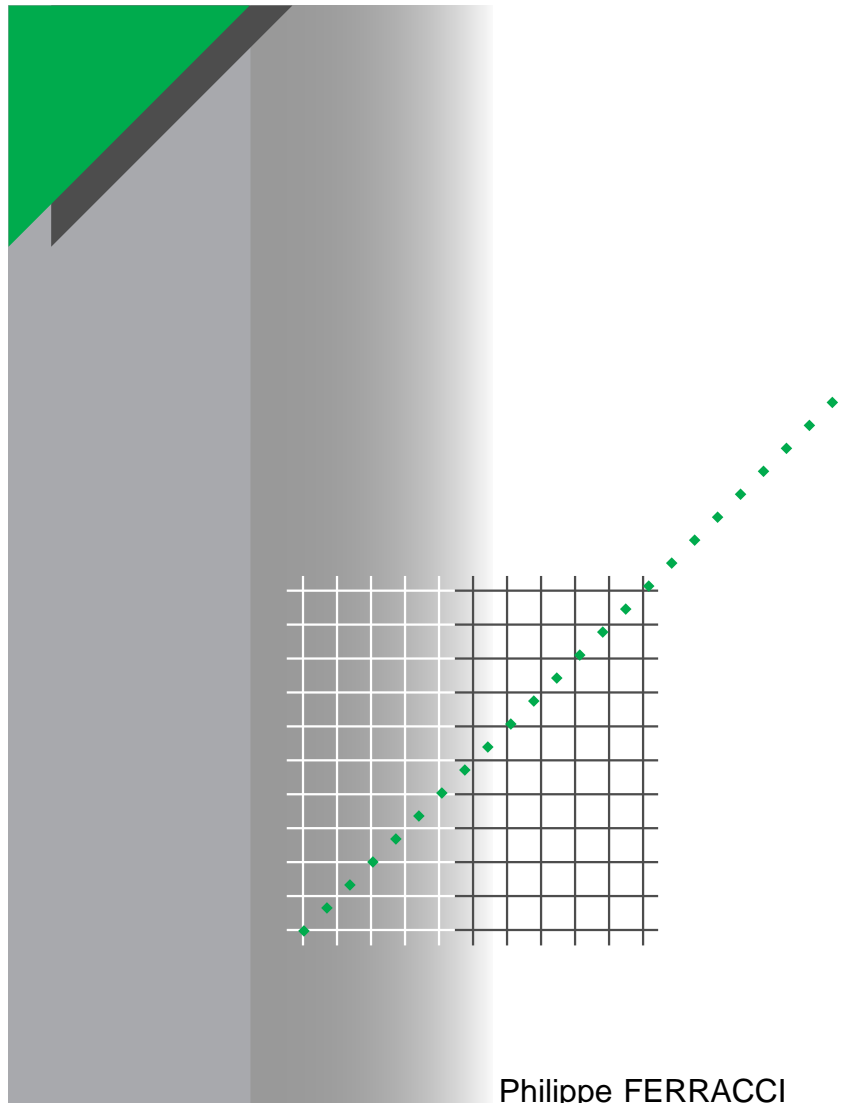


# Cuaderno Técnico nº 190

## La ferrorresonancia



Philippe FERRACCI



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](mailto: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 190 de Schneider Electric».

# Cuaderno Técnico nº 190

## La ferorrresonancia



### **Philippe FERRACCI**

Licenciado en la «École Supérieure d'Électricité» en 1991, ha desarrollado una tesis sobre el régimen de neutro compensado, en colaboración con la dirección de Estudios e Investigaciones de EDF. En 1996, se incorporó en el Grupo Schneider donde dirige los estudios relativos a la electrotecnia y las redes eléctricas.

Trad.: P. Rodón

Original francés: octubre 1997

Versión española: octubre 2000

**Merlin Gerin**

**Modicon**

**Square D**

**Telemecanique**

**Schneider**  
 **Electric**

## Terminología

---

**CPA: Controlador Permanente de Aislamiento**

Dispositivo usado para indicar (mediante una señal sonora o visual) la aparición de un primer defecto de una parte activa a tierra o a masa.

**Número irracional (no fraccionario)**

Número que no se puede expresar como cociente de dos enteros ( $\sqrt{2}$ ,  $\sqrt{3}$ ,  $\pi$ ...).

**TCT: Transformador Condensador de Tensión (CEI 186)**

Transformador de tensión que incorpora un dispositivo capacitivo y un elemento

electromagnético cuya tensión secundaria es prácticamente proporcional a la tensión primaria aplicada al divisor capacitivo y en fase con él.

**TT: Transformador de Tensión (CEI 50)**

Transformador de medida dentro del cual la tensión es, en condiciones normales de empleo, proporcional a la tensión primaria y está desfasada respecto a ésta un ángulo cercano a cero, para un sentido apropiado de las conexiones.

# La ferorrresonancia

La ferorrresonancia es un fenómeno de resonancia no lineal que puede afectar a las redes eléctricas. Las tasas de armónicos anormales, las sobretensiones o las sobreintensidades transitorias o permanentes que provoca suelen ser peligrosas para el material eléctrico.

Algunas de las averías mal solucionadas son debidas a este fenómeno raro y no lineal.

Este Cuaderno Técnico permite comprender la ferorrresonancia. Los métodos presentados permiten predecir y experimentar de forma creíble los riesgos de ferorrresonancia dentro de una instalación existente o en desarrollo. Se dan las soluciones prácticas que permiten evitar o suprimir la ferorrresonancia.

## Índice

1	Introducción	p.	6
2	Comprender la ferorrresonancia	2.1 Resonancia	p. 7
		2.2 Ferorrresonancia	p. 7
3	Identificar la ferorrresonancia	3.1 Elementos de diagnosis	p. 13
		3.2 Ejemplos de situaciones de redes eléctricas propicias a la ferorrresonancia	p. 13
4	Evitar o amortiguar la ferorrresonancia	4.1 Soluciones prácticas	p. 18
		4.2 Criterios prácticos de evaluación	p. 21
5	Estudios para prever o comprender	5.1 Ejemplo de estudio	p. 23
		5.2 Modelización, aproximación matemática	p. 26
		5.3 Recapitulación	p. 28
6	Conclusión	p.	29
	Anexo 1: Bibliografía	p.	30
	Anexo 2: Guía de elección de las resistencias de carga de los TT	p.	31

# 1 Introducción

Habiendo aparecido por primera vez en la literatura en 1920, el término ferorrresonancia designa todos los fenómenos oscilatorios que aparecen en un circuito eléctrico que comprende al menos:

- una inductancia no lineal (ferromagnética saturable),
- un condensador,
- una fuente de tensión (generalmente sinusoidal),
- pérdidas débiles.

Las redes eléctricas comportan numerosas inductancias saturables (transformadores de potencia, transformadores inductivos de medida de tensión (TT), reactancias shunt), así como condensadores (cables, líneas largas, transformadores capacitativos de tensión, condensadores de compensación serie o shunt, condensadores de reparto de tensión entre cámaras de corte de interruptores automáticos, centros de transformación blindados). Por lo tanto las redes son susceptibles de presentar configuraciones propicias a la existencia de la ferorrresonancia.

La principal característica de este fenómeno es la de presentar al menos dos regímenes permanentes estables. Aparece a continuación de transitorios, sobretensiones de origen atmosférico, conexión o desconexión de transformadores o de cargas, aparición o eliminación de defectos, trabajos bajo tensión... Existe la posibilidad de transición brusca de un estado estable normal (sinusoidal a la misma frecuencia que la red) a otro estado estable ferorrresonante caracterizado por fuertes sobretensiones y por importantes tasas de armónicos peligrosas para los equipos.

Un ejemplo práctico de este comportamiento (sorprendente para el personal no experto) es la desconexión de un transformador de tensión al abrirse un interruptor automático. El transformador queda alimentado por la capacidad de las cámaras de corte del

interruptor automático: la maniobra puede llevar o a una tensión nula en bornes del transformador, o a una tensión permanente muy distorsionada y de una amplitud muy superior a la de la tensión normal.

Para evitar las consecuencias de la ferorrresonancia (disparo intempestivo de la protección, destrucción de materiales tales como transformadores de potencia o de medida de tensión, pérdidas de producción...) se necesita:

- comprender el fenómeno,
- predecirlo,
- saberlo identificar,
- evitarlo o suprimirlo.

Este fenómeno no es muy conocido porque es raro y no se puede analizar ni predecir por los métodos de cálculo (basados en la aproximación lineal) habitualmente utilizados por los técnicos eléctricos. Y además, como no se conoce, se le atribuyen frecuentemente fallos de funcionamiento y averías raras.

Una distinción entre resonancia y ferorrresonancia permite poner en evidencia las características particulares y algunas veces desconcertantes del fenómeno de la ferorrresonancia.

Los ejemplos prácticos de configuraciones de redes de energía eléctrica con riesgo de ferorrresonancia permiten identificar y evidenciar la variedad de configuraciones potencialmente peligrosas, de forma que el diseñador de redes advertido puede evitar entrar en estas situaciones peligrosas.

Si persisten las dudas respecto a las configuraciones límite e inevitables, se debe llevar a cabo un estudio predictivo. Las herramientas de análisis numérico permiten prever las posibilidades de ferorrresonancia en una red mediante la obtención de sus parámetros en condiciones de explotación normales o degradadas. Para evitar la ferorrresonancia y protegerse existen soluciones prácticas.

## 2 Comprender la ferorrresonancia

### 2.1 Resonancia

Este fenómeno se encuentra en las redes eléctricas sea cual sea su tensión.

Se puede encontrar, por ejemplo en el caso de régimen de neutro compensado (bobina de Petersen) utilizada para minimizar las corrientes de defecto en MT. También puede ser la causa de la destrucción por perforación de dieléctrico por fenómenos térmicos o por envejecimiento prematuro de materiales eléctricos por sobretensiones o por sobreintensidades (resonancia armónica...).

Dentro del caso de resonancia serie y en régimen senoidal ( $U = E \cos(\omega_n t)$ ), la relación entre las tensiones se puede expresar bajo la forma vectorial:

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C \quad (\text{figura 1}).$$

Dentro del caso particular de la resonancia serie, las tensiones en bornes del condensador y de la inductancia se compensan y se dice que el circuito está en resonancia. La pulsación  $\omega_n$  para la que esto ocurre, es tal que  $L C \omega_n^2 = 1$ .

Entonces, la amplitud de la corriente  $I$  es igual a:

$$I = \frac{E}{R}$$

Esta corriente puede ser muy importante.

La amplitud de la tensión en bornes del condensador (y en bornes de la inductancia) es igual a  $k.E$ .

El factor de calidad  $k$  tiene por expresión:

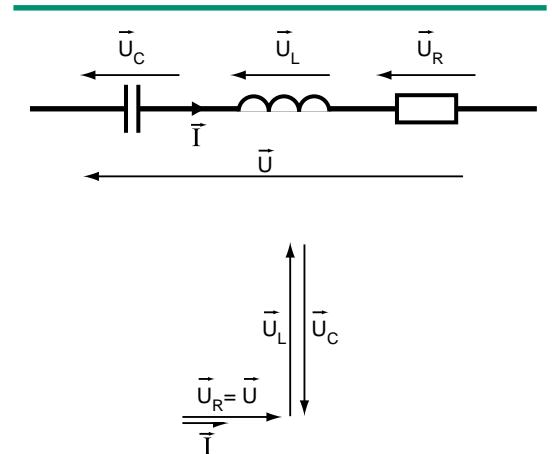


Fig. 1: Resonancia serie.

$$k = \frac{L\omega_n}{R} = \frac{1}{RC\omega_n}$$

Según el valor de  $k$  la amplitud de la tensión  $U_L (=U_C)$  puede ser superior o inferior a la amplitud  $E$  de la tensión de excitación  $U$ .

Hay resonancia armónica mientras la pulsación  $\omega_n$  coincide con una pulsación armónica  $n \omega_0$  (siendo  $\omega_0$  la pulsación de la red) generada por ciertos equipos (motores a velocidad variable, rectificadores estáticos...). La resonancia armónica puede igualmente tener consecuencias nefastas sobre el material eléctrico y debe por lo tanto ser controlada [6], [7].

### 2.2 Ferrorresonancia

Las diferencias fundamentales de un circuito ferorrresonante respecto a un circuito resonante lineal son, para una  $\omega$  dada:

- la posibilidad de resonar dentro de una gran gama de valores de  $C$ ,
- la frecuencia de las ondas de tensión y las corrientes que pueden ser diferentes de las de la fuente de tensión senoidal,

- la existencia de varios regímenes permanentes estables para una configuración y valores de parámetros dados. Uno de estos regímenes es el régimen «normal» contemplado (en la hipótesis lineal); los otros regímenes «anormales» no contemplados son a menudo peligrosos para el material.

El régimen alcanzado depende de las condiciones iniciales (cargas eléctricas de los condensadores, flujo remanente del material que forma el circuito magnético de los transformadores, el instante de conexión).

