

EL CONDENSADOR SÍNCRONO

DE TORRENTE

HIDROELÉCTRICA ESPAÑOLA, S. A., dentro del plan de ampliación de su sistema de transporte de energía eléctrica en alta tensión, ha instalado un condensador sincrónico de 50 000 kVAr en la estación transformadora de Torrente. Se describen a continuación las características principales de esta máquina y del equipo asociado con ella, dedicando atención principal a las de índole eléctrica.

1 — Generalidades.

Con objeto de enlazar su gran central térmica de Escombreras con los mercados propios de Valencia y Madrid, HIDROELÉCTRICA ESPAÑOLA ha superpuesto a su red de 138 kV una arteria de transporte a 230 kV: Escombreras-Torrente (Valencia) — Villaverde (Madrid), que en su día servirá también para el trasvase a Levante de la energía procedente del aprovechamiento hidráulico del Tajo, actualmente en vías de construcción.

Dada la gran longitud de esta arteria (Escombreras-Torrente: 220 km, Torrente-Villaverde: 300 km), era evidente la necesidad de medios para regular la tensión en los extremos de la arteria: por ello, HIDROELÉCTRICA ESPAÑOLA decidió ya desde un principio la instalación de condensadores síncronos de gran potencia en las estaciones transformadoras de Torrente y Villaverde, nudos principales de enlace de los sistemas de 230 kV y 138 kV.

TABLA I

CARACTERÍSTICAS DEL SÍNCRONO DE TORRENTE

Potencia aparente en servicio continuo con $\cos \varphi = 0$ sobreexcitado	50 000 kVA
Tensión	$11 \pm 5\%$ kV
Frecuencia	50 Hz
Intensidad	2620 A
Velocidad	1000 rev/min
Pérdidas nominales a 11 kV y $\cos \varphi = 0$	775 kW
Impedancia sincrónica	148 %
Relación de cortocircuito	0,675
Reactancia sincrónica	175 %
Reactancia transitoria	24 %
Reactancia subtransitoria	13 %
Calentamiento (sobret temperatura respecto a la temperatura ambiente, según las normas B. S. S. 226)	
Devanado del estator	80 °C (termopar)
Devanado del rotor	85 °C (resistencia)
Refrigeración	por aire en circuito abierto
Método de arranque	Korndörffer

Este enlace, se efectúa en Torrente a través de dos autotransformadores trifásicos, fabricados en Galindo (Bilbao) por «General Eléctrica Española», de 225/138/11 kV y 100/110,5/30 MVA, dotados de unidades de regulación en carga de $138/138 \pm 10\%$ /11 kV con 23 puntos de regulación. El condensador sincrónico, de 50 MVA está conectado a la red a través de los dos devanados terciarios de 11 kV y 30 MVA de los autotransformadores, en una conexión — clásica en este tipo de sistemas (véase fig. 1, esquema unifilar de la red primaria de H. E.).

Las características principales del sincrónico de Torrente fabricado en Inglaterra por «Metropolitan-Vickers Electrical Co Ltd.», están indicadas en la Tabla I.

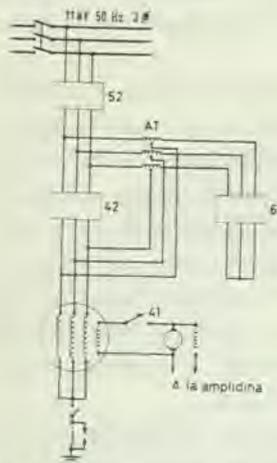
Se trata de una máquina de polos salientes, sin devanado amortiguador, de eje horizontal, montado en dos cojinetes normales tipo pedestal, y está dispuesta para funcionamiento a la intemperie. Para ello, la máquina, incluida su excitatriz principal, que va montada sobre el mismo eje del sincrónico, está cubierta por una carcasa exterior de chapa de acero resistente a las inclemencias del tiempo.

La refrigeración es por aire en circuito abierto; el aire frío es absorbido por filtros especiales, protegidos por lumberras, montados en los dos extremos de la carcasa y, una vez ha atravesado los devanados y se ha calentado, es descargado por los laterales.

La lubricación de los cojinetes se realiza por circulación de aceite, el cual es enfriado en circuito cerrado por refrigeradores especiales enfriados por aire. Para el arranque dispone de un sistema de alta presión de aceite que levanta el rotor antes de arrancar, en la forma normal para máquinas de esta clase. El equipo de lubricación comprende, pues

- dos bombas de aceite de lubricación, (una de ellas de reserva, que entra automáticamente en servicio al fallar la otra), alojadas en el soporte del cojinete de la excitatriz principal
- dos bombas de aceite de alta presión, una por cada cojinete, y
- un ventilador para la refrigeración del aceite.

Las bombas y el ventilador están accionados por motores de corriente alterna a 220 V, 50 Hz.



- AT Autotransformador de arranque
- 52 Interruptor principal
- 6 Interruptor de neutro
- 42 Interruptor de marcha normal
- 41 Interruptor de campo

Fig. 2 — Esquema de arranque (Método Korndörffer)

se desarrolla automáticamente y en los circuitos de control respectivos se han previsto enclavamientos para impedir errores al realizar la maniobra y asegurar así la secuencia correcta de las distintas operaciones.

Los circuitos de control para el arranque son alimentados por c. c. a 110 V desde la batería de la subestación.

La parada es también «semiautomática», bastando abrir el conmutador de control, con lo que disparan los interruptores 52 y 42, parando así la máquina. La bomba de aceite de lubricación permanece en servicio durante unos 30 minutos, hasta la detención total del rotor, asegurando el engrase de los cojinetes durante el periodo de deceleración. En una parada normal, permanece cerrado el interruptor de campo 41, que es disparado automáticamente al arrancar de nuevo la máquina, antes del cierre del interruptor de neutro, como se ha descrito antes.

