

que al pasar de pesos á volúmenes se encuentran también para estas cales diferencias muy considerables.

3.º *Morteros y hormigones de cemento Portland*.—Aunque es ya frecuente referirse á pesos en los datos sobre morteros de cemento, ocurre también muchas veces tener que referirse á volúmenes. Entonces se pueden tomar como límites del peso del litro las cifras anteriormente dadas 0,773 á 1,75 kilogramos. La proporción de cal varía entre 57 y 66 por 100. Lo mismo que en los casos que anteceden, si no se dispone de las primeras materias, cemento y arena, se obtendrán grandes diferencias en los resultados.

En la *Tonindustrie Zeitung* (1909, páginas 197 y 1.123) se han publicado estudios detenidos sobre el análisis de los hormigones, llegándose á las siguientes conclusiones:

«Si el hormigón se compone sólo de cemento y arena y ésta no contiene elementos solubles en los ácidos, basta determinar la pérdida por calcinación, la parte soluble y la insoluble, para tener en seguida la composición en peso del hormigón estudiado, que será la relación del peso de la parte soluble al de la insoluble. Pero en este caso por un lado se prescinde de que parte de la pérdida por calcinación corresponde á cada componente, y se da por sentado que el cemento es totalmente soluble. Para pasar de pesos á volúmenes sería siempre preciso conocer los pesos límites de la unidad de volumen de los componentes. Los de la arena, en el caso que nos ocupa, podrían determinarse separando de la muestra de hormigón por medio del ácido clorhídrico, la cantidad necesaria para dicha determinación.

«Pero como en general la arena contiene alguna parte soluble en el ácido, los valores resultantes son sólo aproximados, siendo á menudo necesario para obtenerlos con alguna seguridad, hacer uso de muestras bien tomadas de los elementos componentes: cemento, grava y arena, sin lo cual los resultados del análisis carecerían de valor práctico desde el punto de vista que nos ocupa. Cuando se dispone de esas muestras se determina el peso de la unidad de volumen de cada componente y se verifica el análisis completo de cada uno. Después, verificado también el análisis de la mezcla, se parte de la cantidad de residuo insoluble, se añade la parte soluble correspondiente á la arena y el resto de lo soluble se toma como cemento.

«Si el cemento contuviera una parte insoluble de alguna importancia, no se pueden obtener más que valores aproximados aun efectuando un análisis completo de cada componente.

«Por último, puede presentarse el caso de tener que estudiar un hormigón de cal y cemento. Si la cal fuera hidráulica, con cualquier método que se empleara se marcharía á oscuras; entonces sería inútil efectuar el análisis. Si la cal fuera una cal grasa corriente, libre de silicatos, sí se podrían obtener valores aprovechables, partiendo de la composición de cada uno de los elementos. En todo caso los resultados no pueden ser más que aproximados.»

Tanto de lo que acabamos de transcribir, como de cuanto anteriormente queda expuesto, se deduce que (aparte de las pruebas de resistencia y demás que no constituyen el objeto del presente trabajo) lo mismo en la práctica que en el análisis, si se quiere llegar á resultados utilizables, no deben perderse de vista ciertas conclusiones, que pueden resumirse como sigue:

1.º Aunque en la técnica de los ensayos de morteros

no se opera ya sobre volúmenes sino sobre pesos, porque los resultados que se obtienen de aquéllos varían dentro de límites muy extensos, y aunque sea mucho más racional y seguro preparar los morteros con arreglo á pesos que á volúmenes, en la práctica no puede aún prescindirse de estos últimos, mientras no exista número suficiente de fábricas de morteros, y se hallen éstas convenientemente repartidas de modo que se pueda prescindir en todas partes de las pequeñas industrias de este ramo, que mantienen el antiguo sistema de establecer las proporciones.

2.º Las cantidades necesarias de cal y cemento se deben fijar con arreglo á los resultados del estudio de la arena que haya de emplearse. Para dicha determinación hay asimismo que tener en cuenta los pesos de la unidad de volumen de cada componente del mortero.

3.º Queda aún por resolver la cuestión de hasta qué punto los pesos por unidad de volumen de las sustancias empleadas en la preparación de los morteros corresponden á los productos resultantes después del fraguado, puesto que éstos constituyen el agente de trabazón, y deben rellenar los espacios huecos de la arena. Sería de desear que se emprendieran pruebas en grande duración é importancia suficiente sobre este punto, en caso de que no se hagan estas observaciones al tiempo mismo de emplear el mortero.

