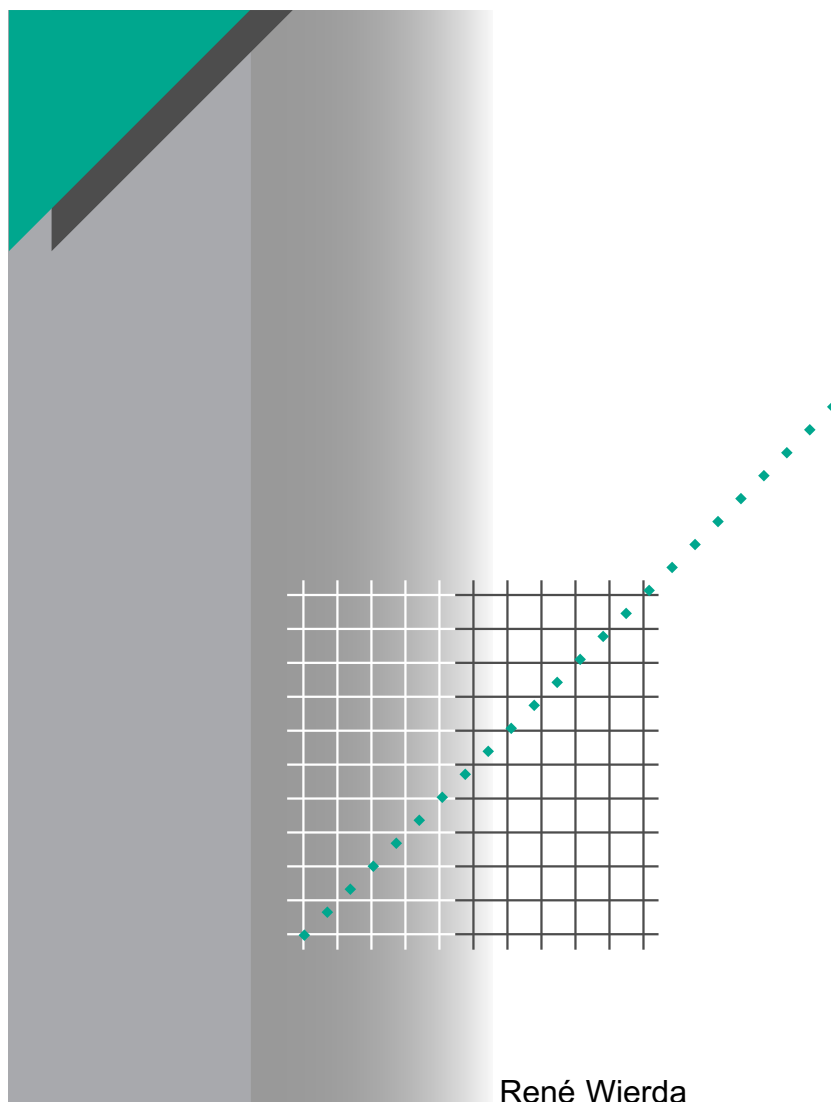


Cuaderno Técnico nº 176

Flicker o parpadeo de las fuentes luminosas



René Wierda

	Merlin Gerin
	Eunea Merlin Gerin
	Modicon
	Telemecanique
	Mesa
	Himel
	Square D

La **Biblioteca Técnica** constituye una colección de títulos que recogen las novedades electrotécnicas y electrónicas. Están destinados a Ingenieros y Técnicos que precisen una información específica o más amplia, que complemente la de los catálogos, guías de producto o noticias técnicas.

Estos documentos ayudan a conocer mejor los fenómenos que se presentan en las instalaciones, los sistemas y equipos eléctricos. Cada uno trata en profundidad un tema concreto del campo de las redes eléctricas, protecciones, control y mando y de los automatismos industriales.

Puede accederse a estas publicaciones en Internet:
<http://www.schneiderelectric.es>

Igualmente pueden solicitarse ejemplares en cualquier delegación comercial de **Schneider Electric España S.A.** o bien dirigirse a:

Centro de Formación Schneider
C/ Miquel i Badia, 8 bajos
08024 Barcelona

Telf. (93) 285 35 80
Fax: (93) 219 64 40
e-mail: formacion@schneiderelectric.es

La colección de **Cuadernos Técnicos** forma parte de la «Biblioteca Técnica» de **Schneider Electric España S.A.**

Advertencia

Los autores declinan toda responsabilidad derivada de la incorrecta utilización de las informaciones y esquemas reproducidos en la presente obra y no serán responsables de eventuales errores u omisiones, ni de las consecuencias de la aplicación de las informaciones o esquemas contenidos en la presente edición.

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria:
«Reproducción del Cuaderno Técnico nº 176 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 176

Flicker o parpadeo de las fuentes luminosas

René Wierda

Diplomado en 1989 como Ingeniero en Tecnología Eléctrica y Conducción de Redes en la Universidad Técnica de Delft en los Países Bajos (Technische Universiteit Delft, afdeling Elektrotechniek) entra en Merlin Gerin en 1989 en el Servicio de Estudios de Redes (Dirección de Investigaciones Generales).

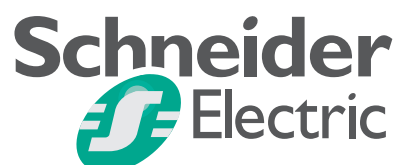
Durante muchos años se encarga especialmente de los estudios de redes de alimentación de hornos de arco. Diseña, en colaboración con el Departamento de Ejecución y Montaje de Schneider Electric, dispositivos de filtrado de Alta Tensión para varias instalaciones industriales.

En este entorno ha profundizado en el conocimiento de las perturbaciones generadas por los procesos industriales de gran potencia.

Trad.: Lluís Miret

Original francés: diciembre 1995

Versión española: septiembre 2001



Flicker o parpadeo de las fuentes luminosas

El flicker se relaciona con variaciones luminosas; es el resultado de pequeñas fluctuaciones de tensión provocadas por el funcionamiento de cargas variables importantes: hornos de arco, equipos de soldadura, motores...

Provoca una fatiga física y psíquica a los usuarios de iluminación conectada cerca de la carga perturbadora.

Este Cuaderno Técnico:

- presenta este fenómeno particular al que a veces se enfrentan los diseñadores o explotadores de redes,
- define las magnitudes que permiten medirlo y los límites que conviene no sobrepasar,
- presenta las soluciones aplicadas, frecuentemente sobre las redes MT, para reducir las fluctuaciones de tensión y por tanto el flicker. En este aspecto complementa el Cuaderno Técnico nº 169 «Diseño de redes industriales en AT».

Índice

1 Definición del flicker		p. 5
2 Las fluctuaciones de tensión en el origen del flicker	2.1 Descripción de las fluctuaciones de tensión en el origen del flicker	p. 7
	2.2 Otros orígenes del flicker	p. 8
	2.3 Los perturbadores	p. 8
3 Inconvenientes del flicker, sensibilidad de las fuentes luminosas		p. 9
4 Definición teórica de la molestia, cuantificación y medida del flicker	4.1 Dosis de flicker, definición de la molestia, medida del flicker	p. 10
	4.2 La curva de «Función de Probabilidad Acumulada» –FPC–	p. 11
	4.3 Los parámetros Pst y Plt	p. 13
	4.4 El flickérmetro	p. 14
	4.5 El ΔV_{10}	p. 15
	4.6 Otras magnitudes de medida	p. 15
5 Límites	5.1 Niveles de compatibilidad de Pst, Plt	p. 16
	5.2 Límites individuales de Pst, Plt	p. 17
	5.3 Límites de ΔV_{10}	p. 17
6 Determinación del flicker en una instalación	6.1 Método cualitativo	p. 18
	6.2 Método que utiliza la «curva de referencia Pst = 1»	p. 18
	6.3 Método analítico	p. 19
	6.4 Método para los hornos de arco	p. 19
	6.5 Método para los equipos de soldadura	p. 20
7 Soluciones	7.1 Elección del sistema de iluminación	p. 21
	7.2 Ondulador	p. 21
	7.3 Modificación del perturbador	p. 21
	7.4 Inclusión de un volante de inercia	p. 22
	7.5 Conversor rotativo	p. 22
	7.6 Modificación de la red	p. 22
	7.7 La capacidad-serie	p. 22
	7.8 La reactancia en serie	p. 24
	7.9 La reactancia shunt saturada	p. 24
	7.10 La reactancia de desacoplamiento	p. 24
	7.11 El compensador asíncrono	p. 24
	7.12 El conversor de fase	p. 25
	7.13 El compensador estático (SVC)	p. 25
	7.14 Síntesis	p. 27
8 Conclusión		p. 28
Anexo 1: Estudio del flicker en la alimentación de un equipo de soldadura		p. 29
Anexo 2: Estudio del flicker en la alimentación de un horno de arco		p. 33
Bibliografía		p. 36

1 Definición del flicker

El flicker o parpadeo de la luz (del inglés: to flicker = parpadear, titilar) se define como «impresión subjetiva de fluctuación de la luminancia» (ver CEI 555-1). Es un fenómeno de origen fisiológico visual que acusan los usuarios de lámparas alimentadas por una fuente común a una iluminación y a una carga perturbadora.

La molestia del parpadeo se pone de manifiesto en las lámparas de BT. Por contra, las cargas perturbadoras pueden encontrarse conectadas a cualquier nivel de tensión.

En el origen de este fenómeno están las fluctuaciones bruscas de la tensión de red. En esta definición del flicker sólo se incluyen las fluctuaciones:

- de amplitud < 10%,
- de período < 1 hora.

Principalmente el flicker es el resultado de fluctuaciones rápidas de pequeña amplitud de la tensión de alimentación, provocadas:

1– por la variación fluctuante de potencia que absorben diversos receptores: hornos de arco, máquinas de soldar, motores, etc.

2– por la puesta en tensión o fuera de tensión, de cargas importantes: arranque de motores, maniobra de baterías de condensadores en escalones, etc.

Especialmente estudiado para las lámparas de incandescencia, el flicker es más o menos importante según el tipo de fuente luminosa. Pueden existir causas distintas a las variaciones de tensión.

Durante 50 años, el flicker ha sido objeto de numerosas publicaciones. Ahora es un fenómeno bien definido (norma CEI 868), analizado, medible, para el cual existen medops de previsión y soluciones.

2 Las fluctuaciones de tensión en el origen del flicker

En todos los países industriales, los distribuidores de energía, así como los explotadores de instalaciones eléctricas, han de respetar unas tolerancias de variaciones de amplitud y de frecuencia en las redes, de lo contrario no estaría garantizado el buen funcionamiento de los equipos. Así, la norma EN 50160 fija estas tolerancias:

- $\pm 10\%$. Esta tolerancia es para las tensiones nominales BT (Baja Tensión: $U_n < 1000 \text{ V}$),
- de $+6\%$ a -10% específicamente para las tensiones BT 230/400 V, en el período 1996 y 2003, (armonización internacional),
- a $\pm 1\%$ de la frecuencia nominal (50 Hz).

Pero existen diversos tipos de variaciones de tensión tales como las fluctuaciones (variaciones cíclicas), los huecos de tensión, los cortes, las sobretensiones, ... (figura 1). El Cuaderno Técnico nº 141 los presenta detalladamente.

En los párrafos siguientes se presentan los dos principales tipos de fluctuación de tensión que provocan flicker y, después, un recordatorio de la relación entre fluctuación de tensión y potencia absorbida.

Al final de este capítulo se abordan otras dos causas de flicker y los distintos tipos de perturbadores.

