

Los convertidores estáticos de vapor de mercurio con rejilla de regulación y sus diversas aplicaciones¹

III y ÚLTIMO

Demostraciones de convertidores estáticos en la fábrica Brunnenstrasse (Berlín), de la A. E. G.

El día 1.º de julio tuvieron lugar en Berlín, en la fábrica de Brunnenstrasse, de la A. E. G., unas demostraciones, sumamente interesantes, de converti-

una conferencia-demostración del doctor ingeniero Sr. Laub.

Conferencia del Dr. Laub: Introducción. — Fundamentos técnicos. — Aplicaciones. — Ensayos.

Después de unas palabras de presentación del doctor Tröger, director de la Oficina de Estudios, co-

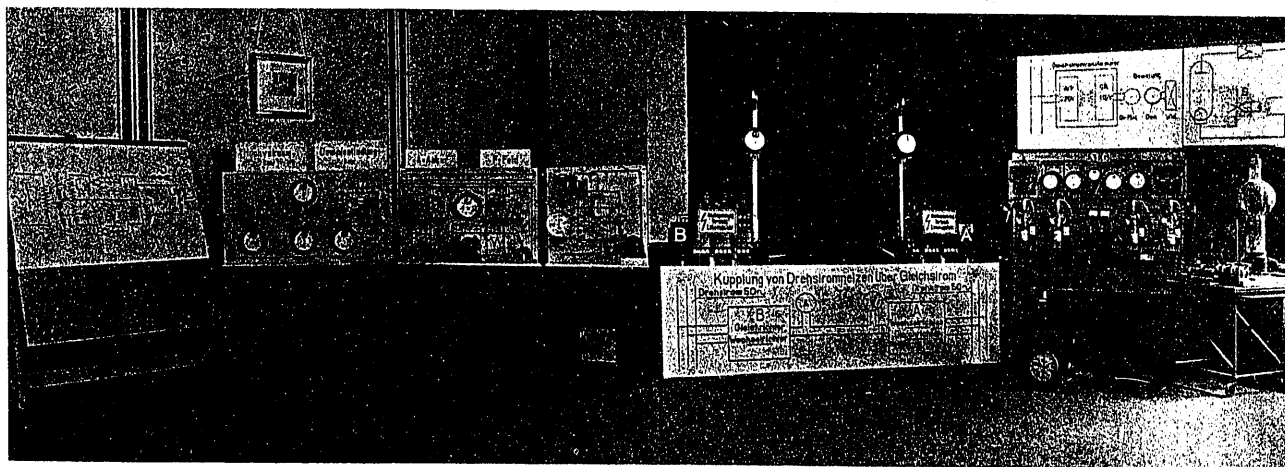


Fig. 28. Cuadros y aparatos empleados por el Dr. Laub para demostraciones, en su conferencia

dores de vapor de mercurio con rejilla de regulación. Habiendo sido invitado el señor director de la Escuela de Caminos para asistir a ellas por la Sociedad Geothom (representante en España de la A. E. G.), y delegando amablemente el Sr. Machimbarrena en quien esto escribe, tuve ocasión de presenciar las citadas demostraciones, en compañía de otros dos ingenieros de Caminos, españoles, los Sres. Valentí y Armero.

Para asistir a la conferencias, pruebas, etc., escrupulosamente organizadas por la A. E. G., y que luego se describirán brevemente, se había invitado a ingenieros de muy diversas nacionalidades, y el día 1.º de julio se reunieron en la fábrica de Brunnenstrasse ingenieros de Austria, Bélgica, Checoslovaquia, Danzig, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Holanda, Italia, Japón, Lituania, Luxemburgo, Noruega, Polonia, Rumania y Suecia.

Después de ser obsequiados con una comida por la Dirección de A. E. G., en la misma fábrica, pasaron todos los invitados a una sala para escuchar

menzó su disertación el Dr. Laub, del Laboratorio de Investigaciones.

Esta disertación, sumamente clara y ordenada, fué seguida con vivísima atención por los ingenieros que llenaban el local. En ella expuso el Dr. Laub los fun-

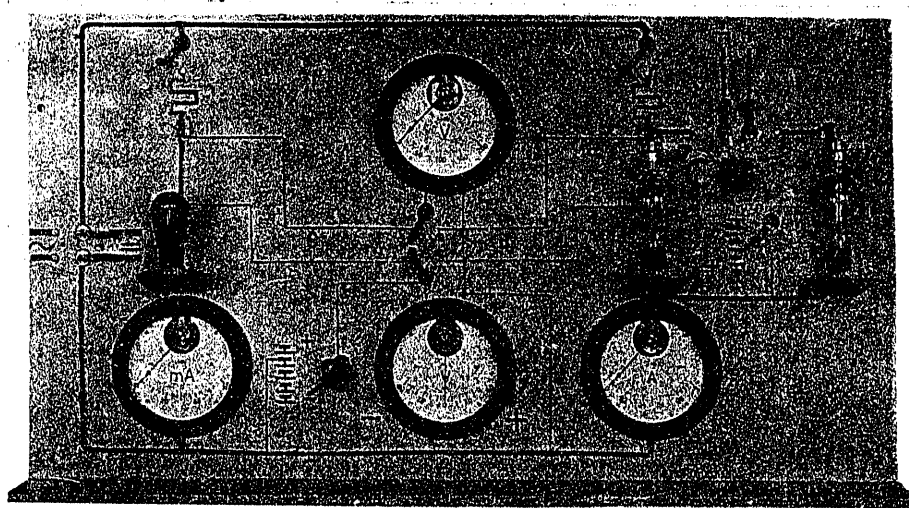


Fig. 29. Plotron o thyatrones con corriente continua o alterna

damentos físicotécnicos de los rectificadores, y sus aplicaciones, siguiendo un orden análogo al adoptado en los dos artículos anteriores. La conferencia fué constantemente acompañada por ensayos - demostraciones, con diversos pequeños aparatos, ya debida-

¹ Véase el número anterior, página 461.

mente preparados en el fondo de la sala (fig. 28). Resumimos a continuación esos diferentes ensayos.