4.º Conviene que se haga una clasificación precisa y uniforme de las cales, y que se fijen los correspondientes límites para su composición, peso de la unidad de volumen, etc. Conviene asimismo que se lleven á cabo estudios más detenidos que los verificados hasta ahora, sobre la acción de los agentes atmosféricos sobre los morteros, tanto cuando aún no han fraguado, como después de fraguar.

5.º Los químicos deben siempre referir á volúmenes los resultados de los análisis de morteros, y en caso de no ser esto posible llamar la atención sobre ello é indicar la causa de la imposibilidad, á fin de que donde aún se trabaja con arreglo á ellos se pueda tener en cuenta dicha circunstancia.

F. F. Y P.

TRANSIENTES ELÉCTRICOS

por

D. CARLOS PROTEUS STEINMETZ (1).

1. Con el incremento de magnitud é importancia de los sistemas eléctricos, aquellos fenómenos, que temporalmente ocurren en todos los circuitos eléctricos, tales como oscilaciones, ondas, impulsos eléctricos y ondas en movimiento, van siendo de una frecuencia y destructividad cada vez mayores, y un conocimiento y comprensión de su naturaleza general y de sus características, y la causa de su origen, ha llegado á ser importante y necesaria para el Ingeniero electricista.

(1) Del *Journal of the Franklin Institute*, July, 1911, traducido por la *Revista Tecnológico-industrial*.

No teniendo en nuestro idioma un nombre que exprese los fenómenos momentáneos eléctricos que se tratan en este artículo, para evitar confusiones, hemos creído mejor adoptar el mismo nombre inglés *Transient*, españolizado, ó sea «Transiente».—N. del T.

Mientras la teoría de estos transientes eléctricos está todavía lejos de ser completa y envuelve cálculos matemáticos considerables, es posible también sin teorías matemáticas obtener un conocimiento profundo de su causa y origen, de su naturaleza y características generales, y también de sus relaciones numéricas más importantes, y en vista del gran y rápido aumento de importancia de estos fenómenos, á continuación se intenta exponer, sin empleo de matemáticas, una discusión general de los mismos y su situación en el funcionamiento de los sistemas eléctricos.

2. En general un circuito eléctrico comprende un manantial ó generador, una línea y una carga. En el generador, la potencia eléctrica es producida por alguna otra forma de potencia, como la mecánica, y discurre por la línea hasta la carga en donde es empleada. La potencia que llega hasta la carga no es toda la producida por el generador, sino que una parte se consume por todo el circuito, disipada como calor por la resistencia del conductor: ri^2 .

Esto, sin embargo, no constituye todavía el fenómeno completo que llamaremos flujo de potencia eléctrica, sino que se desarrolla algo en el espacio fuera del conductor que dirige el flujo de la potencia eléctrica; hay un *campo magnético*, líneas de fuerza magnética que rodean el conductor; hay también un *campo electrostático* ó *dieléctrico*, líneas de fuerza electrostática ó dieléctrica radian del conductor, y el campo magnético y el campo electrostático ó dieléctrico en el espacio fuera del conductor, siendo precisamente partes esenciales del flujo de la potencia eléctrica, como la disipación de potencia en la resistencia del conductor.

El campo magnético es proporcional á la corriente i , con un factor proporcional llamado *inductancia* L del circuito, siendo, pues, Li ; el campo dieléctrico es proporcional al voltaje e , con un factor proporcional llamado *capacidad* C del circuito y, por lo tanto, es Ce .

El campo magnético y el campo dieléctrico representan *energía acumulada*; la energía acumulada por el campo magnético, es

$$\frac{Li^2}{2}$$

y la acumulada por el campo dieléctrico, es

$$\frac{Ce^2}{2}$$

Antes de que una corriente constante pueda engendrarse en un circuito, se debe para ello suministrar energía para producir su campo magnético; antes de que un voltaje constante pueda estar en el conductor, debe serle también suministrada energía para producir su campo dieléctrico. Esta energía es suministrada por un flujo de potencia del conductor al espacio que le rodea, en el cual existe el campo. Como el campo magnético es proporcional á la corriente, la potencia requerida para suministrar su energía es dada por un voltaje, el *voltaje de inductancia*; como el campo dieléctrico es proporcional al voltaje, la potencia requerida para suministrar su energía es dada por una corriente, la *corriente de capacidad* y voltaje de inductancia y corriente de capacidad; así son los fenómenos por los cuales la energía acumulada de los campos magnético y dieléctrico respectivamente es suministrada al espacio que rodea á los conductores.

