

2 Gen. 56



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

**LA COMPENSACION SERIE Y PARALELO DE
LAS LINEAS DE TRANSMISION EN LA RED
ELECTRICA NACIONAL.**

**T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A
JESUS GERMAN LIRA ORTEGA**

MEXICO, D. F.

1982



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

LA COMPENSACION SERIE Y PARALELO DE LAS LINEAS DE TRANSMISION EN LA RED
ELECTRICA NACIONAL

I N D I C E

	<u>PAGINA</u>
1.- INTRODUCCION	1
2.- CONSIDERACIONES BASICAS	2
3.- SISTEMAS DE COMPENSACION	3
4.- COMPENSADORES ESTATICOS	3
5.- APLICACIONES DEL COMPENSADOR ESTATICO A SISTEMAS DE POTENCIA M.T. Y A.T.	22
6.- RESULTADOS DE PRUEBAS PRACTICADAS A UN TRANSDUCTOR TIPO COMPENSADOR ESTATICO	22
7.- FUNCIONAMIENTO A REGIMEN	26
8.- TRANSITORIOS ELECTROMECAVICOS	40
9.- SOBRETENSIONES DE MANIOBRAS Y PROBLEMAS PARTICULARES	55
10.- LOS COMPENSADORES ESTATICOS EN LAS GRANDES REDES DE TRANSPORTE	69
11.- CONCLUSIONES	85
12.- BIBLIOGRAFIA	88

1.- INTRODUCCION

En el presente trabajo se sintetizarán los problemas relacionados con la regulación de la tensión y de la potencia reactiva en sistemas de transmisión en alta tensión y larga distancia. Se han examinado algunos aspectos relacionados con la compensación serie y derivada y con la utilidad de su modulación y correcta ubicación.

Además se han hecho notar las relaciones existentes entre la regulación de la tensión y de la potencia reactiva, con la estabilidad transitoria y dinámica y con las sobretensiones.

En países en vía de desarrollo, la utilización de grandes recursos hidráulicos a notables distancias de las cargas, se ha vuelto económica y técnicamente posible gracias a la introducción, ya sea de la transmisión en corriente continua o de corriente alterna.

La decisión de escoger una solución en corriente, continua o alterna, ha sido tomando en cuenta los costos de instalación y de uso.

En este trabajo nos limitaremos a tratar los sistemas en corriente alterna en líneas aéreas, sobre la base de los resultados de un gran número de estudios realizados para tensiones de 400 hasta 1200 KV y para distancias hasta cerca de 1000 Km.

El objeto será el de poner en evidencia, cómo para estos sistemas los problemas de regulación de tensiones de potencia reactiva y de estabilidad están estrictamente relacionados no solo entre sí, sino con otros también, como por ejemplo con las sobretensiones dinámicas y de maniobras, con la posibilidad de volver a energizar monofásicamente y con transitorios.

El estudio de la regulación de la potencia reactiva y de la estabilidad no pueden ser por lo tanto realizados por separado e independientemente de los otros problemas, como para los sistemas más usuales; hay que examinar cada posible alternativa en su total posibilidad de funcionamiento en condiciones de régimen perturbado, durante las fases de desarrollo del sistema mismo. Con respecto a esto todo mundo sabe cómo sobre todo para los sistemas radiales, el problema de la potencia reactiva y el de la es-

tabilidad, son casi siempre críticos en las dos fases extremas de desarrollo.

El inicio del estudio de la compensación de líneas de transmisión, casi siempre está caracterizado por exceso de líneas energizadas y sin carga por motivos de estabilidad y confiabilidad; además la potencia de corto circuito por el limitado número de grupos de generación es moderada. Necesitamos por lo tanto adoptar y estudiar métodos para poder absorber el reactivo y para controlar las sobretensiones, sobre todo dinámicas por separación de carga y maniobras de interruptores.

El final de este estudio se caracteriza por una potencia de corto circuito relevante y por líneas muy cargadas. Se presenta por lo tanto la necesidad de eliminar o reducir la compensación derivada durante el funcionamiento normal o en el momento de fallas compatiblemente con el contenimiento de las sobretensiones.

2.- CONSIDERACIONES BASICAS.

El componente reactivo de la corriente consumida por un usuario cuando un componente semejante existe determina, como es bien sabido, una mayor corriente r.m.s. que aquella que es estrictamente necesaria para el abastecimiento de la energía activa. Por lo tanto conduce a un incremento en el efecto Joule perdiendo hasta el final la total generación de electricidad y el sistema de transmisión. Es por esta razón por la que las tarifas de electricidad son elaboradas con mayor frecuencia no sólo en términos del valor de la parte activa sino también de la parte reactiva registrada en los contadores de energía; esto significa que una sanción se determina por los valores del factor de potencia los cuales también son bajos. Además el componente inductor de la corriente fluyendo directo de la impedancia de la potencia, suministra un sistema que es responsable para una gran extensión, por la caída de voltaje en las terminales conectadas a la carga. Cuando el valor de este componente se vuelve bastante alto, la caída de voltaje que se acusa puede llegar a ser inconveniente, o incluso prohibitivo, para la operación satisfactoria de la instalación del usuario.

Sería posible que el usuario encontrara ventajoso generar local-

mente la energía reactiva para su instalación, así que no tiene que ser suministrada por el sistema de potencia y de manera que el componente de corriente correspondiente no tiene que fluir directo del sistema de impedancia.

3.- SISTEMAS DE COMPENSACION

Si el usuario conecta a través de sus barras colectoras de distribución local ya sea un banco de capacitores estáticos o una máquina síncrona sobreexcitada, a él le sería posible generar la energía reactiva requerida para su instalación.

Si el componente reactivo está sujeto a variaciones de tiempo de la corriente, el banco capacitor puede ser dividido, y los diferentes grupos de capacitores pueden ser conectados o desconectados de acuerdo a la magnitud de la corriente. En el caso de una máquina síncrona, el valor de la sobreexcitación puede ser alterado. Sin embargo, si las variaciones sufridas son abruptas, frecuentes y considerables, (ejemplo: Aquellas debidas a la operación de un horno de arco eléctrico, o un tren de laminar reversible manejado por un motor de C.D. alimentado desde un rectificador que suministra potencia), las operaciones de desconexión de los grupos de capacitores no serían suficientemente rápidas para prevenir las variaciones de voltaje. En cuanto a la solución del uso de una máquina síncrona, la máquina debe ser probada con un sistema de excitación suministrado desde un rectificador capaz de dar una tensión terminal apreciablemente mayor que el que es requerido para las condiciones de un estado de tensión, debe ser controlado también por un regulador electrónico operado por el componente reactivo de la corriente suministrada por el sistema de potencia en una forma tal como para reducir este componente a cero o a algún valor restrictivo determinado. A un sistema tal se le llama compensador síncrono.

4.- COMPENSADORES ESTATICOS

Los compensadores estáticos discutidos en este trabajo resuelven

el problema igualmente bien (ejemplo: Aquellos de compensación - para cambios abruptos y frecuentes en la energía reactiva) y tienen la ventaja de no requerir máquinas de rotación, ni el trabajo de mantenimiento cuando ellas operan. Además, las pérdidas de energía cuando son usadas están generalmente bien por abajo de -- aquellas las cuales podrían haber incurrido por un compensador - síncrono.

Además un compensador estático puede ser construído, así como suministrar la instalación con los componentes armónicos de la -- corriente requerida por los rectificadores o los hornos de arco, -- si la instalación incluye a cualquiera. De esta manera se hace -- posible suprimir la distorsión de la tensión de la forma de onda -- la cual sería inevitable si los componentes armónicos de la co- -- rriente hubieran sido suministrados por el sistema de potencia y -- fluye a través de sus reactancias. Uno de estos sistemas, al -- cual nosotros llamaremos un "transductor tipo compensador" consta esencialmente de:

Un banco de capacitores divididos en grupos los cuales, con la -- excepción de uno sólo, son sintonizados a las frecuencias de los -- diferentes componentes armónicos de la corriente por medio de -- reactores de núcleo de aire conectados en serie.

De manera que el grupo que no tiene reactores en serie, es tan -- considerado que el banco completo puede suministrar, a un voltaje -- estimado, la potencia reactiva máxima necesaria para alcanzar la -- puntuación considerada, ejemplo: Ya sea para limitar la caída de -- voltaje o para dar el factor de potencia un valor medio mayor que -- un mínimo establecido.

Un transductor (un reactor el cual puede estar saturado por una -- corriente directa) capaz de atraer (individualmente) una corrient- -- te reactiva bastante alta para compensar por un posible componen- -- te capacitivo mayor que el límite determinado; ésto es sobre la -- suposición de que el consumo de energía reactiva está en su valor -- mínimo.

Un regulador electrónico que, de acuerdo a la energía reactiva -- que satura al reactor.

Cualquier otro tipo de compensador estático puede ser considerado cuando el problema original es aquel de estabilización del valor de la tensión; esto es el compensador con reactor de saturación natural, comprendiendo esencialmente:

Un banco de capacitores, si necesariamente se dividen en grupos - sintonizados a las varias frecuencias armónicas que sean suministradas (por lo que se refiere a las del primer tipo).

Un reactor de "saturación natural", el cual se satura bajo el efecto de la tensión alterna estimada del sistema de distribución de las barras colectoras para las cuales se conecta el compensador estático.

Bancos de tres fases-simples de capacitores, conectados en serie con las tres fases respectivamente del reactor de saturación natural para cancelar el efecto de su reactancia residual (la reactancia, que es un devanado, tendría en la ausencia de núcleo magnético).

Este último tipo de compensador estático no necesita ser controlado por un regulador electrónico; como su trabajo requiere alguna explicación, se dará posteriormente.

4.1 El reactor saturable de saturación natural tipo compensador estático.

Cuando el resultado buscado es la estabilización de la tensión perfecta (para prevenir parpadeo de luz, por ejemplo) - el compensador estático usa un reactor de "saturación natural" que proporciona la mejor solución para el problema; el principio de operación será descrito subsecuentemente.

4.1.1 Composición del compensador.

Un compensador tal se obtiene por medio del circuito mostrado en la figura 1. Consta de:

Un banco de capacitores subdivididos en varios grupos, cada grupo se sintoniza por reactores de núcleos de aire de acoplamiento en serie a una frecuencia correspondiente para un comportamiento armónico que podría aparecer en la corriente requerida por la instalación. Los componentes fundamentales

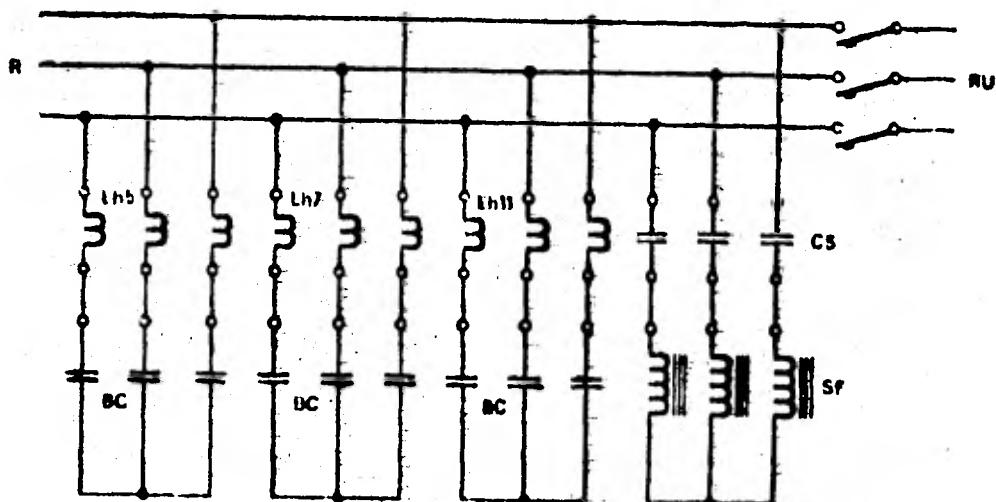


FIGURA 1.- Diagrama de un reactor tipo compensador estático, saturado.

BC = Banco de Capacitores.

CS = Capacitores Serie.

Lh5, Lh7, Lh11, = Reactores en Núcleo de Aire sintonizados.

R = Sistema de Suministro de Potencia.

RU = Sistema de Utilización (carga).

Sf = Reactor con Núcleo de Hierro

de estos grupos deben estructurar una potencia reactiva total igual a aquella que se requiere para compensar.

Un reactor trifásico que, a una tensión determinada de la potencia que suministra el sistema (la tensión que se desea para estabilizar), tiene una densidad de flujo de 20.5 Kg.; en otras palabras, está completamente saturado.

Bancos de tres capacitores conectados en serie respectivamente con las tres fases del reactor trifásico.

4.1.2 Consideraciones teóricas.

Si a las terminales de un reactor trifásico se aplica una tensión senoidal cuyo valor de r.m.s., de la corriente de línea resultante se mide, los resultados de las mediciones pueden estar representados por una curva de la forma mostrada en la fig. 2, en la cual los valores de la tensión han sido marcados como ordenadas, las corrientes se muestran como abscisas.

La porción OA (lado inclinado) de esta curva corresponde a tensiones que no saturan al fierro. En el punto A, la saturación empieza a aparecer. En el punto B, el fierro está completamente saturado (la densidad de flujo de 20.5 Kg) y la densidad de flujo además no puede incrementarse. Si los devanados transportan mayor tensión a través de sus terminales, esto es a causa del incremento en los ampere-vueltas que actúan como si la bobina fuera de núcleo de aire.

Es obvio que las corrientes no mayores serán senoidales debido a la histéresis en la región OA de la curva y de la saturación en la porción siguiente. Las corrientes pueden ser tomadas como las sumas de corrientes senoidales de diferentes frecuencias (componentes fundamentales y armónicas). Como una simplificación, nosotros despreciamos las componentes armónicas de estas corrientes, considerándolas como puramente senoidales. Por lo tanto, se puede ver que cuando estas corrientes fluyen a través de los capacitores (los cuales están en serie con los devanados del reactor)-

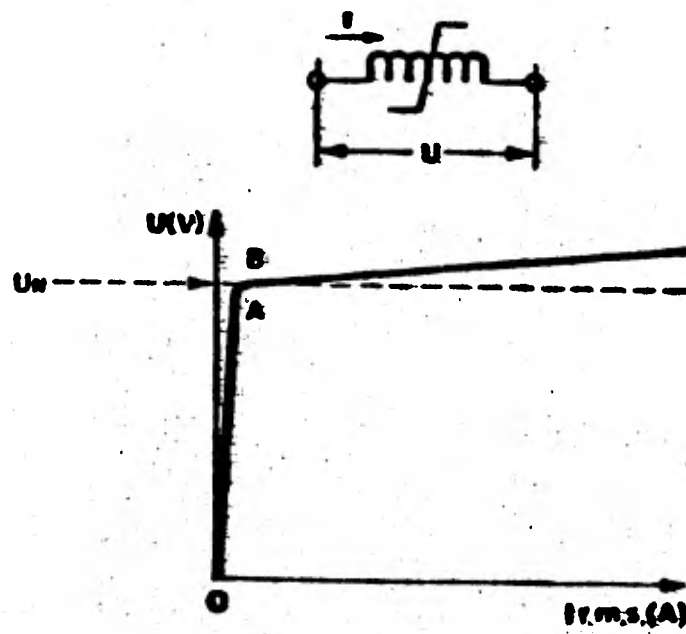


FIGURA 2.- La característica de un Reactor con Núcleo de Hierro es: $U = f(I_{r.m.s.})$.

ellos desarrollan a través de los capacitores, tensiones - que están en fase de oposición con las tensiones que las - mismas corrientes desarrollan a través de las fases corres- pondientes del reactor. Si bajo estas condiciones, los ca- pacitores de una capacitancia conveniente, (ofrece, a una- frecuencia suministrada, el mismo valor absoluto de impe- dancia como el devanado de una fase del reactor con un - - núcleo de aire), fueron usados, sería posible obtener una- combinación que se comportara como una impedancia cero en- la ausencia de un núcleo de hierro.

Una combinación tal tendría una característica voltaje-con- tra-corriente como se muestra en la fig. 3, comportándose- semejante a un corto circuito (la impedancia se reduce a - la resistencia óhmica de los devanados), para este rango - de tensión en exceso de esta definición de una densidad de flujo de saturación (20.5 KG) en el hierro. Aunque las co- rrientes no son senoidales, si la capacitancia de los capa- citores en serie se hace un valor conveniente, es posible- obtener una característica que en la práctica es muy simi- lar a aquella que está en la fig. 3, para la combinación - de "Reactor-Capacitores en serie".

Ahora consideramos un capacitor designado en esta forma co- nectado a través de una potencia que suministra el sistema con la reactancia que no puede ser omitida (ejemplo: Una- reactancia del 10% con respecto a la potencia estimada a - la salida del compensador); en la práctica, éste sería el - caso si la instalación estuviera abastecida por un trans- formador de la misma potencia indicada que el compensador- y ofreciendo una reactancia de ese orden. La presencia de este compensador indica que la instalación incluye disposi- tivos representando una carga inductiva variable, capaz de alcanzar un valor por lo menos igual a la potencia nominal de salida del compensador (fig. 4). El lado derecho de la figura 5 muestra la característica para la combinación - - reactor-capacitores serie, el lado izquierdo muestra el - voltaje, y corriente característicos del juego de bancos -

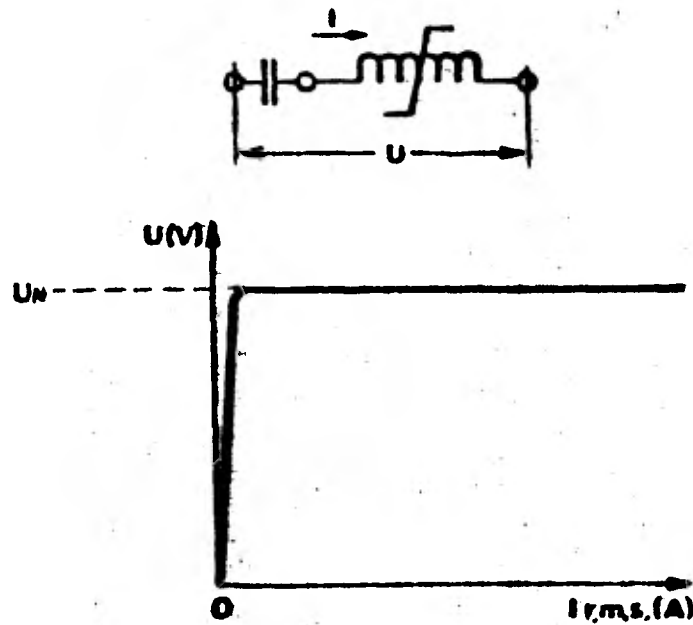


FIGURA 3.- La característica de un Reactor con Reactancia Residual compensada por Capacitores en serie, es:
 $U = f(I_{rms})$.

