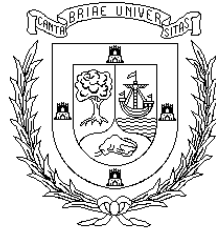


**Universidad de Cantabria**  
**Departamento de Electrónica y Computadores**



TESIS DOCTORAL

**Nuevo Método de Detección y Análisis  
en Tiempo Real de Eventos  
en la Tensión de Suministro de Energía  
Eléctrica Empleando un Modelo Combinado  
Wavelets-Filtro de Kalman Extendido**

Autor: Enrique Pérez Fernández

Santander, Marzo de 2006

# Capítulo 2

## Perturbaciones en la calidad de la energía eléctrica

---

*En este capítulo se definen las distintas alteraciones en la calidad de la energía eléctrica y se analiza el estado de la normativa internacional. También se estudian sus causas y el efecto que dichas alteraciones producen sobre los equipos conectados a la red de distribución. Finalmente se analizan las curvas de tolerancia de un equipo frente a las variaciones de tensión.*

---



---

## 2.1. INTRODUCCIÓN

---

La Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) en su normativa sobre compatibilidad electromagnética clasifica las perturbaciones electromagnéticas de la forma que se indica en la tabla 2.1 [1].

<i>Fenómenos conducidos de baja frecuencia</i>	Armónicos, interarmónicos Señales transmitidas en la red Fluctuaciones de tensión Huecos de tensión e interrupciones Desequilibrio de tensiones Variaciones de frecuencia Voltajes inducidos de baja frecuencia Componente de continua en redes de alterna
<i>Fenómenos radiados de baja frecuencia</i>	Campos magnéticos Campos eléctricos
<i>Fenómenos conducidos de alta frecuencia</i>	Tensiones o corrientes inducidas de onda continua Transitorios unidireccionales Transitorios oscilatorios
<i>Fenómenos radiados de alta frecuencia</i>	Campos eléctricos Campos magnéticos Campos electromagnéticos (radio) Ondas continuas Transitorios
<i>Fenómenos de descarga electrostática</i>	-
<i>Pulsos electromagnéticos nucleares</i>	-

**Tabla 2.1.** Clasificación de los principales fenómenos que producen perturbaciones electromagnéticas según la CEI.

Dependiendo del entorno podemos encontrar diferentes tipos de perturbaciones electromagnéticas. Las perturbaciones radiadas de baja o alta frecuencia suelen ser de naturaleza electromagnética causadas por equipos tales como líneas de alta tensión, antenas, aparatos magnéticos, transmisores de radio, radares, etc.

Las perturbaciones conducidas tanto de baja como de alta frecuencia, suelen estar producidas por el acoplamiento de grandes cargas como convertidores de potencia, motores eléctricos, bancos de condensadores o circulación de corrientes de fallo por las redes de distribución. Los fenómenos de descarga electrostática, por su parte, se producen por la acumulación de carga

estática en personas u objetos con la consiguiente posibilidad de descarga cuando se entra en contacto con ellos.

Un aspecto importante a tener en cuenta es que la eliminación completa de las perturbaciones electromagnéticas es imposible. Por ello, los equipos se deben adecuar para disminuir al máximo las emisiones que generan, y que pueden afectar al funcionamiento de otros equipos y al mismo tiempo deben reducir las repercusiones que puedan tener esas alteraciones en su propio funcionamiento.

En lo que se refiere a las perturbaciones conducidas de baja frecuencia, las principales perturbaciones son fundamentalmente las siguientes: variaciones de la frecuencia, interrupciones del suministro de corta y de larga duración, huecos de tensión, armónicos e interarmónicos en tensiones y corrientes, fluctuaciones de tensión rápidas y lentas, flicker de tensión y desequilibrio entre fases en sistemas trifásicos.

Las interrupciones del suministro, los huecos de tensión, las fluctuaciones de tensión, la distorsión armónica y el desequilibrio se generan en el propio sistema y se transmiten de la red a las cargas conectadas, mientras que los armónicos de corriente, el desequilibrio de corrientes y el flicker de tensión se generan en las cargas y se transmiten al resto de la red.

Los armónicos han sido históricamente la perturbación más estudiada ya que su existencia se conoce desde los comienzos de la distribución eléctrica. Su estudio y la evolución de las técnicas de medida han sido los generadores del interés en otros aspectos de la calidad de la energía eléctrica hasta llegar a la situación actual.

En un entorno industrial las perturbaciones más severas por los efectos económicos que pueden producir son las interrupciones del suministro y los huecos de tensión [2], y son el campo de aplicación de esta tesis doctoral. En un entorno residencial además de estas perturbaciones hay que añadir el flicker de tensión debido a la sensación de molestia que produce la fluctuación de la luminosidad que lleva asociado en las lámparas y otros dispositivos de iluminación.

---

## 2.2. MEDIDA Y CARACTERIZACIÓN DE EVENTOS EN LA TENSIÓN DE SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

---

Las normas más importantes que tratan sobre medida y caracterización de eventos en la tensión de suministro de energía eléctrica (y en general de la calidad de la energía eléctrica) son la norma europea EN-50160 [3], el estándar IEC 61000-4-30 [4] y el IEEE Standard 1159-1995 [5]. En los siguientes apartados se revisan y comparan las definiciones y los métodos de caracterización empleados en las distintas normas.

### 2.2.1 Estándar EN-50160

La norma EN-50160 es la norma europea básica en calidad de la energía eléctrica. Esta norma describe las características principales que debe tener la tensión suministrada por una red general de distribución en baja y en media tensión en condiciones normales de explotación y en el punto de entrega al cliente. Como dice en su primer apartado: *“Esta norma da los límites o los valores de las características de la tensión que todo cliente tiene derecho a esperar, y no da los valores típicos en la red general de distribución”*.

El estándar EN-50160 define los límites para la frecuencia nominal de la tensión suministrada, la amplitud de la tensión, las variaciones de la tensión suministrada, las variaciones rápidas de la tensión (amplitud de las variaciones y severidad del parpadeo), los huecos de tensión, las interrupciones breves y las interrupciones largas del suministro, las sobretensiones temporales y transitorias, el desequilibrio de la tensión suministrada, las tensiones armónicas e interarmónicas y la transmisión de señales de información por la red, así como los protocolos de medida.