== Lámpara de tres electrodos de alto vacío (plotron) ==

Núm. 1. En el tablero de la figura 29, la lámpara de la izquierda es un plotron, es decir, un recti-

perior mide, como antes, la caída de tensión en el arco; el inferior, la tensión entre rejilla y cátodo, y el amperímetro de la derecha, la intensidad en el thyatron. Mientras la rejilla tiene, respecto al cátodo, una tensión negativa superior a la crítica, U_K , la corriente no pasa por el tubo. Una vez que $U_G = U_K$, empieza la descarga, tomando la intensidad un valor constante, que no es afectado ya por ninguna variación de la tensión U_G . Los aparatos muestran que la caída de tensión en el arco es sólo de unos 15 voltios, y la intensidad, del orden del amperio.

Núm. 3. Una vez establecida la corriente, la rejilla ha perdido su facultad de regulación, y no se puede interrumpir, aun dando a U_G un fuerte valor negativo, mayor que U_K (muchos elementos de la batería intercalados). Sólo si se corta la corriente con el interruptor superior, en el circuito del ánodo, vuelve a regular la rejilla, y al cerrar de nuevo el interruptor no pasa corriente si la excitación negativa U_G de la rejilla es suficientemente grande.

Núm. 4. La corriente en el thyatron considerado se puede también interrumpir superponiendo a ella otra igual y contraria, producida por la descarga

de un condensador C . Este condensador (fig. 29), después de cargado, se conecta a los dos thyatrones, sirviendo el de la derecha como interruptor, e ini-

ficador de cátodo incandescente, con rejilla, pero trabajando con un vacío muy elevado dentro de la lámpara. Conectando a la corriente continua de la derecha del conmutador (izquierda del tablero), y cerrando el interruptor superior, se hace pasar corriente por el plotron, dando a la rejilla la tensión adecuada respecto al cátodo; para esto último se emplea una batería, tomando de ella más o menos elementos. El voltímetro superior mide la caída de tensión del arco, y el inferior, la tensión entre rejilla y cátodo (los aparatos de la derecha del cuadro no intervienen en este ensayo). Variando esta última tensión (negativa o positiva) se consigue hacer variar gradualmente la intensidad que pasa por la lámpara, desde cero hasta un máximo, o inversamente, desde un máximo hasta cero. Se ve así que la rejilla no pierde en ningún momento sus propiedades de regulación. En cambio, la intensidad que circula por el tubo es tan sólo de algunas decenas de mA, y la caída de tensión en el arco (voltímetro superior) es muy elevada, del orden de 150 voltios, apreciándose con evidencia los grandes inconvenientes de esta clase de tubos para la técnica de las corrientes fuertes.

== Thyatrones conectados a la corriente continua ==

Núm. 2. En el mismo cuadro de la figura 29, los dos tubos de la derecha son thyatrones. Abriendo el interruptor situado sobre la resistencia de la izquierda, cerrando el análogo de la derecha y pasando a la derecha los dos conmutadores situados entre los voltímetros, se desconecta el plotron y se conecta un thyatron a la corriente continua. El voltímetro su-

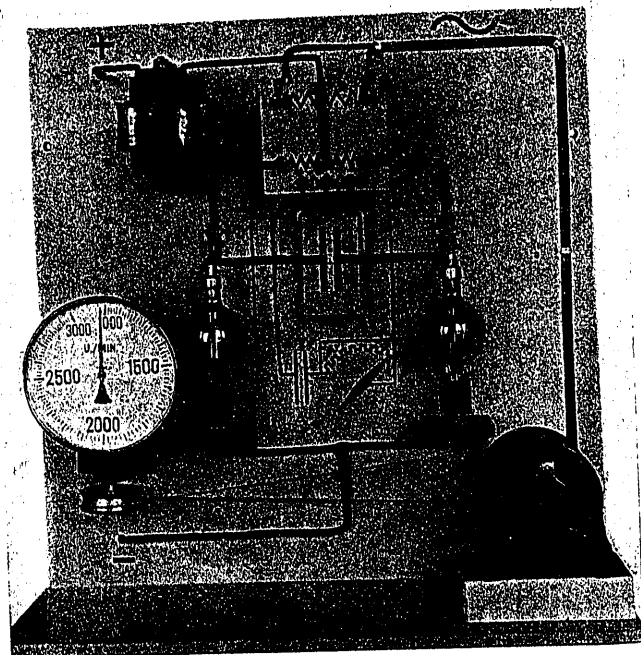


Fig. 30. Regulación de la velocidad de un motor de corriente continua

Fig. 31. Inversor auto-excitado. Variación de la frecuencia de la corriente invertida

ciándose la descarga del condensador en cuanto la tensión de rejilla de este último (batería de la derecha) alcanza el valor necesario.

