
CAPÍTULO 10

Desequilibrios de tensión y sistemas de corrección de perturbaciones

10.1. Definición

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

La UNE 50160 define desequilibrio de tensión en un sistema trifásico como: “estado en el cual el valor eficaz de las tensiones de fases o los desfases entre fases no son iguales”.

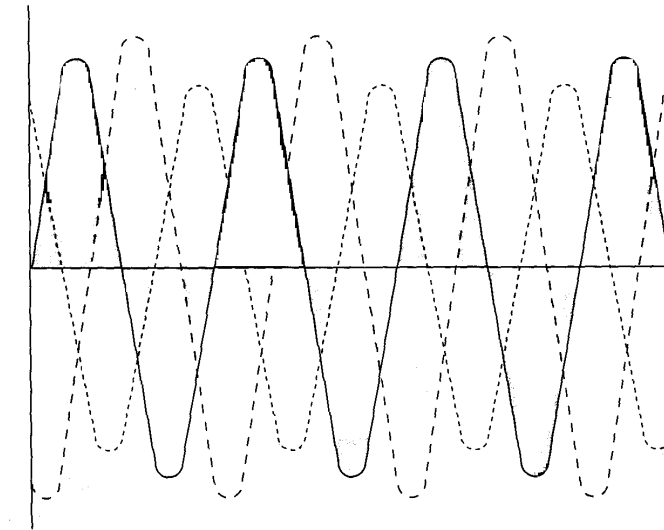


Figura 10.1. Sistema desequilibrado.

El sistema sinusoidal trifásico suele estar representado mediante tres vectores cuyos módulos son iguales, que se encuentran desfasados 120° entre sí y que tienen una secuencia de fases anti-horaria directa.

Para estudiar los desequilibrios de tensión, se descompone dicho sistema, de acuerdo con los teoremas de Fortescue-Storvis (componentes simétricas).

$$\vec{V} = (V_1 \quad V_2 \quad V_3) \quad (10.1)$$

Así, si se representa la tensión en un punto del sistema por un vector de tres componentes complejas: V_1 , V_2 , V_3 , ecuación (10.1), donde cada una de ellas representa la tensión fase-neutro, este vector tensión se puede descomponer en la suma de los tres vectores siguientes (Fig. 10.2):

Vector directo. Se trata de un vector formado por tres componentes de igual módulo y desfasadas 120° (sistema trifásico equilibrado), que es sincrónico con el sistema de origen (secuencia horaria). Sus componentes son designadas mediante V_{d1} , V_{d2} y V_{d3} .

Vector inverso. Se trata de un vector formado por tres componentes de igual módulo y desfasadas 120° (sistema trifásico equilibrado), pero de secuencia opuesta a la del sistema de origen (anti-horaria). Sus componentes son designadas mediante V_{i1} , V_{i2} y V_{i3} .

Vector homopolar. Sistema constituido por tres vectores cuyos módulos y dirección son iguales. Sus componentes se representan mediante V_{h1} , V_{h2} y V_{h3} .

Por lo tanto, para estudiar los desequilibrios del vector tensión, se descompone dicho vector, de acuerdo con los teoremas de Fortescue-Storvis, en los tres vectores siguientes, (Fig. 10.2):

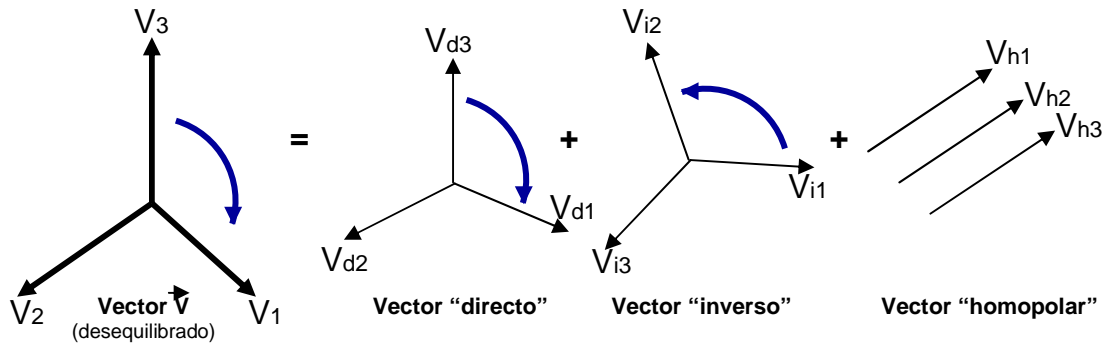


Figura 10.2. Vectores directo, inverso y homopolar equivalentes a un vector asimétrico (desequilibrado)

Si se utiliza el operador unitario "a", (10.2), que gira 120°:

$$a = e^{j120} \quad (10.2)$$

Se puede poner:

$$\begin{cases} V_{d1} = V_d \\ V_{d2} = a^2 V_d \\ V_{d3} = a V_d \end{cases} \quad \begin{cases} V_{i1} = V_i \\ V_{i2} = a V_i \\ V_{i3} = a^2 V_i \end{cases} \quad \begin{cases} V_{h1} = V_h \\ V_{h2} = V_h \\ V_{h3} = V_h \end{cases} \quad (10.3)$$

Así si se conoce V_d , V_i y V_h , se pueden determinar las componentes de los vectores "directo", "inverso" y "homopolar".

Se tiene que el vector \underline{V} , se puede representar como, (10.4):

$$\vec{V} = (V_1 \ V_2 \ V_3) = (V_{d1} \ V_{d2} \ V_{d3}) + (V_{i1} \ V_{i2} \ V_{i3}) + (V_{h1} \ V_{h2} \ V_{h3}) \quad (10.4)$$

Dados (V_d, V_i, V_h) quedan determinados (V_1, V_2, V_3) y viceversa, ya que la matriz de paso [a], viene dada por (10.6) y tiene inversa:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_d + V_i + V_h \\ V_2 &= a^2 V_d + a V_i + V_h \\ V_3 &= a V_d + a^2 V_i + V_h \end{aligned} \quad (10.5)$$

$$[a] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (10.6)$$

$$\begin{aligned}
 V_d &= \frac{1}{3}(V_1 + aV_2 + a^2V_3) \\
 V_i &= \frac{1}{3}(V_1 + a^2V_2 + aV_3) \\
 V_h &= \frac{1}{3}(V_1 + V_2 + V_3)
 \end{aligned}
 \tag{10.7}$$

Estas magnitudes se pueden calcular, en función del sistema original (U_R, U_S, U_T), mediante las expresiones matemáticas (10.1), en las que “a” es el operador unitario que gira 120° .

$$\begin{aligned}
 V_1 &= \frac{1}{3}(V_R + aV_S + a^2V_T) \\
 V_2 &= \frac{1}{3}(V_R + a^2V_S + aV_T) \\
 V_0 &= \frac{1}{3}(V_R + V_S + V_T)
 \end{aligned}
 \tag{10.8}$$

Llamando $V_s=(V_d, V_i, V_h)$ “**vector simétrico**” asociado al vector asimétrico $\underline{V}=(V_1, V_2, V_3)$, existe una correspondencia biunívoca entre ambos.

$$\vec{V} = (V_1 \quad V_2 \quad V_3) \Leftrightarrow V_s (V_d \quad V_i \quad V_h)
 \tag{10.9}$$

Los números complejos V_d, V_i, V_h se llaman, respectivamente, componente “**directa**”, “**inversa**” y “**homopolar**” del vector \underline{V} .

El desarrollo anterior, siguiendo los teoremas de Fortescue-Storvis, se puede aplicar también a: corrientes, potencias, impedancias, etc.

10.2. Cálculo de un sistema desequilibrado

Las tensiones asimétricas que aparecen en el punto de conexión común (PCC), como consecuencia de la conexión de cargas asimétricas trifásicas ó cargas fase-fase, se pueden calcular mediante la expresión (10.10).

$$U_{\text{asim}} (\%) = \frac{S_{\text{carga}}}{S_{\text{cc}}} * 100
 \tag{10.10}$$

siendo:

S_{carga} = Potencia aparente de la carga conectada

S_{cc} = Potencia de cortocircuito en el PCC.

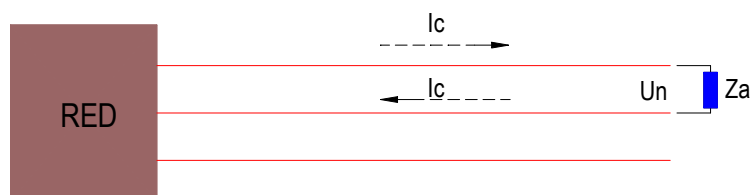


Figura 10.3. Conexión de cargas monofásicas.