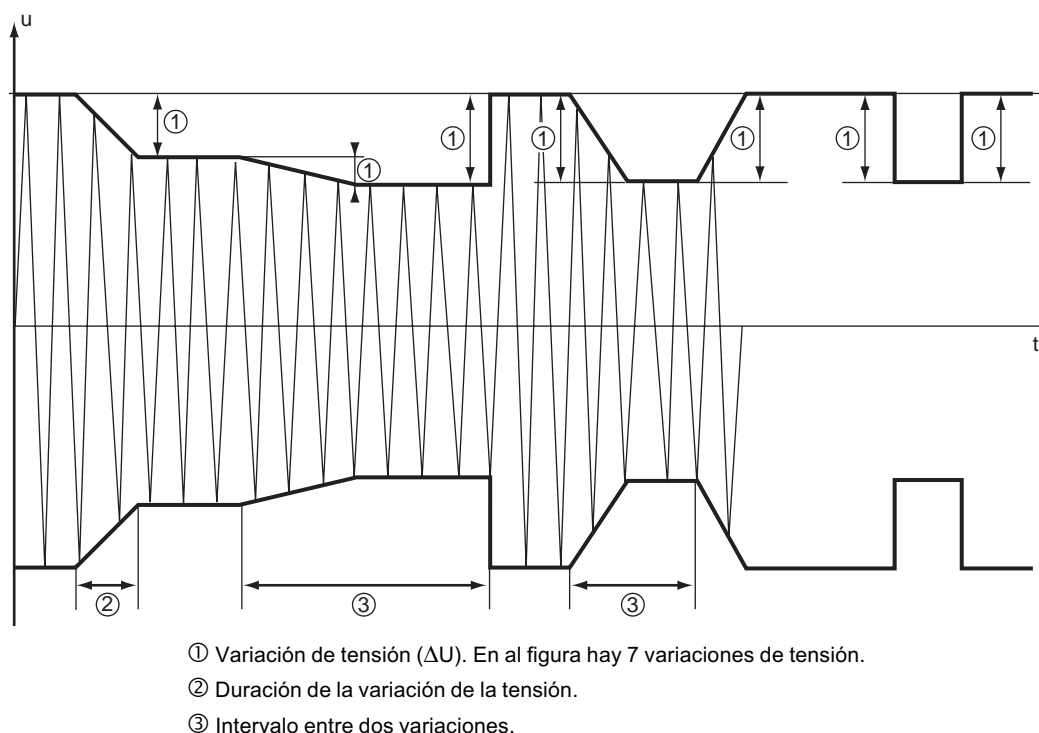


Fig. 1: Definiciones relacionadas con las variaciones de tensión (según la CEI 555-3).

2.1 Descripción de las fluctuaciones de tensión en el origen del flicker

Las variaciones de tensión periódicas y rápidas

Estas variaciones periódicas o erráticas permanentes tienen una descomposición espectral en una banda desde 0,5 Hz a 25 Hz.

Se deben a cargas (o conjunto de cargas) cuya utilización se caracteriza por una constante variación de su demanda de potencia (por ejemplo: hornos de arco, equipos de soldadura, ...).

Las variaciones bruscas de tensión

Se trata de variaciones bruscas de tensión que se producen de manera sistemática y o errática (intervalos entre variaciones superiores a algunos segundos).

Estas variaciones se deben a puestas en marcha de cargas importantes (por ejemplo: arranque de motores, maniobra de batería de compensación, ...).

Explicación matemática del origen del flicker

Las fuentes de estas fluctuaciones son equipos eléctricos cuyo funcionamiento necesita importantes variaciones cíclicas de intensidad. Éstas, al recorrer la impedancia de la red (R, X), provocan variaciones de tensión ΔU (figura 2)

Se define:

U = tensión nominal de la red (de funcionamiento),

E = tensión en vacío de la red,

ΔU = caída de tensión ($= E - U$),

P = potencia activa de la carga bajo la tensión nominal U,

Q = potencia reactiva de la carga bajo la tensión nominal U,

$\cos \varphi$ = factor de potencia de la carga,

I = corriente nominal de la carga,

S_{cc} = potencia de cortocircuito de la red aguas arriba,

R = resistencia total de la red aguas arriba,

X = reactancia de la red aguas arriba.

Si se considera que el ángulo entre E y U es pequeño:

$$\Delta U = E - U \approx R.I \cos \varphi + X.I \sin \varphi,$$

se puede escribir:

$$P = U.I \cos \varphi \text{ y } Q = U.I \sin \varphi$$

de donde resulta:

$$\Delta U = \frac{R.P + X.Q}{U}$$

y en valor relativo:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{R.P + X.Q}{U^2}$$

Notas:

1- en AT, la resistencia R es despreciable frente a la impedancia X, y la ecuación se transforma:

$$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{X.Q}{U^2} = \frac{Q}{S_{cc}}$$

es decir: la variación de la potencia reactiva es preponderante y se ha de controlar.

2- En BT, R no es despreciable, de modo que hay que actuar sobre la potencia activa P y la potencia reactiva Q.

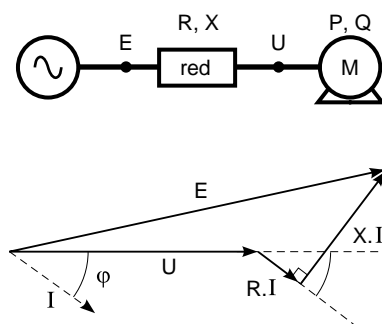


Fig. 2: Las variaciones de tensión, origen del flicker, se deben a variaciones de intensidad I que recorren la impedancia de la red.

2.2 Otros orígenes del flicker

Mal funcionamiento del sistema de iluminación

Una fluctuación del flujo luminoso puede ser también debida a un mal funcionamiento del sistema de iluminación. ¡Esta es la primera hipótesis a comprobar en caso de problema!

Por ejemplo: las lámparas fluorescentes incorporan un balastro.

- los tubos con balastro ferromagnético tradicional, además del parpadeo que se observa al final de su vida, pueden generar flicker cuando están asociados a un regulador. En efecto la ionización del gas no se asegura cuando el mando de ángulo de fase amputa una parte de la senoide,

- los tubos con balastro electrónico son generalmente insensibles a las variaciones de su tensión de alimentación. Existen balastros

que pueden utilizar reguladores con mando por ángulo de fase, en este caso se han podido observar parpadeos en presencia de armónicos o corrientes portadoras (detección insegura del paso por cero de la tensión).

Flicker provocado por los subarmónicos y los interarmónicos

Se ha demostrado y constatado que, en ciertas condiciones, la presencia de interarmónicos en la tensión de alimentación también es una fuente del flicker [1]. En particular, las lámparas de incandescencia son sensibles en la banda de frecuencias comprendidas entre 20 Hz y 80 Hz, mientras que los fluorescentes lo son a frecuencias superiores a 100 Hz. Las lámparas de balastro inductivo parecen más sensibles a este fenómeno que las que llevan balastro capacitivo.

2.3 Los perturbadores

El horno de arco

El horno de arco es el principal generador de flicker. Su normal funcionamiento provoca unas fluctuaciones de tensión, que se sienten tanto más cuanto más elevada es la potencia de los hornos, en particular en relación a la potencia de cortocircuito de la red: habitualmente su valor es del orden de decenas de MVA.

Máquinas con cargas fluctuantes

Los motores potentes, o grupos de motores, con arranques y paros frecuentes, o con carga variable, (como los de los trenes de laminación), así como las máquinas con par resistente alterno (compresores), pueden producir flicker.

Reguladores de potencia con tiristores

Para huir de los inconvenientes del «mando por ángulo de fase» (armónicos y parásitos en alta frecuencia), los reguladores con tiristores (a veces llamados también «convertidores») funcionan en «mando sincopado» cuando su carga lo permite.

Los tiristores de mando sincopado se encienden durante periodos enteros (regulación por tren de ondas enteras), pero los tiempos de conducción son muy breves, repetidos a frecuencias de algunos Hz. Por tanto son generadores de flicker. Por ejemplo, para evitar este fenómeno en el campo del calentamiento eléctrico, las normas imponen a los constructores unos sistemas de regulación tales que la potencia no se conmute más de una vez en 20 segundos.

Los equipos de soldadura

Los soldadores de arco de potencia relativamente débil no son muy molestos (salvo utilización intensiva en casa de un abonado en BT). Por contra los ciclos repetitivos de soldadores por resistencia, a frecuencias comprendidas entre 0,1 y 1 Hz, están en el origen de perturbaciones en forma de oscilaciones bruscas de tensión.

3 Inconvenientes del flicker, sensibilidad de las fuentes luminosas

Las fluctuaciones de tensión no afectan en general al buen funcionamiento de los aparatos conectados, mientras la alteración sea inferior a los límites contractuales de variación de tensión de alimentación (ver capítulo precedente). Sin embargo, estas fluctuaciones pueden afectar al flujo luminoso según los distintos tipos de iluminación. La tabla de la **figura 3** presenta las principales características de las distintas fuentes luminosas y sus comportamientos según la tensión.

Como resumen, se puede escribir que todas las fuentes luminosas son sensibles a las variaciones de tensión. En orden decreciente de sensibilidad:

- las lámparas de vapor de mercurio o de sodio, pero iluminan lugares donde el parpadeo es poco molesto (espacios exteriores, monumentos, carreteras, etcétera),
- las lámparas de incandescencia,
- las lámparas fluorescentes.

Los receptores de televisión así como las pantallas de los sistemas informáticos tienen una cierta sensibilidad al flicker. Esta sensibilidad es muy variable según los aparatos. No disponemos de un estudio preciso al respecto.

fuentes luminosas	fluorescencia	incandescencia	vapor de sodio a baja presión	vapor de sodio a alta presión	vapor de mercurio a alta presión
tipo de lámparas	rectilínea, circular, de un solo casquillo, compacta, miniatura o de sustitución	éstandard, fantasía, halógena BT o MTB		con distintos casquillos	ampolla fluorescente, luz mixta con yoduros metálicos, con distintos casquillos
potencia eléctrica (W)	de 45 a 65	de 5 a 2000	de 18 a 180	de 35 a 1000	de 35 a 3500
Eficacia luminosa (lm.W ⁻¹)	de 35 a 104	de 8 a 25	de 100 a 200	de 37 a 150	de 11 a 120
comportamiento al ponerla en tensión	después del cebado se obtiene el flujo luminoso completo. Una corriente de precalentamiento de algunos segundos puede alcanzar 2 I _n	el flujo luminoso es inmediato. La sobreintensidad puede alcanzar 14 I _n	hay una espera de entre 5 y 10 minutos desde que se pone en tensión hasta que se obtiene el flujo luminoso completo. No hay una sobreintensidad notable	hay una espera de entre 5 y 7 minutos desde que se pone en tensión hasta que se obtiene el flujo luminoso completo. La sobreintensidad puede alcanzar 1,2 ó 1,3 I _n	hay una espera de entre 1 y 4 minutos desde que se pone en tensión hasta que se obtiene el flujo luminoso completo. La sobreintensidad puede alcanzar 1,5 ó 1,7 I _n
comportamiento frente a fluctuaciones de la tensión de alimentación	sólo se perturba con fluctuaciones 2 ó 3 veces más fuertes que las que afectan a las lámparas de incandescencia. Esto es debido a la remanencia del depósito fluorescente	especialmente sensibles a las pequeñas variaciones de tensión repetidas. Esto se debe a la pequeña constante térmica de los filamentos	muy sensible, puesto que su inercia térmica es la del plasma de la descarga luminosa	ídem que la lámpara de vapor de sodio a baja presión	ídem que la lámpara de vapor de sodio a baja presión

Fig. 3: Principales características y comportamiento frente a las variaciones de tensión de distintas fuentes luminosas.

4 Definición teórica de la molestia, cuantificación y medida del flicker

La cuantificación y la medida del fenómeno del flicker resultan bastante complejas, puesto que al mismo tiempo hacen intervenir factores técnicos, fisiológicos y psicológicos. ¿Cómo cuantificar y medir la sensación de molestia experimentada por el hombre? Se han llevado a cabo muchos estudios profundos sobre el análisis y la cuantificación del flicker en diversos países [2].

En este capítulo se presentan, en orden cronológico, las distintas etapas que han permitido que ahora el flicker sea un fenómeno bien definido, cuantificado y medible:

- análisis experimental de la molestia notada por el hombre sometido a un flicker debido a fluctuaciones de tensión,

- cuantificación del flicker y definición de unidades de medida: flicker instantáneo, dosis de flicker,

- realización de un aparato de medida: el flickérmetro, y

- elaboración de un análisis de medida estadística,

- introducción de los parámetros que definen la molestia por flicker: Pst (a corto plazo) y Plt (a largo plazo).

Estas magnitudes son las que se utilizan actualmente. Otro parámetro, el ΔV_{10} , se utiliza habitualmente en Japón y en otros países.

4.1 Dosis de flicker, definición de la molestia, medida del flicker

La «Dosis de flicker», primer parámetro de cuantificación del flicker, utilizado Francia, se ha establecido a partir de experimentaciones:

- la sensación de molestia es función del cuadrado de la amplitud de la fluctuación de la tensión y de la duración de ésta,

- la sensibilidad del observador medio a las fluctuaciones de iluminación es máxima alrededor de 10 Hz (8,8 Hz),

- el límite mínimo de percepción para esta frecuencia de 8,8 Hz (= 0,25%) es el límite mínimo de molestia (= 0,5%) (**figura 4**),

- se han obtenido dos pautas:

- la molestia percibida para una fluctuación de la tensión a una frecuencia f (distinta de 8,8 Hz) con una amplitud a_f , es igual a la molestia percibida por una fluctuación de la tensión a 8,8 Hz con una amplitud equivalente $a_{8,8} = g_f \cdot a_f$. El coeficiente (g_f), sólo depende de la frecuencia de esta fluctuación de tensión inicial ($g_f \leq 1$; $g_{8,8} = 1$). Por tanto, cualquier fluctuación de tensión puede expresarse en una fluctuación de tensión equivalente a 8,8 Hz,

- una superposición de varias fluctuaciones de tensión a frecuencias f_i y amplitudes a_i distintas, equivale a una fluctuación de amplitud $a_{8,8}$ equivalente a 8,8 Hz y dada por:

$$a_{8,8}(t) = \sqrt{\sum_i a_{8,8i}^2(t)} = \sqrt{\sum_i a_i^2(t) \cdot g_{fi}^2}$$

El parámetro $a_{8,8}(t)$ es una función del tiempo que se llama: **flicker instantáneo**.