En cambio, el estándar no fija la responsabilidad del cumplimiento de esos límites en ninguna de las partes. También es importante destacar que la norma solo es aplicable en condiciones normales de operación e incluye una lista de operaciones en las que esos límites no son aplicables, como las operaciones realizadas después de un fallo, acciones industriales o cortes de suministro debidos a eventos externos.

El estándar define la tensión nominal normalizada para las redes generales de baja tensión de 230 voltios entre fase y neutro en sistemas trifásicos de cuatro conductores y de 230 voltios entre fases en sistemas trifásicos de tres conductores. Las variaciones de la tensión suministrada en condiciones normales de explotación deben ser:

- para cada periodo de una semana, el 95% de los valores eficaces de la tensión suministrada promediados en 10 minutos, deben situarse en  $\pm 10\%$  de la tensión nominal.
- para todos los valores de 10 minutos, los valores promediados del valor eficaz de la tensión deben situarse en el intervalo de  $+10\% / -15\%$  de la tensión nominal.

De acuerdo con el estándar EN-50160, un hueco de la tensión de alimentación se define de la siguiente forma:

*“Disminución brusca de la tensión de alimentación a un valor situado entre el 90% y el 1% de la tensión de alimentación declarada  $U_c$ , seguida del restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo. Por convenio, un hueco de tensión dura de 10 ms a 1 minuto. La profundidad de un hueco de tensión se define como la diferencia entre la tensión eficaz mínima durante el hueco de tensión y la tensión declarada. Las variaciones de tensión que no reducen la tensión de alimentación a un valor inferior al 90% de la tensión declarada  $U_c$  no se consideran como huecos de tensión”.*

En las redes de baja tensión la tensión declarada y la tensión nominal son iguales.

En cuanto a valores indicativos, el estándar dice que el número de huecos tensión esperado en un año puede ir de algunas decenas a un millar y que la mayor parte de los huecos tiene una duración de menos de un segundo y una profundidad inferior al 60%.

Una interrupción de la alimentación se define como:

*“Condición en que la tensión en los puntos de suministro es inferior al 1% de la tensión declarada  $U_c$ ”.*

La interrupción se clasifica como interrupción larga si su duración sobrepasa los 3 minutos, y se clasifica como interrupción breve si su duración es inferior a los 3 minutos.

Según el estándar, el número esperable de interrupciones breves de la tensión de alimentación puede variar de algunas decenas a varias centenas, siendo la duración de aproximadamente el 70% de las interrupciones breves inferior a 1 segundo. En cuanto a las interrupciones de larga duración, la frecuencia anual esperable puede ser inferior a 10 o alcanzar hasta 50 según las regiones.

La norma EN-50160 define una sobretensión temporal como una sobretensión de una duración relativamente larga en un lugar dado y una sobretensión transitoria como una sobretensión oscilatoria o no oscilatoria de corta duración fuertemente amortiguada y que dura como máximo algunos milisegundos.

Estas definiciones se resumen en la tabla 2.2.

<i>Evento en la tensión de suministro</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Duración</i>
<i>Hueco de tensión</i>	90% < 1%	10 ms < 1 minuto
<i>Bajada de tensión</i>	90% < 1%	> 1 minuto
<i>Interrupción del suministro</i>	< 1%	< 3 minutos (breve) > 3 minutos (larga)
<i>Sobretensión temporal</i>	> 110%	relativamente larga
<i>Sobretensión transitoria</i>	> 110%	algunos milisegundos

**Tabla 2.2.** Definiciones utilizadas en la norma EN-50160.

### 2.2.2 Estándar IEC 61000-4-30

El estándar IEC 61000-4-30 define los métodos de medida de los parámetros de la calidad de suministro y el modo de interpretar los resultados. En la norma se indican los métodos de medida sin fijar los umbrales. Entre otros parámetros el estándar define los métodos de detección y evaluación de los huecos de tensión, sobretensiones temporales y las interrupciones de la tensión de suministro.

Este estándar define el valor  $U_{\text{rms}(1/2)}$  como la magnitud básica para caracterizar un hueco, interrupción o sobretensión en la tensión de alimentación. El valor  $U_{\text{rms}(1/2)}$  se define como la tensión r.m.s. medida sobre un ciclo, comenzando en el cruce por cero de la señal fundamental, y actualizada cada medio ciclo.

Un hueco de tensión comienza cuando la magnitud  $U_{\text{rms}(1/2)}$  cae por debajo del umbral de detección (0.9 p.u. de la tensión declarada de acuerdo con la norma EN-50160) y termina cuando el valor  $U_{\text{rms}(1/2)}$  es igual o superior al umbral de detección más una tensión de histéresis (esta histéresis es en general igual al 2% de la tensión declarada). En lugar de utilizar un umbral de detección sobre la tensión declarada, el estándar también establece la posibilidad de emplear



una tensión de referencia deslizante, definida como un valor de tensión promediado en un intervalo de tiempo especificado, que representa la tensión que precede al hueco.

Los huecos de tensión se caracterizan por un par de datos:

- la tensión residual o la profundidad
- la duración

La tensión residual es el menor valor de  $U_{\text{rms}(1/2)}$  medido durante el hueco y la profundidad de un hueco de tensión se define como la diferencia entre la tensión de referencia y la tensión residual y en general se expresa en porcentaje de la tensión de referencia. Por su parte, la duración de un hueco de tensión se define como la diferencia del tiempo entre el inicio y el final del hueco de tensión

Una sobretensión temporal en la tensión de suministro comienza cuando la magnitud  $U_{\text{rms}(1/2)}$  sobrepasa el umbral de detección (1.1. p.u. de la tensión declarada respectivamente, de acuerdo con la norma EN-50160) y termina cuando el valor  $U_{\text{rms}(1/2)}$  es igual o inferior al umbral de detección menos una tensión de histéresis. También en este caso se puede emplear una tensión de referencia deslizante en lugar de la tensión declarada como umbral de detección.

Las sobretensiones temporales también se caracterizan por un par de datos:

- la amplitud máxima de la sobretensión
- la duración

La amplitud máxima es el mayor valor de  $U_{\text{rms}(1/2)}$  medido durante la sobretensión y su duración es la diferencia de tiempo entre el comienzo y el final de la sobretensión temporal.

