

SOBRETENSIONES EN SISTEMAS DE POTENCIA

Autor: Dr.-Ing. Eduardo Orduña

INDICE DE CONTENIDO

- 1. Introducción. Definición de Fenómeno Transitorio**
- 2. Transitorios en sistemas a parámetros concentrados**
 - 2.1 Circuito RC**
 - 2.2 Circuito serie RL**
 - 2.3 Circuito LC**
 - 2.4 Circuito serie RLC**
- 3. Análisis de algunos procesos transitorios típicos**
 - 3.1 Tensión de restablecimiento**
 - 3.2 Desconexión de cargas capacitivas con reencendido.**
- 4. Transitorios en circuitos a parámetros distribuidos**

SOBRETENSIONES EN SISTEMAS ELECTRICOS

1. Introducción. Definición de Fenómeno Transitorio

Un fenómeno transitorio tiene lugar siempre que un sistema, operando en cierto régimen estacionario, es forzado por alguna perturbación a funcionar en un régimen diferente. El cambio de régimen no se produce en forma instantánea, sino que requiere un cierto tiempo. Este tiempo es el período transitorio.

Como se verá, durante ese período las tensiones o corrientes pueden alcanzar valores mayores que en los estados estacionarios inicial y final, de modo que aunque los sistemas eléctricos operan la mayor parte del tiempo en régimen estacionario, los mayores esfuerzos los soportan durante los transitorios.

Los transitorios electromagnéticos se deben fundamentalmente al intercambio de energía entre el campo eléctrico y el campo magnético del sistema. Son en general de breve duración (desde algunas milésimas de segundos hasta un segundo) y resultan importantes por las sobretensiones que producen. En la práctica junto con los transitorios electromagnéticos se estudian otros fenómenos que no son transitorios en el sentido estricto, sino regímenes estacionarios de corta duración en los que se presentan sobretensiones elevadas. Por ejemplo las sobretensiones en las fases sanas durante un cortocircuito monofásico en sistemas con neutro aislado. En este caso, después de un transitorio electromagnético muy breve y con sobretensiones que no son muy importantes, aparecen en las fases sanas tensiones a tierra de 50 Hz. iguales a la tensión de línea. Esta situación se prolonga hasta la apertura trifásica o hasta la extinción de la falla.

Cualquiera sea su origen, el valor máximo no es el único parámetro que determina la severidad de una sobretensión, también son importantes su duración y la forma de onda.

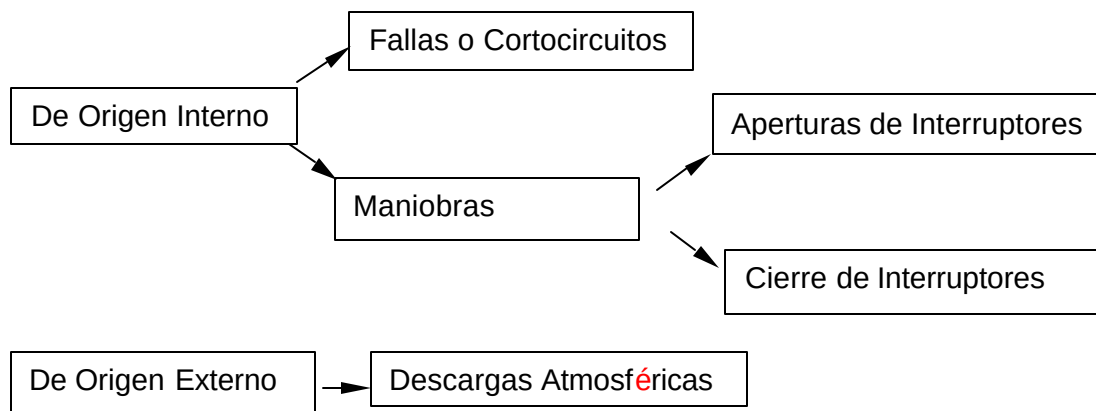
La sobretensión que puede soportar una cadena de aisladores depende de su duración. La formación del canal de descarga requiere un cierto tiempo. La descarga no se produce si la sobretensión desaparece antes que el canal se haya formado.

Por otra parte una sobretensión modesta y prolongada puede exigir térmicamente mucho más a los descargadores de Oxido de Zinc que otra más elevada pero breve.

Cuando la tensión supera cierto valor la corriente empieza a fluir por estos descargadores que entonces consumen la potencia ($P=VI$). Esta se convierte en calor y la temperatura del descargador sube (tanto más rápido cuanto mayor sea $P=VI$). Si la situación se prolonga demasiado, la temperatura se eleva excesivamente y el descargador se rompe.

El estudio del comportamiento transitorio del sistema frente a las distintas perturbaciones que pueden afectarlo permite definir algunas medidas para limitar esas solicitaciones y calcular la aislación necesaria para soportarlas.

Las perturbaciones que afectan a los sistemas eléctricos y que interesan desde el punto de vista de los transitorios electromagnéticos pueden ser:



Las sobretensiones de origen interno tienen una duración de algunos milésimos de segundo hasta un segundo y su valor máximo es en cierta medida proporcional al nivel de tensión del sistema donde se producen. Por ejemplo, al energizar una línea las sobretensiones que pueden producirse están en el orden del doble de la tensión fase tierra.

Por el contrario, las sobretensiones producidas por los rayos son muy breves: duran desde algunas millonésimas de segundo hasta algunas décimas de milisegundo. Su valor máximo depende fundamentalmente de la corriente del rayo, y por lo tanto es esencialmente independiente del nivel de tensión del sistema.

Por esto, en los niveles de muy alta tensión (330 kV o más), el nivel de aislación capaz de soportar las sobretensiones internas usualmente soporta sin problemas a las sobretensiones atmosféricas, mientras que en los niveles de 132 kV o menos, la mínima aislación necesaria normalmente viene impuesta por las sobretensiones atmosféricas que son más solicitantes.

En el nivel de 220 kV se tiene una situación intermedia, y ambos tipos de perturbaciones producen sollicitaciones comparables para la aislación.

