Sobre transmision i transformacion de la corriente alterna en continua

POR

CÁRLOS VALENZUELA CRUCHAGA

SUMARIO.—Necesidad de centralizar la produccion de la enerjía eléctrica.—El transporte de enerjía. —La conveniencia de los altos voltajes: economía en el peso del cobre.—La causa de la preferencia del sistema trifase en las transmisiones.—El grupo jenerador con motor síncrono.—Id. con motor asíncrono, el convertidor rotatorio, el transformador en cascada.—Ventajas e inconvenientes.

I

El prodijioso desarrollo alcanzado en los últimos tiempos por las aplicaciones industriales de la electricidad i el interes de jenerarla abundante i económicamente, han impuesto la necesidad de centralizar su produccion en determinados puntos de la zona por servir, puntos favorecidos especialmente por la naturaleza para ese objeto o indicados por razones de órden técnico.

En esas fábricas se produce la electricidad en condiciones seguras i económicas gracias al perfeccionamiento de las grandes máquinas modernas i a la centralizacion de todos los servicios.

Sea que en muchas ocasiones se quiera aprovechar la enerjía desarrollada por una caida de agua, sea que las dificultades en el aprovisionamiento del combustible o del agua necesaria para la condensacion, si se trata de usinas térmicas, alejen la central de los centros de consnmo, surje inmediatamente la cuestion del transporte de la enerjía.

Si P, p, V, R e I representan respectivamamente la potencia por transmitir, la pérdida por efecto Joule tolerada en la línea, la diferencia de potencial, la resistencia de la trasmision i la corriente, tenemos las relaciones fundamentales:

$$P = V\,I$$
$$p = R\,I^2$$
$$R = \frac{l\rho}{s} = \frac{p}{I^2} = \frac{p\,V^2}{P^2}$$

La última ecuacion, en que l es el largo simple de la transmision, ρ la resistencia específica i s la seccion del alambre, enseña que la seccion del alambre es inversamente proporcional al cuadrado del voltaje. ¡Propongámonos, por ejemplo, transmitir 600 KW a 5 km de distancia con una caida de tension de un 20% del voltaje i veamos numéricamente en algunos casos a cuánto asciende el peso del cobre.

1.º) Transmision a 250 volts con corriente continua:

Dándole valores a la ecuacion

$$s = \frac{2\,l\rho I}{v} \quad \text{tenemos:}$$

$$s = \frac{2 \times 5\,000 \times 0{,}017 \times 2\,400}{50} = 8\,160 \text{ mm}^2$$

Peso de cobre: 734 400 kgs.

2.º) Transmision a 250 volts con corriente trifase:

$$s = \frac{l\rho\sqrt{3}\,I}{v}$$

$$s = \frac{5\,000 \times 0{,}0017 \times 1{,}73 \times 1\,388}{50} = 4\,025 \text{ mm}^2$$

Peso de cobre: 543 375 kgs.

3.º) Transmision a 5 000 volts con corriente trifase:

$$s = \frac{5\,000 \times 0{,}017 \times 1{,}73 \times 69}{1\,000} = 10 \text{ mm}^2$$

Peso de cobre: 1 350 kgs.

Este ejemplo pone de manifiesto la economía realizada con el empleo de los altos voltajes. Es así que las transmisiones a 60 000 volts no son una rareza en Europa i que aun se haya ido, tanto acá como en Norte América, a mas de 100 000 volts de tension en condiciones satisfactorias. Mencionemos aquí de paso la transmision Niágara-Dundes-Toronto-Santo Tomas en Canadá, con 500 km de largo, 110 000 volts i

25 períodos por segundo i la mui reciente de Lanchhammer en Sajonia con 115 000 volts.

Pero la elevacion del voltaje no puede ser indefinida, como se comprenderá fácilmente si se piensa en la dificultud material de aislar los conductores, en el mayor precio que exijen los instrumentos anexos a la transmision, provistos de transformadores especiales, en el encarecimiento de los aisladores, en las mayores pérdidas por efluvios, etc.

Ahora bien, los jeneradores de corriente continua son inadecuados para utilizarse en estas transmisiones a altos voltajes. Al paso que los colectores de estas máquinas no permiten, salvo especiales excepciones, tensiones superiores a 1 500 volts, a las bornas de los alternadores se puede obtener fácilmente 15 000 volts.

