

Causas y efectos de las perturbaciones

Calidad de onda en el servicio eléctrico

Con motivo de la liberación del sector eléctrico y debido a la evolución de los sistemas de producción, el concepto de calidad del servicio ha ido cobrando importancia en los últimos años. Así, el Real Decreto 1995/2000 del 1 de diciembre de 2000 regula las condiciones mínimas de calidad del servicio diferenciando tres aspectos: Continuidad del suministro (número y duración de interrupciones); Calidad del producto (características de la onda de tensión); y Calidad en la atención y relación con el cliente.

Los dos primeros puntos hacen referencia a la calidad del suministro de energía eléctrica (*power quality*) a partir de dos aspectos concretos: la continuidad del servicio y de la calidad de la onda. La interrupción en el servicio normalmente es debida a causas de fuerza mayor difícilmente predecibles. Actualmente, está regulada por ley la cantidad y duración máxima de interrupciones por periodo de tiempo en un área (calidad zonal). Este tema se ha tratado en otros artículos de **AeI** y por tanto no se hará mayor incidencia en ello.

Por otro lado, la calidad de onda hace referencia a la degradación de algunos parámetros de la onda en el punto de medida. Si situamos este punto en el consumidor final (industria), una mala calidad puede producir efectos como facturación indebida por una medida errónea de la potencia activa/reactiva debido a la presencia de armónicos, pérdida de sincronismo al variar la frecuencia fundamental (en equipos con referencia temporal por detección de cero), reset de equipos electrónicos (autómatas, por ejemplo) por disminución brusca y breve de la tensión de alimentación, etc.

El origen de esta mala calidad de-

Los diferentes tipos de perturbaciones que afectan la calidad de la onda eléctrica tienen una gran importancia en la industria actual. Definir con exactitud las causas u orígenes de las perturbaciones que se propagan por la red es un apartado complejo que necesita siempre de una correcta monitorización y análisis con el propósito de proponer acciones correctoras.



Fuente: ABB

bemos situarlo tanto entre los propios clientes (por ejemplo, variaciones bruscas de cargas) como en la operación de la red (por ejemplo, accionamiento de interruptores) o averías en ambos. Hay que tener en cuenta que la propia naturaleza de los sistemas eléctricos hace que variaciones ocurridas en un punto puedan transmitirse centenares de kilómetros, a través de las redes de transporte y distribución, afectando de formas diversas a otros elementos del sistema y, por tanto, la localización del origen de una mala calidad no es siempre tarea fácil.

Los efectos nocivos de una deficiente calidad de la onda pueden manifestarse de muchas formas, unas más perceptibles físicamente que otras.

- Errores en ordenadores y equipos informáticos: Reinicialización, bloqueos, errores de disco o datos.
- Daños o malfuncionamiento de sistemas de control: Pérdida de control del proceso, daños en tarjetas de entradas/salidas, fallos de dispositivos hardware, daño en dispositivos remotos.
- Mal funcionamiento de equipos de protección: Disparo de interrup-

tores y fusibles.

- En elementos de interconexión: Aparición de arcos eléctricos o conexiones quemadas.

- Sobrecalentamiento de transformadores, contribución a la aparición de ferresonancia.

- Sobrecalentamiento de maquinaria rotativa.

- Disminución de la vida útil de equipos. Reducción de la eficiencia eléctrica del sistema.

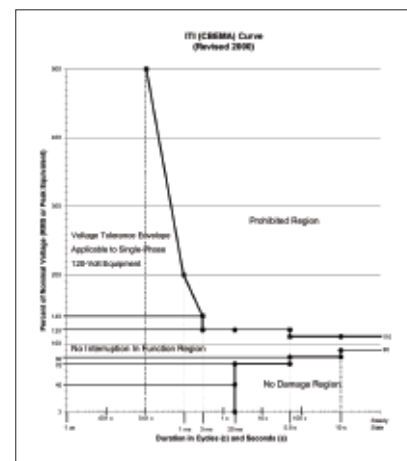
- Interferencia en redes de comunicación.

- Mal comportamiento de cargas eléctricas, fallo de condensadores en la corrección del factor de potencia.

- Errores en la medición del consumo de energía.

Marco regulador

La legislación actual se basa en los estudios llevados a cabo por organismos internacionales como el *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), la *International Electrotechnical Commission* (IEC), el norteamericano *Electric Power Research Institute* (EPRI), la Conferencia Internacional de Grandes Redes Eléctricas (CIGRE, comité CE-36) o la Conferencia Internacional de Redes de Distribución (CIRED). Éstos dedican de forma continuada recursos al análisis de la importancia, evolución y consecuencias de esta calidad de onda. Así, se han establecido diferentes recomendaciones (DIN EN 50160, IEEE STD. 519-1992, IEEE STD.



