

del siglo XV, dirigió la construcción de este puente, del que ya no quedan más que los primeros arcos inmediatos a las murallas, hasta el número cinco, llamado arco de las armas, y algunos cimientos de otros destruidos por las crecidas y sobre los que se levantaron los actuales de ladrillo, y unos tramos de madera en la margen izquierda, que en 1908 fueron sustituidos por otros de hierro.

Así, el puente angosto y torcido sorprende por su longitud interminable. Sus arcos, ni grandiosos ni uniformes, estribando sobre gruesos pilares, llegan a treinta y uno, más los cinco tramos de hierro, que suman los treinta y seis claros del puente actual.

Los cuatro primeros arcos más próximos a la villa, del tiempo de Mendoza, son de piedra y forman ángulo con la línea de los restantes que, como hemos dicho, son de ladrillo, menos los cinco últimos, destruidos en la invasión francesa, arreglados provisionalmente de madera y definitivamente de hierro.

Las luces de los distintos tramos de este puente son las siguientes:

Número	Luces	Número	Luces	Número	Luces
1	10,25	13	9,25	25	2,80
2	10,60	14	10,80	26	10,80
3	10,60	15	10,05	27	2,40
4	10,70	16	11,00	28	10,80
5	10,85	17	11,05	29	5,35
6	5,75	18	10,90	30	6,30
7	8,90	19	3,90	31	8,30
8	11,00	20	5,65	32	5,00
9	9,50	21	4,40	33	4,15
10	10,70	22	4,30	34	6,50
11	6,00	23	7,00	35	6,00
12	11,00	24	7,85	36	6,15

Completan la descripción algunas fotografías que dan idea del aspecto general que ofrece este puente.

V. M.

Bibliografía y colaboración: Parcerisa y Quadrado, *Recuerdos y bellezas de España: Castilla la Nueva*, Tomo II. Ildefonso Fernández y Sánchez, *Historia de Talavera*.

Los dibujos del puente del Arzobispo son debidos al profesor de la Escuela, D. Antonio Prieto Vives.

Notas y fotografías han suministrado el ingeniero jefe de Obras públicas de la provincia de Toledo, D. Luis Baroet y el alumno de la Escuela D. Juan Reguart.

Acoplamiento de alternadores

I

Objeto del artículo

Los ingenieros y matemáticos que han estudiado el funcionamiento de las máquinas eléctricas, analizaron sutilmente todas las incidencias de los fenómenos que se presentan en el servicio. Las alteraciones de régimen por variaciones lentas o medianamente rápidas de la potencia motora o de las constantes del circuito exterior sobre que se trabaja, fueron tenidas en cuenta, desde el comienzo de la investigación, en las máquinas de corriente continua y calculadas las fluctuaciones de las cantidades que entran en juego. Para los alternadores, hubo de introducirse en el cálculo otras variaciones rapidísimas del vaivén de las cantidades armónicas fundamentales y más tarde hasta las vertiginosas variaciones del establecimiento del régimen de la corriente y otras fluctuaciones de período sumamente corto.

Al estudiar el caso, que la necesidad práctica impuso, del trabajo simultáneo de varias máquinas sobre un mismo circuito, debieron los ingenieros introducir en el problema las reacciones mutuas de unas máquinas sobre otras, y el estudio de estas reacciones asentó en la técnica un problema tipo, resuelto, desde luego, en un primer grado de aproximación: el acoplamiento de un alternador a otro o a una red que se halle trabajando. Para calcular el impulso que cada máquina recibe de su compañera en el trabajo se la considera como un manantial de energía eléctrica en el cual se engendra una fuerza electromotriz activa o pasiva y que reacciona contra la corriente que la atraviesa, como una bobina sélfica meramente.

En realidad, desde el principio fué bien comprendido el hecho de que la reacción del circuito de armadura del alternador, provocada por la corriente circulante, no es simplemente sélfica, y en los libros clásicos se explica exactamente cómo es aquella reac-

ción. Así, por ejemplo, el maestro Steinmetz, con la esplendorosa claridad que le caracterizaba, además de explicar las circunstancias de aquella reacción, dedica un capítulo de su obra *Teoría y cálculo de los fenómenos de la corriente alternativa* a comentar lo que sería una «máquina de reacción», o sea una máquina de corriente alternativa, vulgar, funcionando sin excitación, en virtud de ciertas disimetrías de la reacción de armadura.

El efecto utilizable en la máquina de reacción, nacido de la disimetría apuntada, consiste, como explica Steinmetz, en que, contrariamente a lo que sucede en un circuito que permanece quieto entre las masas materiales que le rodean, la f. e. m. de selfinducción no está defasada a 90° sobre la corriente y puede hacer, por tanto, trabajo.