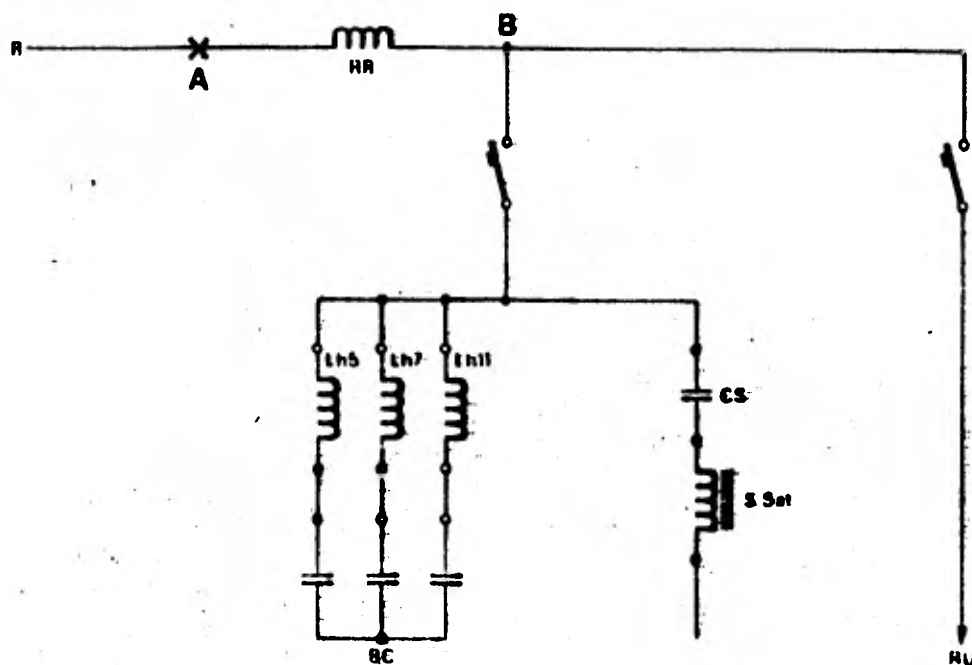


FIGURA 4.- Diagrama unifilar de la instalación de un reactor saturado, tipo compensador estático.

BC = Banco de Capacitores.

CS = Capacitores en Serie.

Lh5, Lh7, Lh11 = Reactores con núcleo de aire sintonizados para la 5a., 7a., y 11a. armónicas.

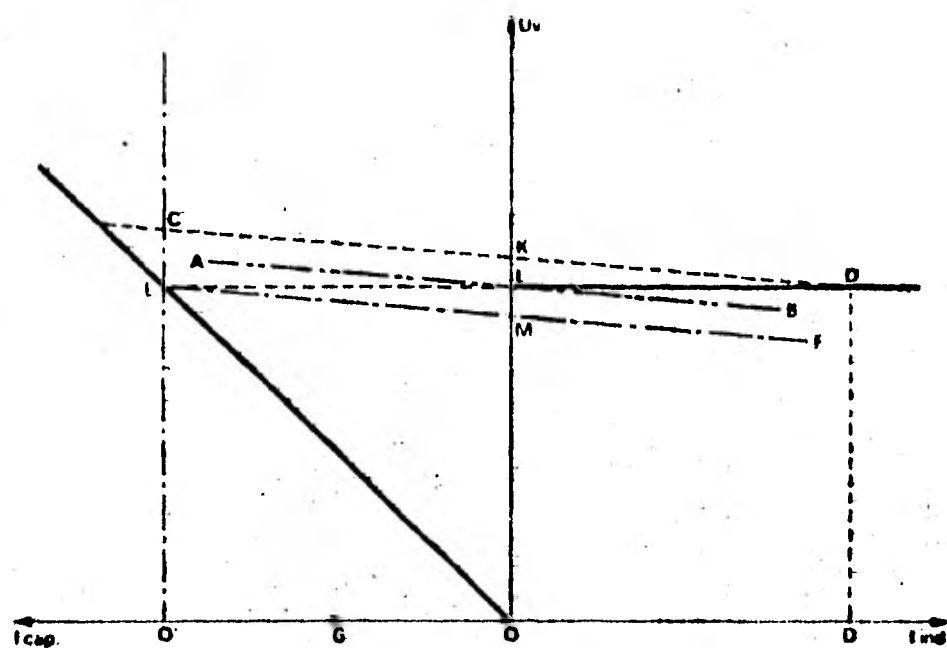


FIGURA 5.- Diagrama de operación de un reactor saturado tipo compensador estático.

U_v = Línea de Tensión
 I_{cap} = Corriente Reactiva Capacitiva.
 I_{ind} = Corriente Reactiva Inductiva.

de capacitores en derivación con sus grupos de reactores - sintonizados en serie para la frecuencia del sistema de potencia. En la sección derecha ha sido considerado que las corrientes de magnetización bajo saturación fueron despreciables; por lo tanto la característica de la parte inclinada coincide con el eje vertical.

Por lo tanto, a la derecha se trazarán las corrientes inductivas absorbidas en el sistema (tomadas como positivas) y a la izquierda las corrientes capacitivas absorbidas en el sistema (tomadas como negativas).

La cota OL, nos da el valor nominal del voltaje, que es requerido para mantener las líneas terminales. Entonces por hipótesis, la línea ofrece una reactancia que determina una caída de voltaje del 10% para una corriente inductiva del valor de la potencia nominal, esta característica de la tensión de corriente inductiva es una línea inclinada como AB, cortando los ejes OU en el punto L, lo cual nos da subida de tensión de la reactancia de línea; ésta corresponde a la corriente cero suministrada por el sistema de potencia y por lo tanto a la caída de voltaje cero. Si la subida de tensión tuvo el valor de la sección OK, la tensión a través del circuito de carga contra la corriente reactiva suministrada por el sistema de potencia, característica que sería dada por la línea CD, paralela a AB. Esto estaría representado por la línea EF, si el aumento de tensión tuvo el valor correspondiente a OM.

Se considera que la subida de tensión se encuentra entre OM y OK, y que el circuito de carga no demanda ninguna corriente (el caso en que el compensador solo es conectado al sistema de suministro de potencia).

Entonces el reactor puede absorber cualquier corriente en la tensión terminal de OL y prácticamente no consume corriente cuando las caídas de voltaje son menores de este valor, se puede ver que la magnitud de la corriente suministrada por el sistema de potencia al compensador está da

da por la abscisa del punto de intersección de la característica del sistema con la línea horizontal que atraviese el punto L; el voltaje a través del compensador, entonces tendrá siempre un valor dado por OL.

Consecuentemente, si la subida de voltaje está dada por OK, la magnitud de la corriente suministrada por el sistema de potencia estará dada por OD', siendo esta una corriente inductiva. Ahora, debido al voltaje OL, el banco de capacitores toma una corriente OO'. De aquí sigue que la corriente del reactor está dada por O'D'. Si el voltaje aumentado regresa al valor de potencia nominal OL, L es el punto de intersección de la característica del sistema suministrado, con la del reactor. La corriente suministrada por el sistema de potencia cero y el banco de capacitores, aún toma una corriente dada por OO', así que el reactor toma una corriente dada por O'O, la suma de estas dos corrientes es cero (excepto para la pequeña corriente de interfase, que está determinada por las cargas).

Si la tensión aumentada toma el valor OM, la intersección es en E. La corriente del sistema de suministro de potencia, de magnitud OO', es capacitiva, y el reactor prácticamente no toma corriente (entonces la corriente de magnetización es despreciable).

Para ilustrar el efecto de una carga inductiva determinada por el sistema de utilización, nos permite asumir como ejemplo, que la tensión del sistema (aumentado) es el valor de la potencia nominal (OL) y que el valor de la corriente inductiva requerida por la carga, corresponde como quien dice a O'G. Si el sistema ha suministrado toda o parte de esta corriente, la tensión disminuida (de la reactancia del sistema) caería abajo del valor OL y la corriente (inductiva) tomada por el reactor caería inmediatamente del valor O'O a cero.

Se puede ver que el reactor "dejará" parte de O'G al consumidor de corriente y "conserva" una corriente dada por GO.

La suma de estas dos corrientes inductivas, $O'D$, contrabalañeará a la corriente $O'D$ tomada por el banco de capacitores y el sistema de potencia tendrá aún que suministrar solamente la pequeña corriente en fase correspondiente a las pérdidas en los diferentes dispositivos de carga.

Si la "subida" de voltaje fué OK (y no OL), cuando el sistema de utilización demandara una corriente $O'G$, la corriente en el reactor cambiaría del valor $O'D$ a GD , con el sistema de potencia continuando el suministro de una corriente inductiva OD .

Si la tensión del sistema de potencia fué OM, entonces el reactor toma solamente corriente de magnetización, la corriente inductiva demandada por el sistema de utilización pudo no ser largamente estabilizada al gasto de la corriente del reactor. El sistema de potencia tendría que proveerla y la tensión terminal de este sistema, caería. Se puede ver entonces que la estabilización de la tensión puede estar asegurada, para cualquier valor de corriente inductiva demandada (desde cero hasta el valor nominal), solamente para sistemas de potencia con voltajes no menores de OL. En otras palabras, si es cuestión de asegurar la estabilidad de la tensión para cualquier valor de corriente inductiva demandada por el sistema de utilización, debe estar estabilizada en el valor más bajo, que la tensión del sistema es probable que tome.

Además se puede ver que si se desea establecer un acertado valor en el factor de potencia por ejemplo, el incremento de tensión debe ser todas las veces igual al valor nominal (OL) y esto es posible solamente si un transformador con un cambiador de toma en carga está disponible. Además esto es esencial para evitar excesivas y prolongadas sobrecargas del reactor lo cual puede ocurrir si el valor del incremento excede al valor nominal, especialmente cuando son demandadas pequeñas cargas inductivas por el sistema de utilización.

4.2 Transductor tipo compensador estático de 16 MVAR para una siderúrgica.

Se ilustrarán las capacidades de un transductor tipo compensador estático (el primer tipo) para el ejemplo de una unidad de 16KVAR construída para un complejo siderúrgico.

Este equipo, terminado en el principio de 1971, fué completamente probado antes de ser puesto en operación. Se grabaron un gran número de oscilogramas que muestran cómo se comportó; el más notable de ellos ha sido reproducido en este trabajo.

4.2.1 Datos generales de instalación.

La siderúrgica mencionada comprende esencialmente:

Un tren laminador reversible de cuatro alturas.

Un laminador de paso.

Una cortadora en frío.

Un limpiador de metales.

La potencia fué suministrada de las líneas eléctricas de alta tensión, vía dos transformadores de 31.5 MVA, de relación de transformación 110/6.3 KV.

El transductor tipo compensador estático está conectado directamente a las barras colectoras de 6.3 KV, en la subestación principal. Está valorada para compensar un máximo de 16 MVAR, esta potencia reactiva siendo necesaria y suficiente para mantener el factor de potencia a 0.85 o más bajo en las más desfavorables condiciones de operación.

4.2.2 Compensador estático de 16 MVAR.

El compensador estático para esta instalación comprende esencialmente (fig. 6):

Tres bancos de capacitores trifásicos, tasados respectivamente a 12.6 y 3.6 MVAR a un voltaje nominal de 7100 V.

Tres juegos de tres reactores monofásicos conectados en serie con las tres fases de cada uno de los bancos.

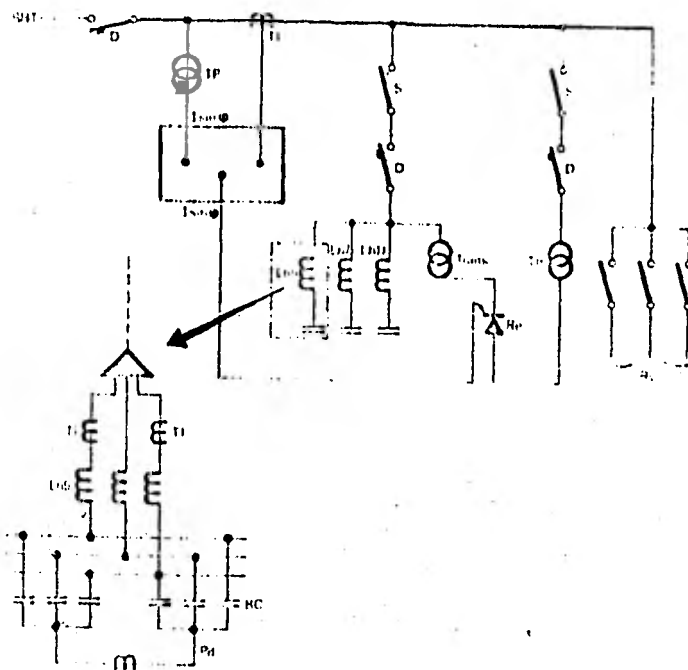


FIGURA 6.- Diagrama funcional unifilar de un Transductor tipo - compensador Estático.

BC = Bancos de Capacitores.

D = Interruptor de Circuito.

Lh5, Lh7, Lh11 = Reactores con Núcleo de Aire sintonizados para la 5a, 7a., y 11a. armónicas.

I sen φ = Regulador de I sen φ

Pd = Protección Desbalanceada.

R = Rectificadores.

RU = Sistema de Utilización (carga)

R.A.T. = Sistema de Potencia de Alta Tensión.

S = Interruptores Aisladores.

TR = Transformador Rectificador.

Tf = Transformador de corriente.

Trans. = Transductor.

TP = Transformador Principal.

Cada una de las fases superiores está conectada al sistema de suministro de potencia vía un reactor. Estos reactores y los capacitores en los bancos correspondientes están - - arreglados para formar circuitos resonantes, para 250 Hz - (quinta armónica), 350 Hz (séptima armónica) y 550 Hz (undécima armónica) respectivamente.

La autoinductancia de las bobinas conectadas en serie con las fases del banco de 12 MVAR es $537 \mu\text{H}$ (resonancia a - 250 Hz) y la de las bobinas conectadas en el circuito del banco de 6 MVAR es $548 \mu\text{H}$ (resonancia a 350 Hz). Finalmente, el banco de 3.6 MVAR está conectado al sistema de - de potencia vía bobinas de las cuales la autoinductancia es $370 \mu\text{H}$, para formar un circuito resonante a 550 Hz.

Un transductor, el cual es un reactor con un núcleo de hierro que puede ser saturado por una corriente directa traída de la corriente de control. La corriente reactiva tomada por este dispositivo cuando se conecta al suministro de 6.3 KV, es proporcional a la corriente de control. Esta - puede alcanzar un valor correspondiente a 16 MVAR y así - cancelar el efecto de los bancos de capacitores.

Un rectificador el cual suministra el devanado de corriente directa del transductor y provee la corriente de control. Esta unidad alimentada del suministro trifásico de 380 V y 50 Hz, provee un voltaje de salida de corriente directa el cual puede ser variado desde cero hasta 510 V y - puede ser suministrada una corriente desde cero hasta - - 275 A. Para traer el transductor a su completa capacidad inductiva de 16 MVAR, es necesario pasar una corriente de 250 A a través del circuito de control, y para alcanzar este valor es suficiente aplicar un voltaje de 100 V, bajo - condiciones de estado estable. La tensión máxima de 510 V es usada bajo condiciones transitorias a una velocidad superior a la establecida de la corriente de estado estable y reduce a una fracción de segundo el tiempo necesario para corregir el factor de potencia cuando hay cambio repen-

tino en la demanda de energía reactiva.

Un regulador electrónico del factor de potencia o más exactamente, regulador de energía reactiva. Esta unidad es alimentada con una señal de "corriente del sistema de potencia" y una señal de "tensión del sistema de potencia". Las dos señales se combinan para proveer una señal de "potencia reactiva".

Tan larga como esta señal se representa, la corriente con un retraso de fase en la tensión o remanente a cero; la unidad actual sobre el tiristor del sistema de control, para reducir la tensión en corriente directa del rectificador antes mencionado, a un mínimo.

Tan pronto como un componente capacitivo aparece en la corriente del sistema de potencia, el regulador actúa sobre el tiristor del sistema de encendido para establecer la tensión apropiada en corriente directa, y por lo tanto la corriente apropiada, en el circuito de control del transductor para que este tome una corriente inductiva de magnitud tal que cancele la componente capacitiva en la corriente del sistema de potencia.

Esto puede parecer desusual para los bancos de capacitores valorados a 21.6 MVAR, cuando la potencia útil que ellos pueden suministrar al sistema de 6.3 KV, es solamente de 16 MVAR.

Ellos están sobrevalorados porque:

- a). La presencia de reactores de sintonización causa una tensión más alta que la tensión del sistema que aparece a través de los capacitores.
- b). La presencia de componentes armónicas en las corrientes.

4.3 Operación del Compensador.

El transductor tipo compensador estático opera como sigue:
Tan grande como es la energía inductiva absorbida por las-

diversas cargas que no caen abajo de la capacidad útil del juego de bancos de capacitores (16 MVAR), el sistema de potencia tiene que suministrar solamente la parte de esta energía inductiva que excede de 16 MVAR.

Si la energía inductiva demandada se hace menos de 16 MVAR, el transductor interviene para elevar este valor inductivo de 16 MVAR y hace el factor de potencia igual a la unidad.

El valor medio del factor de potencia será entre 0.85 y 1.

Además, entonces los 3 bancos de capacitores están sintonizados respectivamente por los reactores de la 5a, 7a y 11a frecuencias armónicas, las componentes armónicas correspondientes de la corriente son suministradas por los filtros y no por el sistema de suministro de potencia.

4.4 Balance de energía.

Quando el compensador estático está en operación éste absorbe una cierta cantidad de potencia activa la cual es disipada como cargas.

Quando los dispositivos de carga tomados como un entero, son equivalentes a una carga inductiva de 16 MVAR o más, el transductor prácticamente no absorbe corriente.

Los componentes del compensador disipan entonces 80 KW como cargas (40 KW en los capacitores, 40 KW en las bobinas de inductancia y 10 KW en el transductor).

Para cualquier carga reactiva total P_r debida al sistema de utilización el cual es menor que 16 MVAR, las pérdidas W en el compensador estático están dadas por la fórmula:

$$W = 80 + \left(1 - \frac{P_r}{16}\right)^2 \times 85 \text{ KW}$$

Este es un punto interesante ya que un compensador síncrono capaz de suministrar continuamente 16 MVAR, tendría pérdidas de 180 KW aproximadamente cuando esté corriendo sin carga y 350 KW cuando esté a plena carga.

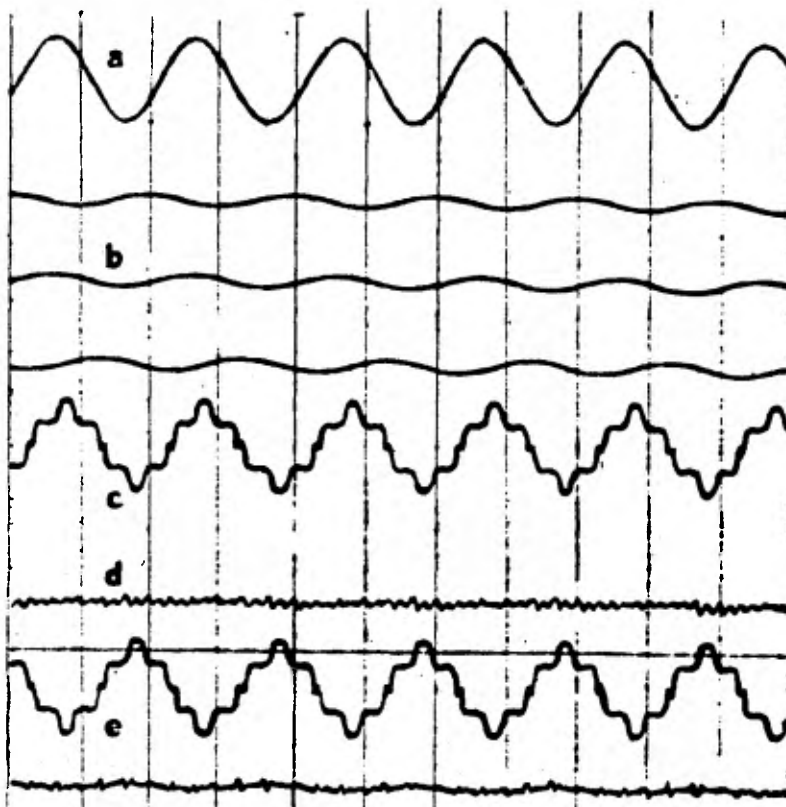


FIGURA 7.- Oscilogramas mostrando, para condiciones de estado estable, variaciones en el suministro de tensión y las corrientes en los diferentes circuitos con el compensador conectado solo.