- se ha observado, que para una fluctuación de tensión, frecuencia, amplitud y duración determinada, se experimenta la misma sensación de molestia que para una fluctuación de tensión de la misma frecuencia, de amplitud doble, pero de duración cuatro veces más corta.

Estos resultados permiten definir un parámetro de cuantificación de la molestia –G– percibida sobre un período de observación determinado (normalmente 1 minuto) según la ecuación:

$$G = \int_{t_0}^{t_0+T} a_{8,8}(t)^2 \cdot dt$$

Se llama **Dosis de flicker** y se expresa en %².mn (por ciento al cuadrado minuto).

La «Dosis de flicker» proporciona una valoración de la cantidad de molestia a lo largo de una duración determinada. Este parámetro es muy fluctuante para una carga perturbadora con ciclo de funcionamiento más largo que el período de integración. Expresa mal la molestia total

percibida. Para poder analizar tanto fluctuaciones de tensión periódicas como cambios bruscos de tensión, se ha desarrollado un método de análisis estadístico.

Nota:

1– La definición de la dosis de flicker se basa en experimentos realizados con una lámpara de incandescencia de 60 W, 50 Hz, 220 V.

2– En Francia ya no se acostumbra a usar la Dosis de flicker. Para expresar la severidad del flicker ahora se usan otras magnitudes: (Pst - Plt).

La severidad del flicker se valoraba comparándola entre la dosis de flicker medida y la curva límite de dosis de flicker [2].

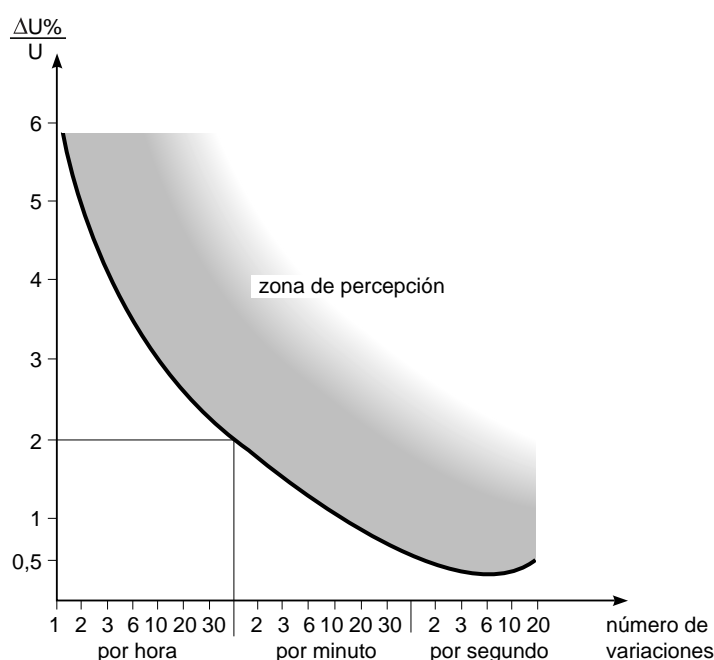


Fig. 4: Límite de sensibilidad del ojo a las variaciones de iluminación causadas por fluctuaciones de tensión, en lámparas de incandescencia.

4.2 La curva de «Función de Probabilidad Acumulada» –FPC–

Esta curva se establece a partir de los valores de flicker instantáneo, o sea $a_{8,8^2}(t)$, que también se puede considerar como el valor «diferencial instantáneo de la dosis de flicker». Se muestrea el flicker instantáneo $a_{8,8^2}(t)$, función del tiempo. Estas medidas muestreadas se agrupan en clases según su valor (**figura 5**). Esto permite trazar la función de densidad de probabilidad y la «Función de Probabilidad

Acumulada» (**figura 6**). En el ejemplo, para simplificar el trazado, se ha limitado el número de clases a 10. Sobre esta curva se leen 5 valores: $P_{0,1}$, P_1 , P_3 , P_{10} y P_{50} . Estos valores expresan los valores de flicker instantáneo sobrepasados durante, respectivamente, 0,1%, 1%, 3%, 10% y 50% del período de observación, que normalmente es de 10 minutos. Los valores P_1 a P_{50} son valores alisados (norma CEI 868-0).

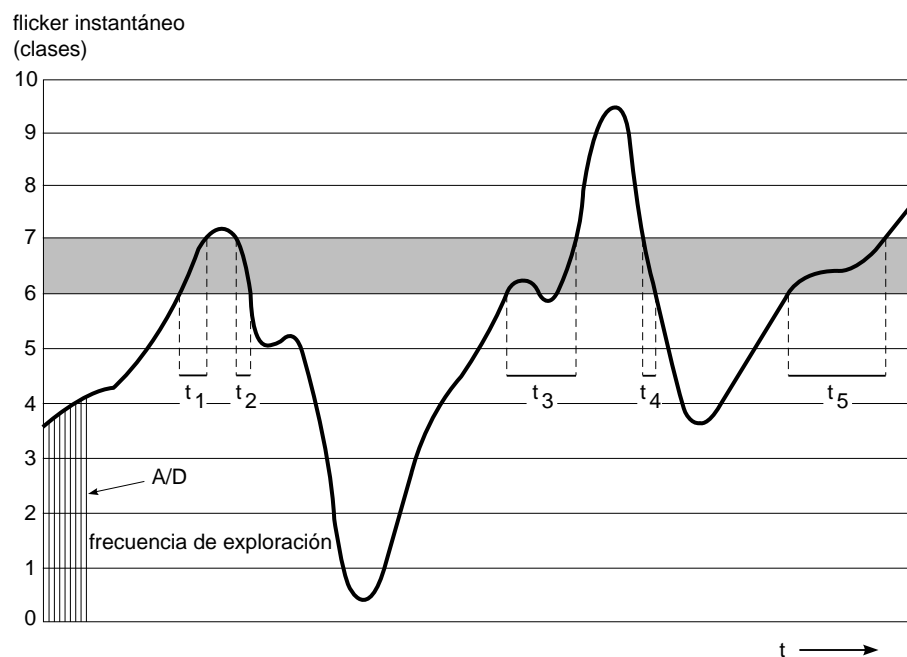


Fig. 5: Representación esquemática de un muestreo del flicker instantáneo. Se muestra el nivel de flicker en función del tiempo, para un número de clases limitado a diez (según CEI 868).

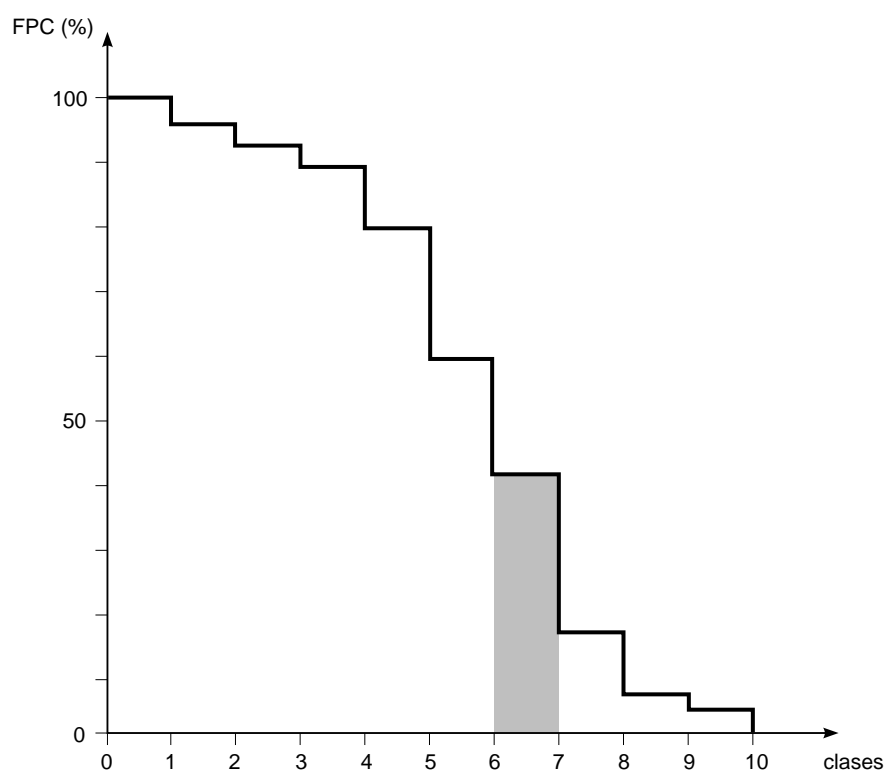


Fig. 6: Curva de la Función de Probabilidad Acumulada de la presencia de señal en una de las clases. El número de clases se ha limitado aquí a diez (según CEI 868).

4.3 Los parámetros Pst y Plt

La evaluación final de la severidad del flicker según la CEI 868 se expresa por dos parámetros: el Pst (corta duración) y el Plt (larga duración).

Pst y Plt son las «unidades de medida» del flicker; magnitudes sin dimensiones físicas, aquí se les denomina «parámetros».

Mientras que el Pst se determina con un algoritmo multipunto utilizando los 5 puntos $P_{0,1}$, P_1 , P_3 , P_{10} y P_{50} leídos sobre la FPC, el Plt se calcula a partir de varios valores de Pst.

Así, el Pst se calcula sobre un período de 10 minutos, y el Plt se calcula para 12 valores de Pst en un período de 2 horas [5], [6], [7]. Estos parámetros valoran las distintas formas de FPC.

Este método de cuantificación del flicker tiene la ventaja de ser «universal»: independiente del tipo de fluctuación (periódica, súbita, senoidal, con otras formas, etc.) y por tanto independiente del tipo de perturbación.

Estos parámetros se calculan y se guardan a lo largo de todas las mediciones.

Por ejemplo, para un cálculo de Pst en 10 minutos y con 2 horas para el Plt: después de un día de mediciones se dispone de 144 valores de Pst.

Definición del Pst:

El Pst se define por la ecuación:

$$Pst = [K_{0,1} \cdot P_{0,1} + K_1 \cdot P_1 + K_3 \cdot P_3 + K_{10} \cdot P_{10} + K_{50} \cdot P_{50}]^{1/2}$$

con:

P_n = niveles en la curva FPC que tienen una probabilidad n% de que sean superados,

K_n = coeficientes de ponderación dados por la norma y que permiten que la curva límite de la CEI (figura 7) se corresponda con un

Pst = constante = 1 (la curva CEI se determinó experimentalmente mucho antes de la definición del Pst). Así, el Pst representa la curva CEI.

La severidad de corta duración de un flicker, definida por la norma CEI 868-0, queda pues expresada por la ecuación:

$$Pst = [0,0314 \cdot P_{0,1} + 0,0525 \cdot P_1 + 0,0657 \cdot P_3 + 0,28 \cdot P_{10} + 0,08 \cdot P_{50}]^{1/2}$$

con:

$P_{0,1}$ = nivel superado solamente durante el 0,1% del período de observación,

P_1 = nivel superado solamente durante el 1% del período de observación,....