Para la determinación del grado de asimetría de la tensión U_{asim} , para una carga monofásica conectada según el esquema de la figura 10.3, es válida la expresión (10.11) en la cual I_1 e I_2 son componentes simétricas:

$$I_1 = I_2 = \frac{I_c}{\sqrt{3}} \quad (10.11)$$

En las redes de media tensión, si llamamos Z_2 a la impedancia del sistema inverso y Z_{cc} a la impedancia de cortocircuito, se cumple normalmente que $Z_2 = Z_{cc}$; entonces, las tensiones de las componentes directa e inversas vendrán dadas por las expresiones (10.12) y (10.13), respectivamente.

$$V_1 = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad (10.12)$$

$$V_2 = I_2 Z_2 = I_2 \frac{U_n^2}{S_{cc}} \quad (10.13)$$

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

En consecuencia, la definición rigurosa del grado de asimetría de la tensión vendrá dada por la expresión (10.14).

$$U_{\text{asim}} (\%) = \frac{V_2}{V_1} * 100 \quad (10.14)$$

Sustituyendo en la expresión (10.14), los valores determinados anteriormente, se llega a la definición inicial, dada por la expresión (10.10).

En la mayor parte de los casos, para calcular la asimetría de una carga monofásica, es suficiente determinar el grado de asimetría de la tensión utilizando la expresión (10.14).

10.3. Valores de referencia

La UNE 50160 indica que la tensión en las condiciones normales de explotación, para cada período de una semana, debe cumplir que el 95% de los valores eficaces calculados cada 10 minutos de la componente inversa de la tensión de alimentación debe situarse entre el 0 y el 2% de la componente directa. En ciertas regiones equipadas con líneas parcialmente monofásicas o bifásicas, los desequilibrios pueden alcanzar el 3% en los puntos de suministros trifásicos.

En esta norma no se indican más que valores que corresponden a la componente inversa de la tensión, que es determinante para los eventuales daños provocados en los aparatos conectados a la red.

Las condiciones de compatibilidad en el PCC son las siguientes:

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

10.4. Causas que los originan

Las redes eléctricas son generalmente trifásicas y alimentan receptores trifásicos, pero también muchos receptores monofásicos. Las corrientes absorbidas en las tres fases son de amplitud diferente y se observan desequilibrios de tensión.

Las cargas monofásicas entre conductor de fase y conductor neutro, que sólo son posibles en las redes de baja tensión, no tienen, en general, especial relevancia. Esto se debe a que, en el PCC, la relación entre la potencia de las cargas conectadas y la potencia de cortocircuito es baja: normalmente, 1/150.

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

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

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

10.5. Efectos que producen

Una de las principales consecuencias que tienen las tensiones asimétricas sobre los receptores que son sensibles a ellas es el calentamiento.

Así pues, las tensiones asimétricas producen diferentes efectos según cual sea el tipo de receptor:

- Transformadores y líneas. Para una misma carga activa, la intensidad causada por la asimetría puede ser el doble de la que existiría en situación de simetría. Por ello, cuando en la red hay conectadas cargas que producen asimetría, estos equipos trabajan con unos niveles de utilización máxima del 60%.

Motores síncronos y asíncronos. Los desequilibrios de tensión generan componentes inversas de la corriente, que hacen aparecer sobre todo pares de frenado parásitos y calentamiento en los motores de corriente alterna. Las intensidades del sistema inverso generan un campo giratorio de doble velocidad – que se opone al de excitación- y producen pérdidas adicionales, principalmente en el rotor.

- En los motores asíncronos, el aumento de temperatura por calentamiento es significativo para valores de U_{asim} superiores a un 1%. Y es especialmente perjudicial cuando se llega al 2% en máquinas totalmente cargadas.
- En los motores síncronos, se admite una intensidad del sistema inverso equivalente entre el 5% y el 10% de su intensidad de dimensionamiento I_{rG} , lo cual es tanto como decir que toleran un valor de U_{asim} de entre un 1 % y un 2%.
- Equipos de regulación y control. Como señala la norma CEI 146, deben estar preparados para aceptar un grado de asimetría de hasta el 2%. En caso de que este nivel sea superado, su funcionamiento puede verse afectado de manera significativa.

10.6. Métodos de corrección y prevención de desequilibrios

Para prevenir sus efectos es necesario tener en cuenta tanto su grado de asimetría, como la duración de la misma.

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

- Reparto de las cargas monofásicas, consiguiendo una distribución más homogénea entre las tres fases.

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

10.7. Sistemas universales de corrección de perturbaciones

Esta denominación engloba los métodos de corrección de red que utilizan componentes electrónicos de potencia y son capaces de corregir prácticamente la totalidad de las perturbaciones.

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

10.8. Sistemas de alimentación ininterrumpida estáticos (SAIs)

Son equipos que por su concepción autónoma, permiten realizar suministro aún cuando no exista suministro de red. Para ello incorporan baterías, cargador de baterías y ondulator, la finalidad de este último, es convertir la corriente continua procedente de los acumuladores, en corriente alterna, de iguales características que la red, pero exenta de los problemas de ruidos y variaciones que la afectan.

Las prestaciones más generales que deben aportar dichos equipos son:

- Aislar la carga que se alimenta de la red.
- Estabilizar la tensión y la frecuencia de salida.
- Evitar picos y efectos parásitos de la red eléctrica
- Almacenar energía en las baterías, las cuales la suministrarán por un periodo fijo de tiempo, cuando haya un corte de corriente.

De los requisitos y prestaciones antes mencionados, se desprenden las topologías más comúnmente usadas en la concepción de Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAIs).

10.8.1. Modo de funcionamiento.

En tanto hay red, el sistema proporciona la tensión y la corriente demandada por las cargas, manteniendo unas baterías conectadas en paralelo, en su estado de flotación.

Al ocurrir el fallo de la red ó producirse oscilaciones que la sitúen fuera de márgenes, son las baterías las que, sin interrupción por su conexión en paralelo, proporcionan la tensión y la corriente demandadas por las cargas.

Si el fallo tiene una duración superior a la autonomía prevista, el sistema dispone de un detector-desconector, que actúa al alcanzarse el nivel de subtensión de la batería prefijada, para evitar una descarga profunda y la consecuente degradación de la batería, además cuenta con un rearme automático tras la correspondiente histéresis.

Cuando se restablece la tensión de la red, el sistema alimenta la salida, empleándose la corriente no utilizada por la salida en la recarga de la batería, hasta que alcanza su estado de flotación, en cuyo momento recibe únicamente la corriente de goteo o mantenimiento.

10.8.2. Sistema de carga

El sistema de carga utilizado es el denominado IU (Intensidad Constante, Tensión Constante).

Mediante la doble estabilización de la tensión y de la corriente de que el sistema esta dotado, cuyos valores son ajustables, el sistema proporciona de forma constante toda la corriente no empleada por la utilización en la recarga de la batería, siempre que esta este por debajo de su nivel de flotación.

Al aproximarse al nivel de flotación, la corriente de carga va disminuyendo, proporcionando únicamente la corriente de mantenimiento, cuando las baterías alcanzan el nivel de flotación prefijado.

10.8.3. Tecnología aplicada

La tecnología aplicada en los alimentadores-cargadores es la denominada Modulación de Ancho de Pulso ("Pulse Width Modulation", PWM), con grandes ventajas en cuanto a peso, tamaño, rendimiento y fiabilidad.

La entrada de red se filtra, rectifica y filtra de nuevo. La tensión en continua obtenida se trocea a una frecuencia de 60 kHz mediante conmutadores MOS para alta frecuencia, en montaje semipunte con el que se actúa sobre el primario de un transformador de ferrita. Con la adecuada relación de transformación se obtiene en el secundario el valor requerido, el cual se rectifica y filtra.

Mediante un servomecanismo optoacoplado se actúa sobre el modulador de ancho de pulso, para mantener las constantes de salida prefijadas en un +1%, con independencia de las variaciones tanto en la línea como en la carga.

10.8.4. Baterías

Los equipos de Alimentación Ininterrumpida en CC, normalmente están diseñados para funcionar con baterías tipo ácido plomo de GEL, herméticas y sin mantenimiento. Este tipo de batería se considera idóneo para aplicaciones tipo "stand by" por su vida útil de 5 a 10 años (según fabricante) reducida auto-descarga, eliminación de mantenimiento periódico y la posibilidad de trabajo en cualquier posición.

Dependiendo de la autonomía requerida, es posible en algunos modelos incorporar baterías en el interior del chasis o caja junto al modulo alimentador-cargador o incluso suministrar un "pack" de baterías en un chasis separado, sin embargo a partir de ciertos requerimientos de capacidad y número de baterías se recomienda que su ubicación sea en el fondo del armario o "rack" para evitar problemas derivados del peso y volumen de las baterías.