### Enfoque físico

El estudio de las oscilaciones libres del circuito de la **figura 2a** permite ilustrar este comportamiento particular. Las pérdidas se consideran despreciables y la característica  $\phi(i)$  simplificada de la bobina con núcleo de hierro es la representada en la **figura 2b**. A pesar de estas hipótesis simplificativas, las formas de onda correspondientes (**figura 2c**) son características de un régimen de ferresonancia periódica.

Al principio, la tensión en bornes de la capacidad se supone igual a  $V_0$ .

■ En el instante  $t_0$ , el interruptor K se cierra y se establece una corriente que oscila a la pulsación  $\omega_1 = 1/\sqrt{LC}$ .

Las expresiones del flujo dentro de la bobina y de la tensión V en bornes del condensador son entonces:

$$\phi = (V_0 / \omega_1) \text{sen } \omega_1 t; \quad v = V_0 \text{cos } \omega_1 t.$$

■ Si  $V_0 / \omega_1 > \phi_{\text{sat}}$ , al final del tiempo  $t_1$  el flujo  $\phi$  alcanza el flujo de saturación  $\phi_{\text{sat}}$ , la tensión v alcanza  $V_1$  y la inductancia de la bobina saturada pasa a ser  $L_S$ . Como  $L_S$  es mucho menor que L, el condensador se «descarga» bruscamente a través de la bobina, bajo la forma de una oscilación de pulsación  $\omega_2 = 1/\sqrt{L_S C}$ . La corriente y el flujo

pasan por un máximo cuando la energía electromagnética almacenada por la bobina es igual a la energía electrostática  $1/2 CV_1^2$  devuelta por el condensador.

■ En el instante  $t_2$ , el flujo vuelve a ser el de saturación  $\phi_{\text{sat}}$ , la inductancia toma de nuevo el valor L y como las pérdidas se han considerado despreciables, la tensión v, que es inversa, es igual a  $-V_1$ .

■ En el instante  $t_3$ , el flujo alcanza  $-\phi_{\text{sat}}$  y la tensión v es igual a  $-V_2$ .

Como que en la práctica  $\omega_1$  es muy pequeña, se puede considerar  $V_2 \approx V_1 \approx V_0$ .

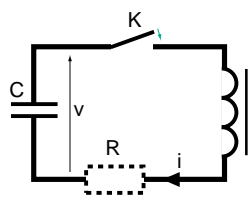
Por consiguiente, el periodo T de oscilación queda comprendido entre  $2\pi\sqrt{LC}$  en el caso

de no saturación, y  $2\pi\sqrt{L_S C} + 2(t_3 - t_2)$  en el caso de saturación (siendo  $t_3 - t_2 \approx 2\phi_{\text{sat}}/V_0$ ).

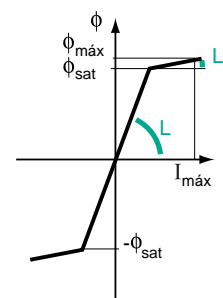
La frecuencia f correspondiente ( $f = 1/T$ ) es

$$\text{pues tal que: } \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} < f < \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S C}}$$

a - Esquema de principio



b - Característica  $\phi(i)$  simplificada



c - Tensión v, corriente i y flujo phi en función del tiempo

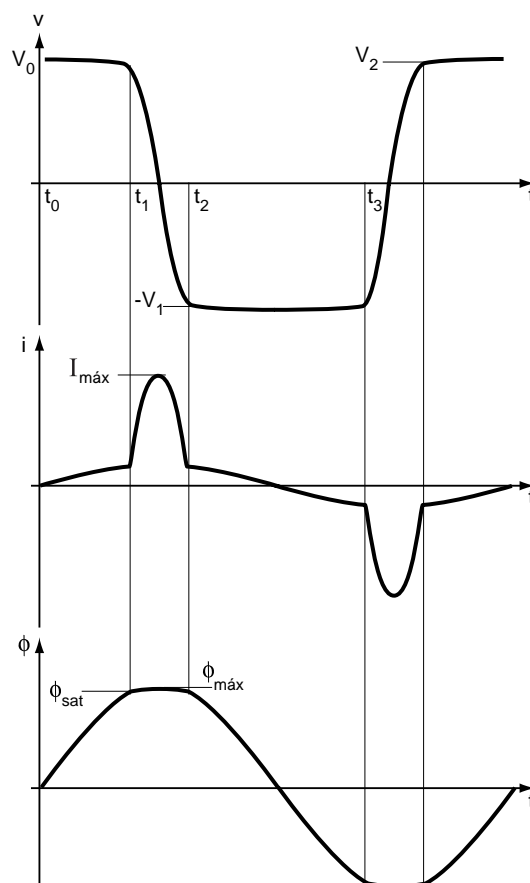


Fig. 2: Oscilaciones libres de un circuito ferresonante serie.

Esta frecuencia inicial depende del flujo de saturación  $\phi_{\text{sat}}$ , es decir de la no linealidad y de la condición inicial  $V_0$ .

En la práctica, debido a las pérdidas por efecto Joule, ( $Ri^2$ ) en la resistencia R (sobre todo en cada inversión de tensión) la amplitud de la tensión decrece ( $V_2 < V_1 < V_0$ ). Como la variación de flujo  $\Delta\phi$  durante el periodo ( $t_3 - t_2$ ) de no



saturación es tal que  $\Delta\phi = 2\phi_{\text{sat}} = \int_{t_2}^{t_3} v dt$ , la

disminución de  $v$  conduce a una disminución de la frecuencia. Si las pérdidas de energía (pérdidas por efecto Joule, pérdidas en el hierro...) se compensan mediante una fuente de tensión, la frecuencia, al disminuir, se puede sincronizar con la frecuencia de la fuente (en el caso en que la frecuencia inicial sea superior a la frecuencia de la red), o bien a una frecuencia submúltiplo de la de la fuente (en el caso en que la frecuencia inicial sea menor que la de la red).

Esto muestra que contrariamente a la resonancia lineal, para una inductancia dada, el fenómeno de la resonancia puede aparecer no sólo para un valor determinado de  $C$  sino para una gran gama de valores de  $C$ .

■ Las diferencias fundamentales entre un circuito ferorrresonante y un circuito resonante lineal son:

- posibilidad de resonancia dentro de una gran gama de valores de parámetros,
- La frecuencia de las ondas de tensiones y de corrientes puede ser distinta de la de la fuente senoidal,
- La existencia de varios regímenes permanentes estables para una configuración y los valores de parámetros dados.

■ La ferorrresonancia puede ser monofásica (caso anterior). Se dice que es trifásica cuando hay un acoplamiento magnético no lineal entre las fases; se dice trimonofásica en la ausencia de acoplamiento entre las tres no-linealidades.

La ferorrresonancia es de tipo serie o paralelo.

### Características principales

Gracias a los métodos adaptados que se detallan a lo largo de este documento, el estudio del circuito de la **figura 3a** permite trazar las curvas representadas en las **figuras 3b** y **3c**. Estas curvas ilustran las características de la ferorrresonancia:

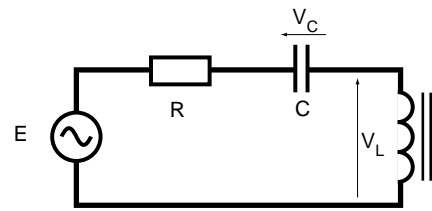
■ Sensibilidad a los valores de los parámetros de la red, fenómeno de salto.

La curva de la **figura 3b** describe la tensión de cresta  $V_L$  en bornes de la inductancia no lineal en función de la amplitud de cresta  $E$  de la fuente de tensión senoidal.

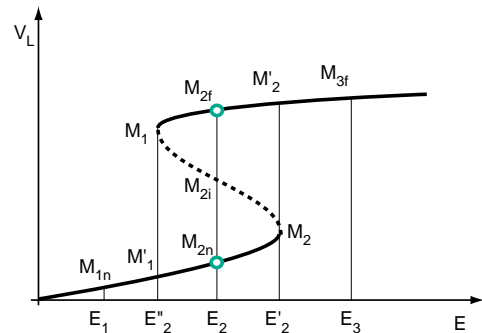
Al aumentar progresivamente la amplitud de cresta  $E$  a partir de cero, la curva de la **figura 3b** ilustra la posibilidad de tres comportamientos distintos según el valor de  $E$  así como el fenómeno de salto:

□ para  $E = E_1$  la solución ( $M_{1n}$ ) es única y corresponde al régimen normal (obtenida en la hipótesis lineal),

a - Circuito de base de ferorrresonancia serie



b - Sensibilidad a los parámetros de la red y fenómeno de salto



c - Sensibilidad a las condiciones iniciales

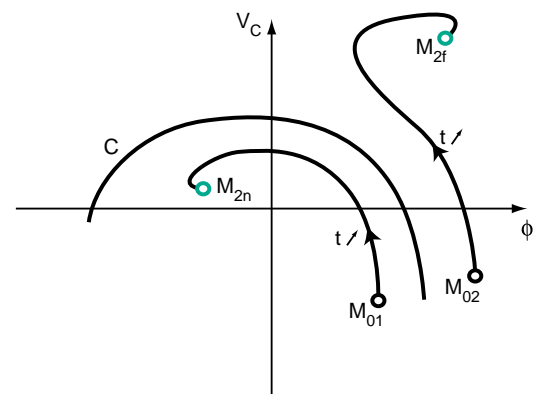


Fig. 3: Ilustración de las características de la ferorrresonancia.

□ para  $E = E_2$  existen tres soluciones ( $M_{2n}$ ,  $M_{2i}$ ,  $M_{2f}$ ), dos de las cuales son estables ( $M_{2n}$  y  $M_{2f}$ ). Una de ellas,  $M_{2n}$ , corresponde al régimen normal y la otra,  $M_{2f}$  al régimen ferorrresonante, la parte de la curva a trazo discontinuo (no puede ser obtenida en la realidad) corresponde a regímenes inestables,

□ para  $E = E'_2$ , la tensión  $V_L$  pasa brutalmente del punto  $M_2$  al punto  $M'_2$  (fenómeno de salto). El punto  $M_2$  se llama punto límite,

□ para  $E = E_3$ , sólo el régimen ferorrresonante ( $M_{3f}$ ) es posible,

□ mientras el valor de  $E$  decrece a partir de  $E_3$ , la solución pasa muy bruscamente del punto  $M_1$  (segundo punto límite) al punto  $M'_1$ . El fenómeno de salto característico de la ferorrresonancia también se puede obtener a partir de otro parámetro de la red (la resistencia  $R$  o la capacidad  $C$ , por ejemplo). Una pequeña variación de un parámetro de la red o del régimen transitorio puede provocar un salto brusco entre dos regímenes estables muy distintos.

■ Sensibilidad a las condiciones iniciales

La obtención de  $M_{2n}$  o de  $M_{2f}$  depende de las condiciones iniciales. La **figura 3c** ilustra las trayectorias del régimen transitorio de los pares ( $\phi, V_c$ ) en función del tiempo para distintas condiciones iniciales ( $M_{01}$  y  $M_{02}$ ). La curva  $C$  determina una frontera. Si las condiciones iniciales (flujo remanente, tensión en bornes del condensador) se encuentran a un lado de la frontera, la solución converge hacia  $M_{2n}$ . Si las condiciones iniciales se encuentran al otro lado, la solución converge hacia  $M_{2f}$ . Como el punto  $M_{2i}$  pertenece a la frontera, cerca de este punto el régimen permanente obtenido es muy sensible a las condiciones iniciales.

### Clasificación de los regímenes ferorrresonantes

La experiencia de las formas de onda presentes en las redes, los experimentos sobre modelos reducidos de redes así como las simulaciones numéricas (digitales) permiten clasificar los regímenes de resonancia en cuatro tipos distintos.

Esta clasificación corresponde al régimen permanente, es decir, después de la extinción de un régimen transitorio. Es difícil distinguir, en un circuito ferorrresonante, el régimen transitorio normal de los regímenes transitorios ferorrresonantes, lo cual no significa que los fenómenos transitorios de ferorrresonancia no puedan ser peligrosos para el material eléctrico. Las sobretensiones transitorias peligrosas pueden, por ejemplo, aparecer varios periodos de red después de un suceso (por ejemplo a continuación de la conexión de un transformador en vacío) y persistir todavía durante varios periodos de red.

Los cuatro tipos de ferorrresonancia que se encuentran son:

- régimen fundamental,
- régimen subarmónico,
- régimen casi-periódico,
- régimen caótico.

Se puede detectar el tipo de ferorrresonancia [13]:

■ bien por el espectro de señales de corrientes y tensiones,

■ bien por una imagen estroboscópica obtenida al medir la corriente  $i$  y la tensión  $v$  en un lugar dado de la red, y trazando en el plano  $v, i$  los valores instantáneos correspondientes a instantes separados por un periodo de red.

Las características de cada tipo de ferorrresonancia pasan a detallarse a continuación:

■ Régimen fundamental (**figura 4a**)

Las tensiones y corrientes son periódicas de periodo  $T$  igual al de la red y pudiendo comportar más o menos armónicos. El espectro de las señales es un espectro discontinuo formado por una fundamental  $f_0$  de la red y sus armónicos ( $2f_0, 3f_0, \dots$ ). La imagen estroboscópica se reduce a un punto alejado del que representa el régimen normal.