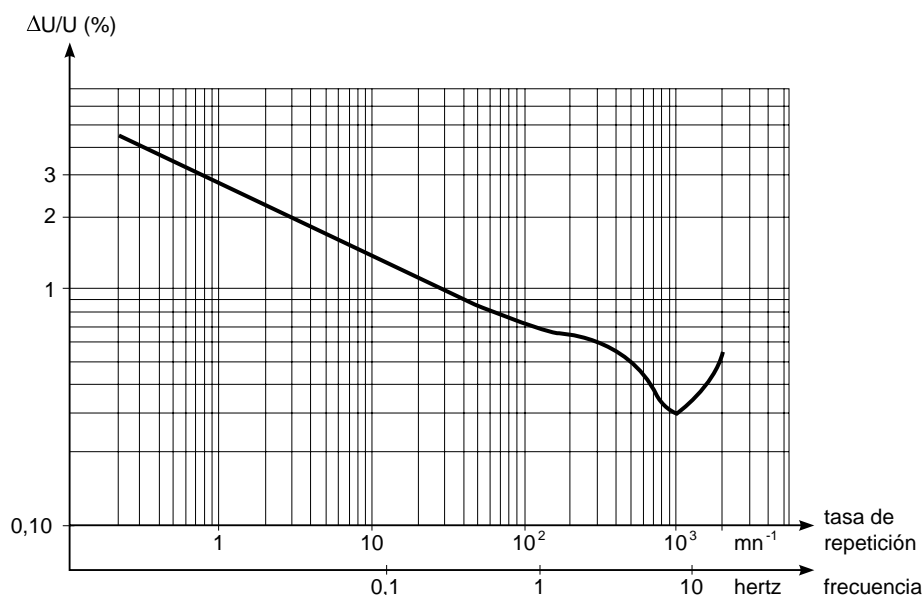


Fig. 7: Curva límite de la molestia del flicker. Indica la amplitud de las fluctuaciones de tensión, en función de su frecuencia de repetición, para una severidad del flicker $Pst = 1$ (según CEI 868). Obsérvese que la frecuencia corresponde a dos fluctuaciones.

NOTA DEL TRADUCTOR: Para que el ciclo se repita, hacen falta dos fluctuaciones (una de descenso y otra de ascenso).

Definición del Plt:

La severidad de un flicker de larga duración Plt se deduce de los Pst por la fórmula:

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N Pst_i^3}{N}}$$

Donde Pst_i (i=1,2,3, ...) son los valores consecutivos obtenidos de Pst.

El Plt se ha de calcular a partir de los valores Pst en una duración adecuada según el ciclo de funcionamiento de la carga, o en un período durante el cual un observador pueda ser

sensible al flicker, por ejemplo algunas horas (normalmente 2 horas).

El orden de magnitud del **límite tolerable** es Plt = 0,74.

Cuando hay distintos elementos polucionantes conectados a una misma red, el parámetro Pst global encontrado en un punto dado se calcula según la regla de suma siguiente:

$$Pst = \sqrt[m]{\sum_i (Pst_i^m)}$$

Habitualmente m = 3, pero pueden utilizarse otros valores.

4.4 El flickérmetro

Las fluctuaciones de tensión como las anteriormente descritas se pueden analizar con un aparato de medida: el flickérmetro de la UIE (Unión Internacional de Electrotermia)

La norma CEI 868 describe las especificaciones funcionales de este aparato (**figura 8**) que son las siguientes:

- adaptación de la tensión de entrada (bloque 1),
- simulación de la respuesta lámpara - ojo - cerebro o cálculo del flicker instantáneo (tensión a la salida del bloque 4),

- cálculo de la Dosis de flicker (salida 4),
- opcionalmente, valoración estadística del nivel de flicker; cálculo del FPC, Pst y Plt (bloque 5).

Un primer flickérmetro numérico totalmente estático lo realizó P. Duveau de la EDF en 1971. [8]. Los flickérmetros actuales proporcionan un gran número de parámetros distintos de medidas o de análisis: valor eficaz de la señal, sensación de flicker instantáneo, dosis de flicker por minutos, FPC, análisis estadístico, cálculos de los valores Pst y Plt, etc. (**Figura 9**).

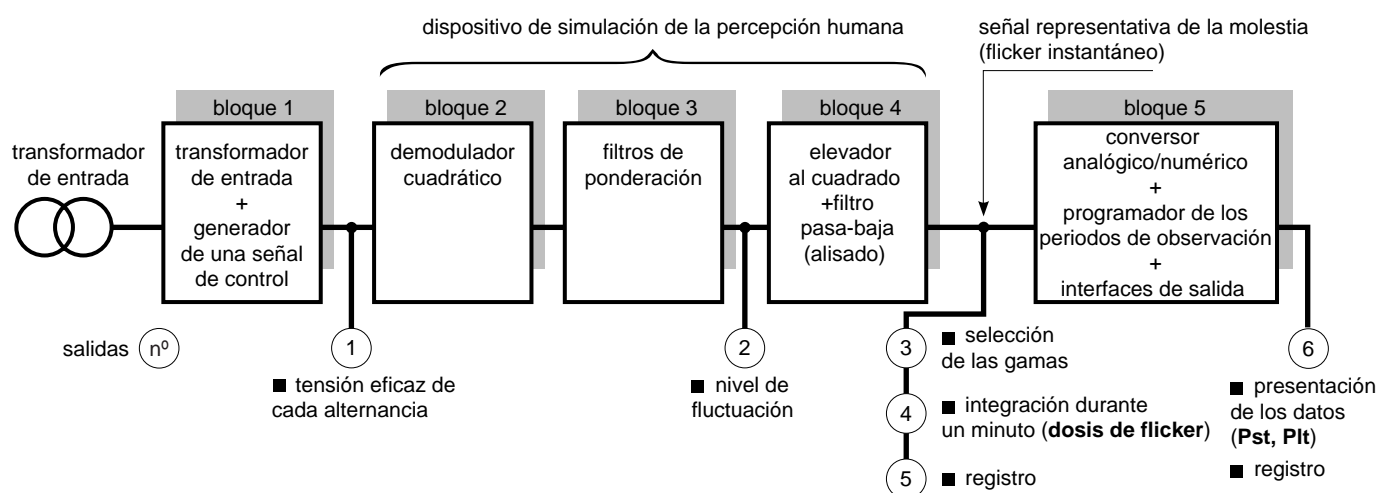


Fig. 8: Diagrama funcional del flickérmetro UIE (según CEI 868).

Duración de la medición	una semana	
Periodo de análisis	un día	
Datos disponibles después de las mediciones con un flickérmetro:		
periodo	magnitud	expresión simbólica
Instantáneo	flicker instantáneo	$a_{8,8}(t)$
Cada minuto	dosis de flicker (en % ² .mn/mn)	$G = \int_{t_0}^{t_0+1} a_{8,8}(t)^2 .dt$
Cada 10 minutos	parámetro de corta duración	Pst
Cada 2 horas	parámetro de larga duración	Plt
Cada día	máximo valor del día de Pst	Pst _{máx}
	tercer valor mayor del día de Pst	Pst _{3máx}
	valor máximo del día de Plt	Plt _{máx}
	otros parámetros estadísticos calculados	
Al final de la semana	valor máximo de los 7 Plt _{máx} del día (Plt _{máx} = el mayor valor de todos los Plt medidos)	
	valor máximo de los 7 Plt _{3máx} diarios (Pst _{3máx} = tercer valor más grande de los Pst)	
	otros parámetros estadísticos calculados	

Fig. 9: Ejemplo de análisis de flicker con un flickérmetro.

4.5 El ΔV10

El parámetro ΔV10 se basa en la utilización de lámparas a 110 V. Se utiliza mucho en países del Lejano Oriente, especialmente en Japón.

El ΔV10 es el valor de la amplitud de una fluctuación de tensión equivalente a una frecuencia de 10 Hz que produce la misma sensación de molestia que la fluctuación real. Se expresa como porcentaje de la tensión nominal.

Para una fluctuación de tensión idéntica, el flicker producido por las lámparas alimentadas a 110 V es ligeramente inferior al producido por las lámparas comparables alimentadas a 220 V.

En efecto, una lámpara de igual potencia necesita una corriente más elevada, lo que requiere un filamento más grueso, de donde resultará una mayor inercia térmica frente a las variaciones [7] (ver el ejemplo en el Anexo 2).

La relación ΔV10/Pst es de aproximadamente 1/3. Esta relación depende mucho de los tipos de perturbador y de las hipótesis de cálculo. Para los flickers debidos a los hornos de arco de corriente continua, esta relación varía entre 1/3,3 y 1/4,4 [9].

4.6 Otras magnitudes de medida

En los últimos años, la CEI ha hecho grandes esfuerzos para estandarizar la medida y la evaluación del flicker que se obtiene con la utilización de los parámetros Pst y Plt; pero existen otros parámetros de flicker además de los mencionados arriba. Sea porque provienen de

reglamentaciones específicas (por ejemplo en los Estados Unidos) sea porque se utilizaban antes (por ejemplo el «FGH-meter» en Alemania, o el «Gauge point» en Gran Bretaña, o la «Dose de flicker» en Francia).

5 Límites

Cada distribuidor de energía eléctrica vela por la calidad de la electricidad que suministra. Para cada tipo de perturbación, exigirá unos límites a la perturbación aportada por cada uno de sus clientes a fin de asegurar un buen

funcionamiento de toda su red. Los textos 1000-3-3, 1000-3-5 de la CEI fijarán los límites respecto al flicker; la norma EN 50 160 del CENELEC y la CEI 1000-2-2 fijan unos límites de compatibilidad.

5.1 Niveles de compatibilidad de Pst, Plt

La calidad de la electricidad frente al flicker se expresa según las dos magnitudes: Pst y Plt. A cada uno de estos parámetros y a los tres niveles de tensión BT, MT y AT se les asigna un nivel de compatibilidad, o límite teórico tolerable (Figura 10) [11]. Estos valores expresan los niveles que no hay que sobrepasar en una red para evitar un flicker molesto.

Observaciones:

- 1– Estos valores no son los límites aceptables de flicker de un único perturbador o de una única fábrica.
- 2– Estos valores son niveles de compatibilidad teórica y están destinados a servir como valores de referencia en caso de molestia probada y con una finalidad de planificación, pero un distribuidor siempre puede imponer otros límites a sus clientes.

En BT, estos valores de **límites aceptables** tienen un significado físico. Están basados en unas sensaciones de molestia real: El valor $Pst = 1$ corresponde a un umbral de molestia experimentada por un observador medio. El límite para la severidad de larga duración Plt es, lógicamente, más bajo, para tener en cuenta el efecto acumulativo de la molestia. Por el contrario, en MT y AT los valores **límites de compatibilidad** no tienen un significado directo. No hay una iluminación conectada a estos niveles de tensión y, por tanto, no se puede experimentar ninguna sensación de molestia. Estos umbrales tienen que ser compatibles con los de BT.

En teoría, se considera que la relación de transmisión de la tasa de flicker de un nivel superior de tensión hacia un nivel inferior es igual a 1. Todo flicker presente en MT o AT se transfiere al nivel BT.

En la práctica, el flicker se atenúa a menudo por el efecto estabilizador de la tensión debido a los motores y generadores conectados a todos los niveles de tensión aguas abajo de la red AT considerada. El factor de atenuación varía entre 0,5 y 0,8, según la potencia de los motores y de los generadores instalados.

Algunas veces, como consecuencia de esta atenuación de flicker, se acepta una tasa de $Pst > 1$ en MT (ejemplo encontrado: $Pst = 1,25$).

La norma europea EN 50 160 sólo indica límites de Plt. Es menos severa que la tabla adjunta e impone a los distribuidores el suministro, en condiciones de funcionamiento normales de su red ($Un < 35$ kV), de una tensión con un $Plt < 1$ durante el 95% de la semana.

	límites aceptables de flicker	niveles de compatibilidad para planificación	
	BT	MT	AT
Pst	1,00	1,00	0,79
Plt	0,74	0,74	0,58

Fig. 10: Límites aceptables y niveles de compatibilidad teórica de Pst y Plt para distintos niveles de tensión... según publicación de la UIE [11].

5.2 Límites individuales de Pst, Plt

Cuando un industrial pide conectar una carga perturbadora en la red, el distribuidor vela para que no se sobrepasen los umbrales de compatibilidad cuando todos los perturbadores conectados a la red estén en servicio. Para ello el distribuidor fija, para cada instalación perturbadora conectada a la red, unos niveles de fluctuación de tensión correspondientes a un flicker aceptable.

Las características que se tienen en cuenta en estos casos son:

- la potencia del perturbador,
- la potencia de cortocircuito en el punto de conexión,
- la presencia de otros perturbadores,
- el número de usuarios que pueden ser molestados,
- un funcionamiento temporal o permanente de la fuente de fluctuaciones,
- la evolución futura de la red.

Una opción sencilla puede ser aceptar que cada perturbador aporte un nivel de molestia proporcional a la potencia determinada en el contrato de suministro entre el distribuidor y el industrial. Sin embargo, a fin de evitar límites demasiado severos a los pequeños usuarios, se han definido unos niveles de emisión individuales aceptables para cualquier nivel de tensión (figura 11) [11].

Entonces el distribuidor se encarga de que la suma de las perturbaciones aportadas por cada

cliente no sobrepase los umbrales de compatibilidad. Los umbrales individuales se han de respetar a fin de evitar quejas.

Sin embargo, a menudo se acepta sobrepasar ocasionalmente el umbral de Pst.