■ Curva ITIC-CBEMA (año 2000).

1159 – 1995, IEC 61000-X-YY, etc.). La reciente IEC 61000-4-30 (febrero 2003) define los métodos de medida de calidad de onda eléctrica y su interpretación.

El estándar considera la frecuencia, la magnitud, flicker, huecos y sobretensiones, interrupciones, desequilibrios y transitorios en la onda de tensión, así como armónicos e interarmónicos de tensión y corriente.

El marco legal actual en España, a raíz de la liberalización del sector eléctrico, se regula con el Real Decreto 1995/2000 del 1 de diciembre de 2000 y la orden ECO/797/2002, de 22 de marzo de 2002. Por lo que se refiere al Real Decreto, en el capítulo 2 del Título VI decreto se centra en tres aspectos: Continuidad del suministro (número y duración de interrupciones), Calidad del producto (características de la onda de tensión) y Calidad en la atención y relación con el cliente.

La calidad de producto en distribución (según el artículo 102 del decreto) seguirá la normativa UNE-EN 50 160 (basada en los estándares mencionados anteriormente), pero no se hace ninguna mención especial a los diferentes tipos de perturbaciones ni a los límites admisibles de éstas, limitándose a legislar sobre el tiempo (TIEPI, y percentil 80 del TIEPI) y número (NIEPI) de interrupciones admisibles en una zona y durante un tiempo de evaluación. Ambos fueron posteriormente regulados por la orden ECO/797/2002/, en que se aprueba el procedimiento

Categoría	Espectro de frecuencia (típico)	Duración (típico)	Magnitud de la tensión (típica)
1. Transitorios			
1.1. Impulsivos			
1.1.1. Nanosegundos	tr = 5 ns	< 50 ns	
1.1.2. Microsegundos	tr = 1 µs	50 ns – 1 ms	
1.1.3. Milisegundos	tr = 0,1 ms	> 1 ms	
1.2. Oscilatorios			
1.2.1. Frecuencia baja	< 5 kHz	0,3 – 50 ms	0 – 4 p.u.
1.2.2. Frecuencia media	5 – 500 kHz	20 ms	0- 8 p.u.
1.2.3. Frecuencia alta	0,5 – 5 MHz	5 ms	0 – 4 p.u.
2. Variaciones de corta duración			
2.1. Instantáneas			
2.1.1. Sag (Dip)		0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 p.u.
2.1.2. Swell		0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 p.u.
2.2. Momentáneas			
2.2.1. Interrupción		0,5 ciclos – 3 s	< 0,1 p.u.
2.2.2. Sag (Dip)		30 ciclos – 3 s	0,1 – 0,9 p.u.
2.2.3. Swell		30 ciclos – 3 s	1,1 – 1,8 p.u.
2.3. Temporales			
2.3.1. Interrupción		3 s – 1 min	< 0,1 p.u.
2.3.2. Sag (Dip)		3 s – 1 min	0,1 – 0,9 p.u.
2.3.3. Swell		3 s – 1 min	1,1 – 1,8 p.u.
3. Variaciones de larga duración			
3.1. Interrupción sostenida		> 1 min	0,0 p.u.
3.2. Subtensión		> 1 min	0,8 – 0,9 p.u.
3.3. Sobretensión		> 1 min	1,1 – 1,2 p.u.
4. Desequilibrio de tensión		Estado estacionario	0,5 – 2%
5. Distorsión de onda			
5.1. Componente D.C.		Estado estacionario	0 – 0,1%
5.2. Armónicos	0 – 100 armónicos	Estado estacionario	0 – 20%
5.3. Interarmónicos	0 – 6 kHz	Estado estacionario	0 – 2%
5.4. Notch	> 10 kHz	Estado estacionario	
5.5. Ruido	Banda ancha	Estado estacionario	0 – 1%
6. Fluctuaciones de tensión < 25 Hz (Parpadeo-Flicker)		Intermitente	0,1 – 7%
7. Variaciones de la frecuencia del sistema		< 10 s	

■ Tipos y categorías de perturbaciones que afectan a la calidad de onda según IEEE Std. 1159-1995.

de medida y control de la continuidad del suministro eléctrico. Por otro lado, el artículo 110 del decreto deja constancia de que tanto consumidores como distribuidores pueden ser los responsables de una mala calidad y que en esos casos hay que limitar las responsabilidades. De ahí la importancia de una correcta monitorización por parte de distribuidores y consumidores.