Aunque este tipo de batería desprende poca cantidad de vapores, es recomendable la provisión de ventilación.

10.8.5. Tipologías básicas

Según la disposición de sus módulos o sus formas de actuar, lo que determina en gran medida alguna de sus características más importantes, como fiabilidad, tamaño y rendimiento, se distinguen básicamente, tres tipologías distintas denominadas:

- ⇒ OFF-LINE o pasivo en reserva.
- ⇒ LINE INTERACTIVE o interactivo con línea.
- ⇒ ON-LINE o doble conversión.

10.8.6. Pasivo en reserva ("off-line")

Esta tipología, en un funcionamiento normal, la red alimenta a la carga. Cuando la tensión de la red está fuera de las tolerancias ajustadas, un conmutador conecta la carga con el inversor alimenta dopor las baterías, el tiempo de conmutación es muy corto (<10 ms), pero aún así se genera un pequeño descenso transitorio de tensión. El rectificador es pequeño, ya que su función es mantener cargadas las baterías.

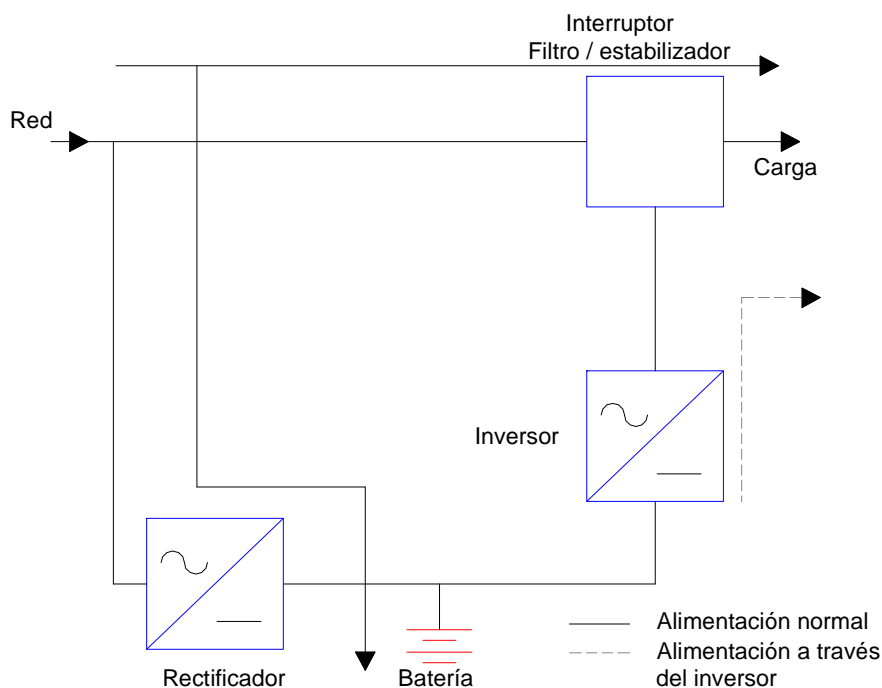


Figura 10.4. Disposición pasiva en reserva.

Las características de este tipo de tipología son:

- Diseño simple y un costo bajo.
- Se utiliza en pequeñas potencias (<2 kVA), con onda de salida muchas veces cuadrada, para protección de cargas poco críticas o sistemas de iluminación de emergencia.
- Se emplea también para muy altas potencias, con salida senoidal, siempre que la carga admita la perturbación de la conmutación.
- Presenta un rendimiento alto.
- Tiene mayor fiabilidad que otros sistemas.

Este tipo de sistema no aísla de las perturbaciones de la red, únicamente actúa en descensos del valor eficaz de la tensión. Esto hace que sean una buena opción para interrupciones y para la mayoría de huecos, pero no para variaciones lentas de tensión, transitorios rápidos, variaciones de frecuencia y armónicos.

Supone una solución de compromiso entre un nivel aceptable de protección frente a perturbaciones a un coste razonable.

10.8.7. Interactivo con línea (“line interactive”)

En funcionamiento normal la carga se alimenta directamente de la red y las baterías se mantienen en flotación. El inversor tiene la doble función de cargar las baterías y alimentar la carga en caso de fallo en la red.

El SAI vigila las características de la tensión, de manera que si no están dentro de los rangos especificados pasa a alimentar la carga desde la batería. Este modo de operación le permite interactuar con la alimentación de la carga, lo que supone una mejora importante respecto a los equipos “off-line”.

En caso de fallo en la tensión, el inversor alimenta la carga mediante las baterías, y el interruptor estático desconecta a que no se alimente a la red.

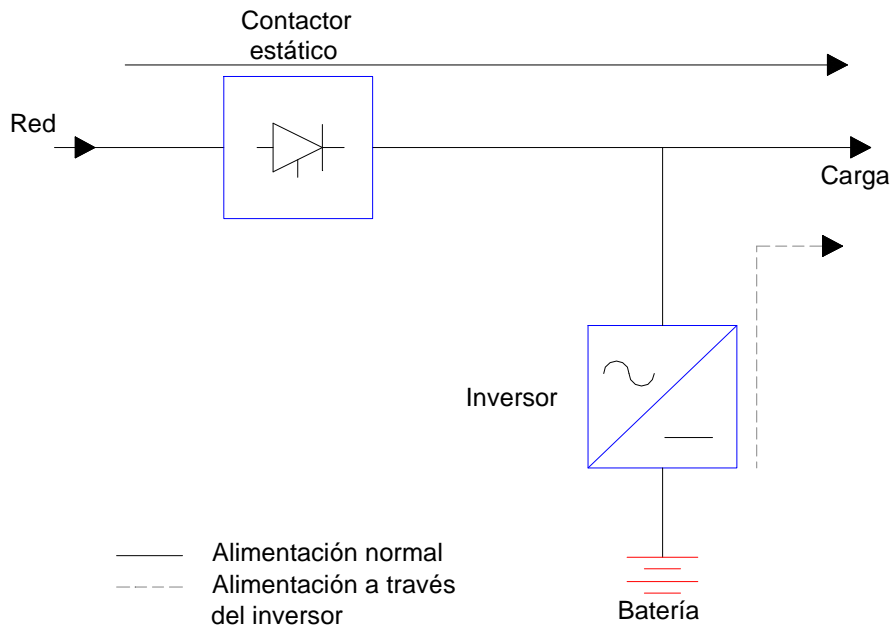


Figura 10.5. Disposición interactiva con línea.

Las características de este tipo de tipología son:

- Se emplea para cargas de mediana y gran potencia.
- Su rendimiento es mayor que el del equipo de doble conversión.

Dispone generalmente de un "by-pass" para realizar operaciones de mantenimiento. Con respecto a su coste, este es menor que el del equipo de doble conversión.

10.8.8. Doble conversión ("on-line")

En funcionamiento normal, la carga se alimenta a través del inversor, proporcionando una tensión de valor y frecuencia regulados.

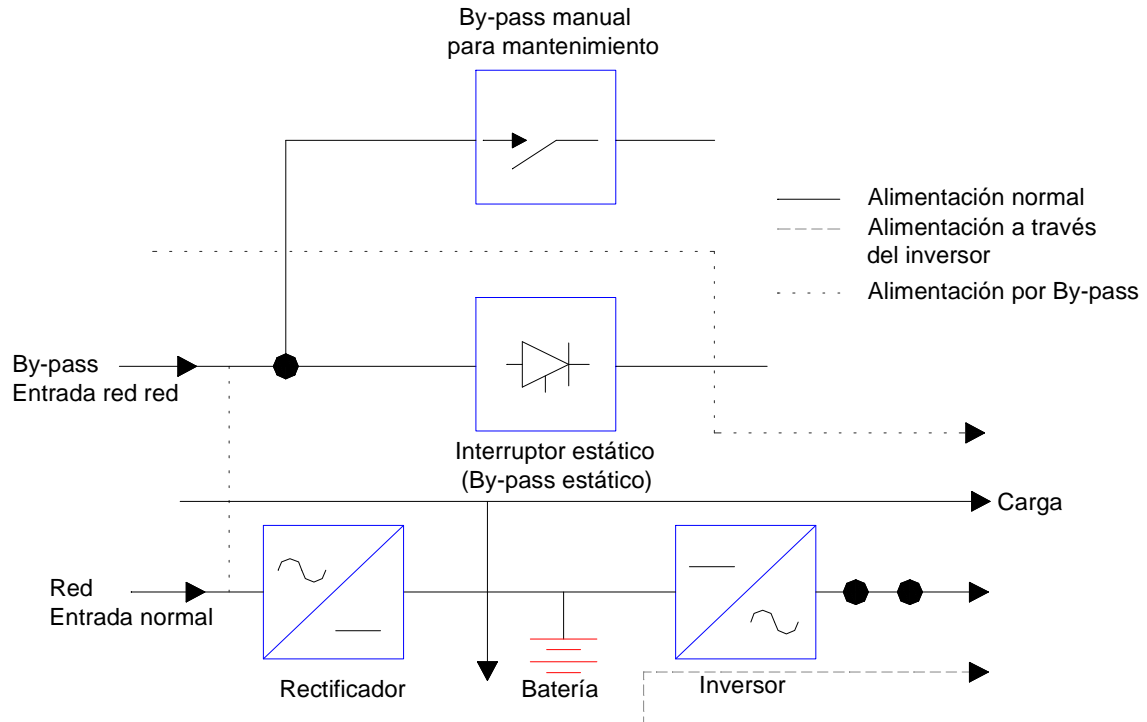


Figura 10.6. Disposición en doble conversión.