A pesar de esta exacta comprensión de los fenómenos, los autores que iban a vanguardia en la investigación, rehuyendo la complejidad del problema, equipararon la reacción de armadura de un alternador acoplado a otros a la reacción de una bobina quieta entre otros cuerpos materiales, fundándose para ello en ciertas analogías de efectos.

La aproximación lograda en el estudio clásico que comentamos será muy suficiente en la generalidad de los problemas; pero tratándose de algunos referentes a máquinas complicadas modernas, no lo es, a mi entender, algunas veces, y el objeto de este artículo es mostrar el grado de aproximación del cálculo corriente y señalar modificaciones que convendría introducir en algún problema delicado, para aquilatar, en el estudio del acoplamiento, la reacción de armadura introduciendo una computación más aproximada de la potencia sincronizante.

El profesor L. Barbillion, en su obra reciente *Couplage des alternateurs*, al establecer el estudio previo de los fenómenos eléctricos del acoplamiento en paralelo, escribe: «Este problema es de una complicación extremada; debe, sin embargo, tratarse en toda

su generalidad; porque toda solución fundada en hipótesis restrictivas carecería de interés.» Sin embargo, al admitir la asimilación del alternador, como órgano reactivo, a una bobina sélfica, asienta una hipótesis restrictiva por demás trascendental.

Estudio de la reacción de armadura de los alternadores

Para ponerse de acuerdo con el lector, recuerda en este párrafo el autor las circunstancias conocidas de la reacción de armadura de los alternadores.

Consideremos las acciones armónicas fundamentales, en un alternador trifásico con carga equilibrada, del tipo «estandarizado». Las corrientes que circulan por la armadura componiendo sus efectos unas con otras engendran, como es sabido, una f. m. m. distribuida en el entrehierro, con una figura estrellada de ramas que supondremos de forma exactamente senooidal y que acompaña sincrónicamente, en su movimiento de rotación uniforme, a la estrella magnética inductora. Pero los ejes de simetría de la figura representativa de esta reacción magnética, a lo largo del entrehierro, no se superponen ni a los ejes de la estrella inductora, ni a sus bisectrices angulares o ejes neutros. Ocupan, en general, una posición intermedia. Para calcular el efecto reactivo de esta estrella magnemotriz se ha distinguido, de siempre, en ella, dos influencias separables en la imaginación: una, que engendra simplemente por sí sola una f. e. m. sélfica, y otra influencia modificadora de la intensidad magnética del campo principal.

Pero conviene, como explican los autores, subdividir aun más estos efectos. Para ello puede descomponerse las corrientes en sus dos porciones ideales, vatiada y desvatiada, con relación a la f. e. m., producida estrictamente por el campo inductor. Cada una de estas componentes producirá un efecto reactivo, y sumados ambos efectos se tendrá la reacción total.

La f. m. m. virtual de la corriente desvatiada dibujará una estrella de ramas senooidales, a lo largo del entrehierro, cuyos ejes coincidirán con los radios de la estrella inductora, y la f. m. m. virtual de la corriente vatiada otra estrella análoga, coincidiendo sus radios con las bisectrices de los anteriores.

La diferencia esencial entre este caso de la máquina y el caso de una bobina simple consiste en esto: que en el alternador, el circuito magnético que se ofrece a la f. m. m. de la corriente desvatiada es de forma y reluctancia distinta que el que se presenta a la componente vatiada, y, contrariamente, en la bobina, ambos circuitos son uno solo.

La reluctancia del circuito canalizado a lo largo de los radios féreos de la estrella inductora, que se presenta a la f. m. m. de la componente desvatiada, es menor que la del circuito de la vatiada, aéreo en su mayor parte. Además, el primero está excitado ya intensamente por los amperiovueltas de la corriente excitatriz de la máquina.

Estas consideraciones nos conducen a dividir la reacción total en tres partes, que se calculan por medio de tres coeficientes:

1.º La acción magnetizadora de la corriente desvatiada modifica la intensidad del campo principal. La intensidad de esta componente desvatiada, I_d , multiplicada por un coeficiente numérico, α , puede sumarse a la intensidad, i , de la corriente excitatriz,

con sentido negativo, para calcular una corriente virtual que obrando sola, en el circuito excitador, produjera el mismo campo principal real de la máquina en funci6n. El campo verdadero es igual al producido en el hierro de la máquina, funcionando en vacío, por una corriente excitatriz igual a $i - I_d \alpha$. Este es el coeficiente α de Potier.