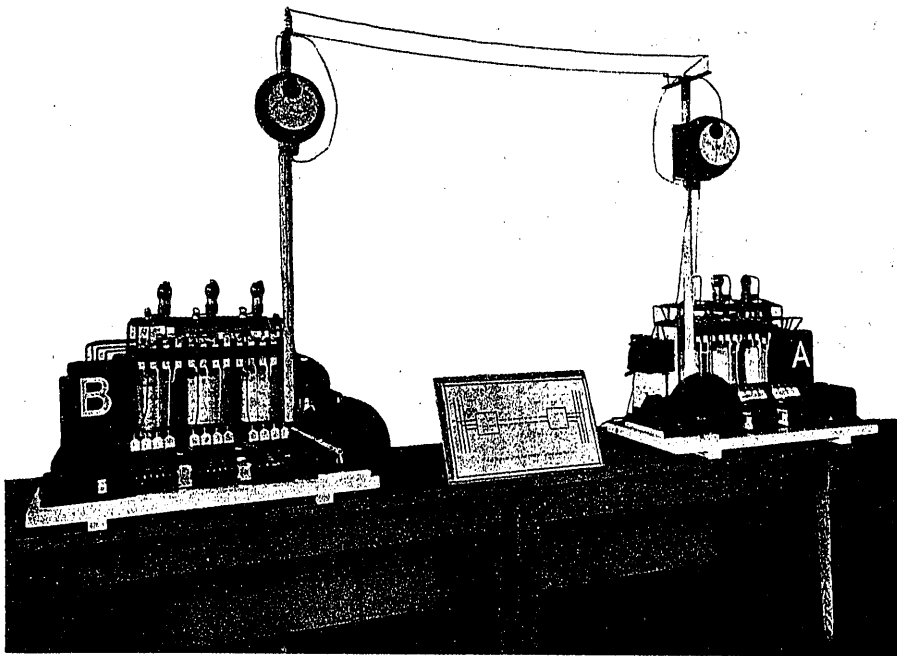


Fig. 32. Transmisión de energía eléctrica con corriente continua

trones, que hacen de rectificadores (a la izquierda). La excitación está también alimentada por otros tres thyatrones (a la derecha). Mediante un pequeño regulador de inducción trifásico (situado abajo, a la derecha), girando a mano el rotor del mismo, se puede cambiar el desfase entre la tensión de rejilla y la de ánodo, sea en el circuito principal (conmutadores en A), sea en el campo del motor (conmutadores en F). Si se empieza, por ejemplo, con la plena excitación (conmutadores en A), se arranca el motor en cuanto las U_G dejan de estar en oposición de fase con las U_A , de los tubos de la izquierda.

A medida que se gira el rotor del regulador de inducción el motor va aumentando de velocidad, pues el valor *eficaz* de

== Thyatrones conectados a la corriente alterna ==

Núm. 5. Conectando el conmutador bipolar de la izquierda del tablero (fig. 29) con la corriente alterna, dejando en la posición de la derecha los dos conmutadores del centro, y el interruptor superior de la derecha cerrado, se tiene un thyatron alimentado con corriente alterna. Se observa entonces que, si se empieza con una tensión U_G no suficientemente negativa, la corriente circula por el tubo (rectificada, naturalmente); pero si luego se hace que U_G tenga un valor negativo conveniente, la corriente se interrumpe, pues al terminar la semionda que en aquel momento existiera, ya no puede iniciarse nuevamente.

== Cierre o apertura de un circuito con la rejilla de regulación ==

Núm. 6. Un thyatron de 200 A (fig. 28, mesa situada en el extremo de la derecha) está alimentado como se indica en el esquema situado sobre el tubo. Para una posición del conmutador S de la rejilla se establece la corriente (U_G positivo). Cambiando la posición del conmutador S , la corriente se corta (U_G negativo, de valor suficiente). Produce verdadera impresión este ensayo, al ver con qué sencillez, sin el menor ruido ni ningún otro efecto externo, se interrumpe una corriente de 200 A.

== Regulación sistema Toulon ==

Núm. 7. Se hace ver, con un modelo a una frecuencia muy reducida, cómo se va desplazando la fase de la tensión U_G , entre rejilla y cátodo, con relación a la fase de U_A , tensión entre ánodo y cátodo.

== Regulación de un motor de corriente continua ==

Núm. 8. Un pequeño motor de corriente continua con excitación en derivación (fig. 30) está alimentado por una red trifásica mediante tres thyra-