Siempre que ocurre un cambio en un circuito eléctrico

que lleve consigo un aumento de su energía acumulada, magnética ó dieléctrica, como un aumento de corriente ó de voltaje, tiene lugar un flujo de potencia del circuito al espacio que le rodea, hasta que ha sido suministrada la energía acumulada, é inversamente, siempre que ocurre un cambio que requiera una disminución de energía acumulada, entonces tiene lugar un flujo de potencia del espacio al circuito.

Este flujo de potencia es temporal, durando sólo hasta tanto que la energía acumulada ha sido suministrada ó bien que el exceso de energía acumulada ha pasado de nuevo al circuito, siendo esto lo que se llama un *transiente* ó *momentáneo eléctrico*.

Los transientes son, por lo tanto, los fenómenos por los cuales en un cambio de condiciones de un circuito la energía acumulada se acomoda ella misma á la nueva condición y cualquier cambio en un circuito que requiera un cambio de la energía acumulada, no puede tener lugar instantáneamente, sino que interviene un período de transición del reajuste de la energía acumulada, hasta que se alcancen condiciones fijas, ya se trate de un circuito de corriente continua ó alterna.

3. Es obvio que los transientes no son específicamente fenómenos eléctricos, pero tienen lugar en cualquier sistema de fuerzas en donde tiene lugar una acumulación de energía.

Así, pues, en potencia hidráulica la energía se acumula en el momento

$$\frac{mv^2}{2}$$

de moverse la masa de agua en la tubería de alimentación, etc., y cualquier cambio de carga, que requiera un cambio del flujo de agua y, por lo tanto, de su energía acumulada, no puede realizarse instantáneamente, sino que aparece un transiente mecánico y el problema de regular potencias hidráulicas, especialmente con grandes alturas, es esencialmente el problema de considerar el transiente mecánico.

En ferrocarriles los períodos de aceleración y desaceleración no son más que transientes mecánicos de la energía acumulada; la activación del fuego de un generador de vapor ó el apagado del mismo son transientes térmicos, etc.

En los casos precedentes la energía es acumulada en una sola forma; la energía cinética mecánica en la tubería y en el tren de ferrocarril, como la energía es calorífica, en el generador de vapor, y el solo cambio de la energía acumulada que puede tener lugar, es un incremento ó una disminución.

Si, no obstante, la energía es acumulada en dos ó más formas, además del aumento ó disminución de la energía acumulada, puede ocurrir una transformación de energía acumulada de una forma ú otra y usualmente ocurre. Este es, por ejemplo, el caso del péndulo. Cuando el peso del péndulo se para en su posición final, contiene energía potencial de gravitación acumulada, debido á su elevación sobre la posición más baja. Cuando el peso alcanza la posición más baja toda esta energía potencial ha desaparecido; parte ha sido disipada por fricción, pero la mayor se ha convertido en energía cinética de movimiento y ahora el peso contiene energía cinética acumulada. Durante su nuevo movimiento, esta energía cinética es convertida de

nuevo en energía potencial hasta que el peso llega á pararse en la próxima posición extrema, y así sucesiva y gradualmente por una serie de transformaciones periódicas entre energía potencial de elevación y energía cinética de movimiento, la energía acumulada del péndulo desaparece.

Existen así dos clases de transientes: el transiente de simple energía, en el cual la energía es acumulada en una sola forma y el fenómeno es un aumento ó disminución fijos de la energía acumulada, y los transientes de doble energía (ó energía múltiple), en los cuales, además de un aumento ó disminución de la energía acumulada, ocurre una transformación de energía acumulada entre sus dos formas, transformación que usualmente es periódica.

4. En circuitos eléctricos de distribución de 110 á 120 voltios, en circuitos de tracción de 600 voltios y aun en circuitos primarios de distribución de 2.000 voltios, la energía dieléctrica

$$\frac{Ce^2}{2}$$

es todavía tan pequeña comparada con la energía magnética

$$\frac{Li^2}{2}$$

que la primera puede ser despreciada comparada con la última (excepto bajo condiciones especiales, como con descargas atmosféricas, etc.), y el circuito puede ser considerado como de acumulación de energía en una sola forma, como energía magnética. Los transientes de tales circuitos son así transientes de energía simple, esto es, un aumento ó disminución fijos de la energía magnética acumulada durante el período de transición después de un cambio en el circuito.

La energía dieléctrica llega á ser comparable en magnitud con la energía magnética en líneas de transmisión de 30.000 y más voltios y en cables subterráneos de 10.000 y más voltios, y tales circuitos de alto voltaje dan entonces transientes de doble energía, ó sean, ondas de energía acumulada.

