

Hay provincias donde se hace; hay otras que no. Yo sé de una donde hasta hace poco se estuvieron empleando exclusivamente calizas relativamente blandas. Había opiniones de que las gravas no se podían utilizar; pero desde una cierta época, en esa misma provincia, se están empleando gravas con calizas y el resultado ha sido muy bueno.

Yo me permito llamar la atención de ustedes por si saben de alguna otra provincia que se halle en estas mismas condiciones.

El Sr. Benavent: Habiendo convenido en que es indispensable recurrir cuando se pueda al empleo de material de gran dureza, sería quizás conveniente tratar por los medios que fuesen más adecuados con las Compañías de ferrocarriles para ver de obtener tarifas especiales para el transporte de ese material.

El Sr. Nicolau: Eso ya está indicado al hablar de medios de transporte.

El Sr. Benavent: Existen zonas donde los materiales son máximos y, en cambio, a poca distancia los hay excelentes, pero las tarifas ferroviarias son tan altas que imposibilitan el traerlos.

El Sr. Nicolau: Eso requiere que el Ingeniero que se encuentre en ese caso se dirija al agente comercial de la Compañía y le proponga una tarifa especial para el transporte de piedra.

El Sr. Benavent: Sí, pero en un caso particular, en pequeña escala no lo conceden de seguro.

El Sr. Director general de Obras públicas: Podrá apoyarlo la Dirección.

El Sr. Nicolau: «Supresión de todo gasto, salvo el de vigilancia, en carreteras que tengan poco ó ningún tránsito, haciéndose la conservación por reparaciones generales cuando sea preciso.»

Parece que en España hay algunas carreteras donde no hay tránsito ninguno, y donde en un año puede decirse que no pasa una docena de carros por ellas, y, sin embargo, esas carreteras tienen su Ingeniero, Sobrestantes, capataces, peones, etc., en las mismas condiciones que las demás. Al cabo del año el gasto total en esas carreteras es grande, en comparación con el poco tránsito de las mismas; y este punto tiene por objeto ver si no convendría someterlas á un régimen especial, no de abandono absoluto en su conservación, pero si que se hicieran reparaciones generales únicamente cuando fuera preciso.

El Sr. Martínez y Ruiz de Azúa: Creo que no se debe suprimir ningún gasto, puesto que en estas carreteras, precisamente por el poco tránsito que tienen, será muy poco, y las visitas que á las mismas haga el Ingeniero no tendrán importancia.

El Sr. Nicolau: No me refiero á eso, que está comprendido dentro de lo que yo estimo la vigilancia, la cual no se puede abandonar, aludo especialmente á los peones camineros.

El Sr. Martínez: En vez de 5 kilómetros, 10.

El Sr. Nicolau: ¿Y si no pasan carros?

El Sr. Terán: ¿Permanentes, Sr. Martínez?

El Sr. Martínez: Permanentes mientras no se amorticen.

El Sr. Director general de Obras públicas: Señores, discutida toda la ponencia, si alguno quiere hacer alguna indicación sobre cualquiera de los puntos tratados esta tarde, se le oirá con muchísimo gusto, y si dan ustedes por terminada la discusión, me limitaré á saludarles y no digo que ofrecerme á ustedes porque ya saben que estoy á su disposición y que pueden siempre mandar lo que quieran.

Se levanta la sesión.



TRANSIENTES ELÉCTRICOS

POR

D. CARLOS PROTEUS STEINMETZ

(CONCLUSIÓN)

La importancia industrial más grande de esta relación entre el voltaje oscilatorio máximo y la corriente oscilatoria máxima está en que permite el cálculo de una forma por medio de la otra. En la mayor parte de casos de oscilaciones de energía eléctrica, una de las dos cantidades, la corriente ó el voltaje, es conocida ó puede ser determinada aproximadamente según la causa de la perturbación, y la relación arriba indicada permite el cálculo de la otra.

7. Consideremos, por ejemplo, el caso de cerrar el circuito de una línea de transmisión de 30.000 voltios. Con los interruptores abiertos, el voltaje en la línea es cero; con los interruptores cerrados, el voltaje tiene un valor efectivo de 30.000, y así, un valor máximo de

$$30.000 \sqrt{2} = 42.400 \text{ voltios.}$$

Esto es, en el momento de cerrar el circuito ocurre un cambio de voltaje repentino en la línea que como máximo puede alcanzar á $C_0 = 42.440$.