Se ha previsto también un pulsador de parada de emergencia, el cual dispara también el interruptor de campo. Este último es asimismo disparado cuando la máquina se para por la actuación de las protecciones diferencial y de sobretensión.

Al pararse la máquina, se conectan automáticamente 6 calentadores de 800 W, previstos para evitar la condensación dentro de la carcasa durante los periodos de parada.

3 — Sistema de excitación: regulador automático de tensión.

La máquina está provista de una excitatriz principal, de conexión en derivación (shunt) y no lleva excitatriz piloto. La excitación y por lo tanto la carga de la máquina puede controlarse bien manualmente, por medio de un reostato «de campo» en serie con el devanado shunt de excitación de la excitatriz principal, bien automáticamente por medio del circuito de regulación automática de tensión, formado por el regulador automático propiamente dicho y una

amplidina. Los elementos principales de este circuito de regulación se indican en el esquema de la fig. 3.

Los terminales de la máquina, a través de un transformador de tensión (con fusibles en el primario), alimentan un rectificador trifásico de onda completa, que proporciona una tensión continua proporcional al valor medio de las tensiones trifásicas en bornas de la máquina. La corriente rectificada se pasa, a través de un reostato de ajuste de tensión, a un detector de error, formado aquí por un puente Metrosil. Con tensión normal en la máquina, el detector no da señal de salida y cuando la tensión que se regula es alta o baja, da una señal de error negativa o positiva.

El empleo de un puente Metrosil, formado por cuatro semiconductores de características distintas dos a dos en las ramas opuestas del puente, tiene la ventaja de proporcionar un elemento de referencia altamente insensible a las variaciones de temperatura y de frecuencia, cualidad que no poseen los detectores de error formados por circuitos electrónicos, por ejemplo.

La salida del puente alimenta al devanado de c. c. de control de un amplificador magnético (transductor con rectificadores) de dos etapas, que a su vez excita el campo debilitador (en oposición) de una amplidina. Esta lleva, además, un campo reforzador excitado separadamente por un generador auxiliar, acoplado al mismo eje que la amplidina.

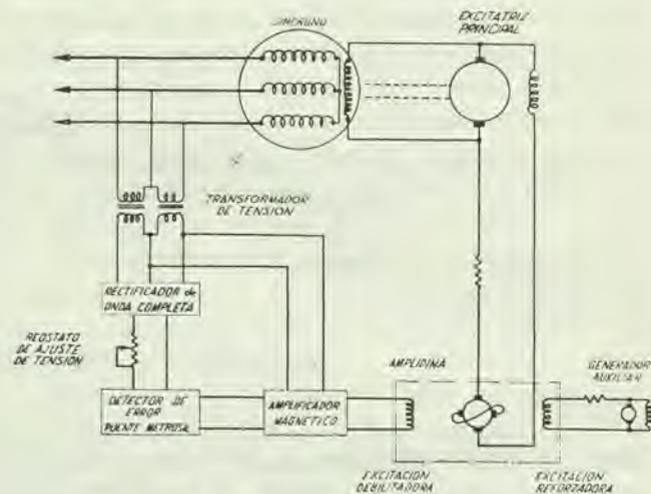


Fig. 3 — Esquema simplificado del circuito de regulación de tensión

También se puede excitar este campo por la excitatriz piloto, caso de haberla, pero éste no es el caso del síncrono de Torrente. El amplificador magnético es capaz de variar los amperios-vuelta del campo debilitador de la amplidina desde un valor casi nulo hasta aproximadamente el doble del del campo reforzador; la disposición es tal que, cuando la tensión regulada (tensión en barras) es la normal, la salida del amplificador magnético es aproximadamente la

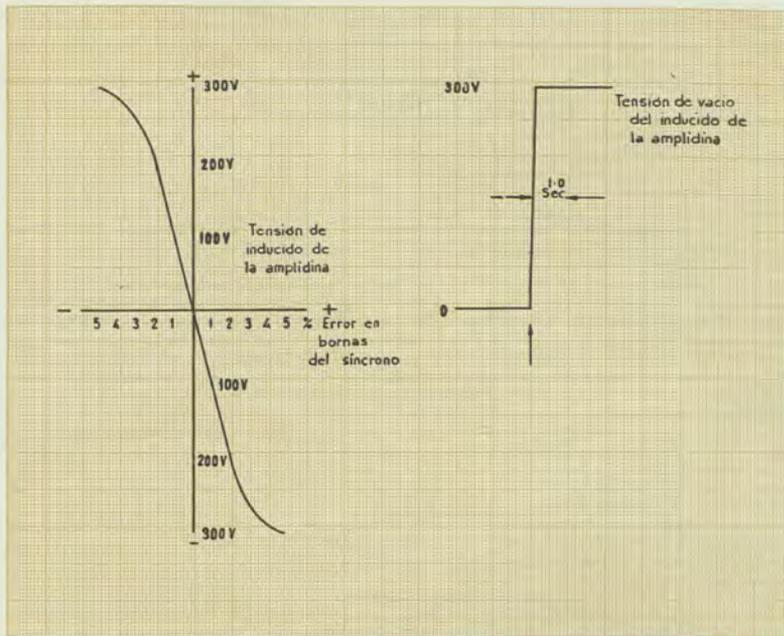


Fig. 4 — Curvas de respuesta para el regulador automático de tensión

CONDENSADOR SINCRONO DE TORRENTE
 50 000 kVA
 11 000 V \pm 5 % 2620 A 50 Hz 1000 rev/min

