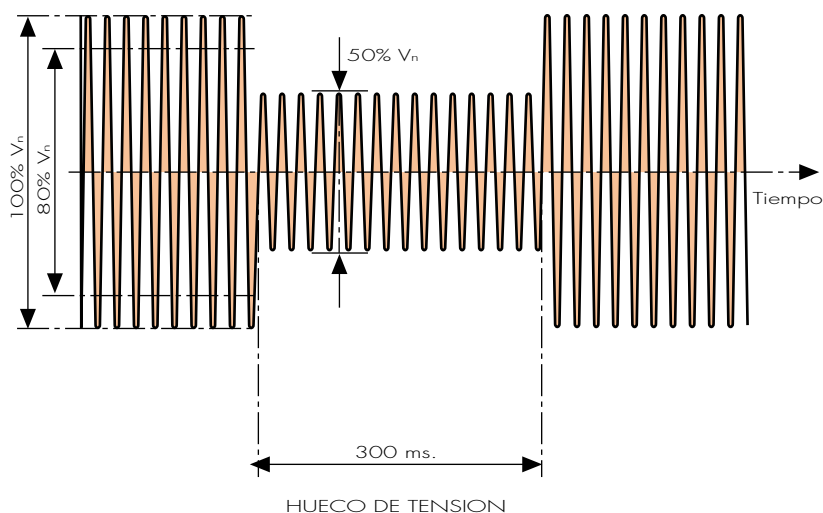
2 2 Cortes breves

Reciben la denominación de cortes breves de corta duración los que no se prolongan más de 0,4 segundos; y cortes breves de larga duración, cuando superan ese límite.

Figura 5.1

Hueco de tensión
y corte breve

Dado que existen aspectos comunes a los huecos de tensión y a los cortes breves, y que tanto sus efectos como las técnicas de inmunización son semejantes, se va a dar a ambas perturbaciones un tratamiento conjunto, simplificación que es aceptable para los fines que persigue la presente publicación.



3 Causas que los originan

Las causas más típicas de los huecos y cortes de tensión son las faltas en la red eléctrica o en las instalaciones de los clientes.

Las corrientes de cortocircuito que se originan en una falta producen la caída de la tensión en una o más fases durante el tiempo que aquella permanece.

Esta caída de tensión se manifiesta en toda la red, pero su magnitud será mayor a medida que la proximidad a la falta sea mayor.

El origen de las faltas puede ser:

- Interior al sistema eléctrico: fallos de aislamiento, falsas maniobras, etc.
- Exterior al sistema: descargas atmosféricas, excavadoras, etc.

Por ello, los huecos y cortes de tensión tienen un carácter fundamentalmente aleatorio. No es posible su eliminación total, ni tampoco reducirlos a partir de un cierto límite.

3 1 Huecos de tensión

Su origen se encuentra en las faltas producidas en elementos de la red suficientemente alejadas del punto de conexión del cliente.

3 2 Cortes breves

Su origen se encuentra en faltas producidas en la propia línea de suministro de electricidad a la instalación receptora.

4 Efectos que producen

Los efectos de los huecos y de los cortes breves de corta duración son similares, mientras que los de los cortes breves de larga duración son diferentes.

Se señalan a continuación las repercusiones de unos y otros sobre diversos equipos.

4.1 Motores asíncronos

• Sobre el accionamiento:

Cuando se produce un hueco de tensión, disminuye el par motor, que es aproximadamente proporcional al cuadrado de la tensión, dando lugar a una ralentización —que se prolonga hasta que se recupera la tensión— o, incluso, a la propia parada del motor.

Cuanto mayor sea el valor y la duración del hueco, mayor será la ralentización del motor:

- En general, huecos menores de un 30% no originan parada, independientemente de cuál sea su duración, ya que se alcanza en ellos un nuevo equilibrio par motor-par resistente a velocidad inferior.
- Si la profundidad del hueco supera el 30%, se producirá o no parada dependiendo de su duración y de la constante de inercia del motor.

Este proceso tiene lugar de forma simultánea en todos los motores de la instalación industrial afectada por el hueco. Si la duración del hueco es mayor de 1 segun-

do, la corriente de reaceleración de los motores será de orden semejante a la del arranque, es decir, aproximadamente de cinco a seis veces la intensidad nominal. Ello puede dar lugar a un nuevo hueco de tensión que, en el peor de los casos, impediría la reaceleración.

Todo lo anteriormente expuesto es válido para los cortes breves de corta duración, con la única particularidad de que en éstos el fenómeno será más acusado por la desaparición de las tres tensiones.

En el caso de los cortes breves de larga duración, el motor puede llegar a pararse.

• Sobre el control:

- Mediante contactores en alterna.** En su variante más simple y extendida, al poner en marcha el motor, se actúa sobre un contactor, que se autoalimenta. Si la tensión se sitúa por debajo de un determinado nivel durante el funcionamiento normal del motor, el contactor cae y hay que reponerlo manualmente.
- Mediante interruptores y relés de mínima tensión.** Para evitar que tenga lugar el arranque de la instalación entera cuando vuelve la tensión tras un cero, se suele dotar a ésta de relés de mínima tensión o de bobinas tensión nula, que desconectan motores en función de la profundidad y duración del hueco.

En caso de cortes breves de corta duración, el proceso sería el mismo. En los de larga duración, el relé de mínima tensión actúa con toda seguridad.

4 2 Motores síncronos

- **Efectos sobre el accionamiento.**

Cuando se produce un hueco de tensión, disminuye el par motor, que es proporcional a la tensión, y puede llegar a caer fuera de sincronismo si su duración es elevada y la inercia del motor, pequeña.

La probabilidad de que esto ocurra no es alta, a no ser que el hueco supere el 50%, dada la gran masa inerte que estos motores generalmente poseen y sus posibilidades de sobreexcitación. Sin embargo, si se produce, sus consecuencias suelen ser importantes.

En cortes breves de larga duración, tendría lugar la parada del motor.

- **Efectos sobre el control.**

Estos motores suelen disponer de interruptor y relé de mínima tensión y, por lo tanto, son aplicables las mismas consideraciones expuestas en los motores asíncronos.

4 3 Motores de continuidad alimentados por tiristores

Cuando el motor está alimentado por un puente de rectificación controlada, con inversión de marcha mediante frenado por recuperación, se pueden producir problemas importantes.

En tal caso, si se quiere cambiar el sentido de giro del motor, hay que actuar sobre la intensidad de

alimentación y la corriente de excitación, de forma que el motor, conservando aún su primitivo sentido de giro, actúa así como generador. A continuación, se ralentiza y, posteriormente, el control vuelve a convertirlo en motor, sólo que girando en sentido contrario al inicial.

Si en el tiempo de frenado se origina un hueco de tensión, se produce la fusión de los fusibles de protección de ciertos tiristores.

Lo mismo ocurre si tiene lugar un corte breve de corta duración. Si es de larga duración, la fusión de los fusibles tendrá lugar en los instantes iniciales del proceso.

4 4 Sistemas de control

El control electrónico de procesos actúa en tiempo real. Por consiguiente, los huecos de tensión y los cortes breves de corta duración pueden inducir en ellos órdenes erróneas que alteren el funcionamiento de estos sistemas.

El corte breve de larga duración puede suponer la pérdida de control.

4 5 Ordenadores

Tanto los ordenadores que realizan funciones administrativas, como los de vigilancia y control de procesos industriales, son sensibles a los huecos de tensión, que pueden ocasionar en ellos pérdidas de información o interpretaciones erróneas de órdenes.

5 Acciones de prevención y corrección

Las acciones para hacer frente a los efectos de los huecos de tensión y cortes breves son diferentes según se trate de una instalación nueva que se va a conectar por primera vez o de una que ya está en funcionamiento.

En el primer caso, deberá hacerse un estudio previo para la elección del punto de conexión común más adecuado (ver capítulo 10).

- Si la instalación está en funcionamiento, lo primero que hay que hacer es documentar el problema, obteniendo información sobre:

- El instante en el que ocurren las perturbaciones y su correlación con faltas en la red de suministro o en las instalaciones del cliente.
- Tipo de perturbación interna que se produce.
- Registro de perturbaciones, a fin de identificar las faltas que originan los huecos y su duración.
- Pérdidas de producción o de otro tipo.
- Grado de insensibilización.

- A partir de los datos anteriores, se ha de evaluar la situación y definir las medidas que pueden adoptar la empresa suministradora y el cliente.

5¹ Medidas que puede adoptar la empresa suministradora

- Elevar la potencia de cortocircuito de la zona. Con ello, se

consigue disminuir el área de influencia de la falta, reduciendo así el número y profundidad de los huecos.

- Reducir el número de huecos:

- Actuando sobre las instalaciones en las zonas con alto índice de faltas; por ejemplo, resolviendo problemas de contaminación, nieblas, mal estado de los materiales, etc.
- Comprobando que los sistemas de protección contra las sobretensiones atmosféricas son adecuados.

- Reducir la duración de los huecos comprobando que los tiempos de eliminación de faltas son normales.
- Operar el sistema separando, si es posible, el punto de conexión del cliente, de las zonas que están muy expuestas a faltas; por ejemplo, usando transformadores independientes.

5² Medidas que puede adoptar el cliente

- Reducir en lo posible el tiempo de eliminación de las faltas.
- Prever que el sistema de protecciones soporte la reaceleración.
- Si posee una fuente de generación propia:

- Disponer los servicios prioritarios sobre la barra que, desde el punto de vista eléctrico, esté más próxima a ella. Se consigue así disminuir la profundidad de los huecos.
- Prever sistemas de desacoplamiento de consumos prioritarios sobre la generación propia en caso de perturbación. Esto puede reducir la duración de

los huecos, si bien conlleva los riegos asociados al aislamiento de la planta.

- Conmutar a un suministro alternativo. Se produce un paso por cero que puede ser inmunizado. Tiene la ventaja adicional de hacer frente a los cortes breves de larga duración.
- Inmunizar la instalación.

5³ Medidas de inmunización de las instalaciones del cliente

La inmunización de una instalación no es una medida que pueda aplicarse a todos los casos. Dado su elevado coste, es necesario valorar su idoneidad caso por caso:

- Para duraciones inferiores a 1 segundo, es económicamente viable, ya que afecta principalmente a los sistemas de control con potencias moderadas.
- Para los huecos superiores a 1 segundo y los cortes breves de larga duración que pueden afectar a una potencia elevada, es mucho más costosa. Sólo se justifica económicamente en aquellas partes de la instalación que tienen potencia reducida y cuya permanencia es de gran importancia, como, por ejemplo, los centros de proceso de cálculo y sistemas de control.

Por su relevancia técnica y económica, se enumeran a continuación los medios de inmunización más comunes de las instalaciones de los clientes (ver Capítulo 9).

- Sistemas de retención o reen-ganche de contactores.

Resultan indicados para cargas menores a unos VA y para huecos o cortes breves de menos de 1 segundo.

- Conjunto motor de alterna–alternador con volante de inercia. Es apropiado para cargas inferiores a 500 kVA y para huecos o cortes breves de menos de 0,5 segundos.
- Fuente continua con condensador de almacenamiento. Es eficaz para cargas menores a unos VA y para huecos o cortes breves inferiores a 1 segundo.
- Fuente continua con batería de almacenamiento. Es indicada para cargas menores a 300 kVA.
- Conjunto motor de alterna–alternador con volante de inercia y motor térmico de emergencia. Es adecuado para cargas de menos de 500 kVA. Cuando entra el motor térmico de emergencia, puede producirse un paso por cero de corta duración.
- Conjunto rectificador-batería-motor de corriente continua-alternador con volante de inercia. Resulta indicado para cargas menores de 500 kVA.
- Sistemas de alimentación ininterrumpida (S.A.I.). Son eficaces para cargas menores de 1.000 kVA.
- Conmutación a alimentación de socorro. Indicada para cargas inferiores a 1.000 kVA. Implica un paso por cero de 0,4 segundos y la disponibilidad de alimentación indefinida desde la nueva fuente.
- Grupo de socorro diésel. También resulta apropiado para cargas de menos de 1.000 kVA.

5 4 Aplicación de las medidas de inmunización

La aplicación de los sistemas de inmunización a algunos de los receptores más sensibles presenta las siguientes características:

- **Contactores.** En el caso más habitual, el contactor cae inmediatamente con el hueco y permanece abierto hasta el rearme manual, pero pueden darse también otras variantes:
 - El contactor permanece cerrado del orden de un 1 segundo tras la aparición del hueco. Si al cabo de ese tiempo la tensión no se recupera, cae definitivamente.
 - El contactor cae inmediatamente con el hueco y cierra si una tensión apropiada vuelve antes de un tiempo previamente establecido.
 - El contactor cae inmediatamente con el hueco y cierra al cabo de un tiempo preestablecido si en ese instante la tensión es apropiada.
 - La elección de una variante u otra estará en función de que el proceso tenga la inercia suficiente para soportar la falta de alimentación y de que la reace-leración sea asimismo tolerable. Dado que puede acontecer
- **Accionamientos por motor de continua alimentado por rectificadores controlados y con frenado por recuperación.** La inmunización es viable sólo si la duración del hueco es inferior a 1 segundo. Por encima de este nivel, aumentan en exceso las dificultades técnicas y el coste. En este caso, el principio básico de la inmunización es actuar sobre los impulsos de mando de los tiristores, una vez que se ha detectado el hueco, para evitar situaciones de cortocircuito.
- **Ordenadores.** Caben dos estrategias:
 - El propio ordenador detecta la perturbación, interrumpe el proceso y lo reanuda automáticamente cuando la tensión vuelve a su valor normal.
 - Utilizar sistemas cuya salida de tensión no se vea afectada por huecos.
- **Sistemas de control de procesos.** En este caso es adecuada la segunda estrategia señalada en el punto anterior.