Es importante mencionar que el estándar IEC 61000-4-30 no define los umbrales de calidad sino los procedimientos de medida. Actualmente, sólo la industria de los ordenadores (CBEMA-Computer and Business Equipment Manufacturers Association o ITIC-Information Technology Industry Council) ha publicado curvas (www.itic.org/technical/iticurv.pdf) especificando los límites operativos que los equipos deben soportar en cuestión de desviaciones de tiempo (ciclos) y magnitud (tensión) provocadas por las perturbaciones (ver figura en página anterior). Se trata de medidas preventivas aplicadas en el diseño, con el propósito de minorizar los efectos de perturbaciones en la alimentación.

Tipos de perturbaciones

A continuación se reproducen las definiciones usadas en la norma UNE-EN-50160 ("Características de la tensión suministrada por redes generales de distribución") para las perturbaciones más importantes. La tabla 1 (página anterior) resume las posibles perturbaciones que afectan a la calidad de onda en cuanto a su

duración y afectación al valor eficaz de la onda.

- **Hueco de tensión:** Disminución brusca de la tensión de la alimentación a un valor situado entre el 90% y el 1% (otras definiciones que siguen las recomendaciones IEEE, ver tabla 1, sitúan el límite inferior en 10%) de la tensión declarada, seguida del restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo. Por convenio, su duración es de 10ms-1 min. La profundidad del hueco se define como diferencia entre la tensión eficaz mínima durante el hueco de tensión (siempre inferior al 90%) y la tensión declarada.

- **Interrupción (accidental o no prevista) de alimentación:** Condición en que la tensión en los puntos de suministro es inferior al 1% de la tensión declarada. Sobrepasados los tres minutos se considera interrupción larga y suele venir provocada por un defecto permanente, mientras que por debajo de los tres minutos se las denomina interrupciones breves.

- **Sobretensiones** son incrementos de la tensión por encima del valor nominal o declarado. Se las califica de temporales cuando su duración es relativamente larga y suelen venir dadas por maniobras (variaciones súbitas de carga), defectos o no linealidades. Son sobretensiones transitorias (oscilatorias o no) cuando su duración ronda los milisegundos como máximo.

- **Desequilibrio de tensión:** En un sistema trifásico, estado en el cual el valor eficaz de las tensiones de fases o los desfases no son iguales.

- **Tensiones armónicas (o simplemente armónicos):** Tensiones sinusoidales cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación.

- **Tensión interarmónica (o simplemente interarmónicos):** Tensión sinusoidal cuya frecuencia se sitúa entre las frecuencias de los armónicos, es decir, no es múltiplo entero de la frecuencia fundamental.

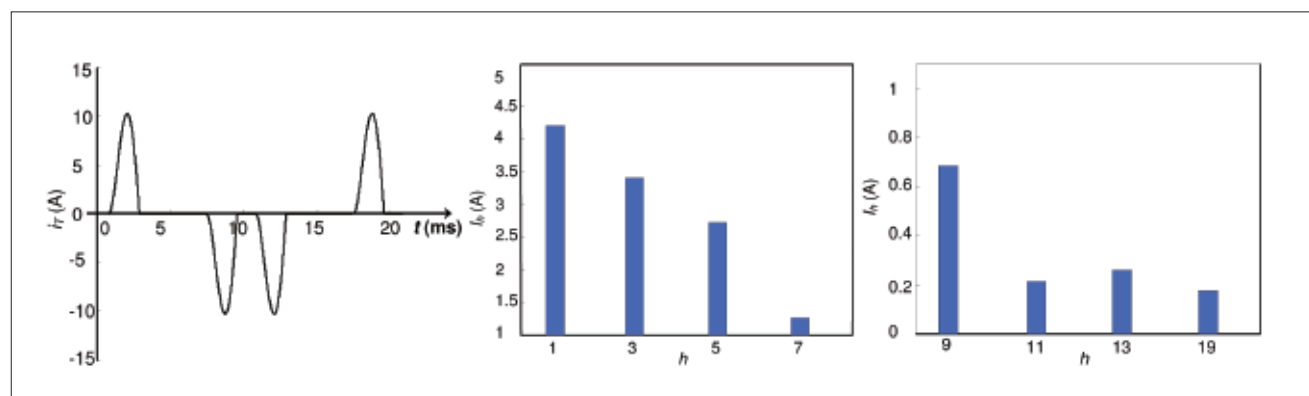
- **Fluctuaciones de tensión:** Serie de variaciones de tensión o variación cíclica de la envolvente de la tensión. Las variaciones de luminancia del alumbrado debido a estas fluctuaciones produce el fenómeno ocular conocido como parpadeo (o flicker).