■ Régimen subarmónico (**figura 4b**)

Las señales son periódicas de periodo  $nT$  múltiplo del de la red. Este régimen se llama subarmónico  $n$  o armónico  $1/n$ . Los regímenes ferorrresonantes subarmónicos son generalmente de rango impar. El espectro presenta una fundamental igual a  $f_0/n$  (donde  $f_0$  es la frecuencia de la red y  $n$  un número entero) y sus armónicos (la frecuencia fundamental de la red  $f_0$  forma parte pues del espectro). Un trazo estroboscópico hace aparecer  $n$  puntos.

■ Régimen casi-periódico (**figura 4c**)

Este régimen, también llamado pseudo-periódico, no es periódico. El espectro es un espectro de rayas donde las frecuencias se expresan bajo la forma:  $nf_1 + mf_2$  (donde  $n$  y  $m$  son números enteros y  $f_1/f_2$  son números reales irracionales). La imagen estroboscópica muestra una curva cerrada.

■ Régimen caótico (**figura 4d**)

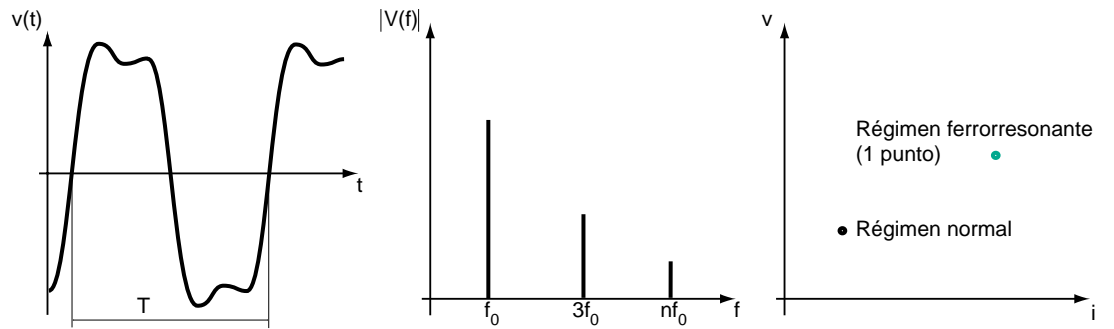
El espectro correspondiente es continuo, es decir, que no se anula para ninguna frecuencia. La imagen estroboscópica está constituida por puntos distintos todos ellos que ocupan una superficie dentro del plano  $v, i$  denominada «atracción extraña».

En conclusión:

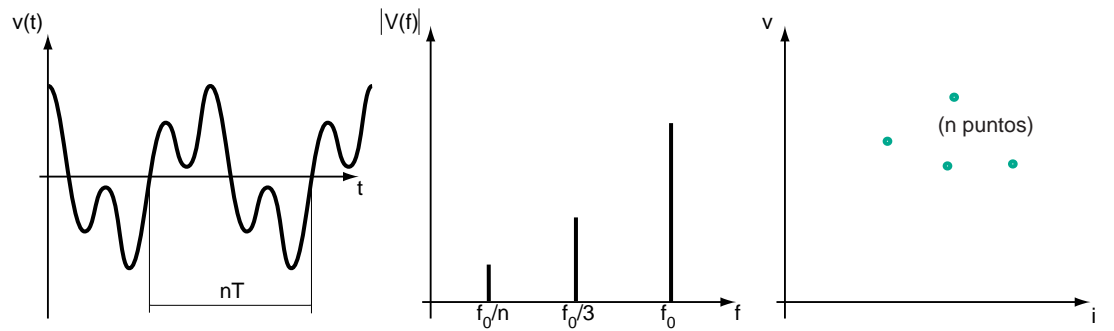
■ El fenómeno de la ferorrresonancia es un fenómeno complejo caracterizado por:

- una multiplicidad de regímenes permanentes para un circuito dado,
- una gran sensibilidad de la aparición de estos regímenes a los valores de los parámetros de la red,

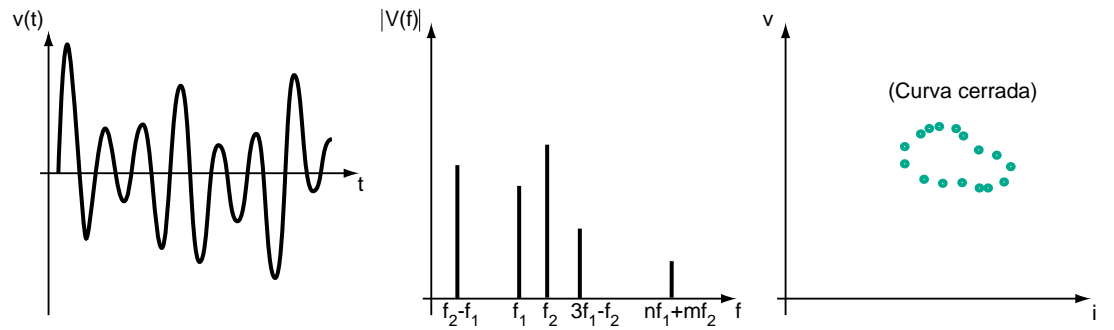
**a - Régimen fundamental**



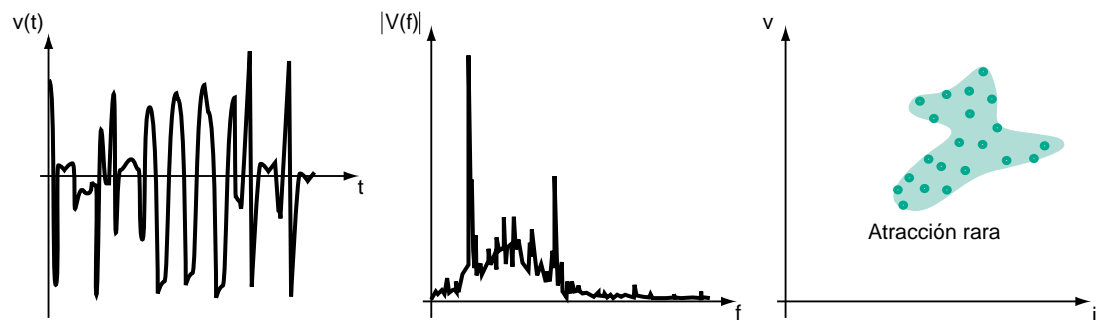
**b - Régimen subarmónico**



**c - Régimen casi-periódico**



**d - Régimen caótico**



**Fig. 4:** Ilustración de las características de la ferrosresonancia.

□ una gran sensibilidad de la aparición de estos regímenes a las condiciones iniciales.

■ Una pequeña variación de alguno de los parámetros de la red o del régimen transitorio puede provocar un salto brusco entre dos regímenes estables muy distintos y desencadenar uno de los cuatro tipos de regímenes permanentes de ferorrresonancia; los regímenes que se encuentran más a menudo son el régimen fundamental y el régimen subarmónico.

■ Las tasas de armónicos anormales, las sobretensiones o las sobreintensidades transitorias o permanentes que provoca la ferorrresonancia son a menudo peligrosas para el material eléctrico.

■ La ferorrresonancia estacionaria se sustenta por la energía suministrada por la tensión de la red.

## 3 Identificar la ferorrresonancia

### 3.1 Elementos de diagnosis

La ferorrresonancia se manifiesta por varios de los siguientes síntomas:

- sobretensiones permanentes elevadas de modo diferencial (entre fases) o de modo común (entre fases y tierra),
- sobreintensidades permanentes elevadas,
- grandes distorsiones permanentes de las formas de onda de tensión y corriente,
- desplazamiento de la tensión del punto neutro,
- calentamiento de los transformadores (en funcionamiento sin carga),
- ruido permanente y excesivamente fuerte dentro de los transformadores y reactancias,
- destrucción de materiales eléctricos (condensadores, TT, TCT, ...) por efectos térmicos o por roturas dieléctricas. Un síntoma característico de la destrucción de los TT por ferorrresonancia es que el enrollamiento primario está destruido y el secundario intacto,
- disparo de protecciones que puede parecer intempestivo.

Alguno de estos síntomas no son propios de un fenómeno de ferorrresonancia. El desplazamiento permanente del punto neutro de una red con neutro aislado puede ser también consecuencia, por ejemplo, de un defecto entre una fase y tierra.

Se puede realizar un diagnóstico inicial comparando las curvas resultantes de las propias medidas con las formas de onda típicas de la ferorrresonancia especificadas en el párrafo anterior (**figura 4**).

Ante la dificultad del diagnóstico (falta de datos, varias posibles interpretaciones de los

síntomas) la primera actuación es analizar la configuración de la red cuando se presenten los síntomas, así como los acontecimientos que los preceden (conexión de transformadores, momento concreto de desarrollo de los procesos industriales, pérdida de carga, ...) y que han podido iniciar el fenómeno.

Por lo tanto es necesario determinar si se reúnen las tres condiciones necesarias, pero no suficientes, para la existencia de la ferorrresonancia:

- conexión simultánea de condensadores y bobinas de inductancia no lineal,
- existencia dentro de la red de al menos un punto cuyo potencial no es fijo (neutro aislado, fusión de un fusible, maniobra unipolar, ...),
- componentes de la red poco cargados (transformadores de potencia o TT en vacío...) o fuentes de pequeña potencia de cortocircuito (alternadores).

Si no se verifica alguna de estas condiciones, la ferorrresonancia es muy poco probable. En caso contrario se necesitarán estudios más exhaustivos.

Se puede efectuar un estudio preventivo. Este estudio implica seguir específicamente los métodos que se detallan a continuación en este Cuaderno Técnico.

Una comparación con los ejemplos de situaciones típicas de redes propicias a la ferorrresonancia puede facilitar la identificación de una configuración propensa al riesgo.

### 3.2 Ejemplos de situaciones de redes eléctricas propicias a la ferorrresonancia

Dada la multitud de capacidades e inductancias que se hallan en una red real y la gran variedad de condiciones de explotación, las condiciones propicias a la ferorrresonancia son innumerables.

La experiencia hace posible citar las configuraciones más típicas que muestran una propensión a la ferorrresonancia. A continuación se dan algunos ejemplos típicos.

#### Transformador de tensión alimentado por la capacidad de un (o de varios) interruptor(es) automático(s) abierto(s)

En THT las maniobras de explotación (enclavamiento de un interruptor automático de corte o de separación de juego de barras, eliminación de un defecto sobre una parte de las barras...) pueden provocar la

ferorrresonancia de los transformadores de tensión (TT) conectados entre fase y tierra.

Estas configuraciones se pueden ilustrar en el circuito de la **figura 5**. La apertura del interruptor automático D inicia el fenómeno al provocar la descarga de la capacidad C a través del TT que se satura [11]. La alimentación del TT a través de los condensadores  $C_d$  (de reparto de tensión entre las cámaras de corte del interruptor automático) inicia el fenómeno.

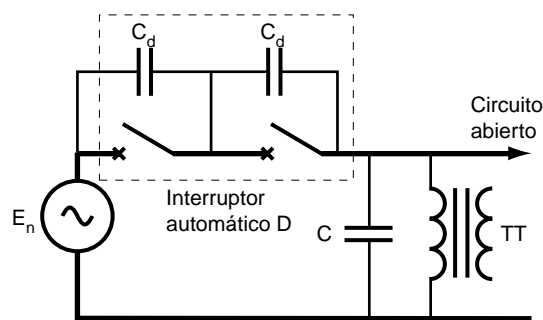
La capacidad C representa el conjunto de las capacidades a tierra del TT y de la conexión alimentada mediante las capacidades del o de los interruptores automáticos abiertos.

La ferorrresonancia es del tipo subarmónico.

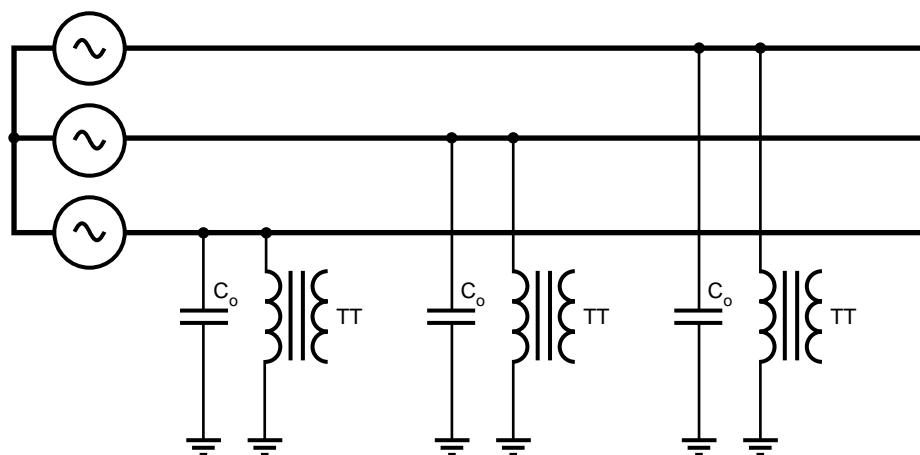
#### Transformadores de tensión (TT) conectados a una red con neutro aislado

Este régimen de neutro puede presentarse por el acoplamiento de una fuente de emergencia con el neutro aislado o por un fallo del sistema de puesta a tierra.