6 Referencias técnicas

- Guide to Quality of Electrical Supply for Industrial Installations. UIE Working Group WG2.
 - Part 1: General Introduction to Electromagnetic Compatibility (EMC). Types of Disturbances and Relevant Standards.
 - Part 2: Voltage Dips and Short Interruptions.

Impulsos de tensión

- 1 Definición
- 2 Valores de referencia
- 3 Causas que los originan
- 4 Efectos que producen
- 5 Acciones de prevención y corrección
- 6 Referencias técnicas

1 Definición

Un impulso de tensión es una variación brusca del valor instantáneo de la amplitud de la tensión. Puede llegar a ser varias veces superior al valor nominal de ésta y su duración oscila entre algunos microsegundos y diez milisegundos, lo que equivale a medio ciclo de la onda senoidal.

Por su amplitud y duración, los impulsos de tensión tienen que ser analizados a partir de valores instantáneos de la amplitud de la onda de tensión y no mediante valores promediados, que son los que habitualmente se utilizan para medir otro tipo de perturbaciones que afectan a la amplitud de la onda.

Los impulsos de tensión suelen aparecer de forma esporádica,

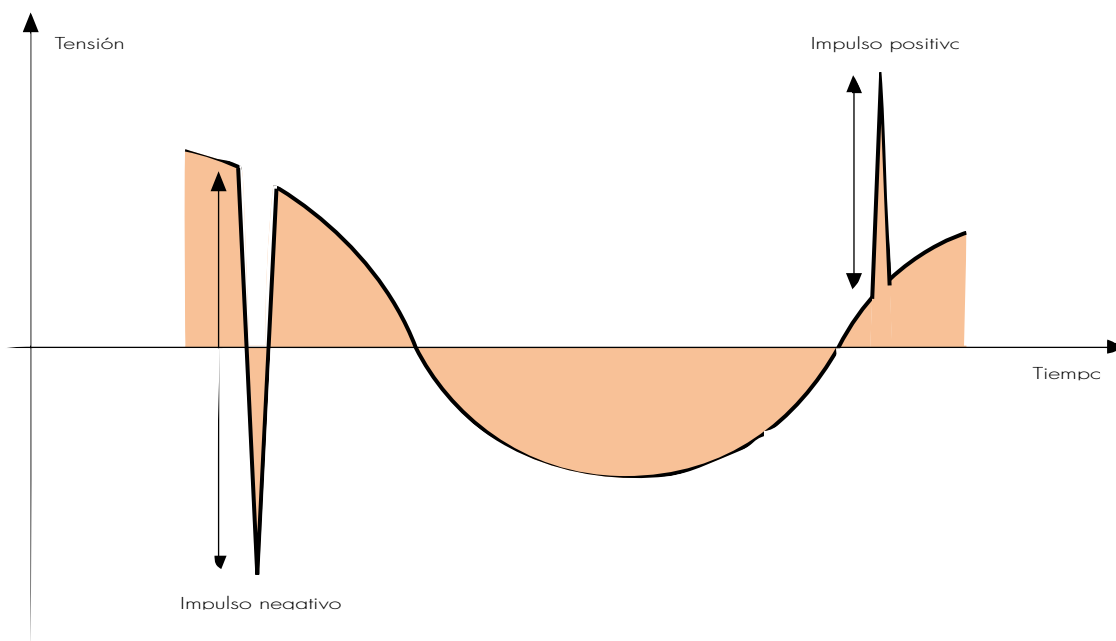
pero es posible también que se repitan a lo largo del tiempo. Pueden manifestarse en cualquier punto de la red. A partir de éste, tienden a desplazarse a lo largo de la misma con la velocidad de propagación de una onda en un medio conductor. Por ello, en la práctica, suele considerarse que aparecen en todos los puntos de dicha red en el mismo instante en el que es generado, aunque con parámetros diferentes, especialmente en lo que se refiere al valor de pico —y, por tanto, a su energía asociada—, que disminuye cuanto más se aleja del punto de generación.

En consecuencia, es posible que ciertos impulsos generados en líneas de alta tensión se propaguen por ellas, se transmitan a través del acoplamiento inductivo de los transformadores y aparezcan, atenuados, en las líneas de tensiones más bajas.

Impulsos
de tensión

Figura 6.1

Impulsos de tensión
positivo y negativo



1 Clasificación

En función del instante de la evolución de la onda de tensión en el que se producen (ver Figura 6.1), pueden ser clasificados en:

- Positivos
- Negativos

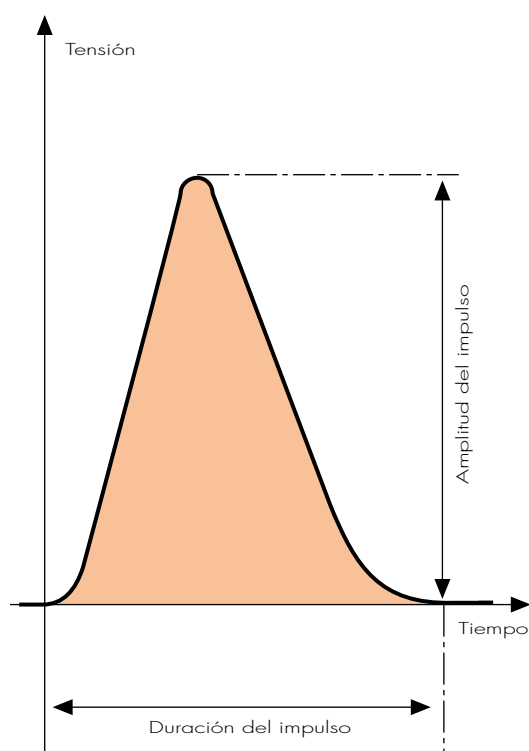
Los efectos de unos y otros son equivalentes.

En función de su forma pueden ser clasificados en

- **Simples.** Presentan un frente de subida y un frente de bajada, a partir del cual, y sin oscilaciones posteriores, la tensión vuelve a su valor normal (ver Figura 6.2).
- **Complejos.** Se caracterizan por un frente de subida, seguido de oscilaciones que van amortiguándose en un determinado periodo de tiempo (ver Figura 6.3)

Figura 6.2

Ejemplo
de impulso simple



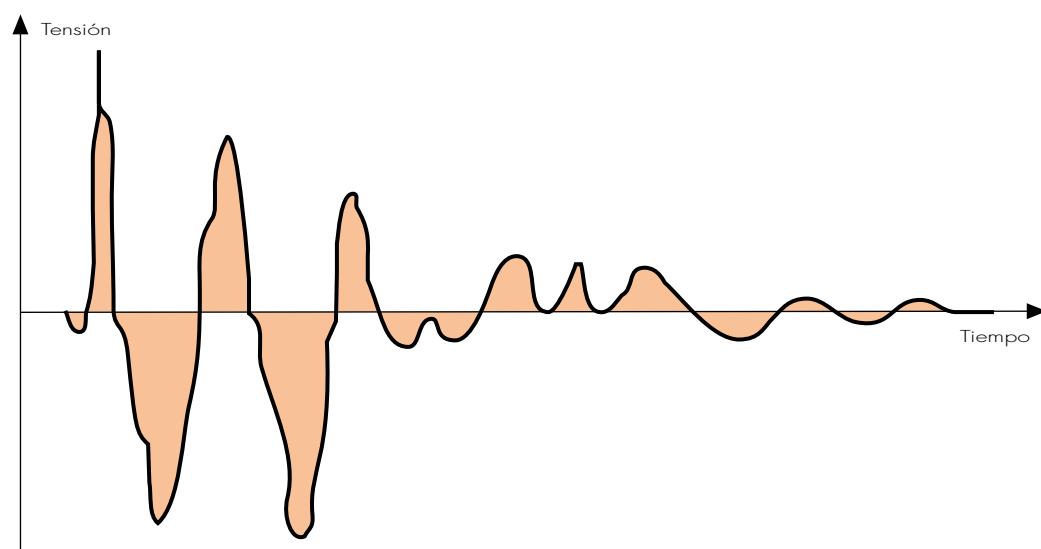
2 Parámetros característicos

Los parámetros que caracterizan un impulso de tensión son los siguientes:

- **Tiempo de subida.** Intervalo de tiempo existente entre el 10% y el 90% de la amplitud máxima del impulso. Es del orden de microsegundos.
- **Tiempo de bajada.** Intervalo existente entre el punto de amplitud máxima del impulso y un valor determinado de su decrecimiento, normalmente el 50%. Es también del orden de microsegundos.

Figura 6.3

Ejemplo
de impulso complejo



- **Duración.** Diferencia absoluta entre los instantes de inicio y final del impulso. Como antes se ha señalado, oscila entre varios microsegundos y algunos milisegundos.
- **Valor de pico.** Amplitud máxima del impulso. Su orden de magnitud es de 1 a 5 veces el valor nominal de la tensión.
- **Energía.** Capacidad de disipación de potencia del impulso sobre una impedancia dada. Depende de la duración y del valor de pico.
- **Frecuencia de oscilación.** Frecuencia asociada a la oscilación amortiguada de un impulso de forma compleja. Se sitúa por encima de 1 kHz.

2 Valores de referencia

En la Tabla 6.1 se recogen los impulsos de tensión más habituales en las redes de distribución de alta y baja tensión y los valores de referencia de sus principales parámetros que son medibles.

3 Causas que los originan

En función de su origen, se pueden distinguir dos tipos de causas o fuentes generadoras de impulsos de tensión:

- Fuentes de generación de impulsos exteriores al sistema eléctrico.
- Fuentes de generación de impulsos interiores del sistema eléctrico.

3.1 Fuentes de generación de impulsos exteriores al sistema eléctrico

La fuente principal es la descarga atmosférica o rayo.

Puede provocar impulsos, básicamente:

- Por el impacto directo del rayo en la red eléctrica
- Por la inducción producida por la descarga a tierra de un rayo en las proximidades de la red eléctrica.

Tabla 6.1

Caracterización cuantitativa de los impulsos de tensión

Nivel de tensión	Causa	Duración	Frecuencia de oscilación	Valor de pico
Alta (1 kV < V < 36 kV)				
	Actuación elementos de corte	$t > 100 \mu\text{seg}$	$f < 10 \text{ kHz}$	(*)
	Transferidas de un nivel superior de tensión	$t > 100 \mu\text{seg}$	$f < 10 \text{ kHz}$	(*)
	Descarga atmosférica	$1 \mu\text{seg} < t < 100 \mu\text{seg}$	$10 \text{ kHz} < f < 1 \text{ MHz}$	(*)
	Reencendido	$1 \mu\text{seg} < t < 100 \mu\text{seg}$	$10 \text{ kHz} < f < 1 \text{ MHz}$	(*)
Baja (< 1 kV)				
	Actuación elementos de corte	$t > 100 \mu\text{seg}$	$f < 10 \text{ kHz}$	$V_p < 1 \text{ kV}$
	Transferidas de un nivel superior de tensión	$t > 100 \mu\text{seg}$	$f < 10 \text{ kHz}$	$V_p < 1 \text{ kV}$
	Descarga atmosférica	$1 \mu\text{seg} < t < 100 \mu\text{seg}$	$10 \text{ kHz} < f < 1 \text{ MHz}$	$V_p < 5 \text{ kV}$
	Reencendido	$1 \mu\text{seg} < t < 100 \mu\text{seg}$	$10 \text{ kHz} < f < 1 \text{ MHz}$	$V_p < 5 \text{ kV}$

(*) Limitado por el nivel de protección de la red.

Los parámetros de los impulsos generados por fuentes externas —es decir, los impulsos “de tipo rayo”— tienen magnitudes diferentes según sea la forma en la que hayan sido ocasionados. En general, son de mayor energía los originados por el impacto directo.

La probabilidad y la frecuencia de aparición de estos impulsos depende de las características geográficas de cada zona, definidas por los niveles isoceráunicos, que determinan la frecuencia de las descargas atmosféricas.

3 ² Fuentes de generación de impulsos interiores del sistema eléctrico

Existen elementos en la red eléctrica y en los receptores conectados a ella que pueden generar impulsos de tensión. Las fuentes más habituales son:

- **Actuación de un elemento de corte (operación de conexión o desconexión).** El impulso de tensión se produce como consecuencia de un cambio brusco de la intensidad que circula por la red derivado de la conexión o desconexión de cargas. En los casos de desconexión, se pueden generar impulsos de forma compleja cuando en el elemento de corte se producen “reigniciones” en la extinción del arco eléctrico. Por ejemplo, se producen impulsos en la:

—**Conexión (“energización”) y desconexión de líneas eléctricas mediante seccionadores o interruptores.** El impulso es atribuible a la existencia de las inductancias equivalentes de las líneas eléctricas.

—**Conexión y desconexión de transformadores.** El impulso de tensión se produce como resultado de la existencia de un núcleo magnético.

—**Conexión de baterías de condensadores.** Se utilizan habitualmente para regular la tensión en las redes eléctricas, corregir el factor de potencia, etc. Su “energización” ocasiona impulsos de tensión a consecuencia de las características transitorias de la carga de un condensador.

—**Conexión y desconexión de cargas.** Ciertos receptores —incluidos electrodomésticos tales como motores, lámparas de descarga, etc.— pueden generar impulsos de tensión a causa de sus características técnicas.

- **Fusión de fusibles.** Los fusibles de limitación de corriente generan impulsos de tensión al actuar, debido a la inductancia equivalente de la red que protegen.
- **Conmutaciones de convertidores electrónicos de potencia.** Generan impulsos de tensión periódicos, al producirse cortocircuitos momentáneos en el proceso de conmutación, seguidos de un rápido cambio en la tensión.