- a) Suministro de Voltaje.
- b) Corrientes de línea en las fases R.S. y T. representando la suma de las corrientes en el transductor, los reactores filtro y los Bancos de Capacitores.
- c) Corriente en el Transductor.
- d) Corriente en el Devanado de Control.
- e) Corriente en el Grupo de Filtros.

5.- APLICACIONES DEL COMPENSADOR ESTÁTICO A SISTEMAS DE POTENCIA M.T. Y A.T.

Los compensadores de energía reactiva, en particular compensadores estáticos, encuentran su aplicación no solamente en esas industrias que demandan una potencia reactiva variable, sino también en sistemas de distribución de tensión media y al final de una línea larga de alta tensión. En este caso estos también hacen una contribución tendiente a conservar constantemente la tensión independientemente de la carga, y puede ser ventajosamente sustituida por transformadores equipados con cambiadores de conexión en carga. Para no solamente estabilizar estos la tensión, reducen las pérdidas por efecto Joule a través de incremento completo de electricidad generada y el sistema de transmisión.

Localizado al final de una línea larga de alta tensión, el compensador estático generará localmente la energía inductiva requerida durante los períodos de carga pesada; por otro lado proveerá por sí mismo una carga inductiva durante los tiempos de carga de luz y así compensado para el efecto capacitivo de la línea.

Aquí otra vez, las pérdidas de energía debidas a la operación del compensador estático, serán más bajas que las de un compensador síncrono proporcionando el mismo servicio.

6.- RESULTADOS DE PRUEBAS PRACTICADAS A UN TRANSDUCTOR TIPO COMPENSADOR ESTÁTICO.

El compensador estático descrito en los párrafos anteriores fué sometido a pruebas con el fin de verificar la efectividad de los filtros y la velocidad de respuesta en una brusca variación de la energía reactiva consumida.

Los oscilogramas de la fig. 7 muestran las variaciones en el suministro de tensión y las corrientes en los diferentes circuitos, cuando el compensador está conectado solo; la tensión de suministro de los compensadores está mostrada en la parte superior (diferencia entre dos fases): entonces siguen las corrientes en cada línea de suministro; lo siguiente es la gráfica de la corriente en una fase del transductor y entonces la otra es la de la corriente de control. La última curva, en la parte de abajo de la fig.,

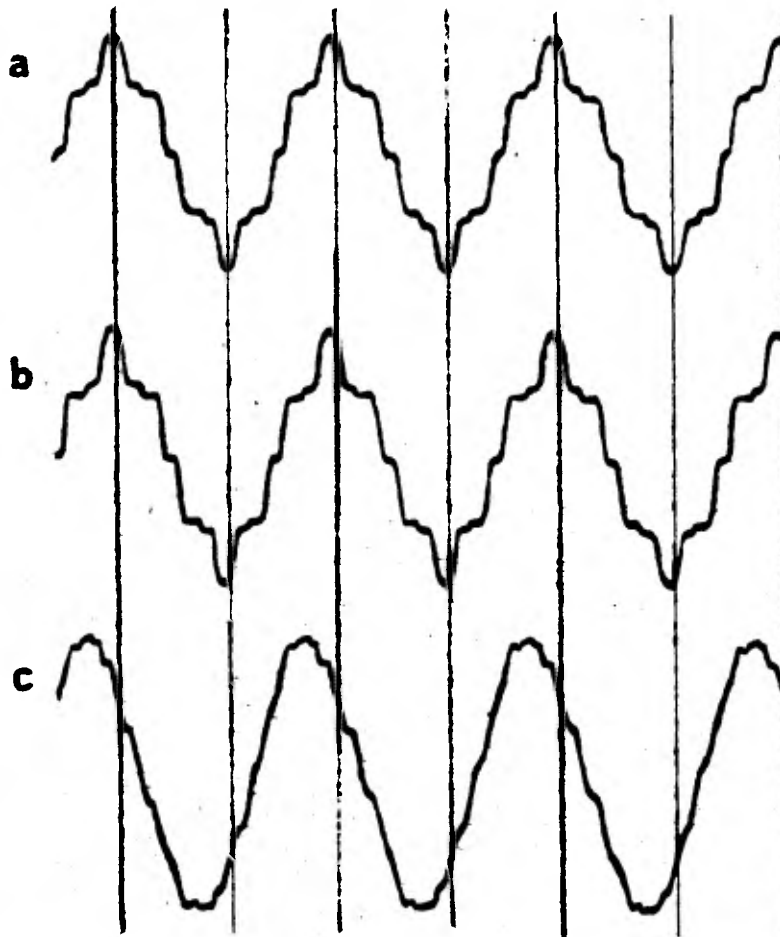


FIGURA 8.- Oscilogramas dando separadamente las corrientes (con pensador conectado solo).

- a) En el Transductor.
- b) En una fase del Grupo de Filtros.
- c) En la línea de suministro de Potencia al Sistema.

da una forma de onda de la corriente en una fase del grupo de - - filtros; se puede ver que ésta es idéntica a la forma de onda de la corriente del transductor. Esto es normal, entonces este juego de filtros suministra las componentes armónicas de la corriente requerida por el transductor. Además, se puede ver que la - - corriente en la línea es solamente de 20 A, a pesar del hecho de que los bancos de capacitores toman 1550 A por fase; esto es por que el regulador electrónico ha permitido que fluya una corriente de control de 275 A, dando así un rango a cada corriente inductiva de 1550 A, en cada fase del devanado de corriente alterna del transductor; esta corriente está virtualmente en oposición de fase con la que viene del banco de capacitores.

La corriente resultante suministrada por la línea de suministro - está en fase con el voltaje y sirve para compensar las pérdidas - de energía en los diferentes elementos componentes.

Los oscilogramas de la fig. 8, muestran una larga escala de la corriente del transductor en una fase, la corriente en una fase del grupo de filtros y la corriente en una de las líneas de suministro del sistema de potencia; si se recuerda que la primera de estas corrientes es 1550 A y la última es solamente 20 A, se puede ver que la línea suministra solamente un minuto, parte de las corrientes armónicas requeridas por el transductor.

Los oscilogramas de la fig. 9, muestran el fenómeno transitorio - que en un momento repentino requiere de 4.5 MVAR inductivos en el "circuito de utilización" y en el tiempo en que tal requerimiento desaparece repentinamente.

Se notará que esta prueba fué sacada para conectar en paralelo - con el compensador estático por cierre de un circuito interruptor, un transformador con secundario en corto circuito, tomando como - resultado 400 A a 6300 V; la corriente en una fase de la "carga inductiva" está dada por la segunda curva de la parte baja de la fig., la última curva representa la corriente de control.

Los puntos cuando esta carga inductiva es conectada en un toma - corriente puede ser claramente vista y es obvio que el regulador-

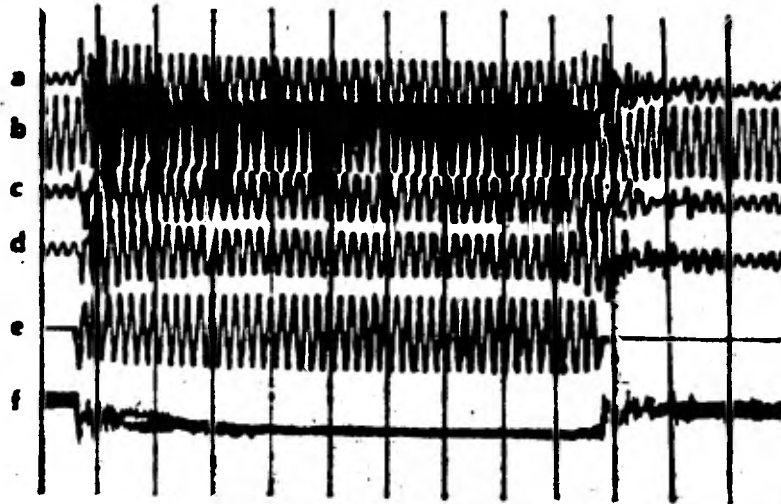


FIGURA 9.- Oscilogramas mostrando el fenómeno transitorio en el tiempo de una conexión repentina, seguida de una des conexión, de una carga de 4.5 MVAR en el circuito de utilización.

- a) Corriente de Línea, en la Fase R.
- b) Tensión de Línea, en la Fase R.
- c) Corriente de Línea, en la Fase S.
- d) Corriente de Línea, en Fase T.
- e) Corriente de Carga Inductiva de 4.5 MVAR.
- f) Corriente de Control del Transuctor.

electrónico reacciona instantáneamente y también reduce la corriente de control tan pronto como lo permite la carga inductiva, o incrementa tan pronto como esta carga desaparece.

La primera, tercera y cuarta, curvas en la parte alta de la fig., son para estas corrientes, en las 3 fases del suministro al circuito comprendiendo la carga inductiva y el compensador.

Antes de que la carga inductiva sea conectada, la corriente en línea es 20A, y puede ser observado que a pesar de la conexión a la carga que toma 400 A, en ningún tiempo esta corriente de línea excede de 100 A, y que esta, baja alrededor de 60 A después de 5 períodos.

El extra de 40 A en la línea corresponde a la energía activa absorbida por el transformador cortocircuitado.

La segunda curva de la parte superior de la fig. 9 muestra el voltaje entre dos fases de suministro y muestra que la caída de tensión es debida a la aparición de la última carga reactiva por solamente 5.6 períodos. En la desaparición repentina de la carga reactiva, las perturbaciones son siempre muy pequeñas y al último por un corto tiempo.

Las pruebas muestran por lo tanto que el compensador estático proporciona el completo servicio esperado de él.

7.- FUNCIONAMIENTO A REGIMEN

7.1 Generalidades

El continuo aumento de las tensiones, de la longitud de las líneas y del número de los conductores por fase, ha agudizado en forma clara la importancia en los sistemas de alta tensión de corriente alterna, de la producción de la potencia reactiva de las líneas, de su control y del control de la tensión.

La tabla 1 da una clara idea de la potencia relativa generada por kilómetro de línea saliendo con la tensión de 420 KV a 1200 KV.

En la red nacional se tienen a la fecha compensadas 5 líneas de transmisión de 400 KV en compensación serie que varía entre 30 y 47.5% de la reactancia inductiva y todas las líneas de transmisión de 400 KV tienen reactores en paralelo que compensan prácticamente el 50%.

En la misma tabla 1 se muestra la potencia natural P_n de las líneas consideradas.

V_N (KV)	No. SUB COND	P (Ω /Km)	X (Ω /Km)	C (NF/Km)	Tc (Ω)	P_N (MVA)	C/KM (MVAR)	t (MS)
420	3	0.0211	0.342	12.90	266	650	0.86	43
525	4	0.0237	0.331	13.34	256	1050	1.38	37
800	4	0.0105	0.319	13.89	247	2600	3.34	80
1000	6	0.0079	0.311	14.40	240	4150	5.40	104
1200	6	0.0051	0.294	16.40	218	6600	8.90	153

TABLA 1.- Parámetros característicos en 60 Hz de líneas de alta tensión.

Es útil recordar que para potencia transmitida (P) inferior a la potencia nominal (P_n), la línea se comporta como un "condensador", para $P = P_n$ la línea no genera ni absorbe potencia reactiva y para $P > P_n$ la línea absorbe reactivo.

Puesto que la potencia transmitida P, sobre todo en largos sistemas que unen centrales hidráulicas con las cargas, está "modulada" en función de la carga requerida, por consecuencia resulta también "modulada" la potencia reactiva requerida en los dos extremos. La figura 10 puede dar una clara idea de la potencia que puede ser transmitida aumentando el nivel de la tensión y considerando líneas no compensadas con un ángulo de transmisión de 25° .

La figura 11 representa la correspondiente potencia reactiva.

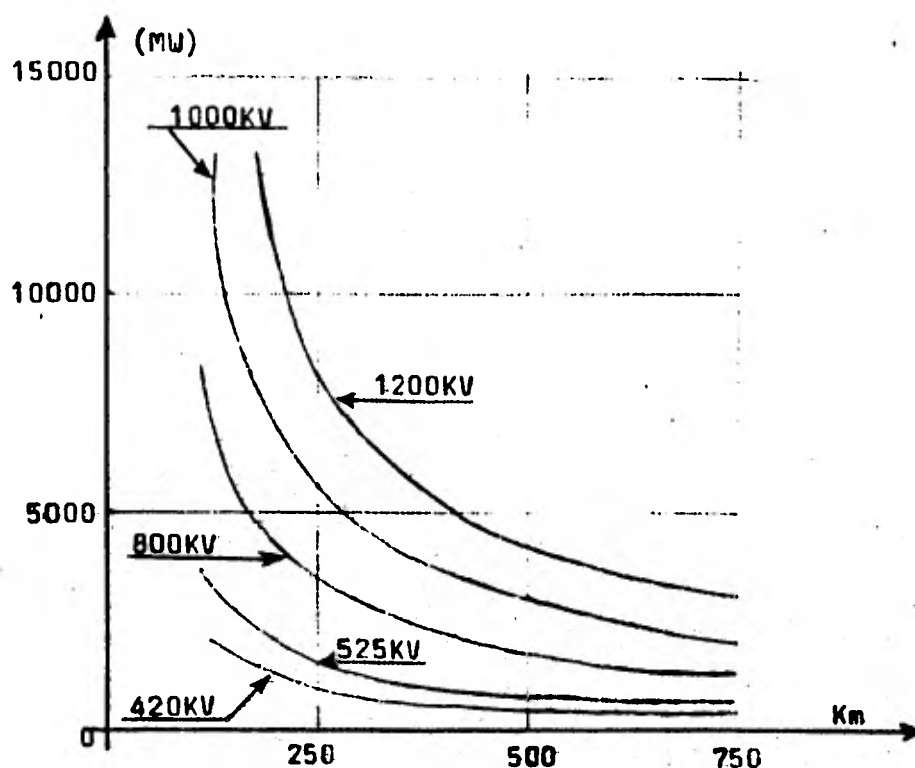


FIGURA 10.- Potencia transmisible en líneas de distinta tensión - sin compensación y con ángulo de transmisión de 25° - Parámetros como los de la tabla 1. Exámen realizado en la hipótesis de tensión principio-fin, transmisión máxima operativa en el sistema.

Para estos sistemas la determinación de escoger la compensación - derivada está determinada por las dos condiciones siguientes:

- 1.- Operación de puesta en tensión y funcionamiento con bajas- de cargas.
- 2.- Limitación de las sobretensiones por pérdida de carga.

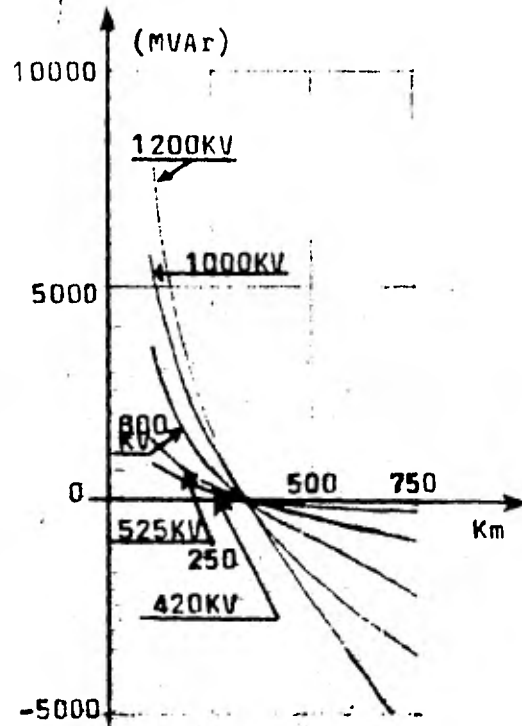


FIGURA 11.- Necesidad de potencia Reactiva requerida por las líneas en correspondencia de las potencias transmissibles mostradas en la fig. 10.

Como se verá más adelante, esta última condición es casi siempre - la más difícil e implica la necesidad de conectar los reactores directamente a las líneas sin poderlos desconectar en las cargas - - máximas. Esta condición puede tener como consecuencia una fuerte - limitación de la potencia activa.

Para no tener que utilizar la multiplicación de los circuitos que funcionan en paralelo, para esta única condición se introduce la - compensación serie que compensa la "modulación" de la potencia - reactiva siendo un parámetro sensible a la corriente.

En algunos sistemas actualmente en estudio, se ensaya la modula- - ción de la potencia reactiva derivada.

Eliminando parte de los reactores en el momento en que las cargas sean más altas siempre y cuando las sobretensiones por pérdida de carga sean de un valor aceptable.

Tomando en cuenta reactores controlados por tiristores o con - - autocontrol.

Tomando en cuenta compensadores de gran potencia.

7.2 Ejemplos de Aplicación

Para una mejor comprensión de la modulación de la potencia reactiva, de las tensiones y de las pérdidas en un determi- - nado sistema cuando varía la carga requerida, se anexan al - algunos resultados de un estudio sobre un sistema de 400 KV, de 600 Km. de longitud, que conecta las grandes centrales - hidráulicas a una red de tensión más baja.

En particular, ha sido objeto de exámen la mejor ubicación de la compensación serie y derivada, tomando en cuenta dos diferentes valores de la compensación serie, correspondien- - tes respectivamente al 30 y 50% y dos diferentes hipótesis de ubicación, es decir:

Compensación concentrada entre las barras de la estación - intermedia.

Compensación en la línea.

Po

po

en

pe

to

En

sa

te

te

ex

la

De

pe

c

c

d

P

d

n

a

r

l

P

m

n

d

t

d

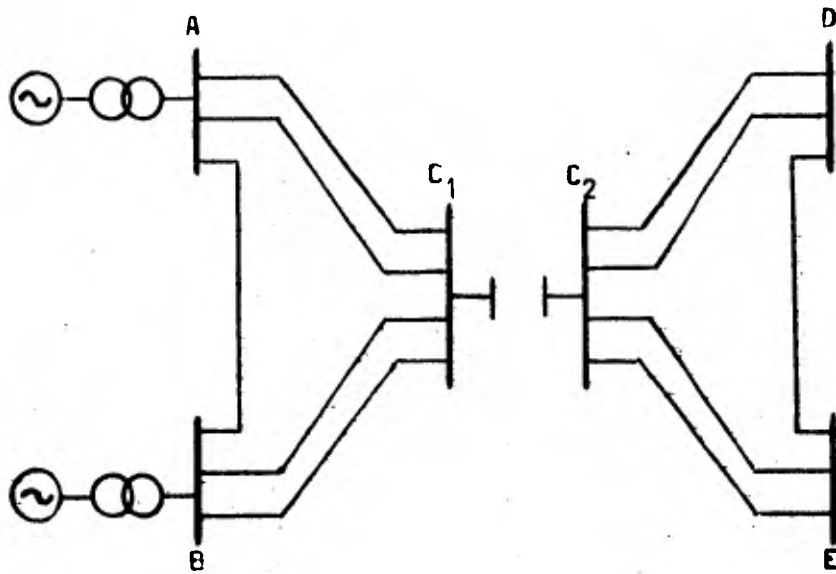


FIGURA 12.- Esquema de extra alta tensión que ha sido tomado en cuenta en el examen de la influencia de la posición de la compensación derivada.