2. Transitorios en sistemas a parámetros concentrados

Aunque el cálculo de procesos transitorios en sistemas de potencia es un problema complejo, en última instancia consiste en determinar cómo deben evolucionar las corrientes y tensiones para que en cada una de las capacidades e inductancias se cumpla una ley muy sencilla. La complejidad del cálculo se debe fundamentalmente al gran número de componentes presentes en el sistema. Considérese un capacitor de capacidad C como en la fig. 1, y un par de instantes consecutivos t_1 y t_2 .

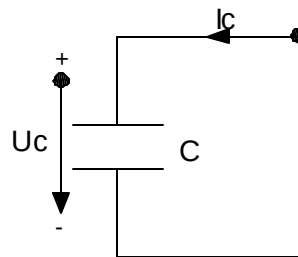


Fig. 1 – Carga de un capacitor

Es bien sabido que la tensión de un capacitor aumenta cuando se lo carga, y que esa carga se obtiene inyectando una corriente. Cuanto mayor es la corriente y el tiempo que se aplica, mayor resulta la carga inyectada y el aumento de tensión. Esto es lo que expresa la Ec. 1 que vale para todos los capacitores del sistema:

$$[\text{Ec. 1}] \quad U_c(t2) = U_c(t1) + \frac{1}{C} * I_c * \Delta t$$

La ecuación indica que $U_c(t2)$, la tensión en el capacitor al final del período es igual a la tensión al comienzo de ese periodo $U_c(t1)$ más el incremento debido a la carga adicional, que se calcula como $\frac{1}{C} * I_c * \Delta t$

Obsérvese que si la corriente tuviese un valor constante I , la carga adicional sería $I \Delta t$, pero la corriente en general es variable.

Para las inductancias (bobinas sin resistencia) puede deducirse una ley análoga, que se escribe del siguiente modo:

$$[\text{Ec. 2}] \quad I_L(t2) = I_L(t1) + \frac{1}{L} * U_L * \Delta t$$

En este caso la corriente que circula por la inductancia L aumenta durante el lapso de tiempo debido a la tensión aplicada en sus terminales. El aumento es proporcional a la tensión y al tiempo que se mantiene aplicada:

$$\frac{1}{L} * U_L * \Delta t$$

Para las resistencias vale la sencilla ley de Ohm:

$$U_R = R \bullet I_R$$

Además de estas leyes, que valen para cada tipo de componente (R, L o C), en cada nodo y cada malla de un circuito valen las leyes de Kirchoff:

- 1) En cada nodo: La suma de las corrientes que llegan al nodo es nula
- 2) En cada malla: La suma de las caídas de tensión es igual a la suma de las fem.

2.5 Circuito RC

Se analizará a continuación el circuito de la fig. 2. Se trata de un circuito muy sencillo pero que permitirá mostrar algunos hechos importantes que ocurren en todos los transitorios.

Observemos que la corriente que circula en el circuito y se inyecta al capacitor es:

$$I(t1) = \frac{E(t1) - U(t1)}{R}$$

$$I(t2) = \frac{E(t2) - U(t2)}{R}$$

Entonces, reemplazando esto en la Ec. 1 se obtiene:

$$U(t2) = U(t1) + \frac{1}{C} * [I(t2) - I(t1)] * \Delta t$$

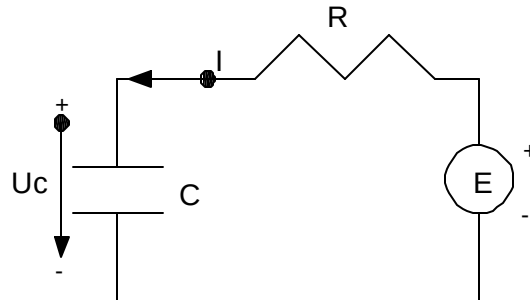


Fig. 2

Considérese como ejemplo un circuito serie con una resistencia $R=10000\Omega$ y un capacitor C de $10\mu F$ inicialmente cargado con 30 Volt. Aplicando la Ec. 3 se ha calculado la tensión sobre el capacitor para sucesivos instantes definidos. El resultado se ha graficado en la fig. 3. Se observa que la tensión decae progresivamente.

Es importante observar que en ningún momento la tensión en el capacitor presenta discontinuidades, ni siquiera cuando se inicia el transitorio en $t = 0$. Esto siempre ocurre con los capacitores: *En ellos la tensión no puede variar a saltos.*

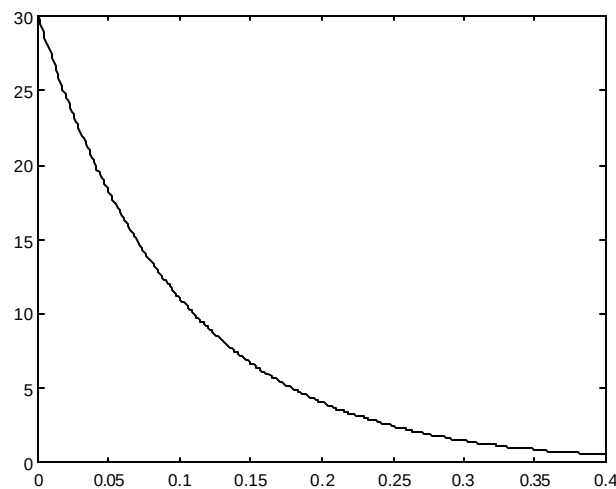


Fig. 3

En la parte superior de la fig. 4 se muestra la tensión calculada para el mismo circuito pero asumiendo ahora que el capacitor está inicialmente descargado y que se aplica una fem alterna de frecuencia $f=50$ Hz y 220 Volt eficaces:

$$E = \sqrt{2} \cdot 220 \cdot \text{sen}(2\pi f) \text{ Volt}$$

En la parte inferior se muestran los dos términos en los que puede descomponerse la respuesta. Uno de ellos, conocido como componente transitoria, es del todo similar al que se obtuvo en el caso de capacitor inicialmente cargado y decae con la misma velocidad. El segundo término es igual a la tensión alterna que se tendría si el régimen fuese estacionario, es decir, si la fem se hubiese aplicado un largo tiempo antes. Este término se conoce como componente forzada o de estado estacionario.