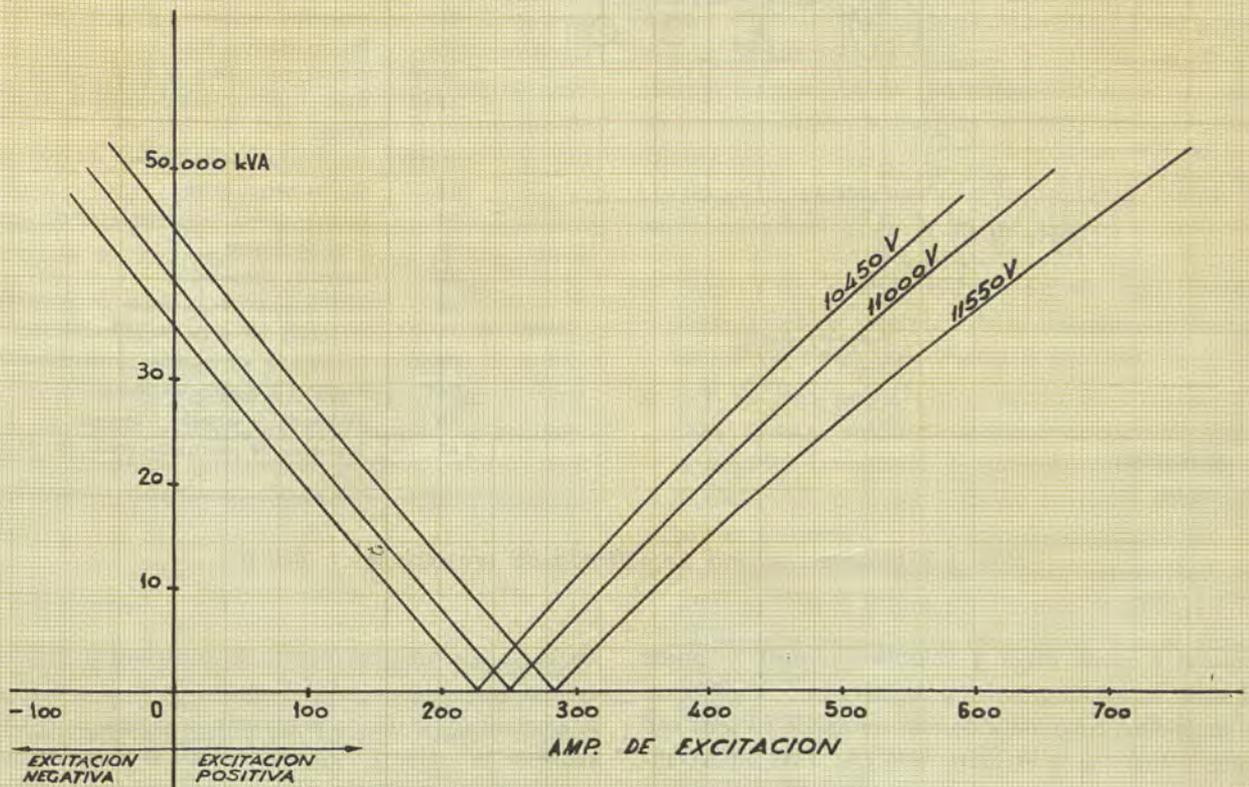


Fig. 5 — Curvas en V del sincrónico



Fig. 7 — Vista aérea de la E.T. Torrente

los cursores del reostato de ajuste de tensión (véase fig. 3), el cual modifica la entrada al puente Metrosil y hace que el regulador «perciba» una tensión diferente, y del reostato de campo, se correspondan en todo momento. De ello se encarga automáticamente un relé diferencial especial, incluido en el equipo regulador, que hace que el reostato fuera de servicio siga siempre al que está en servicio: es el relé «seguidor» VTD. El equilibrio ó correspondencia de posiciones de los dos reostatos está indicado en el pupitre de mando por un indicador de equilibrio (voltímetro de cero central).

Modificando, pues, con el equipo descrito la intensidad de excitación del síncrono, se regula su carga. Las curvas que dan las cargas en kilovoltampérios en función de los amperios de excitación, llamadas, como es sabido, curvas en V de la máquina, están representadas para diferentes tensiones de funcionamiento, en la fig. 5. Para excitaciones inferiores a unos 200 A, el síncrono subexcitado, trabaja en inducción, absorbiendo potencia reactiva; para valores superiores, trabaja en capacidad, produciendo potencia reactiva.

4 — Protecciones.

Se distinguirán los dispositivos de protección del síncrono que producen, al actuar, el disparo de la máquina, de los que simplemente dan lugar a una alarma acústica y óptica.

4.1 — Protecciones que conducen a disparo.

Están dispuestas para operar, unas por medio del relé de bloqueo 86A, que cuando actúa desenergiza el contactor

principal ó maestro, conduciendo al disparo de los interruptores 6, 52 y 42, y otras por medio del relé de bloqueo 86B, que conduce además al disparo del interruptor de campo 41. Estos dispositivos dan lugar además, a la correspondiente alarma a través de los relés con bandera 30, que indican el aparato protector que ha actuado. En el esquema general simplificado de la fig. 6 se indican los distintos relés y dispositivos de protección, sin hacer distinción entre los dos relés de bloqueo 86 y los distintos relés de bandera 30.