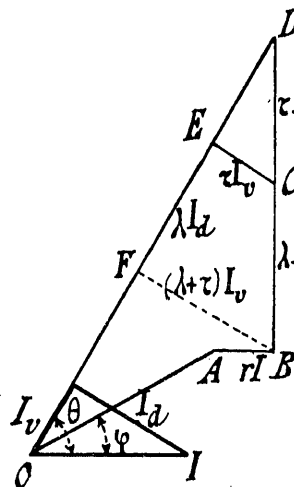
2.º La componente desvatiada produce además líneas de fuerza magnética que se enhebran en espiras de la armadura, cerrándose al través de zonas casi enteramente aéreas, sin pasar a lo largo del circuito de hierro de la estrella inductora. Su alternación engendra una f. e. m. sélfica de fase encontrada con la de la componente de la corriente desvatiada. A la velocidad de régimen, el coeficiente de reactancia aplicable a este efecto suele designarse con la letra griega λ .

3.º La componente vatiada tiene muy poca influencia sobre la intensidad de imanación del hierro de la estrella magnética. Unicamente puede suceder, cuando se halla este hierro en un estado próximo a la saturación, que la influencia de la corriente vatiada robe a un cuerno polar de la estrella más magnetismo que lo que añada al cuerno opuesto del mismo polo, alterando el valor del flujo total. Pero con pequeño error puede suponerse, casi siempre, que el efecto de la componente vatiada es sólo el de retorcer las líneas del campo principal, alterando su forma; pero no el valor total del flujo inductor. El efecto de que hablamos se reduce, en definitiva, a otra f. e. m. sélfica con un coeficiente de reactancia naturalmente mayor que λ , o sea igual a $\lambda \times \tau$. Este tercer coeficiente, τ , se tiene en cuenta en el diagrama de Blondel, que representa, con mucha aproximación, la interdependencia de unas y otras cantidades, de que venimos hablando.

Si el vector OI representa a la corriente y el decaje en el circuito exterior es φ , en la dirección OA podemos tomar la d. d. p. entre bornes. AB , paralelamente a OI , será la pérdida por efecto Joule, rI en la armadura. BC , perpendicularmente a OI , podrá representar a λI . En prolongación dibujamos τI en CD . Unamos O con D y desde C tracemos CE perpendicular a OE . Este vector OE representa la f. e. m. de la máquina. I_v e I_d , pueden ser las componentes vatiada y desvatiada, en un diagrama adjunto de corrientes dibujado con línea más gruesa. La intensidad de excitación es la correspondiente a la f. e. m. OE ,

en circuito abierto, añadiéndole el valor $- \alpha I_d$. La potencia de la máquina es $OA + OI \times \cos \varphi + rI^2$; la cual suma no es igual, como salta a la vista, a $OE \times OI \times \cos \theta$.

Es decir, que la f. e. m. de la máquina, multiplicada por la intensidad de la corriente y por el coseno de la diferencia angular de sus fases, no nos da la potencia en juego, como sucede en una bobina quieta en su estructura material, y esto es a causa de que la reluctancia de los circuitos magnéticos frente a cada



componente de la corriente no es la misma. En la bobina de la armadura del alternador, la potencia de la componente desviada, producto $I_d \times BF$, es mayor que la potencia de la variada $I_v \times EF$ y de sentido contrario a la $OE \times OI \times \cos \theta$, y por eso, la f. e. m. sélfica hace, en resumen, trabajo.

Medición de las constantes de reacción de armadura

Es posible que la vulgarización de métodos de cálculo poco aproximados en el problema del acoplamiento de alternadores se deba a la dificultad de la medición directa de las constantes α , λ y τ , que requeriría aparatos costosos y desusados. Pero esta medición se realiza sin tropiezos con sólo disponer de sencillas resistencias óhmicas acoplando a la máquina, cuyas constantes se desea determinar, otra auxiliar, que funciona como una reactancia sincrónica graduable con ambos signos.

Un método para practicar estas mediciones fué publicado por el autor en el fascículo noviembre-diciembre 1925 de los *Anales de la Asociación de Ingenieros del Instituto Católico de Artes e Industrias*.

En especial es poco practicada la medición del coeficiente τ . Por el método del autor se realiza acoplando la máquina en prueba, A , con otra máquina auxiliar, B , con interposición de una resistencia óhmica, R , capaz de absorber una parte alícuota pequeña ($1/5$ a $1/10$, por ejemplo) de la capacidad de potencia a plena carga, de la máquina en prueba.