La tensión resultante es nula en el instante inicial. Así debe ser porque el capacitor está inicialmente descargado y su *tensión no puede variar bruscamente*.

Si se modifica la amplitud y/o la fase de la tensión aplicada, la componente forzada varía de la misma manera, pero también cambia el valor inicial de la componente transitoria de modo que la tensión resultante en $t = 0$ sea siempre nula.

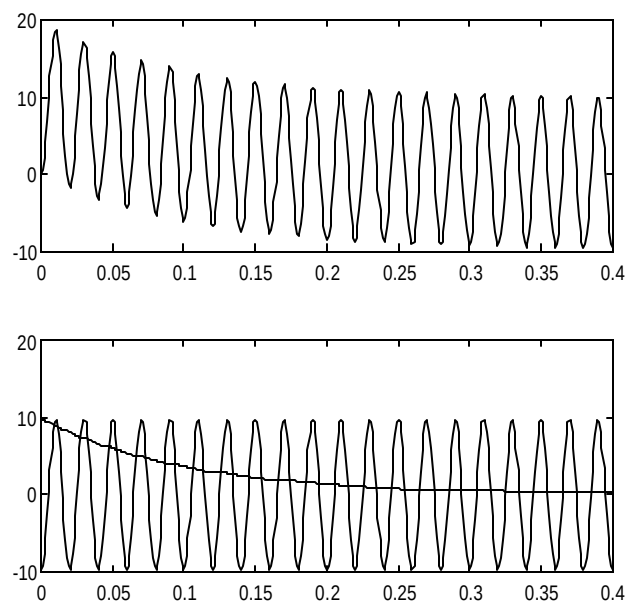


Fig. 4

Finalmente en la fig. 5 se observa la tensión en el capacitor calculada cuando existe una tensión inicial de 30 Volt, y se aplica la fem de 220 Volt eficaces.

El resultado es la suma de los casos anteriores. La componente transitoria es ahora la suma de dos partes: una debida a la carga inicial y otra a la acción de la fem aplicada. Está también la componente forzada, que naturalmente es como en el caso anterior porque es la tensión que se alcanza en estado estacionario y no puede depender de la carga que inicialmente posee el capacitor.

La suma de todas las componentes resulta una tensión en el capacitor que varía en forma continua a partir de su valor inicial.

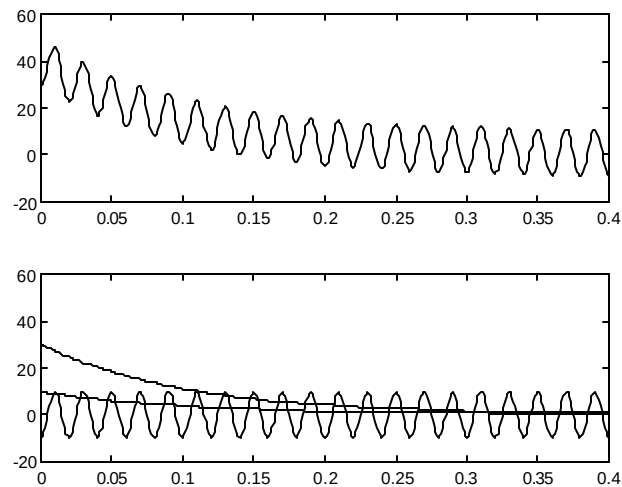


Fig. 5

2.6 Circuito serie RL

De manera semejante puede analizarse un circuito serie RL de la fig. 6. Este tipo de circuito se presenta con cierta frecuencia en la descripción simplificada de los sistemas de potencia en régimen transitorio.

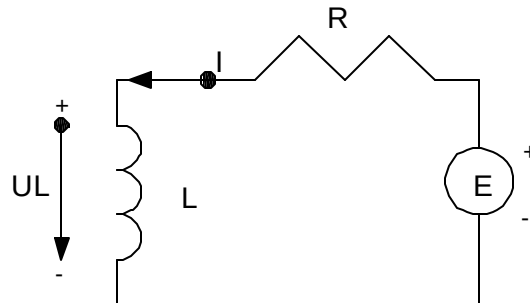


Fig. 6

La ley fundamental para las inductancias es:

$$I(t2) = I(t1) + \frac{1}{L} * UL * \Delta t$$

pero observando la fig. se deduce que la tensión en la inductancia es:

$$\begin{aligned} U(t1) &= E(t1) - R * I(t1) \\ U(t2) &= E(t2) - R * I(t2) \end{aligned}$$

y puede escribirse entonces:

$$[Ec. 4] \quad I(t2) = I(t1) + \frac{1}{L} * [UL(t2) - UL(t1)] * \Delta t$$

Puede observarse una completa analogía con la Ec. 3 obtenida para el circuito serie RC , de modo que ambos poseen un comportamiento enteramente análogo, con la diferencia de que aquello que se afirmaba para la tensión en el circuito RC, vale en este caso para la corriente. En particular se cumple que *la corriente en la inductancia no puede variar en forma discontinua, o por saltos*.

A modo de ejemplo en la fig. 7 se muestra la corriente (en kA) para un circuito serie RL formado por una resistencia de 8.33Ω y una inductancia de 0.8 H por la que circula inicialmente una corriente de 143 Amper .