Los dispositivos que actúan a través del relé de bloqueo 86A son los siguientes:

- 1). Disparo por sobrevelocidad (12): De tipo mecánico, actúa cuando la velocidad de la máquina se eleva por encima del 130% de la velocidad síncrona.
- 2). Relé de baja potencia e inversión de potencia (37 y 37A): Detecta una interrupción ó cambio de signo en la pequeña componente de potencia activa que el condensador, como motor síncrono en vacío, toma de las barras, actuando a través del relé de tiempo 37A.
- 3). Termostatos de temperatura de los cojinetes (38): Estos aparatos (38A y 38B) actúan cuando la temperatura de los cojinetes respectivos se eleva por encima de un valor predeterminado.
- 4). Relé de secuencia incompleta (48): Actúa en el caso de que el ciclo de arranque automático no se complete en el tiempo previsto.
- 5). Relés de sobreintensidad (51 y 51H): Esta protección consta de 3 elementos de sobreintensidad de tiempo inverso, y 2 elementos instantáneos 51H, conectados



Fig. 8 — Edificio principal con el síncrono

a los secundarios de 3 transformadores de intensidad en las conexiones principales de la máquina.

- 6). Relé de baja presión de aceite (63BB): Este dispositivo dispara el condensador en el caso de una falta sostenida de flujo de aceite en los cojinetes.
- 7). Disparo inadvertido del interruptor de marcha 42.
- 8). Disparo inadvertido del interruptor de campo 41.

(Estas dos últimas protecciones son simples enclavamientos eléctricos).

Los dispositivos que actúan a través del relé de bloqueo 86B, conduciendo por tanto al disparo de todos los interruptores incluido el de campo 41, son:

- 1) Relé de sobretensión (59): Este relé, cuya bobina está alimentada desde el secundario de un transformador de tensión, actúa en el caso de una sobretensión procedente del sistema.
- 2) Relé de protección diferencial (87): Este relé tripolar del tipo Merz-Price, alimentado por transformadores de intensidad en el interruptor principal 52, en el neutro del autotransformador y en el neutro de la máquina, actúa en el caso de faltas en los devanados de la máquina y del autotransformador y en los cables de interconexión hasta el interruptor principal.

4.2 — Alarmas.

El equipo de alarma está formado por el relé 74 de alarma acústica, asociado a un cláxon y es energizado por los distintos relés de bandera indicadora 30, que señalan el aparato que ha actuado, y energizan además una lámpara roja de alarma.

Este equipo es operado por los siguientes aparatos:

1. Termostato de aire (26): Actúa cuando el aire de refrigeración alcanza una temperatura prefijada.
2. Falta de tensión en el equipo del regulador automático de tensión (27VX): Es preciso discriminar entre una

falta real debida a un cortocircuito en el sistema, y un fallo de los fusibles conectados en el primario del transformador trifásico de tensión de 11 000/110 V que alimenta el equipo regulador. De esto se encarga un relé especial — relé VNV — que utiliza las puntas de corriente subtransitoria que se producen en el caso de falta real para bloquear el circuito de disparo de un relé de mínima tensión (27 V) conectado al secundario del transformador de tensión. En caso de fallo de los fusibles, el relé VNV permite el funcionamiento de 27 V, que a través del relé auxiliar 27 VX, opera el relé de alarma y provoca el paso de control automático a control manual, dejando fuera de servicio el regulador de tensión.

3. Termostato de los cojinetes (38): Contactos sobre los termostatos (38AA y 38BB) actúan, operando el relé de alarma, cuando la temperatura de los cojinetes se eleva excesivamente. Ya se ha visto que, para otra temperatura superior a la de alarma, actúan otros contactos que producen el disparo de la máquina.
4. Relé térmico de sobreintensidad (49): Este relé, cuya desviación es proporcional a la intensidad eficaz del estator de la máquina, se alimenta desde un transformador de intensidad en las conexiones principales del condensador síncrono. Tiene una característica térmica aproximadamente igual a la de la máquina y la protege contra sobreintensidades permanentes o esporádicas. Al funcionar, actúa por medio de 49X, sobre la excitación de la máquina a través del regulador automático de tensión, en el sentido de reducir la excitación y por tanto, la intensidad en el estator, a un cierto valor.
- 5) Falta de flujo de aceite en los cojinetes (63 QB): Una falta de flujo de aceite en los cojinetes obliga al relé de flujo 63QB a actuar, a través del relé auxiliar 63QBX, operando el relé de alarma, siempre que el interruptor principal 52 esté cerrado. El relé 63QBX también inicia el arranque de la bomba de aceite de reserva.

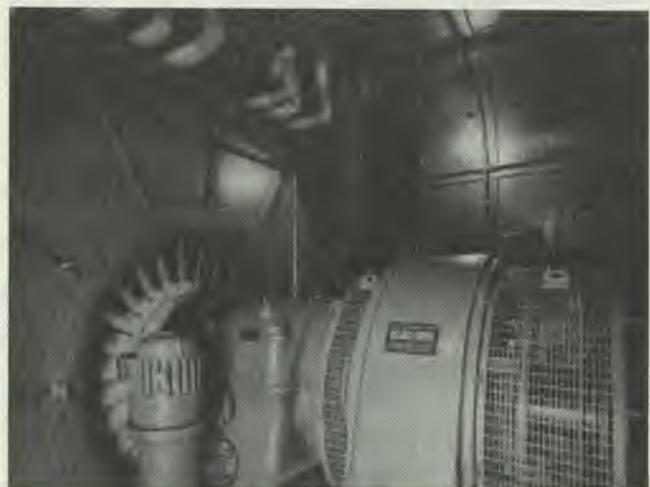


Fig. 9 — Excitatriz principal del síncrono

6) Relé de falta a tierra (64): La bobina de este relé está conectada al secundario de un transformador monofásico de tensión, cuyo primario está conectado en serie en la conexión del neutro del condensador a tierra. Un pararrayos *metrosil* está conectado a través del primario para proporcionar un camino a tierra de baja resistencia a las ondas de choque que lleguen al neutro del condensador.