Para la evaluación de las interrupciones de la tensión de suministro, se considera que una interrupción comienza cuando el valor  $U_{\text{rms}(1/2)}$  cae por debajo del umbral de interrupción de tensión y termina cuando el valor  $U_{\text{rms}(1/2)}$  es igual o superior al umbral de interrupción de tensión mas la histéresis. De acuerdo con la EN-50160 se produce una interrupción cuando la tensión en los puntos de suministro es inferior al 1% de la tensión declarada. La duración de una interrupción de tensión es la diferencia entre el comienzo y el final de la interrupción.

### 2.2.3 Estándar IEEE 1159-1995

El estándar IEEE 1159-1995 define siete categorías distintas de fenómenos electromagnéticos en las redes eléctricas: transitorios, variaciones de corta duración, variaciones de larga duración, desequilibrio de la tensión, distorsión de la forma de onda, fluctuaciones de tensión y variaciones de la frecuencia.

La categoría de variaciones de corta duración comprende los huecos de tensión, las interrupciones y lo que denomina la antítesis al hueco de tensión o “swell”. Cada tipo se clasifica en instantáneo, momentáneo o temporal dependiendo de su duración, como se indica en la tabla 2.3.

<i>Categorías</i>	<i>Duración típica</i>	<i>Magnitud típica de la tensión</i>
<b>2.0 Variaciones de corta duración</b>		
<b>2.1 Instantánea</b>		
2.1.1 Hueco	0.5 – 30 ciclos	0.1 – 0.9 p.u.
2.1.2 Swell	0.5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 p.u.
<b>2.2 Momentánea</b>		
2.2.1 Interrupción	0.5 ciclos – 3 s	< 0.1 p.u.
2.2.2 Hueco	30 ciclos – 3 s	0.1 – 0.9 p.u.
2.2.3 Swell	30 ciclos – 3 s	1.1 – 1.4 p.u.
<b>2.3 Temporal</b>		
2.2.1 Interrupción	3 s – 1 min	< 0.1 p.u.
2.2.2 Hueco	3 s – 1 min	0.1 – 0.9 p.u.
2.2.3 Swell	3 s – 1 min	1.1 – 1.2 p.u.
<b>3.0 Variaciones de larga duración</b>		
3.1 Interrupción sostenida	> 1 min	0.0 p.u.
3.2 Bajada de tensión	> 1 min	0.8 – 0.9 p.u.
3.3 Sobretensión	> 1 min	1.1 – 1.2 p.u.

**Tabla 2.3.** Definiciones de las variaciones de corta duración y de larga duración en el IEEE Std. 1159-1995.

Las variaciones de corta duración se producen casi siempre por condiciones de fallo, por la conexión de grandes cargas que requieren grandes corrientes de arranque o por desconexiones intermitentes. Dependiendo de la localización del fallo y del estado del sistema, el fallo puede producir sobretensiones, bajadas de tensión o interrupciones temporales. Tanto en el caso en el que el fallo esté cercano o lejano al punto de interés, su efecto sobre la tensión va a ser una variación de corta duración.

De acuerdo con la tabla 2.3, una interrupción se produce cuando la tensión de alimentación es inferior a 0.1 p.u. durante un tiempo inferior a 1 minuto.

Un hueco de tensión se define como una disminución de la tensión eficaz de corta duración comprendida entre un valor del 90% y del 10% de la tensión nominal y con una duración comprendida entre 0.5 ciclos y 1 minuto. Las disminuciones de tensión inferiores a medio ciclo no se pueden caracterizar por medio de la variación de su valor eficaz, y por eso se incluyen dentro de la categoría de fenómenos transitorios. Por otro lado, las disminuciones de la tensión con una duración mayor a 1 minuto pueden estar asociadas a una gran variedad de causas distintas de los fallos en la red y se pueden controlar por medio de los dispositivos de regulación de tensión. Debido a ello, el estándar incluye estas perturbaciones dentro del grupo de las variaciones de tensión de larga duración.

Los huecos de tensión se dividen en tres categorías en función de su duración: instantáneos, momentáneos y temporales, que coinciden con las tres categorías de interrupciones y de swells. Estas duraciones están escogidas en función de los tiempos de operación típicos de los dispositivos de protección.

Un swell se define como un aumento de la tensión eficaz de una duración comprendida entre 0.5 ciclos y 1 minuto. La magnitud típica de un swell está comprendida entre el 110% y el 180% de la tensión nominal. Al igual que los huecos de tensión, los swell están producidos normalmente por fallos en la red, pero son mucho menos frecuentes que los huecos de tensión. Un swell se puede producir como resultado de un fallo de línea a tierra que puede dar origen al aumento de la tensión en la fase no afectada por el fallo. La magnitud del aumento de la tensión es función de la localización del fallo, de la impedancia del sistema y del tipo de conexión a tierra.

Por su parte, la categoría de variaciones de larga duración comprende las desviaciones del valor r.m.s. superiores a 1 minuto en el rango especificado en la tabla 2.3. Las variaciones de larga duración pueden ser tanto sobretensiones como bajadas de tensión. Tanto unas como otras no son generalmente producidas por fallos. Están producidas por variaciones en la carga o por operaciones de conmutación en el sistema.

Por último, una interrupción sostenida se define como una disminución hasta cero voltios de la tensión de alimentación por un período superior a un minuto. Este tipo de interrupciones son normalmente permanentes y requieren de intervención manual para la reposición del servicio.

Actualmente este estándar está en proceso de revisión donde incluye novedades significativas. El estándar se subdivide en tres diferentes. El 1159.1 dedicado a la definición de los requisitos del sistema de medida para caracterizar las perturbaciones electromagnéticas [6]. El 1159.2 donde se define la forma de convertir los valores muestreados de la tensión y corriente en un conjunto de categorías de power quality, describiendo los atributos de cada categoría [7] y el 1159.3, ya aprobado, donde se define el formato de los datos adecuados para el intercambio de información relacionada con la calidad de la energía eléctrica [8].