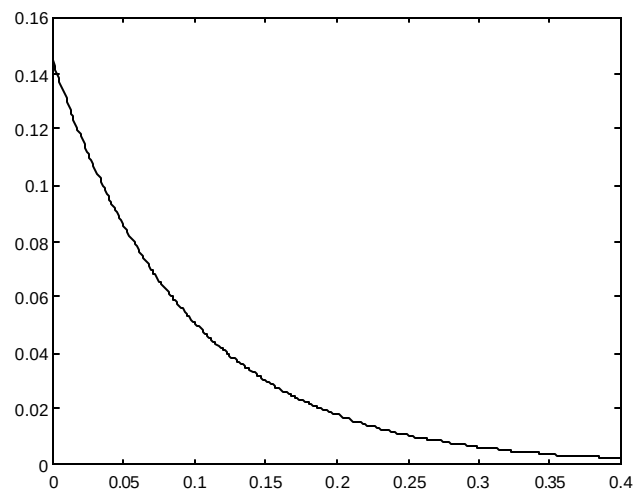


Fig. 7

La fig. 8 corresponde al caso en que la corriente inicial es nula y se aplica una fem alterna de 50 Hz y $132/\sqrt{3} \text{ kV}$ eficaces:

$$E(kT) = \sqrt{2} * 132 \cdot \text{sen}(2\pi f) \text{ kV}$$

La parte inferior de la fig. muestra la componente forzada y la componente transitoria de la corriente.

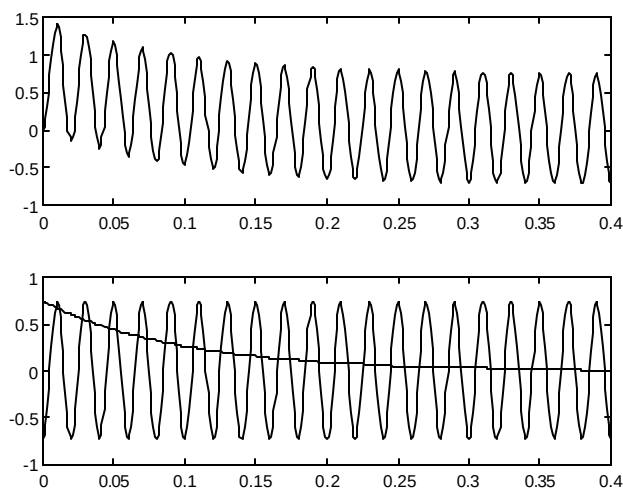


Fig. 8

Es importante observar que la corriente total puede alcanzar valores próximos al doble de la componente forzada o de estado estacionario. Lo que acaba de describirse es esencialmente la corriente que circula durante un cortocircuito en una línea de transmisión real.

2.7 Circuito LC

Se describe a continuación el comportamiento transitorio de un circuito serie LC (fig. 9). Este circuito es muy interesante pues, como se verá, permite analizar los aspectos básicos de muchos procesos transitorios que realmente tienen lugar en los sistemas de potencia. Las ecuaciones que permiten calcular las corrientes y tensiones durante el transitorio se obtienen aplicando los mismos conceptos y lineamientos que en los casos anteriores (ecuaciones 3 y 4).

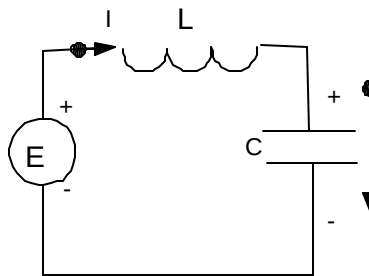


Fig. 9

A modo de ejemplo se ha calculado el transitorio para un circuito LC formado por una inductancia de 0.05 H y un capacitor de 20 μF con una tensión inicial de 1 Volt. La fem y la corriente inicial son nulas. El oscilograma superior de la fig. 10 corresponde a la tensión en el capacitor y el inferior a la corriente.

Obsérvese que ambas magnitudes oscilan con la misma frecuencia, que se conoce como frecuencia natural del circuito LC y resulta

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

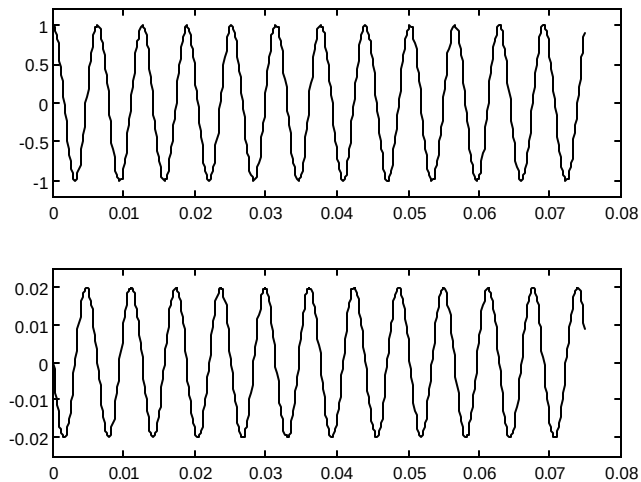


Fig. 10

Las fig.s 11 y 12 corresponden al caso con una fem alterna de 50 Hz., amplitud unitaria.

$$E(t) = \cos(2\pi ft + 45^\circ)$$

La fig. 11 muestra la tensión en el capacitor (oscilograma superior) y sus componentes forzada y transitoria (en la parte inferior). La amplitud de la componente forzada es tal que la tensión inicial en el capacitor resulta nula como lo exige su estado inicial. La fig. 12 presenta las magnitudes análogas referidas a las corrientes.

Es importante observar que tanto la tensión como la corriente pueden adquirir valores que superan ampliamente y hasta duplicar los de estado estacionario, como consecuencia de la superposición de la componente transitoria.