Si se imponen límites de Pst y Plt se necesitan controles. Hay que definir una duración de las medidas y, si los valores límites pueden sobrepasarse ocasionalmente, establecer sus criterios. El CIGRE y el CIRED proponen el siguiente método de diagnóstico:

- duración de las medidas: 1 semana,
- valor de Pst: calculado cada 10 mn,
- valor de Plt: calculado cada 2 horas,
- el valor criterio para Pst es el mayor de los 7 valores diarios del $Pst_{3m\acute{a}x}$ ($Pst_{3m\acute{a}x}$ = tercer valor mayor de Pst),
- el valor criterio para Plt es el mayor de los 7 valores diarios del $Plt_{m\acute{a}x}$ ($Plt_{m\acute{a}x}$ = valor mayor de Plt medido).

niveles individuales aceptables	
Pst	0,35
Plt	0,25

Fig. 11: Niveles de emisión de flicker individuales aceptables, válidos en AT, MT y BT.

5.3 Límites de ΔV10

El valor eficaz del ΔV10, medido durante 1 minuto se define como ΔV10s (short time = corta duración), con los siguientes límites:

- umbral de percepción:

$\Delta V_{10s} = 0,32\%$,

- umbral de molestia:

$\Delta V_{10s} = 0,45\%$

(= 1 p.u. ΔV10).

El cuarto valor mayor de ΔV10 se compara con el límite a corto plazo exigido.

La media de los resultados de una hora se compara con el límite a largo plazo exigido [7].

6 Determinación del flicker en una instalación

Antes de instalar un aparato generador de fluctuaciones de tensión en una red, hay que conocer la tasa de flicker que aporta a la red. Esta tasa de flicker depende a la vez de las características del aparato y de las de la red a la cual está conectado.

La determinación previa del flicker se realiza mediante un análisis teórico de la red y del perturbador, y permite la estimación de la tasa de flicker.

Este capítulo presenta algunas reglas y métodos prácticos para evaluar el nivel de flicker emitido por un aparato perturbador. El análisis del flicker se realiza en el Punto Común de Conexión (PCC), o punto de la instalación común al perturbador y al alumbrado. En el caso de los perturbadores potentes, suele ser el punto de conexión de la red de la fábrica con la del distribuidor.

6.1 Método cualitativo

La primera y más sencilla determinación previa de flicker se realiza analizando la relación entre la potencia de la carga perturbadora y la potencia de cortocircuito de la red.

- como norma general, el flicker no provoca ninguna molestia si la potencia aparente del conjunto de las cargas perturbadoras es inferior al 1% de la potencia de cortocircuito de la red en el punto común de conexión,
- entre el 1 y el 2% hay una zona de incertidumbre donde la molestia admisible depende en gran parte del tipo de carga, de la proximidad a las redes de alumbrado, etc.,

- por encima del 2% hay que tomar medidas para reducir el flicker al nivel admisible.

En la zona de incertidumbre y más arriba, es necesario conocer la tasa de flicker de la carga a instalar a fin de evaluar la necesidad de reducción del flicker. Se han propuesto varios métodos aproximados basados principalmente en la extrapolación de medidas de flicker tomadas de instalaciones semejantes o basados en un método analítico que calcula el parámetro Pst de una instalación a partir de las características de la variación de tensión.

6.2 Método que utiliza la «curva de referencia Pst = 1»

Este método está basado en el principio de que el nivel de flicker es proporcional a la amplitud de la variación de tensión. La curva límite de severidad del flicker de la CEI 868 (**figura 7**) da la amplitud límite de la fluctuación de la tensión en función de la frecuencia de dicha fluctuación. Esta curva corresponde pues a $P_{st} = 1$.

Ejemplo:

Un perturbador crea un escalón de tensión con una amplitud del 0,9% con una frecuencia de repetición de 10 veces por minuto. Sobre la

curva de referencia, el escalón de tensión máximo que da una molestia aceptable debida al flicker, leído sobre la curva de referencia, es $\Delta U_{Lim} = 1,35\%$.

La fluctuación de $\Delta U = 0,9\%$ genera un nivel de flicker de:

$$P_{st} = 1 \times (0,9/1,35) = 0,67.$$

Para comprender mejor el procedimiento en la práctica, se muestra un ejemplo en el Anexo 1: Instalación de un equipo de soldadura.

6.3 Método analítico

Este método [11] puede utilizarse de manera general para perturbaciones repetitivas. Como punto principal, incluye un coeficiente que depende de la forma de la variación de tensión. El Pst puede estimarse según la fórmula:

$$Pst = 0,365 \cdot \Delta \cdot F \cdot r^{0,31} \cdot R$$

con:

Δ = variación relativa de la tensión en %
(figura 1),

r = tasa repetición de la variación de tensión (mn^{-1}),

R = coeficiente dependiente de la tasa de repetición ($R \approx 1$ para $r \leq 1000$ y disminuye muchísimo para $r > 1000$),

F = factor de equivalencia, dependiente de la forma de la fluctuación de la tensión ($F \approx 1$ para las fluctuaciones bruscas: escalones u ondas cuadradas, y $0,9 < F < 1$ para fluctuaciones suaves: sinusoides, rampas...).

Ejemplo:

Con los datos del ejemplo anterior ($\Delta = 0,9\%$; $r = 10 / mn$; $R \approx 1,05$; $F \approx 0,98$):

$$Pst = 0,365 \times 0,9 \times 0,98 \times 10^{0,31} \times 1,05 = 0,69.$$

6.4 Método para los hornos de arco

Se proponen dos métodos para la estimación del flicker:

- el primero se basa en la «dosis de flicker» antiguamente utilizada en Francia [3] [4] [12],
- el segundo método calcula el valor de Pst.

Dosis de flicker:

La dosis de flicker generada por un horno de arco de corriente alterna (esquema eléctrico equivalente dado en la figura 12) se obtiene por la ecuación:

$$G = k^2 \cdot \left(\frac{X_n}{X_n + X_f} \right)^2 \cdot t$$

con:

X_n = la reactancia de cortocircuito aguas arriba de la red de alimentación, vista desde el Punto Común de Conexión (PCC),

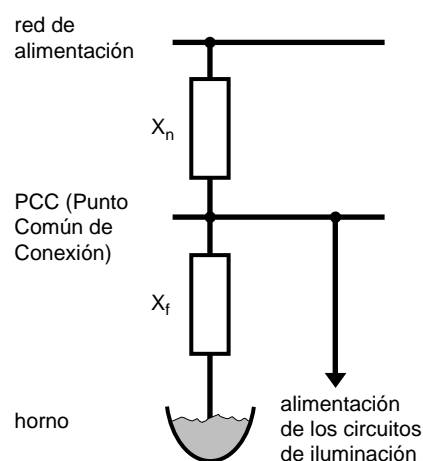
X_f = toda la reactancia de cortocircuito aguas abajo vista desde el PCC hasta el horno en cortocircuito, cuando los electrodos del horno están inmersos,

k = coeficiente experimental (determinado a partir de una cincuenta de instalaciones: $k = 11,25$),

t = duración de la observación; por ejemplo 1 minuto.

El límite máximo de la dosis de flicker estimada considerada habitualmente como admisibles es:

$$G = 0,09 (\%)^2 \text{ mn/mn.}$$



X_n = reactancia de cortocircuito de la red de alimentación aguas arriba,

X_f = conjunto de reactancias de toda la conexión eléctrica desde el PCC hasta el horno (el transformador reductor, los cables de MT, la posible reactancia en serie, el transformador del horno y todas las conexiones BT del horno).

Fig. 12: Esquema eléctrico equivalente de la alimentación eléctrica de un horno de arco.

De aquí proviene la siguiente regla: el riesgo de perturbaciones molestas debidas a un horno de arco de corriente alterna se estima como casi nulo:

■ si la reactancia de cortocircuito de la red X_n y la reactancia de cortocircuito del horno X_f están en una relación tal que $X_f/X_n > 36$,

■ o si la potencia de cortocircuito ($S_{cc} = U^2/X$) de la red (S_{ccn}) y la potencia de cortocircuito del horno (S_{ccf}) están en una relación tal que $S_{ccn} S_{ccf} > 36$.

Recordatorio: en AT, las resistencias son despreciables frente a las reactancias.

Método actual

Puede obtenerse una estimación del valor de P_{st} para un horno de arco de corriente alterna con la ayuda de la fórmula experimental [6]:

$$P_{st} = K_{st} \cdot \frac{S_{ccf}}{S_{ccn}} \cdot \frac{1}{R_{SVC}} \cdot C_{HT/BT}$$

con:

K_{st} = coeficiente experimental (comprendido entre 48 y 85, con un valor medio igual a 61, y un valor aconsejado igual a 75),

S_{ccf} = potencia de cortocircuito del horno, electrodos dentro del baño,

S_{ccn} = potencia de cortocircuito de la red a nivel del PCC;

R_{SVC} = factor de reducción aportado por una instalación de compensación estática,

$C_{HT/BT}$ = coeficiente de atenuación para la transmisión del flicker de la AT hacia la BT (entre 0,5 y 1).

El nivel de flicker generado por un horno de arco de corriente continua es aproximadamente la mitad del emitido por un horno comparable de corriente alterna [6].

En el Anexo 2 se desarrolla un estudio de determinación y de reducción del flicker.

6.5 Método para los equipos de soldadura

Soldadura por resistencia

Las características de las variaciones bruscas de tensión producidas por estas máquinas pueden calcularse a partir de medidas o de registros perturbográficos. Las parejas de datos amplitud-frecuencia así obtenidas hay que compararlas con la curva de referencia aprobada por la CEI (**figura 7**) o tratarlas con el método analítico expuesto anteriormente.

El nivel de perturbación que se considera como aceptable está fijado en:

$\Delta U \leq 5\%$ para una frecuencia $r \leq 8,7$ golpes/hora (es decir $r \leq 0,15/\text{mn}$).

Las caídas de tensión aproximadas pueden calcularse con la ayuda de las siguientes fórmulas [12].

■ máquinas trifásicas:

$$\Delta U/U_n = (S_{\text{máx}}/U^2) \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi)$$

■ máquinas bifásicas:

$$\Delta U/U_n = (S_{\text{máx}}/U^2) \cdot [R \cdot \cos (\varphi \pm 30^\circ) + X \cdot \sin (\varphi \pm 30^\circ)]$$

■ máquinas monofásicas:

$$\Delta U/U_n = (3 \cdot S_{\text{máx}}/U^2) \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi)$$

con:

ΔU = caída de tensión en el punto de conexión PCC,

U_n = tensión nominal,

$S_{\text{máx}}$ = potencia máxima de soldadura,

$R + jX$ = impedancia de la red en el punto de conexión,

$\cos \varphi$ = factor de potencia del equipo de soldadura.

Ver ejemplo en el Anexo 1.

Soldadura por arco

Los impactos de estos equipos, cuyo funcionamiento es intermitente, tienen una frecuencia en general inferior a 3 Hz. Así, para no temer un efecto de flicker, la amplitud de estos golpes no debe sobrepasar 0,6% de U_n sobre la red común a los equipos de soldadura y a los de iluminación.

7 Soluciones

Se pueden considerar diversas soluciones que se presentan en los párrafos siguientes comenzando por las más fáciles de implantar.

7.1 Elección del sistema de iluminación

Ya que existen fuentes luminosas más o menos sensibles al flicker (**figura 3**), la solución evidente y la primera que hay que considerar es elegir bien estas fuentes.

La tabla de la **figura 3** indica que las lámparas fluorescentes tienen una sensibilidad a las variaciones de tensión dos o tres veces menor que las lámparas de incandescencia. Así pues se presentan como la mejor elección. Además, la investigación de los fabricantes para mejorar la eficacia luminosa y reducir las dimensiones de sus productos, ha llevado a la creación de «balastos electrónicos», o alimentaciones de alta frecuencia (> 20 kHz) de los fluorescentes (tubos o lámparas fluo-compactas):

- mejora de la eficacia en un 10%,
- reducción del consumo de orden del 20%.

El comportamiento de las fuentes luminosas así realizadas, frente al fenómeno del parpadeo, también ha sido mejorado; sin embargo hay que notar que:

- su factor de potencia está cercano al 0,5,
- las corrientes armónicas que generan son muy importantes ($H3 = 30\% H1$),
- para adaptar el nivel de iluminación tienen que asociarse a reguladores especiales.

7.2 Ondulador

En el caso en que la molestia debida a un flicker se limita a un grupo de usuarios bien identificado, se puede considerar «limpiar» la línea de salida para la iluminación por medio de la instalación de un regulador de tensión o de un ondulator.