En el caso de falta a tierra en el circuito del condensador, el relé de tensión 64 opera el relé de alarma 74; no conduce, pues, al disparo de la máquina.

7) Fallo del grupo amplidina (98): Un relé de prueba 98 de la tensión del generador auxiliar acoplado al grupo amplidina, que tiene por misión asegurar que la amplidina gire a su velocidad nominal antes de poner el condensador bajo control automático, posee contactos adicionales que operan el relé de alarma en caso de disparo del grupo amplidina ó pérdida de la tensión

Finalmente, como se ha dicho ya, contactos de los relés de bloqueo 86A y 86B que se cierran cuando actúan éstos en caso de falta conducente a disparo de la máquina, están dispuestos para excitar el relé de alarma 74 a través de los relés de banderola 30 correspondientes.

5 — Emplazamiento del síncrono y del equipo asociado

El síncrono está emplazado junto al edificio principal de la estación transformadora en la parte opuesta al parque de intemperie (véase las figs. 7 y 8). La excitatriz principal, (fig. 9) está alojada, como se ha dicho, en el interior de la carcasa.

El embarrado principal, de pletina de cobre soportada por aisladores de porcelana, penetra en la sala de celdas del síncrono, situada en la planta baja del edificio, formando cuerpo aparte del mismo. Esta sala contiene las celdas del

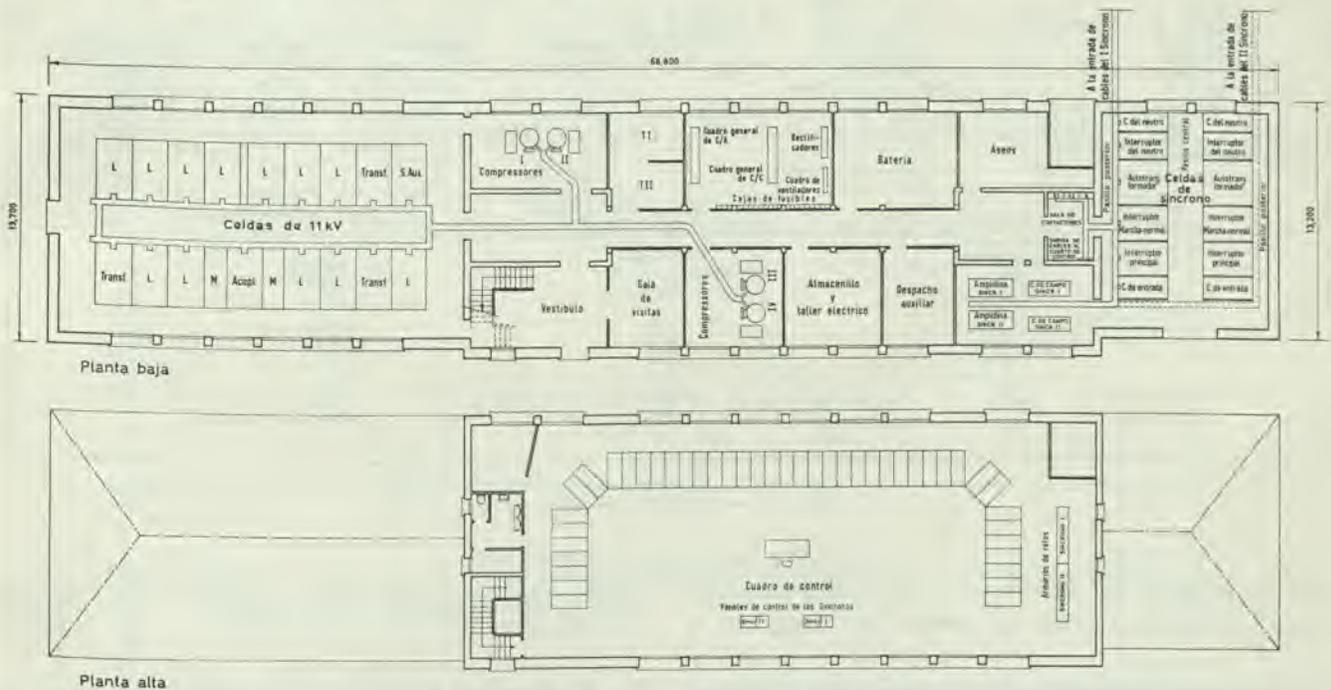


Fig. 10 — Plantas del edificio principal

del generador auxiliar. Además, en condiciones normales, este relé enciende una lámpara indicadora de que la amplidina está en marcha.

8) Alimentación c. a. para servicios auxiliares: Relé de mínima tensión: Un relé de mínima tensión trifásico, conectado a las barras de los servicios auxiliares, impide que la máquina sea arrancada a menos que la alimentación de c. a. sea normal en cuanto a tensión y rotación de fases. La falta de alimentación de c. a. una vez que el condensador ha arrancado no provocará la parada de la máquina, pero conducirá a la operación del relé de alarma a través de un relé auxiliar.

autotransformador de arranque y de los tres interruptores (principal, de neutro y de marcha normal) de la máquina, habiéndose previsto las celdas correspondientes a un segundo síncrono, a instalar en el futuro. En un local anejo está montado el grupo amplidina y el armario del equipo de regulación de tensión por amplificadores magnéticos (fig. 10).