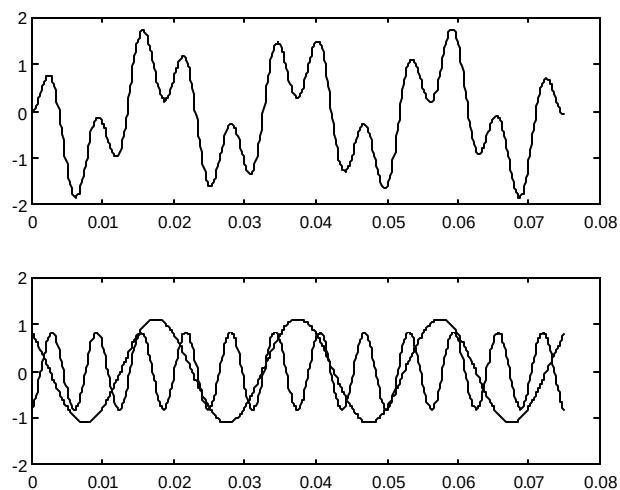


Fig. 11

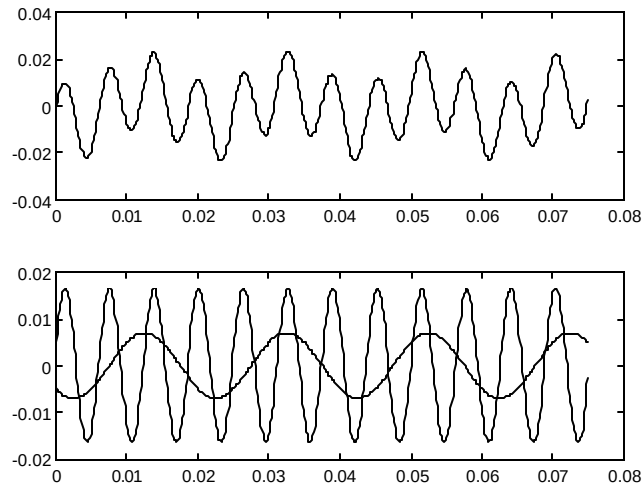


Fig. 12

2.8 Circuito serie RLC

El circuito LC que acaba de analizarse es en realidad una idealización porque en todo sistema real existe cierta resistencia. Al ser recorrida por la corriente, la resistencia transforma parte de la energía eléctrica en calor, haciendo que las oscilaciones transitorias se amortigüen progresivamente.

Un fenómeno similar está en la base del comportamiento de los circuitos RC y LR analizados anteriormente: El sistema parte con una cierta energía almacenada en el campo eléctrico o magnético. La energía se va disipando cuando la corriente circula. Si no existe una fuente externa que provea energía al sistema (fem), la energía electromagnética se agota y las corrientes y tensiones desaparecen completamente.

En beneficio de la brevedad no serán desarrolladas las ecuaciones de estos circuitos que incluyen resistencias, limitándose este punto a presentar los oscilogramas correspondientes a un circuito como el de la fig. 13 alimentado con una fuente alterna de 50 Hz. para distintos valores de resistencia.

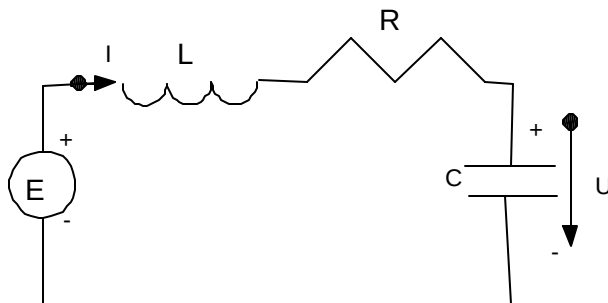


Fig. 13

En la fig. 14 se presentan la componente transitoria de las tensiones en el capacitor para resistencias serie de 0, 8, 32 y 100 Ohm. Se observa que a medida que la resistencia aumenta la componente transitoria se amortigua más rápidamente e incluso para

elevadas resistencias, pierde su carácter oscilatorio. Esta situación sin embargo no es usual en los sistemas de potencia dado que las resistencias son reducidas a fin de limitar las pérdidas.

En la fig. 15 se muestran los correspondientes oscilogramas de las tensiones sobre el capacitor donde puede observarse que, como en los casos anteriores, la tensión parte desde el valor inicial (en el caso considerado es cero) y evoluciona sin discontinuidades. Por otra parte es interesante notar que la presencia de la resistencia reduce la amplitud de la componente transitoria y en consecuencia también la máxima sobretensión total. Este hecho es aprovechado en algunos dispositivos como los interruptores con resistencias de preinserción, que insertan una resistencia en el sistema durante algunas milésimas de segundo a fin de limitar los picos máximos de tensión o corriente.

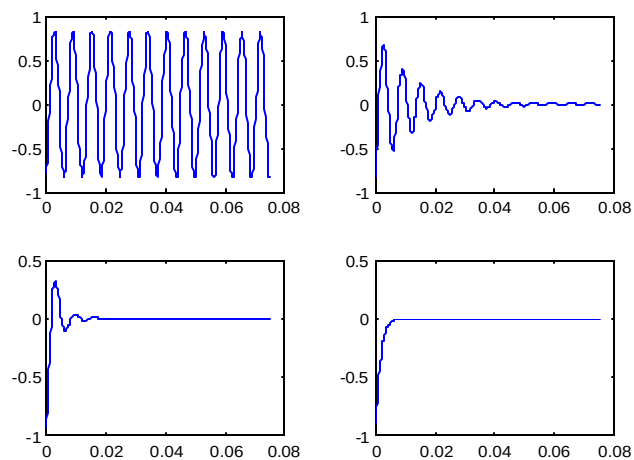


Fig. 14

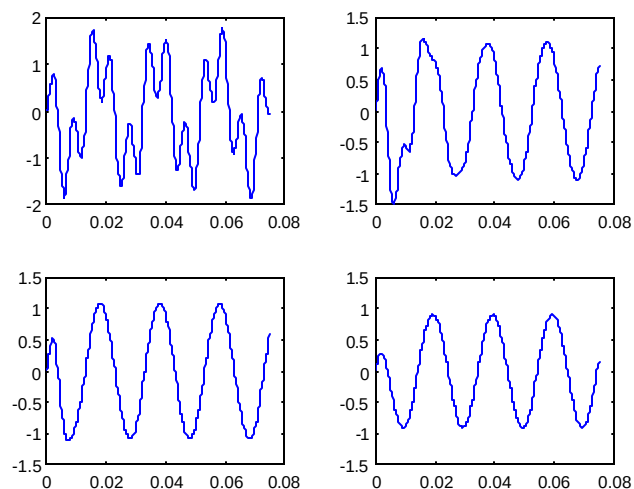


Fig. 15

3. Análisis de algunos procesos transitorios típicos

Al considerar los circuitos RL ha sido analizado el transitorio de inicio de falla, donde se advirtió que la corriente de cortocircuito excede en los primeros ciclos al valor de estado estacionario, planteando mayores sollicitaciones al interruptor que debe eliminar la falla.