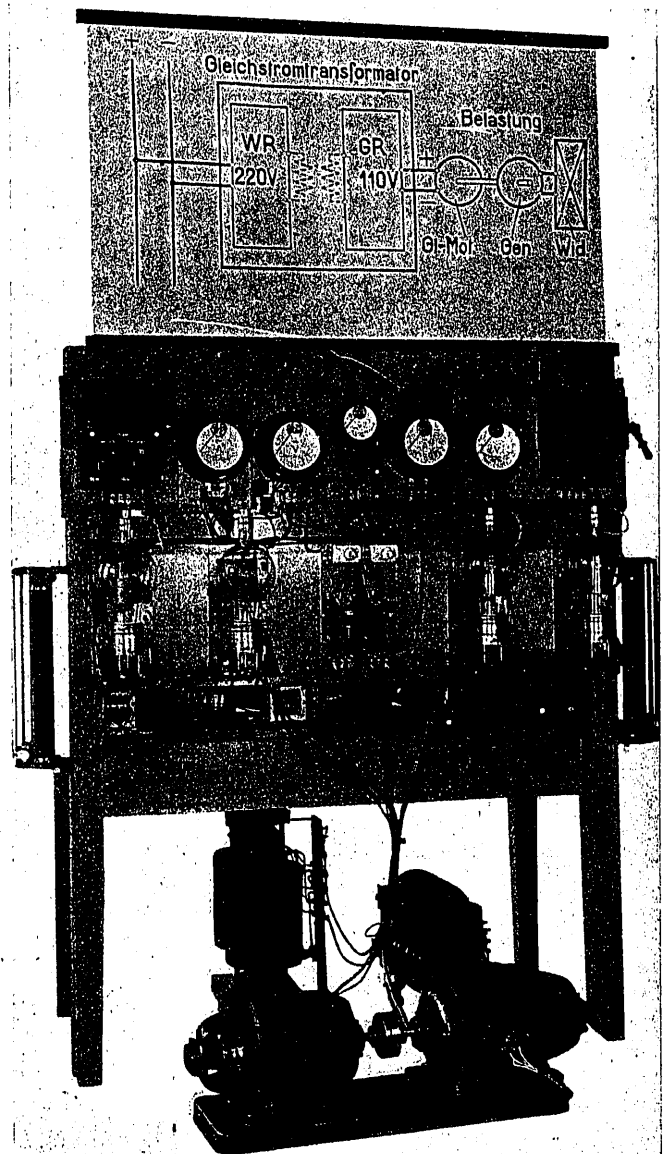


Fig. 33. Transformador de corriente continua

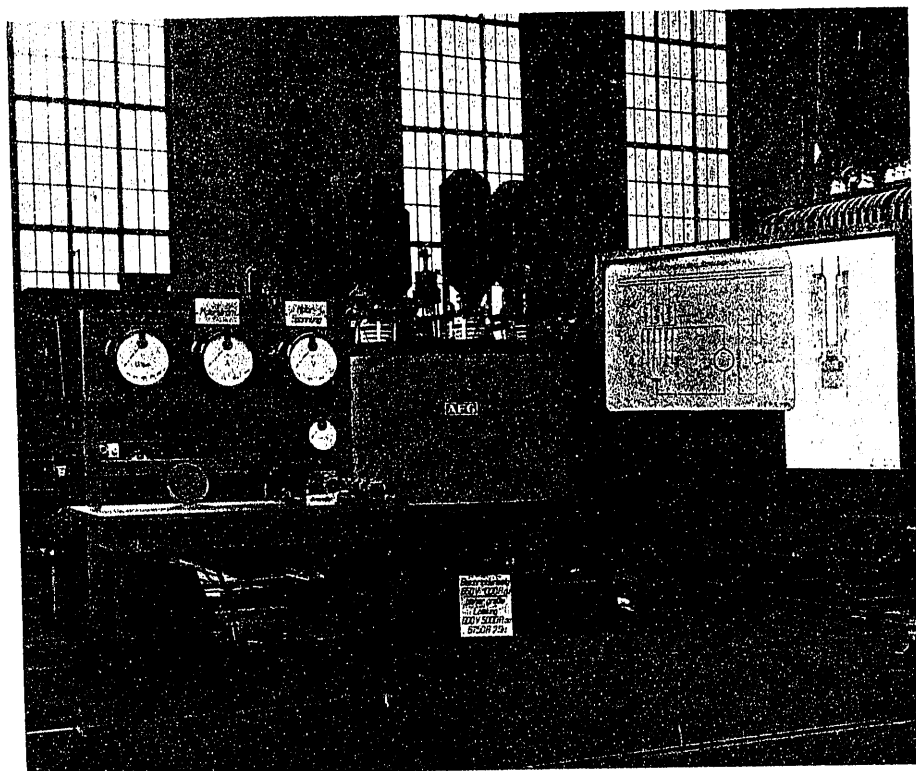


Fig. 34. Rectificador con rejillas de regulación

la tensión en bornas del mismo va también creciendo, al disminuir el defasaje entre las U_G y las U_A . Se alcanza la velocidad máxima —tensión rectificadora eficaz máxima— cuando las tensiones de rejilla y de ánodo están en fase. Pero todavía se puede aumentar más la velocidad si ahora se obra sobre las rejillas de los thyatrones de la excitación (conmutadores en K). Volviendo hacia atrás el rotor del regulador de inducción se va creando un ángulo de fase creciente entre las U_G y las U_A de los thyatrones de la derecha, y, por tanto, incrementando la velocidad al disminuir la tensión rectificadora eficaz en bornas de la excitación. Este ensayo produce un efecto grande, pues deja ver las enormes posibilidades que ofrecen los nuevos convertidores para regular, sin pérdidas y entre límites extensísimos, la velocidad de los motores.

== Inversor auto-excitado ==

Inversión de corriente continua en alterna, con variación de frecuencia de 30 a 2 000 períodos por segundo (figura 31).

Núm. 9. Un inversor, formado por dos thyatrones, un condensador y los circuitos de rejilla, todo ello según el esquema ya explicado (figura 23 del artículo anterior), produce en los

terminales superiores del transformador (fig. 31) corriente alterna monofásica, estando alimentado por corriente continua. Variando la resistencia en el puente de los circuitos de rejilla se cambia la fase de las U_G y, con ello, la frecuencia de la corriente invertida. Alimentando con esta corriente un altavoz, el tono del sonido producido, cada vez más agudo, permite percibir la gran variación de la frecuencia.

Núm. 10. Se repite el mismo ensayo anterior, pero empleando la corriente alterna para accionar un pequeño motor monofásico con el rotor en cortocircuito. La velocidad del motor varía con la frecuencia, mostrándose esta variación con un tacómetro, que puede verse a la izquierda en el tablero.