ESQUEMA	POTENCIA REACTORES EN MVA					
	A	B	C ₁	C ₂	D	E
1	180	180	720	-	180	180
2	180	180	360	720	-	-
3	180	180	-	720	180	180
4	180	180	360	360	180	180

TABLA 2.- Alternativas de ubicación de reactores examinados para el funcionamiento a régimen.

ESQUEMA	PERDIDAS ACTIVAS (%)	POTENCIA REACTIVA REQUERIDA POR EL SISTEMA (MVAR)	TENSION AL FINAL DE LA LINEA (P.U.)
1	5.63	625	0.90
2	5.07	355	1.00
3	5.20	425	0.98
4	5.30	465	0.95

TABLA 3.- Resultados obtenidos por las alternativas de la Tabla 2; tratando de alcanzar la máxima tensión operativa sobre el sistema.

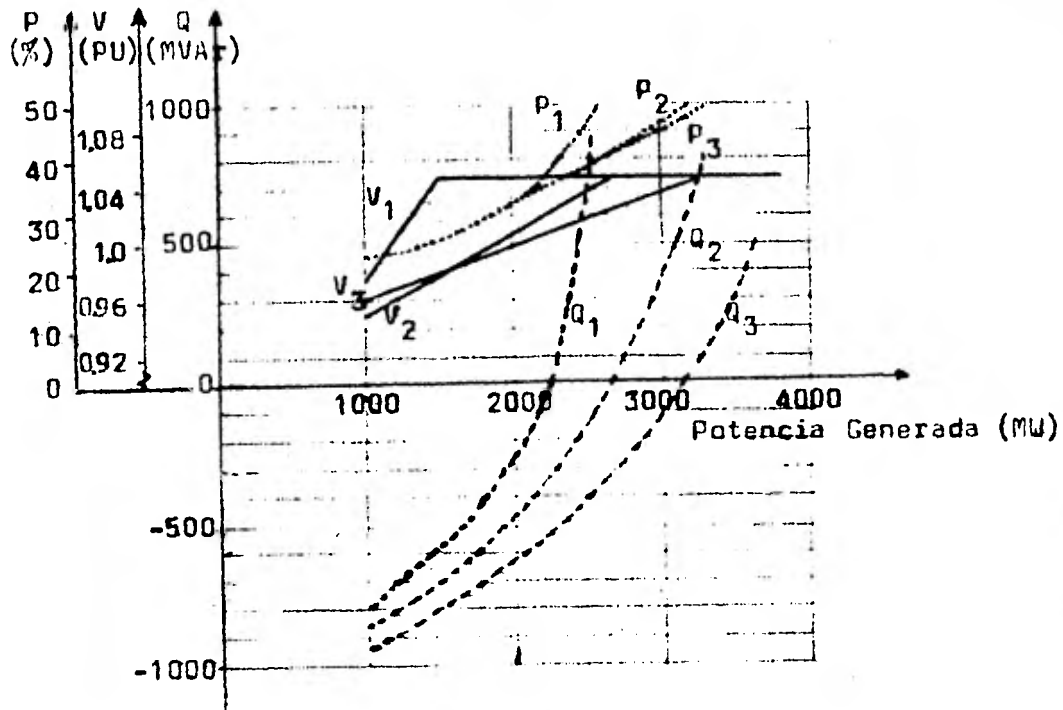


FIGURA 13.- Situación con compensación serie concentrada entre las barras de la estación intermedia.

Curvas representativas de las condiciones de funcionamiento a régimen del sistema cuando varía la potencia generada y el grado de compensación serie.

Q = Requerimiento de potencia reactiva del sistema.

V = Tensión que se requiere al principio de la línea cuando en el sistema se encuentra la máxima tensión operativa.

P = Pérdidas activas en el sistema.

$\left. \begin{matrix} Q_1 \\ V_1 \\ P_1 \end{matrix} \right\}$ Resultados correspondientes al sistema sin compensación serie.

$\left. \begin{matrix} Q_2 \\ V_2 \\ P_2 \end{matrix} \right\}$ Resultados correspondientes al sistema con compensación se-
rie del 30%.

$\left. \begin{matrix} Q_3 \\ V_3 \\ P_3 \end{matrix} \right\}$ Resultados correspondientes al sistema con compensación se-
rie del 50%.

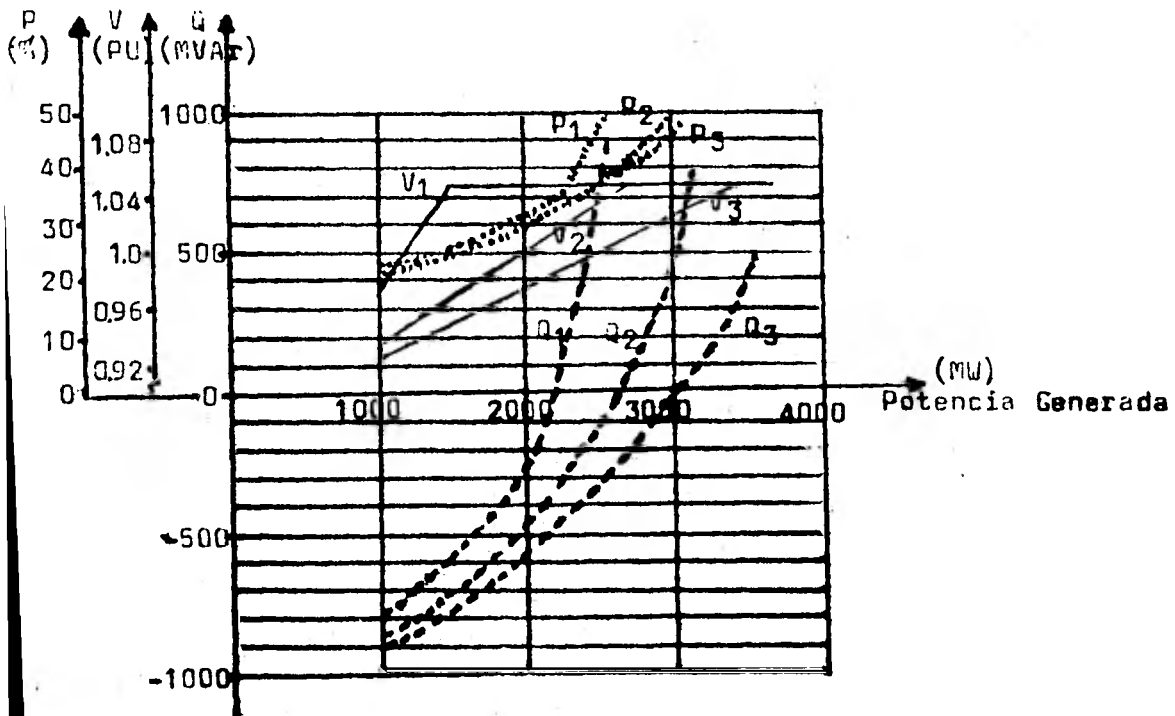


FIGURA 14.- Situación con compensación serie en la línea de --
transmisión.

Por lo que se refiere a las figuras con compensación serie sobre todas las líneas, se ha tratado el problema de la mejor ubicación de los condensadores ya sea a la mitad o al final de la línea. Como resultado de las gráficas de la fig. 15 el mejor control de la tensión al final de la línea y las pérdidas activas menores se han logrado por medio de condensadores ubicados al final de cada tramo de línea. Este resultado se debe a la peculiar posición de la compensación derivada y podría no ser siempre válido.

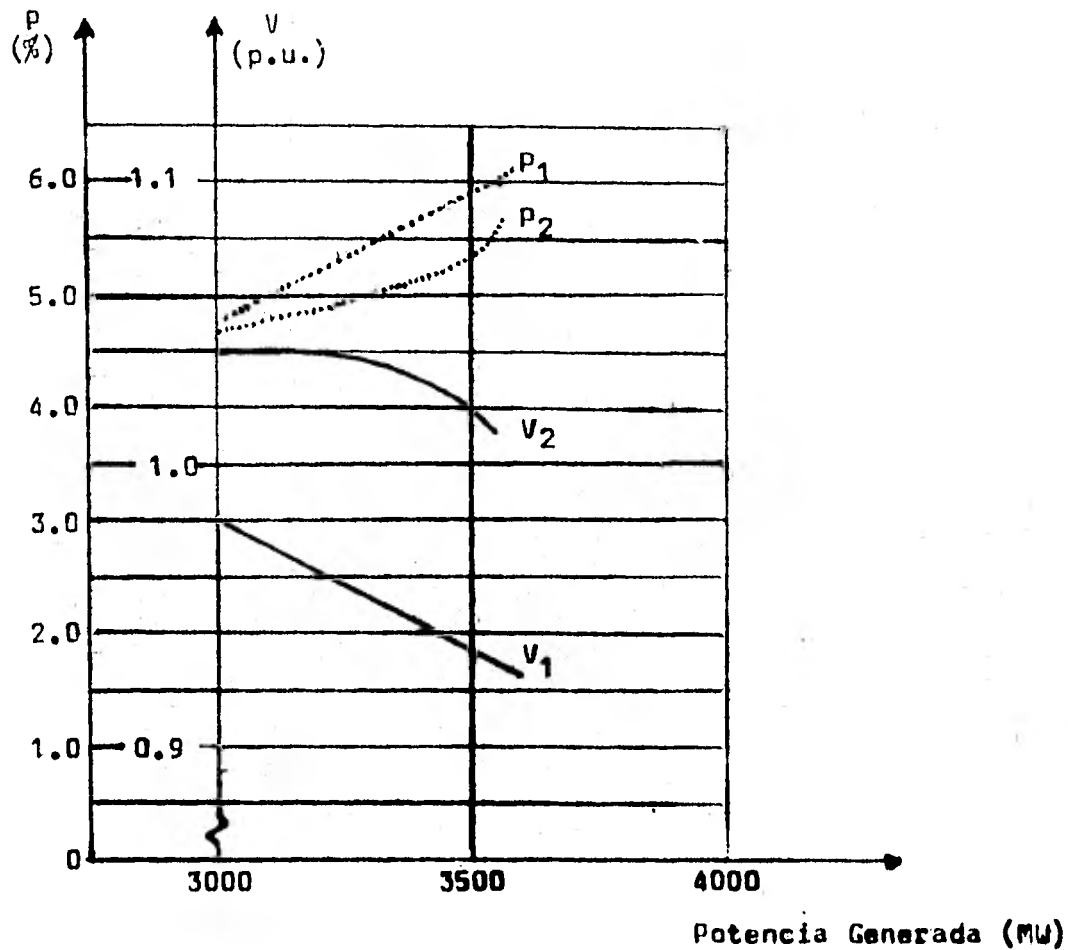


FIGURA 15.- Situación con compensación serie en línea.

Curvas representativas de las condiciones de funcionamiento a régimen del sistema cuando varía la potencia generada y la posición de los condensadores.

V = Tensión al final de la línea obtenida manteniendo en el sistema la máxima tensión operativa.

P = Pérdidas activas en el sistema.

$\left. \begin{matrix} V_1 \\ P_1 \end{matrix} \right\}$ Resultados correspondientes a la ubicación de los condensadores a la mitad de la línea.

$\left. \begin{matrix} V_2 \\ P_2 \end{matrix} \right\}$ Resultados correspondientes a la ubicación de los condensadores al final de la línea.

Para poner más en evidencia la importancia del control de la tensión y de la potencia reactiva, sobre todo en la etapa inicial de funcionamiento de un sistema de extra alta tensión (ver fig. 16), mostramos como ejemplo algunos resultados obtenidos en el curso de un estudio para un sistema a 400 KV. Ha sido verificado que en la fase de funcionamiento inicial, aún disponiendo de una compensación derivada del 65% (1), que permite un nivel de tensión satisfactorio sobre el sistema, los transformadores en los extremos del sistema mismo resultan sobrecargados a causa de la elevada potencia reactiva que en ellos circula. Aún cuando se solucione ese inconveniente, la escasa potencia de corto circuito del sistema de generación ha puesto en evidencia otro problema; la gran cantidad de variaciones de tensión que se pueden dar en correspondencia de maniobras en tramos de la línea. Ha sido constatado que al energizar el circuito del tramo A-B, siempre con compensación derivada del 65% y cuando se encuentra funcionando otra terna en el mismo tramo, provoca en A una sobre elevación de tensión del 30%; de la misma forma la eliminación de una de las dos ternas del dicho tramo origina una baja de tensión en el sistema.

(1) Niveles de compensación superior pueden llevar a problemas de resonancia en condiciones de conductores abiertos o por el acoplamiento entre dos ternas paralelas aún distantes entre sí.

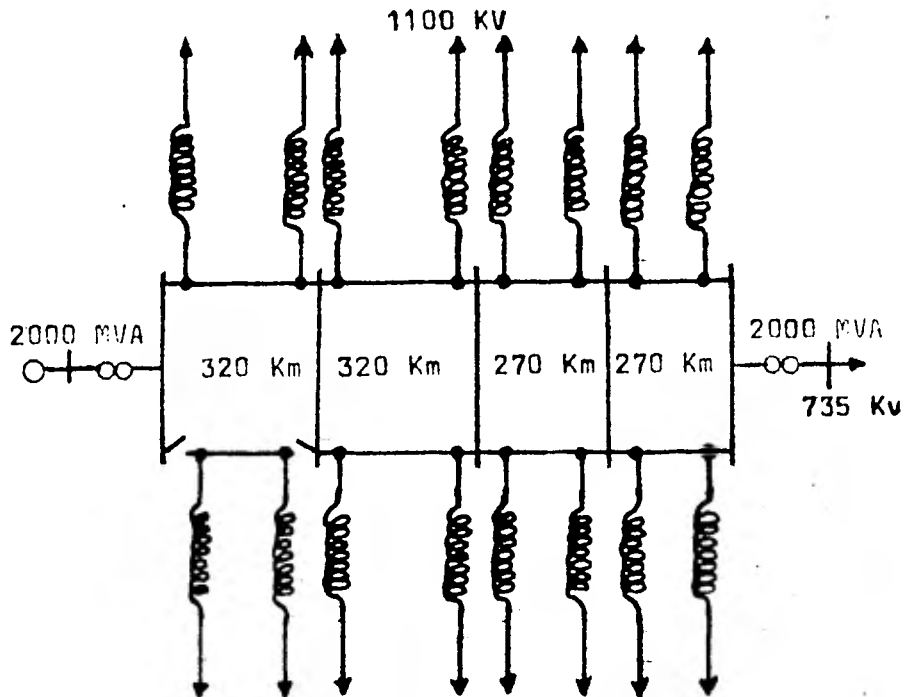


FIGURA 16.- Sistema 1100. KV utilizado para el análisis del funcionamiento a régimen.

Estos resultados indican que en la fase inicial del sistema se necesita por ejemplo:

- a) Subir mucho la compensación derivada con respecto a la que se está considerando con posibilidades de desconectar y conectar los reactores en el caso de eliminación o conexión

de tramos de línea.

- b) Tener que recurrir en la fase inicial a un funcionamiento - con nivel más bajo de tensión.
- c) Tener que funcionar con un solo circuito por cada tramo y - conectar rápidamente en caso de fallas el circuito de reserva.

8.- TRANSITORIOS ELECTROMECHANICOS.

8.1 Generalidades

Todos los transitorios electromecánicos están afectados de manera determinante por los medios utilizados para el control de tensión y de la potencia reactiva. Sobre todo en - los largos sistemas de transmisión de alta tensión.

Como ejemplo nos resulta práctico considerar dos tipos de - transitorios electromecánicos:

- 1.- Transitorios de estabilidad estudiados con el objeto de verificar si por efecto de perturbaciones de la red, la conexión paralelo entre las diferentes máquinas síncronas se pierde en la primera oscilación o en las sucesivas oscilaciones o sea por la progresiva ampliación causada por leves disturbios.

8.2 Transitorios por pérdidas de carga

De los antes citados transitorios se darán algunas caracte- rísticas a continuación, respectivamente para los dos tipos arriba mencionados.

Queremos subrayar que los medios para el control de la ten- sión y de la potencia reactiva tienen influencia, en los - dos transitorios mencionados, no siempre en el mismo senti- do, por lo tanto a veces las soluciones para uno de los dos pueden llevar a empeorar el otro problema. O sea es indis- pensable buscar la mejor solución sin perder de vista los - problemas del funcionamiento a régimen.

Diremos también que por lo general se utilizan los transito

rios electromecánicos cuando de los estudios de régimen -- que ya toman en cuenta varios criterios de las condiciones transitorias, resulta un dimensionamiento previo de la compensación derivada y serie.

8.3 Ejemplos de Transitorios de Estabilidad

En las figuras 17 y 18 han sido representados dos sistemas de transmisión en 400 KV que desde una o más centrales lle van la potencia hacia los centros de utilización.

En el primer sistema las líneas de 400 KV unen la central-A con la estación terminal C a una distancia de 900 Km., - aproximadamente; la potencia activa se pierde sobre todo - en las estaciones B, C y E a través de los transformadores indicados, y en E a través de una interconexión de 400 Kv.

La estación pierde una considerable cantidad de potencia - proveniente de la central y está ubicada aproximadamente a un 60% de todo el trayecto entre A y C. La compensación - serie, puesta en el primer tramo, tiene un valor equivalente al 40% de la reactancia del tramo A-B en el cual está - incluida. Los reactores puestos sobre las líneas que confluyen en el nodo B tienen una potencia de 100 MVAR cada - uno, a tensión nominal.

Para este sistema el problema crítico que se ha enfrentado es el de la estabilidad transitoria o sea la conservación de la conexión paralelo en la primera oscilación por efecto de una perturbación en la línea.

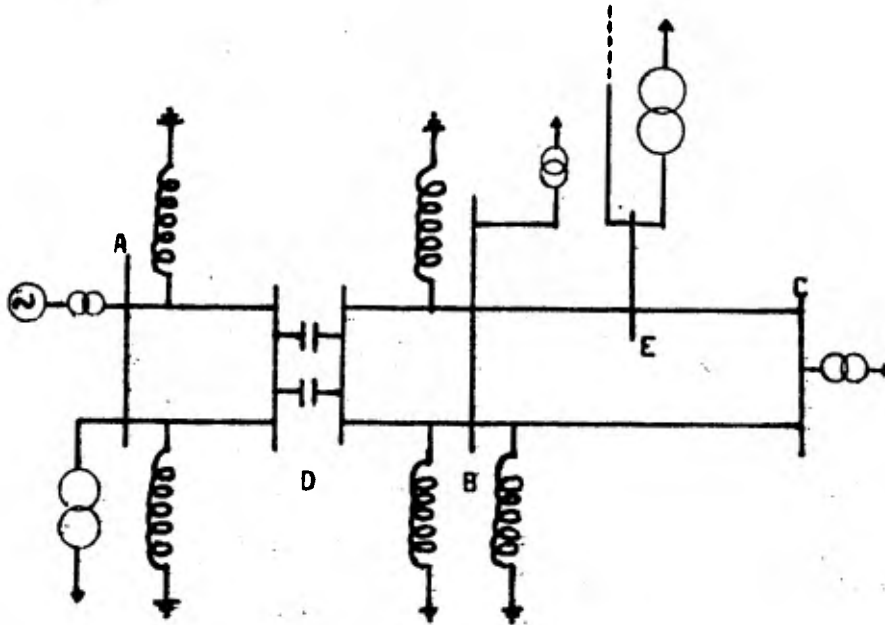


FIGURA 17.- Sistema de transmisión de 400 KV entre la central A-
y los centros de utilización B, C y E (sistema 1).