Se consideran a continuación otros transitorios típicos en las estaciones transformadoras. En primer término se analizarán las sobretensiones que se generan entre los bornes de un interruptor que abre la falla, o desconecta cierto tipo de cargas, conocidas como tensiones de restablecimiento, pero antes es conveniente puntualizar algunos aspectos del comportamiento de los interruptores: la apertura por cero de corriente y el reencendido.

En efecto, al analizar las maniobras debe tenerse en cuenta que la interrupción efectiva de una corriente no se verifica en el momento mismo en que los contactos del interruptor empiezan a separarse, sino en que usualmente se verifica en el primer paso por cero de la corriente. Esto se debe a que inicialmente se establece un arco entre los contactos. El arco es un canal de gas ionizado por la elevada temperatura, a través del cual sigue fluyendo la corriente con baja resistencia. A fin de extinguirlo, el interruptor está dotado de mecanismos de enfriamiento y/o soplado, pero recién cuando la corriente pasa por cero se interrumpe el arco.

No obstante existen interruptores con mecanismos muy enérgicos que son capaces de interrumpir pequeñas corrientes antes de su paso por cero, este comportamiento es normalmente indeseable, por razones que se analizarán mas adelante, y aparece en general solamente con los interruptores de vacío.

Inmediatamente después que la corriente se interrumpe empieza a aumentar la rigidez dieléctrica entre los contactos, pero al mismo tiempo se desarrolla una tensión entre los mismos que depende del circuito al que está conectado el dispositivo y de sus condiciones iniciales.

Esta tensión se denomina genéricamente tensión de restablecimiento porque tiende a restablecer el arco. Que lo consiga o no depende de la velocidad con que crece. Si esta excede la velocidad con que aumenta la rigidez dieléctrica el arco se reenciende hasta el próximo paso por cero de la corriente en el cual se intenta una nueva extinción.

3.2 Tensión de restablecimiento

La fig. 16 muestra un circuito sencillo que modela al sistema en condición de falla próxima a la barra.

La inductancia de la fuente (generador , transformador etc.) es L .

C modela la capacidad a tierra de la estación. Se trata normalmente de una capacidad parásita formada por la capacidad entre los arrollamientos y los núcleos, la capacidad de los bushing etc. C es normalmente muy pequeña, excepto cuando existen en la estación capacitores shunt.

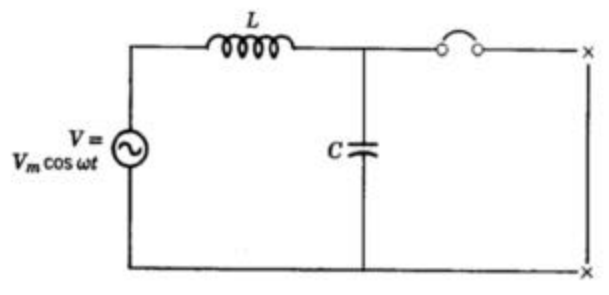


Fig. 16

Para simplificar el análisis se supondrá que la corriente de falla ya alcanzó el estado estacionario al momento de la apertura, vale decir, que ha transcurrido desde el inicio de la falla un tiempo relativamente grande respecto de la constante de tiempo L/R de modo que la componente transitoria de la corriente prácticamente se ha extinguido. En esas condiciones la corriente es alterna de 50 Hz.

Después de la apertura del interruptor, se presenta, lado barra, un circuito serie RLC. Las condiciones iniciales para calcular la tensión en el capacitor se obtienen fácilmente: Debido al cortocircuito su tensión inicial es nula [$U(0) = 0$]; por otra parte, debido al arco en la cámara del interruptor, la apertura se hace efectiva cuando la corriente pasa por un cero y en consecuencia la corriente inicial también es nula [$I(0) = 0$]. Como la resistencia es muy pequeña, la corriente estará atrasada prácticamente 90 grados respecto de la fem, y por lo tanto en el momento de la apertura ($t = 0$) la fem está en un máximo:

$$E(t) = E_M \cos(2\pi ft)$$

En la fig. 20 se muestra la tensión resultante sobre la capacidad, que, de mantenerse la conexión a tierra del otro lado, es también la tensión entre los contactos del interruptor.

Está formada por dos componentes:

- La estacionaria (o forzada) que es prácticamente igual a la fem (la impedancia de la fuente es despreciable respecto de la impedancia asociada a la capacidad parásita)
- y la componente transitoria que oscila con la frecuencia natural del circuito.

$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ mucho mayor que 50 Hz debido a que C es muy chico. Como se observa en la fig. esta componente se atenúa por efecto de la resistencia.

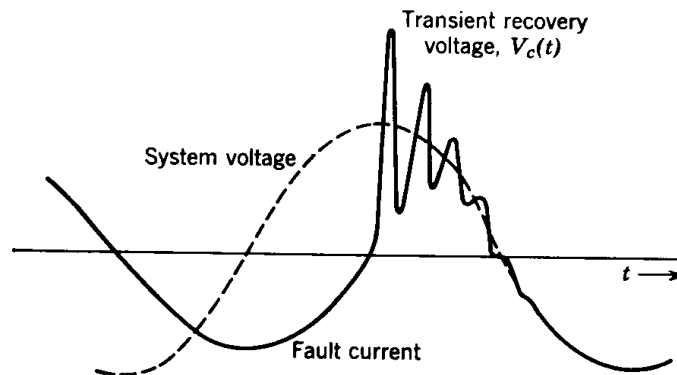


Fig. 17

En el instante $t = 0$ la componente transitoria debe ser igual y opuesta a la forzada de modo que su suma, la tensión en el capacitor, resulte igual a la inicial. Al cabo de medio ciclo ambas componentes poseen el mismo signo y están próximas a su máximo, de modo que la tensión resultante prácticamente duplica a la máxima fem.