La inversión de una instalación como ésta puede ser relativamente pequeña, pero esta solución sólo es un remedio local.

7.3 Modificación del perturbador

El flicker puede atenuarse modificando el ciclo de funcionamiento de la carga perturbadora: ritmo de soldadura, rapidez de rellenado del horno, ... cuando el arranque directo y frecuente de un motor es la causa del flicker, puede adoptarse un modo de arranque que reduzca la sobreintensidad.

7.4 Inclusión de un volante de inercia

En ciertos casos particulares, una carga giratoria puede provocar fluctuaciones de tensión (por ejemplo un compresor volumétrico); un volante de inercia sobre su árbol motor las reduce.

7.5 Conversor rotativo

Un grupo motor-generador reservado para la alimentación de la carga fluctuante es una solución válida si la potencia activa de esta carga es relativamente constante, pero su precio es elevado.

7.6 Modificación de la red

Según la estructura de la red, se pueden considerar dos métodos:

- o bien distanciar, es decir aislar, la carga perturbadora de los circuitos de iluminación,
- o bien aumentar la potencia de cortocircuito de la red disminuyendo su impedancia (en el Punto de Conexión Común, PCC).

Estas soluciones hay que recomendarlas siempre que sean aplicables y con preferencia a a todas las demás (simplicidad de explotación). Para esto son posibles diversos esquemas:

- conexión de los circuitos de iluminación lo más cerca posible de la fuente de alimentación (transformador),

- aumento de la potencia del transformador común (con U_{cc} constante),

- disminución de la tensión de cortocircuito ($U_{cc} \%$) del transformador común (a potencia constante),

- puesta en paralelo de transformadores suplementarios,

- en BT, aumento de la sección de los conductores,

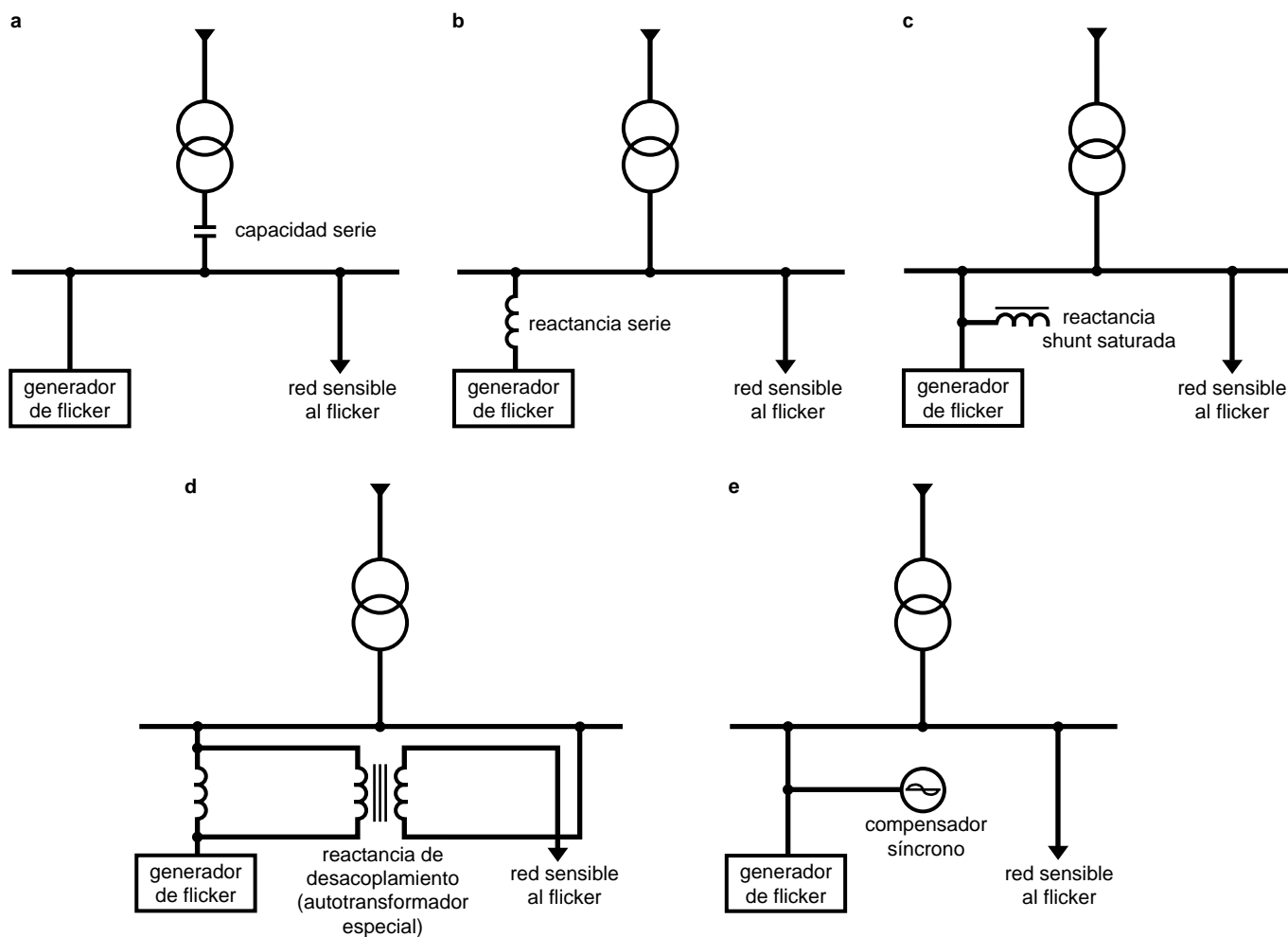
- conexión de la carga perturbadora a una red de tensión más elevada,

- alimentación de la carga por un transformador independiente.

7.7 La capacidad-serie

La introducción de una capacidad en serie en la red (**figura 13a**) aguas arriba del PCC de la carga perturbadora y de los circuitos sensibles al flicker, puede reducir a la mitad las fluctuaciones de tensión. Esta solución presenta una ventaja suplementaria, pero también un inconveniente:

- la ventaja: asegura, además, una producción de energía reactiva;
- el inconveniente: hay que proteger los condensadores contra los cortocircuitos aguas abajo.



- a - capacidad en serie en la red,
- b - reactancia en serie,
- c - reactancia shunt saturada,
- d - reactancia de desacoplamiento,
- e - compensador sincrónico complementado con reactancias de amortiguación.

Fig. 13: Modificaciones de la instalación que permiten reducir el flicker.

7.8 La reactancia en serie

Utilizada en combinación con hornos de arco, esta solución puede reducir en un 30% la tasa de flicker.

La reactancia se inserta en serie con la alimentación de AT del horno aguas abajo del PCC (**figura 13b**). Puede incluirse en el transformador del horno. Con frecuencia comporta un dispositivo de reglaje sin tensión (tomas atornilladas) y una posibilidad de cortocircuitado.

Su principal efecto «positivo» sobre las variaciones de tensión es que reduce la

potencia de cortocircuito demandada por el horno. Además, estabiliza el arco del horno. Así las fluctuaciones de tensión son menos bruscas («inercia electromagnética») y el funcionamiento aleatorio (del arco) se reduce. La influencia de la reactancia sobre la emisión de flicker del horno puede estimarse por la modificación de la reactancia X_f o S_{ccf} (ver capítulo precedente).

Su inconveniente: la self resulta atravesada por la corriente de carga del horno y consume energía reactiva.

7.9 La reactancia shunt saturada

Esta reactancia conectada lo más cerca posible de la fuente de flicker (**figura 13c**) puede reducir en un factor de 10 las fluctuaciones superiores a la tensión nominal; sin embargo es inoperante para las fluctuaciones inferiores puesto que la self no se satura.

Estas reactancias presentan inconvenientes: consumen corriente reactiva, producen armónicos, y su precio es más bien elevado.

7.10 La reactancia de desacoplamiento

Este procedimiento es muy eficaz, puesto que puede reducir las fluctuaciones en un factor de 10. Sin embargo, exige una configuración adecuada de la red: se inserta una impedancia en la alimentación de la carga perturbadora y en el circuito de alimentación aguas abajo de su punto de conexión (**figura 13d**). La caída de

tensión en bornes de este «balastro» se invierte y, por medio de un transformador, se añade a la tensión de la arteria que no hay que perturbar. En la práctica, se trata de un auto-transformador especial. No hay atenuación del flicker aguas arriba del dispositivo.

7.11 El compensador asíncrono

Esta solución lleva a una reducción de fluctuaciones del 2 al 10% y hasta un 30% con los sistemas modernos de control electrónico.

El compensador se complementa a veces con reactancias (lineales) de amortiguación instaladas sobre la alimentación (**figura 13e**).

Actualmente los compensadores síncronos se substituyen por compensadores estáticos, pero pueden resultar interesantes si ya están instalados y se les puede poner de nuevo en servicio.

7.12 El convertor de fase

Las caídas de tensión producidas por cargas fluctuantes monofásicas se reducen mucho con convertidores de fases, grupos rotativos, transformadores con acoplamientos especiales o puentes de Steinmetz [3][4]. Éste último permite el reequilibrado de una carga resistiva monofásica (**figura 14**).

Así una carga monofásica

$$S_m = P_m + jQ_m$$

puede compensarse con una carga $-jQ$ sobre la misma fase. Con ello resulta una carga monofásica puramente resistiva que puede compensarse añadiendo admitancias inductivas y capacitivas sobre las otras dos ramas. Este montaje equivale a una carga trifásica equilibrada puramente resistiva de potencia $P_m/3$.

Cuando la carga monofásica S_m fluctúa mucho, un dispositivo de electrónica de potencia puede permitir una compensación dinámica, prácticamente en tiempo real. Lo mismo puede hacerse con un sistema trifásico desequilibrado, en cuyo caso el Puente de Steinmetz se convierte en un «compensador estático».

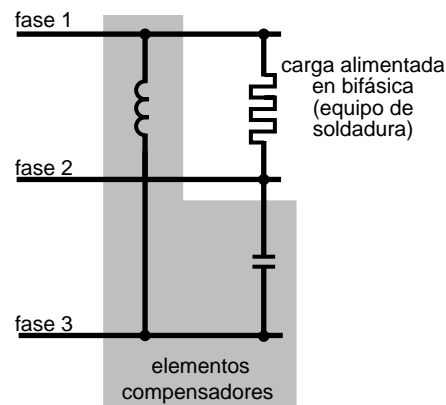


Fig. 14: Montaje en puente de Steinmetz para la compensación de una carga bifásica (esquema de principio).

7.13 El compensador estático (SVC)

El equipo SVC –Static Var Compensator– sirve para compensar automáticamente la energía reactiva (**figura 15**). Su uso también permite reducir el flicker entre un 25% y un 50%.

La siguiente fórmula da un valor estimado del coeficiente de reducción del flicker que se obtiene con un SVC:

$$R_{SVC} \approx 1 + 0,75 \cdot \frac{S_{SCV}}{S_f}$$

donde:

R_{SVC} = factor de reducción de Pst,

S_{SVC} = potencia del compensador (en VAR),

S_f = potencia del horno (en VA).

Su esquema de principio es el de la **figura 16**. Incorpora unas inductancias de compensación, una batería fija de condensadores shunt con un filtro y un dispositivo electrónico a base de tiristores o de IGBT. El dispositivo electrónico

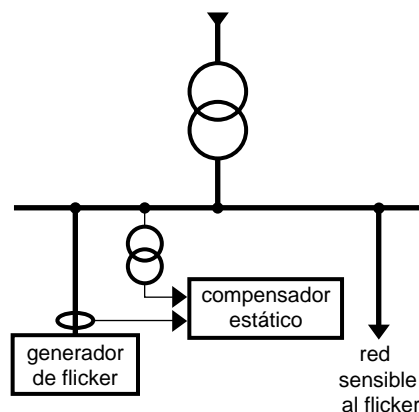


Fig. 15: Esquema de la instalación de un compensador estático.