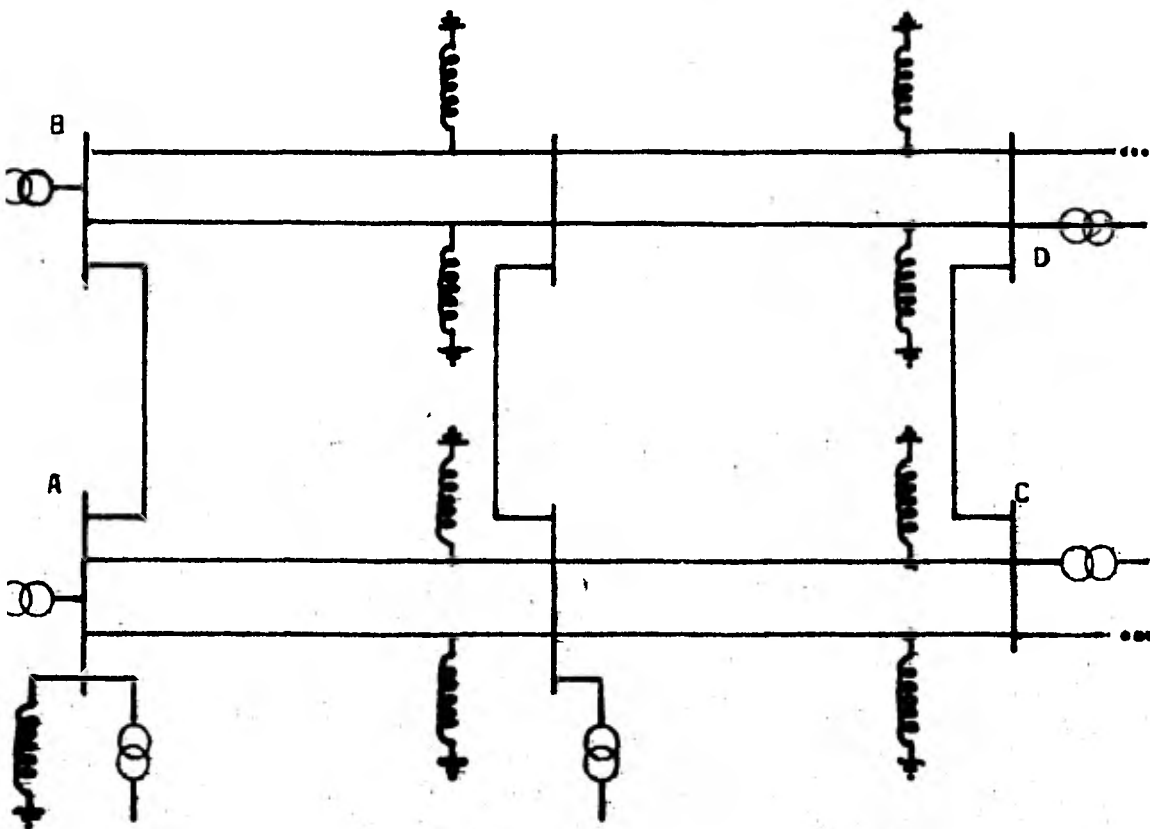


FIGURA 18.- Sistema de transmisión de 400 KV entre las centrales A y B y las estaciones finales C-D (Sistema 2).

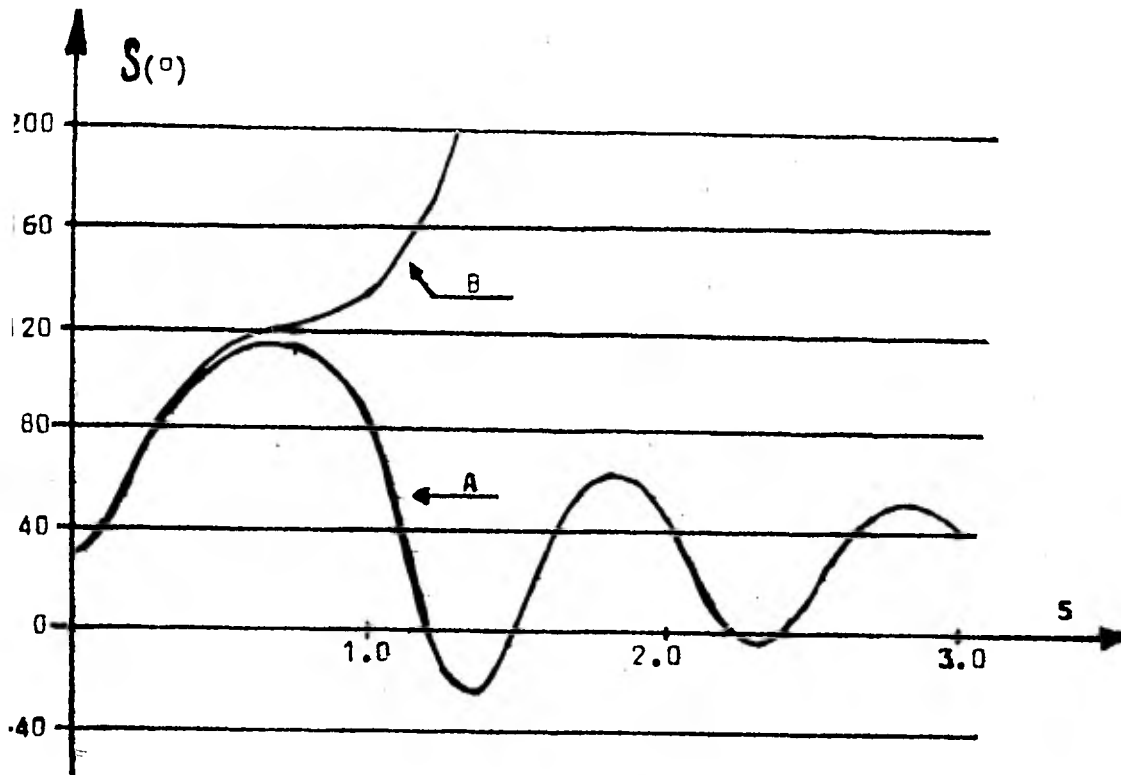


FIGURA 19.- Sistema I. Oscilaciones de los rotores de la central A con respecto al generador por efecto de perturbaciones y de maniobras de apertura-reenergización automática en una de las líneas del tramo A-B.

Curva A: Central de regulación automática de tensión

Curva B: Central con excitación manual.

Se puede ver efectivamente en la fig. 19 que para este sistema no se dan, en la etapa de desarrollo analizada, problemas de extinción dinámica; si en efecto la conexión paralelo entre las máquinas de la central y las del resto de la red se conserva en el curso de la primera oscilación, la extinción que se logra es del todo satisfactoria como se puede deducir de la curva A que, aún deduciendo una condición al límite de estabilidad transitoria de algunas centenas de MW con medios aún excepcionales puede representar una óptima solución como alternativa, la construcción de un -

mayor número de líneas en paralelo. Esto tomando en cuenta que el sistema de 400 KV evoluciona naturalmente en los años hacia un sistema de tecnología más desarrollada y que por lo tanto intrínsecamente resultará ser más estable; se trata entonces de permitir una inversión a futuro.

Es interesante poner en evidencia que de los resultados de la fig. 19, uno supone que la central está funcionando con regulación de tensión automática (curva A) y el otro con la misma central está funcionando con tensión de excitación constante (curva B), se deduce que la ganancia que se puede lograr mediante el uso de sistemas de excitación aún muy forzados no resulta ser interesante con respecto a la estabilidad transitoria. En efecto el comportamiento de la primera oscilación de la curva A pone en evidencia una estabilidad muy crítica también en este caso.

Para el sistema se encontró que la falla sobre una de las líneas que confluyen en el nodo B era altamente crítica. La figura 20 se refiere justamente a una falla sobre una de estas líneas con apertura permanente del mismo tramo y así podemos comentar:

- a) Sea la eliminación de los 300 MVAR nominales de los reactores o bien por la apertura de un banco de condensadores serie en la estación intermedia, vuelven estable una condición crítica.
- b) La comparación entre los dos sistemas de control transitorio de los medios de compensación serie y derivada resulta en este caso, ser favorable a la compensación serie; pero no puede ser generalizado este resultado, considerando que han sido utilizados los elementos disponibles en el sistema sin alguna optimización de los mismos para lograr la estabilidad.
- c) El control a distancia de los condensadores, que aumenta el grado de compensación serie al 80% no presenta inconveniente desde el punto de vista de la realización, aparte la disposición oportuna de la estación intermedia y de un telecontrol. Para la red en estudio se ha tenido en cuenta este telecontrol como retardo de intervención respecto al momento de la-

falla. El tiempo de apertura del Banco de Condensadores serie es de 0.3 segundos y no ha sido optimizado; ha sido verificado que este parámetro no resulta ser crítico con respecto a la estabilidad.

- d) El control local de apertura de los tres reactores es indudablemente más sencillo, no debiendo utilizar el telecontrol, aún cuando sea menos eficaz (2); también para los reactores el tiempo de 0.4 segundos no ha sido optimizado y no resulta crítico como por otro lado no es crítica la potencia de los reactores desconectados como resulta en la curva D.
- e) Un análisis detallado de los transitorios de tensión en el nodo B manifiesta que la inestabilidad transitoria de este sistema, es generada por una caída de tensión al final de la transmisión por lo que resulta evidente la ganancia que se puede lograr por medio del control transitorio de los elementos de compensación.

En el segundo sistema (fig. 18) las líneas de 400 KV (3) unen las dos centrales A y B con una gran red con generación local y en la que confluyen otros sistemas. Para estos sistemas se ha notado un punto crítico en la eliminación de las oscilaciones electromecánicas cuando aumenta la potencia transmitida en las líneas sea por las pequeñas oscilaciones como por aquellas oscilaciones originadas por disturbios en la red. Como por ejemplo en la fig. 21 se ilustra el resultado de un transitorio dinámico en lo que se nota que la eliminación es del todo insuficiente para las centrales A y B, y el disturbio se propaga a toda la red inclusive a otras centrales que funcionan sobre el sistema de recepción.

- (2) Evidentemente los reactores tendrán que ser equipados de interruptores, solución esta que por lo general no se adopta si el reactor resulta a un lado de la línea.
- (3) Queremos recordar que hemos considerado como ejemplo 400 KV el sistema que se utiliza con una tensión máxima de 460 KV.

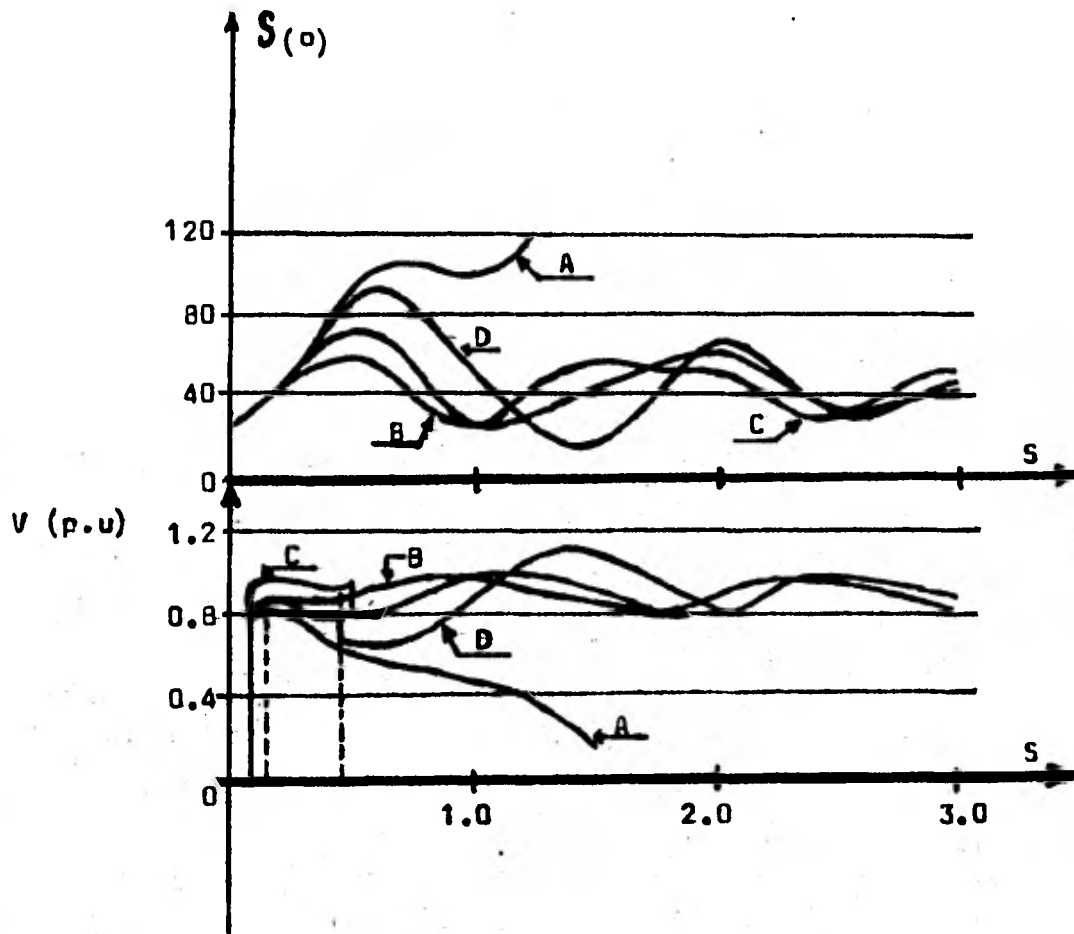


FIGURA 20.- Sistema 1. Oscilaciones de los rotores de la central A con respecto al generador y comportamiento de la tensión sobre el nodo B por efecto de un desperfecto en la línea E-B y en la apertura permanente.

- Curvas A- Sin intervención alguna.
 Curvas B- Apertura de un banco de condensadores por 0.3 seg.
 Curvas C- Apertura de los reactores de las líneas que confluyen en el nodo B por 0.4 seg.
 Curvas D- Apertura de uno solo de los reactores de las líneas que confluyen en el nodo B por 0.4 seg.

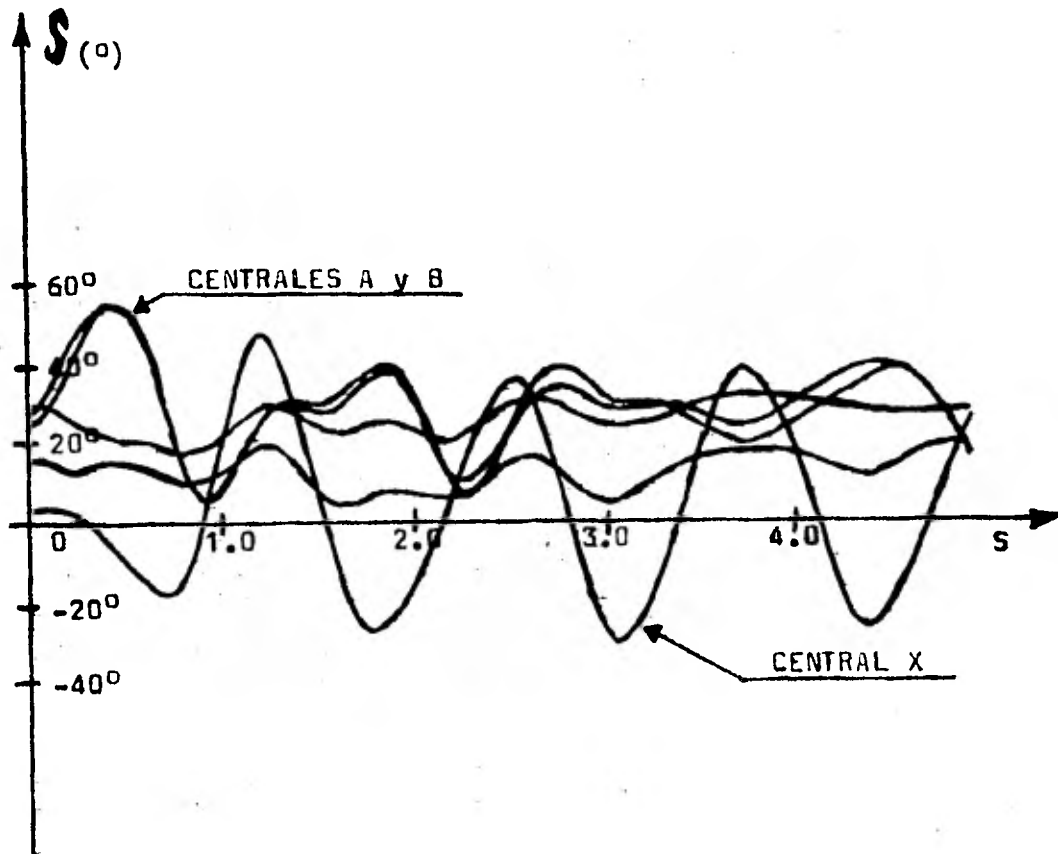


FIGURA 21.- Oscilaciones de los rotores de las centrales A y B, y de otras centrales, con respecto a un generador de la red receptora tomando como referencia, por efecto de una falla monofásica; lograda sobre una línea de 400 KV.

Para este sistema han sido estudiadas todas las maneras posibles de eliminación de las oscilaciones dinámicas; entre ellas nos interesa aquí hablar de las siguientes que se refieren al control de la tensión o de la potencia reactiva.

- a) Utilización de señales estabilizadoras sobre los reguladores de tensión de las centrales A y B.
- b) Posibilidad de desconectar temporalmente los reactores derivados.
- c) Introducción de la compensación serie.

Para las dos primeras, haremos referencia a la fig. 22, que presenta una comparación de las oscilaciones de los rotores de la central B suponiendo no utilizar ningún control especial (curva A), con reguladores de tensión sujetos a las variaciones de potencia eléctrica (curva B) y con el mando discontinuo de la apertura de todos los reactores del sistema (curva C).

De la comparación de la fig. 22 se pueden hacer las siguientes consideraciones:

- a) La eliminación de las oscilaciones que se puede lograr por medio de la utilización de señales sujetas a la variación de potencia, es considerable pero todavía insuficiente.
- b) El control discontinuo de apertura de los reactores lleva a una buena eliminación de las oscilaciones aún cuando no haya sido optimizado; hay que considerar este resultado como un primer intento.