Como la frecuencia de la componente transitoria es muy alta, el crecimiento de la tensión de restablecimiento es muy rápido. Si supera la velocidad con que aumenta la rigidez dieléctrica en la cámara del interruptor se produce un reencendido, y como consecuencia de ello la falla se prolonga al menos medio ciclo más.

A fin de evitar esto, la tensión de restablecimiento originada en las maniobras de apertura de distinto tipo debe ser considerada para especificar las características de los interruptores.

Para algunas aplicaciones es de fundamental importancia que el interruptor esté libre de reencendidos, este es el caso para la desconexión de cargas capacitivas como se verá a continuación:

3.2 Desconexión de cargas capacitivas con reencendido.

La situación se muestra en la fig. 18 donde la capacidad C representa la carga que debe ser desconectada, esta puede ser un capacitor o la capacidad de una línea abierta por ejemplo. L es la inductancia al otro lado del interruptor. La capacidad parásita y la resistencia son despreciadas para concentrar el análisis en los aspectos fundamentales.

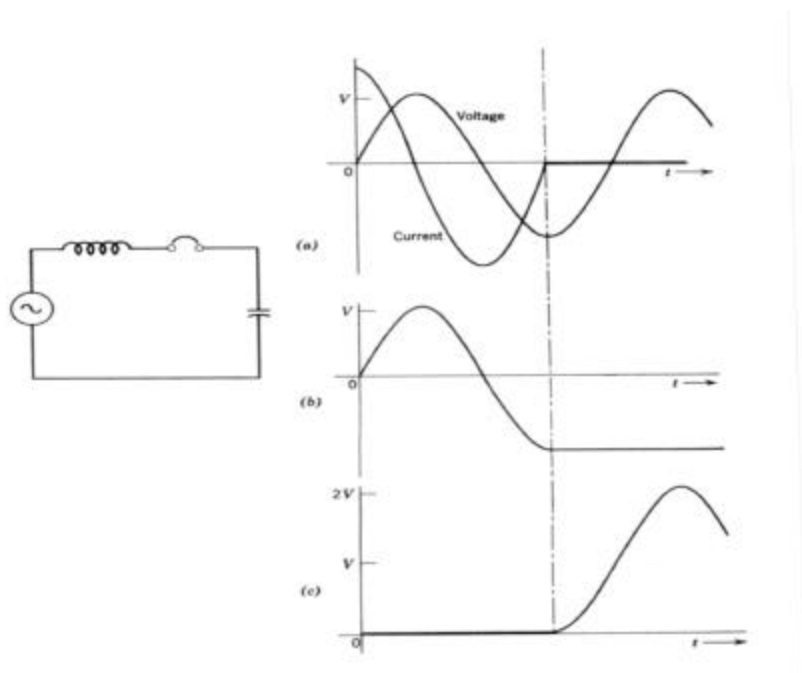


Fig. 18

Nuevamente la corriente es interrumpida cuando pasa por cero y como se muestra en la parte superior de la fig., en ese instante la tensión en el capacitor está en su máximo

(negativo en el ejemplo) porque ambas magnitudes están desfasadas 90 grados. Después de la apertura la tensión en el capacitor se mantiene en el valor máximo. Como se observa en el oscilograma del centro la tensión a tierra al otro lado del interruptor sigue impuesta por la fuente y oscila a 50 Hz. Después de un semiciclo la tensión lado barra es igual y opuesta a la tensión lado carga. Si los contactos del interruptor están aún próximos entre sí, es posible que se produzca un reencendido reconectándose la carga capacitiva.

El transitorio resultante de tensión y corriente se muestra en la parte superior e inferior de la fig. 19 respectivamente.

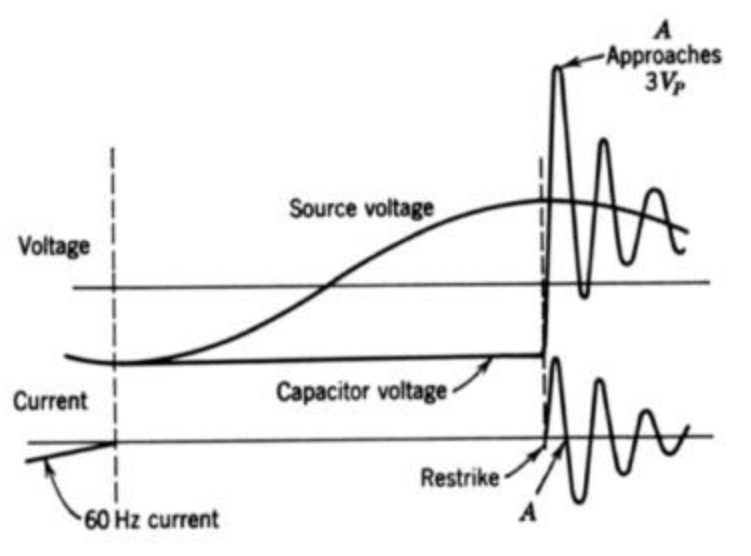


Fig. 19

Al cabo de un semiciclo de la componente transitoria, cuya frecuencia es $f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, la tensión en la capacidad alcanza el triple de la tensión V_M .

Cuando la tensión en el capacitor está en su valor máximo, la corriente es nuevamente nula y el interruptor puede extinguir el arco por segunda vez. El capacitor se mantiene entonces cargado con una tensión $3V_M$ y al cabo de un semiciclo la tensión de la fuente cambia de signo. En ese momento la tensión entre contactos es $4V_M$ de modo que muy probablemente se producirá un nuevo reencendido. El proceso transitorio parte ahora de condiciones iniciales más críticas y la tensión alcanza $5V_M$.

En la práctica este tipo de fenómeno es absolutamente inadmisibles, y por ello los interruptores que maniobran cargas capacitivas deben especificarse y diseñarse adecuadamente.

4. Transitorios en circuitos a parámetros distribuidos

Es bien conocido que una perturbación eléctrica no se transmite en forma instantánea, sino a una velocidad próxima a la de la luz. Este hecho es fundamental para analizar algunos fenómenos transitorios, tales como la energización de líneas o las sobretensiones por descargas atmosféricas.

