



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANEXO II – CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Autor: D. José María Pérez Hernández

Tutor: D. Manuel Vicente Riesco Sanz

Valladolid, julio, 2022

ÍNDICE:

1. ANTECEDENTES.....	1
2. INTRODUCCIÓN	2
3. PROBLEMAS DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.....	3
4. PERTURBACIONES ELÉCTRICAS	4
4.1. VARIACIONES DE FRECUENCIA.....	4
4.1.1. Definición	4
4.1.2. Valores de referencia.....	4
4.1.3. Causas.....	4
4.1.4. Efectos	5
4.1.5. Acciones de prevención y corrección.....	5
4.2. VARIACIÓN DE TENSIÓN	7
4.2.1. Variaciones lentas	7
4.2.2. Fluctuaciones de tensión o flickers	8
4.2.3. Causas.....	8
4.2.4. Efectos	9
4.2.5. Acciones de prevención y corrección.....	9
4.3. HUECOS DE TENSIÓN	10
4.3.1. Definición	10
4.3.2. Valores de referencia.....	10
4.3.3. Causas.....	10
4.3.4. Efectos	10
4.3.5. Acciones de prevención y corrección.....	11
4.4. CORTES DE TENSIÓN.....	12
4.4.1. Definición	12
4.4.2. Valores de referencia.....	12
4.4.3. Causas.....	12
4.4.4. Efectos	12
4.4.5. Acciones de prevención y corrección.....	13
4.5. SOBRETENSIÓN	14
4.5.1. Definición	14

4.5.2. Valores de referencia.....	14
4.5.3. Causas.....	14
4.5.4. Efectos	15
4.5.5. Acciones de prevención y corrección.....	15
4.6. SUBTENSIÓN	17
4.6.1. Definición	17
4.6.2. Valores de referencia.....	17
4.6.3. Causas.....	17
4.6.4. Efectos	17
4.6.5. Acciones de prevención y corrección.....	17
4.7. IMPULSOS DE TENSIÓN.....	19
4.7.1. Definición	19
4.7.2. Valores de referencia.....	19
4.7.3. Causas.....	19
4.7.4. Efectos	20
4.7.5. Acciones de prevención y corrección.....	20
4.8. DISTORSIÓN ARMÓNICA	21
4.8.1. Definición	21
4.8.2. Valores de referencia.....	21
4.8.3. Causas.....	22
4.8.4. Efectos	23
4.8.5. Acciones de prevención y corrección.....	24
5. SISTEMAS DE CORRECCIÓN DE PERTURBACIONES ELÉCTRICAS	25
5.1. PARA VARIACIONES LENTAS DE TENSIÓN.....	25
5.1.1. Reguladores de tensión.....	25
5.1.2. Conjunto motor generador	25
5.2. PARA FLUCTUACIONES TENSIÓN Y FLICKERS	26
5.2.1. Reactancias controladas.....	26
5.2.2. Condensadores controlados	26
5.3. PARA HUECOS DE TENSIÓN Y CORTES BREVES	26
5.3.1. Inmunización de contactores	26
5.3.2. Conjunto motor-generador.....	27
5.3.3. Condensador de almacenamiento.....	27

5.3.4. Batería de almacenamiento.....	27
5.4. PARA IMPULSOS DE TENSIÓN	27
5.4.1. Varistores.....	27
5.4.2. Descargadores de gas	27
5.4.3. Diodos Zener.....	28
5.4.4. Equipos protectores de sobretensiones.....	28
5.5. PARA DISTORSIONES ARMÓNICAS	28
5.5.1. Filtros pasivos	28
5.6. SISTEMAS UNIVERSALES	29
5.6.1. Sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI).....	29
5.6.2. Acondicionadores de red	29
5.6.3. Filtros activos de corriente.....	29
5.7. CONSIDERACIONES FINALES	30

1. ANTECEDENTES

Desde hace años, se viene registrando en todos los países industrializados una creciente sensibilización hacia la calidad de la energía eléctrica, convirtiéndose en los últimos años en un motivo de preocupación:

- Los procesos industriales requieren, de día en día, una mayor calidad de los productos utilizados y, en particular, de la electricidad, haciéndose más sensibles a las alteraciones que puedan existir. Proliferan los equipos de control electrónico y de dispositivos con electrónica de potencia que son muy sensibles a las perturbaciones.
- La creciente utilización de receptores que generan perturbaciones hace que el nivel de contaminación general de las redes eléctricas esté aumentando, lo que puede incidir en el normal funcionamiento de los receptores a ellos conectados y, en definitiva, extendiendo el problema.

Las empresas distribuidoras de energía eléctrica han de intentar reducir en lo posible el impacto de las alteraciones y deben asesorar a los 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 consumidores 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.

2. INTRODUCCIÓN

Las características ideales de la energía eléctrica en el punto de generación pueden verse alteradas durante su transporte, distribución y utilización.