Las sobreintensidades o sobretensiones transitorias debidas, por ejemplo, a ciertas maniobras en la red (pérdidas de carga, eliminación de defecto...) o a defectos a tierra pueden iniciar el fenómeno saturando el circuito magnético de uno o de dos de los TT del circuito ferorrresonante paralelo de la **figura 6**. El régimen ferorrresonante se evidencia por las tensiones entre fases y tierra y por la tensión del punto neutro ( $V_N$ ).



**Fig. 5:** Ferorrresonancia de un transformador de tensión en serie con un dísyuntor abierto.



$C_o$ : capacidad homopolar de la red

**Fig. 6:** Ferorrresonancia de TT entre fase y tierra en una red a neutro aislado.

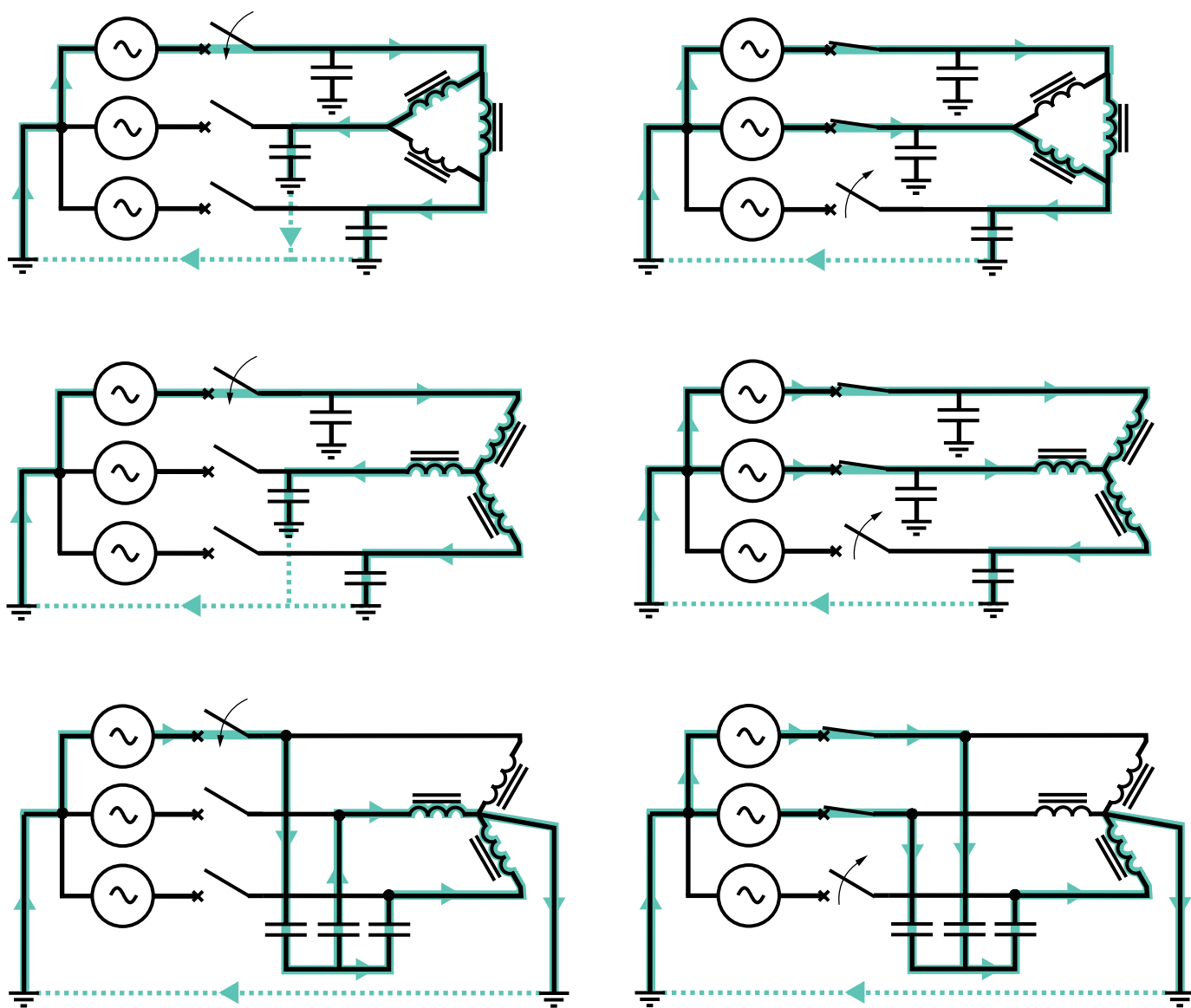
Hay desplazamiento del punto neutro y una subida de la tensión respecto a la tierra de una o de dos fases. Esto puede dar la impresión de un defecto de aislamiento fase-tierra en la red.

Los valores de las sobretensiones pueden sobrepasar en régimen estable los valores de la tensión compuesta y provocar una destrucción dieléctrica del material eléctrico.

Según los valores relativos de inductancia de magnetización del TT y de la capacidad  $C_0$ , la ferrorresonancia es de tipo fundamental, subarmónica o casi-periódica.

### Transformador alimentado accidentalmente sobre una o dos fases

En la **figura 7** se presentan algunos ejemplos de configuraciones propicias a la ferrorresonancia. Éstas aparecen cuando un transformador en vacío o muy poco cargado se alimenta de una red con una o dos fases después de la fusión de un fusible MT, también se presenta cuando se rompe un conductor o se realizan trabajos con tensión, por ejemplo, con ocasión de la conexión de armarios de corte a distancia (ACT). Las capacidades pueden ser las de una línea o un



**Fig. 7:** Ejemplos de sistemas desequilibrados de riesgo para la ferrorresonancia.

cable que alimentan un transformador cuyos arrollamientos primarios están conectados en estrella con neutro aislado, con neutro a tierra, o en triángulo. Por ejemplo, el circuito ferresonante serie se constituye al poner en serie la capacidad fase-tierra (entre el interruptor automático y el transformador) de la fase «abierta» y la impedancia magnetizante del transformador.

Los regímenes son de tipo fundamental, subarmónico o caótico.

En el establecimiento de un determinado régimen intervienen las capacidades entre fases y entre fases y tierra, la conexión de los arrollamientos primarios, secundarios, la estructura del circuito magnético (monofásico, a flujo libre o a flujo forzado), el régimen de neutro y el modo de alimentación.

El fenómeno se produce normalmente cuando el neutro del primario está aislado.

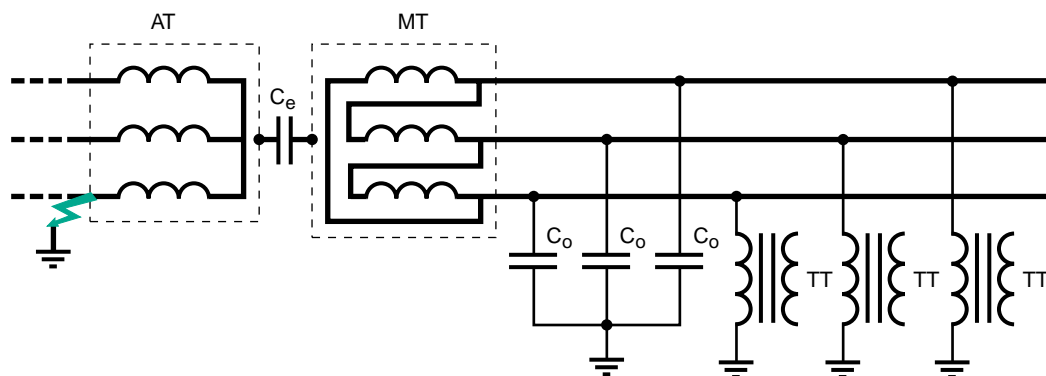
Para evitar riesgos, es bueno utilizar aparataje de corte omnipolar.

### Transformador de tensión y transformadores AT/MT a neutro aislado

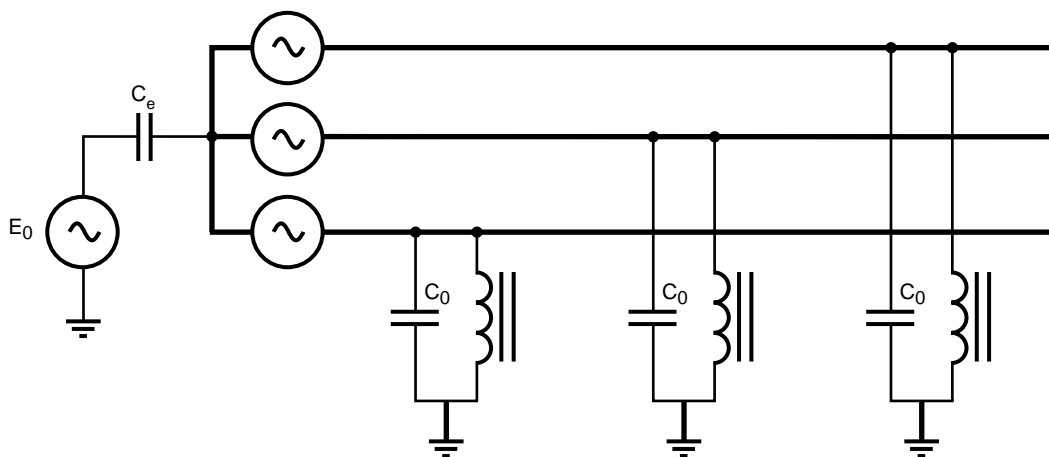
El fenómeno puede producirse cuando los neutros AT y MT están aislados de tierra y los TT se conectan al lado MT entre fase y tierra y no están alimentando ninguna carga (figura 8a).

Cuando hay un defecto a tierra del lado de AT aguas arriba de la estación de transformación, el neutro AT alcanza un potencial elevado. Por efecto capacitivo entre primario y secundario aparecen unas sobretensiones en el lado MT y pueden provocar la

a - Red en defecto



b - Esquema equivalente



$E_0$ : tensión homopolar del lado de AT  
 $C_e$ : capacidad entre devanado AT y MT  
 $C_0$ : capacidad homopolar de la red MT

Fig. 8: Ferrresonancia de TT entre fase y tierra con transformador de fuente a neutro aislado.

ferrorresonancia del circuito constituido por la fuente de tensión  $E_0$ , las capacidades  $C_e$  y  $C_0$  y la inductancia de magnetización de un TT (figura 8b).

Después de que haya desaparecido el defecto AT, la tensión del neutro AT debida a un desequilibrio natural de la red puede ser suficiente para mantener el fenómeno.

La ferrorresonancia es en este caso de tipo fundamental.

#### Red con neutro inductivo

Las dos configuraciones de la figura 9 están predisuestas a que aparezca una ferrorresonancia entre la inductancia conectada entre neutro y tierra y las capacidades fase-tierra de la red.

■ En el caso de redes BT con neutro aislado de tierra, las normas recomiendan (CEI 364) o imponen la instalación de un Controlador Permanente de Aislamiento (CPI) o (CPA). Ciertos CPA miden la impedancia de aislamiento de una red por inyección de una corriente continua entre la red y la tierra. Éstos tienen una impedancia interna básicamente inductiva (baja impedancia para la corriente continua y alta para la frecuencia de red). Pueden contribuir a la ferrorresonancia.

Las sobretensiones pueden provocar una subida de potencial suficiente del punto neutro como para provocar el fenómeno de ferrorresonancia entre la inductancia del CPA y las capacidades entre fase y tierra de la red (figura 9a).

■ En MT para limitar las corrientes de defecto a tierra y favorecer su autoextinción hay que conectar entre el neutro MT de un transformador AT/MT y tierra una bobina (bobina Petersen). Esta bobina  $L$  cumplirá la siguiente condición:  $3 L C_0 \omega_0^2 = 1$ , siendo  $C_0$  la capacidad homopolar de la red MT y  $\omega_0$  la pulsación.

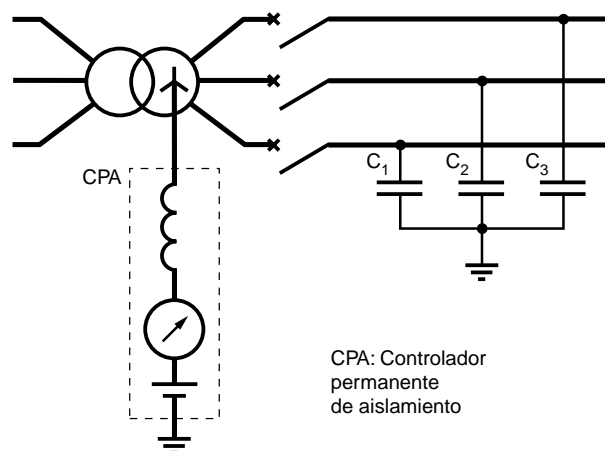
Puede haber excitación y entrada en resonancia del circuito constituido al conectar en serie la inductancia  $L$  y de la capacidad  $3 C_0$  en los siguientes casos:

- neutro del transformador AT/MT puesto a tierra del lado AT y circulación de corriente de defecto AT por la toma de tierra de la subestación transformadora en caso de defecto de AT dentro de la subestación transformadora,
- saturación del circuito magnético de transformador AT/MT,
- disimetría constructiva del transformador,
- disimetría natural de las capacidades ( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  de la figura 9b) entre las fases y la tierra. Esto puede provocar la saturación de la bobina y así iniciar o mantener la ferrorresonancia.