Las corrientes y tensiones se propagan a lo largo de las líneas como ondas viajeras. En todo instante pueden haber sobre la línea ondas que se propagan en uno y otro sentido y

la tensión o corriente en cada punto es igual a la suma de las tensiones o corrientes que viajan en ambos sentidos.

La fig. 20 muestra la evolución de dos ondas que se propagan en distinto sentido y la onda resultante. La gráfica debe interpretarse como una sucesión de imágenes que muestran la posición de las ondas a lo largo de la línea en distintos instantes. Y la tensión resultante en cada en esos mismos instantes.

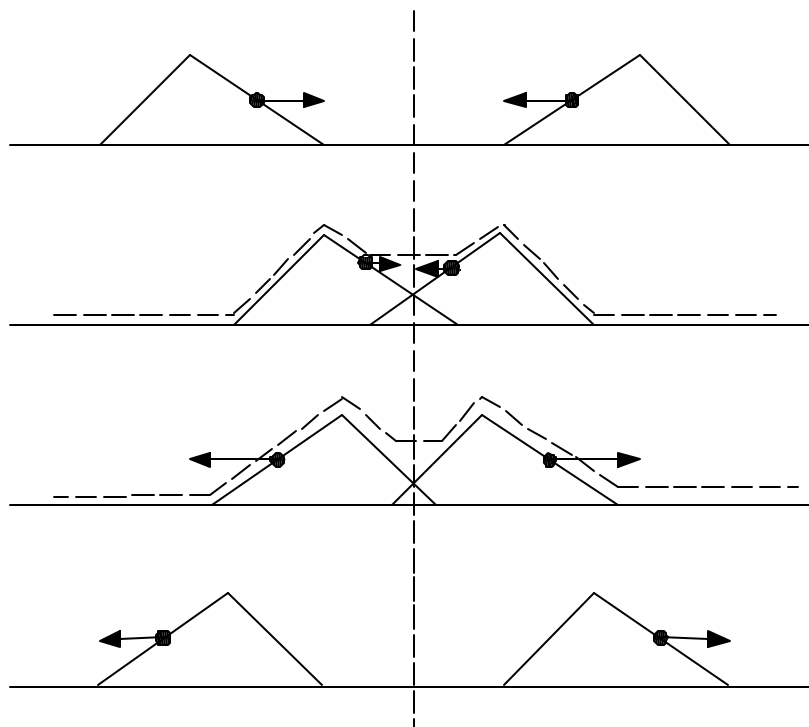


Fig. 20

Las ondas de tensión y corriente llevan consigo cierta energía que se propaga por la línea.

Cuando las ondas llegan a un extremo en general son parcialmente reflejadas: parte de la energía que transportan es devuelta a la línea y vuelve hacia el otro extremo y la otra parte es transferida al circuito conectado en ese extremo.

Desde el punto de vista de las sobretensiones la situación más crítica se produce cuando el extremo de la línea está abierto porque en ese caso toda la energía es devuelta y la onda de tensión se refleja con la misma amplitud y signo. La situación se muestra en la fig. 21. Es fácil advertir allí que en el instante que la onda incidente alcanza el máximo en el extremo abierto, la tensión resultante es máxima e igual al doble de ese valor.

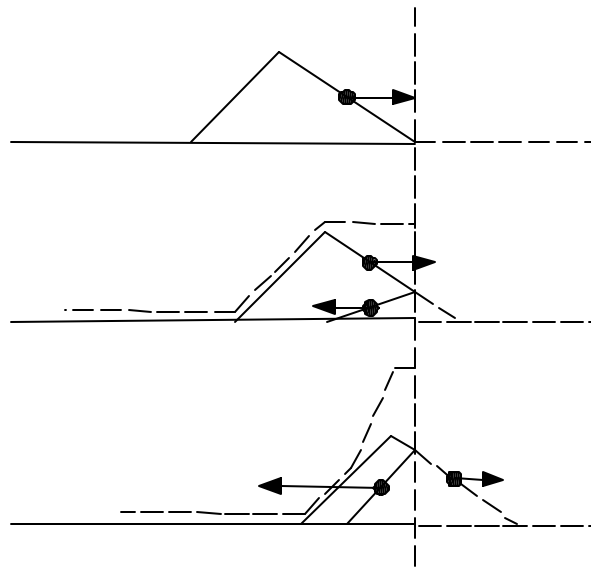


Fig. 21

Por el contrario cuando el extremo receptor está en cortocircuito la onda se refleja con signo opuesto de modo que en todo instante la tensión resultante es nula como lo impone el cortocircuito (ver la fig. 22)

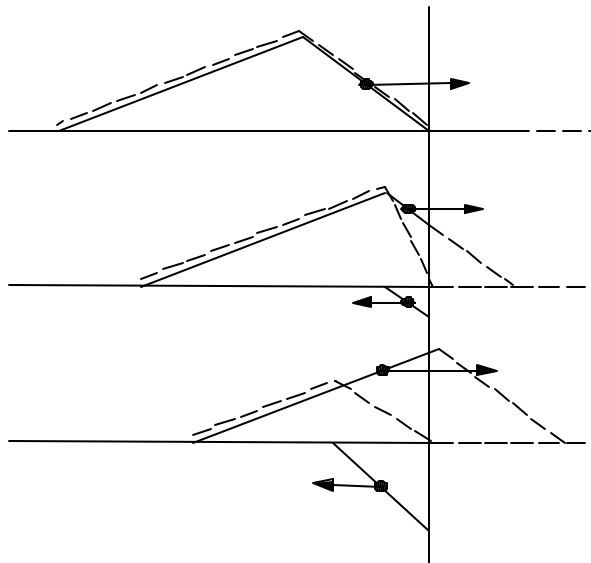


Fig. 22

El análisis de los casos mostrados es sencillo porque existe una sola onda incidente y reflejada. Cuando la onda reflejada llega al extremo opuesto (extremo emisor) experimenta una nueva reflexión y el patrón de ondas que viajan a lo largo de la línea se torna más complejo.