La energía es suministrada en forma de un sistema trifásico de tensiones de naturaleza senoidal, las desviaciones de algunos de los parámetros de la onda senoidal ideal se conocen como perturbaciones eléctricas. Su carácter puede ser transitorio o cuasi-transitorio, su origen puede situarse en el transporte y distribución o en el consumo y sus efectos pueden ser perceptibles sobre dispositivos, equipos e instalaciones.

La acción de los agentes atmosféricos, fallos del material y errores humanos, hacen que se produzcan perturbaciones (incidentes) en la red. Aún en los casos en los que los sistemas eléctricos, estén cuidadosamente proyectados, conservados y explotados, siempre existen posibilidades de que se produzcan incidentes y en tal caso estos deben ser eliminados de forma que quede desconectada del sistema la menor parte posible, a fin de que éste siga funcionando.

Dado que la incidencia de las perturbaciones eléctricas, en mayor o menor grado es inevitable, y dado también que la red de distribución consta de todo un conjunto en el que se integran inseparable sus usuarios, resulta aconsejable la adopción de medidas correctoras o mitigadoras en todos los puntos posibles, a fin de minimizar los perjuicios que dichas perturbaciones pudieran ocasionar.

A fin de lograr la mayor inmunidad en las instalaciones receptoras frente a las perturbaciones se deben distinguir dos tipos bien diferenciados:

- Perturbaciones eléctricas conducidas que provengan del exterior a través de la red de suministro eléctrico.
- Perturbaciones generadas por los propios equipos del consumidor que a su vez pueden ser capaces de afectar tanto internamente a él mismo, como a la red exterior y por tanto a otros usuarios.

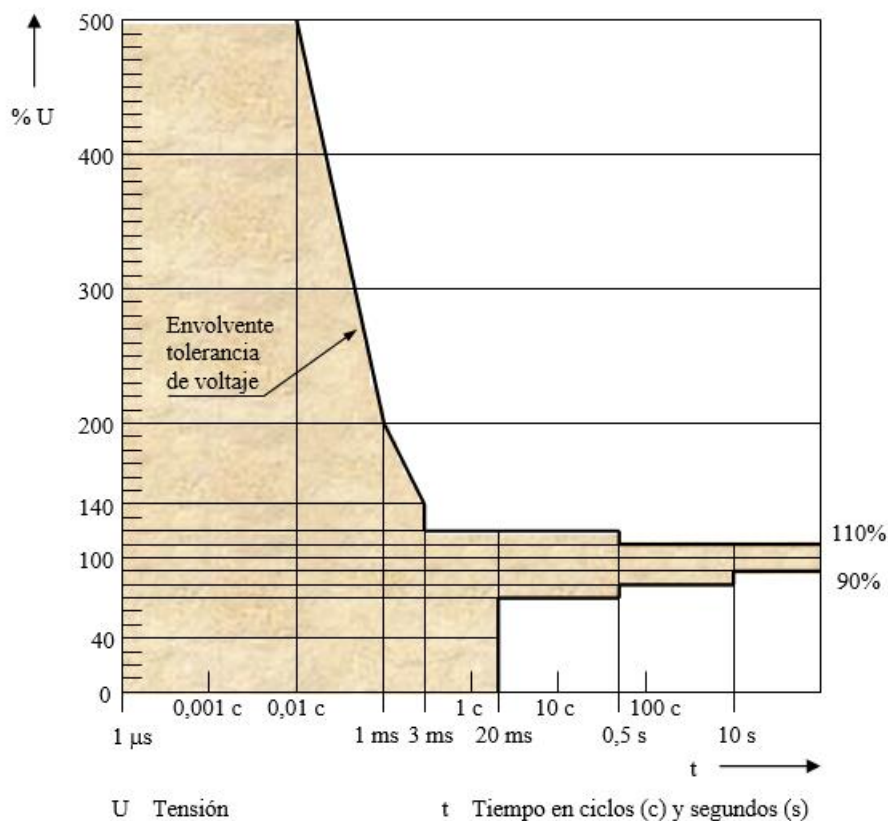
Incluso contando con actuaciones convergentes de la compañía distribuidora y de los propios consumidores en sus instalaciones, alcanzar las cotas más altas de inmunidad requiere también la colaboración de los proyectistas y fabricantes de sistemas, componentes y equipos para que, conociendo el problema, consigan los mejores niveles de comportamiento de estos, tanto en aspectos de insensibilidad como en emisión de perturbaciones.

La calidad del servicio en el suministro de energía eléctrica se mide, básicamente, en término de número y duración de las interrupciones en el suministro, así como por el mantenimiento de la tensión y frecuencia dentro de unos límites prefijados

3. PROBLEMAS DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Los más importantes y críticos son, sin embargo, las caídas de tensión o la interrupción total del suministro de energía.

La curva de la Fig. indica la amplitud de la tensión de suministro en dependencia de la duración de los acontecimientos no deseados.