Si entonces la impedancia natural de la línea, calculada por medio de las ecuaciones ó por medio de las tablas de L y C de los conductores de la línea es: $Z_0 = 400$ ohmios, la corriente oscilante máxima, que puede producirse en la línea por la operación de intercalar la línea muerta con el transformador vivo, es limitada á

$$i_0 = \frac{e_0}{Z_0} = \frac{42.400}{400} = 106 \text{ amperios.}$$

Inversamente, cuando una línea que lleva 30.000 voltios se pone repentinamente en contacto con la tierra, ó en corto circuito, es decir, su voltaje cambia de 30.000 voltios efectivos á cero, la corriente máxima oscilatoria que puede tener lugar, y que, en caso de corto circuito se sobreimpone en la onda de la corriente permanente de corto circuito, es de 106 amperios.

Una interesante aplicación de esta relación tiene lugar para el cálculo de la descarga máxima de un rayo en una línea de transmisión, contra la cual las estaciones deben ser protegidas. Mientras el voltaje del rayo puede ser prácticamente ilimitado, el voltaje máximo que el rayo puede producir en la línea es naturalmente limitado por el esfuerzo disruptivo del aislamiento de la línea contra voltajes momentáneos. Si una línea recibe un alto voltaje por una sacudida de un rayo (como es el caso más frecuente) produce una disipación en el aislador inmediato, y si es de energía suficiente puede perforar los aisladores, destrozando los brazos, consolas y postes localmente en la línea, pero la corriente de la descarga del rayo que pasa á lo largo de la línea hacia la estación está naturalmente limitada al voltaje que pueda existir actualmente, á lo menos momentáneamente en la línea, tal como resulta de la sacudida del rayo.

Suponiendo una línea de 30.000 voltios: los aisladores deben poder soportar continuamente doble voltaje, ó 60.000, y momentáneamente á lo menos el doble, ó sea de

120.000 á 150.000. De este modo la corriente de descarga del rayo es limitada á la dada por el voltaje oscilatorio de un máximo: $e_0 = 150.000$.

Con una impedancia natural de la línea, de $z_0 = 400$ ohmios, esto da:

$$i_0 = \frac{e_0}{z_0} = 375 \text{ amperios.}$$

Así, pues, 375 amperios es la corriente de descarga máxima que el rayo podría producir en la línea y ésta es la corriente máxima, contra la cual los pararrayos de la estación tienen que proteger en el caso de una sacudida en la línea cerca de la estación.

Si la descarga obra á una distancia considerable de la estación, naturalmente que la corriente de descarga en ésta es mucho menor, pues la energía de la oscilación es rápidamente disipada en su paso á lo largo de la línea.

Admitiendo una subida momentánea del voltaje en la estación del 50 por 100, la caída máxima de voltaje al través de los pararrayos sería limitada á la mitad del voltaje máximo de la línea, ó sean 21.400 voltios. Con una descarga de 375 amperios esto permite una impedancia del pararrayos á su relación de descarga, de

$$Z = \frac{21.400}{375} = 57 \text{ ohmios.}$$

Para asegurarse una protección efectiva contra el rayo la resistencia del pararrayos ó impedancia de su conexión á la línea y á la tierra, no debe, pues, exceder de 57 ohmios en este caso.

Si, no obstante, la impedancia natural Z_0 fuese mucho más baja debido al uso de conductores de gran diámetro y una relativa corta distancia relativamente corta entre ellos, por ejemplo, $Z_0 = 200$, y dos líneas paralelas tendidas desde la estación, entonces, si ambas líneas fuesen sacudidas simultáneamente, la impedancia natural de la descarga sería solamente:

$$\frac{Z_0}{2} = 100 \text{ ohmios.}$$

y la corriente máxima de descarga, 1.500 amperios, y de este modo limitaría la impedancia admisible del circuito del pararrayos á 14 ohmios. Así es que resulta necesario para el uno y el otro una resistencia muy baja del pararrayos y una relación de la descarga de impedancia, muy baja también, ó bien el empleo de varios pararrayos y varias líneas y conexiones á tierras múltiples, para asegurar la protección.

8. Como se ha visto, sin entrar en un estudio de detalle de los transientes del rayo se pueden sacar elementos considerables de la relación fundamental arriba citada de la corriente y voltaje de los transientes de doble energía.