#### Transformador alimentado por una red muy capacitiva y de poca potencia de cortocircuito

El fenómeno de la ferrorresonancia puede aparecer cuando un transformador de potencia, en vacío, se alimenta bruscamente con una fuente de potencia de cortocircuito baja respecto a la potencia nominal del

a - Inductancia interna de un CPA de una impedancia entre neutro y tierra



CPA: Controlador permanente de aislamiento

b - Régimen de neutro compensado

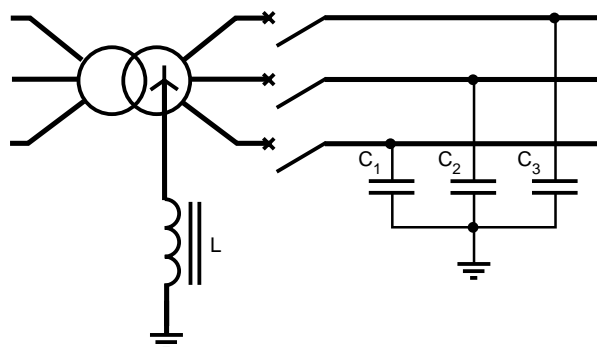


Fig. 9: Ferrorresonancia en el caso de una red a neutro inductivo.



transformador mediante un cable o una línea larga. Este es el caso, por ejemplo, del restablecimiento del servicio de una red MT, pública, urbana o industrial, pero también cuando se conecta una red pública MT rural muy larga (**figura 10**) o cuando la proporción de cables subterráneos aumenta (por fiabilidad y por respeto al medio ambiente).

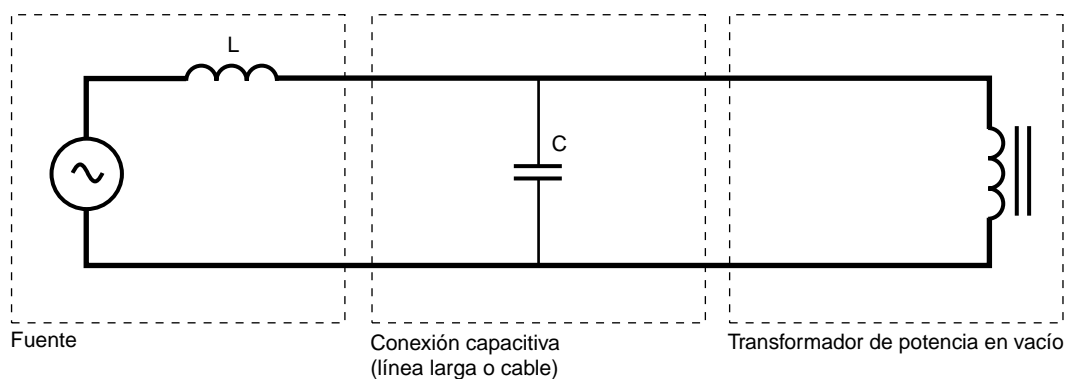
Esta ferorrresonancia paralela (capacidad en paralelo con la inductancia magnetizante del transformador) es generalmente trifásica, a la frecuencia fundamental, o de tipo casi-periódica.

En resumen:

- Las configuraciones de redes eléctricas que pueden quedar afectadas por la ferorrresonancia son innumerables.
- Existen diversos tipos de ferorrresonancia: monofásica, trifásica, de modo común o de modo diferencial.

■ La experiencia permite identificar algunas configuraciones arriesgadas que merecen una especial atención. Éstas son:

- transformador de tensión entre fase y tierra en una red con neutro aislado,
  - conexiones largas y/o capacitivas que alimentan un transformador,
  - protección con fusibles cuya fusión produce un corte no omnipolar,
  - transformador de potencia o de tensión en vacío o poco cargado.
- Los fenómenos que más frecuentemente pueden provocar la ferorrresonancia son:
- maniobra de condensadores y de líneas sin carga,
  - defecto de aislamiento,
  - relámpagos,
  - maniobra de transformadores sin carga.



**Fig. 10:** Esquema equivalente de un transformador de potencia en vacío alimentado por una red capacitiva.

## 4 Evitar o amortiguar la ferorrresonancia

Existen medidas prácticas que permiten protegerse de la ferorrresonancia, cuyas sobretensiones, sobreintensidades y distorsiones provocan sobreesfuerzos térmicos o dieléctricos frecuentemente peligrosos para los materiales eléctricos (destrucción, pérdida de cualidades y envejecimiento prematuro de los aislantes...).

Los distintos métodos prácticos se basan en los principios siguientes:

- evitar, por diseño y/o por las maniobras apropiadas, encontrarse en una configuración propensa a la ferorrresonancia. Esto implica la eliminación de ciertos esquemas de explotación, de ciertas maniobras en las redes y de ciertos tipos de aparamenta,
- evitar que los valores de los parámetros de la red se encuentren (aunque sólo sea temporalmente) en la zona de riesgo y, si es posible, aplicar un margen de seguridad respecto a ésta u otras zonas de riesgo,

■ asegurarse que la energía aportada por la fuente es insuficiente para mantener el fenómeno. Esta técnica consiste en introducir las pérdidas que en caso de ferorrresonancia amortiguan el fenómeno.

La publicación 71 del artículo de la CEI [2] especifica que las sobretensiones temporales de la ferorrresonancia «se deben evitar y limitar». «No se deben considerar como base para la elección de la tensión de un pararrayos o para el diseño de aislantes si estos medios no son suficientes». Esto significa que el procedimiento de coordinación de aislamiento no considera los niveles de sobretensiones debidos a la ferorrresonancia y por consiguiente los pararrayos (cuya tensión residual es en general mucho mayor que las sobretensiones debidas a la ferorrresonancia) no constituyen una protección contra este fenómeno.

### 4.1 Soluciones prácticas

La aplicación de estos principios lleva a recomendar soluciones prácticas, algunas de las cuales se detallan a continuación, especialmente en el caso de algunas configuraciones típicas, citadas en el punto 3.2, propicias a la existencia de ferorrresonancia.

■ En los TT y TCT bien diseñados, se toman las disposiciones constructivas apropiadas para neutralizar el fenómeno.

El caso de TT (con un solo extremo AT aislado) conectados entre fase y tierra a una red con neutro aislado se considera el más propicio al fenómeno de la ferorrresonancia, (provocado por ejemplo por las sobretensiones entre las fases sanas y tierra después de un defecto entre una fase y tierra). Esto es lo que justifica en este caso la instalación de dispositivos especiales contra la ferorrresonancia.

El caso de TT (con los dos extremos AT aislados) conectados entre fases, también puede ser la causa de la ferorrresonancia cuando uno de los TT es susceptible de alimentarse además momentáneamente sobre

una única fase. Éste puede ser el caso por ejemplo de la realización de trabajos bajo tensión, maniobras no simultáneas sobre las tres fases, corte no omnipolar por la fusión de un fusible sobre una sola fase o ruptura de un conductor.

Las soluciones prácticas son:

□ en una red con neutro aislado, evitar conectar los primarios de TT en estrella con neutro (primario) a tierra, sea dejando el neutro de los primarios de los TT aislados, sea utilizando para los TT la conexión triángulo,

□ cuando se utiliza la conexión estrella de los primarios con neutro a tierra (por ejemplo para medir la tensión homopolar) sobre una red con neutro aislado o sobre una red de la que no se sabe el régimen de neutro, se puede:

– bajar mediante la disposición constructiva el valor de la inducción de trabajo del circuito magnético (con valores del orden de 0,4 a 0,7 teslas) de forma que las sobretensiones no puedan iniciar el fenómeno de la ferorrresonancia, con al menos una relación

de 2 entre la tensión de saturación y la tensión asignada,

– introducir pérdidas gracias a una o más resistencias de carga cuyo valor sea suficientemente bajo para amortiguar de forma eficaz el fenómeno, asegurando que la potencia total consumida respeta las condiciones de precisión requeridas.

Método de cálculo (para realizar paso a paso) de las resistencias de carga:

□ Caso de TT con devanado secundario:

Se coloca en el secundario de la carga del TT una resistencia R de amortiguamiento si el consumo aguas abajo no es significativo (figura 11). En este caso, las resistencias absorben permanentemente la potencia mientras los TT están con tensión.

Los valores mínimos recomendados para R y la potencia P<sub>R</sub> de esta resistencia son:

$$R = \frac{U_s^2}{kP_t - P_m}, \quad P_R = \frac{U_s^2}{R}$$

Siendo:

U<sub>S</sub>: tensión asignada secundaria (V),

k: factor comprendido entre 0,25 y 1 de manera que los errores y las condiciones de empleo quedan dentro de los límites especificados por la norma CEI 186 [1] (k P<sub>t</sub> es por ejemplo del orden de 30 W para una potencia de precisión de 50 VA),

P<sub>t</sub>: potencia de precisión del TT (VA),

P<sub>m</sub>: potencia necesaria para la medición (VA).

□ En el caso de TT con dos arrollamientos secundarios (un bobinado secundario de medida más un bobinado secundario de tensión residual, también llamado arrollamiento terciario) se recomienda conectar una resistencia en bornes del triángulo abierto formado por los arrollamientos terciarios de los tres transformadores (figura 12). La ventaja de este dispositivo de amortiguación es que no distorsiona la precisión de la medida y no introduce pérdidas en régimen normal (equilibrado), sino únicamente que amortigua el fenómeno en caso de régimen desequilibrado.

Los valores mínimos recomendados para el valor de la resistencia R y de la potencia P<sub>R</sub> de esta resistencia son:

$$R = \frac{3\sqrt{3}U_s^2}{P_e}, \quad P_R = \frac{(3U_s)^2}{R}$$

Siendo:

U<sub>S</sub>: tensión asignada del secundario del TT, conectado a la resistencia (V),

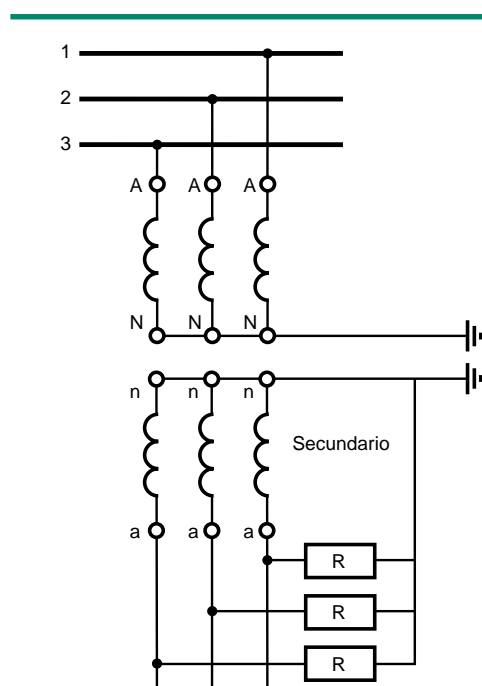


Fig. 11: Dispositivo de protección contra los riesgos de ferorresonancia para TT en secundario.

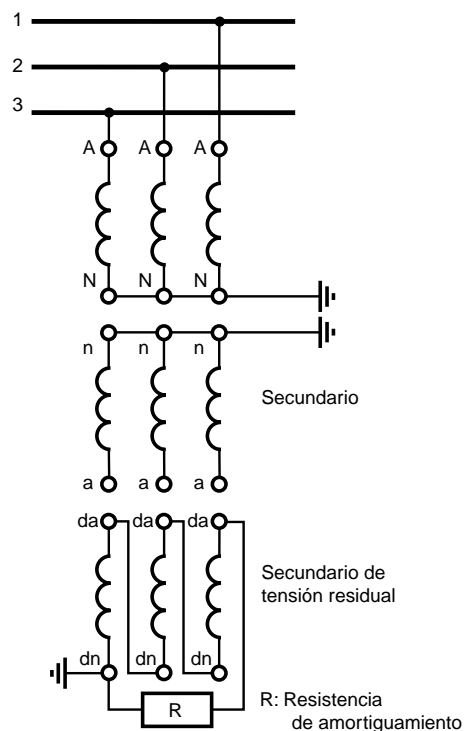


Fig. 12: Dispositivo de protección contra los riesgos de ferorresonancia para TT a dos secundarios.

$P_e$ : potencia de calentamiento del secundario del TT provocada por la resistencia (VA).

La potencia de calentamiento (en VA) es la potencia aparente que el TT puede suministrar al secundario sin sobrepasar los límites de los calentamientos normales, sin exigencia de precisión.

La resistencia R debe escogerse para poder disipar constantemente la potencia  $P_R$ .