Curva que indica la tensión y la duración de las tolerancias de tensión para todos los tipos de equipos

La curva se utiliza con frecuencia en la industria para evaluar el rendimiento de los distintos equipos y de las redes eléctricas.

Los puntos situados por debajo de la envolvente indican una caída de carga, mientras que los puntos situados por encima pueden indicar mal funcionamiento, por ejemplo, del aislamiento, o un disparo por sobretensión o sobreexcitación. La curva es una referencia estándar para todos aquellos equipos sensibles que van a estar conectados a la red eléctrica.

4. PERTURBACIONES ELÉCTRICAS

Existen cuatro parámetros que caracterizan la onda de tensión y que permiten medir el grado de pureza:

- Frecuencia.
- Amplitud.
- Forma de la onda.
- Simetría de las tensiones trifásicas.

4.1. VARIACIONES DE FRECUENCIA

4.1.1. 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 sistema eléctrico de corriente alterna, está directamente relacionada con la velocidad de giro, es decir, con el número de revoluciones por minuto de los alternadores. 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.

4.1.2. Valores de referencia

La frecuencia nominal de la tensión suministrada debe ser de 50 Hz. En las condiciones normales de explotación, el valor medio de la frecuencia fundamental medida durante diez segundos (EN 50.160), en redes de distribución debe estar comprendida en el intervalo:

- Para redes acopladas por enlaces síncronos a un sistema interconectado
 - 50 Hz \pm 1% (es decir de 49,5 a 50,5 Hz) durante el 95% de una semana.
 - 50 Hz + 4% / -6% (de 47 a 52 Hz) durante el 100% de una semana.
- Para redes en funcionamiento aislado
 - 50 Hz \pm 2% (de 49 a 51 Hz) durante el 95% de una semana.
 - 50 Hz \pm 15% (de 42,5 a 57,5 Hz) durante el 100% de una semana.

4.1.3. Causas

Pueden darse los dos casos siguientes:

- La carga es superior a la generación

En este caso, la frecuencia disminuye. Su velocidad de caída dependerá:

- 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 esta, puede llegar a producirse un colapso en el sistema. La recuperación de este se lograría mediante un deslastre rápido, selectivo y temporal de cargas.

- 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 la 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.

4.1.4. Efectos

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 la red atrasan o adelantan.

4.1.5. Acciones de prevención y corrección

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 la carga y generación que, si no es compensado rápidamente por el regulador del generador, dará lugar a un disparo de éste. 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 pérdida de 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 tele desconexión de máxima y mínima frecuencia.

4.2. VARIACIÓN DE TENSIÓN

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

Los parámetros característicos de una variación de tensión son la amplitud y la duración.

Cabe distinguir entre variaciones lentas de tensión, que son aquellas cuya duración es superior a 10 seg. y fluctuaciones de tensión, donde la duración va desde varios milisegundos hasta los 10 seg.

4.2.1. Variaciones lentas

4.2.1.1. Definición

Se considera una variación lenta de tensión a aquella cuya duración es superior a 10 seg.

4.2.1.2. Valores de referencia

En condiciones normales de funcionamiento la tensión de suministro debe estar comprendida en la banda del $\pm 10\%$ de la tensión de suministro.

4.2.1.3. Causas

De todos los factores que influyen en las variaciones de tensión, el más importante es la impedancia de la carga. La carga puede variar por diversas razones, entre las que destacamos las siguientes:

- El consumo de energía no se realiza de forma constante.
- Los receptores no son iguales y sus diferencias condicionan las características del consumo.

La variación del consumo en un tiempo determinado recibe el nombre de curva de carga. Las variaciones de tensión se encuentran estrechamente ligados a ella, de forma que es de esperar que la tensión sea mayor en los momentos de bajo consumo, que en los de alto

4.2.1.4. Efectos

Definida una tensión nominal y su margen de tolerancia, pueden darse dos tipos de variación:

- Las que se sitúan por debajo de dicho margen o “tensión baja”.
- Las que se sitúan por encima del mismo o “tensión alta”.

4.2.1.4.1. 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 dentro de los márgenes de tolerancia.

En la mayoría de los casos los efectos no suelen ser especialmente perjudiciales.

4.2.1.4.2. Efectos de tensión alta

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

4.2.1.5. Acciones de prevención y corrección

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

- Utilización de reguladores de tensión en carga en los transformadores de Alta a Media Tensión y tomas variables en los transformadores de Media a Baja Tensión.
- La tensión nominal de los receptores debe ser igual a la de red a la que van a ser conectados y su funcionamiento debe ser normal dentro de los márgenes de variaciones especificadas en la normativa técnica.
- Instalación de protecciones de máxima y mínima tensión temporizadas para la protección térmica de los equipos.

4.2.2. Fluctuaciones de tensión o flickers

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 los 10 segundos y con una amplitud que no supera el $\pm 10\%$ del valor nominal.

