

REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS

FUNDADA Y SOSTENIDA POR EL CUERPO NACIONAL DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Redactor-Presidente... Excmo. é Ilmo. Sr. D. Leonardo de Tejada, Inspector general del Cuerpo
Redactores..... Los Sres. Presidentes de las Comisiones regionales de Ingenieros.
 D. Antonio Sanier, Profesor de la Escuela de Caminos.
 D. Manuel Maluquer, Ingeniero del mismo Cuerpo, *Secretario*.
Colaboradores..... Todos los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

SE PUBLICA LOS JUEVES

Redacción y Administración: Puerta del Sol, 9, pral.

EFFECTOS DE RESONANCIA

Decíamos en el artículo anterior, que como lo único que podía y debía mantenerse cons ante en la central, era la tensión eficaz *fundamental*, la máxima tensión que por efecto de las resonancias habrían de soportar los dieléctricos podía ser muy distinta de aquélla, y hasta alcanzar valores enormes, ó por lo menos tales que impidieran todo funcionamiento regular de la instalación.

No es necesario para ello que concurren circunstancias tan raras, que pudieran hacer este estudio una mera *curiosidad* científica; bastan las usuales y corrientes de la práctica, como probaremos con algunos ejemplos, por lo cual debe preocupar este asunto muy principalmente á cuantos Ingenieros se ocupan en transportes y distribuciones por corrientes alternas.

Sabido es, que la distancia explosiva entre dos conductores de forma análoga, es una función determinada de la diferencia de potencial máxima *verdadera*. Ferranti halló entre dos bolas de dos centímetros de diámetro, en la Central de Depfort, una distancia explosiva de 14 mm. para una tensión de 15.000 v. y Mascart con los mismos conductores y en análogas condiciones hubo de subir la tensión á 50.000 v. para la misma longitud de chispa.

¿Cómo puede explicarse esto? Únicamente porque Ferranti midió con un voltímetro térmico, unido á un pequeño transformador, y por lo que ya hemos dicho respecto á estos aparatos de medidas industriales, no pudo apreciar la verdadera tensión máxima producida por las armónicas, y que debió ser por lo menos de 50.000 v.

En el sector «des Champs Elysées (Paris)», que trabaja á 3.000 v., se probaron las máquinas con buen resultado á 4.000 v.; pero al hacerlas trabajar sobre la red, apenas se llegó á los 1.500 v., una lluvia de chispas en el entre-hierro quemó el dieléctrico, para lo cual fué necesario (según Gray) que la tensión máxima *verdadera* alcanzase 15.000 v.; esto es, que fuese unas siete veces mayor que la correspondiente á la eficaz medida en la central, puesto que se comprobó que la curva de tensión de las máquinas era sensiblemente sinusoidal.

Un transporte de energía en Rouen, con dos transformadores, uno de corriente continua en trifásica, á 4.500 v., y otro inverso, en los cuales se comprobó la forma sinusoidal de la curva de tensión, no pudo realizarse, pues apenas la carga llegaba á la mitad de su valor normal, se producían violentas explosiones en el colector, y la máquina parecía que aspiraba la corriente.

Cita Rodet en la obra *Distribution de l'énergie par courants polyphasés* el siguiente hecho: «Habiendo faltado cable con cubierta de plomo de 250 milímetros, para unir al cuadro una generatriz trifásica de 3×440 a. á 200 v., se tomó para uno de los conductores un cable armado tipo Siemens de la misma sección. Este cable se calentó de tal modo, que se fundió la capa exterior de brea, cuando los otros dos conductores no manifestaban calentamiento anormal». Algo de esto debió suceder en la canali-

zación subterránea de Pamplona, que no dió resultados muy satisfactorios.

En Saint-Ouen se trataba también de un transporte de corriente trifásica á 6.000 v., que luego se transformaba en continua. En esta instalación debieron originarse tensiones hasta de 100.000 v. y más, que perforaron todos los dieléctricos á medida que los perforados se iban reforzando; primero fueron los de las máquinas, después los de los transformadores y por último los de los cables.

En Berlín, en la central de Ober-Spree de corriente trifásica á 6.000 v., se observó que doblaba la intensidad de la corriente sin que, á tensión constante, variase la admisión en las máquinas de vapor. Fenómeno tan curioso era debido á que las armónicas habían resonado de tal modo que triplicaron la frecuencia de la corriente.