El pupitre de control, con todos los interruptores, conmutadores y selectores precisos para el arranque y regulación del síncrono (fig. 11) está emplazado en la sala del cuadro de control, situado en la primera planta del edificio principal (fig. 12). En esta sala se ha montado también, detrás de uno de los laterales del cuadro de control, el armario de relés

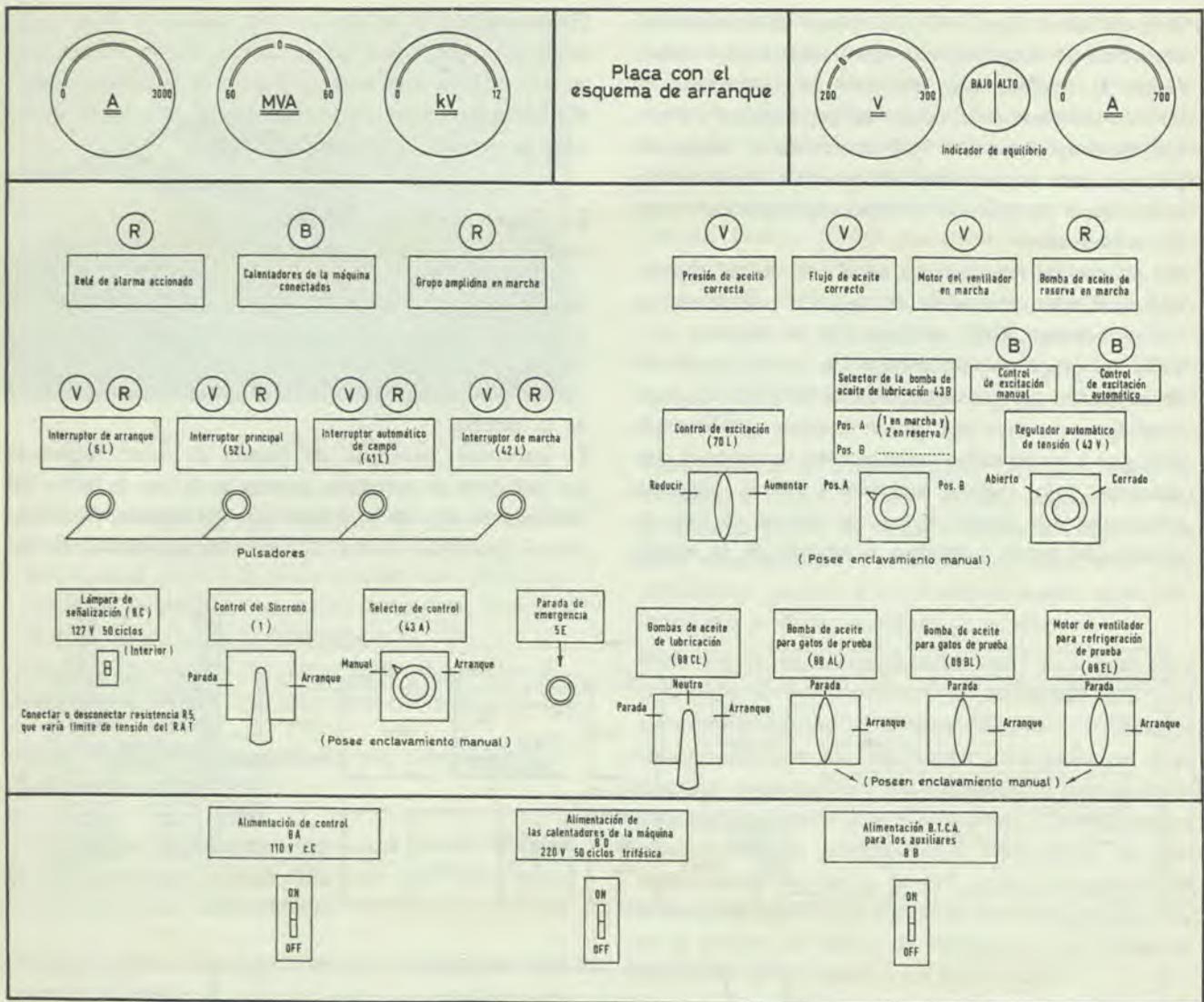


Fig. 11 — Pupitre de control

con las protecciones del síncrono, que quedan así fácilmente accesibles al oficial de cuadro. Las fotografías y

planos adjuntos aclaran estos extremos y no requieren más comentario.



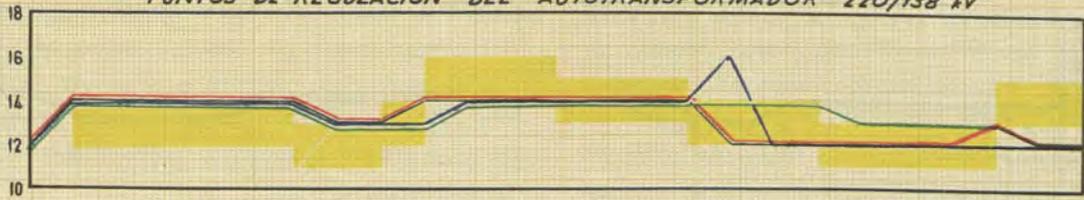
Fig. 12 — Cuadro de control con el pupitre del síncrono

6 — Explotación del síncrono: regulación de tensión.