Esta es la razón de la aparición de perturbaciones eléctricas en circuitos de alto voltaje, diferentes de las que se notan en circuitos de voltajes bajos y medios.

Los transientes de simple energía de circuitos eléctricos que resultan de la energía magnética acumulada, son raramente de seria importancia, pues, son un cambio gradual de las condiciones previas á las posteriores del circuito eléctrico; sus efectos inductivos son usualmente pequeños, debido á la extensión limitada de tales circuitos de bajo y medio voltaje; su energía es moderada, y debido á la relativamente grande resistencia de la mayor parte de tales circuitos, la energía es rápidamente disipada, esto es, de corta duración el transiente y, generalmente, requieren ser tenidos en consideración sólo para evitar las molestias que pueden causar.

Por ejemplo, cuando se cierra el circuito del campo de excitación de un motor en derivación, transcurre un tiempo apreciable (frecuentemente varios segundos) antes que el campo magnético se haya formado, y si entonces al inducido se le da energía inmediatamente y el reostato se quita demasiado rápidamente, una corriente muy intensa puede momentáneamente circular por el inducido sin po-

nerlo en movimiento, pues el campo magnético no ha llegado todavía á producirse y esta corriente puede fundir los fusibles.

Tales transientes magnéticos de simple energía pueden llegar á ser de serias consecuencias cuando son de una gran energía anormal, de modo que en sistemas muy extendidos ó en circuitos altamente inductivos, como campos de motores, y especialmente cuando es forzado, sean de muy corta duración, como en el último caso, aun con una cantidad moderada de energía, la potencia puede ser muy grande, dado que la energía se divide por el tiempo en que se ha disipado. Esto último ocurre con el transiente de apertura de un circuito inductivo. Abriendo un circuito inductivo, su energía magnética acumulada debe disiparse.

Si entonces se abriese instantáneamente un circuito inductivo, esto es, se disipara su energía acumulada en un tiempo infinitamente corto, esto representaría una potencia infinita, esto es, un voltaje inducido infinito, ó en otras palabras, el aislamiento del circuito sería perforado. Un circuito inductivo se protege á sí mismo hasta una medida considerable contra una apertura demasiado rápida, por el arco que sigue á las láminas del interruptor; cuanto más rápidamente se abre el interruptor más grande es el voltaje inducido y más aun sigue el arco y mantiene el circuito, de modo que limita la rapidez de la apertura del circuito. El problema de abrir y cerrar los circuitos inductivos es, pues, abrir el circuito lo suficiente rápidamente para limitar la fusión de los contactos del interruptor por el arco; pero abrirlo lo suficientemente despacio para limitar el voltaje inducido por debajo del valor que destruiría seriamente el aislante. Inversamente, si un circuito inductivo es abierto muy rápidamente, como por una poderosa corriente de aire al través del interruptor, ó un pequeño condensador derivado al través de la interrupción, se producen voltajes prácticamente ilimitados, como en la bobina de Ruhmkorff.

5. Muchas veces los transientes magnéticos son de importancia, no directamente por su energía acumulada, sino por la producción de potencia que causan. Un ejemplo característico de esto se encuentra en las corrientes momentáneas de los cortos circuitos de los alternadores. El voltaje de un alternador depende del campo de excitación y de la carga, esto es, la acción magnetizadora ó desmagnetizadora de la corriente del inducido, que se combina para dar una resultante con la fuerza magnetomotriz de la corriente del campo de excitación y ésta produce el flujo del campo. En circuitos abiertos, el flujo del campo magnético es, pues, debido solamente al campo de excitación. Si ahora con el mismo campo de excitación se toma corriente del inducido, especialmente si es una corriente decalada, la acción desmagnetizante de esta corriente baja el flujo del campo y con él el voltaje.

En corto circuito la corriente del inducido (que entonces es decalada), aumenta hasta tal valor, que su acción desmagnetizante baja el flujo del campo á una pequeña fracción del valor que existiría con la misma excitación del campo á circuito abierto, es decir, sólo el valor suficiente para circular la corriente de corto circuito en el inducido. Con turbo-alternadores modernos de gran velocidad la corriente permanente de corto circuito puede ser de unas cuatro veces la corriente en plena carga y el flujo del campo en corto circuito puede ser tan bajo como cosa de un

décimo del flujo del campo que existe en circuito abierto, con la misma excitación de campo. Poniendo el alternador en corto circuito el flujo del campo magnético decrece así á un décimo de su valor inicial. Como representa energía acumulada no puede hacer esto instantáneamente, sino que puede solamente decrecer de un modo gradual (aunque rápidamente), desde el valor del circuito abierto hasta el del corto circuito, y en el primer momento, después del corto circuito, tiene así todavía, prácticamente, el valor del circuito abierto completo, esto es, un valor que puede ser diez veces tan grande como el valor del corto circuito permanente.