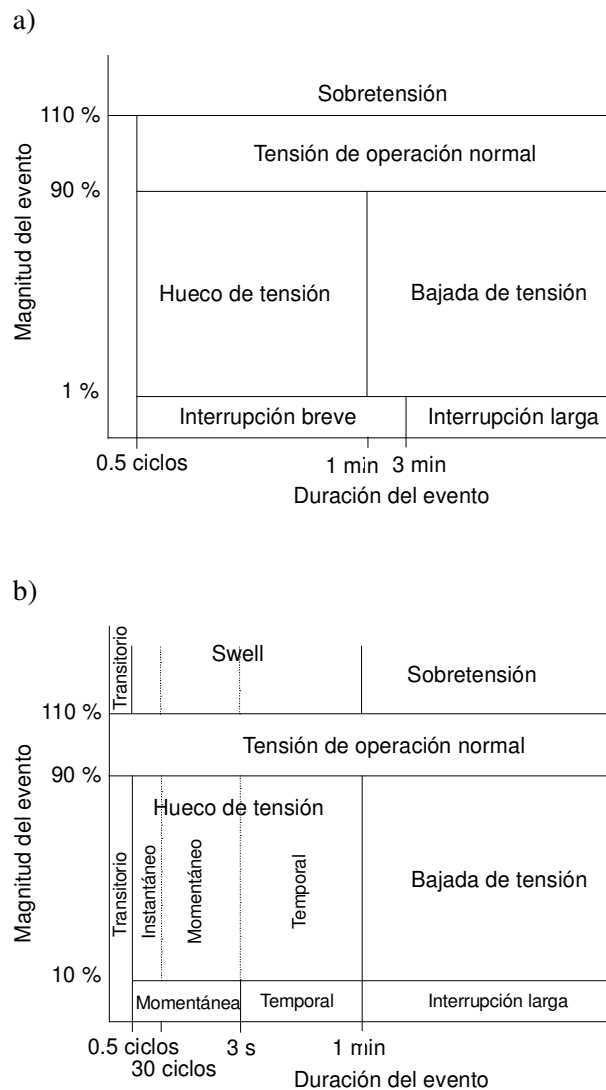
El estándar 1159.1 va a adoptar el valor  $U_{\text{rms}(1/2)}$  definido por la IEC, como la magnitud básica para caracterizar un hueco, interrupción o sobretensión en la tensión de alimentación, empleando un umbral de detección de huecos sobretensiones e interrupciones definido como un porcentaje de la tensión declarada o sobre la tensión de referencia deslizante definida en la misma manera que la IEC. Los distintos eventos se caracterizan por los parámetros magnitud y duración, definidos en la misma forma que en el estándar IEC 61000-4-30.

Como novedad y para reducir el error en el cálculo de la duración de un evento debido a las limitaciones del método  $U_{\text{rms}(1/2)}$ , el estándar propone la utilización del método de envolvente en la forma de onda para determinar la duración. En este método se emplean dos envolventes en  $\pm 5\%$  y  $\pm 10\%$  de la forma de onda de la tensión antes del evento. Cuando la señal supera el límite del 10%, el evento se detecta y se busca hacia atrás el punto de la onda en el que la señal superó por primera vez el límite del 5%. Este punto se toma como el punto de comienzo del evento. El final del evento se considera cuando la forma de onda retorna dentro del límite del 10% al menos durante medio ciclo.

#### **2.2.4 Análisis comparativo**

Como se puede ver de las definiciones dadas por el estándar EN-50160 y por el IEEE Std. 1159-1995, no hay unanimidad ni en las magnitudes ni en las duraciones de estas perturbaciones en la tensión de suministro, incluso, el estándar EN-50160 no define de forma específica ni magnitudes ni rangos de algunas de las perturbaciones.

En la figura 2.1 se representa gráficamente las definiciones dadas en los dos estándares.



**Figura 2.1.** Definición de eventos en la magnitud de la tensión de suministro según: a) EN-50160, b) IEEE Std. 1159-1995

### 2.3. EFECTO DE LAS VARIACIONES DE TENSIÓN SOBRE LOS EQUIPOS

El efecto más importante asociado a los huecos de tensión, las sobretensiones temporales y las interrupciones de la tensión de suministro es la desconexión o el mal funcionamiento de los equipos. En muchos procesos industriales con cargas críticas, variaciones muy cortas de tensión, incluso instantáneas, pueden producir la desconexión de los equipos de control que luego necesitan horas para su reiniciación. En este tipo de procesos, las variaciones de corta duración producen el mismo efecto perjudicial que las perturbaciones de larga duración.

Las interrupciones de tensión, incluso las instantáneas, también pueden producir el mal funcionamiento o la desconexión de equipos electrónicos o de los equipos de iluminación. Las interrupciones momentáneas o temporales producen casi siempre la parada de los controladores electrónicos, el mal funcionamiento de las fuentes de alimentación, computadores, equipos de control de máquinas eléctricas y pueden producir también la desconexión de contactores en motores de inducción.

Los huecos de tensión también producen numerosos fallos en los equipos conectados a la red, dependiendo de la magnitud y duración de estos huecos y de la sensibilidad de los equipos a las variaciones de la tensión. Una posible solución para evitar este problema es alimentar el equipo sensible con un transformador de tensión constante, con una fuente de alimentación ininterrumpida o cualquier otro equipo que proporcione una tensión constante durante el hueco de tensión. Equipos electrónicos con baterías de emergencia no se ven afectados, en general, por este tipo de variaciones de corta duración.

Otros equipos, como transformadores, cables, buses, transformadores de medida de tensión y de corriente, no se ven afectados en su funcionamiento por los huecos de tensión de corta duración. Los motores de inducción pueden sufrir un ligero cambio de velocidad durante un hueco de tensión y los bancos de condensadores pueden disminuir ligeramente su salida durante el hueco de tensión. Por último, algunos dispositivos de iluminación pueden experimentar una ligera disminución de la luminosidad durante un hueco de tensión.