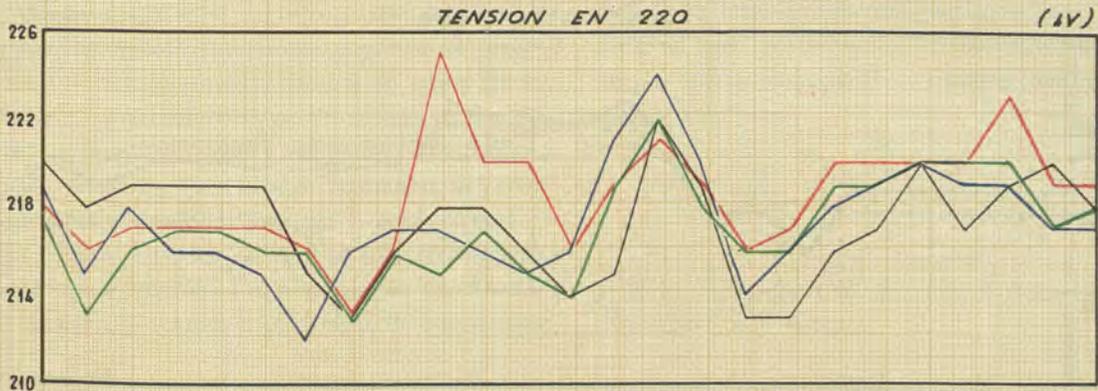
El condensador síncrono de Torrente, por su situación estratégica en el sistema y sus características especiales, constituye una de las piezas fundamentales dentro del programa de regulación de tensiones llevado a cabo en HIDROELÉCTRICA ESPAÑOLA. La flexibilidad de su sistema de control de la excitación, que le permite absorber una potencia reactiva en inducción (subexcitado) igual a la que es capaz de producir en capacidad — a diferencia de la mayoría de los síncronos normales que sólo son capaces de absorber la mitad de su potencia nominal en kilovoltio amperios reactivos — le hace especialmente apto para controlar, en conjunción con los reguladores en carga de los autotransformadores a cuyo terciario está conectado, los niveles de tensión en 230 kV y 138 kV. El beneficio

E.T. TORRENTE

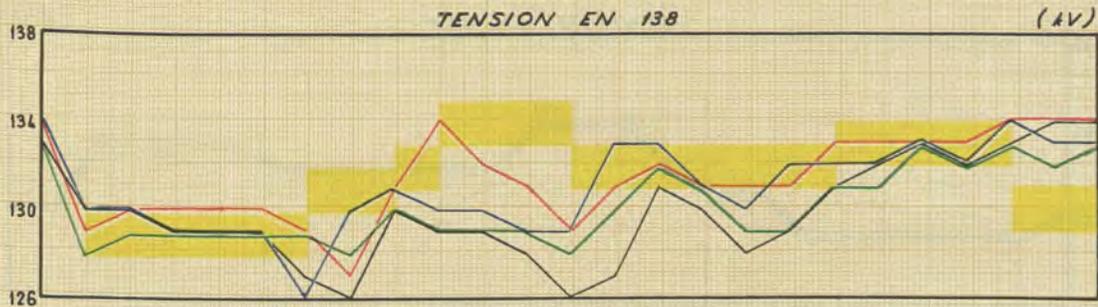
PUNTOS DE REGULACION DEL AUTOTRANSFORMADOR 220/138 kV



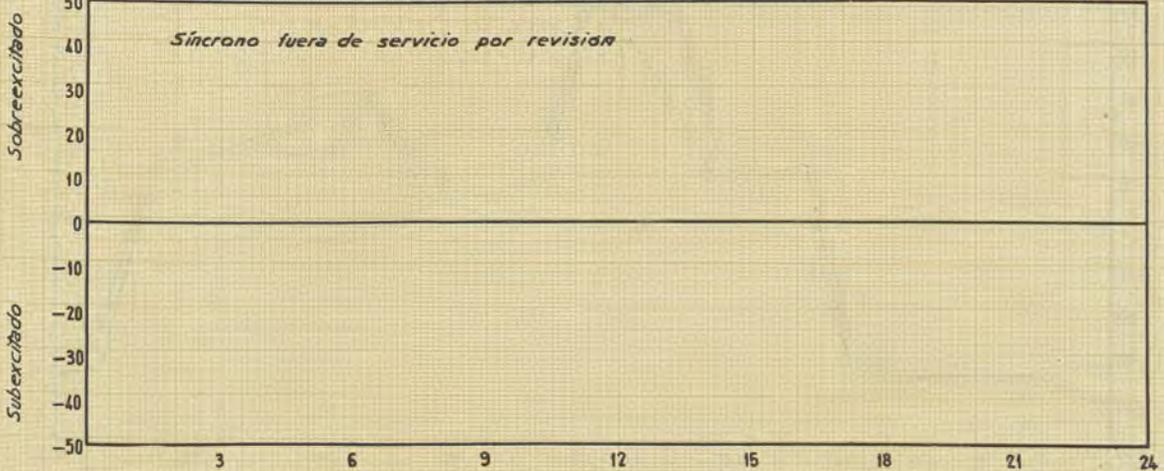
TENSION EN 220 (kV)



TENSION EN 138 (kV)



PRODUCCION DEL SINCRONO (MVar)