== Transmisión de energía eléctrica con corriente continua ==

Núm. 11. Un circuito o red trifásica, A (fig. 32 y fig. 28, en el centro), alimenta, a través de un rectificador-inversor, el extremo de una pequeña línea de corriente continua. El otro extremo de la línea alimenta, a su vez, una red trifásica, B , mediante un inversor-rectificador. El flujo de energía puede tener lugar, con esta disposición, de A a B , o de B a A .

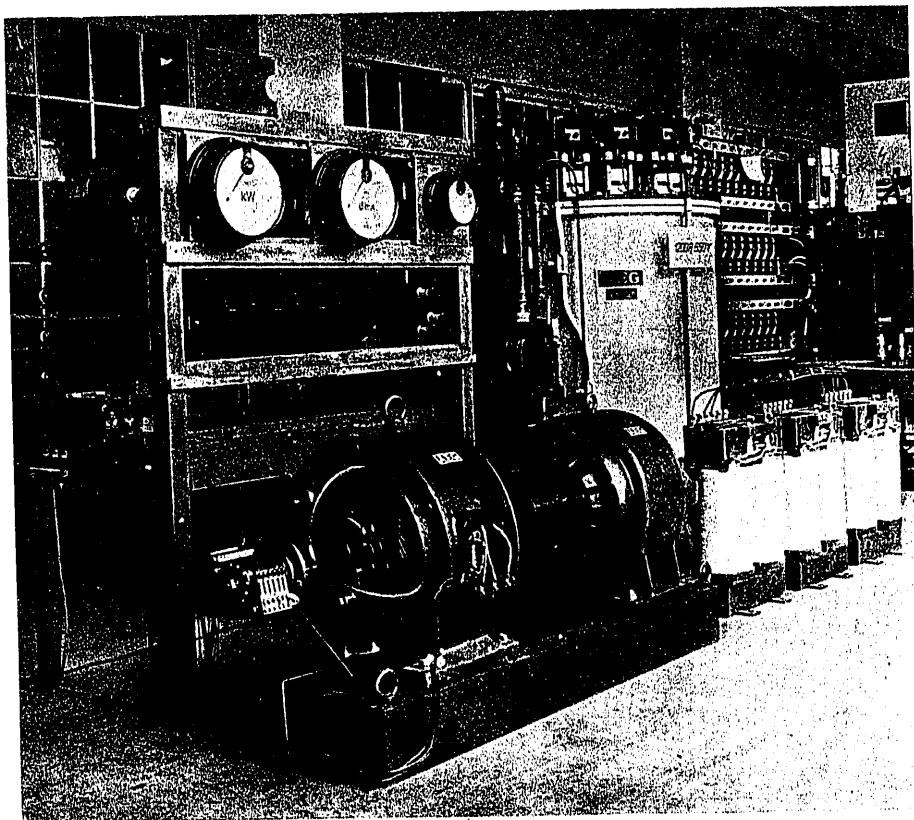


Fig. 35. Regulación de un motor monofásico en serie, sin colector

Para cualquiera de esas direcciones del transporte de energía, obrando sobre la rejilla de los tubos que hacen de rectificadores, se varía el valor de la potencia transmitida, como puede comprobarse con los apa-

tor conectado al secundario del transformador de corriente continua, y que acciona una dinamo cargada sobre una resistencia. Los aparatos del cuadro miden la intensidad y la tensión en los distintos puntos del conjunto.

Núm. 15. Dando el voltaje conveniente a la U_G del rectificador, se conecta de golpe el motor de corriente continua.

Núm. 16. La velocidad del motor conectado en la baja tensión se puede cambiar también actuando sobre la rejilla del inversor, para variar la tensión invertida de éste (fig. 33).

Regulación de la tensión con un rectificador exafásico en recipiente metálico, de 600 V, 1 000 A.

Terminada la conferencia del Dr. Laub, se procedió a realizar una serie de demostraciones en la fábrica, ya en escala industrial.

Núm. 17. Pudimos ver, primeramente, un rectificador grande, para 600 V y 1 000 A, en cuba metálica (fig. 34), con rejillas, al que se ha aplicado el

método de regulación de Toulon. Con rectificadores de este tipo puede regularse, sin pérdidas, la tensión en redes de corriente continua de luz o de tracción eléctrica. En la fecha de los ensayos (1.º de ju-

ratos intercalados (amperímetro y wattímetro).

Núm. 12. Con la regulación de las rejillas se cambia también, a voluntad, el sentido de transporte de la energía, de A a B, o de B a A (fig. 32).

Núm. 13. El cierre o apertura de circuito se realiza, con suma facilidad, actuando en las rejillas.

Estos tres ensayos dan una perfecta idea, en pequeña escala, de lo que puede ser el acoplamiento de redes trifásicas con una línea de corriente continua, empleando convertidores estáticos de vapor de mercurio con rejilla.