El sistema realiza una doble conversión, alterna-continua y continua-alterna (AC-DC / DC-AC). Generalmente dispone de un "by-pass" estático que permite alimentar la carga desde la red en caso de fallo del equipo o de transitorios de corriente elevados. La conmutación se realiza sin interrupción en la tensión, para lo cual necesita una sincronización.

Las características de este tipo de tipología son:

- La protección es continua, ya que la carga está aislada de la red.
- La transferencia de energía es inmediata y sin transitorios.
- Su rendimiento es menor que los dos equipos anteriores.
- Presenta una baja potencia de cortocircuito.
- Ofrece una alimentación de mayor calidad.

Dispone de un interruptor manual de "by-pass" para mantenimiento. En cuanto a su precio, es mayor debido a que está compuesto de dos módulos de conversión.

Para SAIs trifásicos (10-800 kVA) la tecnología "on-line" se ha impuesto, a pesar de su mayor coste, debido a sus mayores prestaciones.

10.8.9. Montajes especiales

Entre otras posibilidades caben las siguientes combinaciones:

- ◆ Combinación con grupo electrógeno:

Los SAI permiten una buena combinación con grupos electrógenos, en este caso, figura 10.7 la carga crítica se alimenta normalmente bien directamente de la red, si se trata de un SAI "off-line", o a través de éste, si es del tipo "on.line". En ambas posiciones, la carga crítica está protegida ante cualquier interrupción en la alimentación de red, hasta que se conecta el grupo electrógeno.

Si lo que se pretende con este montaje es únicamente salvar la falta de tensión hasta la puesta en marcha del grupo electrógeno, se puede emplear un SAI “off-line” reduciendo al mínimo necesario la capacidad de las baterías.

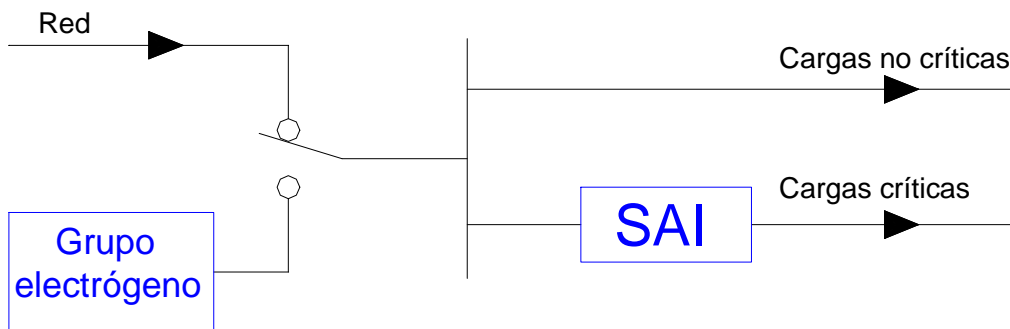


Figura 10.7. Montaje de grupo electrógeno con SAI

♦ Agrupación de módulos:

Cuando la seguridad del funcionamiento requerida no se alcanza con un solo módulo, o cuando la potencia de la carga es superior a 200 kVA, suelen disponerse dos o más módulos en paralelo.

La interconexión entre los circuitos de mando y de potencia debe hacerse de tal manera que el fallo de uno cualquiera de los módulos no perturbe el funcionamiento de los demás. Se consigue mediante:

➤ Agrupación redundante aislada.

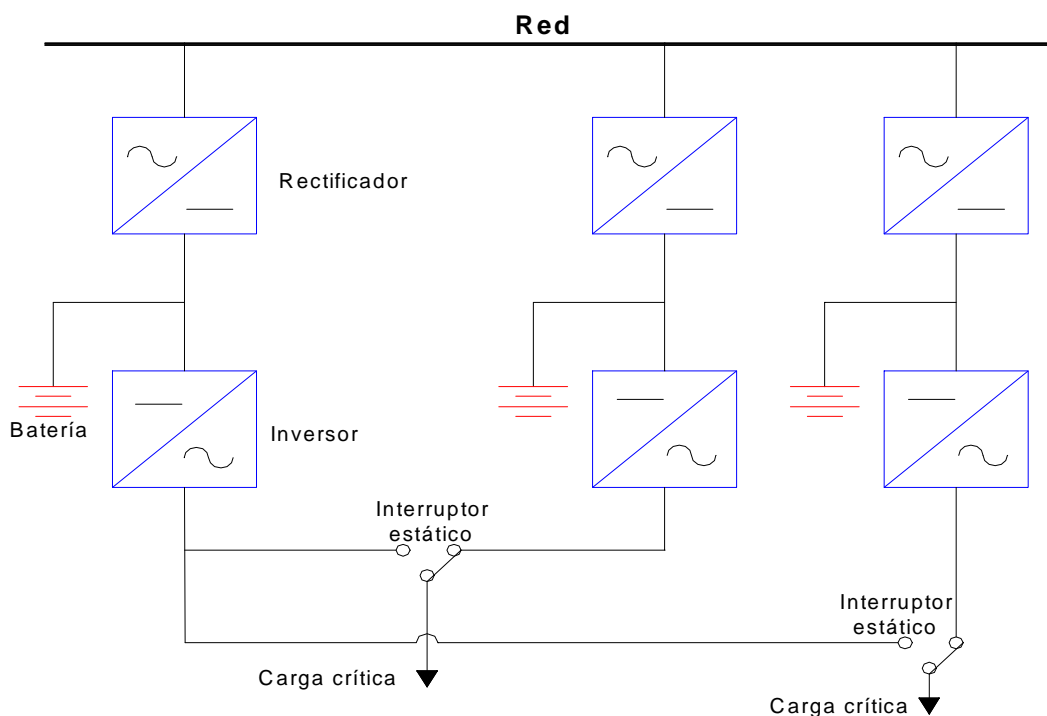


Figura 10.8. Agrupación redundante aislada

Como se ve en la figura 10.8, la carga crítica se alimenta mediante varios módulos en paralelo, de los cuales uno se mantiene inactivo y sólo actúa en caso de fallo o por mantenimiento. Nunca se emplea la capacidad máxima de los módulos.

➤ Agrupación redundante paralela.

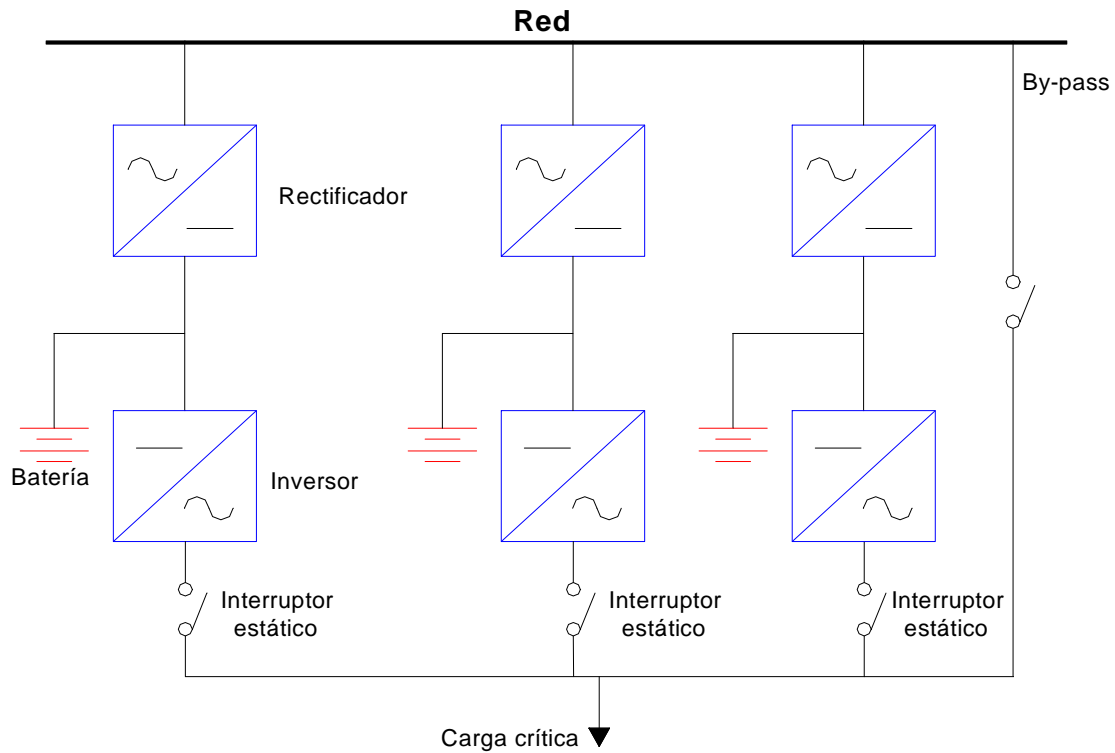


Figura 10.9. Agrupación redundante paralela.