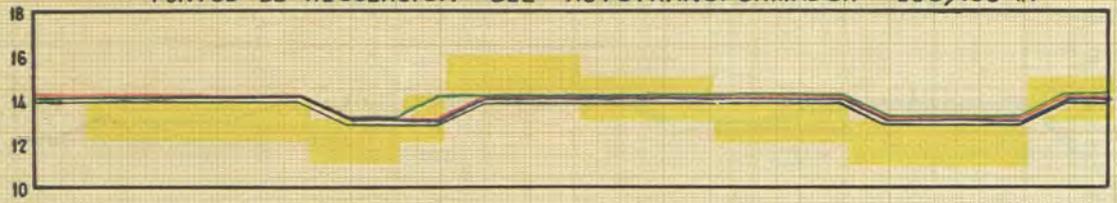
Programa

- 23/6
- 24/6
- 25/6
- 26/6

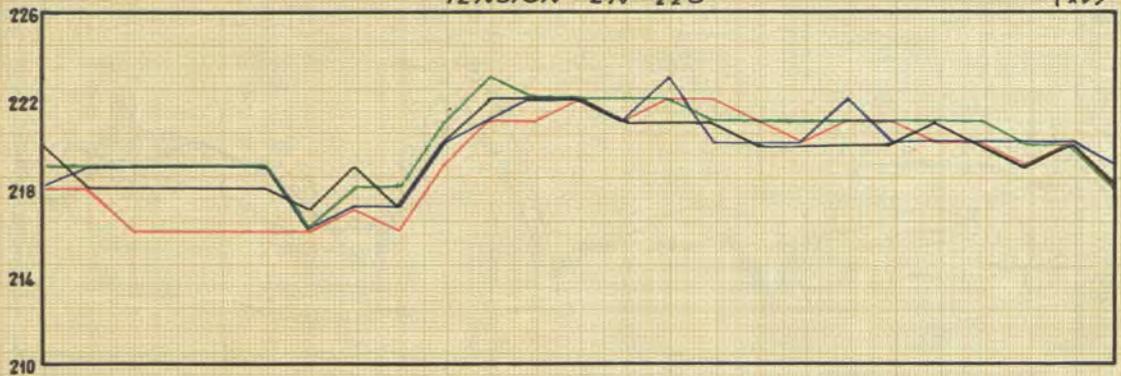
Fig. 13 — Registro de tensiones. (Semana del 23/6 al 26/6/1959)

E.T. TORRENTE

PUNTOS DE REGULACION DEL AUTOTRANSFORMADOR 220/138 kV



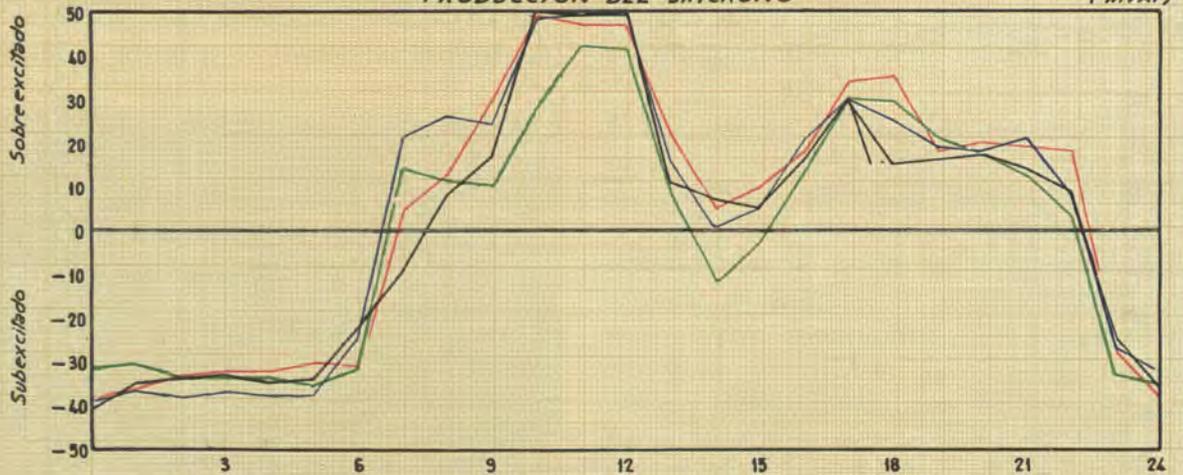
TENSION EN 220 (kV)



TENSION EN 138 (kV)



PRODUCCION DEL SINCRONO (MVar)



Programa

- 18/8
- 19/8
- 20/8
- 21/8

Fig. 14 — Registro de tensiones. (Semana del 18/8 al 21/8/1959)

a que conduce su funcionamiento no es pues solamente local, como en el caso de los síncronos destinados a mejorar el $\cos \varphi$ de las cargas y conectados por ello directamente a barras de distribución, sino que repercute en una gran zona del sistema. Gracias a ello, el síncrono de Torrente ha contribuído en gran manera a la mejora progresiva de los niveles de tensión en el conjunto del sistema, tanto en lo que respecta al valor absoluto de esos niveles — elevación de su valor medio — como en lo relativo a su regularidad.

A raíz de su puesta en servicio — en Octubre de 1958 — y a lo largo de todo el año 1959, ha sido el pilar principal de los programas conjuntos de tensiones y puntos de regulación en carga de los autotransformadores de enlace de los distintos niveles, establecidos en los principales centros del sistema. Su influencia se aprecia claramente comparando los diagramas de las fig. 13 y 14 que reproducen las curvas diarias de tensiones y puntos en Torrente — hora por hora — a lo largo de dos periodos de control (días laborables), uno de ellos con el síncrono fuera de servicio por revisión (fig. 13), y el otro con el síncrono en servicio. En este segundo

(fig. 14) se observa el cumplimiento exacto del programa establecido en 138 kV (zona sombreada), y la regularidad de la tensión (no programada) en 230 kV, en contraste con las variaciones acusadas que muestra la figura anterior en la que se aprecia además la imposibilidad de cumplir el programa de tensión en 138 kV precisamente en el momento más crítico, el de la hora de punta de la mañana.

Actualmente, gracias a la entrada en servicio durante 1960 de los síncronos de San Vicente y Villaverde (v. fig. 1) y a la extensión del sistema de 230 kV, la influencia de una indisponibilidad del síncrono de Torrente es menos marcada, es decir, ha dejado de ser un elemento crítico, pero no por ello se ha reducido su utilidad, que sigue y seguirá siendo manifiesta.

JUAN KARIGER

Ingeniero Industrial

HIDROELÉCTRICA ESPAÑOLA S.A.

N. da R. — *As gravuras das figs. 3, 4, 5, 13 e 14 foram-nos gentilmente cedidas pelo autor.*