= Transformador de corriente continua =

Núm. 14. Un transformador de corriente continua, formado por dos thyatrones (inversor), un transformador, y otros dos thyatrones (rectificados (figura 33), cambia la tensión de la corriente continua, de 220 V a 110 V, pasando la energía de la primera red a la segunda. Dejando constante la tensión y la frecuencia en el inversor se puede variar el voltaje, en el lado de baja tensión, variando la tensión U_G de la rejilla del rectificador. Esta variación del voltaje se muestra por el cambio de velocidad de un mo-

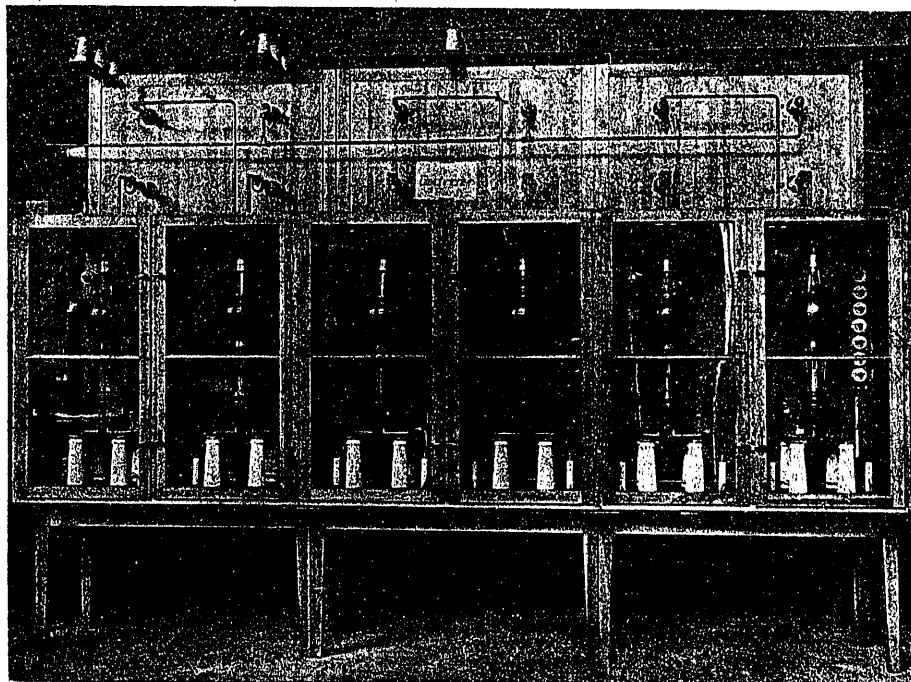


Fig. 36. Rectificador del convertidor universal

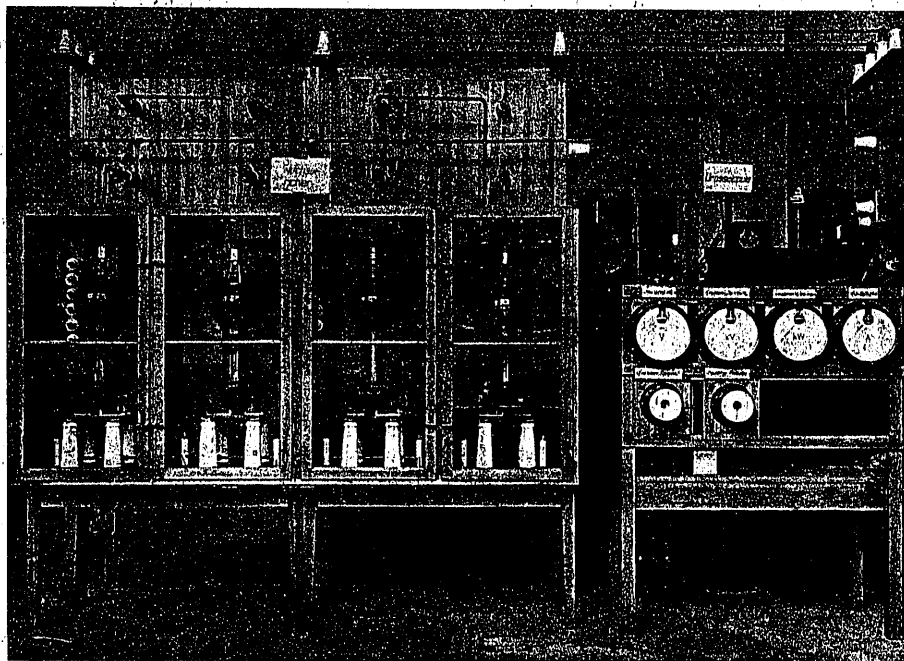


Fig. 37. Inversor del convertidor universal

lio de 1932), la mayor potencia de rectificadores a los que se había aplicado las rejillas, en la A. E. G., era de 600 V, 5 000 A, en marcha continua, y 600 V, 6 750 A, durante dos horas.