Los parámetros de los impulsos de tensión generados por cada una de estas fuentes son característicos, de modo que es posible asociar la forma del impulso a su fuente de origen. En general, tienen una energía superior a los de tipo rayo, ya que, aunque su valor de tensión de pico es menor, su duración suele ser mayor.

4 Efectos que producen

Los impulsos de tensión pueden afectar a todos los elementos del sistema eléctrico, tanto redes como receptores. Su consecuencia más directa es la aparición, en la mayoría de los casos, de una sobretensión cuyos efectos negativos dependerán de la magnitud de la misma.

4 1 Efectos sobre las redes eléctricas y equipos asociados

Los niveles de aislamiento dieléctrico que incorporan actualmente los diseños de las redes y equipos asociados permiten que éstos soporten sin daño los impulsos de tensión previsibles en función de su localización geográfica y de sus propias características técnicas. Así ocurre, entre otros, con los siguientes elementos:

- Cables
- Aisladores en general
- Condensadores
- Transformadores
- Interruptores

Estos y otros elementos de la red tienen asignado un límite máximo admisible de sobretensión transitoria, denominado habitualmente “tensión de choque”, que se obtiene a partir de ensayos. El grado de cumplimiento de estos límites, mediante una adecuada coordinación de los niveles de aislamiento en los diferentes estados de la red, determinará que estos equipos sean más o menos inmunes a los impulsos de tensión.

4 2 Efectos sobre los receptores

Los nuevos equipos que aparecen en el mercado incluyen dispositivos electrónicos, fabricados con elementos semiconductores, lo que hace que presenten un bajo nivel de inmunidad¹ frente a los impulsos de tensión.

Los efectos de este tipo de perturbaciones sobre los receptores pueden ser clasificados en función del riesgo de que éstos sufran averías o anomalías de funcionamiento.

• Receptores con riesgo de avería.

Básicamente, son los equipos que incorporan semiconductores de potencia, por ejemplo:

- Rectificadores con diodos
- Controladores de velocidad de motores mediante tiristores
- Controladores de velocidad mediante Triacs
- Controladores de velocidad mediante GTO's²

Estos receptores pueden sufrir daños por impulsos de tensión del orden de nanosegundos. La probabilidad de que se produzcan averías depende de diversos factores, entre ellos:

- Amplitud del impulso
- Duración del impulso
- Polaridad
- Características de la red a la que están conectados

• Receptores con riesgo de anomalías de funcionamiento.

Son, fundamentalmente, receptores con circuitos electrónicos para señales de baja potencia.

¹
Nivel de inmunidad: aptitud de un receptor para funcionar sin degradación de calidad pese a la presencia de perturbaciones

²
Gate Thyristor Off (Tiristor con descebado controlado por la puerta o rejilla).

En general, no están conectados directamente a la red de baja tensión, sino que se acoplan mediante una conversión corriente alterna/corriente continua. Esta puede llegar a transmitir los impulsos de tensión que llegan a través de la red y afectar a los circuitos electrónicos, alterando su funcionamiento.

Algunos de los receptores más sensibles son los siguientes:

—**Sistemas digitales en general.**

Estos receptores (ordenadores, sistemas controlados por microprocesadores, etc.) pueden sufrir alteraciones en los programas, almacenamiento incorrecto de datos en la memoria, etc.

—**Sistemas de control.** Cuando están contruidos con microprocesadores, se pueden producir rupturas en la función de control.

—**Instrumentación.** Es posible la generación de indicaciones incorrectas.

—**Alarmas y sistemas de disparo.** Pueden actuar de manera no deseada.

—**Equipos de control de velocidad de motores.** Cuando el control se realiza mediante semiconductores de potencia, la velocidad puede verse alterada de forma involuntaria.

5 Acciones de prevención y corrección

Para asegurar la compatibilidad electromagnética (CEM) de los receptores frente a los impulsos de tensión, se pueden seguir tres vías:

- **Reducir la emisión de impulsos en la fuente de perturbación.**

Esto resulta imposible en el caso de las fuentes externas e, incluso, muy difícil en el caso de las internas. En cualquier caso, no se pueden fijar niveles de CEM desde el punto de vista de la emisión.

- **Atenuar su propagación.**
- **Aumentar la inmunidad de los receptores.** Pueden fijarse niveles de CEM desde el punto de vista de la inmunidad (tensión de pico máxima, energía asociada a los impulsos, etc.)

Entre las acciones de prevención y corrección, cabe distinguir las que puede adoptar la empresa suministradora y las que pueden aplicar los consumidores.

5.1 Acciones que puede adoptar la empresa suministradora

En el diseño de las instalaciones del sistema eléctrico, las empresas suministradoras adoptan fundamentalmente dos tipos de medidas preventivas:

- Una adecuada coordinación de los niveles de aislamiento de los elementos que integran las redes.
- La instalación de dispositivos que extinguen los impulsos de tensión en puntos cercanos a la fuente de generación. Los más habituales son:

- Pararrayos (autoválvulas)
- Explosores
- Conductores de tierra equipotenciales sobre apoyos de circuitos aéreos de alta tensión

Cabe advertir, no obstante, que estas medidas permiten atenuar la propagación de impulsos de

tensión hacia las instalaciones de los clientes, pero no pueden garantizar su eliminación total, ni la inmunidad. Siempre existirá una posibilidad de penetración de los impulsos de tensión generados en puntos externos a la instalación del consumidor, en especial como consecuencia de inducciones provocadas por descargas atmosféricas.

5.2 Acciones que puede adoptar el cliente

En primer lugar, hay que identificar los receptores que son sensibles a los impulsos de tensión. A continuación, es necesario anteponer, a sus circuitos de alimentación, dispositivos que

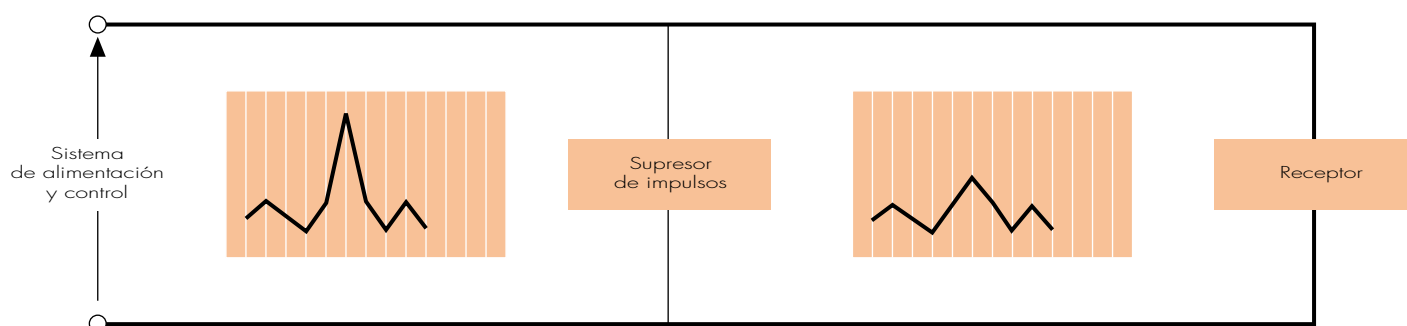
absorban los impulsos de tensión y eviten su propagación.

Entre los más habituales cabe mencionar el **supresor de impulsos de tensión** (ver Capítulo 9). A la hora de elegir el supresor más adecuado para cada instalación, es preciso tener en cuenta una serie de parámetros característicos:

- Tensión nominal de funcionamiento
- Tiempo de respuesta. El orden se sitúa entre picosegundos y microsegundos
- Intensidad de pico del impulso de corriente admisible
- Tensión en los extremos del supresor durante la disipación. Su orden de magnitud es muy inferior al nominal.

Figura 6.4

Esquema de funcionamiento de un supresor de impulsos

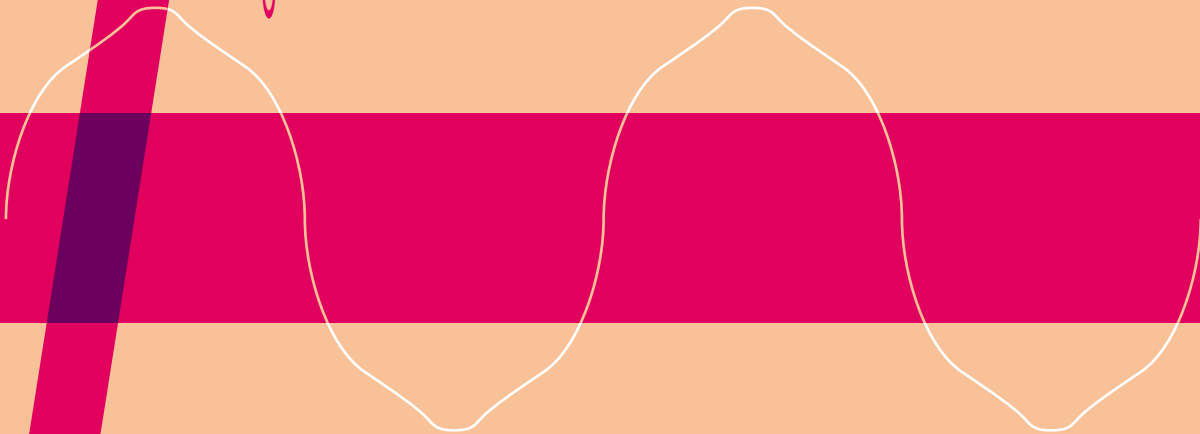


6 Referencias técnicas

- "Sobretensiones en las Redes de Alta Tensión". ASINEL-Mayo 1985.
- "Transients in Low - Voltage Supply Networks" - IEEE - Transaction Electromagnetic Comppability. Vol. EMC 29 NO 2, May 1987.
- "Recommended Practice on Surge Voltages in Low - Voltage AC Power Circuits" (WG 3.6.4 - IEEE - Jun 86).
- "Compabilité électromagnétique (CEM), Partie 2: Environnement. Section 12. Niveaux de compabilité pour les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d'alimentation moyenne tension". Publicación básica en CEM. Futura Norma Internacional CEI 1000-2-12/1995. Futura Norma Europea ENV 61000-2-2/1995.
- UIE (Guide on EMC) "Guide to Quality of Electrical Supply for Industrial Installations". Part 6 - Transients.

Distorsión armónica

- 1 Definición
- 2 Valores de referencia
- 3 Causas que la originan
- 4 Efectos que produce
- 5 Acciones de prevención y corrección
- 6 Referencias técnicas



1 Definición

Se dice que existe **distorsión armónica** cuando la onda sinusoidal, prácticamente pura, que generan las centrales eléctricas sufre deformaciones en las redes de alimentación a los usuarios.

Para cuantificar el grado de deformación de una onda de tensión o de intensidad que no es sinusoidal pura –aunque sí periódica, con 50 Hz de frecuencia–, se recurre a su análisis frecuencial. Este se lleva a cabo normalmente mediante la transformada rápida de Fourier, un algoritmo de cálculo que nos proporciona los contenidos de las diferentes ondas sinusoidales puras que componen la onda deformada. Estos contenidos se refieren a:

- La componente fundamental de la onda (50 Hz de frecuencia).
- Las componentes de frecuencias armónicas (múltiplos de 50

Hz), que reciben la denominación de armónicos de tensión o de intensidad. Su presencia debe limitarse.

Asimismo, aparecen en las redes otras componentes de la onda de tensión que se denominan interarmónicos, cuyas frecuencias no son múltiplos enteros de la fundamental. Estos interarmónicos se presentan tanto a unas ciertas frecuencias como en forma de espectro de banda ancha. Son de poca importancia, por lo que generalmente no se les tiene en cuenta.

A los armónicos se les designa normalmente por su orden, un número que resulta de la relación existente entre su propia frecuencia y la de la componente fundamental.

En la Figura 7.1 se representa una onda de tensión de 50 Hz deformada que contiene únicamente:

- Componente fundamental
- Armónico de orden 5

Los contenidos o tasas de los diferentes armónicos de tensión que constituyen una onda deformada se expresan en forma de porcentaje respecto de la componente fundamental, de acuerdo con la siguiente relación:

$$u_n (\%) = 100 \frac{U_n}{U_1}$$

En esta expresión, U_n es la amplitud del armónico de tensión de orden n y U_1 , la amplitud de la componente fundamental de la onda de tensión.

Distorsión armónica

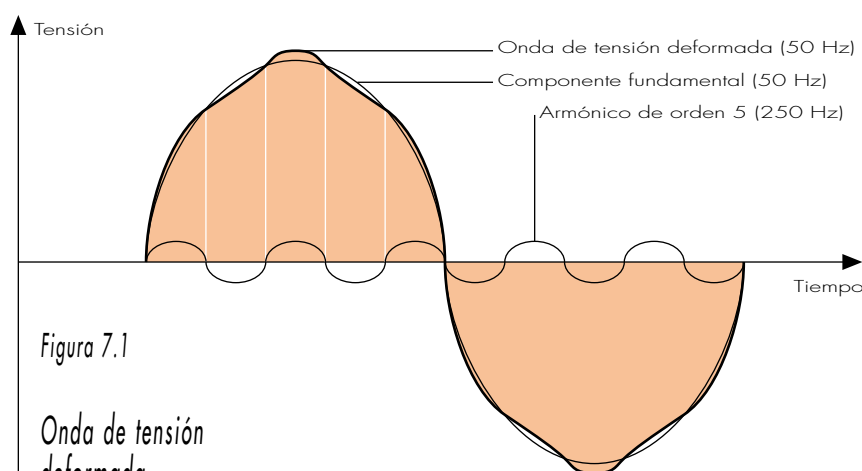


Figura 7.1

Onda de tensión deformada y sus componentes

2 Valores de referencia

2.1 Evaluación

En relación con los armónicos, se han definido tasas que no deben ser sobrepasadas, en el tiempo, en un determinado porcentaje:

- Tanto la normativa internacional como la española establecen unas tasas para cada armónico cuya probabilidad de no ser sobrepasadas ha de ser, como mínimo, del 95%.
- También se ha establecido una tasa de distorsión total que tiene en cuenta simultáneamente todos los armónicos de tensión existentes. La probabilidad de que no sea sobrepasada en el tiempo ha de ser también, como mínimo, del 95%.