Inversamente, esta relación puede aplicarse para determinar el voltaje de oscilación, que puede ser producido por un cambio repentino de la corriente en la línea. Admitiendo que la corriente de carga total de la línea de 30.000 voltios sea de 200 amperios efectivos, tiene un valor máximo de $200 \sqrt{2} = 283$ amperios. Si entonces quitando la carga total del circuito fuere cortado con el valor máximo de la corriente, la oscilación que resulta sería la debida á

un cambio súbito de corriente desde 283 amperios á cero, ó sea:

$$i_0 = 283 \text{ amperios.}$$

Cada una impedancia natural de: $Z_0 = 400$ ohmios, esto da un voltaje oscilatorio máximo de:

$$e_0 = i_0 Z_0 = 283 \times 400 = 113.000 \text{ voltios.}$$

Esto es más del doble del voltaje, ó sea, más que el voltaje que la línea puede soportar continuamente y todavía una sobrecarga moderada, como del 50 por 100 daría un voltaje oscilatorio más elevado que el que la línea podría soportar aun momentáneamente, que causaría chispas en la periferia ó perforaría el aislamiento.

Cortar así la corriente en su máximo ó cerca de él es peligroso y con frecuencia destructivo y el problema de verificación de las líneas de transmisión consiste en proyectar un mecanismo de interrupción, que pueda ser siempre conectado de modo que se corte la corriente á cero. Ésta es la razón por la cual se ha llegado al desarrollo de los interruptores modernos de aceite, puesto que este tipo tiene la característica de cortar el circuito teniendo la corriente el valor cero.

También ha conducido al abandono de todos los tipos de interruptores de aire, como peligrosos en circuitos de alto voltaje, ya que el tipo de interruptor de aire no puede ser dispuesto para cortar siempre la corriente á cero, sino que algunas veces la corta en su máximo ó cerca de éste, siendo entonces expuesto á la destrucción del aislamiento del circuito.

La maniobra de los actuales sistemas de elevado voltaje tan extendidos ha llegado así á ser posible sólo por el desarrollo de los interruptores modernos de aceite.

Puesto que la ruptura de la corriente á plena carga, cuando tiene lugar en punto inadecuado de la onda conduce á voltajes peligrosos, es interesante ver lo que resultaría de abrir un *corto circuito* con la corriente máxima ó cerca de ella.

Suponiendo que la impedancia de la línea es del 20 por 100 á plena carga, ó sea con la corriente de plena carga, el voltaje de impedancia de la línea es del 20 por 100 ó un quinto del voltaje.

En corto circuito el voltaje total imprimido es consumido por la impedancia de la línea, y de este modo la corriente de corto circuito sería cinco veces la corriente de plena carga, mientras que el sistema generador pueda mantener el pleno voltaje en la línea, á lo menos momentáneamente, en el caso de un corto circuito en el extremo de ella.

Con una plena carga de 200 amperios efectivos ó 283 amperios máximo, la corriente máxima de corto circuito sería de $5 \times 283 = 1.415$ amperios, y si se interrumpiere á su valor máximo daría una oscilación de corriente máxima: $i_0 = 1.415$ amperios; así, con una impedancia natural de la línea de $Z_0 = 400$ ohmios, da un voltaje oscilante de valor máximo:

$$e_0 = i_0 Z_0 = 1.415 \times 400 = 566.000 \text{ voltios,}$$

ó sea muy lejos todavía de la fuerza aislante posible de la línea, ó en otras palabras, el aislamiento de la línea, por bueno que sea, se destruiría en el caso de un corto circui-

to, siendo interrumpido ó cortado en el máximo ó cerca del máximo valor de la corriente.

El transiente más destructivo de los circuitos de alto voltaje es, pues, la oscilación del corto circuito.

Algunas veces, sin embargo, los cortos circuitos son inevitables en las líneas de transmisión, ya sea debido á accidentes en los aparatos, ya debido á la producción de chispas en la línea, en aisladores defectuosos, por perturbaciones atmosféricas eléctricas, por vientos fuertes que hacen balancear los hilos, etc.

En cuanto se abren los cortos circuitos por los interruptores de aceite en el sistema, son relativamente inofensivos debido á la naturaleza del interruptor de aceite para abrir la corriente á cero. Son más peligrosas las formaciones de llamas en la línea que resultan de los arcos que se forman y que empiezan por extenderse y luego se apagan.

Afortunadamente, tales arcos sólo algunas veces desarrollan sus cualidades destructivas; pero por lo general desaparecen en el cero de la onda de la corriente; al final de media onda la corriente de vapor del arco se enfría lo suficiente para que al empezar la siguiente mitad de onda el arco no salte nuevamente.

Algunas veces, sin embargo, estos arcos se apagan ellos mismos por explosión, á causa de la rápida expansión del aire debida al calor del arco, y como el efecto calorífico es una corriente en su máximo ó cerca de su máximo, esta ruptura explosiva del arco tiende á ocurrir cerca la corriente máxima, y entonces produce una oscilación destructiva.