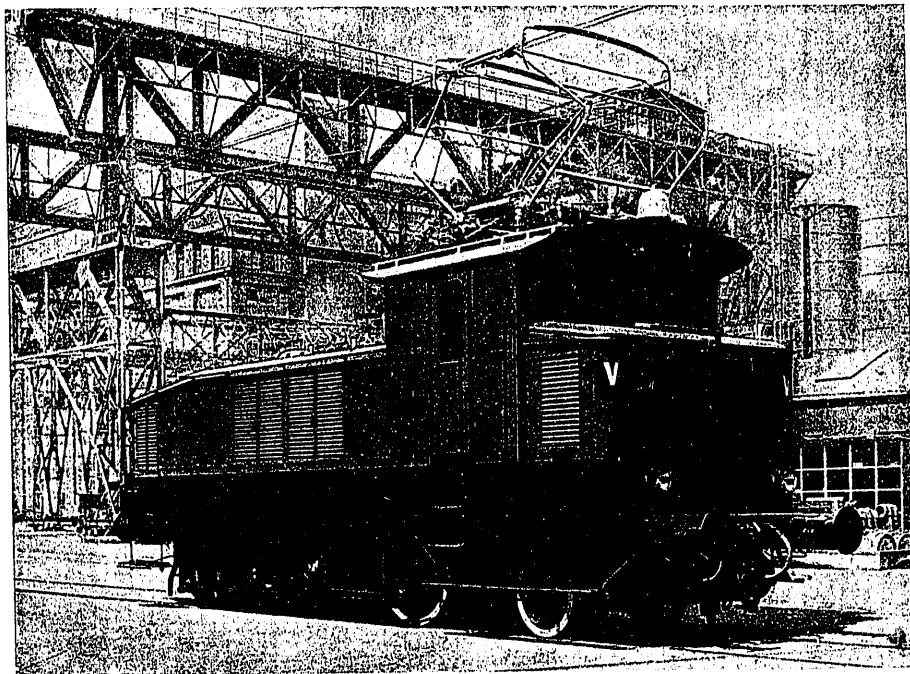


Fig. 38. Locomotora alimentada por el convertidor universal

Regulación de un motor de corriente continua

Un motor de corriente continua de 500 kW se alimenta de la red trifásica, a la frecuencia de 50 p. p. s., con el rectificador de la figura 34.

Núm. 18. Estando el motor en vacío, no arranca mientras las rejillas están en oposición de fase respecto a los ánodos. Un pequeño giro del rotor del regulador de inducción hace que el defasaje sea ya menor de 180° , y el motor arranca suavemente. Causa admiración el ver la verdadera insignificancia del reguladorcito de inducción (situado sobre la mesa, con un letrero), con el que se manejan motores de tan grandes potencias con una sencillez maravillosa. A medida que disminuye el defasaje entre las U_c y las U_a , crece la velocidad del motor, que alcanza su valor máximo cuando ambas clases de tensiones están en fase.

Núm. 19. Una vez puesto en carga el motor de 500 kW, esta carga se regula variando la tensión de la corriente continua, mediante las rejillas, actuando siempre en el pequeño regulador de inducción. Para interrumpir la corriente basta con obrar adecuadamente sobre las rejillas, y se ve en el amperímetro (fig. 34) pasar a cero una corriente de cerca de 700 amperios, sin escucharse el menor ruido ni tener lugar la menor oscilación en el circuito. No son, pues, precisos interruptores exteriores de ninguna clase en el circuito principal.

Regulación de un motor monofásico en serie, para 50 p. p. s., sin colector

Núm. 20. Un rectificador de 650 V, 1 200 A, con rejillas, alimenta un motor monofásico sin colector (figura 35). De modo análogo a como se hizo en los ensayos anteriores, se procede en éste a arrancar y variar la velocidad del motor, regulando la tensión eficaz que existe en sus bornas.

Núm. 21. Se regula también la carga del motor de la misma manera.

Núm. 22. Cambiando la posición de las escobillas en el colector de gobierno del motor (figura 35) se regula la velocidad, y puede hasta invertirse ésta.

Convertidor universal de 500 kW.

Esta instalación permite convertir corriente alterna trifásica, a la frecuencia de 50 períodos por segundo, en corriente monofásica, a $16\frac{2}{3}$ p. p. s. El sistema de conexiones es el explicado en el artículo anterior (figura 27), constando el convertidor de un rectificador, una bobina, un inversor y un acumulador síncrono (máquina síncrona).

El rectificador que se nos mostró estaba formado por seis thyatrones, los más grandes construidos hasta entonces por A. E. G. (fig. 36), y el inversor

(figura 37), por cuatro thyatrones semejantes.

El conjunto de disposiciones adoptadas permite realizar el siguiente servicio:

Núm. 23. Gracias a las rejillas se regula la potencia que pasa a través del convertidor, según puede verse en el wattímetro correspondiente (fig. 37, cuadro).

Núm. 24. Como en las otras demostraciones, se abre y se cierra el circuito con la mayor facilidad.

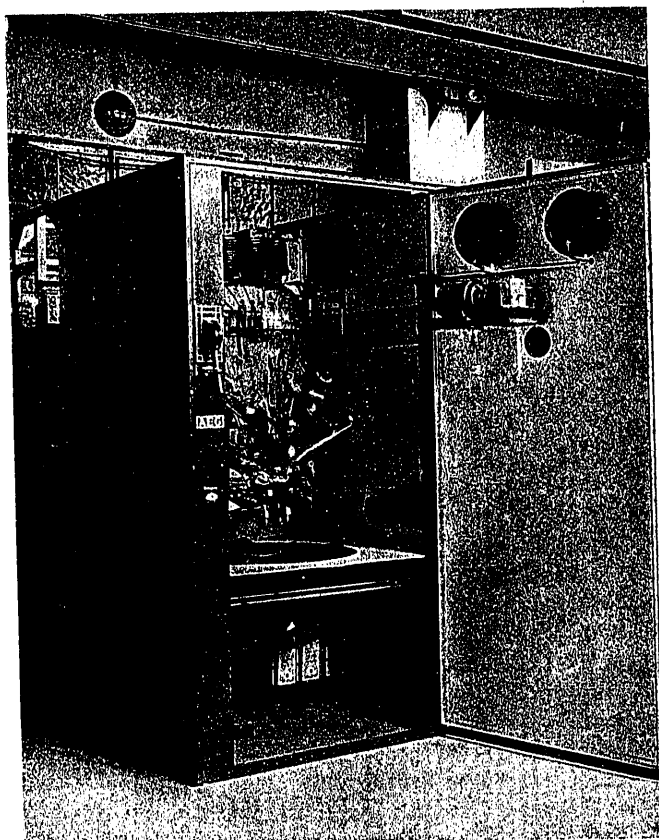


Fig. 39. Rectificador de ampolla de vidrio con rejillas

dad y sin necesidad de ningún interruptor externo.