La comparación entre los dos medios de control de la tensión trae consigo esta consideración: que mientras por efecto de la sujeción complementaria en la primera oscilación se consigue un ligero empeoramiento, mediante la acción de los reactores la mejoría es notable también sobre esta primera parte del transitorio, como por otro lado resulta evidente el análisis de cuanto ya hemos dicho para el sistema 1.

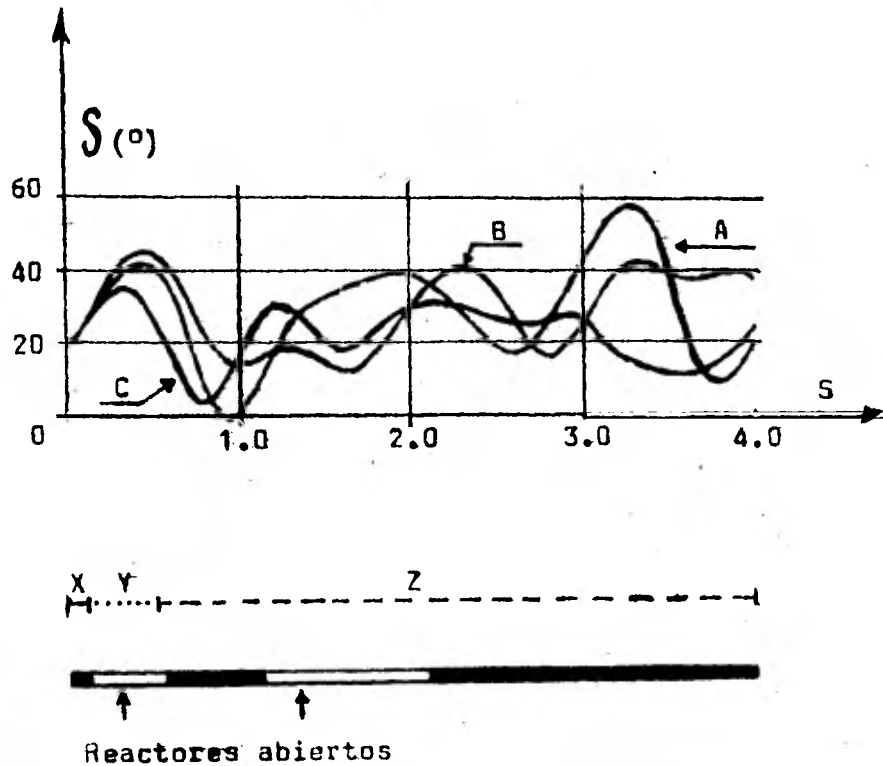


FIGURA 22.- Oscilaciones de los rotores de la central B con respecto a un generador por efecto de falla monofásica sobre una línea (X), apertura trifásica (Y) y reenergización lograda (Z).

Curva A- Ninguna intervención

Curva B- Reguladores de tensión de las centrales A y B con señal proporcional a la variación de potencia.

Curva C- Apertura de todos los reactores del sistema de 400 KV - para los tramos señalados.

Por lo general se puede notar que mientras la utilización de señales de mando lleva a empeorar el transitorio de tensión sobre el sistema, el control de la compensación de la potencia reactiva permite mejorarlo. En fin vale la pena tomar en cuenta que para la señal de mando sería de gran beneficio la adopción de ganancias más elevadas de las que se usan, por lo que respecta a la eliminación de los transitorios electromecánicos, llevaría al peligro de una molesta inestabilidad de tensión.

Se considera importante destacar que la desconexión y reconexión de una enorme potencia reactiva como la que se tomó como hipótesis para el sistema 2, no puede ser tomado como proposición operativa, pero resulta ser, de gran interés la eficiencia que se puede lograr por medio del control de la compensación derivada.

El interés para este estudio es mucho mayor si lo consideramos en la perspectiva de utilización de los medios para la regulación de la potencia reactiva de tipo continuo o discontinuo y sujetos a la tensión. Creemos que estos medios, utilizados hasta ahora para la baja y media tensión, pueden ser utilizados a corto plazo para la alta tensión, también volviendo prácticamente automática la disponibilidad de la potencia reactiva según las necesidades inmediatas del sistema.

Entre los medios para el control de la potencia reactiva no hay que olvidar la eventual utilización de compensadores síncronos, aún de considerable potencia, que tienen la ventaja de ofrecer una regulación continua a régimen, y en transitorio; y que pueden dar resultados de gran interés, además de resultar competi-

tivos en costo con los ya mencionados medios estáticos de compensación.

8.4 Ejemplos de Transitorios por Pérdida de Carga

Siempre con referencia a los grandes sistemas de transmisión un tipo de transitorio electromecánico es aquel que se da por efecto de pérdida de carga activa en el extremo receptor de la transmisión.

Este transitorio necesita siempre de una atención respecto a los generadores de la central, ya que se aceleran y se eleva la tensión generada. La considerable cantidad de reactivo generado por el sistema, el efecto Ferranti en la línea y la posible presencia de elementos saturables representan ulteriores desventajas de estas condiciones; sobre todo los elementos saturables pueden llevar a la formación de ondas muy distorcionadas con máximos de tensión elevados y pueden generar unas condiciones de ferro resonancia.

Es importante resaltar que hay que escoger muy a menudo el nivel de la compensación derivada de un sistema en función del control de las sobretensiones por pérdida de carga.

Considerando que un excesivo dimensionamiento de esta compensación reduce la potencia máxima transmisible sobre el sistema, en igualdad de condiciones, resulta evidente la importancia de un profundo exámen del problema.

Como ejemplo reproducimos en la fig. 23 una comparación entre las áreas de ferro resonancia cuando varía el grado de compensación derivada para el sistema reproducido en la misma figura. En esta figura, en el plano "Fuerza Electromotriz (E'')-Frecuencia", las curvas trazadas separan las áreas de funcionamiento normal de las que la ferro resonancia se manifiesta de manera estable. En las curvas se indica la variación de F.E.M. en función de la frecuencia del generador, por efecto de una pérdida de carga, se pueden determinar las condiciones de régimen que llevan a áreas de

posible ferroresonancia y que deberían por lo tanto ser evitadas (4).

Es interesante observar en dicha figura que con un solo reactor la condición de ferroresonancia se da por valores de frecuencia F.E.M. tales por lo que al desconectarse la carga ésta se presentaría inmediatamente (curva A), mientras con dos reactores (curva B) y con algunas limitaciones a las condiciones de uso sería todavía posible el funcionamiento.

Hay que aclarar que el aumento de la compensación derivada en iguales condiciones de entrega, aumenta la excitación del generador y por lo tanto, mientras se puede reducir el área de ferroresonancia se obtienen valores más altos de

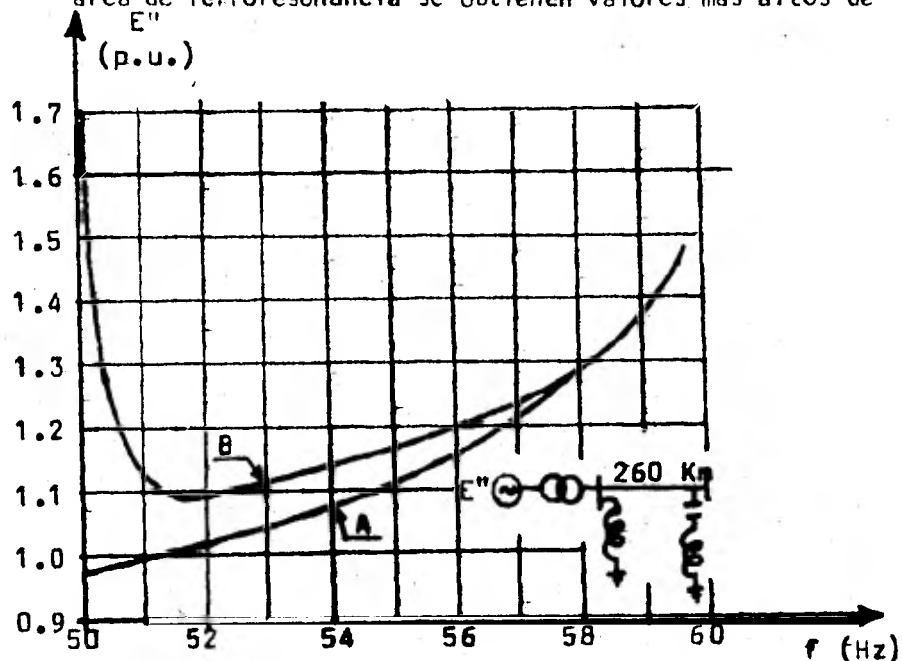


FIGURA 23.- Comparación entre las distintas áreas de ferroresonancia que resultan con 50 MVAR de compensación derivada (curva A) y 100 MVAR (curva B).

(4) No nos detendremos aquí a explicar la metodología usada.

F.E.M. De aquí nace el gran interés para aquellas formas de compensación derivada ya mencionadas, que adoptándose al nivel de tensión pueden no estar presentes a plena carga, pero se conectan con suficiente rapidéz en el caso de una pérdida de carga.

Por último citaremos que para un control eficaz de los transitorios de pérdida de carga hay que realizar un análisis - sobre el sistema de excitación.

Para tal fin representamos en la fig. 24 los transitorios de la F.E.M. en función de la frecuencia de los generadores para el mismo sistema de la fig. 23, en las dos hipótesis - de acción del regulador de tensión y suponiendo eliminar -

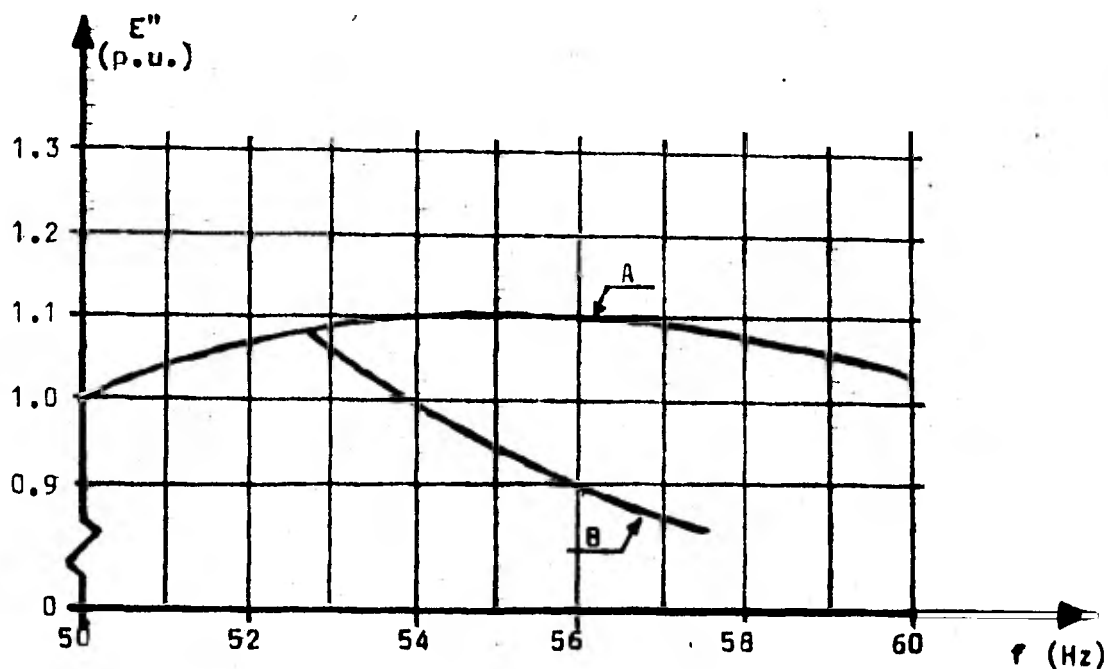


FIGURA 24.- Verificación del efecto derivado de la conexión de un dispositivo de eliminación de la excitación rápida sobre la F.E.M. de una máquina síncrona (curva B) con respecto a la condición original con regulador de tensión conectado (curva A).

rápida^{mente} la excitación sobre la resistencia del campo - del generador.

Podemos observar de esto último que no permite el control - desde el inicio del transitorio, pero puede ser significativo desde un cierto tiempo en adelante. Este hecho resulta- importante si se relaciona con la posibilidad de mover las- áreas de ferresonancia, utilizando reactores fuera de las curvas de F.E.M., frecuencias que interesan de hecho los - primeros instantes del transitorio como resulta del ejemplo de la fig.23.

9.- SOBRETENSIONES DE MANIOBRAS Y PROBLEMAS PARTICULARES.

9.1 Generalidades

Es sabido cómo en los sistemas de extra alta tensión espe-- cialmente sobre largas distancias, el costo de las líneas - tiene una diferencia notable sobre el costo total del sistema de transmisión.

Para estos sistemas, el costo de las distancias de aislamiento se ha determinado por el valor de las sobretensiones de - maniobra, tomando en cuenta que para sobretensiones de maniobra se da una saturación en la retensión de los aislamientos en el aire conforme aumenta la distancia, resulta evidente - como para los sistemas extra alta tensión hasta la variación de algunos porcentajes en las sobretensiones máximas puede - resultar interesante. En las líneas de extra alta tensión - la mayoría de las fallas son de tipo monofásico.

Además los sistemas extra alta tensión resultan ser parti- cularmente sensibles por su longitud y el muy elevado fac- tor de calidad, a las armónicas y a los distintos posibles problemas relacionados con las armónicas mismas.

En particular la presencia, la ubicación y peso de la com- pensación serie y paralelo pueden mejorar o empeorar tales problemas.

El uso de dispositivos especiales actualmente en estudio -

para ser utilizados en sistema extra alta tensión, que controlan el reactivo, tiene que ser por lo tanto examinado seriamente desde el punto de vista de las armónicas iniciales.

9.2 Ejemplos de Aplicación de Sobretensiones de Maniobra

Es sabido que para sistemas dimensionados para sobretensiones de maniobra más o menos de 2 P.U. (5) las sobretensiones de reenergización son aquellas que determinan cómo escoger el aislamiento.

Los reactores derivados, adoptados para la compensación de la potencia reactiva tienen influencia en las sobretensiones si se encuentran permanentemente conectados a la línea de maniobra; una eventual conexión por el lado de la barra de alta tensión o sobre el terciario de los transformadores tiene por lo general un efecto marcado solo en el caso que se realice la energización o la reenergización de las bajas tensiones de líneas, que están conectadas a los transformadores.

Por ejemplo, para una línea de 300 Km. y de 500 KV, la tabla 4 muestra la influencia de las sobretensiones de maniobra, de una compensación derivada del 80%, planteando la hipótesis de interruptores que tengan o no resistencias en el momento de energización.

(5) En lo que sigue, considerando V la máxima tensión eficaz - conectada de funcionamiento del sistema, las sobretensiones serán expresadas en P.U. de $V \sqrt{2} / \sqrt{3}$.

SOBRETENSIONES (p.u.)									
RE AC TO RES	RE SIS TEN CIA (°)	ENERGIZACION				REENERGIZACION			
		(+)	(*)						
		V_{max}	$V_{10\%}$	$V_{20\%}$	$V_{50\%}$	V_{max}	$V_{10\%}$	$V_{20\%}$	$V_{50\%}$
NO	NO	3.1	2.5	2.25	2.0	5.5	4.0	3.5	2.5
SI	NO	2.75	2.25	1.75	1.8	3.8	3.25	2.8	2.4
SI	SI	1.5	1.35	1.3	1.2	2.0	1.5	1.4	1.3
NO	SI	2.2	1.95	1.75	1.5	2.5	2.0	1.8	1.55

TABLA 4.- Influencia sobre las sobretensiones de maniobras de - una compensación derivada del 80%, en ausencia y presencia de interruptores con resistencia en el momento de energizar.

(°) = Resistencia de energización, de 400 Ω conectada por 10 ms.

(+) = V_{max} = Valor máximo teórico de sobretensión.

(*) = $V_{10\%}$ = Valor con probabilidad de ser superado en un 10% de las maniobras.

En la tabla 5, siempre para la misma línea ha sido reportado el valor máximo de sobretensión al final de la línea en energización para diferentes valores de resistencia y con tiempos de conexión de la misma, optimizados.

RESISTENCIA PRE-CONEXION (Ω)	SOBRETENSION MAXIMA (p.u.)	
	SIN REACTORES	CON REACTORES
0	3.2	2.75
100	2.5	2.25
200	2	1.8
300	1.8	1.55
400	1.9	1.4
500	2.1	1.35
600	2.25	1.3
700	2.5	1.35

TABLA 5.- Valor máximo de sobretensión al final de la línea en energización para diferentes valores de resistencia y con tiempos de conexión de la misma, optimizados.

Resulta evidente cómo la introducción de los reactores y una eventual optimización de las resistencias estando conectados los mismos reactores puede permitir fuertes reducciones de las sobretensiones.

Además cabe hacer notar que la compensación derivada en caso que se presente la necesidad de un fuerte control de las sobretensiones de reenergización ofrece un fácil y económico esquema que ya ha sido experimentado sobre un sistema de 765 KV. En la fig. 25, después de la apertura de los interruptores de las líneas A y B se conecta en serie en cada fase de los receptores una oportuna resistencia que "descarga" de la línea en el tiempo muerto y reduce por lo tanto las sobretensiones de reenergización con respecto a las que se dan por simple energización.

La eventual compensación serie presente en la línea, afecta en modo particular dos tipos de sobretensiones de "maniobra" en el caso de fallas ubicadas en lugares tales que no pueden intervenir los entrehierros colocados para la protección de los condensadores.

Las dos sobretensiones más afectadas son:

Las sobretensiones de reenergización.

Las sobretensiones entre dos interruptores una vez eliminada la falla.

Para el sistema de 750 KV representado en la fig. 26 y caracterizado por una compensación serie del 50% y derivada del 62%, la tabla 6 nos muestra las sobretensiones en el extremo abierto de la línea para reenergización trifásica después de una falla monofásica y con resistencias de pre-conexión de 600Ω conectada por 10 ms.

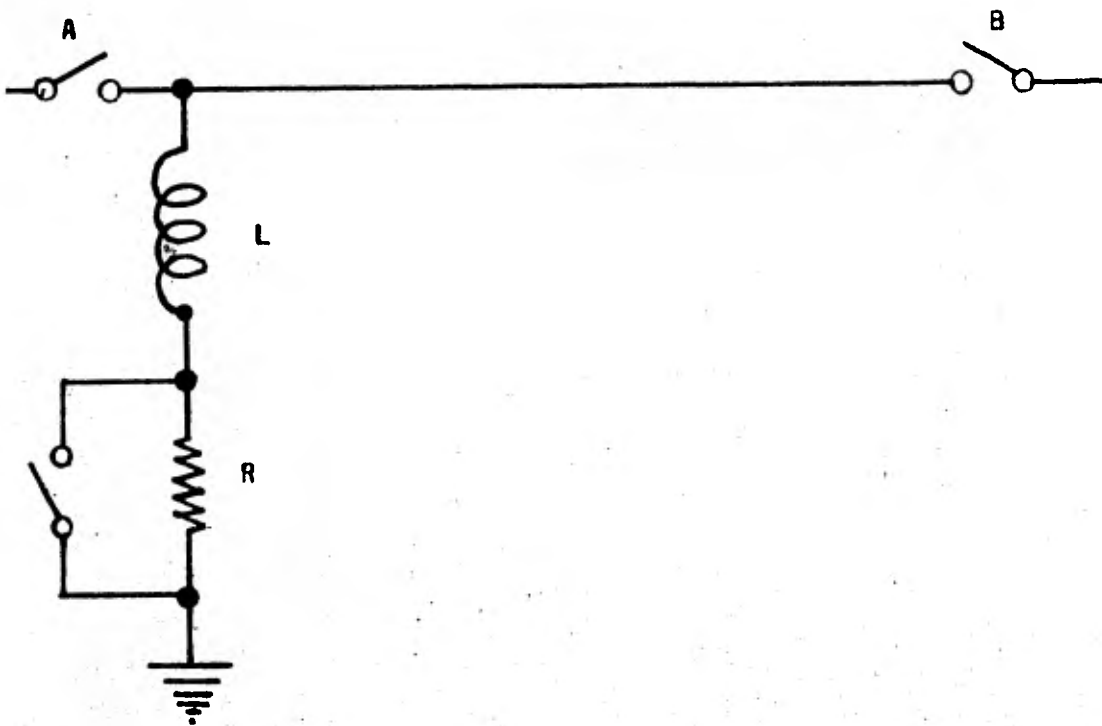


FIGURA 25.- Conexión de una resistencia en serie por cada fase del reactor para "descargar" la línea durante el tiempo muerto.