Ejemplo:

$$TT = 10000 : \sqrt{3} - 100 : \sqrt{3} - 100 : 3V,$$

$$P_e = 100 \text{ VA}$$

$$(U_S = 100 / 3)$$

$$R = \frac{3\sqrt{3}(100/3)^2}{100} = 57,7 \Omega,$$

$$P_R = (3 \times 100 / 3)^2 / 57,7 = 173 \text{ W}$$

(valor normalizado inmediatamente superior a  $57,7 \Omega : 2 \times 120 \Omega //, 2 \times 140 \text{ W}$ ).

■ Para evitar que un transformador accidentalmente alimentado sobre una o dos fases entre en ferorresonancia (**figura 7**), las soluciones prácticas son las siguientes:

□ bajar el valor de la capacidad entre el interruptor automático y el transformador por debajo de su valor crítico, utilizando por ejemplo una unidad de interruptor automático más cerca del transformador, o colocando los interruptores automáticos justo aguas arriba de los transformadores, no cerrándolos hasta haber restablecido la tensión en las tres fases,

□ evitar usar un transformador que consuma una potencia activa inferior al 10% de su potencia aparente nominal,

□ evitar las conexiones en vacío,

□ prohibir las maniobras monofásicas o la protección por fusible cuya fusión produce un corte unipolar,

□ prohibir los trabajos con tensión en el caso de un conjunto cable-transformador cuando la longitud del cable sobrepasa una cierta longitud crítica,

□ puesta a tierra del neutro del centro de transformación mediante una resistencia,

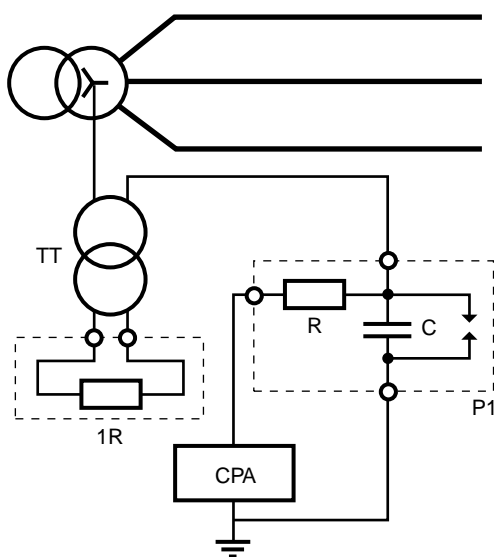
□ puesta a tierra del neutro directa (permanente o solamente en momentos de maniobras de conexión y desconexión) de un transformador donde el primario está en estrella (neutro accesible),

■ Caso de redes a neutro aislado

Para evitar el riesgo de ferorresonancia con CPA que sería demasiado inductivo, se puede instalar una impedancia entre el neutro del transformador y tierra. Ésta es la solución llamada «neutro impedante». Se recomienda una impedancia cuyo valor resistivo puro a 50 Hz es del orden  $1500 \Omega$  en caso de una red corta alimentada por un centro de transformación MT/BT [4].

En MT, los CPA a inyección de corriente continua se asocian según la tensión, sea a un TT cargado por una resistencia (**figura 13**) o bien a una resistencia en serie con el CPA ( $U_n < 5,5 \text{ kV}$ ).

a - Neutro accesible



b - Neutro no accesible

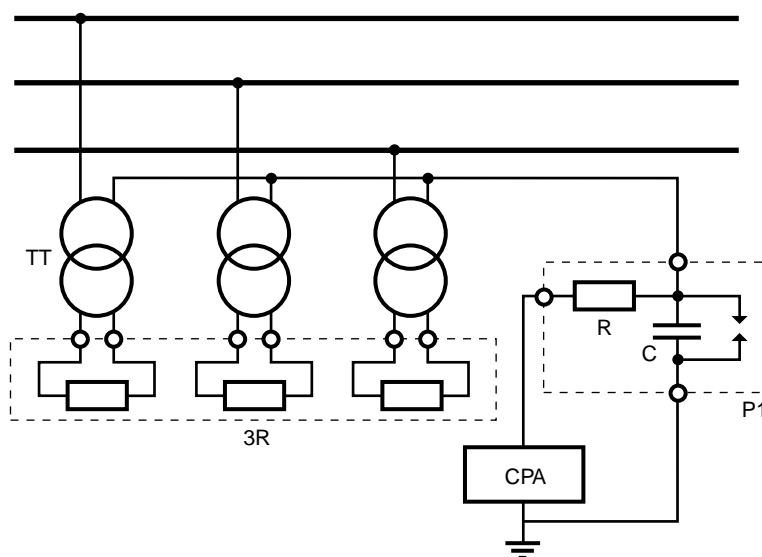


Fig. 13: Auxiliares de CPA.

El punto estrella de los primarios de todos los otros juegos de TT conectados en estrella y conectados a la misma red con neutro aislado, deben también conectarse a tierra a través de una capacidad (pletina P1). Esta disposición es frecuentemente necesaria en las ampliaciones y en el caso de distribuciones.

■ Caso de redes MT con neutro inductivo (figura 9b)

En el caso de una red con neutro compensado, se puede:

□ sobrecompensar la corriente capacitiva de la red desacoplando la inductancia de neutro,

□ añadir una componente resistiva bajando el factor de calidad de la bobina. Sin embargo, la medida tomada no debe comprometer la autoextinción de los defectos de aislamiento a tierra, que es uno de los objetivos del neutro compensado.

■ En el caso de un transformador alimentado por una red capacitiva (figura 10), la mejor solución consiste en evitar encontrarse en la configuración arriesgada donde la potencia activa es inferior al 10% de la potencia nominal del transformador. Este riesgo es importante durante los periodos de poca carga (vacaciones, por la noche).

## 4.2 Criterios prácticos de evaluación

Los sistemas de ecuaciones que describen el comportamiento de los circuitos ferorrresonantes no se pueden resolver de forma analítica, por lo tanto es necesaria una alternativa. Sin embargo, en el caso de un circuito ferorrresonante serie, se puede predecir de forma analítica la ferorrresonancia periódica fundamental (pulsación nominal  $\omega_0$  de la red) y la subarmónica de rango  $n$  (pulsación  $\omega_0/n$  siendo  $n$  un entero).

$L$  es el valor de la inductancia no lineal en régimen no saturado y  $L_S$  corresponde al régimen saturado.

El fenómeno de ferorrresonancia periódica es imposible si se verifica una de las siguientes circunstancias:

■  $\frac{n}{C\omega_0} > \frac{L\omega_0}{n}$

$n$  es el rango del subarmónico (que es igual a uno en el caso de la ferorrresonancia fundamental)

■  $\frac{n}{C\omega_0} < \frac{L_S\omega_0}{n}$

Estos dos criterios se ilustran en la figura 14; la curva de magnetización permite conocer  $L$  y  $L_S$ .

□ El valor de  $L_S$  puede ser suministrado por el constructor.

□ El valor de la inductancia de magnetización de un TT o de la inductancia magnetizante cíclica directa de un transformador de potencia monofásica es:

$$L = \frac{1}{\omega_0} \frac{U_n}{\sqrt{I_0^2 - (P_0/U_n)^2}} \text{ (mH)}$$

Siendo:

$U_n$ : tensión nominal en kV,

$I_0$ : corriente en vacío para  $U_n$  en A,

$P_0$ : pérdidas en vacío para  $U_n$  en kW.

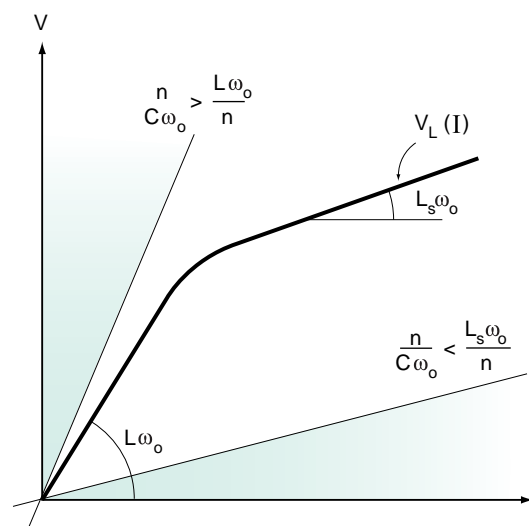


Fig. 14: Valores de  $C$  incompatibles con la ferorrresonancia periódica.

□ En la **figura 15** se dan los órdenes de magnitud de las capacidades homopolares de los cables subterráneos a campo radial con aislamiento sintético y de líneas aéreas. En el caso de los cables, el lector podrá consultar a las fórmulas analíticas de los

fabricantes de los cables o a las tablas de valores de la norma NF C 33-220.

□ Por último, para mantener la ferorrresonancia, es necesario que el acoplamiento a la fuente sea capaz de compensar las pérdidas del circuito [10].

Cables con campo radial y aislamiento sistético				Líneas aéreas				
Tensión asignada Uo/U(Um) (kV)	Sección (mm <sup>2</sup> )	CP	EPR	20 kV	90 kV	150 kV	220 kV	400 kV 2 ternas + cable guarda
5,8/10 (12)	16	0,17	0,21	5 x 10 <sup>-3</sup>	4,8 x 10 <sup>-3</sup>	5,6 x 10 <sup>-3</sup>	5,5 x 10 <sup>-3</sup>	7,1 x 10 <sup>-3</sup>
	240	0,43	0,52					
8,7/15 (17,5)	25	0,16	0,19					
	240	0,34	0,41					
12/20 (24)	35	0,15	0,18					
	240	0,28	0,35					

**Fig. 15:** Capacidades homopolares (en  $\mu F/km$ ) de los cables y de las líneas (órdenes de magnitud).

## 5 Estudios para prever o comprender

La finalidad es predecir los riesgos de la ferrorresonancia para el conjunto de los valores posibles de los parámetros de una red bajo las condiciones normales o excepcionales de explotación y tomando en cuenta las modificaciones futuras de la instalación. Es por lo tanto posible conocer el

margen de seguridad en relación a una zona vecina peligrosa y tomar contramedidas. Una respuesta fiable y creíble a esta cuestión pasa por la utilización de métodos numéricos bien adaptados al estudio de ciertos tipos de regímenes ferrorresonantes.

### 5.1 Ejemplo de estudio

A continuación se explica la puesta en marcha y la explotación práctica de estos métodos.

#### ■ El caso estudiado

Con el fin de reducir el tiempo de corte en caso de accidente, las compañías suministradoras de redes públicas rurales MT accionan a distancia los interruptores-seccionadores.

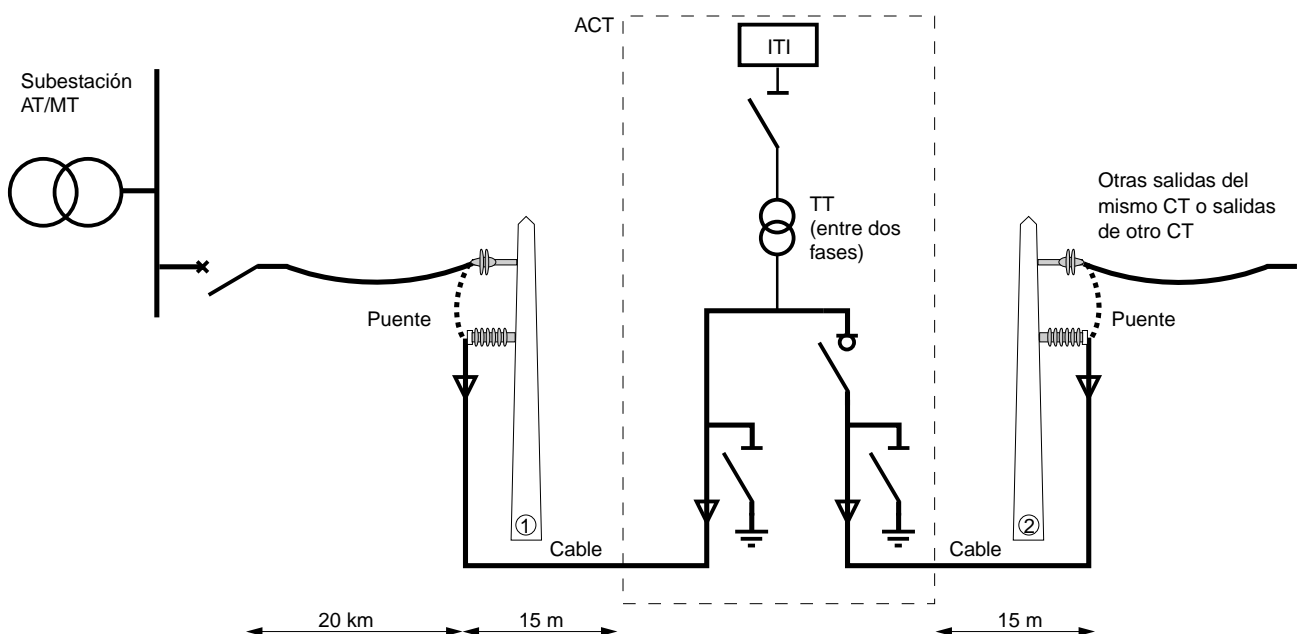
La **figura 16** representa el caso de un armario de corte de telemando puesto a tierra y conectado a una red aérea MT a través de una conexión aérea-subterránea.

Un transformador de tensión TT conectado entre dos fases (fase 1 y fase 3) asegura la

alimentación BT autónoma del armario de telemando de tipo ITI (interfaz de telemando del interruptor).