En las siguientes secciones se examinan con detenimiento dos de estos fenómenos, armónicos y huecos de tensión, con mayor repercusión industrial.

Armónicos

Los niveles de distorsión armónica han aumentado significativamente en los últimos años debido, principalmente, al aumento del número de dispositivos electrónicos conectados en la red. La mejora de nuestro nivel de vida viene acompañada por un creciente aumento de elementos como ordenadores personales, equipos de aire acondicionado y bombas de calor, mejores y más complejos componentes en los procesos industriales, etc. En contrapartida, estos equipos conllevan un incremento de los niveles de distorsión en la onda de tensión.

Esta distorsión en la onda de tensión



■ Intensidad consumida por una fuente de alimentación trifásica, i_T , y su contenido armónico.

se traduce en una variación de sus valores de frecuencia y amplitud nominal, y en una forma de onda diferente a la sinusoidal.

El origen de los armónicos se encuentra en la presencia de cargas no lineales en el sistema eléctrico. Las cargas no lineales consumen una corriente no sinusoidal aunque la tensión de alimentación sea perfectamente sinusoidal. La circulación de estas corrientes no sinusoidales por las impedancias del resto del sistema provoca la distorsión de las tensiones de los diferentes puntos de la red, ya que las caídas de tensión no son sinusoidales, extendiéndose el problema al resto de componentes presentes en el sistema.

Las cargas no lineales se pueden clasificar en tres tipos: equipos electrónicos (variadores de velocidad, rectificadores, fuentes conmutadas, etc.), cargas con inductancias saturables, y cargas con arcos de descarga (fluorescentes, hornos de arco, etc.). La figura de la página anterior muestra la corriente consumida por una fuente de alimentación trifásica y su correspondiente contenido armónico (a destacar la importancia de los armónicos 3 y 5).

La norma UNE-EN 50160 recoge la manera de cuantificar la distorsión armónica de la tensión en un punto de la red, definiendo los siguientes índices:

- *Tasa de distorsión armónica de tensión (HD)*: cociente entre el valor eficaz de la componente armónica y el valor eficaz de la componente fundamental de la tensión.

- *Tasa de distorsión armónica total de tensión (THD)*: cociente entre el valor eficaz del conjunto de las componentes armónicas y el valor eficaz de la componente fundamental de la tensión.

En dicha norma se limita el nivel de las emisiones armónicas y se establecen niveles de referencia para que las compañías eléctricas puedan vigilar el nivel de distorsión en sus redes, en media y baja tensión. En particular, se establecen unas tasas que no deben ser sobrepasadas en cualquier lugar de la red, con una probabilidad mínima del 95% para los valores de cada

armónico de tensión promediados en 10 minutos durante cada periodo de una semana. La tabla 2 recoge estos límites para cada armónico, hasta el armónico de orden 25.

En cuanto a la tasa de distorsión armónica total de la tensión, ésta no debe sobrepasar el 8% (comprendidos todos los armónicos hasta el orden 40).

Desde el punto de vista del distribuidor, éste debe suministrar una alimentación con una impedancia de cortocircuito suficientemente baja, es decir, una potencia de cortocircuito suficientemente alta, para evitar generar tensiones armónicas importantes ante la presencia de cargas contaminantes.

Efectos de los armónicos

En líneas generales, la existencia de armónicos en la red se traduce en un mal funcionamiento de algunos receptores sensibles a la pérdida de calidad de onda de la tensión, sobrecargas, aumento de las pérdidas, etc. A continuación se realiza una descripción de los efectos que pueden producir los armónicos en diferentes elementos de la red.

- Efectos de los armónicos en los conductores: Por un lado, las intensidades armónicas conducen a un aumento del valor eficaz de la corriente en los conductores, lo que puede ocasionar actuaciones intempestivas de las protecciones. Por otro, a medida que aumenta la frecuencia de los armónicos, el efecto skin y el efecto pelicular se hacen más pronunciados, reduciendo la sección

efectiva del conductor. En consecuencia, se incrementan las caídas de tensión y se sobrecalientan los conductores.