En cuanto a las sobretensiones temporales, los aumentos de la tensión por encima de la tensión nominal de los equipos pueden producir el fallo de sus componentes, dependiendo de la magnitud de la tensión y de la frecuencia con la que esta se produzca. Equipos electrónicos como controladores de velocidad, computadores y controladores electrónicos, pueden funcionar en modo de fallo de forma inmediata en estas condiciones. Otros equipos, como transformadores, cables, transformadores de medida de tensión y de corriente y máquinas eléctricas rotatorias, pueden experimentar una reducción importante en su tiempo de vida medio. Los aumentos temporales de tensión pueden producir funcionamientos inesperados en algunos relés de protección y, en cambio, no afectar en su funcionamiento a otros. La luminosidad de algunos dispositivos de iluminación puede aumentar durante una sobretensión temporal. Por último, los dispositivos de protección contra sobretensiones, como varistores o diodos de avalancha, se pueden destruir por sobretensiones que excedan su capacidad máxima.

Las variaciones de larga duración también pueden producir problemas en los equipos. Así, las interrupciones de larga duración producen la desconexión de los equipos, salvo que estos estén protegidos por sistemas de alimentación ininterrumpida o por otros dispositivos de almacenamiento de energía.

Las bajadas de tensión de larga duración también producen el mal funcionamiento de los equipos. Los controladores de los motores eléctricos pueden producir la desconexión durante una bajada de tensión. Las bajadas de tensión de larga duración pueden aumentar las pérdidas por calentamiento en los motores de inducción, debido al aumento de la corriente del motor y también pueden producir cambios en la velocidad del motor. Los computadores y los controladores electrónicos se pueden desconectar durante una bajada de tensión. La salida de los bancos de condensadores se reduce en condiciones de bajada de tensión, ya que su magnitud es proporcional al cuadrado de la tensión aplicada. También se puede reducir la luminosidad de algunos dispositivos de iluminación en las condiciones de bajada de tensión. Por último, las bajadas de tensión no afectan en su funcionamiento a equipos como transformadores, cables, buses, transformadores de medida de tensión y de corriente, dispositivos de medida o transductores.

Las sobretensiones de larga duración también producen fallos en los equipos. Los equipos electrónicos pueden fallar de forma inmediata durante una sobretensión, en cambio, equipos como transformadores, cables, transformadores de medida de tensión y de corriente, máquinas rotatorias, normalmente no presentan un fallo inmediato en estas condiciones, aunque en caso de sobretensiones mantenidas, pueden sufrir una disminución en su tiempo de vida medio. Las sobretensiones mantenidas pueden dar origen a funcionamientos no esperados en algunos relés de protección y en cambio pueden no producir ningún efecto sobre otros. La potencia reactiva generada en los bancos de condensadores aumenta en proporción al cuadrado de la tensión aplicada durante la condición de sobretensión. Y por último, algunos dispositivos de iluminación pueden aumentar la luz visible durante la sobretensión.

De los efectos de las variaciones de corta y larga duración sobre los equipos queda patente la necesidad de disponer de sistemas de monitorización de la calidad de la energía eléctrica y de desarrollar algoritmos de detección para poder actuar rápidamente y evitar estos efectos perjudiciales sobre los equipos y sobre los procesos industriales. En primer lugar es difícil determinar a partir de los efectos observables en los equipos, que tipo de fenómeno electromagnético ha producido la desconexión de ese equipo. Además, el tipo de solución a adoptar puede ser muy diferente en función de si el equipo se ve afectado por huecos de tensión, por interrupciones en el suministro o por sobretensiones.

---

## 2.4. CURVAS DE TOLERANCIA A LAS VARIACIONES DE TENSIÓN

---

La forma recomendada de representar la relación entre las características de funcionamiento de un equipo frente a las variaciones en la tensión de suministro de energía eléctrica, es la utilización de las que se conocen como curvas de tolerancia. Estas curvas, que también se conocen como “power acceptability curves”, representan la variación de la tensión en una línea, expresada en tanto por ciento de tensión, frente al tiempo de duración de esa variación, normalmente expresado en segundos o en ciclos de la componente fundamental y en escala logarítmica. Estas curvas dividen el plano desviación de tensión - duración de la desviación en dos regiones denominadas: potencia aceptable y potencia no aceptable.

En la descripción del comportamiento de un equipo por medio de las curvas de tolerancia se hace implícitamente una suposición fundamental, y es que una variación de tensión, hueco o sobretensión, se puede caracterizar únicamente por medio de su magnitud y de su duración. Así, desde el punto de vista del equipo en estudio, si dos huecos (o dos sobretensiones) tienen la misma magnitud y la misma duración, ambos producirán el mismo efecto sobre el equipo, esto es, o se produce la desconexión del equipo en ambos casos o esta desconexión no se produce en ningún caso.

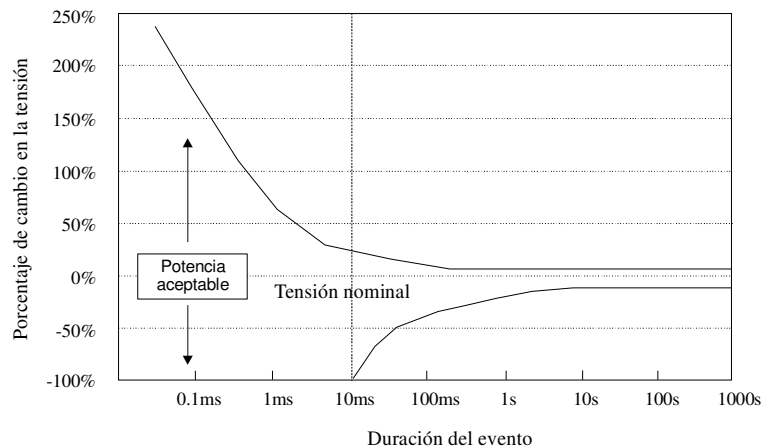
Como ya hemos visto anteriormente, tanto la magnitud como la duración de este tipo de variaciones de corta duración no tienen una definición única. Además, los saltos de fase que normalmente acompañan a estos tipos de perturbaciones y los desequilibrios en el caso de sistemas trifásicos pueden influir significativamente en el comportamiento de los equipos. Por tanto, la representación bidimensional de estas curvas de tolerancia tiene sus limitaciones, especialmente en el caso de sistemas trifásicos.

La primera curva de tolerancia, conocida como la curva CBEMA, fue introducida por la Computer Business Equipment Manufacturers Association, representada en la figura 2.2, se puede emplear para evaluar la calidad de la tensión de suministro en relación a los interrupciones, huecos y bajadas de tensión y las sobretensiones. Esta curva se aplicó inicialmente como una guía para ayudar a los miembros de la CBEMA a diseñar las fuentes de alimentación de sus computadores y equipos electrónicos.