No creemos necesario aducir más ejemplos para probar que los ensayos que generalmente prescriben los pliegos de condiciones para suministro de material eléctrico, y, entre ellos, el más importante desde el punto de vista que examinamos, esto es, la prueba con una tensión doble ó triple que la normal, ni dan seguridad al comprador, en caso de ser satisfactorios, ni prueban de un modo absoluto en caso de avería, defectos en el material, puesto que han podido producirse tensiones muchísimo más elevadas que las medidas.

Con elementos muy buenos puede no funcionar una instalación, si en el enlace y relación de estos elementos no se han tenido en cuenta los efectos de resonancia.

En estos efectos tiene una importancia capital la capacidad de la red, que actúa como una caja sonora reforzando las armónicas de orden inferior, que son las más temibles.

Para darnos cuenta de esta influencia de la capacidad, consideremos un alternador de resistencia R y de coeficiente auto-inducción L cerrado sobre un circuito de resistencia r y coeficiente l , con un condensador en derivación de capacidad c . Sea e la fuerza electromotriz desarrollada en la armadura del alternador, h la tensión entre bornes, i la intensidad sobre el circuito receptor, y j la corriente que atraviesa el condensador. Podremos establecer

$$e = R(i + j) + L \frac{di}{dt} (i + j) + h$$

$$h = r i + l \frac{di}{dt}$$

$$j = c \frac{dh}{dt} = c r \frac{di}{dt} + c l \frac{d^2 i}{dt^2}$$

de donde

$$e = (R + r) i + (L + l + c r R) \frac{di}{dt}$$

$$+ c (R l + r L) \frac{d^2 i}{dt^2} + c l L \frac{d^3 i}{dt^3}$$

De esta fórmula y del desarrollo de Fourier ya incluido, se deduce que la tensión h_n correspondiente á la armónica de orden n y de frecuencia $n \cdot \alpha$ es:

$$(1) h_n = \frac{e_n \sqrt{r^2 + 4 \pi^2 n^2 \alpha^2 l^2}}{\sqrt{[R + r - 4 \pi^2 n^2 \alpha^2 c (lR + Lr)]^2 + 4 \pi^2 n^2 \alpha^2 [L + l + c (rR - 4 \pi^2 n^2 \alpha^2 lL)]^2}}$$

esto es, igual al producto de la fuerza electromotriz e_n por un factor que es función de la capacidad; así pues, según sea ésta, así será h_n .

Igualando á 0 la derivada de h_n con relación á c , podrá determinarse un valor máximo, y dando á n los valores 1, 3, 5,.... se obtendrán una serie de ecuaciones que permitirán deducir h_1 , h_3 , h_5 ,.... Ha de tenerse, sin embargo, en cuenta que las resistencias y los coeficientes de auto inducción varían con la frecuencia, es decir, para las diversas armónicas, y con la carga, y esta variación es tan compleja que hace imposible la solución matemática del problema; pero puede en cada caso llegarse á una solución aproximada que dé por lo menos idea de las resonancias que podrán producirse.

Son también muy de tener en cuenta las corrientes oscilatorias de rápida frecuencia que se producen en los conductores al cambiar su régimen de carga y que pueden hasta duplicar la tensión máxima á que en régimen normal estén sometidos los dieléctricos.

Parece á primera vista que los pararrayos podrían evitar los efectos desastrosos de las altas tensiones anormales, pero se ha comprobado que no es así; porque funcionan como una válvula de seguridad que, una vez abierta, no se cierra hasta dejar vacía la caldera; así, desde que salta el arco en el pararrayos, los cables se descargan instantáneamente para volver luego á cargarse y seguir con este régimen de cargas y descargas sucesivas que hace imposible la utilización de la energía.

Como soluciones radicales del problema planteado, sólo hay las tres siguientes:

- 1.ª Las máquinas que no produzcan armónicas.
- 2.ª Las redes en las cuales no puedan resonar armónicas.
- 3.ª La combinación tel de máquinas y redes que las armónicas producidas en las primeras no puedan resonar en las segundas.

Como generalmente sucede en casos análogos, ninguna de estas soluciones *absolutas* es posible industrialmente; pero bastará en la mayoría de los casos tender hacia ellas, para que ya los efectos de resonancia no tengan inconvenientes prácticos.