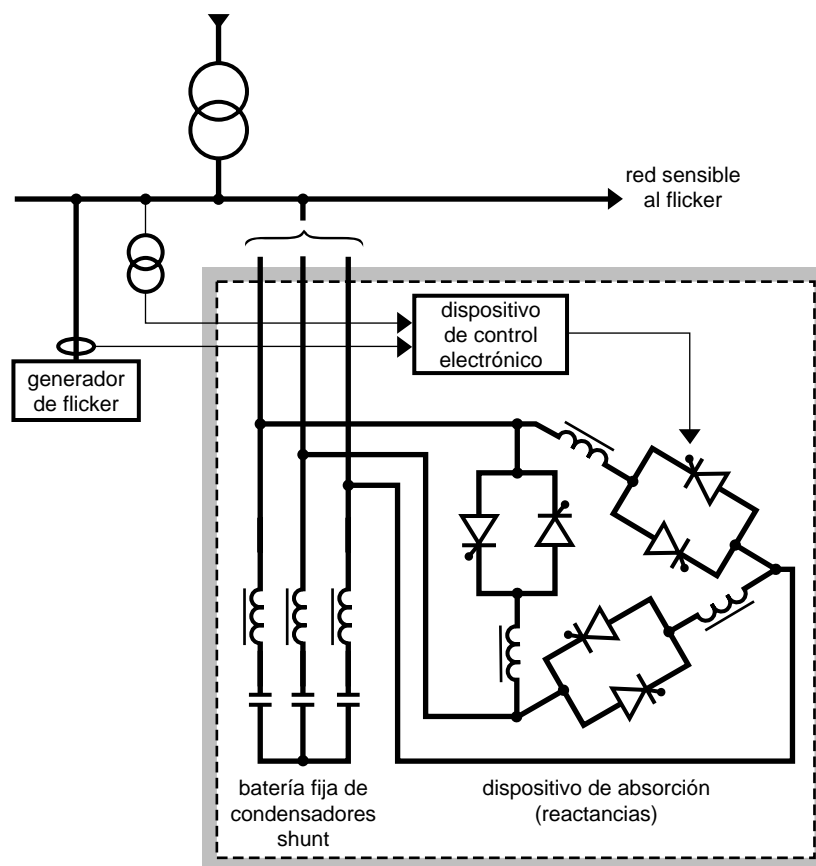


Fig. 16: Esquema simplificado de un compensador estático.

sirve para variar el consumo de energía reactiva de las inductancias para mantener prácticamente constante la potencia reactiva absorbida por el conjunto de generador de flicker, batería fija de condensadores e inductancias de compensación.

Esta compensación fase por fase es de un interés evidente con los hornos de arco cuyos regímenes de funcionamiento son esencialmente desequilibrados.

Los resultados de este tipo de compensadores son notables. Como ejemplo, en la tabla de la **figura 17** se recogen algunas características exigidas por una acerería polaca (estudios y material Merlin Gerin).

tensión nominal de la red controlada	30 kV
potencia del SVC	50 MVar
factor de potencia	$\cos \varphi \geq 0,93$
tasa de distorsión en tensión	$THD \leq 1,5\%$
fluctuaciones de tensión	$\Delta U/U_N \leq 2\%$
desequilibrio de tensión	$U/U_N \leq 1,5\%$
Pst (en 30 kV)	1,1

Fig. 17: Resultados obtenidos por la utilización de un condensador estático para un horno de arco.

7.14 Síntesis

La tabla de la **figura 18** resume, en función de la carga que origina el flicker, las soluciones que se pueden aportar y su rentabilidad.

soluciones	cargas fluctuantes							
	arranque de motor		motor con carga fluctuante		horno de arco		equipo de soldadura	
modificación del perturbador	+	c	-		+	b	+	b
volante de inercia	-		+	a	-		-	
convertor rotativo	+	c	+	c	+	b	+	c
modificación de la red	+	b	+	b	+	a	+	b
capacidad serie	+	b	+	b	+	c	+	b
reactancia serie	-		-		+	a	-	
reactancia shunt saturada	-		-		+	c	+	c
reactancia de desacoplamiento	c	+	c	+	c	+	b	+
compensador síncrono	+	c	+	c	+	a	+	b
convertor de fase	-		-		+	c	+	b
compensador estático	+	b	+	b	+	a	+	b

- : técnicamente inadecuado + : técnicamente posible
a : frecuentemente económico b : quizás rentable c : pocas veces rentable

Fig. 18: Las soluciones aplicables para reducir, o suprimir el flicker.

8 Conclusión

El flicker es el fenómeno de parpadeo de fuentes luminosas, debido a fluctuaciones de tensión de la alimentación eléctrica. Puede molestar a las personas en los talleres, en las oficinas y en las viviendas al producir una fatiga visual y nerviosa. Puede afectar simultáneamente a un gran número de personas (perturbación de la red de distribución pública de media tensión y alta tensión).

Actualmente, se conocen los límites de las fluctuaciones de tensión periódicas que provocan el efecto de flicker. Hay normas internacionales que definen las magnitudes y los aparatos que permiten medirlas (el Pst y el Plt).

Los generadores de flicker son numerosos y pueden ser muy potentes (hornos de arco en

una acería). Es muy importante conocerlos, sabiendo que variaciones de tensión de menos del 1% pueden molestar. Su identificación es una necesidad porque frecuentemente el flicker es difícil de suprimir en una red ya existente. Así pues, es importante analizar los riesgos potenciales de flicker desde el preestudio de una instalación y prever, desde el diseño de la red, las soluciones que permitan librarse de él.

Estas soluciones pueden ser:

- modificación del tipo de iluminación,
- modificación de la estructura de la red,
- adaptación de funcionamiento del perturbador,
- instalación de un equipo de reducción del flicker.

Anexo 1: Estudio del flicker en la alimentación de un equipo de soldadura

La red

Este estudio se lleva a cabo para un equipo de soldadura (soldadura por puntos) alimentado a partir de un cuadro de BT situado en el punto B de la red descrita en la **figura 19**.

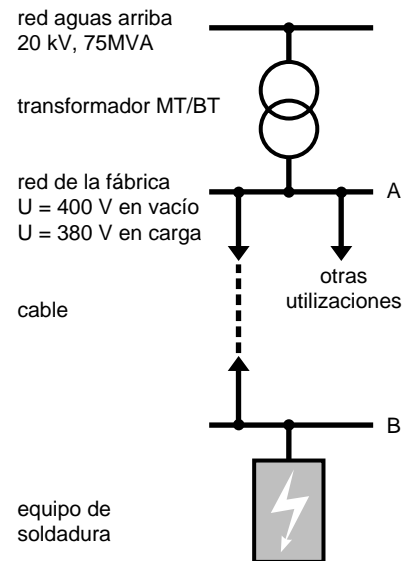


Fig. 19: Red de alimentación de un equipo de soldadura.

Plan del estudio

La primera etapa consiste en calcular las distintas impedancias que afectan a las amplitudes de las bajadas de tensión.

La segunda es el cálculo de las caídas de tensión y del número de soldaduras por minuto más allá del cual el flicker se convierte en molesto. En este nivel del estudio es posible precisar la elección del equipo de soldadura: ¿tiene que ser alimentada en monofásico o en trifásico? ¿dónde conectar la red de iluminación sabiendo que el equipo de soldadura debe poder efectuar hasta tres soldaduras por minuto?

Se estudian tres configuraciones:

- 1– la configuración prevista originalmente,
- 2– la misma configuración, pero con una potencia de soldadura reducida a 100 kVA,
- 3– la configuración de partida con potencia del transformador aumentada a 1000 kVA con una U_{cc} que pasará al 6% y unas pérdidas en el cobre P_{Cu} del 1,3%.

Cálculo de las impedancias

Estos cálculos se hacen según las ecuaciones siguientes:

$$R_n \approx 0,1 X_n$$

$$X_t = \frac{U_{n2}^2}{S_t} \cdot \frac{U_{cc}}{100}$$

$$R_t = \frac{U_{n2}^2}{S_t} \cdot \frac{P_{Cu}}{100}$$

$$R_c = 75 \text{ m}\Omega/\text{km}$$

$$L_c = 0,1 \text{ }\Omega/\text{m}$$

Los resultados se han recogido en la tabla de la **figura 20**.

configuración		nº1	nº2	nº3
hipótesis				
red pública	U_n	20 kV	20 kV	20 kV
	S_{cc}	$S_{cc} = 75 \text{ MVA}$	$S_{cc} = 75 \text{ MVA}$	$S_{cc} = 75 \text{ MVA}$
transformador	P	630 kVA	630 kVA	1000 kVA
	U_{cc}	4%	4%	6%
	P_{Cu}	1%	1%	1,3%
cable	l	40 m	40 m	40 m
	S	240 mm ² , Cu	240 mm ² , Cu	240 mm ² , Cu
equipo de soldadura	p	150 kVA	100 kVA	150 kVA
	$\cos \varphi$	$\cos \varphi = 0,6$	$\cos \varphi = 0,6$	$\cos \varphi = 0,6$
impedancias				
red pública	R_n	0,2 mΩ	0,2 mΩ	0,2 mΩ
	X_n	2,1 mΩ	2,1 mΩ	2,1 mΩ
transformador	R_t	2,5 mΩ	2,5 mΩ	2,1 mΩ
	X_t	10,2 mΩ	10,2 mΩ	9,6 mΩ
cable	R_c	3 mΩ	3 mΩ	3 mΩ
	X	4 mΩ	4 mΩ	4 mΩ
en el punto A	R	2,7 mΩ	2,7 mΩ	2,3 mΩ
	X	12,29 mΩ	12,29 mΩ	11,7 mΩ
en el punto B	R	5,71 mΩ	5,71 mΩ	5,3 mΩ
	X	16,29 mΩ	16,29 mΩ	15,7 mΩ
potencia de soldadura				
	P	90	60	90
	Q	120	80	120

Fig. 20: Hipótesis y resultados de los cálculos de impedancia.

Cálculo de las caídas de tensión

Estas caídas de tensión se han calculado para los dos modos de alimentación posibles para el equipo de soldadura: bifásico o trifásico.

Estos cálculos se hacen según las ecuaciones siguientes:

■ para una máquina alimentada en trifásico:

$$\frac{\Delta V}{V_n} = 100 \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{U_n^2}$$

■ para una máquina alimentada en bifásico:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta V_1}{V_n} (\%) &= \\ &= 100 \frac{\sqrt{3}}{2U_n^2} [R \cdot Q - X \cdot P + \sqrt{3} (R \cdot P + X \cdot Q)] \end{aligned}$$

$$\frac{\Delta V_2}{V_n} (\%) =$$

$$= 100 \frac{\sqrt{3}}{2U_n^2} [X \cdot P - R \cdot Q + \sqrt{3} (R \cdot P + X \cdot Q)]$$

$$\frac{\Delta V_3}{V_n} (\%) = 0$$

Los resultados se presentan en la tabla de la **figura 21**, completados con las cadencias de soldadura determinadas a partir del diagrama de la **figura 7**.

Nota: una soldadura provoca dos variaciones de tensión.

		equipo bifásico		equipo trifásico	
		fase 1	fase 2	fase 3	
configuración nº 1					
punto A	dV	1,32%	2,25%	0,00%	1,19%
	Nb soldaduras/min.	6	1		8
punto B	dV	2,10%	3,03%	0,00%	1,71%
	Nb soldaduras/min.	1	< 1		2
configuración nº 2					
punto A	dV	0,88%	1,50%	0,00%	0,79%
	Nb soldaduras/min.	20	3,5		30
punto B	dV	1,40%	2,02%	0,00%	1,14%
	Nb soldaduras/min.	4	1,5		10
configuración nº 3					
punto A	dV	1,20%	2,14%	0,00%	1,12%
	Nb soldaduras/min.	7	1		10
punto B	dV	1,98%	2,92%	0,00%	1,63%
	Nb soldaduras/min.	1,5	< 1		3

Fig. 21: Caídas de tensión y cadencias de soldaduras previsibles.

Conclusión

En bifásico

El equipo de soldadura a su potencia de 150 kVA puede utilizarse a una cadencia máxima de una soldadura por minuto, sin polucionar a los usuarios conectados en el punto A.

La importancia de las fluctuaciones verificadas en el punto B revela que no es posible alimentar una iluminación a partir de este punto.

La cadencia de soldadura puede aumentarse hasta 3,5 veces por minuto. La configuración 2 es aceptable, pero al precio de una reducción de la potencia del equipo de soldadura.

Por contra, el estudio de la configuración nº 3 muestra que la instalación de un transformador más potente no disminuye necesariamente mucho las variaciones de tensión aguas abajo.

En trifásico

El equipo de soldadura puede tener una cadencia de soldadura más grande (de 1,5 a 3 veces más) sin aumentar el nivel de perturbaciones en la red. Así pues, para poder efectuar hasta tres soldaduras por minuto:

- en bifásico, sólo la configuración 2 es adecuada, y a condición de que el punto común de conexión (PCC) esté situado en A,
- en trifásico, la única configuración que plantea problemas es la 1 si el PCC está en B.