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.

4.2.3. Causas

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 maquinaria industrial de gran potencia.

4.2.4. Efectos

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. Afecta a lámparas de incandescencia y descarga y a monitores y televisores.

4.2.5. Acciones de prevención y corrección

Entre las *acciones correctoras* que se pueden adoptar, cabe citar las siguientes:

- Aumentar la potencia de cortocircuito en el punto de suministro.
- 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 compensadores de reactancia estática.
- Arrancar los motores en 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 debe adoptar solo en los puntos de menor tensión de una red.
- Evitar la simultaneidad de pulsaciones de las máquinas de soldadura con circuitos de control adecuados.

4.3. HUECOS DE TENSIÓN

4.3.1. Definición

Los huecos de tensión son disminuciones bruscas de tensión de suministro, en una o más fases, seguida del restablecimiento de la tensión después de un breve lapso.

4.3.2. Valores de referencia

- 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 10 ms y 1 seg.
- Entre 1 seg. y varios seg.

Los huecos que mayoritariamente tienen incidencia presentan descensos de tensión superiores al 30% y su duración es inferior a 500 ms.

4.3.3. Causas

4.3.3.1. Causas internas

Son debidos a incrementos bruscos de corriente, ocasionados fundamentalmente por cortocircuitos en la red eléctrica, a cualquier nivel de tensión, y por arranque de grandes cargas.

4.3.3.2. Causas externas

Su origen está en las faltas producidas en elementos de la red suficientemente alejadas del punto de conexión del cliente. Estos sucesos fundamentalmente aleatorios son imprevisibles. Su frecuencia anual depende principalmente del tipo de red de distribución y del punto de observación. Además, su distribución en un año puede ser muy irregular.

4.3.4. Efectos

Los principales efectos son:

- En los motores asíncronos disminuye el par motor, dando lugar a la ralentización o incluso la parada del motor

- En los motores síncronos 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.
- Puede inducir ordenes erróneas en los sistemas de control que actúan en tiempo real.
- Puede ocasionar errores y pérdidas de información a los ordenadores.

4.3.5. Acciones de prevención y corrección

Las acciones para hacer frente a los huecos de tensión 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.

Si la instalación está en funcionamiento, lo primero que hay que hacer es documentar el problema, teniendo en cuenta en instante en el que ocurren las perturbaciones, su tipo y las pérdidas que genera

4.4. CORTES DE TENSIÓN

4.4.1. Definición

Una interrupción en el suministro corresponde a la ausencia de tensión de alimentación en las tres fases, durante un tiempo superior a 10 ms, generalmente debida a la apertura de un aparato de corte situado entre la red y el cliente.

Para los cortes muy breves, de duración inferior al segundo, se emplea en ocasiones la denominación de “microcorte”

4.4.2. Valores de referencia

En función de la duración se puede hablar de:

- Corte breve: (duración: $10 \text{ ms} < Dt \leq 1 \text{ min}$)
- Corte largo: (duración: $Dt > 1 \text{ min}$)

4.4.3. Causas

4.4.3.1. Causas internas

Si no son programados, se producen en la mayoría de las ocasiones por actuación de elementos de protección debido a cortocircuitos, de forma que queda sin alimentación una parte de la red eléctrica.

Están íntimamente relacionados con los huecos de tensión, en cuanto a que un cortocircuito en la línea supone un hueco de tensión en todas las líneas conectadas a barras del mismo transformador.

4.4.3.2. Causas externas

Cuando el corte es debido a la actuación del interruptor automático de AT o MT, en la subestación de la Compañía Eléctrica, el tiempo de duración del mismo viene impuesto por la secuencia de desconexión-reenganche de las protecciones.

La mayoría de los cortes ocasionados por causas externas, tienen duraciones inferiores a los dos segundos.

4.4.4. Efectos

Los equipos sensibles a los huecos de tensión lo son, en general, a los cortes breves dado que éstos pueden considerarse como huecos de tensión de una profundidad superior al 99%. Cuanto mayor sea la duración del corte breve mayor será el número de procesos que no dispongan de energía suficiente, tanto en sus circuitos de control como en la parte de potencia, para mantenerse en funcionamiento correcto

4.4.5. Acciones de prevención y corrección

Las acciones de prevención y corrección que se deben tomar son similares al caso de los huecos de tensión.

4.5. SOBRETENSIÓN

4.5.1. Definición

Se produce cuando el valor eficaz de la tensión es superior al 110% del valor nominal. Las sobretensiones de mayor duración alcanzan valores que no suelen exceder del 20% sobre el valor nominal, aunque las de corta duración pueden alcanzar niveles superiores.

4.5.2. Valores de referencia

En condiciones normales de explotación, para cada periodo de una semana, el 95% de los valores eficaces promediados en 10 min. deben situarse en el intervalo definido por $U_n \pm 7\%$.