En el montaje representado en la figura 10.9 todos los módulos, dispuestos en paralelo comparten la carga, pero hay un número suficiente de éstos para poder soportarla en caso de fallo de una unidad. Facilita el incremento de carga, aunque presenta problemas sí hay un fallo que afecte a más de un módulo.

10.9. Sistemas de alimentación ininterrumpida dinámicos

Frente a los sistemas tradicionales, estos equipos utilizan un sistema de almacenamiento de energía cinética en lugar de las clásicas baterías. Para ello emplean un volante de inercia movido por un motor, que en caso de falta de red actúa como generador arrastrado por el volante.

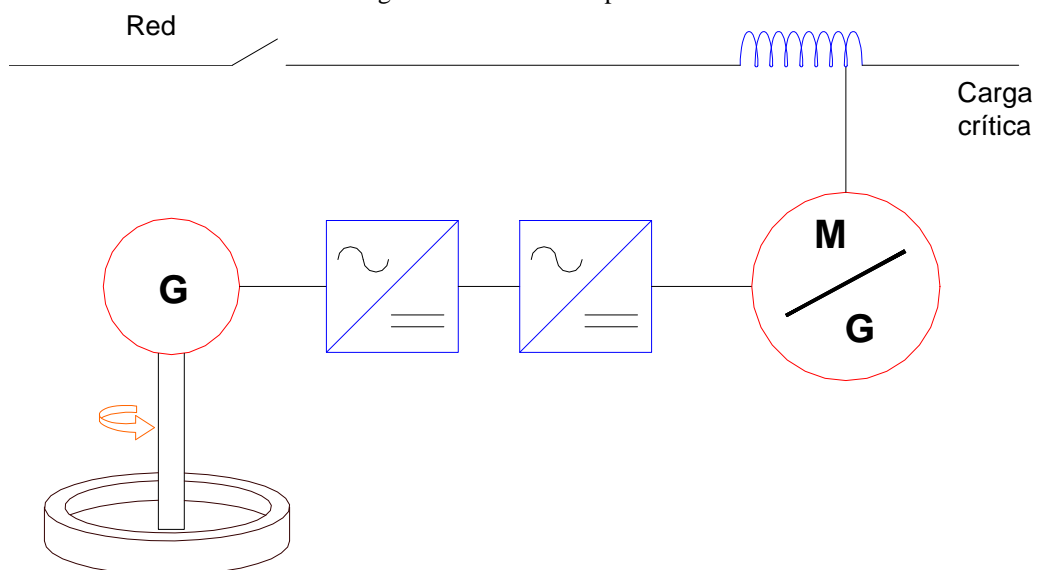


Figura 10.10. Ejemplo de SAI dinámico.

Se pueden encontrar dos tipologías, en función del tipo de almacenamiento utilizado:

➤ De alta velocidad y poca masa.

- Son los de tecnología más moderna.
- Suelen tener una disposición vertical.
- Utilizan materiales de polímeros compuestos.
- Son más compactos.
- Emplean cojinetes magnéticos y bombas de vacío.
- Permiten obtener mayores potencias.

➤ De baja velocidad y gran masa.

- Tienen una configuración horizontal.
- El volante suele ser de acero y gira a menos revoluciones.
- Utilizan cojinetes mecánicos.
- Es la tecnología más clásica, con materiales más tradicionales y diseño más sencillo.

Las principales características de estos dispositivos son:

- Su funcionamiento es idéntico al de los SAIs estáticos, pero sólo son válidos para interrupciones de corta duración. La energía almacenada puede cubrir desde 10 a 15 segundos, con un 100% de su carga nominal y hasta 1 ó 2 minutos dependiendo de la carga.
- No obstante este tiempo supera la mayor parte de los incidentes de las redes eléctricas, y permite incluso el arranque de grupos electrógenos si la perturbación tiene una duración mayor.
- Eliminan los inconvenientes de las baterías: coste elevado de climatización, envejecimiento, dependencia de la temperatura, espacio ocupado y tiempo necesario para su carga.

10.10. Grupo electrógeno.

Es un grupo generador formado, básicamente, por un alternador, en general trifásico, y una máquina motriz que suele ser un motor de combustión interna.

Dispone de dos controles importantes:

- El regulador de velocidad que actúa sobre la alimentación del motor y controla, para cada potencia, la velocidad del generador síncrono y por consiguiente su frecuencia.
- El regulador de tensión que varía la corriente de campo del generador, permitiendo controlar la tensión de salida.

10.10.1. Conexión y funcionamiento

Normalmente los grupos electrógenos industriales están diseñados para trabajar, en baja tensión, aislados de la red eléctrica de distribución comercial, alimentando en caso de emergencia, por corte en el suministro, sobre todo las cargas de la planta que sean críticas, bien por la actividad que desarrollan o por las situaciones de seguridad que implican.

La conexión del grupo a la carga, que debe alimentar, suele hacerse de forma automática en pocos segundos y responde, en esencia, al esquema de la figura 10.11. donde el interruptor general 1 y el de separación de barras 2 abren, a falta de tensión, y el interruptor 3 se cierra, seguidamente, conectando el grupo electrógeno.

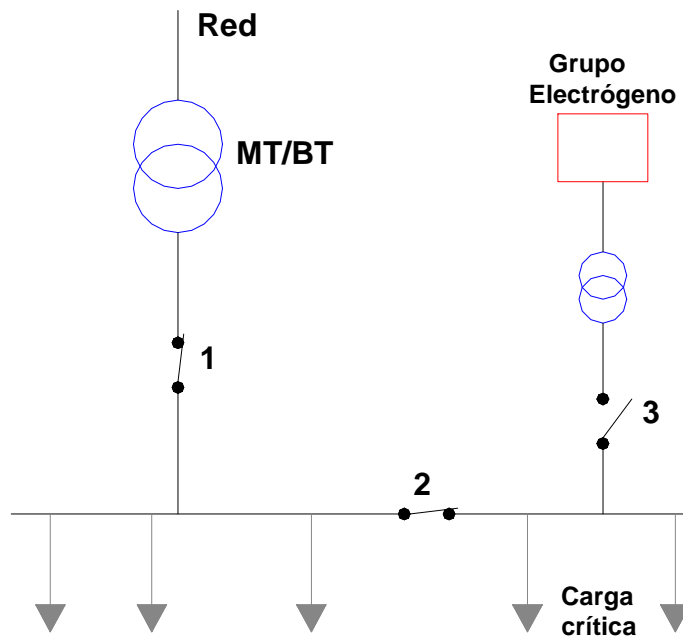


Figura 10.11. Conexión del grupo electrógeno a barras de baja tensión.

Se utilizan también unidades más sofisticadas las cuales incluyen un rectificador, un motor de continua y un volante de inercia, cuya energía cinética se aprovecha para conseguir mediante un embrague, al faltar el suministro, un arranque prácticamente inmediato del motor térmico y alternador. Por ello se denominan, en este caso, grupos de continuidad.