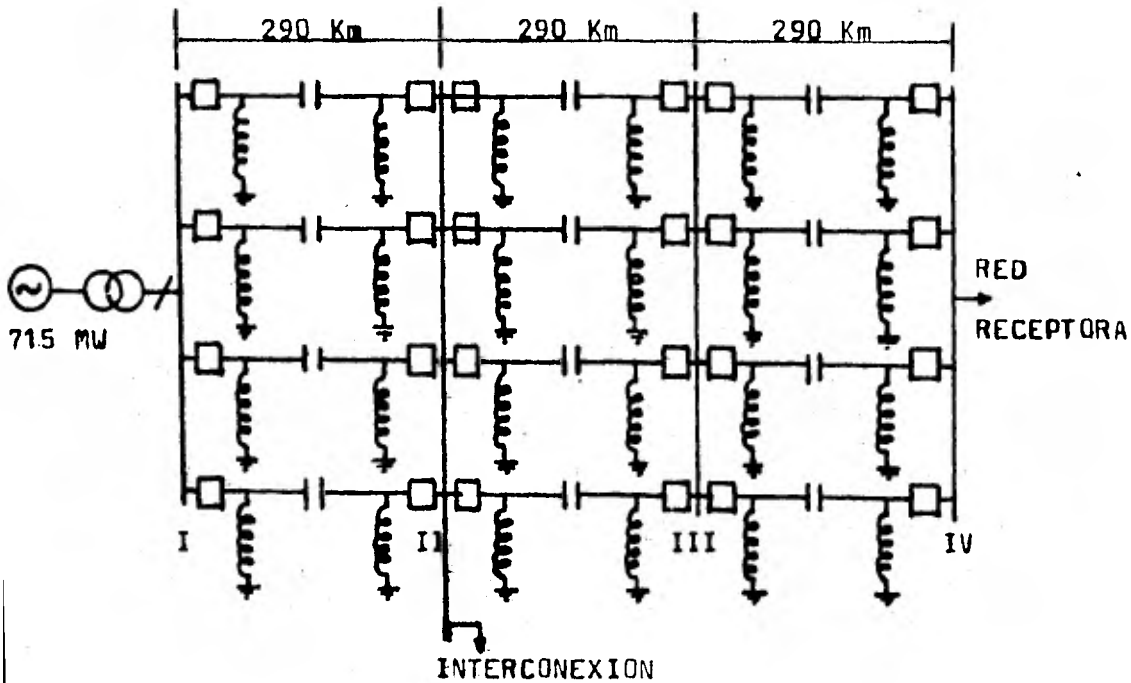


FIGURA 26.- Sistema de 750 KV, previsto para el transporte de 10,000 MW.

Es conveniente saber que el aumento de sobretensión debido a la compensación serie es causada por la carga de los condensadores que queda en ellos por fallas que no han causado la intervención de los entrehierros. El dren de la carga presente en los condensadores serie puede ser realizado:

- 1) Mediante la conexión "artificial" rápida de los entrehierros de protección de los condensadores conectados - sobre la línea de falla.
- 2) Mediante circuitos especiales de descarga permanentemente en paralelo con los condensadores.
- 3) Mediante el método antes citado de conectar una resis-

tencia en el neutro de los reactores durante el tiempo -
muerto.

En particular el último método permite también el dren de -
la carga oscilante de línea.

Siempre para el mismo sistema la fig. 27 muestra las sobre-
tensiones en los extremos de un interruptor situado en la -
estación I en el caso de eliminación de una falla bifásica-
a tierra cercano al otro extremo de la línea.

Estas elevadas sobretensiones son funciones esencialmente:

Del grado de compensación serie.

De la longitud de la línea y de la posición y tipo de falla.

De la potencia de corto circuito de la red.

De la calibración de los entrehierros para protección de -
los condensadores.

Para su reducción, en el sistema que estamos estudiando ha-
sido considerada:

- a) La eventual utilización de interruptores con resisten-
cia en apertura.
- b) La conexión artificial de los entrehierros para protec-
ción de los condensadores y antes que se abran los inte-
rruptores.

SOBRETENSIONES		
	(^o) V_{max}	(*) $V_{2\%}$
A	2.1	1.8
B	1.75	1.6
C	1.5	1.4

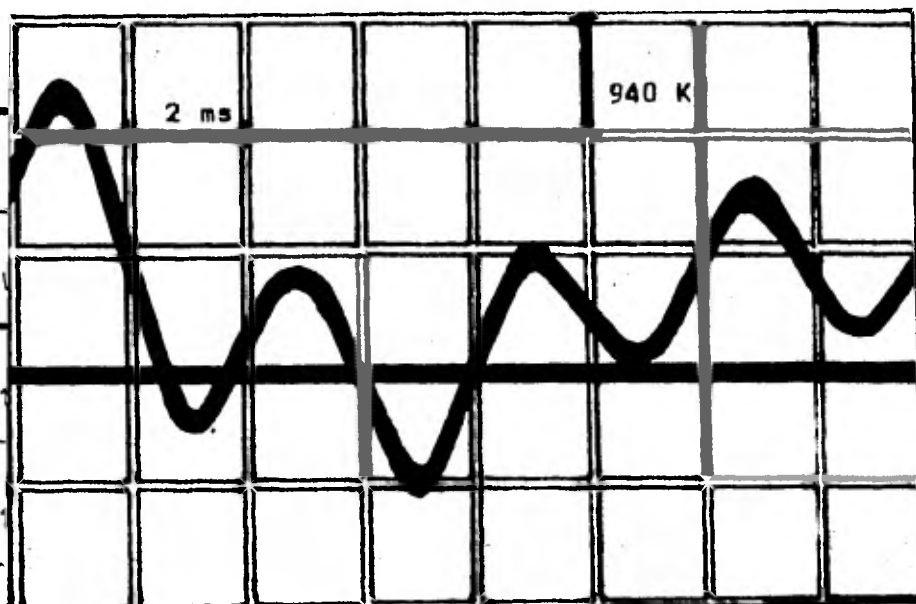


FIGURA 27.- Sobretensiones en los polos del interruptor de la estación I del sistema de la Fig. 26 por eliminación de la falla bifásica a tierra próxima al otro extremo de la línea.

TABLA 6.- Sobretensiones que se presentan en el extremo abierto de la línea durante la maniobra de reenergización en el interruptor dotado de resistencia de drenaje.

- A) Ningún sistema especial que actúe en serie y derivada.
- B) Dren durante el tiempo muerto de la maniobra únicamente (situación parecida a la que se realiza sin compensación serie).
- C) Dren de la carga durante el tiempo muerto de la maniobra como en las líneas.

(^o) V_{max} = Valor máximo teórico de sobretensiones.
 (*) $V_{2\%}$ = Valor con probabilidad de ser superado en 2% durante las maniobras.

Ejemplos de aplicación de algunos transitorios

La compensación derivada causa entre otros algunos problemas relacionados con la posibilidad de la reenergización monofásica y trifásica.

En particular con referencia a la energización monofásica, durante la apertura de los interruptores en los dos extremos de la fase de falla para valores de compensación derivada superiores al 60%, se pueden presentar sobretensiones elevadas sobre la fase abierta. Para reducir sobretensiones y también la corriente secundaria (7) pueden ser empleados unos reactores especiales con impedancia en la secuencia cero superior a la de la secuencia directa.

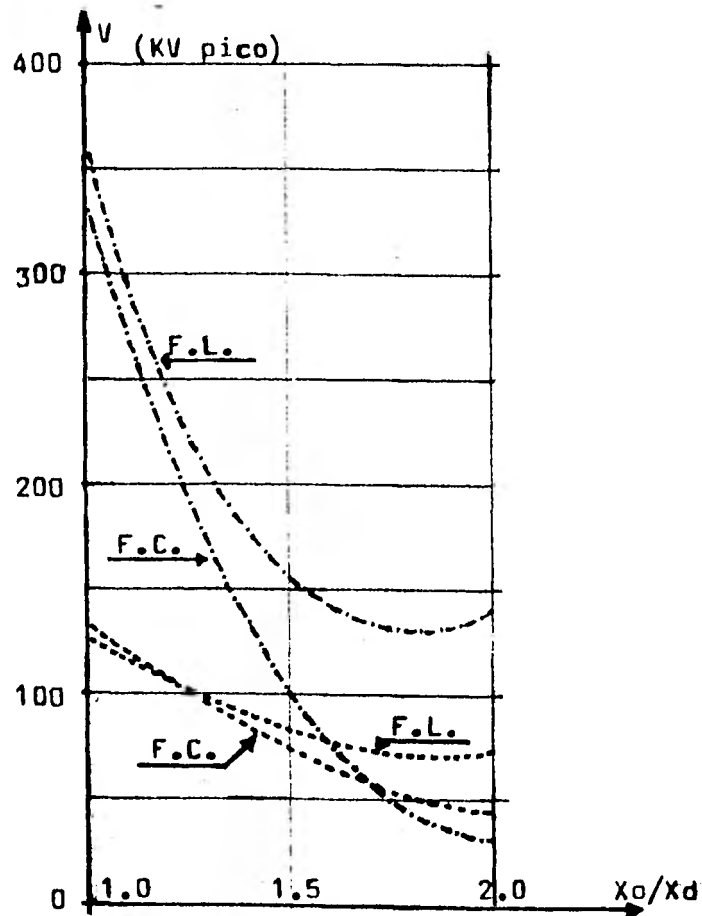


FIGURA 28.- Tensiones inducidas a régimen en una línea en plano no transpuesta por maniobra de apertura monofásica - en función de los valores de X_0/X_d de los reactores.

--- Línea con compensación derivada del 50%
 -.- Línea con compensación derivada del 75%
 F.C. = Fase Central.
 F.L. = Fase Lateral más solicitada.

Por ejemplo, para una línea de 400 KV no transpuesta de - 250 Km. Las figuras 28 y 29 sintetizan la influencia de la proposición X_0/X_d de los reactores sobre tensiones inducidas y corrientes residuales.

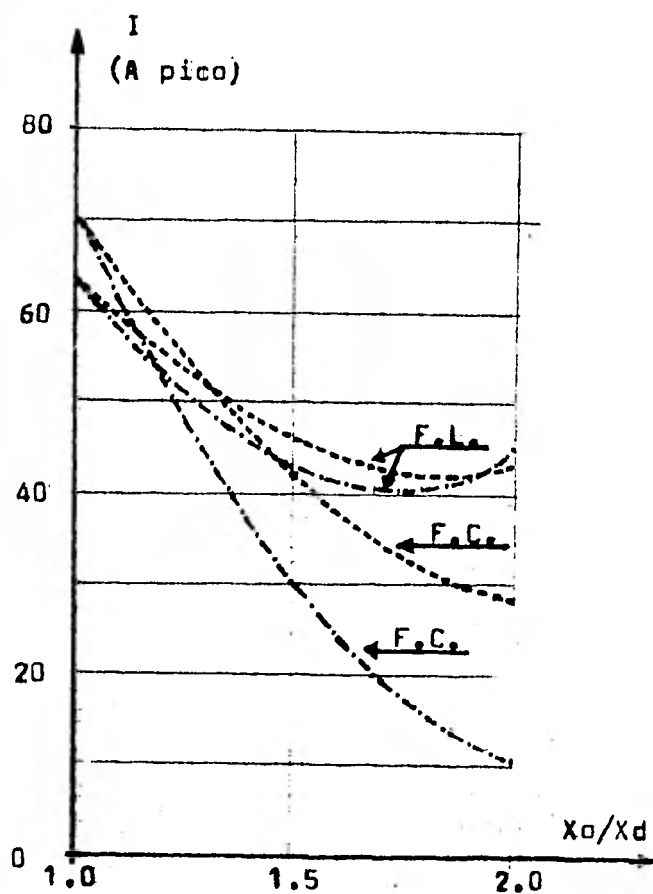


FIGURA 29.- Corrientes secundarias a régimen, en una línea en plano no transpuesta, por maniobras de apertura monofásica en función del valor de X_0/X_d de los reactores.

- - Línea con compensación derivada del 50%

-.- Línea con compensación derivada del 75%

F.C.- Fase Central

F.L.- Fase lateral más solicitada.

(7)

Por corriente secundaria se entiende la corriente que fluye en la falla después de la apertura de los interruptores.

En líneas con compensación sea serie o derivada, se presentan particulares corrientes elevadas "secundarias" también en el caso de apertura trifásica de los interruptores en los dos extremos de la línea, si la falla está en posición tal que no permita la intervención de los entrehierros de protección de los condensadores; de tal manera que la energía almacenada en los condensadores se descarga de manera oscilante a través de la falla y de los reactores, (ver esquema simplificado de la fig. 30).

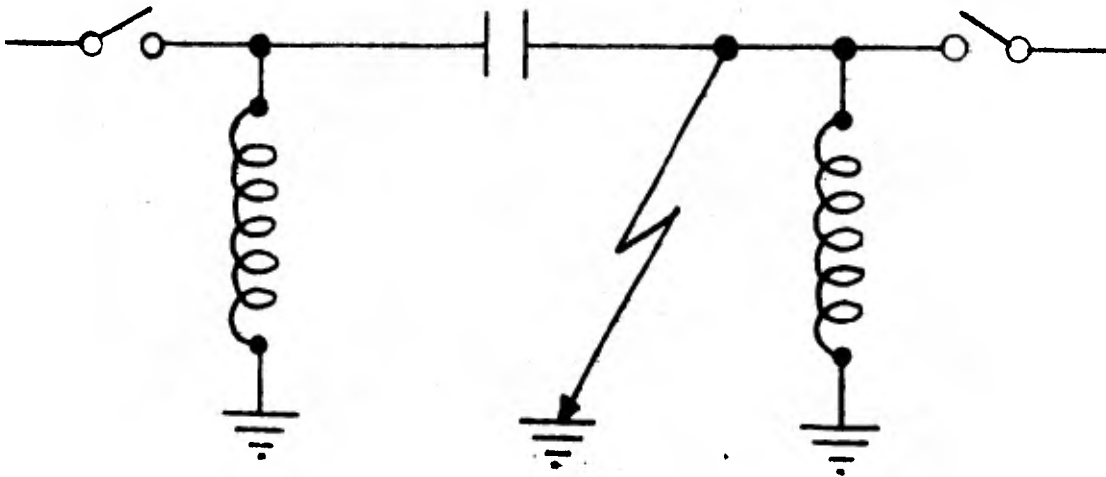


FIGURA 30.- Línea con compensación serie y derivada en el caso de falla y entrehierro de los condensadores no conectado.

En la fig. 31 siempre para el sistema de 750 KV indicado en la figura, se muestra como ejemplo, la corriente secundaria por falla monofásica sobre una de las líneas I-II para apertura trifásica de las mismas; se puede notar cómo por falta de cuidado (curva A) sea prácticamente imposible lograr la extinción de la falla en tiempos muertos razonables, por la presencia de corrientes elevadas.

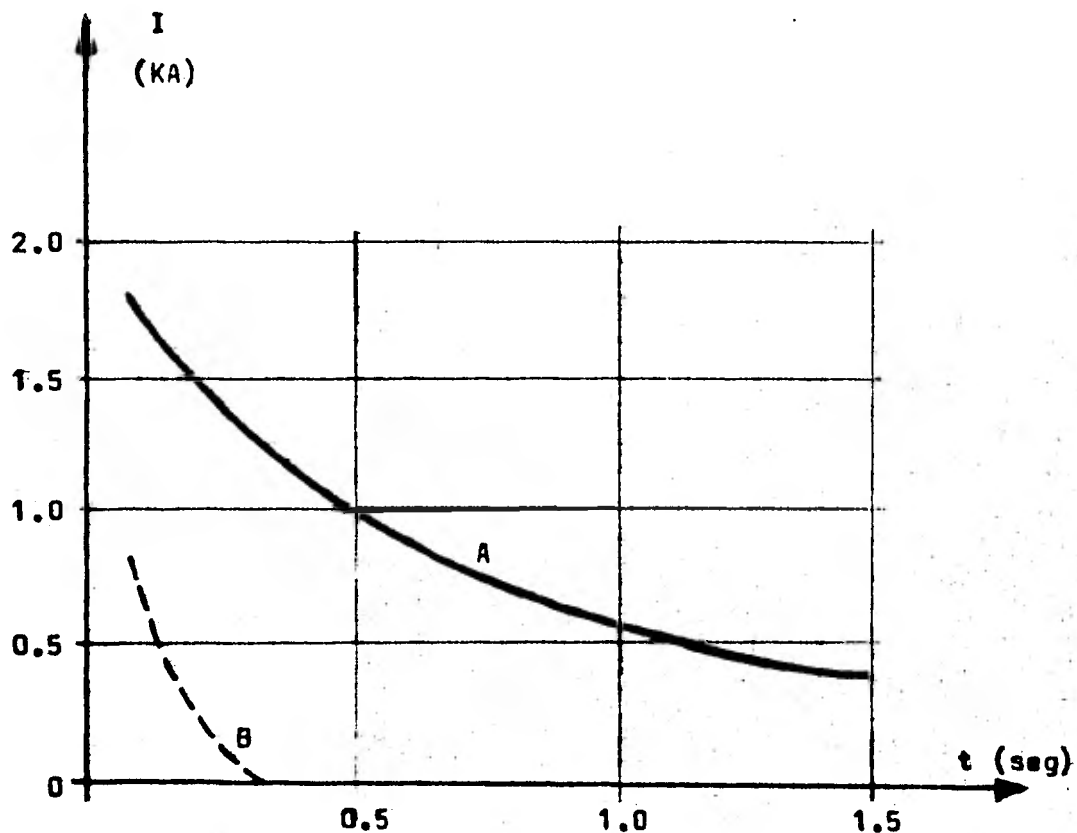


FIGURA 31.- Sistema de la fig. 26. Corriente "secundaria" a través de la falla después de la apertura trifásica de los interruptores en los dos extremos.

- A- Caída de tensión debida a la falla.
- B- Caída forzada conectando resistencias sobre el neutro de los reactores durante el tiempo muerto.

10. - LOS COMPENSADORES ESTATICOS EN LAS GRANDES REDES DE TRANSPORTE.