Este es el caso, especialmente en circuitos de alta capacidad y baja reactancia, como en los cables, en donde la corriente y, por lo tanto, el efecto calorífico en el arco es muy grande y el arco más estable. Así, tales arcos constituyen los fenómenos más peligrosos y más destructivos de los circuitos de alto voltaje.

Es interesante notar que las vibraciones que resultan de un transiente de corriente son, por lo general, mucho mayores en magnitud y en poder destructivo que los que resultan de un transiente de voltaje.

9. Hemos visto que en la vibración de la energía magnética y dieléctrica acumulada la corriente es un máximo cuando el voltaje es cero é inversamente, esto es, la corriente oscilante y el voltaje oscilante están en cuadratura, y de este modo la potencia es reactiva, pues que se produce oscilación del uno á la otra sin haber flujo de potencia á lo largo del circuito. Tal oscilación de energía se llama una *oscilación fija, onda permanente* á *oscilación*.

La corriente oscilatoria y el voltaje pueden también estar en fase una con otra. Entonces hay un flujo de potencia á lo largo del circuito y el fenómeno se llama *onda móvil* ó un *impulso* eléctrico.

Las ondas movibles se han observado ser de frecuencias desde pocos centenares de ciclos á millones de ciclos; éstos por el oscilógrafo y aquéllos por una chispa al través de una pequeña reactancia.

En circuitos que comprenden secciones de diferente carácter, como línea de transmisión, transformador, carga, etc., ó sea en los casos más industrialmente importantes, la oscilación de energía es una combinación de ondas fijas y movibles.

La oscilación de energía, naturalmente, debe desaparecer simultáneamente en todas las secciones del circuito.

Sin embargo, en algunas secciones del circuito, como la línea de transmisión, la disipación de la energía tiene lugar en mayor proporción que en otras secciones del circuito, como en las bobinas de los transformadores y dejadas aparte, la oscilación desaparecería mucho más rápidamente en la línea que en el transformador. Así, cuando la línea y el transformador están conectados, debe suministrarse energía á la línea de la acumulada en el transformador por una onda movable.

De este modo en la oscilación de energía ó el transiente de un tal circuito compuesto, ocurre un flujo de potencia oscilante entre las secciones del circuito. En una transformación del voltaje oscilante y corriente esto resalta en el punto de transición entre las secciones sucesivas del circuito.

Por ejemplo, si una onda movable pasa desde una línea de transmisión al arrollamiento de alto potencial del transformador de reducción y e_1 es el máximo voltaje, i_1 la corriente máxima, tenemos

$$p_1 = \frac{e_1 i_1}{2}$$

la potencia de la onda en la línea de transmisión; e_2 el voltaje máximo é i_2 la corriente máxima, de donde

$$p_2 = \frac{e_2 i_2}{2}$$

la potencia de la onda en el transformador: como la misma potencia que deja la línea entra el transformador, se tiene:

$$\frac{e_1 i_1}{2} = \frac{e_2 i_2}{2} \quad (1)$$

e lo mismo que i están, sin embargo, en relación por la impedancia natural de la sección del circuito, ó sea:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \frac{e_1}{Z_1} \\ i_2 &= \frac{e_2}{Z_2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

siendo Z_1 es la impedancia natural de la línea y Z_2 la impedancia natural del transformador.

Sustituyendo (2) en (1) tenemos:

$$\frac{e_2}{e_1} = \sqrt{\frac{Z_2}{Z_1}}$$

Esto es, «en el punto de transición entre dos secciones de un circuito tiene lugar una transformación de voltaje con una relación de transformación, que es la raíz cuadrada de la relación de la impedancia natural de dos secciones del circuito y una transformación de corriente por la relación inversa»:

$$\frac{i_2}{i_1} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$$

Esta relación entre los voltajes oscilantes y las corrientes en diferentes secciones del circuito es de importancia fundamental el trazar su origen y poder destructivo.

Desde que una onda movable que viene de una sección

de circuito á otra de impedancia natural más elevada, aumenta en voltaje, y por lo tanto, en poder destructivo, é inversamente, cuando entra en una sección de impedancia natural más baja, disminuye en voltaje.

Así, pues, si una onda movible de $e_1 = 30.000$ voltios viene de una línea de una impedancia natural $Z_1 = 400$ ohmios, en el arrollamiento de alto potencial de un transformador, de impedancia natural $Z_2 = 3.600$ ohmios, sube el voltaje á

$$e_2 = e_1 \sqrt{\frac{Z_2}{Z_1}} = 30.000 \sqrt{\frac{3600}{400}} = 90.000 \text{ voltios.}$$

10. Las perturbaciones eléctricas que se originan en una sección de un circuito, con frecuencia desarrollan su poder destructivo en secciones de circuito adyacentes, en las cuales, debido á la impedancia natural más elevada de la primera sección han subido ó aumentado hasta voltajes destructivos.