Esta tasa de distorsión total se expresa en forma de porcentaje respecto de la componente fundamental a partir de la siguiente fórmula, en la cual se tiene en cuenta hasta el armónico de orden 25¹:

$$D_u (\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{25} U_n^2}}{U_1}$$

O, lo que es igual:

$$D_u (\%) = \sqrt{\sum_{n=2}^{25} u_n^2}$$

El conjunto de las tasas mencionadas constituye el nivel de compatibilidad electromagnética (nivel de CEM) para distorsión armónica. Existen niveles de CEM para las redes de alta, media y baja tensión.

Estos niveles de CEM son valores de referencia, definidos para conseguir una coordinación entre equipos perturbadores y equipos susceptibles, que se supone cubre el 95% de los casos posibles, tanto desde el punto de vista del tiempo, como del espacio.

A fin de asegurar que los niveles de CEM fijados para las redes no sean superados por los suministros a usuarios que poseen equipos perturbadores, las empresas eléctricas establecen límites para las tasas de cada armónico que puede generarse y para la tasa de distorsión total. El conjunto de estas tasas constituye el límite de emisión para la distorsión armónica, cuyos valores están normalmente por debajo del nivel de CEM del que se trata.

La propagación de los armónicos en un sistema eléctrico se produce desde el nivel de tensión en el que han sido generados, a todos los demás, tanto superiores como inferiores. Por ello, antes de aceptar la conexión a la red de nuevos suministros a usuarios que poseen equipos perturbadores, las empresas eléctricas hacen una evaluación para comprobar que la emisión a la red de la nueva perturbación respeta los límites permitidos. De esta forma, se asegura con un alto grado de probabilidad –no inferior al 95%– que los niveles de CEM fijados no serán superados y que, por tanto, los aparatos y demás elementos del sistema funcionarán de manera satisfactoria en su entorno electromagnético, soportando sin alteraciones en su funcionamiento la perturbación existente.

¹ En la Comisión Electrotécnica Internacional, se toma en consideración hasta el armónico de orden 40.

2 Niveles de referencia

Los niveles de referencia fijados para distorsión armónica —es decir, los valores a los que pueden estar sometidos aparatos, dispositivos y demás elementos de un sistema eléctrico sin sufrir alteraciones en su funcionamiento— son los niveles de CEM para alta, media y baja tensión que se señalan en la Tabla 7.1.

A partir de estos niveles de CEM, se establecen los límites de emisión para las tasas porcentuales de cada uno de los armónicos que puede aparecer en las instalaciones de los usuarios. A título orientativo, se consideran límites aceptables:

- En **alta tensión**, los que no superen el 90% del correspondiente nivel de CEM.

- En **media tensión**, están situados entre el 60% y el 80% para los armónicos característicos, es decir, los de orden 5, 7, 11, 13, ..., etc.
- En **baja tensión**, la limitación de los armónicos se establece de forma individual en los propios receptores, que deben estar fabricados de acuerdo con la norma CEI 1000-3-2 (EN 61000-3-2).

3 Causas que la originan

Se puede considerar que, en su mayor parte, los equipos y elementos que componen los sistemas de distribución de energía eléctrica son lineales. En otras palabras, que su característica de intensidad/tensión se mantiene constante.

Tabla 7.1

Niveles
de CEM para las
tasas de los
armónicos de tensión

Armónicos	Orden del armónico (n)	Tasa del armónico (%)	
		AT (100 kV ≥ U > 30 kV)	MT (30 kV ≥ U ≥ 1 kV) y BT
Impares no múltiplos de 3	5	2,0	6,0
	7	2,0	5,0
	11	1,5	3,5
	13	1,5	3,0
	17	1,0	2,0
	19	1,0	1,5
	23	0,7	1,5
	25	0,7	1,5
	> 25	0,2 + 0,5 × 25/n	0,2 + 1,3 × 25/n
Impares múltiplos de 3	3	2,0	5,0
	9	1,0	1,5
	15	0,3	0,3
	21	0,2	0,2
	> 21	0,2	0,2
Pares	2	1,5	2,0
	4	1,0	1,0
	6	0,5	0,5
	8	0,2	0,5
	10	0,2	0,5
	12	0,2	0,2
	> 12	0,2	0,2
Tasa de distorsión total (%)		8,0	3,0

No obstante, hay algunos equipos que tienen características no lineales, es decir, cuya intensidad demandada no es sinusoidal pura y sí, por tanto, una onda deformada. Estos equipos emiten armónicos a la red general de alimentación eléctrica en el punto de conexión común (PCC).

Las principales fuentes de intensidades armónicas son:

- **Receptores de uso industrial.**

Entre ellos cabe destacar:

- Los rectificadores. Son los equipos mediante los cuales se efectúa el proceso básico de conversión de la energía eléctrica, de corriente alterna a corriente continua. El orden de las intensidades armónicas características que produce un rectificador viene dado por la expresión:

$$n = p \cdot m \pm 1$$

En esta expresión, n es el orden del armónico, p es el número de pulsos del rectificador (6 ó 12) y m , un número entero (1, 2, 3,...).

Así pues, los armónicos característicos generados por un rectificador de 6 pulsos serán de orden 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25,..., mientras que los originados por un rectificador de doce pulsos serán de orden 11, 13, 23, 25,...

- Los hornos de inducción y los hornos de arco. Las alteraciones de la onda de tensión más características de estos receptores son, además de la distorsión armónica, las fluctuaciones de

tensión que, en general, producen “flicker” (ver Capítulo 4).

- **Receptores de uso doméstico.**

No poseen una potencia unitaria elevada, pero son en conjunto una importante fuente de armónicos, ya que gran número de ellos suelen ser utilizados simultáneamente durante largos períodos de tiempo. Destacan:

- Los receptores de televisión.
- Los aparatos controlados mediante elementos electrónicos (electrodomésticos, reguladores de luminosidad, etc.).
- Las lámparas fluorescentes.
- Las lámparas de descarga de vapor de sodio.

- **Elementos de instalaciones eléctricas.** Se pueden citar:

- Los equipos de producción, transporte y distribución de energía eléctrica. Son generadores de armónicos en pequeñas proporciones.
- Los dispositivos electrónicos de control y mando que regulan la intensidad absorbida. Estos aparatos interrumpen el paso de ésta en ciertos momentos, produciendo componentes armónicas en el sistema de alimentación.
- Los equipos que poseen núcleos magnéticos. Cuando funcionan en condiciones de saturación, originan armónicos de tensión. Se encuentran, entre ellos, los transformadores de potencia, que sufren situaciones de saturación cuando las tensiones que se aplican son superiores a la nominal. Producen entonces armónicos de tensión que, en su mayor parte, son de orden impar.

Cabe subrayar que los armónicos de tensión de una red pueden verse amplificados, incluso en puntos alejados de la carga perturbadora que los origina, si se dan condiciones de resonancia. Estas pueden aparecer en un punto determinado de la red, cuando son conectados en él condensadores para la corrección del factor de potencia. Las sobretensiones así generadas se producen fundamentalmente a una cierta frecuencia de resonancia, según la expresión:

$$f_r = 50 \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}}$$

donde S_{cc} es la potencia de cortocircuito de la red y Q , la potencia reactiva nominal de la batería de condensadores.

4 Efectos que produce

La magnitud de los problemas que causan las tensiones armónicas en los equipos instalados en un determinado entorno electromagnético depende del valor de las tasas de las componentes armónicas —es decir, del grado de deformación de la onda— y de la sensibilidad de dichos equipos a este tipo de alteraciones. En cualquier caso, la incidencia de la distorsión armónica generada por un receptor perturbador será menor cuanto mayor sea la potencia de cortocircuito en el PCC. Entre los equipos sensibles a los efectos de este tipo de perturbaciones, se encuentran:

- **Los condensadores.** Registran pérdidas adicionales y calenta-

mientos capaces de ocasionar un importante deterioro.

- **Los fusibles de protección.** Pueden sufrir asimismo procesos de calentamiento o, incluso, fusión en situaciones de intensidad normal.
- **Los cables.** Los armónicos de alta frecuencia dan lugar a fallos en el aislamiento, gradientes de tensión elevados y efecto corona.
- **Los balastos inductivos** que se utilizan en el alumbrado con lámparas fluorescentes o con lámparas de descarga. El circuito resonante formado por la inductancia de los mismos y por la capacidad instalada en el sistema de alumbrado ocasiona una amplificación de armónicos que produce, a su vez, un aumento de calor capaz de causar fallos prematuros en estos dispositivos.
- **Los relés de protección.** En ocasiones, pueden actuar de manera intempestiva —es decir, sin que exista falta— como consecuencia del valor de cresta de la onda resultante o de su desfase respecto del paso por cero.
- **Los equipos que están diseñados para utilizar la onda de tensión de la forma más pura posible.** Tal es el caso de los que se emplean en sistemas de comunicaciones, manipulación de datos, control de procesos electrónicos, etc. Sus correspondientes fuentes de alimentación eléctrica están proyectadas de manera que no den lugar a la generación de armónicos hasta un determinado nivel. No obstante, si éste es superado, se pueden producir pérdidas de datos o aparición

de datos erróneos en los ordenadores, operaciones fuera de secuencia en máquinas-herramienta o robots controlados por ordenador, etc.

- Los **equipos de medida de inducción**. La presencia de armónicos en la red produce en ellos pequeños errores de lectura, ya que suelen estar calibrados para una onda sinusoidal pura.
- Los **sistemas de transmisión de señales** por la red. Pueden verse afectados cuando existen componentes armónicas cuya frecuencia es parecida a la de la corriente portadora.
- Las **redes eléctricas**. Los armónicos incrementan sus pérdidas por calentamiento, especialmente en conductores neutros de baja tensión, transformadores y motores, degradando los aislamientos y acortando su vida útil.

5 Acciones de prevención y corrección

En los últimos años, ha tenido lugar un sustancial incremento de la actividad normativa a nivel nacional e internacional para evitar el aumento de la distorsión armónica en las redes eléctricas. Esta normativa establece límites a las tensiones armónicas que se generan como consecuencia de la utilización de equipos y aparatos perturbadores.

Las normas sobre distorsión armónica que están actualmente en vigor o en fase de elaboración afectan directamente a la fabricación de aparatos electrodomésticos y equipos análogos. Les exigen, en concreto:

- Que respeten los límites de emisión individual de perturbación.
- Que funcionen de manera satisfactoria, soportando el nivel de perturbación para el cual hay una elevada probabilidad de que exista CEM entre los aparatos, por un lado, y entre éstos y la red eléctrica, por otro.

Las empresas eléctricas españolas controlan que, en condiciones normales de explotación, los contenidos o tasas de los armónicos no superen los niveles de CEM establecidos. Para ello, elaboran recomendaciones y guías técnicas que proporcionan criterios para la conexión de receptores perturbadores. Estos criterios:

- Establecen cuotas de perturbación permitidas en función de las potencias demandadas y disponibles.
- Tienen en cuenta los efectos de simultaneidad en la utilización de las cargas perturbadoras.
- Toman en consideración el efecto de posible supresión o anulación de armónicos desfasados entre sí.

Cuando se solicita a una empresa eléctrica el suministro de energía a receptores de uso industrial que generan distorsión armónica, se debe determinar el PCC más adecuado, efectuando una evaluación de la emisión de perturbación que se produciría en caso de conexión, a fin de comprobar que no supera los límites permitidos (ver capítulo 10).

En el caso de que, a pesar de todo, los niveles de emisión vayan a ser superados, la empresa eléctrica propone al solicitante

la adopción de medidas correctoras en su instalación. Cabe citar las siguientes:

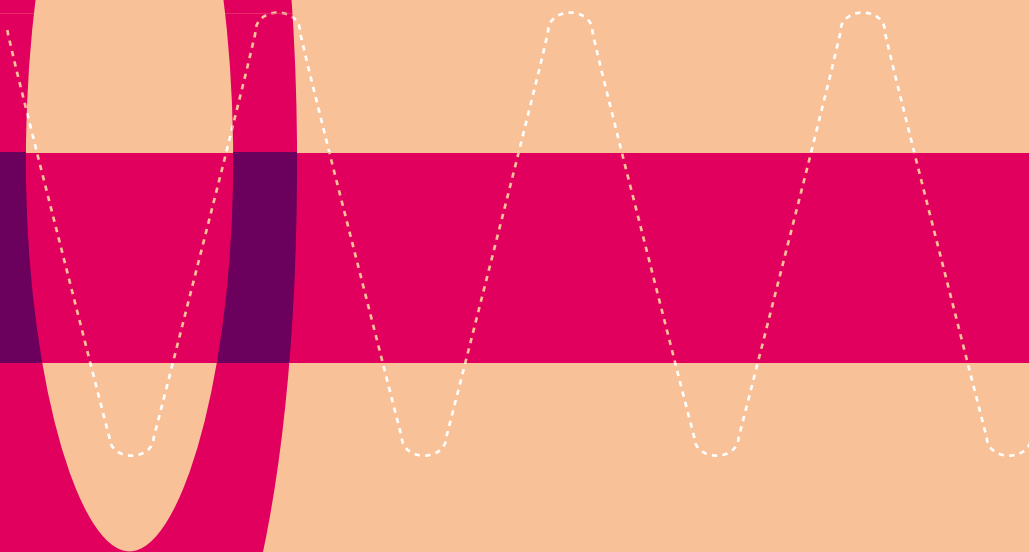
- La utilización de **filtros** (ver Capítulo 9). Es una de las más eficaces.
- La **correcta configuración de equipos de rectificación**, en lo que se refiere al número de pulsos, tipo de control —por diodos o tiristores—, transformadores de alimentación al puente rectificador, etc., de manera que la deformación de la onda de intensidad absorbida no sea importante.
- La **alimentación de la carga perturbadora con un transformador de uso exclusivo**. Así se hace en el alumbrado de vías públicas con lámparas de descarga.
- La utilización de **transformadores con devanados en triángulo** en los equipos que forman parte de la red eléctrica. Contribuye a limitar la aparición de tensiones armónicas homopolares.