- Efectos de los armónicos en el conductor de neutro: En el caso de cargas trifásicas y existencia de conductor de neutro, si las intensidades que consumen estas cargas generan armónicos de orden múltiplo de tres, éstos circulan por el conductor de neutro puesto que su suma no es cero, lo que produce calentamientos y su posible destrucción si no se ha dimensionado correctamente teniendo en cuenta la naturaleza de las cargas conectadas. Además, pueden aparecer ruidos de frecuencia audible en cables instalados en bandeja debido a las vibraciones y valores de tensión entre neutro y tierra grandes.

- Efectos de los armónicos en los transformadores: Debido al aumento del valor eficaz de la intensidad, se produce un aumento de las pérdidas por efecto Joule en los devanados. Además, las pérdidas en el hierro también aumentan. En particular, las pérdidas debidas a las corrientes de Foucault son proporcionales al cuadrado de la frecuencia y las pérdidas por histéresis son proporcionales a la frecuencia. Este hecho conduce a una disminución en la potencia máxima que puede suministrar un transformador si existen armónicos en la red.

- En el caso de transformadores triángulo-estrella, si existen intensidades de frecuencia múltiplo de tres, al estar en fase no llegan a circular

Armónicos impares				Armónicos pares	
No múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Orden h	HD _h (%)	Orden h	HD _h (%)	Orden h	HD _h (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6 ... 24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

■ Tabla 2. Límites de distorsión armónica de tensión (Norma UNE-EN 51600).

por las fases que alimentan el primario, quedando circulando en los devanados que forman el triángulo. Si no se tiene en cuenta esta situación, pueden producirse sobrecalentamientos en los devanados del primario que no sean detectados por las protecciones del sistema.

- Efectos de los armónicos en los motores: Desde el punto de vista de las pérdidas y el sobrecalentamiento son análogos a las comentadas para los transformadores. Además, la presencia de armónicos pueden generar unas vibraciones anormales debido a los pares motores adicionales que provocan, redundando en un acortamiento de la vida útil del motor.

- Efectos de los armónicos sobre los condensadores: Por un lado, la presencia de condensadores junto con las reactancias inductivas de la red pueden provocar la aparición de resonancias que amplifican los armónicos existentes (aumenta la distorsión armónica en el sistema), produciendo sobrecalentamientos y la eventual destrucción del condensador. Por otro lado, la impedancia de un condensador disminuye con la frecuencia, obteniéndose las mismas consecuencias.

- Efectos de los armónicos en equipos electrónicos: En general, los equipos cuyo funcionamiento se basa en la frecuencia de la red, dependiendo de los pasos por cero de la tensión, pueden tener problemas debido a la distorsión de la onda.

- Efectos de los armónicos en medidas eléctricas: Los aparatos cuyo funcionamiento se basa en el valor medio rectificado o el valor de pico, realizan la corrección de la escala para obtener el valor eficaz de la magnitud medida bajo el supuesto de que dicha magnitud presenta una forma de onda sinusoidal. Si la forma de onda no es sinusoidal se producirán errores en las medidas realizadas.

- La utilización de transformadores de tensión o corriente puede conducir a errores: posible saturación de los transformadores de tensión, aparición de un decalaje entre las corrientes de primario y secundario al utilizar transformadores de corriente.

- Por último, respecto a los contadores, según el tipo de contador y el espectro armónico de la carga no lineal se pueden tener lecturas inferiores o superiores a la correcta.

Soluciones

La solución ideal consistiría en eliminar por completo la emisión de armónicos o que éstos lleguen a las cargas sensibles. Por ejemplo, dimensionando correctamente los transformadores para que no se saturen, utilizando equipos electrónicos más complejos que reducen la emisión de armónicos o separando las cargas no lineales del resto de cargas existentes en la red. Debido a que estas soluciones resultan caras, se opta por adoptar soluciones que reduzcan los niveles de distorsión armónica a los niveles indicados por la normativa.

El empleo de transformadores triángulo-estrella evita que los armónicos múltiplos de tres existentes aparezcan aguas arriba del transformador. Otras configuraciones de transformador pueden ser útiles para eliminar los armónicos de orden 5 y 7. En este tipo de soluciones el transformador debe estar correctamente dimensionado y protegido para evitar los problemas comentados en el apartado anterior.