De los tres sistemas de corrientes jeneralmente usados, monofase, difase i trifase, veamos cuál es el mas económico para las transmisiones. Comparemos, por ejemplo, el sistema trifase montado en estrella al monofase con dos conductores, ambos con igual tension E a las bornas.

Supongamos, por ejemplo, que se quiera transmitir una misma potencia P en los dos sistemas, de tal manera que la pérdida por efecto Joule sea la misma en ambos casos.

De las ecuaciones:

$$E\,I = \sqrt{3}\,E\,I'$$

$$2\,r\,I^2 = 3\,\tau'\,I'^2 \quad \text{resulta}$$

$$\frac{v}{r'} = \frac{s}{s'} = \frac{1}{2} \quad \text{i} \quad s' = \frac{s}{2}$$

Sea, ahora, igual a 100 el peso de la trasmision monofase i δ el peso específico del cobre:

$$2\,\delta\,l\,s = 100$$

Para la transmision trifase en que se ha introducido $s' = \frac{s}{2}$ el peso será:

$$3\,\delta\,l\,s' = \frac{3}{2}\,\delta\,l\,s = 75$$

Hai, pues, un 25 % de economía en cobre.

Análogamente se podia demostrar que el sistema difase a cuatro conductores i en la hipótesis supuesta, pesa lo mismo que el monofase.

Es esta la razon de la preferencia casi esclusiva acordada al sistema trifase en transmisiones de altos voltajes.

Para el transporte mismo se eleva la tension en la central por medio de transformadores estáticos i recíprocamente, en la sub-estacion de llegada se baja el voltaje

hasta los límites que lo hagan compatible con los aparatos destinados a convertir la corriente alterna en continua.

II

Tanto para su uso en la traccion urbana, como para fines industriales i domésticos, la corriente alterna debe ser transformada en continua. Para conseguir este objeto, la técnica moderna ha inventado un gran número de dispositivos, entre los cuales debemos mencionar aqui por su vasto empleo industrial los motores síncromos i asíncronos atacando por acoplamiento directo o por correa, sendos jeneradores a corriente continua, los convertidores rotatorios i los transformadores en cascada.

a) Grupo jenerador con motor síncrono.

Como se sabe, el motor síncrono trifase es en sustancia un alternador trifase al que se le envia corriente i se le hace funcionar como motor.

El motor síncrono goza de la notable propiedad de mejorar el factor de potencia de las redes de distribucion, cuando se le hace funcionar con una exitacion superior a la concordancia de fase de la corriente i del voltaje a las bornas. La presencia en una misma red de motores asíncronos, trasformadores, en jeneral de toda clase de aparatos con self-induccion trae por consecuencia la produccion de corrientes deswattadas en retardo de fase respecto de la f. e. m., con lo que decrece el factor de potencia i el rendimiento de la distribucion.

Ahora bien, el motor síncrono, exitado convenientemente puede enviar a su turno corrientes deswattadas en avance de fase que contrarresten en la red las en retardo ocasionadas por la self-induccion: viene a ser equivalente, en cierto modo, a una capacidad intercalada en el circuito.

Si designamos por I la corriente total o resultante, por I_d la corriente deswattada, por I_w la corriente que produce trabajo o corriente wattada i por φ el ángulo de fase entre los vectores que representan la f. e. m. i la corriente, tenemos:

$$I_d = I \sin \varphi$$

$$I_w = I \cos \varphi$$

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_w^2} \qquad \ldots\ldots \ldots\ldots \text{(I)}$$

Pero si hacemos trabajar el motor síncrono con $\cos \varphi = 1$ la ecuacion (I) viene a:

$$I = \sqrt{I^2 \sin^2 \varphi + I^2 \cos^2 \varphi} = \sqrt{I^2 \, o + I^2 \, . \, 1} = I$$

i la corriente deswattada ha desaparecido.