6 Referencias técnicas

- “Compatibilité électromagnétique (CEM). Partie 2: Environnement. Section 1: Description de l’environnement. Environnement électromagnétique pour les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d’alimentation”. Informe Técnico CEI 1000-2-1/1990.
- “Compatibilité électromagnétique (CEM). Partie 2: Environnement. Section 2: Niveaux de compatibilité pour les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d’alimentation à basse tension”. Norma Internacional CEI 1000-2-2/1990 (Prenorma Europea ENV 61000-2-2/1993). (Norma Española UNE-ENV 61000-2-2/1994).
- “Compatibilité électromagnétique (CEM). Partie 2: Environnement. Section 12: Niveaux de compatibilité pour les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d’alimentation moyenne tension”. Publicación básica en CEM. Futura Norma Internacional CEI 1000-2-12/1995.
- “Compatibilité électromagnétique (CEM). Partie 3: Limites Section 2: Limites pour les émissions de courant harmonique (courant appelé par les appareils ≤ 16 A par phase)”. Norma Internacional CEI 1000-3-2/1995 (Norma Europea EN 61000-3-2/1995).
- “Limitación de armónicos en las redes eléctricas españolas de alta tensión de distribución”. Guía Técnica para la conexión a la red. UNESA, 1995.

Desequilibrios de tensión

- 1 Definición
- 2 Valores de referencia
- 3 Causas que los originan
- 4 Efectos que producen
- 5 Acciones de prevención y corrección
- 6 Referencias técnicas

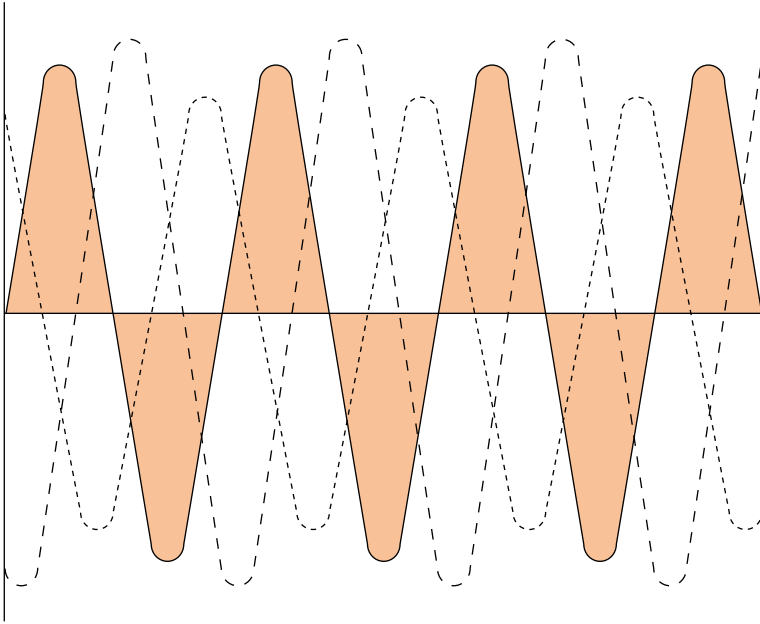


1 Definición

Se dice que existe **desequilibrio de tensión**, o que hay un sistema trifásico desequilibrado o asimétrico, cuando los módulos de los tres vectores representativos de las tensiones o los desfases relativos existentes entre ellos no son iguales.

Figura 8.1

Sistema desequilibrado



El sistema sinusoidal trifásico suele estar representado mediante tres vectores cuyos módulos son iguales, que se encuentran desfasados 120° entre sí y que tienen

una secuencia de fases antihoraria directa.

Para estudiar los desequilibrios de tensión, se descompone dicho sistema, de acuerdo con los teoremas de Fortescue-Storvis, en los tres sistemas siguientes:

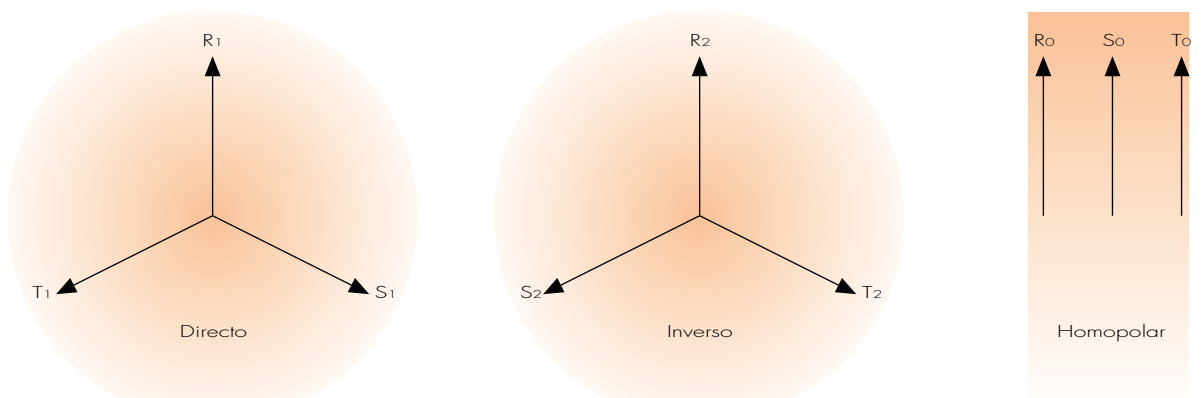
- **Sistema directo.** Se trata de un sistema trifásico equilibrado que es sincrónico con el sistema de origen. Sus componentes son designados mediante U_1 y I_1 .
- **Sistema inverso.** Es un sistema trifásico equilibrado, pero opuesto al sistema de origen. Se designa a sus componentes como U_2 y I_2 .
- **Sistema homopolar**¹. Es un sistema constituido por tres vectores cuyos módulos y dirección son iguales. Sus componentes son representados mediante U_0 y I_0 .

Estas magnitudes pueden ser calculadas, en función del sistema original (U_R , U_S , U_T), mediante las siguientes expresiones matemáticas, en las que $\vec{a}$ es el operador unitario que gira 120° .

Desequilibrios de tensión

Figura 8.2

Sistemas básicos



$$\vec{U}_1 = \frac{1}{3} (\vec{U}_R + \alpha \vec{U}_S + \alpha^2 \vec{U}_T)$$

$$\vec{U}_2 = \frac{1}{3} (\vec{U}_R + \alpha^2 \vec{U}_S + \alpha \vec{U}_T)$$

$$\vec{U}_0 = \frac{1}{3} (\vec{U}_R + \vec{U}_S + \vec{U}_T)$$

2 Valores de referencia

2.1 Cálculo

Las tensiones asimétricas que aparecen en el punto de conexión común (PCC), como consecuencia de la conexión de cargas asimétricas trifásicas o cargas fase-fase, pueden ser calculadas mediante la siguiente expresión:

$$U_{\text{asim}} (\%) = \frac{\text{Potencia aparente de las cargas conectadas}}{\text{Potencia de cortocircuito en el PCC}} 100$$

Veamos, a continuación, cómo se llega a la determinación del grado de asimetría de la tensión u_{asim} . Para una carga monofásica conectada de acuerdo con el esquema de la Figura 8.3, es válida la siguiente expresión, en

la cual I_1 , I_2 son componentes simétricos:

$$I_1 = I_2 = \frac{I_c}{\sqrt{3}}$$

En las redes de media tensión, si llamamos Z_2 a la impedancia del sistema inverso y Z_{cc} a la impedancia de cortocircuito, se cumple normalmente que $Z_2 = Z_{cc}$. Entonces, las tensiones de los sistemas inverso y directo serán:

$$U_2 = I_2 Z_2 = I_2 \frac{U_n^2}{S_{cc}}$$

$$U_1 = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$$

S_{cc} es la potencia de cortocircuito en el punto que se toma en consideración.

En consecuencia, la definición rigurosa del grado de asimetría de la tensión será la siguiente:

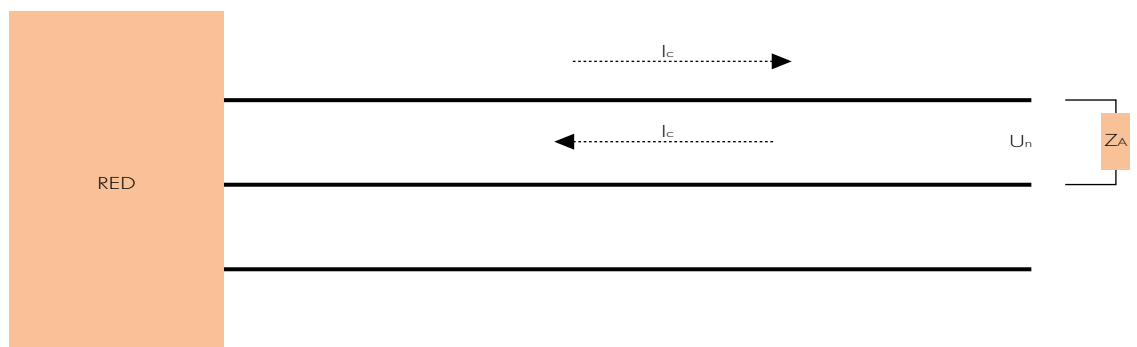
$$U_{\text{asim}} (\%) = \frac{\text{Tensión del sistema inverso } U_2}{\text{Tensión del sistema directo } U_1} 100$$

$$= \frac{U_2}{U_1} 100$$

Sustituyendo en esta expresión los valores anteriormente hallados, se

¹
No se toma en consideración el sistema homopolar en el caso de cargas monofásicas entre dos fases

Figura 8.3
Conexión de cargas monofásicas



llega a la definición inicial, es decir:

$$U_{\text{asim}} (\%) = \frac{S_c}{S_{cc}} 100$$

En la mayor parte de los casos, para calcular la asimetría de una carga monofásica, es suficiente determinar el grado de asimetría de la tensión utilizando esta expresión.

2.2 Medida

Partiendo de medidas reales de la tensión compuesta de línea, se pueden obtener valores aproximados del grado de asimetría mediante esta fórmula:

$$U_{\text{asim}} (\%) = \frac{\text{Desviación máxima respecto del valor medio de tensión}}{\text{Valor medio de tensión}} 100$$

Ejemplo 8.1

Determinemos, de forma aproximada, el grado de asimetría que existe en un punto de la red en el que se registran unas tensiones compuestas de 15,25 kV, 15,05 kV y 14,50 kV.

$$\text{Valor medio} = \frac{15,25 + 15,05 + 14,5}{3} = 14,93$$

Desviaciones:

$$15,25 - 14,93 = 0,316$$

$$15,05 - 14,93 = 0,116$$

$$14,93 - 14,50 = 0,433 \text{ (máxima)}$$

$$U_{\text{asim}} = \frac{0,433}{14,93} 100 = 2,9 \%$$

2.3 Niveles de referencia

Dado que la principal consecuencia que tienen las tensiones asimétricas sobre los receptores que son sensibles a ellas es el calentamiento de las máquinas rotativas, para prevenir sus efectos es necesario tener en cuenta tanto su grado de asimetría, como la duración de la misma.

Las condiciones de compatibilidad en el PCC son las siguientes:

- En las redes de media y baja tensión, el grado de asimetría no puede superar el 2% en valoraciones de más de un minuto; en las de alta tensión, no debe ser mayor de un 1% en ese mismo período de tiempo.
- Para todo tipo de redes, cuando existen varios emisores de este tipo de perturbación, la peor de todas ellas no puede ser superior al 0,7% para valoraciones del rango de minutos y al 1% para valoraciones del rango de segundos.

3 Causas que los originan

La conexión de cargas monofásicas en baja, media y alta tensión absorbe en cada fase intensidades diferentes que producen tensiones asimétricas. Así ocurre, por ejemplo, con la conexión de hornos monofásicos.

Las cargas monofásicas entre conductor de fase y conductor neutro, que sólo son posibles en las redes de baja tensión, no tienen, en general, especial relevan-

cia. Esto se debe a que, en el PCC, la relación entre la potencia de las cargas conectadas y la potencia de cortocircuito es baja: normalmente, 1/150.

Aun así, debe evitarse el efecto que generan varias cargas monofásicas sobre una misma fase. Para conseguirlo, es necesario efectuar un reparto adecuado de dichas cargas entre las tres fases de la red de baja tensión.

Las principales cargas monofásicas conectadas entre dos fases que producen asimetrías en las redes de alta y media tensión son las siguientes:

- Hornos de inducción (cuando trabajan a la frecuencia de la red).
- Hornos de fusión de resistencia.
- Instalaciones inductivas por calentamiento.
- Hornos de resistencia para la fabricación de electrodos.
- Instalaciones de calentamiento por arco voltaico.
- Máquinas de soldadura por resistencia.
- Hornos de fusión de acero de arco voltaico.
- Sistemas de tracción eléctrica, por la conexión fase-tierra.