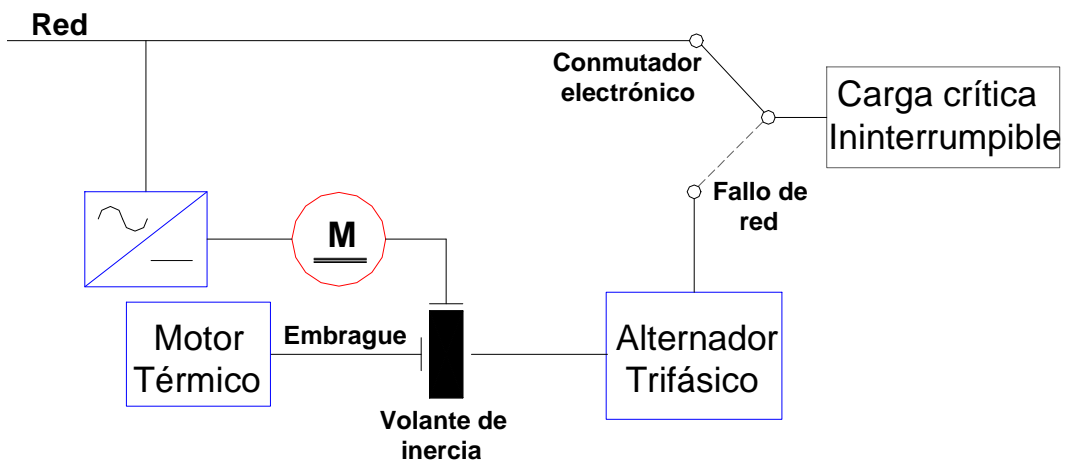


Figura 10.12. Grupo electrógeno de continuidad

Otro sistema, aplicado en algún caso, consiste en disponer de una fuente de alimentación ininterrumpida (SAI) que cubre el suministro de forma continua, aportando la energía momentánea necesaria hasta el arranque del grupo de emergencia clásico, de mayor potencia y autonomía, que pasa a soportar la carga crítica y a evitar la descarga de las baterías del SAI.

La potencia de estos grupos suele variar entre unos pocos y algunos cientos de kVA o incluso puede ser mayor. Las unidades, de potencia unitaria superior, hasta niveles de varios MVA, accionadas también térmicamente por motores o turbinas, no se utilizan habitualmente de forma aislada, como grupos de emergencia, sino en instalaciones cogeneradoras.

Tratándose de grupos electrógenos, con su alternador trabajando en una red aislada, es importante destacar los siguientes puntos:

- La frecuencia depende únicamente de la velocidad del motor primario que mueve la máquina síncrona.
- El factor de potencia del generador es el de la carga.
- La tensión de salida es función de:
 - La velocidad de giro.
 - La corriente de excitación.
 - El factor de potencia de la carga.

Hay que tener en cuenta que estos grupos no son una fuente de potencia infinita, como a menudo puede aceptarse de la red eléctrica, sino que la carga y el generador son de un orden de magnitud similar por motivos de economía en la inversión.

Ello origina complejos problemas de regulación en la excitación para que sea capaz de mantener la tensión al margen de las variaciones de carga, que fácilmente sufre oscilaciones del 100%. El problema se agrava si la carga también está regulada, como es el caso de los motores con velocidad controlada, pues entonces las inestabilidades se suceden y no queda más solución que aumentar la potencia aparente del alternador, en algún caso hasta un 200%, respecto a la del motor térmico que lo acciona.

El control de excitación del alternador con realimentación en tensión solamente, aunque más económico, es inadecuado para el arranque de motores. Estos generadores pueden quedar totalmente desexcitados y con salida de tensión nula después de un corto impulso de corriente de solo $3I_n$, es decir de tres veces el valor nominal.

Lo ideal es acercarse a un adecuado porcentaje de excitación, proporcional a la corriente de carga. Solo esta disposición es capaz de mantener una corriente elevada en condiciones transitorias de cortocircuito, requisito necesario para que un alternador emule convenientemente a la red comercial en casos como el arranque de un motor.

En este tipo de regulación la tensión, se requiere la intervención de la excitatriz, que es otra máquina síncrona pero invertida, es decir, con el inductor en el estator alimentado por la corriente continua del regulador, y el inducido en el rotor.

El inducido de la excitatriz, que puede tener un número arbitrario de fases, se conecta con el inductor del alternador a través de un rectificador estático, a diodos, situado en el propio eje, lo que evita la comunicación eléctrica con el estator a través de escobillas y anillos rozantes, con la comodidad, fiabilidad y seguridad que ello implica. A su vez, la excitatriz permite trabajar con una potencia de excitación menor.

En cuanto a la tensión suministrada no debe desviarse de la tolerancia del $\pm 2,5\%$ entre la marcha en vacío y la marcha a plena carga, siempre que se mantenga el factor de potencia de la carga entre 0,8 y 1.

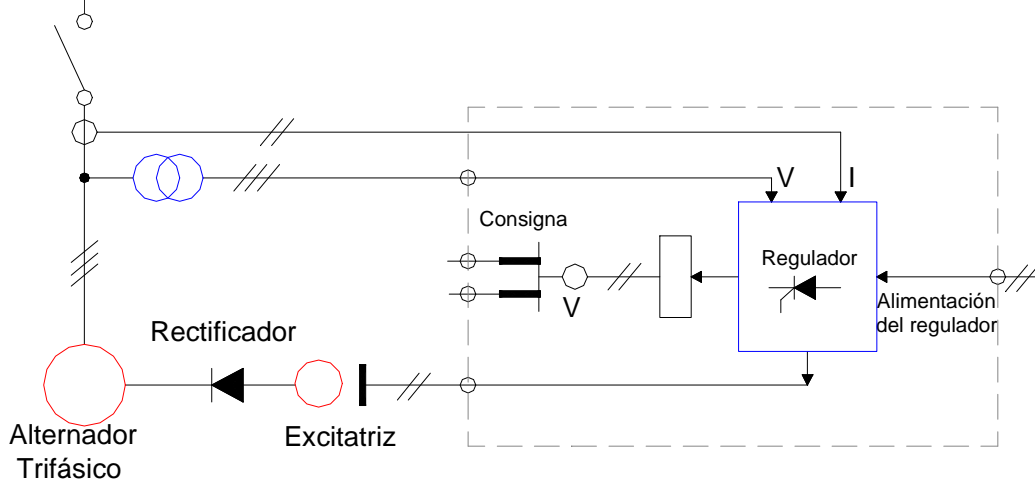


Figura 10.13. Regulación por tensión y por intensidad.

10.10.2. Características

La potencia nominal del equipo se define como aquella que puede suministrar indefinidamente y suele coincidir con la potencia activa que entrega el alternador con un factor de potencia de 0,8. Naturalmente que si el factor de potencia de la carga es más bajo o muy variable, la potencia aparente del generador tendrá que ser mayor para una misma potencia de la máquina motriz.

Por otra parte, de forma orientativa, puede decirse que, en equipos comerciales, las características eléctricas más usuales, de tensión y frecuencia, son:

- Capacidad de variar la consigna de tensión para disponer de tensiones de salida ajustables entre un $\pm 5\%$ y un $\pm 10\%$ del valor nominal, según fabricante.
- Ajuste de frecuencia, mediante el regulador del motor térmico, con una variación máxima de velocidad, entre -1% en vacío y $\pm 4\%$ a plena carga, en grupos pequeños o medianos. Para unidades de potencia superiores a 200 kVA esta regulación es electrónica, con una variación del $\pm 1\%$.

Desde el punto de vista del usuario, interesa conocer la respuesta del equipo frente a un cortocircuito o un cambio brusco de carga. Los fabricantes realizan este tipo de ensayos para proporcionar las curvas características del grupo, como son:

- La curva de caída de tensión, que puede advertir sobre el comportamiento de elementos como relés, durante el arranque de motores, y además permite conocer la corriente permanente máxima del alternador.
- La respuesta ante un cortocircuito.
- La curva típica de corriente de cortocircuito, que en estos equipos no suele ser superior al triple de la corriente nominal.
- La curva de tensión – corriente, que informa sobre las zonas de trabajo del alternador durante los transitorios.

Se debe tener en cuenta además que:

- La potencia del alternador no hay que escogerla en función exclusivamente de la carga que alimente en régimen continuo.
- En el arranque de motores eléctricos se producen puntas de intensidad que superan la intensidad máxima que puede suministrar el generador ($3I_n$).
- La potencia nominal necesaria del alternador para el arranque directo de un motor eléctrico debe ser unas 2,3 veces superior a la de éste y al menos 1,35 veces si el arranque se hace en estrella – triángulo.

El grupo ha de protegerse frente a las sobrecargas y cortocircuitos que se originen en la red a la que alimenta.

La carga alimentada por el grupo puede no quedar suficientemente protegida por fusibles o magnetotérmicos normales, dado que habitualmente necesitan $5I_n$ para actuar en caso de cortocircuito y el generador no puede dar más de $3I_n$, este hecho obliga a utilizar magnetotérmicos especiales, con una intensidad de desconexión más reducida. Además de, subdividir la protección de la carga en varios circuitos, de forma que actúen correctamente los magnetotérmicos normalizados, disponiendo a la vez de sistemas electrónicos con detectores especiales.

El motor térmico, dispone a su vez de alarmas de funcionamiento que pueden provocar la parada del grupo, por anomalías en la presión de aceite, temperatura del agua o del aceite, embalamiento, etc.