4.5.3. Causas

4.5.3.1. Causas internas

En lo que se refiere a las sobretensiones de mayor duración, que también son las de menor amplitud, es responsabilidad de la Compañía Eléctrica el regular la tensión en la red de distribución de MT, para que ésta se encuentre dentro de los límites reglamentarios.

Sin embargo, existen elementos en la propia instalación receptora que ante una variación en la tensión suministrada, dentro de los límites reglamentarios, pueden ocasionar una sobretensión:

- La selección incorrecta de la toma de regulación de los transformadores de MT/BT.
- La utilización de transformadores MT/BT sin posibilidad de regulación.
- Excesiva caída de tensión en la red de BT que obligue a mantener una tensión elevada en el cuadro general.

En lo que respecta a las sobretensiones de menor duración, y que alcanzan magnitudes más elevadas que las anteriores, éstas se pueden producir debido, fundamentalmente, a cambios en la fuente de alimentación de la instalación:

- Cambio a una alimentación de seguridad (por ejemplo, a un grupo electrógeno), teniendo en cuenta que además, durante la conmutación, puede producirse un corte de tensión.
- En el caso de una generación propia (autogeneradores), en paralelo con la red, se produce en general, una sobretensión cuando el generador se desconecta de la red y se queda en isla, con la carga propia del cliente.
- En el caso de tener instalados equipos de regulación automática de tensión, pueden producirse sobretensiones debido a la desconexión de grandes cargas, durante el tiempo de respuesta de los citados equipos.

4.5.3.2. Causas externas

La Compañía Eléctrica tiene capacidad de regulación de la tensión suministrada, dentro de los límites establecidos, modificando la relación de transformación del transformador de la subestación.

En caso de una disminución importante de la carga o una modificación transitoria de la tipología de la red, se puede ocasionar un aumento de la tensión que cesará al actuar el mecanismo de regulación.

Aunque la tensión durante este transitorio no quede fuera de límites, puede ocasionar una sobretensión en el interior de la fábrica si se da alguna de las razones anteriormente citadas.

4.5.4. Efectos

4.5.4.1. Sobretensiones de pequeña duración

- Los dispositivos electrónicos de potencia pueden verse afectados en muy poco tiempo por la sobrecorriente que, generalmente, se asocia a una sobretensión.
- Si se exceden los límites superiores admisibles por las fuentes de alimentación de los circuitos de control, autómatas programables, ordenadores y equipos similares, éstos pueden averiarse.
- Los dispositivos de protección frente a impulsos pueden ser destruidos.

4.5.4.2. Sobretensiones de mayor duración

- Los transformadores, máquinas giratorias, contactores y relés, alimentados directamente desde a la red, sufren calentamientos anormales que ocasionan una reducción de su vida útil.
- Si la sobretensión es muy prolongada puede averiarse, por calentamiento, la maquinaria afectada.
- Las lámparas incandescentes y de descarga, reducen su vida útil de forma importante, incluso con sobretensiones de duración reducida.

4.5.5. Acciones de prevención y corrección

Para evitar su producción:

- Utilizar transformadores de potencia, en los centros de transformación del cliente, con tomas de regulación apropiadas. Elegir la toma que proporcione la tensión de salida adecuada.
- En centros de transformación del cliente con varios transformadores, en caso de que fuese posible alimentar con distinto transformador, los equipos receptores sensibles con márgenes de tensión más estrictos, de manera que estén separados de otros equipos que puedan producir en su funcionamiento sobretensiones.

- Diseño y ejecución correcta de las líneas de distribución interiores evitando caídas de tensión elevadas.
- No interrumpir el conductor neutro, bajo ninguna circunstancia, en sistemas que alimenten circuitos monofásicos.

Para reducir sus repercusiones:

- Instalación de autotransformadores o transformadores, con regulación automática de la tensión de salida.
- Instalación de relés de máxima tensión que desconecten, en caso necesario, los equipos de la red.
- Alimentación de los equipos especialmente sensibles con las fuentes de alta calidad referidas en el caso de huecos de tensión.

4.6. SUBTENSIONIÓN

4.6.1. Definición

Descenso del valor eficaz de la tensión por debajo del 90% del valor nominal, con una duración superior a 1 minuto. Los valores mínimos alcanzados no suelen ser inferiores al 80% del valor nominal.

4.6.2. Valores de referencia

Es válido lo dicho respecto de la Compañía eléctrica en el caso de sobretensiones.

4.6.3. Causas

4.6.3.1. Causas internas

Son análogas a las expuestas en el caso de sobretensiones, tanto en lo relativo a la relación de transformación de los transformadores MT/BT, como en los transitorios de funcionamiento de elementos de generación propios (autogeneradores).

La subtensión será mayor si los conductores de alimentación a distintos sectores de fábrica presentan caídas de tensión importantes.