4 Efectos que producen

Las tensiones asimétricas producen diferentes efectos según cuál sea el tipo de receptor:

- **Transformadores y líneas.** Para una misma carga activa, la intensidad causada por la asimetría puede ser el doble de la que existiría en situación de

simetría. Por ello, cuando en la red hay conectadas cargas que producen asimetría, estos equipos trabajan con unos niveles de utilización máxima del 60%.

- **Motores síncronos y asíncronos.**

Las intensidades del sistema inverso generan un campo rotatorio de doble velocidad —que se opone al de excitación— y producen pérdidas adicionales, principalmente en el rotor.

—En los **motores asíncronos**, los aumentos de temperatura por calentamiento son significativos para valores de U_{asim} superiores a un 1%. Y son especialmente perjudiciales cuando se llega al 2% en máquinas totalmente cargadas.

—En los **motores síncronos**, se admite una intensidad del sistema inverso equivalente a entre el 5% y el 10% de su intensidad de dimensionamiento I_{IG} , lo cual es tanto como decir que toleran un valor de U_{asim} de entre un 1% y un 2%.

- **Equipos de regulación y control.** Como señala la norma CEI 146, deben estar preparados para aceptar un grado de asimetría de hasta el 2%. En caso de que este nivel sea superado, su funcionamiento puede verse afectado de manera significativa.

5 Acciones de prevención y corrección

Es posible disminuir el grado de asimetría aplicando una o varias de estas acciones:

- Repartir las cargas monofásicas, consiguiendo una distribu-

ción más homogénea entre las tres fases.

- Instalar equipos y dispositivos correctores, tales como condensadores y bobinas de inductancia. En el caso de que se puedan registrar fuertes variaciones de la carga, estos dispositivos deberán ser regulables.
- Separar la carga monofásica de la red por medio de convertidores estáticos. Esta opción da lugar a la generación de intensidades armónicas que deberán ser tenidas en cuenta.
- Conectar la carga monofásica en un punto que tenga una potencia de cortocircuito o una tensión más elevadas.

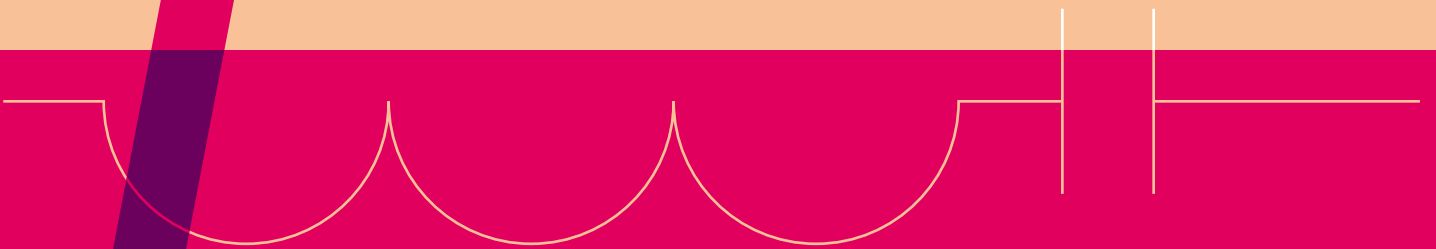
6 Referencias técnicas

- “Guide to Quality of Electrical Supply for Industrial Installation”. Union Internationale d’Electrothermie (UIE), 1993.
- “Grundsätze für die Beurteilung von Netrückwirkungen”. Vereinigung Deutsche Elektrizitätswerke (VDEW), 1992.



Sistemas de corrección de perturbaciones

- 1 Corrección de perturbaciones: definición
- 2 Sistemas de corrección específicos
- 3 Sistemas de corrección universales
- 4 Consideraciones finales
- 5 Referencias técnicas



En los capítulos precedentes, han sido analizados diversos tipos de alteraciones de la onda de tensión, señalando en cada caso las medidas de prevención y corrección que pueden ser aplicadas. Así, han sido mencionados distintos dispositivos que tienen como función hacer frente a esas alteraciones, ya sea durante la fase de diseño de la instalación y de los receptores que van a ser conectados a ella, ya sea durante el funcionamiento de los mismos.

Dada la importancia que tienen estos dispositivos, resulta aconsejable recoger, en un capítulo específico, una descripción más detallada y sistemática de cada uno de ellos.

Algunos de los dispositivos que van a ser descritos a continuación pueden corregir simultáneamente varios tipos de perturbaciones. Por ello, se distinguirá entre:

- Dispositivos específicos
- Dispositivos universales

1 Corrección de perturbaciones: definición

Se entiende que el concepto de corrección de perturbaciones engloba a cualquier medida que se adopte en una instalación o en los receptores conectados a la misma para que su funcionamiento sea satisfactorio en el entorno considerado.

La corrección puede efectuarse desde dos puntos de vista:

- **Desde el punto de vista de la emisión de perturbaciones.** Las medidas consisten en incorpo-

rar los dispositivos adecuados para que los equipos emitan perturbaciones por debajo del límite a partir del cual pueden afectar al funcionamiento de otros receptores situados en su entorno.

- **Desde el punto de vista de la inmunización frente a perturbaciones.** El cumplimiento de la Compatibilidad Electromagnética (CEM) exige que los equipos funcionen correctamente y sin sufrir deterioro hasta unos determinados niveles de perturbación. Las medidas consisten en incorporar los dispositivos necesarios para que dichos equipos sean inmunes a esos niveles CEM.

2 Sistemas de corrección específicos

Se describen a continuación los diferentes sistemas correctores existentes para cada tipo de perturbación.

2.1 Variaciones lentas de tensión

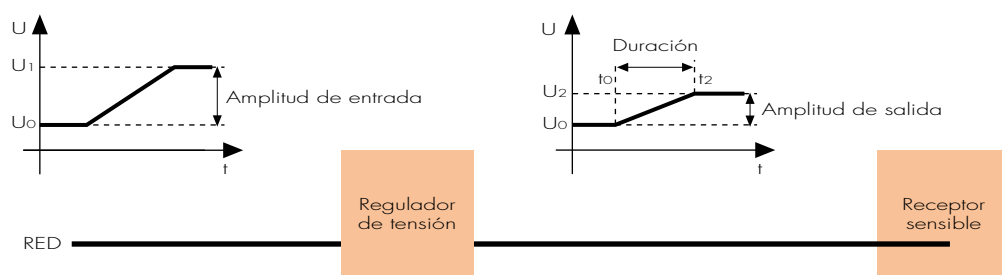
Como se ha señalado en el Capítulo 3, este tipo de perturbación afecta al parámetro amplitud de la onda senoidal del sistema trifásico de tensiones.

Las empresas eléctricas garantizan los márgenes de variación mediante un adecuado diseño de sus redes que incluyen sistemas de regulación de tensión. En consecuencia, los receptores que van a ser conectados a esas redes deben estar diseñados de manera que puedan funcionar correctamente dentro de esos márgenes de variación.

No obstante, hay receptores sensibles, cuyo margen de funcionamiento correcto es inferior al indicado en las normas correspondientes. En tal caso, es necesario anteponer, a dichos receptores, dispositivos correctores inmunizadores, tales como:

Figura 9.1

Esquema de un regulador de tensión



- **Reguladores de tensión.** Su función es reducir los márgenes de variación del valor eficaz de la tensión de alimentación del receptor.

Una opción particular, para el caso de tomas variables, es el autotransformador regulado. La variación de la relación de transformación a través del circuito de control le permite mantener la tensión de salida U_2 prácticamente constante —en realidad, con un margen de variación incluso menor que el que puede aparecer en la entrada— cuando la tensión de alimentación varía.

El tiempo de respuesta del regulador —es decir, la duración mínima de la variación en la entrada— dependerá de la tecnología utilizada. El tiempo menor se consigue con los que están

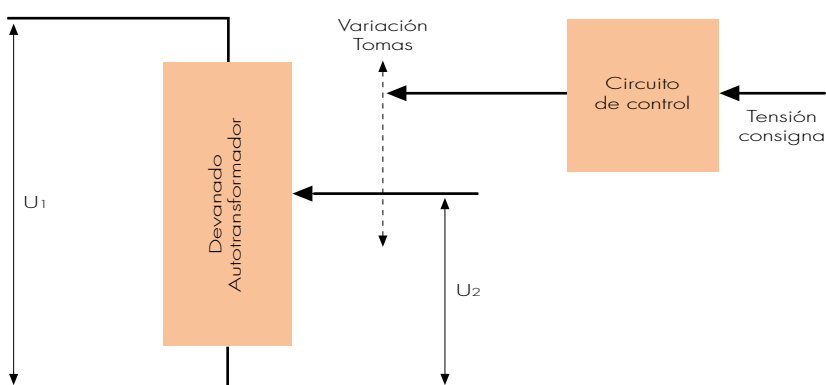
controlados electrónicamente mediante tiristores, Triacs, etc.

El regulador de tensión debe cumplir que $(U_2 - U_0) < (U_1 - U_0)$, de forma que el margen de variación a la salida del mismo sea lo suficientemente pequeño como para que no afecte al funcionamiento correcto del receptor sensible.

Con los reguladores de tensión, se pueden lograr reducciones del margen de variación de entrada desde un 15%, a valores comprendidos entre el 3% y el 7%.

Figura 9.2

Esquema de un autotransformador regulado

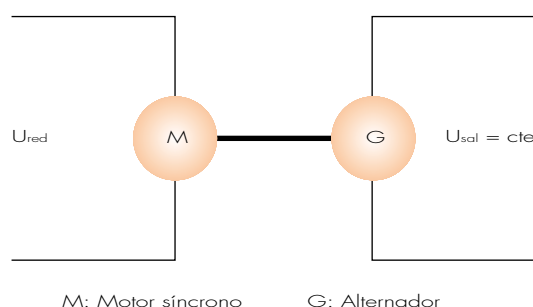


- **Conjunto motor–generador.** Su función es alimentar el receptor sensible desde un generador que mantiene su tensión constante.

Las variaciones del valor eficaz de la tensión de la red son absorbidas por el motor síncrono, que mantiene un par y una velocidad constantes, absorbiendo más o menos corriente de la red. Su acoplamiento con el alternador hace que éste pueda regularse para mantener su tensión de salida prácticamente constante y evitar que el receptor sensible conectado a sus bornes se vea afectado por las variaciones de la red.

Figura 9.3

Esquema de un conjunto motor-generador



2.2 Fluctuaciones de tensión y "Flicker"

Como se expuso en el Capítulo 4, este tipo de perturbación afecta al parámetro **amplitud** de la onda senoidal del sistema trifásico de tensiones.

En todos los casos, los causantes de esta alteración son determinados receptores. Para garantizar la CEM, su conexión debe efectuarse en el punto de la red más adecuado.

No obstante, es necesario además que estos receptores estén equipados con dispositivos que reduzcan al máximo las emisiones de esta perturbación. Cabe subrayar que algunos de estos dispositivos son eficaces únicamente para un tipo de receptor concreto.

Los más habituales son los denominados genéricamente compensadores estáticos. Los más extendidos son:

- **Reactancias controladas.**

Tienen como función disminuir

las variaciones de la potencia demandada que están asociadas a variaciones de su componente reactiva (ΔQ).

Su utilización típica es en hornos de arco. De forma general, estos hornos deben ir equipados con una reactancia inductiva en serie, a fin de limitar su potencia de cortocircuito y, en consecuencia, las potencias demandadas durante el proceso de fusión.

En estos y otros receptores semejantes, si se conectan en paralelo reactancias inductivas controladas, producen variaciones en la potencia reactiva que absorben ($\Delta Q'$), de manera que, desde el punto de vista de la red, se puede obtener una variación nula

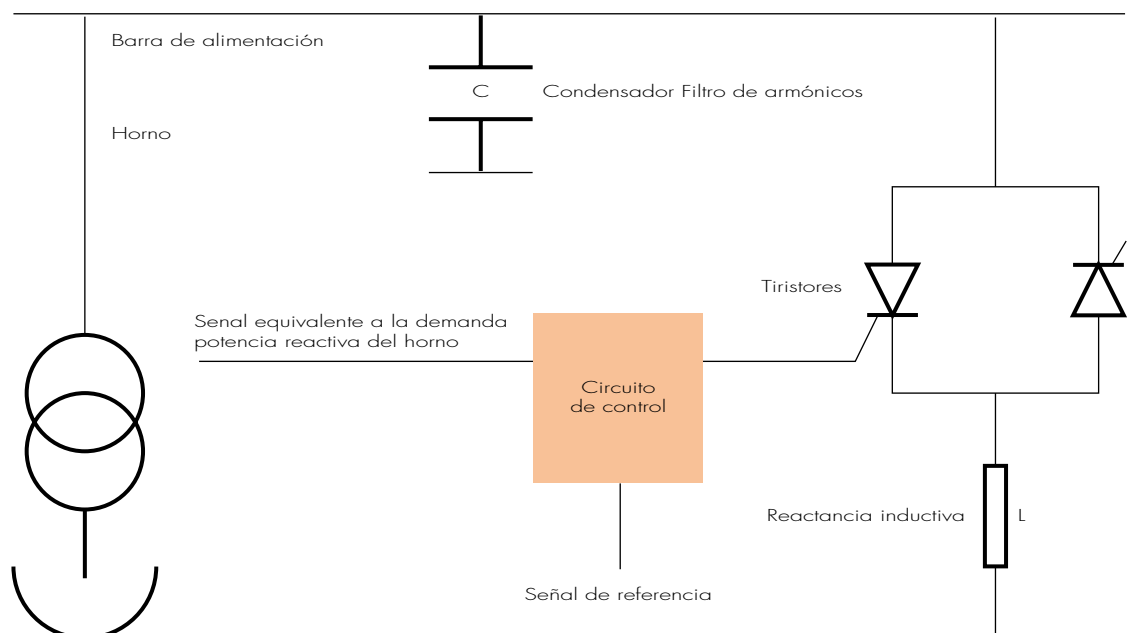
$$\Delta Q + \Delta Q' \approx 0$$

lo que se traduce en una mayor uniformidad de la potencia demandada, atenuando las fluctuaciones de tensión.