Veamos en números la trascendencia de este fenómeno. Supongamos que el fac-

tor de potencia en las barras colectrices de una distribucion valga $\cos \varphi = 0{,}6$ con $P = 1\,000$ Kw de potencia i 3 000 volts de tension. Tendremos así para la corriente:

$$I = \frac{P \times 1\,000}{E \sqrt{3} \cos \varphi} = \frac{1\,000 \times 1\,000}{3\,000 \times 1{,}73 \times 0{,}6} = 321 \text{ amperes.}$$

Elevemos ahora el factor de potencia a $\cos \varphi = 1$

$$I = \frac{1\,000 \times 1\,000}{3\,000 \times 1{,}73 \times 1} = 192 \text{ amperes.}$$

La corriente ha disminuido pues en un 60%. Ahora bien, a igualdad de potencia consumida la corriente varia en razon inversa con el factor de potencia: de I pasa a valer $\frac{I}{\cos \varphi}$ i el efecto Joule a igualdad de resistencia se aumenta de $R P^2$ a $\frac{R P^2}{\cos^2 \varphi}$. Así en el caso considerado de $\cos \varphi = 0{,}6$ seria menester dimensionar la trasmision 2,8 veces mayor que si $\cos \varphi = 1$ para tener la misma pérdida por efecto Joule.

La elevacion del factor de potencia producida por el motor síncrono permite, como se ve, una disminucion de la corriente en los trasformadores i trasmisiones con ventaja para el mejor rendimiento de la distribucion. Esta circunstancia es de gran interes, sobretodo en las redes en que por aumento del consumo se hace necesario ampliar la instalacion. En tal caso, en vez de una nueva instalacion con sus crecidos gastos, se recurre ventajosamente al motor síncrono.

Pero al frente de estas ventajas presenta el motor síncrono sus inconvenientes, sobre todo en lo que se refiere a la puesta en marcha. Mientras no haya sincronismo en la marcha del campo rotatorio del inducido con el inductor el par de arranque es pulsatorio i no puede cargarse el motor. En la práctica se provoca el sincronismo atacando al motor por un motor asíncrono, susceptible de desacoplarse, o bien, si se trata de una red en que haya acumuladores, haciendo marchar como motor sea la exitatriz, sea el dinamo, ámbos montados sobre un mismo eje con el motor síncrono.

Una vez obtenida la misma fase, frecuencia i tension queda el motor en condiciones de intercalarse en paralelo en la red i de recibir carga. Sea dicho de paso que ello requiere cierto tiempo i personal adiestrado para el caso.

Aunque normalmente la marcha del motor síncrono es perfectamente regular, cuando se producen oscilaciones fuertes de la corriente en la red primaria o sobrecargas en la secundaria que sobrepasan cierto límite, el motor cae fuera de fase i se para.

b) Grupo jenerador con motor asíncrono.

El motor asíncrono, cuya jénesis se remonta apenas al año 1885 con los memorables trabajos del profesor Galileo Ferraris, es un alterno motor de induccion que

participa a un mismo tiempo de las propiedades de los trasformadores estáticos i de los motores a corriente contínua.

El principio del funcionamiento está basado en la accion repulsiva del campo rotatorio creado por el inductor sobre el campo rotatorio inducido en el motor. El asincronismo o diferencia entre la velocidad del flujo inductor i de la armadura constituye el deslizamiento, necesario para la formacion de la corriente inducida en el motor. De ahí proviene el nombre del motor.

Su uso con la ayuda de volantes está indicado allí donde pueden producirse fuertes sobrecargas en la red de trabajo, tanto mas cuanto que no es de temer, como ocurre con el motor síncrono, que pueda caer fuera de fase. Al reves de lo que ocurre con el motor síncrono el arranque en carga, como su colocacion en paralelo en la red, no presenta en este motor ninguna sujecion especial: se ejecuta con toda rapidez, como que no intervienen ahora ni los fasémetros, ni los frecuenciómetros, ni la excitacion especial a corriente contínua. La ausencia de colector como la sencillez de sus arrollamientos i simplicidad de construccion hacen de él un motor relativamente barato i de fácil conservacion.

Lo mismo que el síncrono tambien este motor asegura una marcha regular i ámbos arrastrados a una velocidad superior al sincronismo pasan a jenerar corriente, recuperándose así enerjía en la red.

Tiene la desventaja de producir corrientes deswattadas que empeoran el factor de potencia de la distribucion. Tratándose de pequeñas cargas es posible todavía suprimir el reostato de arranque i los anillos toma corriente, de manera que quede el solo inducido en forma de jaula. En tal caso la economía queda contrabalanceada con la complicacion en los nuevos medios de arranque que se hace preciso proveer (sincronizacion).

c) El convertidor rotatorio.