El grupo tanto si entra en funcionamiento diariamente como si es sólo de emergencia, requiere unas atenciones y unas revisiones periódicas, de acuerdo con un plan de mantenimiento preventivo bien programado, para estar siempre disponible ante cualquier eventualidad.

10.11. Grupo motor – generador

El grupo motor – generador básicamente se trata de equipos que se componen de un motor eléctrico de entrada que, como elemento motriz, acciona un alternador acoplado al mismo eje. Además para aumentar su inercia incorpora, normalmente, un volante de inercia.

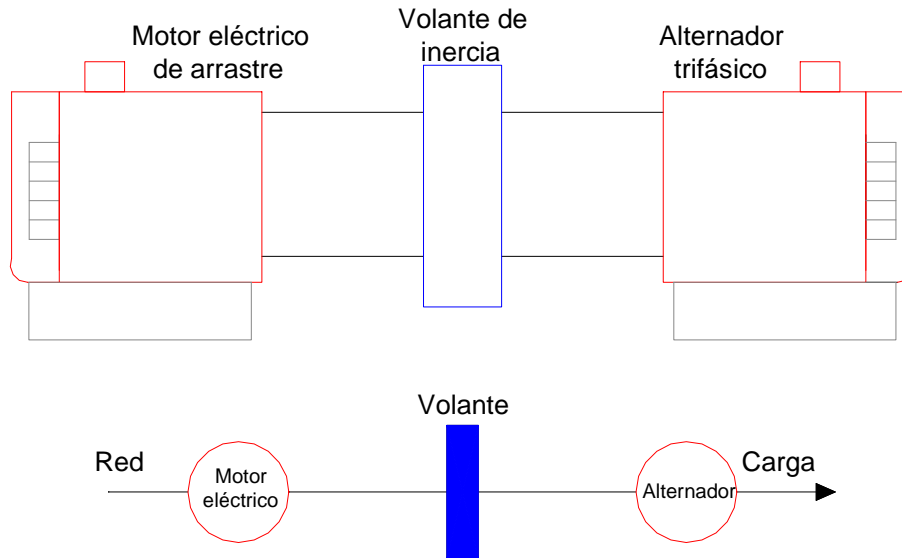


Figura 10.14. Grupo motor generador

Se utiliza, preferentemente, para que el alternador, aislado de la red, pueda proporcionar una onda de calidad a la carga que alimenta. Esta carga suele ser crítica, como es el caso frecuente de los circuitos de control o de los convertidores de frecuencia, en procesos industriales sensibles.

El volante de inercia es esencial para que, en caso de huecos de tensión y cortes breves, su energía cinética asegure la continuidad estable del suministro durante algunos segundos.

10.11.1. Posibilidades constructivas

Se refieren, sobre todo, a las tres variantes más empleadas, según que el motor de entrada sea de inducción, de corriente continua, o síncrono, resaltando en cada caso las peculiaridades siguientes:

- Motor de inducción.

Es el más empleado para potencias inferiores a 100 kVA, por su simplicidad y menor coste. La velocidad del motor y por tanto del grupo depende de la frecuencia de la red y del par resistente, por lo que la frecuencia del alternador disminuye conforme aumenta la carga, lo que puede ser problemático si afecta a la calidad del trabajo que se efectúa, esto se puede evitar mediante la utilización de convertidores de frecuencia.

- Motor de corriente continua.

Necesita emplear rectificadores, presenta una gran facilidad para regular su velocidad, independientemente de la frecuencia de red, también tiene la posibilidad de suministrar potencia a una frecuencia distinta a la de la red.

Requiere mayor mantenimiento, puede permitir un aumento de autonomía mediante la incorporación de baterías.

- Motor síncrono.

No presenta problemas en la frecuencia de salida del alternador, por lo que es el empleado cuando la carga requiere una frecuencia muy estable, además proporciona un par muy pequeño a velocidades inferiores a la de sincronismo, por lo que arranca en vacío y no se conecta la carga hasta que alcanza el sincronismo, es más caro que los anteriores.

10.11.2. Características

Destacan las siguientes:

- ↳ El aislamiento eléctrico del alternador con relación a la red proporciona un buen comportamiento frente a perturbaciones transitorias.
- ↳ Dependiendo de la inercia, inmuniza frente a huecos de tensión y cortes breves de hasta algunos segundos.
- ↳ Permite su utilización para potencias altas ($> 1\text{MVA}$).
- ↳ El alternador se sobredimensiona normalmente, entre el doble o el triple de la potencia del motor, para:
 - Cubrir las necesidades de potencia reactiva.
 - Permitir el arranque de motores.
 - Disminuir la deformación en la tensión provocada por corrientes armónicas.
- ↳ La corriente de cortocircuito se sitúa normalmente entre 5 y 15 In.
- ↳ Tiene una probada fiabilidad.
- ↳ Permite cambios de la frecuencia de alimentación de la carga.
- ↳ Requiere mantenimiento mecánico.

Como consideraciones finales de este tipo de dispositivo, cabe mencionar que permite en ocasiones una solución integrada en la maquinaria, aprovechando las inercias.

Además, si el alternador no está adecuadamente dimensionado puede dar lugar a caídas de tensión inaceptables, sobre todo en el arranque de motores. También existe la probabilidad de sobrecarga en el motor que acciona el equipo, ante períodos prolongados de baja tensión en la red que lo alimenta.

10.12. Estabilizadores de tensión

Son equipos que se instalan, entre la carga a proteger y la red de alimentación, para mantener la tensión aguas abajo dentro de límites preestablecidos.

Existen diferentes tipologías, siendo las más significativas las siguientes:

- ↳ Estabilizadores ferorrresonantes.
- ↳ Estabilizadores motorizados.
- ↳ Estabilizadores de tomas.

10.12.1. Estabilizadores ferorrresonantes

Son transformadores especiales, con relación de transformación unidad, diseñados para trabajar con el núcleo saturado. La tensión de salida es estable debido a la resonancia creada entre un condensador conectado a su arrollamiento secundario, en paralelo con la bobina formada por dicho secundario y arrollada sobre un núcleo saturado, figura 10.15. Por ello una variación de intensidad a consecuencia de

un cambio en la tensión del primario, del $\pm 20\%$, apenas modifica la secundario un $\pm 3\%$. Se denominan también CVT (“Constant Voltage Transformer”).

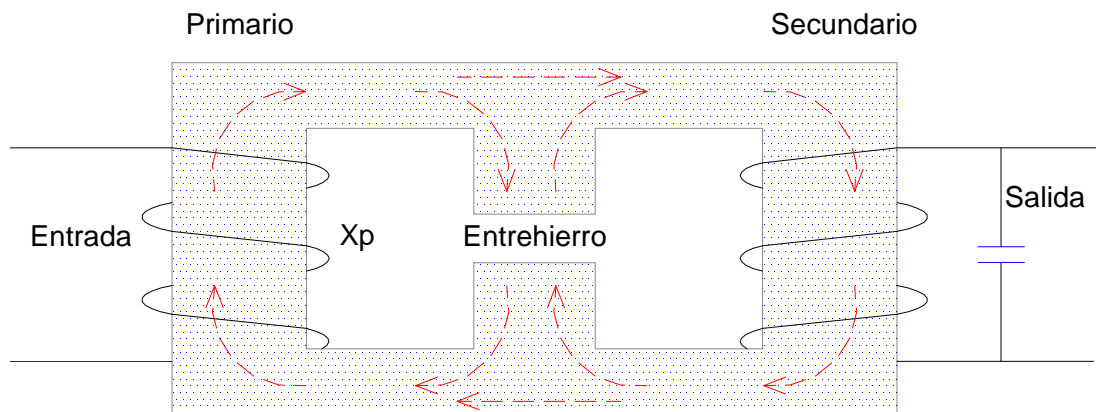


Figura 10.15. Transformador ferorrresonante.

Las características más destacables de estos equipos, son las siguientes:

- ❑ Son equipos robustos y de cierto peso.
- ❑ Debido a su principio de funcionamiento la forma de onda de la tensión de salida está deformada, precisándose un filtro a la salida para aproximarla a una onda senoidal.
- ❑ Su rendimiento es bajo, del orden de un 70% para una potencia de unas 2 kVA, siendo la potencia reactiva del orden de 2,5 veces la nominal.

El empleo de este equipo es aconsejable para cargas constantes y de pequeña potencia debido a su rápida respuesta ($= 30$ ms), su aislamiento galvánico y su gran fiabilidad. Aunque su utilización ha descendido desde que aparecieron los estabilizadores electrónicos, que incorporan componentes semiconductores activos, todavía se emplean en aquellos sistemas en los que es imperativa una fiabilidad elevada.