La compensación de los incrementos de la potencia reactiva

Figura 9.4

Esquema del funcionamiento de reactancias controladas en un horno de arco



demandada por el horno se hace de manera instantánea a nivel de fase mediante el circuito de control, que actúa sobre el ángulo de disparo de los tiristores y, en consecuencia, sobre el tiempo en el que se encuentra conectada la inductancia L , generando $\Delta Q'$. Todo el conjunto funciona en un bucle cerrado, es decir, un lazo de realimentación con comparador respecto de una referencia.

Se suele añadir al conjunto un filtro LC para hacer frente a los armónicos producidos por el comportamiento no lineal del horno y por el propio sistema de compensación.

- **Condensadores controlados (SVC)**¹. Su función es compensar los incrementos de demanda de potencia reactiva corrigiendo las correspondientes variaciones del $\cos \varphi$ de forma que se mantenga aproximadamente constante a un valor prefijado.

Se utilizan asimismo muy frecuentemente en los hornos de arco. Uno o más condensadores controlados, conectados en paralelo con el receptor que crea la perturbación, proporcionando una compensación continua del factor de potencia mediante la conexión de más o menos potencia reactiva capacitiva.

Estos dispositivos son análogos a las reactancias controladas, sustituyendo la reactancia inductiva por condensadores distribuidos en escalones. La regulación del factor de potencia se consigue mediante el control del ángulo de disparo de los tiristores y la con-

exión o desconexión de escalones de condensadores.

Es habitual conectar en serie con los condensadores, pequeñas reactancias inductivas, con el fin de disminuir los efectos transitorios derivados de su conexión.

Asimismo, se puede disponer de un bloque de potencia reactiva capacitiva conectado permanentemente.

- **Estabilizadores magnéticos.** Constituyen una variante de los dispositivos anteriores. La compensación de los incrementos de potencia reactiva se efectúa mediante la conexión de un transformador de elevada reactancia de dispersión en paralelo con la carga. El secundario del transformador es cortocircuitado durante determinados períodos de tiempo a través del control de tiristores conectados a él.

La evolución de los dispositivos electrónicos (tiristores, GTO's, etc.) ha permitido sustituir los antiguos estabilizadores magnéticos basados en reactancias saturables, por el diseño que se acaba de describir.

- **Arrancadores de motores.** Su función es limitar las potencias demandadas —muy superiores a las nominales— durante su proceso de arranque².

Por sus características de funcionamiento, los motores asíncronos trifásicos absorben durante su arranque una intensidad de corriente que puede ser hasta 6 veces la nominal. Para reducir

¹
SVC = Static Var
Compensators

²
El arranque aislado de estos motores produce generalmente un hueco de tensión, cuya duración puede alcanzar varios minutos. En consecuencia, la función de estos dispositivos correctores permite hacer frente a la emisión de huecos de tensión

esta corriente a valores inferiores, estos motores pueden ir equipados con dispositivos de arranque estrella-triángulo.

En el instante inicial del arranque, el motor se conecta en estrella, absorbiendo una corriente del circuito de alimentación inferior a la de la conexión triángulo, configuración a la que se conmuta una vez establecido el régimen normal de funcionamiento.

2³ Huecos de tensión y cortes breves

Como se señalaba en el Capítulo 5, los huecos de tensión son variaciones bruscas de la amplitud de tensión que la sitúan por debajo del 90% de su valor nominal durante un período de tiempo que oscila entre 10 milisegundos y varios segundos. Los cortes breves suponen la ausencia total de tensión entre 10 milisegundos y un minuto.

Los principales sistemas de corrección de estas perturbaciones son los siguientes:

- **Inmunización de contactores.** Esta medida se basa en la utilización de retardadores capacitivos que evitan la apertura de los contactos ante una reducción brusca de la tensión de alimentación.
- **Conjunto motor-generador.** Se trata de un conjunto motor volante de inercia-generador. La energía cinética almacenada permite mantener la velocidad del sistema durante intervalos cortos de tiempo. Cuando aparece un hueco de tensión o un corte breve, la energía mecáni-

ca se libera, manteniendo la tensión de alimentación.

- **Condensador de almacenamiento.** La descarga de un condensador mantiene la alimentación de un circuito de corriente continua frente a un hueco o un corte breve. Es apropiada para huecos y cortes inferiores a un segundo.
- **Batería de almacenamiento.** Su funcionamiento es parecido al del dispositivo anterior. La diferencia principal entre ambos es que en este caso se utiliza una batería como medio de almacenamiento, lo que permite hacer frente a interrupciones de mayor duración.

2⁴ Impulsos de tensión

Estas perturbaciones han sido analizadas en el Capítulo 6. Afectan a la amplitud de la onda y tienen lugar entre los conductores activos de alimentación o entre los conductores activos, considerados como un todo, y tierra.

Como medida de corrección se suelen utilizar **supresores** (ver Figura 9.5). Se trata de un elemento, conectado en paralelo con el receptor sensible en la entrada de alimentación o en la de señal de baja potencia, que posee una impedancia muy elevada para valores cercanos a la tensión nominal de dicho receptor y muy baja, respecto de la de éste, a partir de un valor determinado de tensión superior a la nominal. En esta última situación, el impulso de tensión genera un impulso de corriente que circula por el supresor, de

forma que o bien se disipa la potencia asociada en forma de calor, o bien se deriva al circuito de tierra de la instalación.

El ancho de la banda correspondiente a este tipo de perturbación puede ser muy elevado, por lo que es muy importante determinar la necesidad real para obtener un correcto funcionamiento.

Los supresores de impulsos más comunes son:

- **Varistores.** Son elementos semiconductores (carbono de silicio, óxido de zinc, etc.) con una característica no lineal tensión/corriente. Sus parámetros fundamentales presentan los siguientes rasgos:

- Tiempo de respuesta: nanosegundos
- Tensiones nominales: disponibles dentro de todas las gamas de baja y media tensión.
- Picos de corriente admisibles: del orden de kA.

- **Descargadores de gas.** Están constituidos por tubos de descarga gaseosa mediante gases inertes. Su aplicación es muy restringida: se utilizan, por

ejemplo, para protección de equipos de alta frecuencia. Actúan de forma diferente a los dispositivos semiconductores: derivan el impulso a tierra, en lugar de disiparse en él.

- Tiempo de respuesta: microsegundos
- Tensiones nominales: superiores a 70 V y hasta 70 kV.
- Picos de corriente admisibles: hasta 60 kA.

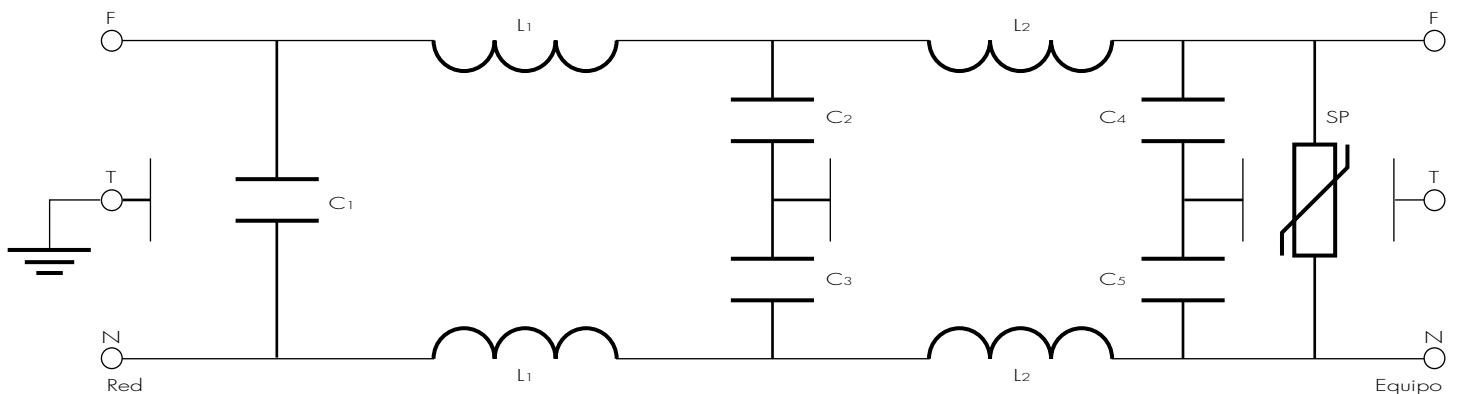
- **Diodos Zener.** Son elementos semiconductores rectificadores polarizados con tensión inversa. Se utilizan únicamente en aplicaciones con alimentación en corriente continua.

- Tiempo de respuesta: picosegundos
- Tensiones nominales: hasta 300 V
- Picos de corriente: hasta del orden de 50 A

- **Equipos protectores de sobretensiones.** Son equipos conectados en serie en la entrada de la alimentación del receptor, bien en la de corriente alterna de baja tensión, bien en la de corriente continua, que lo desconectan de la misma con un

Figura 9.5

Esquema típico de un supresor de AF



determinado retraso –entre 5 y 10 milisegundos– cuando aparece en ella un impulso de tensión, efectuando a continuación la reposición en un tiempo inferior a 30 segundos.

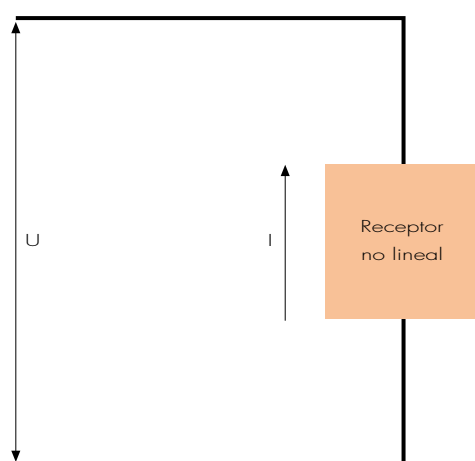
2.5 Distorsión armónica

Este tipo de perturbación, que ha sido analizado en el Capítulo 7, afecta a la forma de la onda del sistema trifásico de tensiones. Los causantes fundamentales de esta alteración de la onda son los receptores con una característica “intensidad/tensión” no lineal.

Como ya se ha señalado, para que las emisiones de estos receptores no superen el límite a partir del cual pueden afectar a otros receptores de la red, las empresas eléctricas procuran que su conexión se haga en el punto más adecuado. No obstante, es necesario también que los receptores que generan estas perturbaciones estén equipados con dispositivos correctores, como los que se indican a continuación, para minimizar la emisión de las mismas:

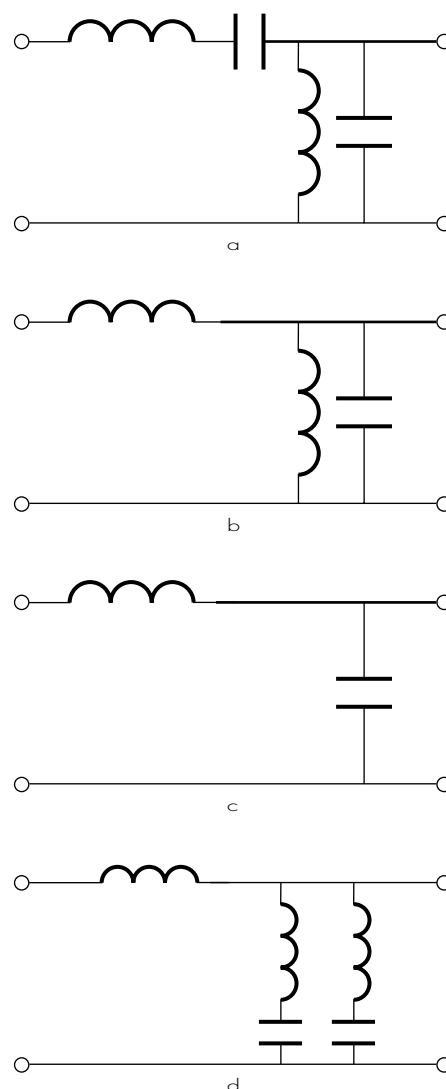
Figura 9.6

Esquema de distorsión armónica generada por un receptor no lineal



$$U = U_0 \cos 2\pi f_0 t$$

$$I = I_0 \cos 2\pi f_0 t + \text{SUM} (\cos 2\pi f_0 t)$$



La alimentación de un receptor con característica no lineal y una tensión sinusoidal de frecuencia f_0 (50 Hz) genera una corriente de frecuencias f_0 y nf_0 –múltiplos de f_0 , denominados armónicos–. Esto equivale a inyectar en la red componente armónicas de corriente, que producirán a su vez armónicos de tensión.

Los valores de los n armónicos dependen del tipo de receptor no lineal: rectificador, lámpara de descarga, etc.

La conexión en paralelo, con el receptor que genera una componente armónica de corriente nf_0 , de un conjunto serie inductancia-condensador, es decir, de un filtro pasivo sintonizado que cum-

- **Filtros pasivos.** Se trata de convertir en lineal la característica no lineal del receptor. Para ello, se le considera, desde la red de alimentación, como un conjunto formado por el receptor y el filtro pasivo, conectados en paralelo.

ple la siguiente condición de resonancia

$$nf_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{LC}$$

Presenta una impedancia total nula para la componente armónica de corriente nf_0 , por lo que esta componente no será inyectada a la red.