El estudio está motivado por la destrucción por explosión de TT en distintas instalaciones del mismo tipo, durante la realización de trabajos bajo tensión (conexión de puentes de conexión de la línea aérea a una de las dos conexiones aéreo-subterránea).

La explosión del TT se ha constatado que tiene lugar entre 5 y 55 minutos (según el caso) después de poner los puentes de la fase 1 del poste ① (interruptor-seccionador cerrado y puentes del poste ② no colocados).



**Fig. 16:** Armario de corte telemando (ACT), puesto a tierra, conectado a una red de MT aérea.

Parámetros de la red estudiada:

TT: 20 000/230 V, 100 VA,

Centro de transformación AT/MT:

63/21 kV, 10 MVA,

Resistencia de puesta a tierra del neutro:

40  $\Omega$ ,

Línea aérea de 20 km entre la central y el CT AT/MT y el poste ①,

Conexiones ACT-poste: 15 m de cable, 150 mm<sup>2</sup>, Aluminio.

A las frecuencias de trabajo (50 Hz y subarmónicos), la línea aérea se puede modelizar por su impedancia longitudinal. El esquema equivalente es el de la **figura 17a**.

Siendo:

$e(t)$ : fuente de tensión senoidal

$e(t) = E \cos(100 \pi t)$

$E = 21000 \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3} = 17000$ .

$R$ : resistencia de neutro + resistencia propia del transformador AT/MT + resistencia propia longitudinal de la línea aérea.

$L$ : inductancia propia del transformador AT/MT + inductancia propia longitudinal de la línea aérea.

$C_0$ : capacidad homopolar de los 30 m de cable ( $C_0 = 6,7$  nF).

$L_p$ : inductancia (no lineal) de magnetización del TT vista del lado primario. Su característica se determina a partir de las medidas tensión-corriente (curva de magnetización) efectuadas sobre el TT en vacío.

$R_p$ : resistencia del devanado primario.

$R_2$ : resistencia equivalente a las pérdidas en el hierro y a las pérdidas por histéresis.  $R_2$  se supone constante e independiente de la tensión eficaz y del flujo punta.

Este circuito puede simplificarse a la forma del esquema representado en la **figura 17b**.

Este circuito de ferorrresonancia serie es propicio a la ferorrresonancia.

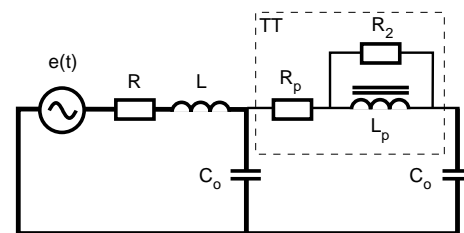
La aplicación de métodos adaptados permite estudiar la posibilidad de ferorrresonancia entre el TT y la capacidad fase-tierra de los 30 metros de cable conectados a la fase libre (no conectada a la fuente) del TT.

■ Determinación de las zonas de riesgo

El diagrama de bifurcación  $\hat{\phi}(E)$  de la **figura 18** muestra que para los valores de los parámetros de la red es posible un régimen ferorrresonante (punto  $M_f$ ) a la tensión simple de la red (17 kV).

La zona de riesgo se sitúa por debajo de la línea de bifurcación en trazo verde representada en la **figura 19** en el plano (C,E)

a - Esquema monofásico equivalente



b - Esquema simplificado

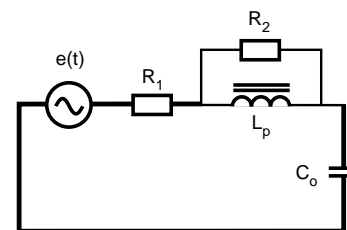


Fig. 17: Puesta del tirante de la fase 1 del poste ①.

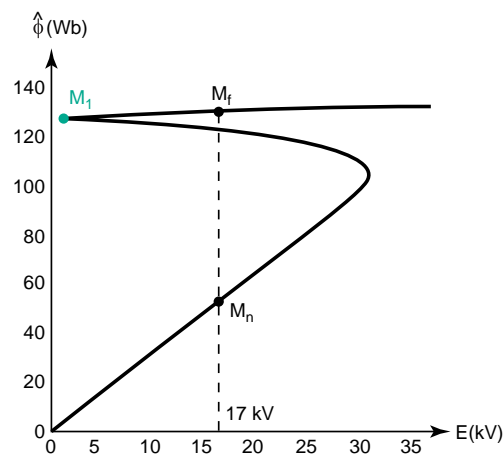


Fig. 18: Diagrama de bifurcación.

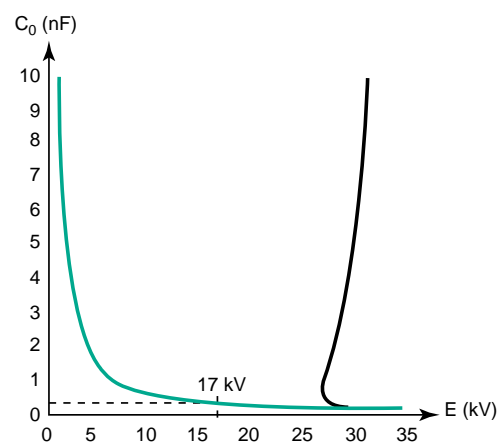


Fig. 19: Líneas de bifurcación.



(lugar de los puntos M<sub>1</sub> del diagrama de bifurcación de la **figura 18**). El valor de la capacidad de 6,7 nF se sitúa ampliamente dentro de la zona de riesgo.

Esta condición no es suficiente para concluir que el fenómeno pueda producirse en la práctica.

■ Simulaciones numéricas temporales

La cuestión es saber si los valores de condiciones iniciales posibles permiten la desactivación de la ferorrresonancia. Una simulación numérica temporal del circuito trifásico permite responder.

En el caso que nos interesa, la capacidad del cable se descarga y por tanto, las condiciones iniciales se determinan principalmente por las condiciones de la conexión de una fase de la conexión aéreo-subterránea. Estas condiciones de conexión dependen directamente del operador y no son comparables a las de una conexión mediante interruptor.

Las formas de ondas obtenidas por simulaciones y representadas en las **figuras 20a y 20b** demuestran que ciertos métodos de trabajo bajo tensión pueden ayudar a provocar un régimen ferorrresonante permanente.

■ Resistencia del material a los sobreesfuerzos

Es necesario determinar si este régimen es peligroso para el material eléctrico y si permite explicar la destrucción de los TT. Puesto que las sobretensiones calculadas en bornes del TT en el régimen ferorrresonante que se establece son inferiores a la tensión asignada de resistencia dieléctrica del TT a la frecuencia industrial (50 kV<sub>ef</sub>/1 min, o sea,

70 kV de pico) hay que estudiar la posibilidad de destrucción térmica o mecánica.

Puesto que la tensión de cortocircuito de un TT es el 2,5%, éste soporta por construcción como mínimo, los efectos mecánicos y térmicos de una corriente de cortocircuito de 40 I<sub>n</sub> durante 1 s (CEI 186). Esto permite calcular el tiempo t<sub>min</sub> de fatiga térmica con I<sub>ef</sub>:

$$(40 I_n)^2 \times 1 \text{ s} = (I_{ef})^2 \times t_{min}$$

$$\text{de donde } t = \frac{(40 \times 100 / 20000)^2}{(0,13)^2} = 2,4 \text{ s}$$

Por tanto, existe al menos un régimen ferorrresonante que lleva a la destrucción del TT por efecto térmico. Es necesario pues tomar precauciones especiales.

■ Soluciones

En este caso concreto se pueden proponer métodos de mejora como por ejemplo:

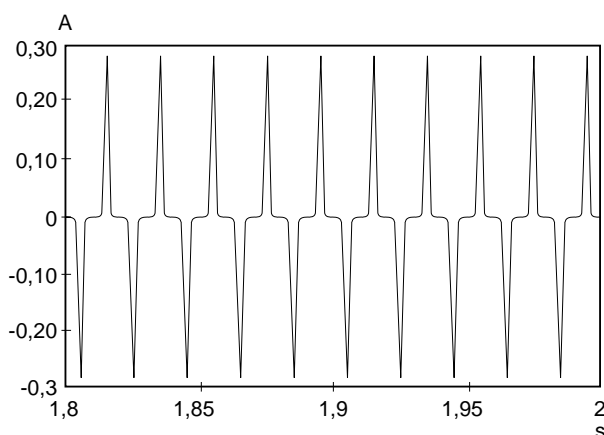
□ cargar el secundario del TT: los métodos numéricos adaptados permiten determinar el valor de esta carga,

□ efectuar las maniobras sin tensión,

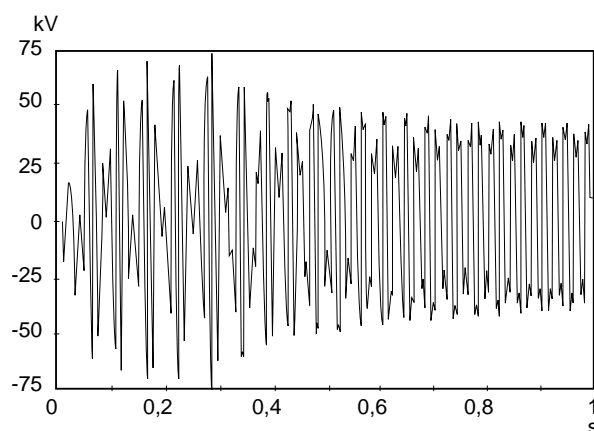
□ modificar el procedimiento de conexión. Se trata aquí, ante todo, de colocar los tres puentes del poste ②, estando el interruptor seccionador abierto. A continuación se cierra el interruptor sobre las tres fases alimentando simultáneamente las dos fases del TT. A continuación se pueden colocar los tres puentes del poste ①.

Los métodos aplicados en este estudio, y otros más, se presentan a continuación.

a - Corriente primaria del TT



b - Tensión primaria del TT



**Fig. 20:** Simulación numérica temporal.

## 5.2 Modelización, aproximación matemática

Los medios de estudio de los problemas electromagnéticos transitorios y de la ferorrresonancia son:

- la simulación analógica

Basada en una representación en modelo reducido de los elementos de la red, presenta la ventaja de obtener resultados en tiempo real pero con el inconveniente de la dificultad de representar un caso real con precisión.

- la simulación numérica temporal en transitorio

La resolución del sistema de ecuaciones que describe el comportamiento de la red necesita la utilización de medios informáticos. En el caso de la ferorrresonancia, los regímenes transitorios suelen ser largos, y por tanto, los tiempos de simulación importantes y los estudios costosos.

Puesto que el fenómeno de la ferorrresonancia es muy sensible a los valores de los parámetros y a las condiciones iniciales que normalmente son poco conocidas en la práctica; hay que hacer un estudio para cada posible combinación. Pero esto es poco realista. Los métodos anteriormente citados no se adaptan bien a la búsqueda de una visión global del comportamiento de la red. Para paliar los inconvenientes de estos métodos las matemáticas han desarrollado los siguientes métodos:

- métodos de cálculo directo del régimen permanente

Permiten calcular las soluciones en régimen permanente sin pasar por el cálculo del régimen transitorio, generalmente muy largo en el caso de la ferorrresonancia.

- método de continuación

El cuadro matemático adaptado al estudio global del comportamiento de los sistemas dinámicos es la teoría de las bifurcaciones donde la herramienta principal es el método de continuación. Utilizado conjuntamente con los métodos de cálculo directo del régimen permanente, permite determinar las zonas de riesgo.

Nótese que la simulación numérica temporal conserva un cierto interés. Esto permite:

- confirmar los resultados de otro método, para una configuración y valores de los parámetros determinados,
- precisar las formas de onda así como los niveles de sobretensiones y sobreintensidades correspondientes, gracias a una fina modelización de los elementos de la red.

### Métodos numéricos de cálculo de régimen permanente

Las matemáticas han desarrollado métodos frecuenciales o temporales que permiten calcular las soluciones en régimen permanente sin pasar por el cálculo del régimen transitorio.

Los métodos siguientes permiten estudiar la ferorrresonancia periódica (fundamental subarmónica).

El principal método frecuencial es el método Galerkin.

Los principales métodos temporales son el método del punto fijo de la aplicación de Poincaré y el método de las perturbaciones.

- Métodos de Galerkin

Este método consiste en buscar una solución aproximada del sistema de ecuaciones diferenciales no lineales que describen el comportamiento de una red. La solución se descompone en una serie de Fourier limitada al rango  $k$  para resolver las soluciones periódicas. La incógnita se sustituye por su expresión. Lo que lleva a un sistema de  $2k + 1$  ecuaciones y  $2k + 1$  incógnitas (los coeficientes del desarrollo de la serie de Fourier).

- Método del punto fijo de la aplicación de Poincaré

Siendo una solución periódica de periodo  $nT$ , el método consiste en buscar de forma iterativa una solución invariante para una simulación numérica del sistema sobre el periodo  $nT$ .