La curva CBEMA muestra la magnitud y duración de las variaciones de tensión en el sistema eléctrico. La línea representada por  $\Delta V = 0$  representa el caso de tensión al valor nominal,



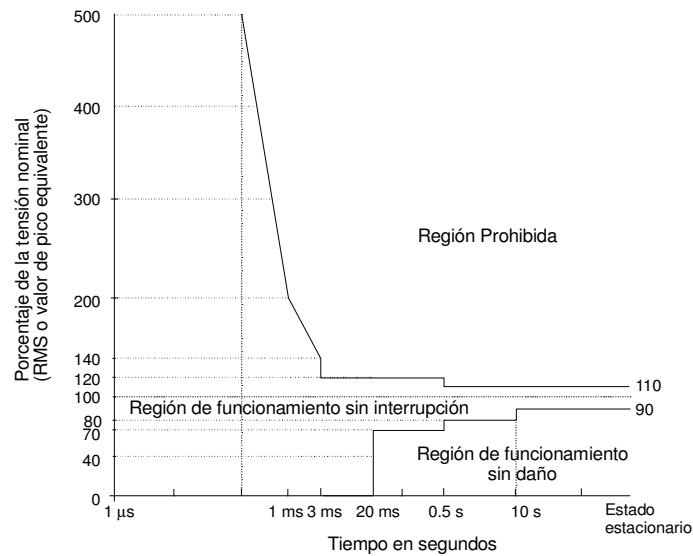
mientras que los semiplanos correspondientes a  $\Delta V < 0$  y  $\Delta V > 0$  corresponden a las regiones de tensión inferior y superior respectivamente al valor nominal. La región entre los dos lados de la curva representa la región de tolerancia dentro de la que se espera que los equipos electrónicos funcionen correctamente. Las sobretensiones y las bajadas de tensión de muy corta duración se consideran aceptables, en el sentido de que no producen la desconexión o el mal funcionamiento de los equipos. Esta curva de tolerancia es parte importante del IEEE Std 1346-1998 [9].



**Figura 2.2.** Curva CBEMA de tolerancia a variaciones de tensión

La curva CBEMA se construyó a partir de datos experimentales y de datos históricos obtenidos de grandes computadores. Estudios posteriores sobre la calidad de la energía eléctrica pusieron de manifiesto que había un gran número de eventos en la tensión de alimentación (huecos de tensión fundamentalmente) que no estaban incluidos dentro de la zona aceptable definida por la curva CBEMA [10,11]. Esto llevó a una revisión de la curva CBEMA que incluyó unos requerimientos más estrictos para definir la zona de aceptabilidad. Esta curva CBEMA revisada ha sido adoptada por el Information Technology Industry Council (ITIC), se conoce como la curva ITIC [12] y se representa en la figura 2.3.

La curva ITIC describe la envolvente (el rango) de la tensión de suministro de corriente alterna que normalmente pueden tolerar, es decir, que no interrumpen su funcionamiento, una mayoría de equipos de electrónicos denominados como equipos de la tecnología de la información. La curva es aplicable solamente para tensiones monofásicas de 120 voltios nominales de valor eficaz y 60 Hz y no está definida para servir como especificación en el diseño de equipos o de sistemas de distribución de corriente alterna. La curva define tanto condiciones estacionarias como transitorias y su utilización para otras tensiones nominales y para otras frecuencias no está específicamente considerada.



**Figura 2.3.** Curva ITIC.

Fuera de esta región de tolerancia se definen dos regiones desfavorables. La región de funcionamiento sin deterioro, incluye huecos e interrupciones de tensión más severas que las especificadas anteriormente y que aplican tensiones inferiores al límite mínimo de la tolerancia en el estado estacionario. En esta región no se espera que los equipos funcionen correctamente, pero, en cambio, no es de esperar ningún daño sobre ellos. En la región restante, denominada región prohibida, incluye sobretensiones que superan el límite superior de la curva y es una región a evitar, ya que si se somete a los equipos a tensiones con estas condiciones se puede esperar que se produzca su avería.

Aunque la curva ITIC (CBEMA) se ha definido para equipos de las denominadas tecnologías de la comunicación, también se emplea como un estándar en otros tipos de equipos. También existen otros estándares como por ejemplo, el SEMI Standard F47 [13], definido específicamente por la industria de fabricación de semiconductores, que define la tolerancia de los equipos de fabricación, medida y test automático de semiconductores a los huecos de tensión.

Por último, es interesante destacar la referencia [14] en donde se propone un método para deducir de forma teórica las curvas de aceptabilidad para distintos tipos de cargas.

## 2.5. RANGOS Y PRUEBAS DE TOLERANCIA DE LOS EQUIPOS A LAS VARIACIONES DE TENSIÓN

Como ya se ha dicho anteriormente, el efecto más importante asociado a los huecos de tensión, las sobretensiones temporales y las interrupciones del suministro es la desconexión o el mal funcionamiento de los equipos.

Dentro de los equipos más sensibles a las variaciones de tensión se pueden destacar los computadores, equipos de control de procesos, equipos de electrónica de consumo, controladores de velocidad de motores eléctricos, motores de inducción y motores síncronos, contactores y otros sistemas de protección y equipos de iluminación.

La tolerancia de todos estos equipos es muy diversa, e incluso para un mismo equipo la tolerancia depende de la marca y del modelo del equipo. La Tabla 2.4, tomada del estándar IEEE Std. 1346-1998 [9], da rangos de tolerancia de distintos tipos de equipos actualmente en uso.