Si se conectan tres puntas situadas a 120° en el rotor de un dinamo respectivamente a tres anillos colectores i se pone en marcha el dinamo por medio de un motor cualquiera se recojerá en un lado corriente continua i en el otro corriente trifase. Reciprocamente si se suprime el motor cualquiera i en vez de recojer se envia corriente trifase al rotor, se producirá allí un flujo rotatorio que actuando sobre los polos inductores pondrá tambien en marcha el dinamo i lo hará producir corriente: se ha realizado de esta manera un convertidor rotatorio que goza de interesantes propiedades.

El hecho de que en esta máquina no haya mas que un solo arrollamiento en el inducido i una sola exitacion inductriz determina por sí mismo una razon fija entre las tensiones de las dos clases de corrientes que recorren las espiras de su armadura. Es así que si designamos por E_a la tension de la corriente alterna i por E_c la de la continua tenemos:

$E_a = 0{,}707\ E_c$ para corriente monofase
» $= 0{,}61$ » » » trifase
» $= 0{,}35$ » » » exafase

en la suposicion de curvas sinusoídales.

Estas relaciones muestran que la tension de la corriente continua es siempre mas elevada que la alterna. Si quisiéramos, por ejemplo, tener en las bornas del convertidor corriente continuada a 220 volts con corriente exafase necesitaríamos $220 \times 0{,}35 = 77$ volts.

Pero segun hemos visto, como las bajas tensiones no son favorables para las transmisiones a distancia se recurre a un transformador, a fin de poder utilizar las ventajas de los grandes voltajes en combinacion con el convertidor rotatorio.

La corriente polifase, jeneralmente exafase, enviada al rotor se compone con la corriente continua allí jenerada, dando como resultante una corriente de menor intensidad que la normal. Como consecuencia una menor pérdida por efecto Joule en la armadura i por lo tanto mayor capacidad para soportar las sobrecargas que un dinamo de igual potencia.

El efecto Joule disminuye proporcionalmente al número de fases. Así si ese efecto vale 1 cuando la máquina trabaja como dinamo, cuando funciona como convertidor con corriente monofase vale 1,37, con corriente trifase 0,55 i con exafase 0,26. Tanto por esta razon, como para disminuir la reaccion del inducido que orijinan los defases de la f. e. m. i de la corriente en la red primaria los convertidores rotatorios trabajan casi siempre con corriente exafase. Van provistos para ello de seis anillos montados sobre el eje i conectados al inducido a 60°.

Es natural que el rendimiento industrial de tales máquinas supere al de los otros grupos analizados anteriormente en atencion a que en el convertidor rotatorio el proceso de transformacion es inmediato, esto es, no pasa por la transicion de enerjía eléctrica—trabajo mecánico, trabajo mecánico—enerjía eléctrica a que están sujetos los otros grupos.

Véase en el cuadrs siguiente tomado de la excelente obra de Kyser «Elektrische Kraftübertragunf» la confirmacion de este acerto.

Motor jenerador compuesto de un motor siner. trifase, 3000 volts, 50 períodos i un dinamo schunt de corr. continua de 300 K W, 220 volts, 500 revoluc. por minuto.

Convertidor rotatorio con transformador exafase. La corriente trifase es de 3000, 134 volts, 50 períedos i la corriente continua 300 K W 220 volts, 500 revoluciones por minutos.

Tanto por % de rendimiento.

Carga	η_M	η_j	η_r	Carga	η_T	η_{cr}	η_r
1/4	86	84,5	72,67	1/4	95,4	87	82,99
1/2	92,5	89	82,31	1/2	96,8	92,2	89,25
3/4	94	91,5	86,01	3/4	97,3	93,5	90,98
4/4	94,5	92,5	87,41	4/4	97,5	94	91,68

en que η_M =rendimiento en % del motor síncrono.

η_j = » dinamo a corr. continua.

η_T = » transformador.

η_{cr}= » convertidor rotatorio.

η_r = » rendimiento industrial.

Hai todavía otra interesante propiedad que abona al convertidor acercándolo del motor síncrono en su aspecto favorable. Nos referimos a la posibilidad de mejorar el factor de carga de la distribucion como en el caso del motor síncrono, mediante una exitacion adecuada.

En los grupos jeneradores estudiados anteriormente tanto la tension alterna como la continua eran completamente independientes entre sí e independientes de la carga. La tension continua podia ser reglada como en todo dinemo normal. No ocurre lo mismo en el convertidor rotatorio. Ahora precisa arbitrar medios especiales para reglar el voltaje de la corriente continua vista la estrecha solidaridad existente entre ambas tensiones. El principio del sistema consiste en hacer cariar el voltaje alterno sea por medio de bobinas de reaccion o de trasformadores especiales con escalonamientos sucesivos, sea adicionando una tension suplementaria con un agregado *ad-hoc*.