4.6.3.2. Causas externas

Es válido lo dicho respecto de la compañía eléctrica en el caso de sobretensiones.

Una subtensión de una duración inferior al minuto, se considera como hueco de tensión.

4.6.4. Efectos

Los principales efectos son:

- Los transformadores y máquinas giratorias en general sufren calentamientos anormales debido al incremento de corriente que aparece, asociado a una subtensión, cuando se alimentan cargas que consumen potencia a par constante. Este efecto puede agravarse en presencia de líneas de alimentación insuficientemente dimensionadas.
- Las lámparas de descarga reducen su flujo luminoso y pueden apagarse o modificar su reproducción cromática.

4.6.5. Acciones de prevención y corrección

- Utilizar transformadores de potencia, en los centros de transformación del cliente, con tomas de regulación apropiadas. Elegir la toma que proporcione la tensión de salida adecuada.
- En centros de transformación del cliente con varios transformadores, en caso de que fuese posible alimentar con distinto transformador, los equipos receptores sensibles

con márgenes de tensión más estrictos, de manera que estén separados de otros equipos que puedan producir en su funcionamiento subtensiones.

- Diseño y ejecución correcta de las líneas de distribución interiores evitando caídas de tensión elevadas. Es preciso considerar en este diseño la presencia, en múltiples cargas, de puntas de corriente, especialmente en el momento de arranque, que puedan aumentar notablemente las caídas de tensión.
- No sobrecargar las líneas conectando más potencia de la prevista inicialmente.
- No interrumpir el conductor neutro, bajo ninguna circunstancia, en sistemas que alimenten circuitos monofásicos.
- Instalación de autotransformadores o transformadores, con regulación automática de la tensión de salida.
- Instalación de relés de mínima tensión que desconecten, en caso necesario, los equipos de la red.
- Alimentación de los equipos especialmente sensibles con las fuentes de alta calidad referidas en el caso de huecos de tensión.

4.7. IMPULSOS DE Tensión

4.7.1. Definición

Variación brusca del valor instantáneo de la tensión, de duración breve e inferior usualmente a algunos milisegundos, que puede alcanzar valores superiores a varias veces la tensión nominal. Pueden presentarse aislados o de forma repetitiva a lo largo del tiempo.

Pueden ser positivos o negativos

4.7.2. Valores de referencia

A continuación, se recogen en una tabla 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.

CARACTERIZACIÓN CUANTITATIVA DE LOS IMPULSOS DE Tensión			
Causa	Duración	Frecuencia de oscilación	Valor de pico
AT (1 kV < V < 36 kV)			
Actuación de elementos de corte	$t > 100 \mu s$	$f < 10 \text{ kHz}$	(*)
Transferidos de un nivel de tensión superior	$t > 100 \mu s$	$f < 10 \text{ kHz}$	(*)
Descarga atmosférica	$1 \mu s < t < 100 \mu s$	$10 \text{ kHz} < f < 1 \text{ MHz}$	(*)
Reencendido	$1 \mu s < t < 100 \mu s$	$10 \text{ kHz} < f < 1 \text{ MHz}$	(*)
BT (V < 1 kV)			
Actuación de elementos de corte	$t > 100 \mu s$	$f < 10 \text{ kHz}$	$V_p < 5 \text{ kV}$
Transferidos de un nivel de tensión superior	$t > 100 \mu s$	$f < 10 \text{ kHz}$	$V_p < 5 \text{ kV}$
Descarga atmosférica	$1 \mu s < t < 100 \mu s$	$10 \text{ kHz} < f < 1 \text{ MHz}$	$V_p < 5 \text{ kV}$
Reencendido	$1 \mu s < t < 100 \mu s$	$10 \text{ kHz} < f < 1 \text{ MHz}$	$V_p < 5 \text{ kV}$

* Limitado por el nivel de protección de la red

4.7.3. Causas

4.7.3.1. Causas internas

- 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.

- Fusión de fusibles

Los fusibles de limitación de corriente generan impulsos de tensión al actuar, debido a la inductancia equivalente de la red que protege.

- 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.

La subtensión será mayor si los conductores de alimentación a distintos sectores de fábrica presentan caídas de tensión importantes.

4.7.3.2. Causas externas

La fuente principal es la descarga atmosférica o rayo.

Básicamente pueden provocar impulsos:

- 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.

4.7.4. Efectos

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 esta.

4.7.5. Acciones de prevención y corrección

Los dispositivos más habituales que extinguen los impulsos de tensión en puntos cercanos a la fuente de generación son:

- Pararrayos.
- Explosores.
- Conductores de tierra equipotenciales sobre apoyos de circuitos aéreos de AT.

El sistema de tierras y su conservación es muy importante para los dispositivos de protección contra impulsos actúen correctamente.

4.8. DISTORSIÓN ARMÓNICA

4.8.1. Definición

Deformación de la onda respecto de la senoidal pura teórica. La manera de cuantificar esta deformación, especialmente cuando es periódica, es descomponerla en sus componentes armónicas, múltiplos de la frecuencia fundamental de 50 Hz.