Anexo 2: Estudio del flicker en la alimentación de un horno de arco

Características de la red de alimentación del horno de 60 MVA

El esquema de la red de alimentación eléctrica del horno de arco, objeto de este estudio, se presenta en la **figura 22**. Sus características se recogen en la tabla de la **figura 23**.

red aguas arriba
de la alimentación
del PCC

transformador reductor

red de la fábrica

reactancia en serie

transformador del horno

horno

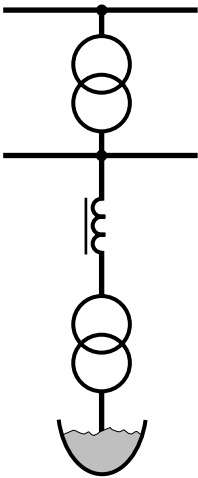


Fig. 22: Red de alimentación eléctrica del horno de arco.

red aguas arriba	potencia de cortocircuito	$S_{ccn} = 5500 \text{ MVA}$
	tensión nominal	$U_n = 225 \text{ kV}$
transformador reductor	potencia nominal	$S_{tra} = 80 \text{ MVA}$
	tensión de cortocircuito	$u_{cca} = 10\%$
red de la fábrica	tensión nominal	$U_{res} = 30 \text{ kV}$
reactancia en serie	impedancia	$X_{ser} = 0,0 \text{ } \Omega$
transformador del horno	potencia nominal	$S_{trf} = 60 \text{ MVA}$
	tensión de cortocircuito	$u_{ccf} = 7,5\%$
	tensión nominal en el lado BT	$U_{2f} = 750 \text{ V}$
horno	impedancia de las conexiones BT	$X_{BT} = 0,003 \text{ } \Omega$
	potencia nominal	$S_f = 60 \text{ MVA}$

Fig. 23: Características de la red de alimentación eléctrica del horno de arco.

Cálculos de los niveles de flicker (Pst y ΔV_{10})

La primera etapa de este estudio consiste en calcular las distintas reactancias convertidas al mismo nivel de tensión. En este ejemplo se ha escogido la tensión del Punto de Conexión Común, es decir 225 kV.

Este estudio tiene una doble finalidad: ser un ejemplo, y comparar los resultados entre Pst y ΔV_{10} .

De aquí los dos enfoques:

- a partir de la potencia de cortocircuito del horno, calcular la Pst;
- a partir de la variación máxima de la potencia reactiva, calcular la ΔV_{10} .

Cálculo de las distintas reactancias para una misma tensión

Para comenzar, convertimos todas las reactancias a una misma tensión. Como tensión referencia escogemos la tensión en el Punto de Conexión Común, (PCC):

- tensión de referencia
 $U_{ref} = 225 \text{ kV}$
- reactancia de la red
 $X_n = 9,2 \Omega$
- reactancia de transformador reductor
 $X_{tra} = 63,3 \Omega$
- resistencia en serie
 $X_s = 0 \Omega$
- reactancia del transformador de horno
 $X_{trf} = 63,3 \Omega$
- reactancia de las conexiones de BT del horno
 $X_{btf} = 270 \Omega$
- reactancia total
 $X_t = 405,8 \Omega$

valor del cos (ϕ_f) del horno

El factor de potencia del horno lo da el constructor para los distintos puntos de funcionamiento del equipo; el valor del factor de potencia, utilizado para calcular el nivel de flicker, es:

$\cos \phi_f = 0,75$.

Determinación del Pst

Cálculo de la potencia de cortocircuito, a nivel del horno, en esta instalación:

$$S_{ccf} = \frac{U_{ref}^2}{X_t}$$

donde

$$S_{ccf} = 125 \text{ MVA}$$

El nivel del flicker viene dado por la ecuación:

$$P_{st} = K_{st} \frac{S_{ccf}}{S_{ccn}}$$

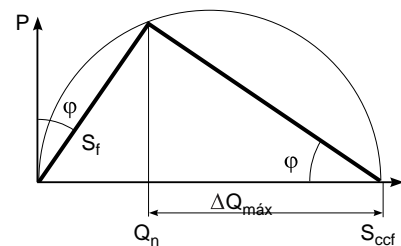
donde

$$K_{st} = 75 \text{ (valor escogido),}$$

$$S_{ccf} = 125 \text{ MVA}$$

$$S_{ccn} = 5500 \text{ MVA}$$

$$P_{st} = 1,7$$



$$\begin{aligned} \Delta Q_{\max} &= S_{ccf} - Q_n, \\ &= S_{ccf} - (\text{sen } \phi \cdot S_f), \\ &= S_{ccf} - (\text{sen } \phi \cdot \text{sen } \phi \cdot S_{ccf}), \\ &= S_{ccf} [1 - (\text{sen } \phi)^2], \\ &= S_{ccf} (\cos \phi)^2, \\ &= S_{ccf} (\cos \phi_f)^2, \\ &= 70,18 \text{ MVar.} \end{aligned}$$

Fig. 24.

Determinación del ΔV_{10}

El cálculo de la variación máxima (ΔQ_{\max}) de la potencia reactiva se hace entre dos puntos de funcionamiento importante del horno.

- el primer punto corresponde al funcionamiento normal, con $\cos \varphi_f$ y un consumo de energía reactiva $Q_n = S_f \cdot \sin \varphi_f$,
- el segundo punto corresponde al horno en cortocircuito, con una potencia reactiva máxima, es decir $Q_{ccf} = S_{ccf}$. (Figura 24... para el cálculo de ΔQ).
- el nivel de ΔV_{10} viene dado por la ecuación:

$$\Delta V_{10} = \frac{1}{3,6} \cdot \frac{\Delta Q_{\max}}{S_{ccn}} \cdot 100\%$$

Lo que da para nuestra instalación, en el PCC:
 $\Delta V_{10} = 0,35\%$.

Comentarios

El valor del Pst está muy por encima del límite de molestia ($Pst = 1$). El valor de ΔV_{10} está muy cerca del límite de percepción (0,32%), pero todavía por debajo del límite de molestia (0,45%). El ejemplo demuestra que una evaluación del flicker por el método del ΔV_{10} es menos severa que por el método del Pst (verificar el apartado relativo al ΔV_{10}).

Esto proviene del hecho de que las lámparas alimentadas con 110 V son menos sensibles a las fluctuaciones de tensión que las lámparas alimentadas a 220 V, por lo que los límites de ΔV_{10} son menos severos.

Dimensionado de un SVC «Static Var Compensator»

Caso de un límite expresado en Pst

Como límite de Pst escogemos el límite de molestia es decir:

$$Pst_{ref} = 1$$

Factor de reducción del flicker R:

$$R_{Pst} = \frac{Pst}{Pst_{ref}} = 1,7$$

La potencia del SVC se calcula con la fórmula:

$$Q_{SVC_{Pst}} = (R_{Pst} - 1) \cdot \frac{S_f}{0,75}$$

de donde:

$$Q_{SVC_{Pst}} = 56,1 \text{ MVar}$$

Caso de un límite expresado en ΔV_{10}

Como límite de ΔV_{10} escogemos $\Delta V_{10} = 0,32$ que corresponde al límite de molestia.

Valor buscado: $\Delta V_{10_{ref}} = 0,32$.

Factor de reducción del flicker R:

$$R_{\Delta V_{10}} = \frac{\Delta V_{10}}{\Delta V_{10_{ref}}}$$

$$R_{\Delta V_{10}} = 1,11$$

La potencia en SVC se calcula según:

$$Q_{SVC} \cdot \Delta V_{10} = C \cdot S_{ccf}$$

C es un coeficiente que depende de $R_{\Delta V_{10}}$ y del rendimiento del constructor y toma un valor

entre 0 (para $R_{\Delta V_{10}} = 0$) y alrededor de 0,7 (para $R_{\Delta V_{10}}$ grande). Aquí un valor de 0,35 es válido, lo que da:

$$Q_{SVC_{\Delta V_{10}}} = 0,35 \cdot S_{ccf},$$

es decir:

$$Q_{SVC_{\Delta V_{10}}} = 43,8 \text{ MVar}.$$

Evaluación de los índices de flicker en la misma instalación, pero después de incluir una inductancia en serie en el circuito de alimentación del horno

Esta evaluación hecha para tres valores de la inductancia X_{ser} se presenta en la tabla de la figura 25.

Queda claro el efecto positivo de una inductancia en serie sobre el nivel de flicker generado por la instalación de un horno de arco. Hemos escogido varios valores habituales de impedancias serie.

X_{serie}	Pst	$Q_{SVC_{Pst}}$
0,5 Ω	1,59	47 MVA
1,5 Ω	1,41	32 MVA
2,5 Ω	1,26	21 MVA

Fig. 25: Evaluación de las tasas de flicker después de insertar una autoinducción en serie en el circuito de alimentación del horno.

Bibliografía

Normas

CEI 555-1: UNE 21806-1:1990: Perturbaciones producidas en las redes de alimentación por los aparatos electrodomésticos y los equipos análogos. Parte 1: Definiciones.

CEI 555-2(*): UNE 21806-2:1990: Perturbaciones producidas en las redes de alimentación por los aparatos electrodomésticos y los equipos análogos. Parte 2: Armónicos.

CEI 555-3(*): UNE 21806-3:1990: Perturbaciones producidas en las redes de alimentación por los aparatos electrodomésticos y los equipos análogos. Parte 3: Fluctuaciones de tensión.

CEI 868

UNE-EN 60868-0: 1995: Medidor de flicker, especificaciones funcionales y de diseño.

UNE-EN 60868-0:1997: Medidor de flicker. Parte 0: Evaluación de la severidad del flicker.

Normas de Compatibilidad Electromagnética

CEI 1000-2-2:

Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas en baja frecuencia y la transmisión de señales en la red pública de alimentación de baja tensión. 1990.

CEI 1000-3-3: UNE-EN 61000-3-3:1997:

Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3: Límites. Sección 3: Limitación de las fluctuaciones de tensión y del flicker en redes de baja tensión para los equipos con corriente de entrada ≤ 16 A.

CEI 1000-3-5: Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3: Límites. Sección 5 Limitación de las fluctuaciones de tensión y del flicker para los equipos con corriente de entrada >16 A por fase.

CEI 1000-4-15: UNE-EN 61000-4-15:1999: Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4: Técnicas de ensayo y medida. Sección 15: Medidor de flicker. Especificaciones funcionales y de diseño. Norma básica de CEM.

EN 50160: UNE-EN 50160:1996:

Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución.

NF C15-100: Installations électriques à Basse Tension: règles - 1991

(*) NOTA DEL TRADUCTOR: Las normas CEI 555-2, CEI 555-3 y sus equivalentes en castellano UNE 21806-2 y UNE 21806-3 son normas que están anuladas. Las vigentes en el momento de la traducción (septiembre 2001) son las siguientes:

UNE-EN 61.000-3-2:1997, que sustituye a UNE 21806-2.

UNE-EN 61.000-3-3:1997, que sustituye a UNE 21806-3.

Publicaciones diversas

[1] Flicker caused by interharmonics. W. MONBAUER, et Archiv Bd. 12 1990.

[2] Flicker et conditions de raccordement d'appareils produisant des variations rapides de tension. P. MEYNAUD, RGE 11/71.

[3] Condition de raccordement d'équipement générateurs de fluctuations rapide de tension (fours à arc, machine à souder); Bulletin DER d'EDF; n° 4 - 1982. G. BONNARD; G. DECHARTE.

[4] Technique de l'ingénieur; Fluctuation rapide de tension et flicker.

[5] Cigré 36-203: Evaluation de la qualité de la tension point de vue harmonique, flicker et déséquilibre; A. ROBERT; J. MARQUET; août 1992.

[6] Recent experience of connecting of big arc furnaces with reference to flicker level. CIGRE 36-305. A. ROBERT; M. COUVREUR; août septembre, 1994.

[7] Strategy for worldwide applicability of the UIE/ IEC flickermeter; M. Sakulin, H. Renner; Institute of Electrical Power Systems, University of Technology Graz, Austria.

[8] Flickermètre numérique. P. DUVEAU, RGE 11/71.

[9] Investigation and analysis of voltage fluctuation in DC arc furnaces. N. SAITO; I. KOBAYASHI .

[10] Arc furnace flicker assessment and prédiction. Evaluation et prédétermination de flicker pour des fours à arc. A. ROBERT; M. COUVREUR.

[11] Connection of fluctuating loads. C. MIRRA; IUE : International Union for Electroheat, WG disturbances, Tour Atlantique - Cedex 6 - 92080 Paris-la Défense. 1988.

[12] Guide de l'ingénierie électrique des réseaux internes d'usines. Collection Electra, Ed. DOPEE 85, Diffusion Lavoisier.

Cuadernos Técnicos Schneider

Las perturbaciones eléctricas en baja tensión. Cuaderno Técnico nº 141. R. Calvas.

El diseño de las redes industriales en AT. Cuaderno Técnico nº 169. G. Thomasset.