El convertidor rotatorio cuando transforma corriente trifase en continua está afectado tambien de las sujeciones que ya hicimos notar en el motor síncrono, tanto en lo que respecta al arranque como en la dependencia de la marcha en el circuito primario.

El convertidor puede todavía transformar corriente monofase en continua o viceversa, o bien jenerar simultáneamente corriente continua i alterna. Pero en ámbos procesos, máxime en el primero a causa de su poca economía, no ha alcanzado sino unir limitadas aplicaciones.

d) El transformador en cascada.

I llegamos por fin a la forma mas moderna de los convertidores, forma que ha encontrado vasta aplicacion en las grandes intalaciones de traccion eléctrica.

El transformador en cascada resume, por decirlo así, las mejores cualidades de los otros traesformadores, sustrayéndose sin embargo a los inconvenientes que les son inherentes

Es así que del grupo jenerador con motor síncrono tiene la cualidad de que el motor pueda trabajar con cos φ=1, del con asíncrono la facilidad del arranque i la ausencia de exitacion especial; por fin supera al convertidor rotatorio en su mayor capacidad de recibir frecuencias elevadas i en cuanto al rendimiento aquel lo distancia en mui poca cosa. Agreguemos que en las centrales ocupa un local reducido i que es mas económico en cuanto al material requerido para su construccion.

Este grupo consiste en principio de un motor asíncrone ordinario i de un convertidoa rotatorio montados sobre un mismo eje i conectados electricamente de tal manera que el rotor del motor asíncrono quede en conexion con puntos equidistantes

de la armadura del convertidor. Equivale pues este montaje al dispositivo usado para hacer variar la velocidad de dos motores asíncronos polifases instalados sobre un mismo eje: montaje en cascada.

Es propiedad fundamental de la agrupacion en cascada el hecho de que si el número de polos de ámbas máquinas es el mismo el eje comun toma una velocidad correspondiente a la mitad de la frecuencia de la corriente alterna enviada al estator. El motor asíncrono transmite así la mitad de su enerjía al eje comun en forma de trabajo mecánico i la otra mitad al convertidor en forma de enerjía eléctrica.

De ahí se sigue que teóricamente tal motor no requiera mas que la mitad de la potencia que le seria menester en caso de transformacion con la misma velocidad toda la enerjía eléctrica en irabajo mecánico. Por otra parte el convertidor trabaja con una frecuencia igual a la mitad de la frecuencia primaria. Esta circunstancia permite construirlo con dimensiones mas moderadas que de ordinario, aún sin riesgo de que se produzcan chispas en el colector. A mayor abundamiento, sobre todo en caso de fuertes sobrecargas, se le puede adicionar polos auxiliares qne facilitan la conmutacion.

La puesta en marcha del transformador en cascada no presenta mayor dificultad que la del motor asíncono ordinario.

La reactancia del motor asíncrono del grupo permite que variándose la exitacion de la corriente continua pueda reglarse la tension lo mismo que si se usaran bobinas de reaccion. Por medio de agregados suplementarios en sincronismo es posible todavia variar aquel reglaje entre límites mas estensos.

Hai aun otros procedimientos para transformar la corriente alterna en continua, pero no tienen todavia empleo industrial.

Para terminar séame permitido reiterar desde aquí mis agradecimientos al señor Hans Proebster, injeniero de la Siëmes-Schuckert de Nurenberg, que tuvo la amabilidad de obsequiarme las fotografías que ilustran estas pájinas.

Nürenberg, (Baviera) 12 de Marzo de 1913.

BIBLIOGRAFIA

E. Arnold Arbeiten aus den El Inst. der Grossherzoglichen Tech. Hochsch. Fridericiana zu Kalsruhe. Berlin 1910-11 Spring.

H. Kyser. Elektrische Kraftübertragung 1912. I. Band. Berling Spring.

E. Gérard. Leçons d'Electricité II volumen 1910 Paris Gauthier Villars Elektrische Kraft Betriche und Balmen 1910 und 1911.

Elektrotechnische Zeitschrift 1912.

N. O. Lifschitz. Die Umformer. Verlagvon Hachmeister Thal. Leipzig 1909.