Los filtros pasivos son circuitos eléctricos que dejan pasar corrientes

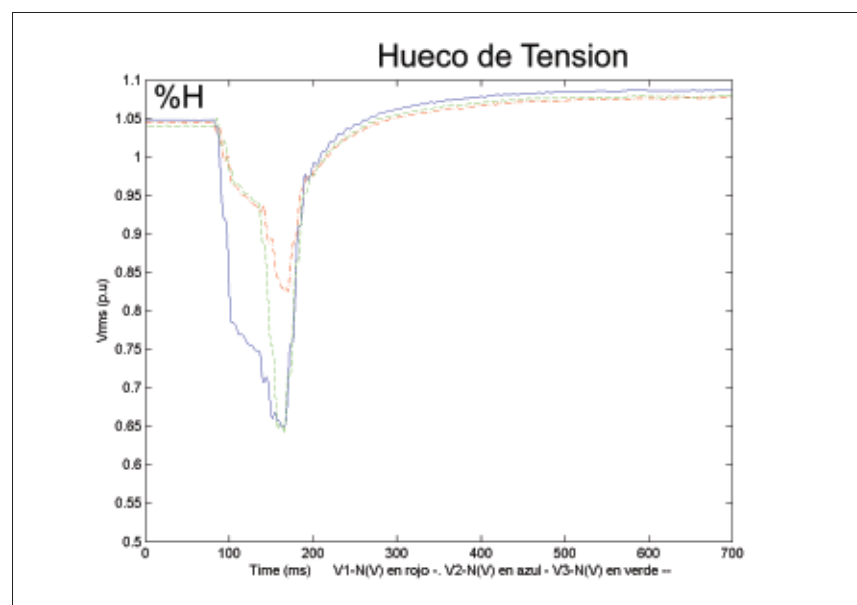
de ciertas frecuencias y no deja pasar otras, con lo que podemos reducir el nivel de los armónicos hasta los límites admisibles. Además, presentan la ventaja que permiten compensar la potencia reactiva de la instalación, aunque hay que tener precaución en su diseño, puesto que pueden originarse fenómenos de resonancia.

Por su parte, los filtros activos son dispositivos electrónicos que inyectan en la red intensidades con un valor y frecuencia determinados de forma que se cancelen los armónicos de intensidad que se encuentren presentes en la red. Presentan la ventaja de que no existen resonancias, y que además permiten corregir otro tipo de perturbaciones como los huecos de tensión. En su contra está su precio y que trabajan a alta frecuencia, originando perturbaciones de alta frecuencia.

Finalmente, existen los filtros híbridos que combinan las ventajas de los filtros activos y pasivos, resultando un filtrado en un amplio rango de frecuencias y una compensación de la energía reactiva.

Huecos de tensión

La importancia de los huecos de tensión (disminución de la tensión entre el 10% y el 90% de su valor nominal –valor RMS–, sin llegar a la interrupción, y por un tiempo de



■ Hueco de tensión trifásico (valor eficaz) (%H = profundidad).

entre 0,5 y 30 ciclos, según IEEE Std.1159-1995 –ver tabla 1) deriva de los efectos catastróficos indirectos que puede producir. La figura de la página anterior muestra un hueco de tensión trifásico (en valor eficaz –RMS–).

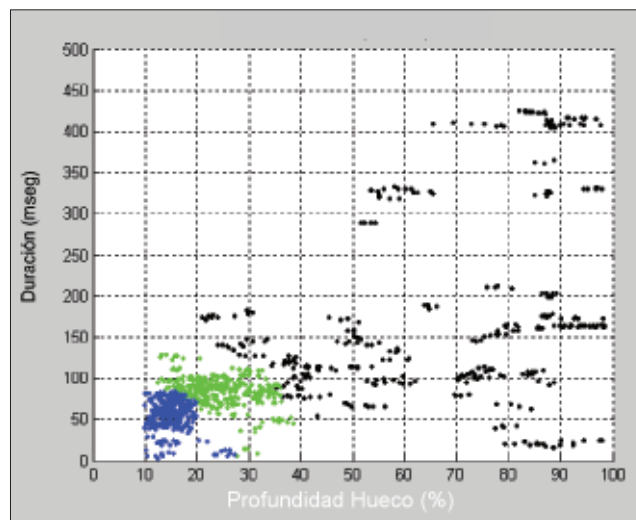
Entre otros efectos cabe citar el funcionamiento erróneo de dispositivos electrónicos, el disparo inapropiado de elementos de protección o reinicialización de equipos provocando paros indeseados en máquinas, procesos y cadenas de producción o el malfuncionamiento de éstos.