Se aconseja seleccionar un transformador ferorrresonante, con una potencia 4 veces superior a la potencia de la carga, de ahí que sea raro su empleo para potencias superiores a 10 kVA.

Es conveniente realizar un estudio previo, si se emplea con cargas capacitivas, ya que podría cambiar su resonancia.

Reduce la profundidad de los huecos de tensión que aparecen en el primario, por lo que en ocasiones se utiliza como dispositivo de mitigación frente a perturbaciones.

10.12.2. Estabilizadores motorizados

Son autotransformadores con devanado de una capa en los que la tensión de salida depende de la posición de una escobilla motorizada que se desliza sobre el secundario. Un circuito de control posiciona dicha escobilla para mantener en todo momento la tensión de salida en un valor prefijado $\pm 2\%$.

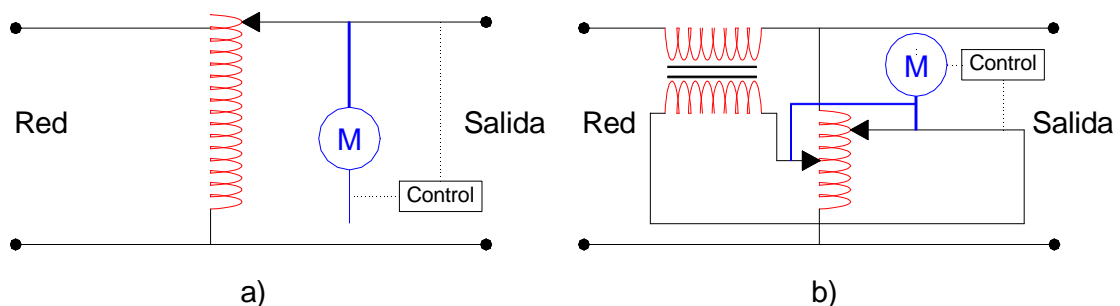


Figura 10.16. Estabilizador motorizado de pequeña potencia a) y gran potencia b).

Dado que el tiempo de respuesta es del orden de 1 segundo, poseen bastante estabilidad dinámica, la regulación de la tensión de salida se puede realizar de forma conjunta en las tres fases o bien por fase para tres cargas diferentes.

A efectos prácticos se pueden considerar como de regulación continua. Además son equipos que pueden soportar sobrecargas muy elevadas (intensidad de cortocircuito $> 20 I_n$), limitadas solamente por el posible deterioro del devanado y de las escobillas.

Actualmente se emplean principalmente en equipos trifásicos de más de 500 kVA, incorporando un transformador compensador que reduce la intensidad a manejar por las escobillas.

Hay que tener en cuenta que estos equipos no atenúan los ruidos e impulsos en modo común ni en modo diferencial, ya que no suelen tener aislamiento galvánico, a no ser que dispongan de un transformador adicional.

Debido a las componentes móviles que actúan en su funcionamiento, requieren un mantenimiento adecuado y no deben utilizarse en ambientes sucios y de ninguna manera en ambientes que puedan ser explosivos.

10.12.3. Estabilizadores de tomas

Son equipos que están constituidos por un transformador o autotransformador en el que la toma de salida se selecciona por la actuación de interruptores estáticos, figura 10.17.

Dependiendo de la tensión de entrada y de la carga, el circuito de control selecciona la toma apropiada para asegurar la tensión de salida prevista $\pm 2,5\%$.

Las tomas pueden estar en el secundario o en el primario, presentando ambas soluciones ventajas e inconvenientes. Desde el punto de vista de la protección frente a ruidos, es más aconsejable disponerlas en el secundario.

Su tiempo de respuesta es del orden de 100 ms; pueden aparecer saltos bruscos en la tensión de salida (de unos 10 V para un equipo de 220 V $\pm 2,5\%$), cuando se cambia de una toma a otra.

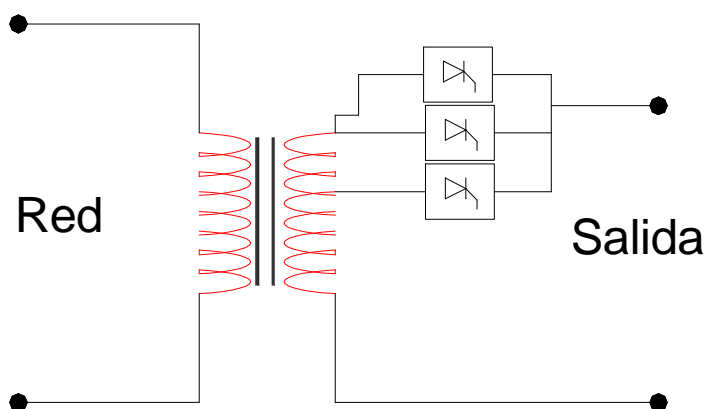


Figura 10.17. Estabilizador de tomas.

Los transitorios que se originan pueden ser perjudiciales para el proceso de fabricación que se desarrolle, debiendo emplear, en su caso, otro tipo de estabilizadores o bien instalar filtros.

Su buena relación calidad - precio los hace recomendables para potencias medias y bajas (0,5 a 150 kVA).

El principal problema de este tipo de equipos es la corriente de cortocircuito que se puede establecer entre los semiconductores, aunque hay soluciones para subsanarlo. Su comportamiento ante sobrecarga es bastante bueno.

Para elevadas potencias se emplea una configuración con transformador compensador, similar a la comentada en reguladores motorizados.

10.13. Transformadores de ultra-aislamiento

Aunque en algunos casos la terminología es confusa, se suelen denominar transformadores de ultra-aislamiento a aquellos cuya misión es aislar las cargas sensibles de las perturbaciones de alta frecuencia presentes en la red eléctrica; por ello suelen tener una relación de transformación unidad.

Aunque suelen disponer de aislamiento reforzado, su objetivo es diferente al de los transformadores de aislamiento eléctrico, que se emplean como elementos de seguridad eléctrica para protección de las personas.

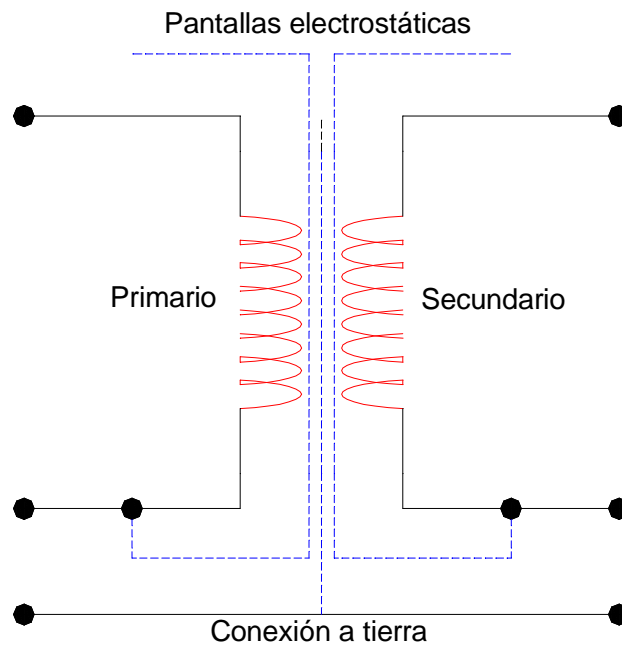


Figura 10.18. Transformador apantallado de ultra-aislamiento.

Las características constructivas que diferencian a los transformadores de ultra-aislamiento de otros tipos de transformadores, es la existencia de pantallas electrostáticas que, en el caso más general, pueden situarse entre el primario y el secundario, rodeando independientemente a cada uno ellos, figura 10.18. El objetivo de estas pantallas es reducir las capacidades parásitas que existen entre los devanados del transformador, y que impiden el paso de señales de alta frecuencia no deseadas. De este modo se incrementa la inmunidad de los equipos, conectados al transformador, frente a perturbaciones de alta frecuencia en modo común y en modo diferencial.

Presentan una amplia gama de potencias, aunque su uso se suele limitar a instalaciones pequeñas o de carácter especial, ya que tienen un coste sustancialmente superior al de los transformadores normales.

En ocasiones forman parte de otros equipos de mitigación, como SAIs o reguladores de tensión. Al ser transformadores, son equipos muy robustos y fiables, con un alto rendimiento.

Como consideraciones, cabe destacar que, aunque aminoran las perturbaciones en modo diferencial, sobre todo si son de muy altas frecuencias, estas se encuentran presentes en el secundario, aunque con menor amplitud.

También, se ha de tener en cuenta que, su correcto funcionamiento depende, en gran medida, de su adecuada conexión a tierra, en el punto conveniente. Se debe evitar una impedancia elevada entre el transformador y el punto de conexión a tierra.