<i>Equipo</i>	<i>Tolerancia a las variaciones de tensión</i>		
	<i>Rango superior</i>	<i>Promedio</i>	<i>Rango inferior</i>
<i>PLC</i>	20 ms, 75%	260 ms, 60%	620 ms, 45%
<i>Tarjeta de entradas de un PLC</i>	20 ms, 80%	40 ms, 55%	40 ms, 30%
<i>Controlador motor a.c. de 5 C.V</i>	30 ms, 80%	50 ms, 75%	80 ms, 60%
<i>Relé de control de alterna</i>	10 ms, 75%	20 ms, 65%	30 ms, 60%
<i>Arrancador de un motor</i>	20 ms, 60%	50 ms, 50%	80 ms, 40%
<i>Computador personal</i>	30 ms, 80%	50 ms, 60%	70 ms, 50%

**Tabla 2.4.** Rangos de tolerancia de distintos tipos de equipos según IEEE Std. 1346-1998.

Los valores que se proporcionan en la tabla 2.4 se deben interpretar de la siguiente forma. Una tolerancia de a ms y b% implica que el equipo puede tolerar una tensión de cero voltios durante a milisegundos y una tensión de b% del valor nominal de forma indefinida. Un hueco de tensión de mayor duración que a ms y de mayor magnitud que b% producirá la desconexión o el mal funcionamiento del equipo.

Las referencias [15,16] son dos artículos clásicos importantes donde se estudia el efecto de los huecos de tensión en los sistemas industriales y donde se mide la sensibilidad de los equipos de control en una planta industrial para determinar el umbral de huecos para la planta completa.

En la referencia [17] se puede ver un estudio general sobre el comportamiento de distintos tipos de equipos frente a los huecos de tensión. Computadores personales, equipos de electrónica de consumo, equipos electrónicos de control de procesos, controladores de velocidad de motores eléctricos de continua y alterna, motores de inducción y motores síncronos y en menor medida contactores y dispositivos de iluminación se analizan bajo distintos tipos de huecos de tensión.

Otras referencias interesantes sobre la tolerancia de distintos tipos de equipos son las siguientes: La tolerancia de computadores personales y el efecto de la distorsión armónica en la tensión de suministro sobre a esa tolerancia se estudia en [18,19]. La referencia [20] también hace un estudio de la tolerancia de los computadores frente a huecos e interrupciones.

El comportamiento de los controladores de velocidad de los motores eléctricos frente a distintos tipos de huecos de tensión, simétricos y asimétricos, y frente a interrupciones momentáneas se analiza con detalle en las referencias [21-24]. El comportamiento de los propios motores de inducción y de los motores síncronos frente a distintos tipos de huecos de tensión y de interrupciones se analiza en las referencias [25-27], o la influencia que tiene la existencia de motores de inducción y sus cargas sobre los propios huecos se estudia en la referencia [28].

Por último, en la referencia [29] se estudia el efecto de las variaciones de tensión sobre lámparas de sodio de alta presión y en las referencias [30,31] se estudia el efecto de los huecos de tensión sobre los contactores.

### **2.5.1 Pruebas de tolerancia de los equipos a las variaciones de tensión**

En la actualidad, el estándar IEC 61000-4-11 [32] y recientemente el estándar IEC 61000-4-34 [33] aprobado en octubre de 2005, son las normas que describen como obtener la tolerancia de un equipo frente a las variaciones de tensión. El estándar IEC 61000-4-11 define los métodos de ensayo de inmunidad y los rangos de los niveles de ensayo aconsejados para los equipos eléctricos y electrónicos conectados a las redes de baja tensión, en lo concerniente a los huecos de tensión, las interrupciones breves y las variaciones de tensión. El objetivo del estándar es por tanto, establecer una referencia común para la evaluación de la inmunidad de los equipos eléctricos y electrónicos frente a las variaciones de tensión.

La tabla 2.5 da los niveles de ensayo y las duraciones aconsejadas en el estándar IEC 61000-4-11.  $U_T$  es la tensión asignada del equipo y se utiliza como la tensión base para las especificaciones de los niveles de ensayo. Los niveles de ensayo en % de  $U_T$  son los siguientes: 0%, 40% y 70% que corresponden a huecos e interrupciones del 100%, 60% y 30% respectivamente. En todos estos ensayos el cambio de tensión entre  $U_T$  y la tensión modificada debe ser brusco.

<i>Nivel de ensayo % <math>U_T</math></i>	<i>Huecos de tensión e interrupciones breves % (<math>U_T</math>)</i>	<i>Duración (en períodos)</i>
0	100	0.5*
40	60	1
70	30	5
		10
		25
		50
		X
* Para 0.5 períodos, el ensayo debe ser realizado en polaridad positiva y negativa, es decir, comenzando a 0° y a 180°		

X corresponde a una duración "abierto" que puede figurar entre las especificaciones del producto.

**Tabla 2.5.** Niveles de ensayo y duraciones aconsejadas para los huecos de tensión y las interrupciones breves.

El estándar IEC 61000-4-11 también define las características de la instrumentación a utilizar en el ensayo, el generador de ensayo y el transformador de medida de crestas de corriente de entrada, así como el procedimiento del ensayo.

Por último, el estándar proporciona dos configuraciones de ensayo posibles para la simulación de la alimentación de la red, en la primera se emplean dos transformadores variables y dos interruptores y en la segunda se emplea un generador de formas de onda y un amplificador de potencia. Aunque esta segunda configuración permite ensayar los equipos en condiciones de variaciones de frecuencia y de armónicos en la tensión, el estándar no hace referencia sobre los ensayos en estas condiciones.

El estándar IEC 61000-4-34 hace una descripción equivalente para equipos con corrientes de entrada mayores de 16 amperios por fase [33].

Por otra parte, el IEEE Std 1346-1998 [9] recomienda una metodología para el análisis técnico y económico de la compatibilidad a los huecos de tensión entre los equipos de procesamiento electrónico y el sistema eléctrico. Este estándar presenta una metodología para utilizar como herramienta de planificación para cuantificar el entorno y la sensibilidad de los procesos a los huecos de tensión, indicando como se pueden evaluar las alternativas técnicas y financieras. No incluye en cambio límites para el propio sistema ni para los equipos de procesamiento electrónico. El estándar presenta un método para evaluar las pérdidas en caso de fallo del equipo y un método para evaluar el número anual de fallos en los equipos debidos a la calidad de la energía eléctrica. De esta información se puede determinar el coste financiero de la compatibilidad y evaluar alternativas para reducir esas pérdidas.

De todas estas consideraciones se puede deducir fácilmente que el conocimiento en profundidad de los eventos en la tensión de suministro eléctrico en una determinada red de distribución y la tolerancia a las variaciones de tensión de los equipos conectados a esa red, son ambos absolutamente indispensables para evaluar los efectos de las variaciones de tensión sobre los equipos y para elaborar estrategias de diseño de equipos de protección frente a esas perturbaciones en la tensión de suministro eléctrico.