En la figura superior se representan con un punto los huecos de tensión (coordenadas duración y profundidad) registrados en una subestación de 25KV. Aunque la distribución no sea uniforme se observa una concentración de huecos de duración entre 50ms y 100ms y profundidad entre el 10% y 40%.

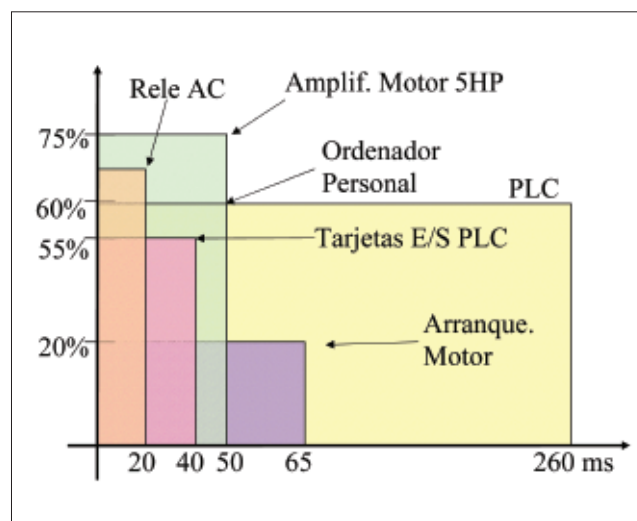
El estudio de su propagación, efectos e insensibilización es tema de actualidad en todos los foros del sector y afecta tanto a las compañías de distribución como a los consumidores (tanto como generadores como en calidad de receptores de huecos) por las repercusiones económicas que pueden derivarse.

Causas

Los fenómenos que intervienen en la aparición de un hueco en la red son varios y diversos, pero de forma general podemos decir que éstos se inician por sobrecarga o cortocircuito (total o parcial) y desaparecen bien por la acción de una protección del sistema eléctrico, que la aísla (dejando la línea afectada sin servicio), o bien por la desaparición rápida de la sobrecarga (sin tiempo que actúen las protecciones). También pueden ser motivo de huecos de tensión



■ Huecos de tensión registrados por equipos de monitorización y caracterizados según su duración y profundidad.



■ Tolerancias a variación de tensión (valores medios) de diversos equipos industriales.

la operación propia de la red para efectuar obras de mantenimiento o reparación.

Las causas más comunes de fallos en la red (transmisión y distribución) son las meteorológicas. Las descargas eléctricas sobre la línea o elementos metálicos de apoyo como torretas en medio de tormentas son causas frecuentes de cortocircuitos (fase-fase o fase-tierra). Vientos y nevadas pueden provocar movimientos de balanceo en las líneas hasta producir, ocasionalmente, cortocircuitos o variación momentánea de algún parámetro eléctrico. Otras causas puede ser la acción de maquinaria (en el transcurso de ejecución de obra civil) o de animales directamente sobre los cables.

El origen de huecos de tensión en clientes debe centrarse en la operación brusca de cargas (motores) y a fallos en el sistema eléctrico (cortocircuitos) y disparos de elementos de protección.

Efectos de los huecos de tensión

La perturbación ocasionada por estas incidencias se propaga a través de los diferentes elementos (líneas y transformadores) y puede ser registrada mediante equipos registradores especializados. Sus efectos en un punto concreto de la red dependen básicamente de la longitud recorrida y de la distribución de impedancias (básicamente transformadores) en este recorrido. Las conexiones de los transformadores pueden implicar variaciones importantes en las magnitudes propagadas.

Los efectos de las variaciones de tensión producidos por huecos pueden analizarse bajo el concepto de tolerancia de los equipos tal y como muestra la figura adjunta. En ella se

representa la tolerancia de varios equipos a variaciones de tensión. En las abscisas se representan los tiempos máximos que el equipo puede mantener su funcionamiento normal en ausencia de tensión, y en las ordenadas se indica la disminución máxima de tensión que el equipo soporta durante un tiempo ilimitado. De una forma más precisa, la curva de la figura que aparece en la página XX representa para equipos de procesamiento de datos (ordenadores y similares), la región de funcionamiento de los equipos frente a variaciones de tensión de corta duración.

De forma representativa se pueden citar como efectos de una disminución de la tensión, los que afectan a:

- **Contactores:** Una disminución de la tensión inferior al 50% durante más de 4 ciclos puede provocar su apertura, dejando sin alimentación todo un circuito.

- **Lámparas de mercurio:** Éstas se apagan con alimentación inferior al 80% de la nominal y si esto sucede debe pasar un tiempo previo a su posterior encendido.