Para cuantificar el grado de deformación de una onda de tensión o de intensidad que no es senoidal pura, aunque sí periódica, se recurre a su análisis frecuencial. Este se lleva a cabo normalmente, mediante la transformada de Fourier, un algoritmo de cálculo que nos proporciona los contenidos de las diferentes ondas senoidales puras que componen la onda deformada.

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.

Los contenidos o tasas de 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:

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

Siendo:

U_n = Amplitud del armónico de tensión de orden n .

U_1 = Amplitud de la componente fundamental de la onda de tensión.

4.8.2. Valores de referencia

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 AT, MT y BT, que se señalan en la siguiente tabla:

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 y BT 30 kV ≥ U
Armónicos 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 x 25/n	0,2 + 1,3 x 25/n
Armónicos 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
Armónicos 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

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

En AT, los que superen el 90% del correspondiente nivel de CEM.

En MT, los situados entre el 60% y el 80% para los armónicos característicos, es decir, los de orden 5, 7, 11, 13, ..., etc.

En BT, la limitación de los armónicos se establece de forma individual en los propios receptores.

4.8.3. Causas

Ciertas cargas tienen una característica no lineal, es decir, la corriente demandada no es proporcional a la tensión suministrada. Esta corriente contiene armónicos que provocan corrientes armónicas en las redes. La presencia de tensiones armónicas en las redes genera corrientes armónicas en los equipos eléctricos, lo que provoca calentamientos.

4.8.4. Efectos

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.

Entre los equipos sensibles a los efectos de este tipo de perturbaciones, se encuentran:

- Condensadores

Registran pérdidas adicionales y calentamientos capaces de ocasionar un importante deterioro.

- Fusibles de protección

Pueden sufrir procesos de calentamiento o, incluso, fusión en situaciones de intensidad normal.

- Cables

Los armónicos de alta frecuencia dan lugar a fallos en el aislamiento, gradientes de tensión elevadas y efecto corona.

- 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.

- Equipos diseñados para utilizar la onda de tensión de forma más pura posible

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 las máquinas herramientas o robots controlados por ordenador, etc.

- 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 senoidal pura.

- 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.

- 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.

4.8.5. Acciones de prevención y corrección

Las principales medidas a tomar son:

- Sobredimensionar condensadores (en tensión y potencia).
- Sobredimensionar transformadores de potencia.
- Sobredimensionar conductores. La sección del conductor neutro debe ser igual a la sección de las fases.
- Alimentar separadamente las cargas generadoras de corrientes armónicas del resto de la instalación.
- Estudiar cuidadosamente la posibilidad de resonancia entre baterías de condensadores y reactancias de transformador de potencia y red.
- Reducir el consumo de corrientes armónicas por parte de los receptores, mediante un cuidadoso diseño de los circuitos electrónicos de potencia. Ejemplo: Utilizar 12 pulsos en lugar de 6 pulsos, en convertidores que empleen tiristores
- Procurar que las máquinas, que utilizan núcleos ferromagnéticos, funcionen en la zona no saturada de dichos núcleos
- Inserción de filtros antiarmónicos en la alimentación a los circuitos generadores de armónicos.
- Instalación de filtros antiarmónicos sintonizados a las frecuencias apropiadas en lugar de baterías de condensadores simples.
- Alimentación eléctrica independiente a los receptores generadores de armónicos.
- Transformador con un devanado en triángulo, para evitar los armónicos homopolares.

5. SISTEMAS DE CORRECCIÓN DE PERTURBACIONES ELÉCTRICAS

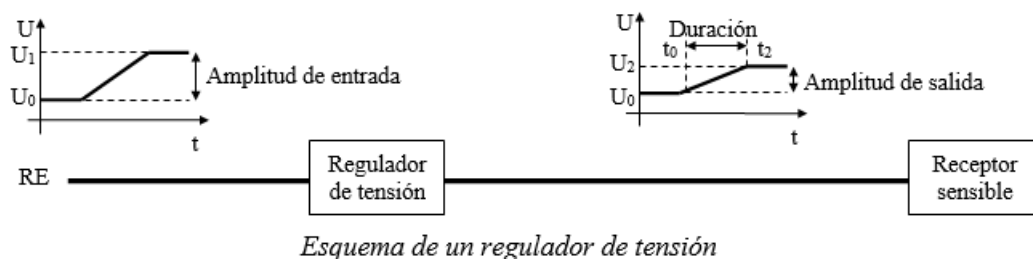
Veremos a continuación una descripción más detallada y sistemática de cada uno de los distintos dispositivos que tienen como misión hacer frente a las alteraciones, ya sea durante la fase de diseño de la instalación y de los receptores que van a ser conectados a ella, o durante el funcionamiento de estos.