---

## 2.6. REFERENCIAS

---

- [1] International Electrotechnical Commission. Technical Committee 77, Working Group 6, Classification of Electromagnetic Environments. International Electrotechnical Commission. Geneva. (Switzerland)
- [2] M.F. McGranaghan, D.R. Mueller, M.J. Samotyj, "Voltage Sags in Industrial Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 2, March/April 1993, pp. 397-402.
- [3] UNE EN 50160. Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución. 1999.
- [4] IEC Standard 61000-4-30, 2003. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement techniques. Section 30: Power quality measurement methods".
- [5] IEEE Std 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE New York, USA, 1995.
- [6] IEEE P1159.1 Draft, Recommended Practice for Power Quality Measurements in A.C. Power Supply Systems, IEEE, New York, USA, 2004.
- [7] IEEE P1159.2 Draft, Recommended Practice for Characterization of a Power Quality Event Given an Adequately Sampled Set of Digital Data Points, IEEE, New York, USA.
- [8] IEEE Std 1159.3-2003, Recommended Practice for the Transfer of Power Quality Data, IEEE, New York, USA, 2003.
- [9] IEEE Std 1346-1998, IEEE Recommended practice for evaluating electric power system compatibility with electronic process equipment", New York: IEEE, 1998.
- [10] J.A. Oliver, R. Lawrence, B.B. Banerjee, "Power Quality: How to Specify Power Quality Tolerance Process Equipment," IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 8, No. 5, September/ October 2002, pp. 21-30.

- 
- [11] D.S. Dorr, M.B. Hughes, T.M. Gruz, R.E. Jurewicz, J.L. McClaine, "Interpreting recent power quality surveys to define the electrical environment", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 6, Nov.-Dec. 1997, pp. 1480 – 1487.
- [12] ITI (CBEMA) Curve Application Note, Information Technology Industry Council (ITIC), Washington, USA, Disponible: <http://www.itic.org/technical/iticurv.pdf>
- [13] SEMI Standard F47-0200, "Specification Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity", Disponible en: <http://www.semi.org>.
- [14] J. Kyei, R. Ayyanar, G. Heydt, R. Thallam, J. Blevins, "The Design of Power Acceptability Curves", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 3, July 2002, pp. 828-833.
- [15] M.F. McGranaghan, D.R. Mueller, M.J. Samotyj, "Voltage Sags in Industrial Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 2, March/April 1993, pp. 397-402.
- [16] V.E. Wagner, A.A. Andreshak, J.P. Staniak, "Power Quality and Factory Automation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 26, No. 4, July/August 1990, pp. 620-626.
- [17] M.H.J. Bollen, "Understanding Power Quality Problems, Voltage Sags and Interruptions", IEEE Press Series on Power Engineering, IEEE, 2000.
- [18] J. Barros, R.I. Diego, "Effects of Non-Sinusoidal Supply on the Voltage Tolerance of Equipment", IEEE Power Engineering Review, Vol. 22, No. 7, July 2002, pp.46- 47.
- [19] J. Barros, R.I. Diego, E. Pérez, "Measuring Voltage Tolerance of Equipment under Practical Conditions", Proc. 2002 IASTED Int. Conference on Power and Energy Systems, Crete, Greece, pp. 289-293.
- [20] S.Z. Djokic, J. Desmet, G. Vanalme, J.V. Milanovic, K. Stockman, "Sensitivity of Personal Computers to Voltage Sags and Short Interruptions", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, January 2005, pp. 375-383.



- [21] H.G. Sarmiento, E. Estrada, “A Voltage Sag Study in an Industry with Adjustable Speed Drives”, *IEEE Industry Applications Magazine*, January/February 1996, pp. 16-19.
- [22] M.H.J. Bollen, L.D. Zhang, “Analysis of Voltage Tolerance of AC Adjustable-Speed Drives for Three-Phase Balanced and Unbalanced Sags”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 36, No. 3, May/June 2000, pp. 904-910.
- [23] J. Pedra, F. Corcoles, F.J. Suelves, “Effects of Balanced and Unbalanced Voltage Sags on VSI-Fed Adjustable-Speed Drives”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 1, January 2005, pp.224-233.
- [24] S.Z. Djokic, K. Stockman, J.V. Milanovic, J.M. Desmet, R. Belmans, “Sensitivity of AC Adjustable Speed Drives to Voltage Sags and Short Interruptions”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 1, January 2005, pp. 494-505.
- [25] J.C. Gómez, M.M. Morcos, C.A. Reineri and G.N. Campetelli, “Behavior of Induction Motor Due to Voltage Sags and Short Interruptions”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 17, No. 2, April 2002, pp. 434-440.
- [26] J.C. Das, “Effects of Momentary Voltage Dips on the Operation of Induction and Synchronous Motors”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 26, No. 4, July/August 1990, pp. 711-718.
- [27] L. Guasch, F. Corcoles, J. Pedra, “Effects of symmetrical and unsymmetrical voltage sags on induction machines”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 2 , April 2004, pp.774 – 782.
- [28] G. Yalcinkaya, M.H.J. Bollen, P.A. Crossley, “Characterization of Voltage Sags in Industrial Distribution Systems”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 34, No. 4, July/August 1998, pp. 682-688.
- [29] D.S. Dorr, A. Mansoor, A.G. Morinec, J.C. Worley, “Effects of Power Line Voltage Variations on Different Types of 400-W High Pressure Sodium Ballasts”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 33, No. 2, March/April 1997, pp. 472-476.

- [30] S.Z. Djokic, J.V. Milanovic and D.S. Kirschen, "Sensitivity of AC Coil Contactors to Voltage Sags, Short Interruptions and Undervoltage Transients", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 3, July 2004, pp. 1299-1307.
- [31] J. Pedra, F. Corcoles, L. Sainz, "Study of AC Contactors During Voltage Sags", 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2002, Vol. 2 , pp. 565 – 570.
- [32] IEC Standard. 61000-4-11, 1994, Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques. Section 11: Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests.
- [33] IEC Standard. 61000-4-34, 2005, Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4-34: Testing and measurement techniques - Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests for equipment with input current more than 16 A per phase.