- **Autómatas programables (PLC):** el reset de uno de estos equipos puede producir la parada inmediata de una línea de producción, una máquina o la pérdida de control de un proceso. Las tarjetas de entradas y salidas son más sensibles que las propias unidades de control, pudiendo llevar a malfuncionamientos cuando la alimentación disminuye por debajo del 90% durante pocos ciclos.

- **Electrónica de consumo:** un hueco de tensión puede manifestarse en un televisor dejando la pantalla negra durante varios segundos, puede reinicializar un reproductor de discos compactos o quedando a la espera de accionar un control, o borrar ajustes realizados en equipos (canales en el televisor, programas de un microondas, programación video, etc.) en caso que no dispongan de batería.

Soluciones

Evidentemente, la mejor solución al problema de los huecos de tensión pasa por eliminar o reducir las causas que los producen. Por tanto, cualquier esfuerzo por evitar cortocircuitos y disparos de elementos de protección redundará en una reducción del número de huecos.

Para sus redes en zonas especialmente sensibles, las compañías adoptan soluciones como la sustitución de líneas aéreas por subterráneas, instalación de apantallamientos especiales, uso de cables con cubierta aislante o incrementar la frecuencia de inspección y mantenimiento de las líneas.

Desde la perspectiva del usuario final, las alternativas son varias, pudiéndose actuar sobre el sistema eléctrico de potencia, instalar equipos específicos que permitan mitigar los efectos de los huecos o añadir como criterio de selección de nuevos equi-

pos la adopción de soluciones constructivas desde su diseño:

- **Cambios en el sistema de potencia.** Algunos cambios en el sistema de alimentación puede reducir el efecto de los huecos:

- Situar los generadores (en caso de haberlos) cerca de las cargas sensibles. En caso de existir plantas de cogeneración, cuidar el punto de conexión a la red con este propósito. Ello permitirá mantener la alimentación durante el hueco de tensión.

- Alimentar los equipos o líneas sensibles desde dos subestaciones. Esto puede incrementar el número de huecos, pero reducirá su severidad.

- Instalación de limitadores de corriente (recordar que el hueco viene asociado a una sobreintensidad) en puntos estratégicos con el fin de incrementar la distancia eléctrica. Esto irá en perjuicio de otros usuarios.

- **Instalación de equipos adicionales.** A continuación se relacionan algunas soluciones útiles para mantener el nivel de tensión durante la aparición de un hueco:

- **Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAI).** Su instalación en la línea a proteger posibilitará mantener la tensión constante durante el hueco de tensión.

- **Conjunto motor de combustión -generador (grupo electrógeno).**

- **Conjunto motor-generator con volante de inercia,** también conocido

como SAI dinámico.

- **Condensadores y baterías de almacenamiento,** con el correspondiente ondulator.

- **Instalación de DVR (*Dynamic Voltage Restorer*),** los cuales permiten generar formas sinusoidales de frecuencia, fase y amplitud deseada, a partir de una tensión de continua (batería o condensador) empleando inversores en fuente de tensión, mitigando de esta forma el efecto de los huecos

- **Soluciones constructivas en los equipos.** Los fabricantes de equipos electrónicos, sensibles a esta problemática, ofrecen soluciones robustas a las caídas de tensión que pasan por:

- Incrementar la capacidad de los condensadores en los buses de alimentación DC de los equipos.

- Mejoras en los convertidores DC/DC, para equipos con alimentación monofásica y pequeña potencia, de forma que su funcionamiento correcto se amplíe a un rango mayor de tensión.

- **Variadores de velocidad de motores de inducción y de corriente continua.** En el primer caso, aumentando la capacidad en el bus de continua se reduce la sensibilidad del conjunto a la presencia de huecos de tensión (se trata en muchos casos de diseños especiales bajo especificaciones de cliente). En el segundo caso, es más complicado, pues no existe elemento que almacene energía como era el anterior condensador. Además, la corriente de inducido de la máquina y, por tanto, el par motor disminuyen rápidamente al producirse un hueco de tensión.

- **Otras soluciones:** Análisis de inmunidad individual de los elementos de aparataje eléctrico (contactores, relés, etc.) y fuentes de alimentación en beneficio de un incremento en la insensibilización global de la instalación.

Joaquim Meléndez Frigola

Sergio Herraiz Jaramillo

Joan Colomer Llinás

Institut d'Informàtica i

Aplicacions

Universitat de Girona