- Método de las perturbaciones

El método consiste en simplificar un sistema de ecuaciones que describe el comportamiento del circuito anulando ciertos parámetros tales como la pérdida y la amplitud de la fuente de tensión. Después de haber resuelto la ecuación así obtenida, los términos anulados se introducen mediante un desarrollo limitado alrededor de la solución anteriormente obtenida. Este método es especialmente interesante cuando se asocia al método de continuación.

### Método de continuación

Este método numérico basado en el procedimiento iterativo permite el estudio de la influencia de un parámetro (por ejemplo la amplitud de la fuente de tensión) sobre las soluciones (por ejemplo el flujo en un transformador) de las ecuaciones que describen el sistema. Los puntos de la curva

de las soluciones, se obtienen por aproximación a partir de una solución conocida: Conociendo una solución  $x_0$  correspondiente al valor  $E_0$  del parámetro escogido, la solución vecina  $x_1$  se obtiene inicializando la resolución del sistema para la solución  $x_0$  y el valor vecino  $E_1$  del parámetro. La curva así obtenida por aproximación, se llama diagrama de bifurcación.

En el circuito ferorrresonante, el método usado es uno de los utilizados en régimen permanente, lo que permite aproximar las condiciones iniciales.

■ Diagramas de bifurcación

Para el circuito ferorrresonante serie de la figura 21a los ejemplos de diagramas de bifurcación según la amplitud  $E$  de la fuente de tensión para dos valores ( $R_a$  y  $R_b$ ) de la resistencia paralela  $R_2$  se trazan en la figura 21b. Para un valor de  $R_2$  dado, estas curvas ponen en evidencia dos puntos particulares ( $M_1$  y  $M_2$  para  $R_2 = R_a$ ) llamados puntos límite para los cuales hay cambio de estabilidad.

■ Líneas de bifurcación

Para cada uno de los puntos  $M_1$  y  $M_2$  es posible determinar el valor de  $E$  correspondiente llamado valor crítico ( $E_1$  para el punto  $M_1$  y  $E_2$  para el punto  $M_2$ ).

El trazo, dentro del plano de dos parámetros, por ejemplo  $E$  y  $R_2$ , de los pares  $(E_1, R_2)$  y  $(E_2, R_2)$  correspondientes a los puntos singulares para los diferentes valores de  $R_2$ , permite obtener las curvas (figura 21c) que representan la frontera entre dos regímenes de funcionamiento distintos, el normal y el ferorrresonante. Las curvas así obtenidas se llaman curvas de bifurcación.

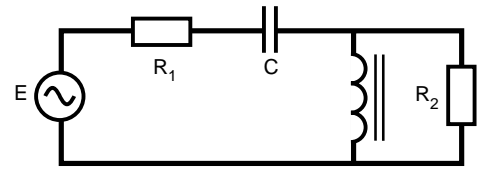
También es posible trazar líneas de bifurcación en el plano de diferentes pares de parámetros tales como por ejemplo  $(R_2, C)$  o  $(R_1, E)$ .

■ Zonas aisladas o separadas (isolat)

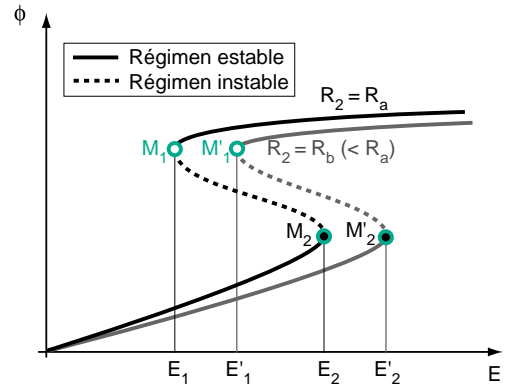
Los diagramas de bifurcación de la figura 21b corresponden al caso de la ferorrresonancia fundamental. Estas curvas pasan en efecto por la solución evidente  $(0,0)$ . A partir de este punto, el usuario puede iniciar el método de continuación.

En cambio, la continuación de los «isolats», que son las curvas cerradas, es más delicada. Es necesario conocer una solución aparente a esta curva aislada para iniciar el método de continuación. La utilización del método de las perturbaciones permite obtener esta solución. Las curvas obtenidas corresponden a una frecuencia diferente de la de la fuente de tensión, como por ejemplo el «isolat» subarmónico representado en la figura 22.

a - Circuito ferorrresonante serie



b - Diagrama de bifurcación según E



c - Líneas de bifurcación en el plano R, E

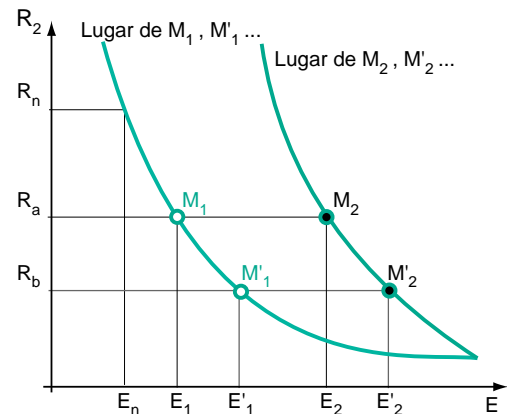


Fig. 21: Diagramas y líneas de bifurcación.

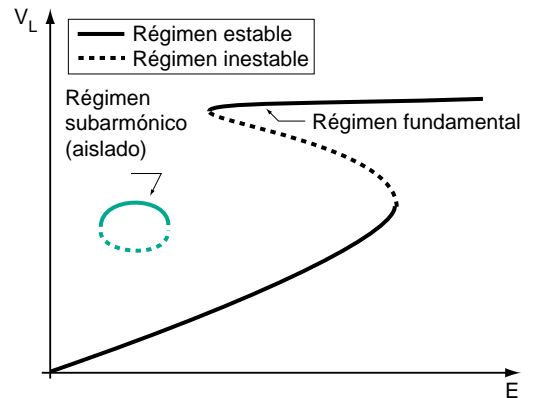


Fig. 22: Zonas aisladas de un régimen subarmónico.

Para una tensión  $E$  comprendida entre las extremidades de la zona aislada, la mínima perturbación puede hacer pasar al sistema de la curva verde a la curva negra y viceversa.

■ Uso práctico de los diagramas de bifurcación

Conociendo los valores de los parámetros del circuito (y en particular  $R_2$  igual a  $R_a$ ) la **figura 21b** muestra que mientras  $E$  se mantenga inferior a  $E_1$ , no se puede mantener un régimen permanente ferorrresonante fundamental.

■ Uso práctico de las líneas de bifurcación

Si bajo todas las condiciones de explotación de la red, la amplitud  $E$  de la fuente de tensión es inferior a  $E_n$ , la **figura 21c** muestra

que el valor de una resistencia  $R_2$  inferior a  $R_n$  garantiza la ausencia de ferorrresonancia fundamental.

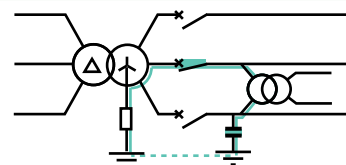
Dada la imprecisión en los valores de los parámetros de la red, el truco consiste en tomar un margen de seguridad con relación a los dominios de riesgo.

Hay que precisar que todos los regímenes situados en las zonas de riesgo cuyas fronteras están constituidas por las líneas de bifurcación no se alcanzan necesariamente en la práctica, porque hace falta que ciertas condiciones iniciales especiales sean verdaderas. Las simulaciones numéricas temporales permiten determinar si estas condiciones iniciales son posibles en la práctica.

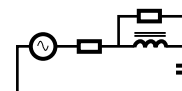
### 5.3 Recapitulación

He aquí el plan de un estudio de ferorrresonancia tratado según los métodos que se han descrito. Se detallan, por orden, las diversas etapas de un plan de estudio.

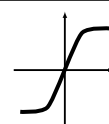
1 Identificación de una configuración de riesgo



2 Simplificación del circuito



3 Determinación de los parámetros de la red:  
– característica no lineal de la inductancia,  
– variaciones y tolerancias de  $R$  y  $C$ .



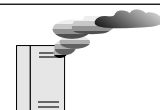
4 Determinación de los dominios de riesgo (visión global):  
– método de continuación,  
– método de cálculo del régimen permanente.



5 ¿En la práctica, las condiciones iniciales llevan a una situación de riesgo? Simulaciones numéricas temporales.



6 Consecuencias en los esfuerzos térmicos, mecánicos y dieléctricos del material.



7 Propuesta de soluciones.



## 6 Conclusión

El riesgo de ferrorresonancia se ha de tener en cuenta desde que se empieza el diseño de una instalación eléctrica. Igualmente es necesario permanecer vigilante en cuanto al mantenimiento y a la extensión de la red. Para evitar esos riesgos hay que conocer las configuraciones peligrosas y las condiciones de existencia del fenómeno. Si una configuración supuestamente arriesgada es inevitable, sólo un estudio en profundidad puede evaluar los riesgos y evaluar la eficacia de los posibles remedios.

El diseñador-instalador de la red AT y BT ha de tomar una serie de precauciones para evitar este fenómeno curioso y a menudo peligroso.

Esto le debe llevar a hablar con expertos.

El usuario suele tener algunos elementos de diagnóstico gracias a los cuales sospechará de la existencia de ferrorresonancia, pero sería abusivo atribuirle cualquier avería inexplicable.

Parece interesante recordar brevemente los fenómenos que desencadenan la ferrorresonancia y las configuraciones de riesgo:

■ Algunos ejemplos de fenómenos susceptibles de provocar la ferrorresonancia:

- maniobras de condensadores,
- defectos de aislamiento,
- rayos,
- maniobras de transformadores.

■ Algunas configuraciones con riesgo que merecen una especial atención:

- transformador de tensión (TT) entre fase y tierra de una red con neutro aislado,
- conexiones largas y/o capacitivas que alimentan a un transformador,
- protección por fusibles cuya fusión conduce a un corte no omnipolar,
- transformador de tensión o de potencia en vacío o poco cargado,
- transformador de tensión que trabaja en el límite de la saturación,
- transformador de tensión sobredimensionado en potencia.

Al lector que desee ampliar conocimientos al respecto se le invita a consultar la bibliografía citada en este mismo documento.

# Anexo 1: Bibliografía

## Normas

- [1] CEI 186: Transformadores de tensión
- [2] CEI 71: Coordinación del aislamiento

## Cuadernos Técnicos

- [3] Puesta a tierra del neutro en una red industrial MT. F. SAUTRIAU. Cuaderno Técnico Merlin Gerin nº 62.
- [4] Esquemas de conexión a tierra en BT (regímenes de neutro). B. LACROIX, R. CALVAS. Cuaderno Técnico Merlin Gerin nº 172.
- [5] Sobretensiones y coordinación de aislamiento. D. FULCHIRON. Cuaderno Técnico Merlin Gerin nº 151.
- [6] Las perturbaciones por armónicos en redes industriales y su solución. P. ROCCIA, N. QUILLON. Cuaderno Técnico Merlin Gerin nº 152.
- [7] Armónicos: convertidores «limpios» y compensadores activos. E. BETTEGA, J.N. FIORINA. Cuaderno Técnico Merlin Gerin nº 183.

## Bibliografía diversa

- [8] Revue des phénomènes de ferrorésonance dans les réseaux haute tension et présentation d'un modèle de transformateur de tension pour leur prédétermination. N. GERMAY, S. MASTERO, J. VROMAN. CIGRE, sesión de 1974-21-29 agosto.
- [9] Ferrorésonance in a transformer switched with an EHV line. E.J. DOLAN, D.A. GILLIES, E.W. KIMBARK. IEEE Power Apparatus and Systems, 1972.
- [10] Contribution théorique et expérimentale à l'étude des phénomènes de ferrorésonance monophasée, P. MAHY. SRBE, marzo 1972.
- [11] Transformateurs de mesure-Généralités. Théorie. Fonctionnement. J.P. DUPRAZ. D 4720, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique.
- [12] Ferrorésonance study using Galerkin Method with pseudo-arclength continuation method. G. KIENY, G. LE ROY, A. SBAI. IEEE PWD. Vol. 6, Nº.4, Octubre 1991.
- [13] Ferrorésonance dans les réseaux. C. KIENY, A. SBAI. D 4745. Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique.

## Anexo 2: Guía de elección de las resistencias de carga de los TT

Secundario de tensión residual en triángulo abierto, cerrado sobre una resistencia

Tensión secundaria asignada	Potencia de calentamiento del secundario cerrado por la resistencia	Resistencia mínima calculada (W)	Elección práctica	
			Resistencia normalizada (W)	Potencia disipada en
$\frac{100}{3}$	50	115,5	120	83
	100	57,7	2 x 120 en //	2 x 83
	200	28,9	2 x 100 en //	2 x 100
$\frac{110}{3}$	50	139,7	150	80,7
	100	69,9	2 x 150 en //	2 x 80,7
	200	34,9	2 x 100 en //	2 x 121
$\frac{100}{\sqrt{3}}$	50	346,4	390	77
	100	173,2	2 x 390 en //	2 x 77
	200	86,6	2 x 220 en //	2 x 136
$\frac{110}{\sqrt{3}}$	50	419,2	470	77
	100	209,6	2 x 470 en //	2 x 77
	200	140,8	2 x 390 en //	2 x 93