Núm. 25. Regulando en el rectificador se cambia la frecuencia en el circuito de baja frecuencia, mostrando así el acoplamiento *elástico* que permite el convertidor, por lo que a las frecuencias se refiere.

Núm. 26. La tensión de alimentación de los cátodos incandescentes se regula automáticamente al variar la carga.

Núm. 27. Una sobrecarga, que aumenta suavemen-

señores invitados una serie de rectificadores de vapor de mercurio, con rejillas, en ampolla de vidrio, de diferentes potencias (figuras 39 y 40): de 3 000 V, 200 A, para tracción; de 600 V, 500 A y de 600 V, 300 A, también para tracción, y de 200 V, 150 A, haciéndose algunas demostraciones con este último.

Vimos también varios pequeños rectificadores para diferentes aplicaciones: para el cinematógrafo sonoro, un convertidor de 110 V corriente continua en 220 V corriente alterna, 50 p. p. s., de 200 W; para proyectores con lámparas de incandescencia, un convertidor de 220 V corriente continua en 20 a 50 V corriente alterna, 50 p. p. s., 250 W (cátodo incandescente), y para el mismo fin, 220 V corriente continua, 15 a 30 V en alterna, 50 p. p. s., 1 000 W, con cátodo de mercurio.

Finalmente, tuvimos ocasión de ver unos cuantos thyatrones, desde las más pequeñas hasta las más grandes potencias construídas.

* * *

En todo lo anterior sólo hemos podido dar una muy pobre idea de lo que fueron las demostraciones reseñadas. Cada una fué precedida de una con-

ferencia por un ingeniero especialista, que se ayudaba, en sus explicaciones, con esquemas detallados de la instalación (algunos de estos esquemas pueden verse en las figuras de este artículo, reproducción de fotografías originales, que debo a la amabilidad de A. E. G.).

El tiempo destinado a cada una de estas conferencias y a las demostraciones siguientes estaba cuidadosamente medido, de tal forma, que en una tarde pudo realizarse el amplísimo programa —30 ensayos o demostraciones, contando con los de la conferencia del Dr. Laub— sin causar fatiga en los asistentes al acto.

No quiero terminar estos artículos sin expresar a la Dirección de A. E. G., al mismo tiempo que mi agradecimiento por la invitación hecha a la Escuela de Caminos y las atenciones de que fuí objeto, mi sincera felicitación por la excelente organización y el completo éxito de las demostraciones del día 1.º de julio con convertidores estáticos de vapor de mercurio con rejillas de regulación.

Pedro JOSE LUCIA
Ingeniero de Caminos

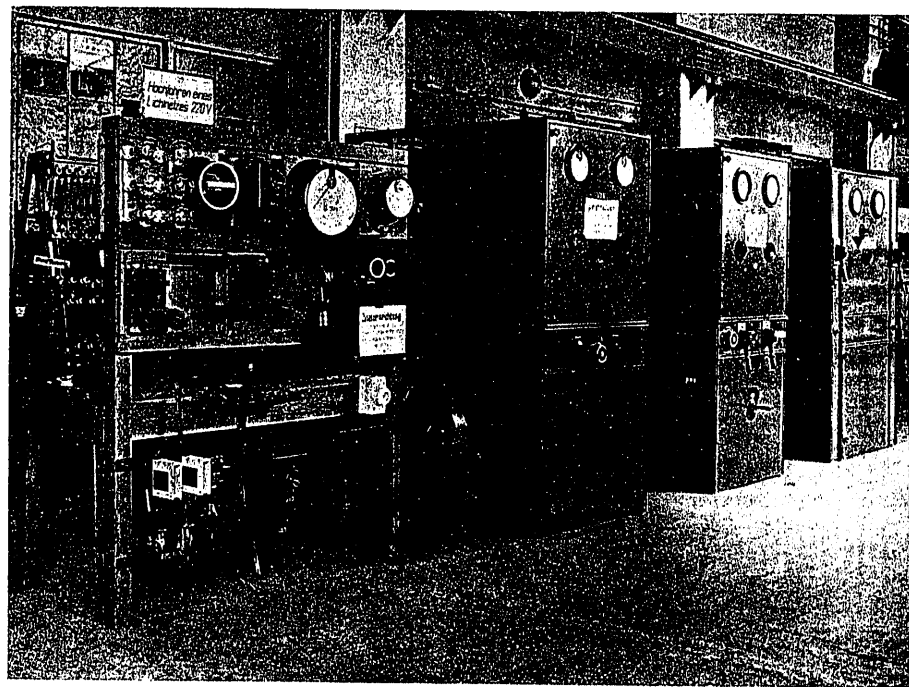


Fig. 40. Varios rectificadores, con rejillas de diversas potencias

te, produce automáticamente la apertura del circuito.

Núm. 28. En el caso de un cortocircuito se interrumpe también, automáticamente, el circuito.

Núm. 29. Como demostración se alimentó con el convertidor un motor monofásico de tracción, para 16 2/3 p. p. s., de 485 kW de potencia unihoraria.

Núm. 30. Y, por último, pudimos ver en el patio de la fábrica una locomotora monofásica (fig. 38), circulando alimentada por el convertidor.

Este convertidor universal representa, indudablemente, un gran paso hacia la resolución, con convertidores estáticos, del problema del acoplamiento *elástico* de una red trifásica a 50 p. p. s. con una red monofásica a 16 2/3 p. p. s., problema tan importante para la electrificación de ferrocarriles con corriente monofásica.

Exposición de rectificadores de ampolla de vidrio, con rejillas, y de pequeños tubos convertidores

Terminadas estas demostraciones se enseñó a los