Aunque toda máquina produce un número *indefinido* de armónicas, se tenderá á la primera solución, evitando el empleo de conmutatrices con pequeño número de circuitos secundarios; porque producirían armónicas de los primeros órdenes, que son los más temibles, y dando un ligero entre-hierro á los transformadores con el fin de evitar las armónicas producidas por las variaciones de la permeabilidad magnética.

En el caso de líneas aéreas, cuya capacidad sea muy pequeña, y, por lo tanto, en las cuales sólo puedan resonar armónicas de orden muy elevado, no son de temer extraordinarias tensiones anormales, pues que el término armónico de orden n es la n -ésima parte del de primero; pero cuando precisen los cables armados, entonces la segunda solución no es tampoco posible, y para tender á ella pueden tenerse en cuenta las siguientes indicaciones:

Emplear la menor tensión y la menor frecuencia posibles, puesto que estos elementos aumentan el coeficiente de autoinducción de todos los aparatos y facilitan la resonancia de armónicas más bajas.

Proscribir en absoluto el empleo de los cables concéntricos que tienen mayor capacidad que los retorcidos, y con los cuales el aislamiento de las máquinas es más difícil, si, como generalmente sucedé, el conductor exterior está poco aislado de tierra.

Tener extraordinario cuidado en la elección y disposición de

los electromotores, porque oponen pequeña resistencia al paso de corrientes de frecuencia superior á la normal, y pueden originar, como en Ober-Spree, el que se triplique la intensidad.

No disponer un gran número de arcos en serie, pues que su fuerza contra-electromotriz puede originar armónicas de los primeros órdenes.

Con las corrientes alternas, á la inversa de lo que sucede con las continuas, la extracorrente de cierre es la peligrosa, puesto que los arcos que se producen al abrir el circuito, obran como reostatos de resistencia creciente.

No deben, pues, cerrarse nunca los circuitos de corriente alterna, sin el intermedio de una bobina de autoinducción variable.

Precauciones de la índole de las indicadas, bastarán en general para asegurar el buen aislamiento de las instalaciones, y sólo en casos muy especiales será preciso recurrir á la tercera solución, haciendo un estudio sumamente complejo en cada caso, estudio que no podemos desarrollar aquí.

ANTONIO GONZÁLEZ Y ECHARTE.

Madrid, Noviembre 9.

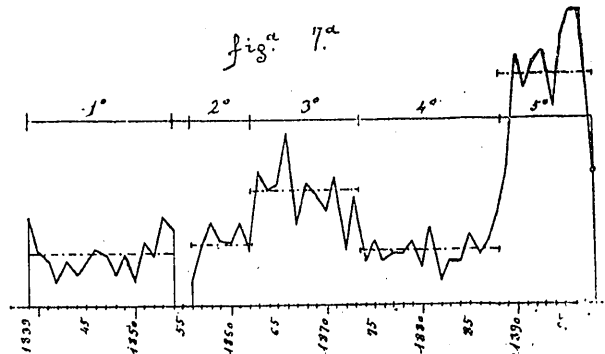
DISQUISICIONES

III.—Realidades.

Que la verdad es amarga y tristes las realidades, son cosas sabidas de antaño, y que la conseja se cumple en este caso no hay para qué decirlo; mas, como siempre, del conocimiento de la verdad brota fecundo manantial de enseñanzas, que, aprovechadas con oportunidad y decisión, conseguirán atajar los daños hoy puestos de relieve. Por causas inevitables, que á nadie cabe imputar, el mal se ha producido, y hay que sanarlo; de lo contrario, las consecuencias serán desastrosas para los intereses del país, para la Administración pública y para los Ingenieros.

Cómo se muestra la realidad en el organismo del Cuerpo de Ingenieros de Caminos es el asunto de esta tercera y última disquisición.

La línea quebrada de la fig. 7.ª representa la serie de pro-



mociones que desde el año 1839 al 1893 han salido de la Escuela, las ordenadas de sus vértices son proporcionales á los números de alumnos de las promociones; el área del polígono figura el total de Ingenieros en ellas contenidos. Son 59 promociones, con 833 individuos:

Aunque de forma irregular, puede distribuirse en cinco grupos: el primero se extiende del 1839 al 1854, y ofrece una promoción media de 8,2 individuos; el segundo, abarca hasta 1862