El resultado y la indicación de una perturbación en una línea de transmisión es así con frecuencia la destrucción de los transformadores conectados en la línea, no porque los transformadores sean defectuosos de aislamiento, sino porque la perturbación, mientras es de un voltaje inofensivo en la línea, al entrar en el transformador se eleva en voltaje á valores destructivos.

Cuando se habla de transformación de voltaje en el punto de transición entre dos secciones de un circuito, es obvio que en el punto de transición el voltaje es el mismo en ambos circuitos, pero ocurre un cambio de fase que resulta en un voltaje máximo diferente á alguna distancia más allá en el circuito del punto donde tiene lugar el máximo voltaje.

Con un aumento de voltaje, este máximo es aproximadamente una cuarta parte de onda distante del punto de transición, y dependiendo la frecuencia de la onda, este punto puede estar muy cerca del punto de transición con

ondas de muy alta frecuencia ó muy distante, con bajas frecuencias.

De este modo pueden los transformadores destruirse en el medio de sus arrollamientos, como resultado de perturbaciones en la línea de transmisión en que están conectados si la perturbación es de una frecuencia moderada, mientras que la destrucción ocurriría en las espiras extremas si la perturbación en la línea es de muy alta frecuencia.

Así, pues, la localización de la destrucción en un transformador no indica si la perturbación se ha originado en el transformador ó si ha entrado de fuera.

Para concluir, pues, las dos relaciones numéricas más importantes que gobiernan las perturbaciones eléctricas en sistemas de alto voltaje son:

a. La relación entre la corriente máxima i_0 y el voltaje máximo e_0 de la oscilación, onda permanente, impulso ú onda movible:

$$\frac{e_0}{i_0} = Z_0$$

de donde

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

es la impedancia natural del circuito.

b. La relación de transformación de voltajes e_1 y e_2 y corrientes i_1 é i_2 en el punto de transición entre dos secciones de circuitos adjuntas, de impedancias naturales Z_1 y Z_2 respectivamente es:

$$\frac{e_2}{e_1} = \sqrt{\frac{Z_2}{Z_1}} = \frac{i_1}{i_2}$$

y de estas dos relaciones se pueden derivar considerables datos sobre la naturaleza, causa y efectos de los transientes.

Revista de las principales publicaciones técnicas.

Los servicios generales de la Exposición internacional de Turín.

El emplazamiento escogido para la Exposición internacional de Turín (fig. 1.^a) es el Parque del Valentino, en la orilla izquierda del Po, y una faja de terreno situada en la orilla opuesta, al pie de una colina cubierta de árboles y de jardines, sobre la cual se escalonan las construcciones. La superficie total de la Exposición es de 1.200.000 metros cuadrados, de los cuales 350.000 están ocupados por edificios, extendiéndose aquélla en una longitud de cerca de 3 kilómetros. La superficie ocupada de la Exposición de Milán no era más que de 280.000 metros cuadrados.

La Exposición se encuentra en la misma ciudad y á poca distancia del centro; la puerta situada en el puente Humberto I se halla, en efecto, á menos de 800 metros de la estación central. El otro extremo de la Exposición en la orilla derecha, el *Pilone*, es, en verdad, de un acceso menos fácil y se encuentra en cierto modo aislado del resto de la Exposición.

De una manera general, los diversos palacios son obras ar-

quitectónicas de valor y deben su bello aspecto más bien á sus líneas que á la riqueza de la decoración de que tanto se abusa á menudo en las construcciones provisionales de las Exposiciones; como ejemplo reproducimos la figura 2.^a que representa el Palacio de las Industrias artísticas, figura que, con otras, ilustra el artículo que M. P. Calfas, Ingeniero de artes y manufacturas, publica en *Le Génie Civil*, del 5 de Agosto, y del cual extractamos la parte relativa al asunto que encabeza esta nota.

Los servicios generales afectos á dicha Exposición comprenden:

Fuerza motriz.—La fuerza motriz se suministra á la Exposición por una estación central (figs. 3.^a y 4.^a); lo mismo ocurrió en las precedentes Exposiciones de Turín, pero, mientras que en la de 1884 la potencia total no era más que de 900 caballos y en la de 1898 de 1.250, en la actual llega á 10.000 caballos.

Esta estación, situada en la extremidad de la Galería llamada «de máquinas en movimiento», comprende:

Dos calderas Babcock y Wilcox, de 1.148 metros cuadrados de superficie de calefacción total que producen vapor recalentado á 350°, á la presión de 13 kilogramos por centímetro cuadrado.