Las operaciones necesarias para medir τ , suponiendo la excitación de las máquinas hecha por separado (el caso de excitatrices acopladas apenas tiene diferencia), son sucesivamente:

1.º Se elige una intensidad I , para la prueba, como pueda absorber de continuo el reóstato R , con una d. d. p. aproximada a la normal del alternador.

2.º Se determina la apertura del regulador del motor que impulsa a A , para dar la corriente I , ce-

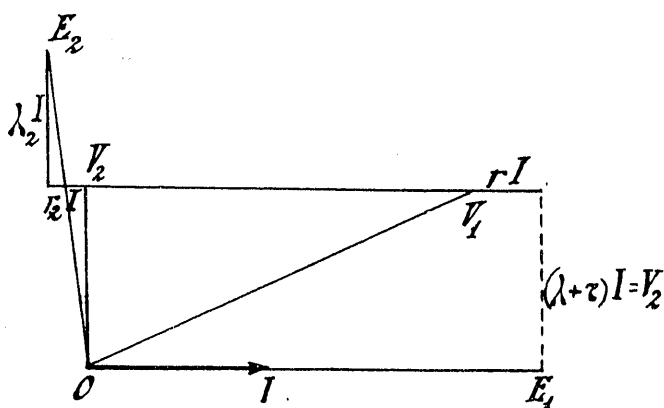
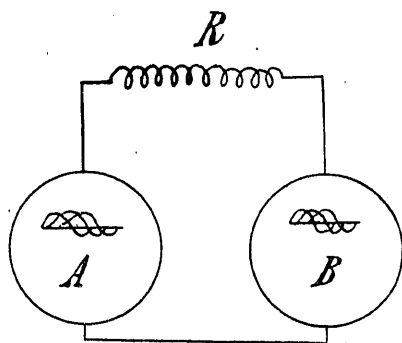
rrada esta máquina sola, sobre el reóstato R , a la velocidad de régimen ω . Sea p_1 esta apertura.

3.º Se determina también la intensidad de corriente excitatriz en A , para dar en circuito abierto la tensión $RI + rI$, siendo r la resistencia interna de la armadura de A . Sea i esta intensidad de corriente excitatriz.

4.º Se determina la apertura del regulador del motor que impulsa a B , para que esta máquina dé, en circuito corto, la intensidad I . Sea p_2 esta apertura.

5.º Se acopla ambas máquinas al través de R y manteniendo en la máquina A la excitación i , fija, se va cerrando el regulador de B , hasta p_2 , y abriendo el de A , hasta p_1 .

6.º Mientras tanto se varía la excitación de B , en sentido conveniente hasta lograr que, hallándose en sus cifras respectivas las aperturas p_1 y p_2 , la corriente cambiada sea I , con la velocidad de régimen ω .



En este punto la lectura del voltaje de B nos da el valor $(\lambda + \tau)I$. Para convencerse de ello basta mirar el diagrama siguiente: OV_2 , que es la d. d. p. de B , es perpendicular al vector de la corriente OI , porque no puede hacer trabajo alguno en el circuito exterior de la máquina B , cuyo motor tiene la apertura necesaria únicamente para el trabajo interno.

La máquina A suministra todo el trabajo sobre R ; pero la B , sobrecitada suficientemente, impone el sentido de la corriente.

El circuito externo de A , de resistencia $R + r_2$, tiene capacidad sincrónica que equilibra totalmente la inductancia $\lambda + \tau$ interna de la máquina.

Emilio AZAROLA
Ingeniero de Caminos

Anteproyecto de un plan general de electrificación de los ferrocarriles españoles

III

Llegamos al punto en que se han de aplicar cuantas conclusiones, fórmulas, resultados concretos, etc., han sido el objeto próximo de los artículos primero y segundo de este trabajo (1): «Obtención de un plan general de electrificación de los ferrocarriles españoles de interés general». Recordemos que para alcanzar las mayores condiciones de garantía y la exactitud más precisa (aunque sólo relativa, como repetidamente hemos tenido buen cuidado de hacer no-

tar), hubiera sido necesario estudiar dos partes de importancia capital:

a) Condición de mínima economía de una electrificación.

b) Ventajas técnicas de la tracción eléctrica sobre la de vapor, que se traducen casi siempre en ventajas económicas de diversas categorías, formando así, en su conjunto, las bases de una racional agrupación de líneas férreas que deben ser electrificadas.

La primera ha sido tratada en los artículos anteriores. La segunda, por su gran extensión, no ha podido ser estudiada aquí, formando la segunda parte del trabajo citado.

(1) REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, números 2 471 y 2 472, páginas 70 y 89.