Figura 9.7

Combinaciones de filtros pasivos:

- a) Resonante serie y paralelo
- b) L serie y resonante en paralelo
- c) LC simple para altas frecuencias
- d) L serie y dos circuitos trampa (resonante en serie) en paralelo

La condición anterior se puede establecer tanto para filtros en serie, como en paralelo. Para la elección de los mismos, se debe tener en cuenta la ubicación de la fuente de armónicos. En algunos casos, es conveniente asociar filtros serie-paralelo, sintonizando cada uno de ellos a una frecuencia determinada. En la Figura 9.7 se presentan algunas combinaciones posibles.

3 Sistemas de corrección universales

Se engloba bajo esta denominación a los correctores de red que utilizan componentes electrónicos de potencia y son capaces de

corregir prácticamente la totalidad de las perturbaciones. Los más conocidos son los llamados SAI³, es decir, los diversos tipos de sistemas de alimentación ininterrumpida. Recientemente, se ha iniciado la fabricación de dispositivos, basados en nuevas topologías de potencia, que se sitúan entre los cambiadores de tensión y los SAI y reciben el nombre de acondicionadores de red.

- **Sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI).** Son los equipos que mejor contrarrestan las perturbaciones de la red. Su característica específica es su capacidad para mantener la alimentación de la carga en ausencia de la red durante un cierto tiempo, llamado de autonomía, que suele situarse entre 10 minutos y varias horas.

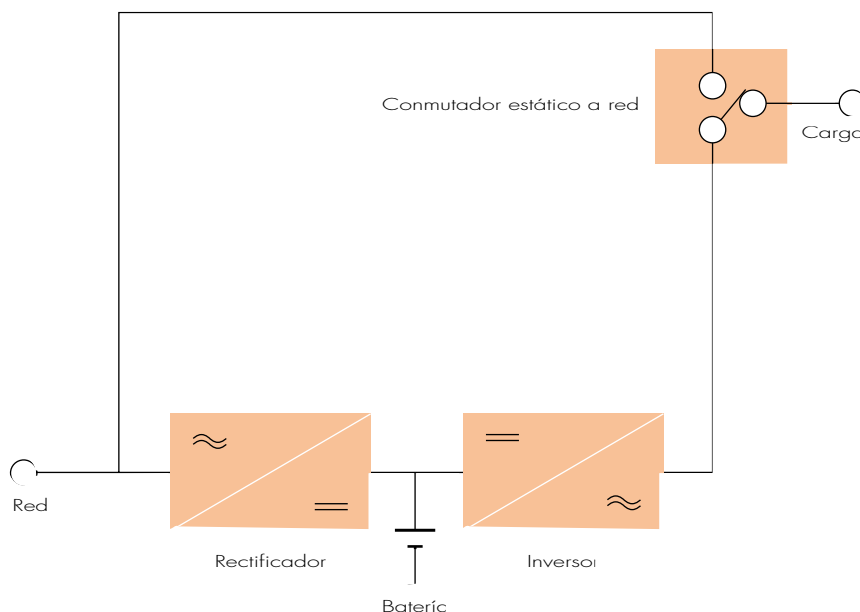
Existen dos tipos fundamentales de SAI:

—**SAI en línea.** En él, la carga es alimentada por la línea rectificador-inversor y la carga de la batería se mantiene por la acción del primero. Posee un “by-pass” o conmutador a red que, en caso de fallo del inversor, conecta la carga a dicha red (ver Figura 9.8)

—**SAI fuera de línea (“off-line”) o en espera.** En este tipo de SAI, la red alimenta normalmente la carga y, cuando aquella falla, pasa a ser alimentada por el inversor. La diferencia fundamental con el anterior es que la carga se encuentra alimentada por la red en condiciones normales y, por lo tanto, recibe la misma calidad que tiene ésta.

Figura 9.8

Esquema de SAI en líneas



- **Acondicionadores de red.** Son dispositivos cuya misión es corregir las perturbaciones en tensión –red de alimentación– y en corriente –cargas contaminantes–. Suelen estar constituidos por una fuente de tensión en serie con la red, que se encarga de corregir las perturbaciones de la tensión, y una fuente de corriente en paralelo, que corrige las perturbaciones de corriente generadas por los receptores. Se denominan filtros activos de tensión aquéllos que únicamente efectúan la corrección de tensión.

Figura 9.9

Esquema filtro activo de tensión

Como se ve en la Figura 9.9, la fuente de tensión se encuentra en serie con la red, aportando el

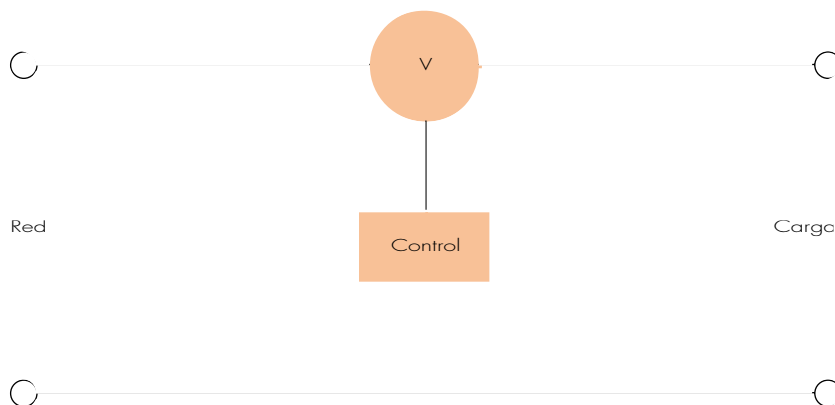
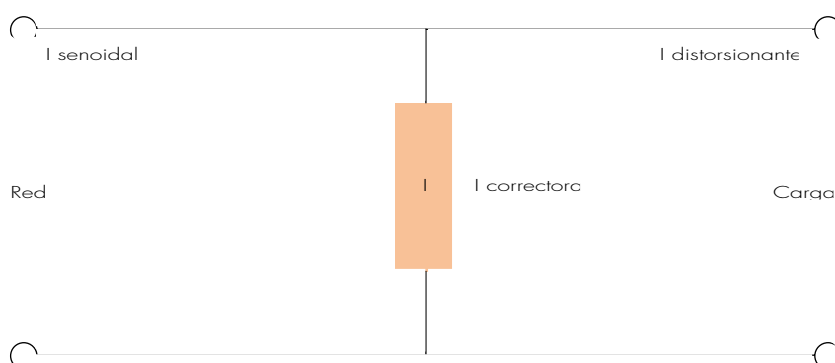


Figura 9.10

Esquema filtro activo de corriente



valor necesario en cada instante para obtener la tensión deseada.

- **Filtros activos de corriente.** Se denomina así a los que eliminan las corrientes armónicas producidas por los receptores.

Suelen estar formados por fuentes de corriente conectadas en paralelo con la carga. Generan una corriente distorsionada que, sumada a la que absorbe la carga, hace que la red registre un consumo de forma senoidal.

4 Consideraciones finales

La elección del sistema de corrección más adecuado exige un estudio particular de cada caso concreto, ya que cada tipo de emisión de perturbaciones suele requerir soluciones específicas.

Es evidente que en la elección ha de tenerse en cuenta el coste inicial del dispositivo, pero también han de ser considerados otros factores –mantenimiento, fiabilidad, rendimiento, etc– que tienen una gran influencia en su eficacia.

A título de ejemplo, la Tabla 9.1 recoge una comparación de diferentes sistemas de corrección, utilizando como parámetro de referencia su rendimiento energético.

Cabe señalar que, en algunos casos, hay que utilizar combinaciones de varios dispositivos. Por ejemplo, es necesario instalar filtros de armónicos juntos a los SAI, ya que estos últimos son fuentes de armónicos.

Tabla 9.1

Rendimiento
energético en %
de algunos sistemas
de corrección

Sistema corrector	1 kVA	10 kVA	100 kVA
Supresor	100	100	100
Filtro de RF	98	99	100
Trafo de ultraaislamiento	92,5	97,7	98,5
Estabilizador de tomas con autotrafo	97,7	98,5	99
Estabilizador de tomas con trafo	94,5	97	98
Estabilizador por divisor inductivo	85	89	—
Estabilizador ferorrresonante	80	—	—
SAI fuera de línea (muy variable con modelo)	96	98	—
SAI en línea	75	85	91

Nota:

Los valores son
típicos para familias
de equipos

5 Referencias técnicas

- "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems". Norma EN 50160. 1994.
- "Alimentación de equipos informáticos y otras cargas críticas". S. Martínez. 1992.



Selección del Punto de Conexión Común (PCC)

El PCC es el punto de la red donde se produce la interconexión entre las redes de los participantes.

El PCC debe ser el punto de la red que minimice el costo de la conexión.

El PCC debe ser el punto de la red que maximice la eficiencia de la conexión.

El PCC debe ser el punto de la red que maximice la seguridad de la conexión.

El PCC debe ser el punto de la red que maximice la disponibilidad de la conexión.

El PCC debe ser el punto de la red que maximice la calidad de la conexión.

El PCC debe ser el punto de la red que maximice la velocidad de la conexión.

El PCC debe ser el punto de la red que maximice la capacidad de la conexión.

El denominado punto de conexión común (PCC) es el punto de la red de distribución en el que se pretende conectar la carga de un usuario.

De la lectura de los capítulos anteriores se desprende que la correcta selección del PCC es uno de los factores determinantes para disminuir tanto los efectos que producen los receptores perturbadores sobre la red, como los de las perturbaciones que transmite la red sobre los receptores que son sensibles a ellas.

Lógicamente, esta medida sólo puede adoptarse cuando se trata de una instalación que va a ser conectada por primera vez a la red de alimentación eléctrica, pero en cualquier caso, dada su importancia, debería ser tenida en cuenta desde la misma fase del proyecto de la instalación.

Este factor ha de ser tomado en consideración preferentemente en aquellas instalaciones que disponen de un equipamiento singular, ya sea por su especial sensibilidad a posibles perturbaciones (equipos de control automático, ordenadores, variadores de velocidad para motores, etc.) o por su capacidad de ser emisores de las mismas (rectificadores, hornos de arco e inducción, grandes motores, etc.).

Los usuarios de estas instalaciones deben dirigirse a la empresa suministradora aportando la información precisa para que ésta pueda seleccionar el PCC que mejor satisfaga sus intereses, teniendo en cuenta los requerimientos de calidad del suministro necesarios para el tipo de equi-

pamiento que se va a instalar y los condicionantes de la red.

La información mínima que se ha de proporcionar a la empresa suministradora para que pueda realizar el estudio correspondiente incluye:

- Datos de identificación del suministro.
 - Localización geográfica.
 - Fecha de entrada en servicio.
 - Tipo de industria.
- Características técnicas del suministro eléctrico.
 - Tensión.
 - Previsión de curvas de consumo.
 - Factor de potencia.
- Características técnicas de los receptores especiales.
 - Grandes motores.
 - Sistemas de control automático.
 - Grupos rectificadores.
 - Hornos de arco e inducción.
 - Equipos de soldadura.
 - Sistemas de compensación de reactiva.

Para las instalaciones que son sensibles a las perturbaciones, el estudio se basará en los siguientes criterios:

- Si son inmunes a los niveles de perturbación habitualmente existentes en el PCC, se acepta su conexión.
- En caso contrario, se buscará una solución alternativa en base a posibles medidas de inmunización, ajuste de protecciones, mejora de la calidad del suministro, etc.

- Si, a pesar de todo, no se consigue una solución satisfactoria se debe plantear la elección de otro PCC.

Para las instalaciones que son potencialmente perturbadoras, el estudio se basará en los siguientes criterios:

- Estimar si el nivel de perturbación general de la red, una vez que se conecte el nuevo usuario, se mantiene dentro de valores aceptables. Si es así, se acepta automáticamente su conexión. Esta estimación se puede realizar mediante una

serie de algoritmos que tienen en cuenta las características de la red y de las instalaciones de los demás clientes que están conectados a ella.

- En el caso de que el nivel de perturbación general de la red vaya a rebasar los límites aceptables, se estudiarán soluciones que permitan reducir el nivel de emisión de las instalaciones del nuevo usuario basadas en filtros, incremento de la Scc, etc..
- Si, a pesar de todo, no se consigue reducir el nivel de emisión suficientemente, se estudiará la elección de otro PCC.

CEM	Compatibilidad Electromagnética. Se denomina Compatibilidad Electromagnética (CEM) a la aptitud de un aparato o de un sistema para funcionar de forma satisfactoria en su entorno electromagnético, y sin producir él mismo perturbaciones electromagnéticas intolerables para todo lo que se encuentre en dicho entorno.
CEI	Comisión Electrotécnica Internacional.
Nivel CEM	Es el nivel especificado de perturbación en un entorno electromagnético para el cual existe una elevada probabilidad CEM.
PCC	Punto de conexión común. Es el punto de la red de distribución, el más próximo eléctricamente de un usuario, al que están o pueden ser conectados otros usuarios.
Sc	Potencia aparente de una carga. Se expresa en kVA ó MVA.
Q	Potencia reactiva. Se expresa en kVAr ó MVar.
SAI	Sistema de Alimentación Ininterrumpida.
Sc	Potencia aparente de cortocircuito. Se expresa en kVA ó MVA.
SVC	Static Var Compensators. Compensadores estáticos de potencia reactiva.
U_{asim}	Grado de asimetría de la tensión. Se expresa en %.
u_n	Tasa porcentual de armónico de orden n.
U_n	Amplitud del armónico de orden n de la onda de tensión.
U₁	Amplitud de la componente fundamental de la onda de tensión.
UIE	Unión Internacional de Electrotecnia.

UNISA

COMITÉ DE DISTRIBUCIÓN - COMISIÓN TÉCNICA