5.1. PARA VARIACIONES LENTAS DE TENSIÓN

5.1.1. Reguladores de tensión

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

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 de este sea lo suficientemente pequeño como para que no afecte al funcionamiento correcto dl receptor sensible.

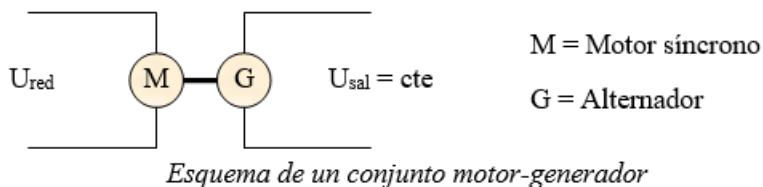


5.1.2. Conjunto motor generador

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

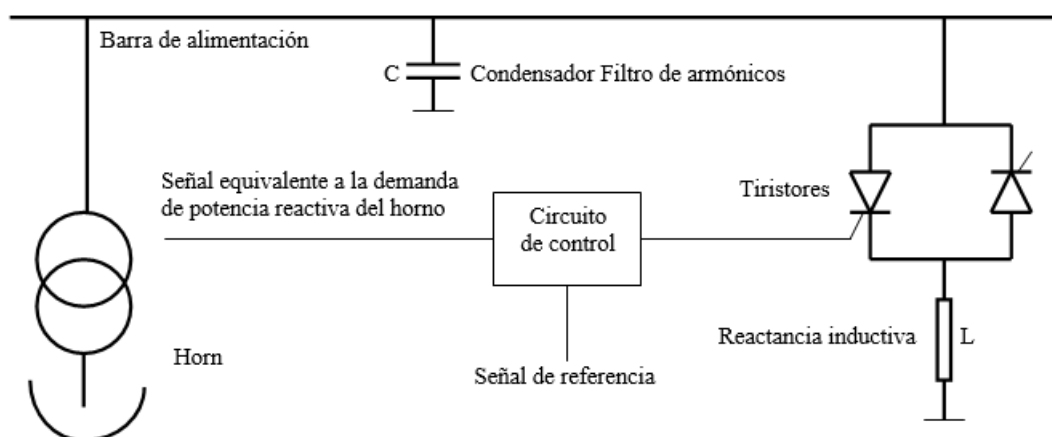


5.2. PARA FLUCTUACIONES TENSIÓN Y FLICKERS

5.2.1. Reactancias controladas

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

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.



Esquema del funcionamiento de reactancias controladas en un horno de arco

5.2.2. Condensadores controlados

Su función es compensar los incrementos de demanda de potencia reactiva corrigiendo las correspondientes variaciones del $\cos \phi$ de forma que se mantenga aproximadamente constante a un valor prefijado.

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

5.3. PARA HUECOS DE TENSIÓN Y CORTES BREVES

5.3.1. 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.

5.3.2. Conjunto motor-generator

Se trata de un conjunto motor volante de inercia-generator. 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 mecánica se libera, manteniendo la tensión de alimentación.

5.3.3. 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.

5.3.4. Batería de almacenamiento

Su funcionamiento es parecido al 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.

5.4. PARA IMPULSOS DE TENSIÓN

5.4.1. 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.

5.4.2. 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.

5.4.3. 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 admisibles: hasta del orden de 50 A.

5.4.4. Equipos protectores de sobretensiones

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

5.5. PARA DISTORSIONES ARMÓNICAS

5.5.1. 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.

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 componentes armónicas de corriente, que producirán a su vez armónicos de tensión.

Los valores de las n armónicas 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 cumple 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.

La condición anterior se puede establecer tanto para filtros en serie, como en paralelo. Para la elección de estos, 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.

5.6. SISTEMAS UNIVERSALES

Se engloba bajo esta denominación a los correctores de red que utilizan componentes electrónicos de potencia y son capaces corregir prácticamente la totalidad de las perturbaciones. Los más conocidos son los llamados SAI, es decir, los diversos tipos de sistemas de alimentación ininterrumpida.

5.6.1. 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:

5.6.1.1. 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.

5.6.1.2. 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.

5.6.2. 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 aquellos que únicamente efectúan la corrección de tensión.

5.6.3. 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.

5.7. 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 considerarse otros factores, tales como mantenimiento, fiabilidad, rendimiento, etc., que tienen gran influencia en su eficacia.

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

En la tabla recogemos una comparación de diferentes sistemas de corrección, utilizando como parámetro de referencia su rendimiento energético.

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
Transformador de ultra aislamiento	92,5	97,7	98,5
Estabilizador de tomas con autotransformador	97,7	98,5	99
Estabilizador de tomas con transformador	94,5	97	98
Estabilizador por divisor inductivo	85	89	--
Estabilizador ferorresonante	80	--	--
SAI fuera de línea (muy variable con el modelo)	96	98	--
SAI en línea	75	85	91