Como este último da una corriente de corto circuito en el inducido, igual á cuatro veces la corriente de plena carga, ésta da una corriente diez veces mayor, esto es, una corriente de corto circuito momentánea que puede ser de cuarenta veces el valor de toda la carga. De este modo, el efecto del transiente del campo magnético del alternador es una corriente transiente excesiva entregada al inducido en corto circuito. Considerando que la corriente permanente de corto circuito del inducido, de un valor de cuatro veces la carga total, desmagnetiza el campo hasta bajarlo á un décimo de su valor, la corriente momentánea de corto circuito; de valor cuarenta veces la carga, desmagnetizaría tanto como diez veces, y como en este momento de principiar el corto circuito el flujo del campo tiene aún su valor total, la corriente del campo debe también aumentar momentáneamente de diez veces su valor normal, para mantener el flujo del campo completo, contra la acción excesivamente desmagnetizante de la corriente momentánea de corto circuito del inducido.

Esto es, el campo magnético, en el momento del corto circuito empieza á decrecer en tal proporción que por su disminución induce en el arrollamiento del campo de excitación una fuerza electromotriz que sube la corriente del campo al valor que se necesita para mantener el flujo del campo contra la reacción del inducido. De este modo la corriente momentánea llevada al inducido en corto circuito es acompañada por un correspondiente impulso de corriente en el campo.

Con un corto circuito monofásico esta corriente de campo impulsa con doble frecuencia, así como la reacción del inducido monofásico impulsa con doble frecuencia; con un corto circuito polifásico aparece una pulsación de un transiente de toda la frecuencia en la corriente del campo, correspondiendo al transiente de arrancada de la corriente del inducido.

6. Los transientes eléctricos más importantes, porque son los más peligrosos, son los transientes de doble energía de los circuitos de alto voltaje. En estos circuitos, en los cuales la energía dieléctrica acumulada es

$$\frac{Ce^2}{2}$$

es de la misma magnitud que la energía magnética acumulada

$$\frac{Li^2}{2}$$

el incremento gradual de la energía acumulada total, en un cambio de las condiciones del circuito, es acompañado por una oscilación ó transformación de la energía acumulada entre sus dos diferentes formas, de un modo similar al que

se hizo ver con el péndulo, como una oscilación entre la energía potencial de gravitación y la energía cinética de movimiento.

Durante el período de transformación entre las energías magnética y dieléctrica acumuladas, la magnética tiene un máximo,

$$\frac{Li_0^2}{2}$$

y, por lo tanto, la corriente oscilatoria i , un máximo i_0 en aquel momento en que toda la energía es magnética, esto es, la energía dieléctrica

$$\frac{Ce^2}{2}$$

y, por lo tanto, el voltaje oscilante e es cero. La energía dieléctrica tiene un máximo

$$\frac{Ce_0^2}{2}$$

y, por lo tanto, el voltaje oscilante e tiene un máximo e_0 , cuando durante la transferencia periódica de la energía acumulada toda la energía se ha convertido en dieléctrica, ó sea en energía magnética

$$\frac{Li^2}{2}$$

y, por lo tanto, la corriente oscilatoria i es cero.

Sin embargo, es la misma cantidad de energía acumulada (despreciando la disminución gradual y lenta de energía por la disipación de la potencia), que un momento aparece como energía magnética y en el momento próximo como energía dieléctrica. Así es, pues:

$$\frac{Li_0^2}{2} = \frac{Ce_0^2}{2}$$

Esta relación entre el valor máximo de la corriente oscilatoria i_0 , y el valor máximo del voltaje oscilatorio e_0 es de una importancia industrial muy grande. Se refiere á todos los transientes de doble energía, ó sea á las oscilaciones de energía acumulada. Haciendo una transposición se tiene:

$$\frac{e_0}{i_0} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$\sqrt{\frac{L}{C}}$ es de la naturaleza de una impedancia, y se la llama *impedancia natural del circuito*, pudiéndose denotar por Z_0 :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

En líneas de transmisión, Z_0 usualmente está comprendido entre 200 y 600 ohmios; es mucho más baja en cables, debido á su alta capacidad C y baja inductancia L y es mucho más elevada en circuitos inductivos, como los arrollamientos de alto potencial de los transformadores de elevado voltaje.

(Continuará).