10.1 Problema General

Frecuentemente, los centros de consumo de energía eléctrica (grandes ciudades y complejos industriales) se encuentran muy alejados de las centrales productoras instaladas cerca de las fuentes de energía primaria, minas de carbón o recursos hidráulicos, por ejemplo. En consecuencia, se deben transportar potencias muy importantes a grandes distancias.

Una técnica que ha sido adoptada en varios casos por su carácter fiable y su costo comparativamente más bajo, es la transmisión en corriente alterna de tensión muy elevada (400-765 KV) con compensación derivada.

En efecto, esta última es muy necesaria para asegurar un mantenimiento bueno del plan de tensión, independientemente del estado de carga de la red; por otra parte, mejora la estabilidad transitoria del sistema y puede contribuir a limitar las sobretensiones dinámicas derivadas de la eliminación de una o varias cargas importantes.

10.2 Principio del Compensador Estático de Red

Una alternativa moderna a la solución clásica, que combina el uso de reactancias lineales derivadas y de compensadores síncronos, es el empleo de compensadores estáticos; estos últimos ofrecen rendimientos más elevados (en particular rapidéz de respuesta) a un costo más bajo.

El compensador estático de transductor, tal como se describe en la sección precedente puede aplicarse a las redes de alta tensión, y su regulador electrónico le proporciona una flexibilidad que permite adaptarlo a diferentes aspectos del problema. También se ha desarrollado otro tipo de compensador estático siguiendo un principio algo diferente: la reactancia variable es del tipo autosaturable,

(es decir, que se satura en corriente alterna según el nivel de tensión que se le aplica).

La impedancia residual de la característica tensión-corriente, queda nula por un condensador corrector de pendiente.

La potencia capacitiva la proporciona una batería de condensadores shunt. La propiedad fundamental de este sistema es la de mantener la tensión en sus bornes constantes - por absorción o producción de la potencia reactiva adecuada; ese compensador es pues soporte rígido de tensión en el punto en donde se conecta.

10.2.1 Tecnología de la Reactancia Autosaturable

Las características que se exigen a un compensador estático de red son la fiabilidad y la posibilidad de soportar regímenes de sobrecarga importantes, durante las situaciones de urgencia. La reactancia autosaturable y el transformador responden a estos dos criterios, gracias a su tecnología demostrada de transformadores de potencia y a su inercia térmica importante.

La reactancia autosaturable ha sido concebida de manera - que disminuya las corrientes armónicas generadas por el funcionamiento del aparato en régimen no lineal. El acoplamiento adoptado es un doble zig-zag en serie, con neutro aislado, que elimina las armónicas de corriente de posiciones inferiores; las armónicas restantes 11, 13, 23 y 25 son así fácilmente filtradas por el condensador shunt. La figura 32 muestra la disposición de la parte activa de una reactancia autosaturable de 55 MVar/11 KV/50Hz: comprende 6 circuitos magnéticos totalmente independientes, - cada uno de los cuales lleva un enrollamiento en zag de otra fase. Esta concepción permite un equilibrio perfecto de las corrientes armónicas; por otra parte, las pérdidas son mínimas ya que los flujos magnéticos se canalizan en circuitos individuales de retorno. Por otro lado el carácter modular de este tipo de construcción permite contemplar aparatos de gran potencia (se han estudiado detalladamente unidades de 600 MVar). Esta concepción es el-

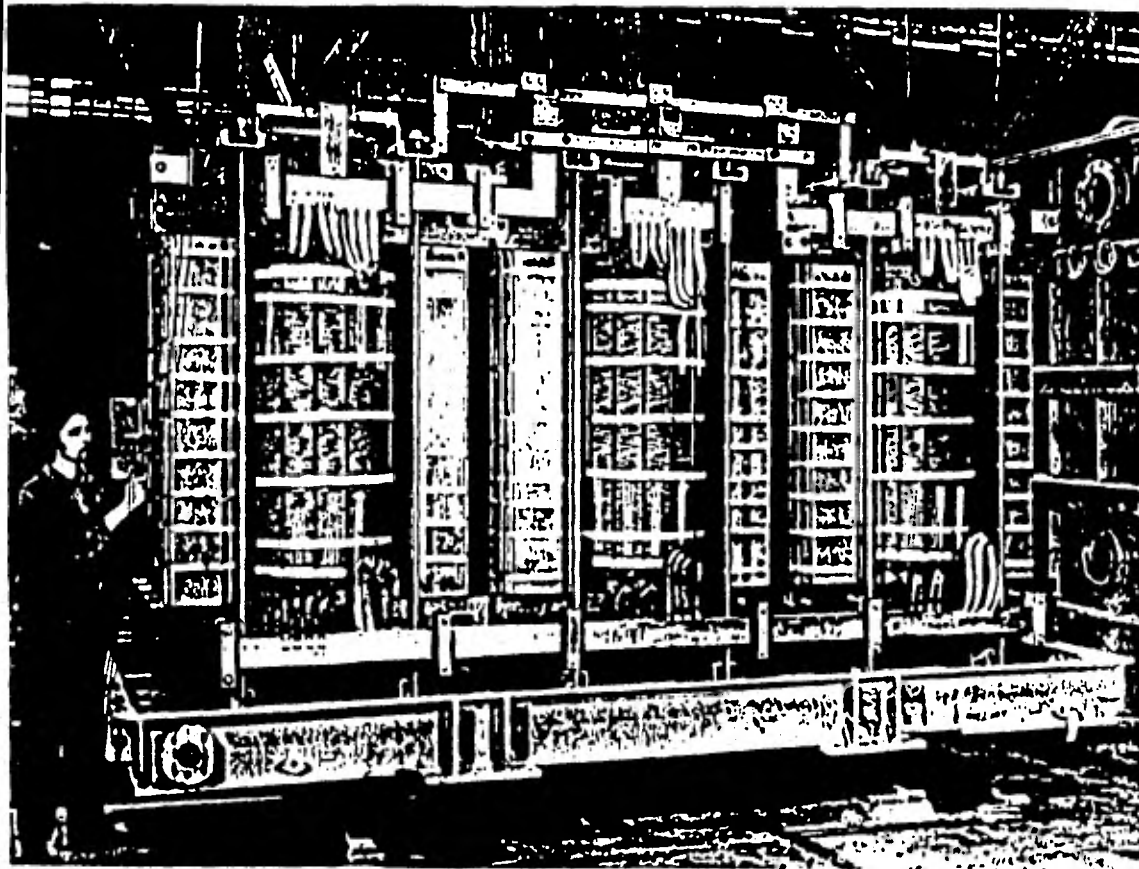


FIGURA 32.- Parte activa de un equipo autosaturable de 55 MVar.

fruto de un trabajo de desarrollo iniciado por cálculos - en el ordenador de las tarjetas de flujo magnético así como del comportamiento del sistema en regímenes establecidos y trifásicos. Diversas maquetas y prototipos industriales (hasta una potencia de 1300 KVA/12 KV/50 Hz) han permitido comprobar y refinar ciertos puntos particulares.

10.2.2 Concepción del compensador de reactancia autosaturable

Los demás elementos que constituyen el compensador estático han sido también objeto de estudios profundos, en particular el condensador corrector de pendiente. Este último está dotado de un circuito de protección contra las sobretensiones que provocarían limitaciones dieléctricas inadmisibles y de un circuito de amortiguación. La protección contra la sobretensión es del tipo clásico, por descargador y circuito de descarga; también se puede pensar en la posibilidad de reinserción rápida. Además, un interruptor de derivación cortocircuita el condensador cuando entra la reactancia autosaturable. El circuito de amortiguación, cuyo dimensionamiento resulta de pruebas realizadas exhaustivamente con prototipos de potencia, está concebido de manera que amortigüe vigorosamente cualquier fenómeno de ferresonancia susceptible de ser excitado por un régimen transitorio del conjunto condensador-corrector de corriente-reactancia autosaturable. Las pérdidas de este circuito son mínimas gracias a la puesta en serie con la resistencia de un circuito tapón para la frecuencia fundamental.

10.3 Presentaciones de un compensador prototipo de potencia

10.3.1 Régimen estacionario

Las pruebas en fábrica (con ayuda de un grupo turboalternador de 21 MVar) de un compensador prototipo de entre 10 MVar y 30 MVar han permitido comprobar las características estáticas del equipo.

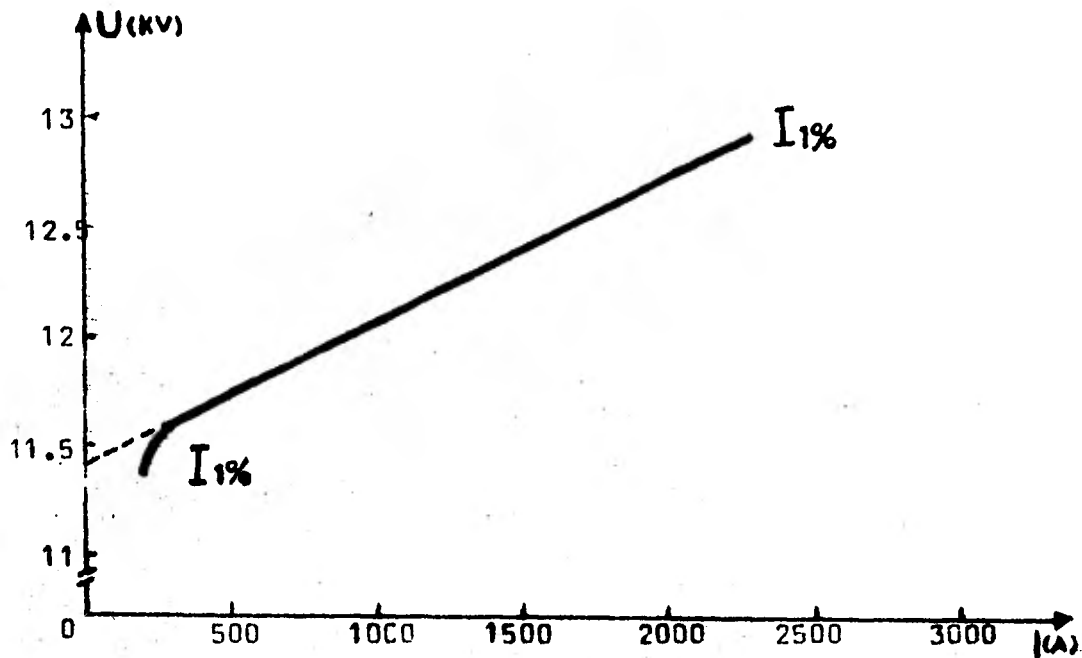


FIGURA 33.- Característica tensión/corriente de un equipo autosa_
turable de 55 MVar.

1. Reactancia saturable de 55 MVar/11 KV.
2. Curva medida.

La linealidad de la característica tensión-corriente, esencial para obtener un mantenimiento preciso de tensión, es excelente, tal como se muestra en la figura 33. Las corrientes armónicas generadas por la reactancia son inferiores al medio por ciento para las posiciones inferiores, y corresponden a los valores calculados para las posiciones elevadas: H11 : 15% - H13, H23 y H25: 5%. El nivel de las pérdidas es de 286 KW a una corriente nominal de 2400 A (55 MVar).

10.3.2 Régimen Transitorio

Los regímenes transitorios que puede encontrar un compensador estático durante la explotación en la red han sido analizados en fábrica sobre el prototipo industrial de 1300 KVA/12 KV. Las pruebas de conexión y de inserción del condensador corrector dependiente han indicado que los transitorios son análogos a los de un transformador de potencia. La eliminación de los fenómenos de oscilaciones bajo armónicas de ferresonancia por el circuito amortiguado ha sido demostrado por series muy completas de pruebas transitorias.

El tiempo de respuesta a una variación brutal de una carga shunt (o de un escalón de fuerza electromotriz) se ilustra por el oscilograma de la figura 34; en él puede verse que la corriente de reactancia alcanza su nuevo valor en el semiperíodo siguiente a la perturbación; hay un ligero "rebase del límite" que se reabsorbe por una oscilación subarmónica muy fuertemente amortiguada. (Se observa que la tensión fase-neutro en los bornes de la reactancia se deforma como consecuencia de desplazamiento del punto neutro aislado, lo que permite la libre circulación de la armónica 3 de flujo).

10.4 Estaciones de redes de transporte compensadas

La primera red de transporte contemplada se representa en la figura 35, su longitud es de 800 km y se divide en dos

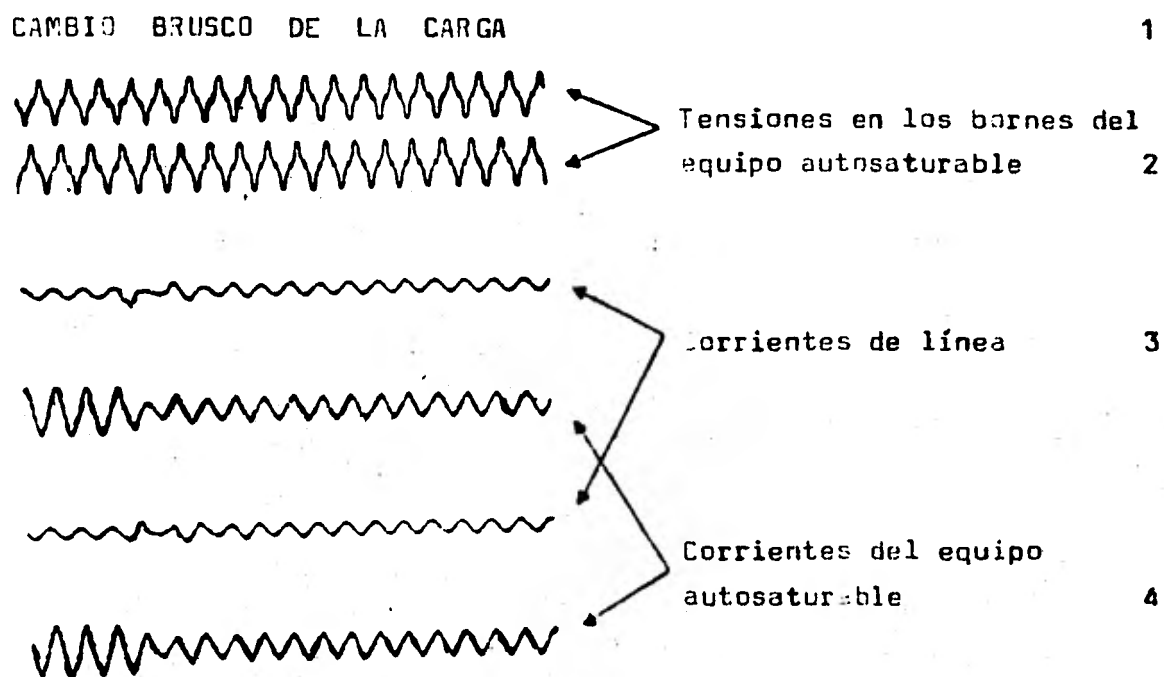


FIGURA 34.- Respuesta de un compensador a una variación brusca de la carga.

1. Cambio brusco de la carga.
2. Tensión en los bornes del equipo.
3. Corriente de línea.
4. Corriente del equipo.

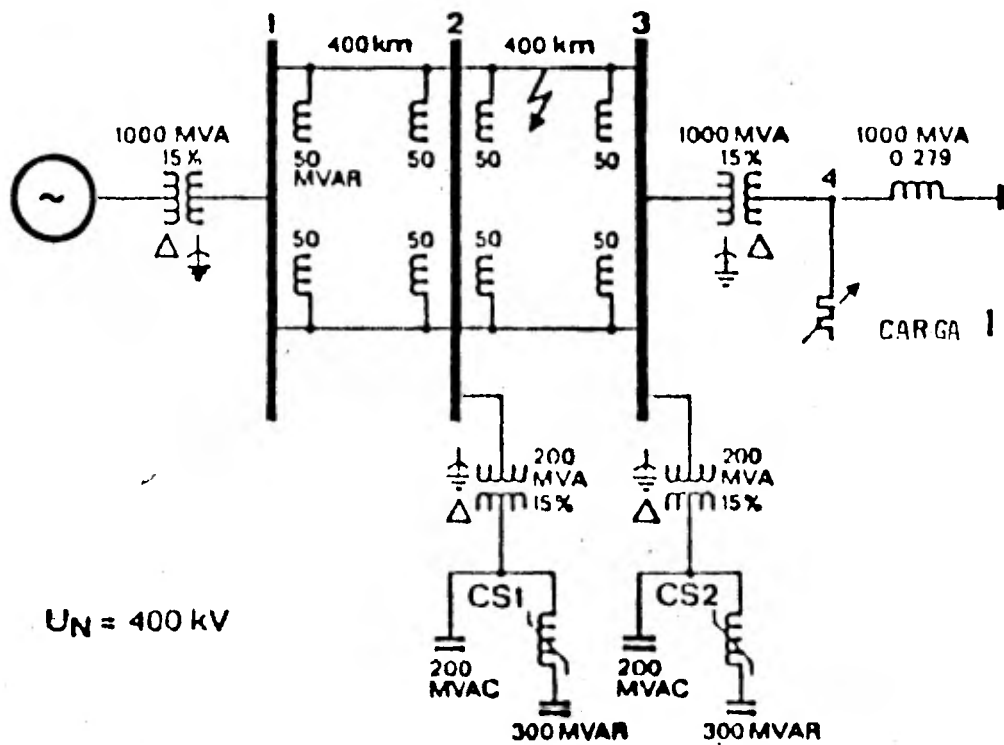


FIGURA 35.- Esquema unifilar de la red de 400 KV/800 KM.

1. Carga.

secciones de 400 Km, comprendiendo cada una dos líneas de un término en paralelo. Unos disyuntores permiten desconectar cada sección de línea. El estudio trata de la influencia de uno o dos compensadores estáticos de potencia entre 200 MVar y 100 MVar que pueden ser conectados a las barras colectoras 2 y 3. Unas reactancias shunt fijas de 50 MVar se conectan permanentemente a cada extremo de las líneas, dando una compensación fija del 40% aproximadamente. Los grupos generadores dan un total de 1000 MVar y la tensión de transporte 400 KV. La carga se conecta por mediación de un transformador reductor de 1000-MVar con un 15% de tensión de cortocircuito. Esta red de transporte está interconectada a una red de potencia infinita por un enlace relativamente débil (impedancia de 0.79 p.u. sobre base de 1000 MVar).

10.4.1 Mejora de las características en régimen estacionario

La curva de capacidad de transporte en régimen estacionario de la red de 400 KV ha sido calculada por un programa de ordenador que incorpora las características no lineales de los compensadores estáticos. Una red miniatura de 115 V del tipo TNA (analizador de red transitoria) permite representar la red y los compensadores a una escala de laboratorio y comprobar los resultados del cálculo.

Se han estudiado diferentes casos: todas las líneas son sanas, o una línea se encuentra desconectada en las secciones 1-2 ó 2-3.

La tensión en el nudo 1 se mantiene a un valor fijo de 400 KV por medio del regulador de tensión de los grupos generadores. A título de ejemplo, la característica P1, potencia activa que entra en la red en el nudo 1 en función del desfase entre las tensiones en los nudos 1 y 3, se indica en la figura 36 en el caso en que se desconecte una línea de la sección 1-2.

La presencia de un compensador en el nudo 3, y de dos com

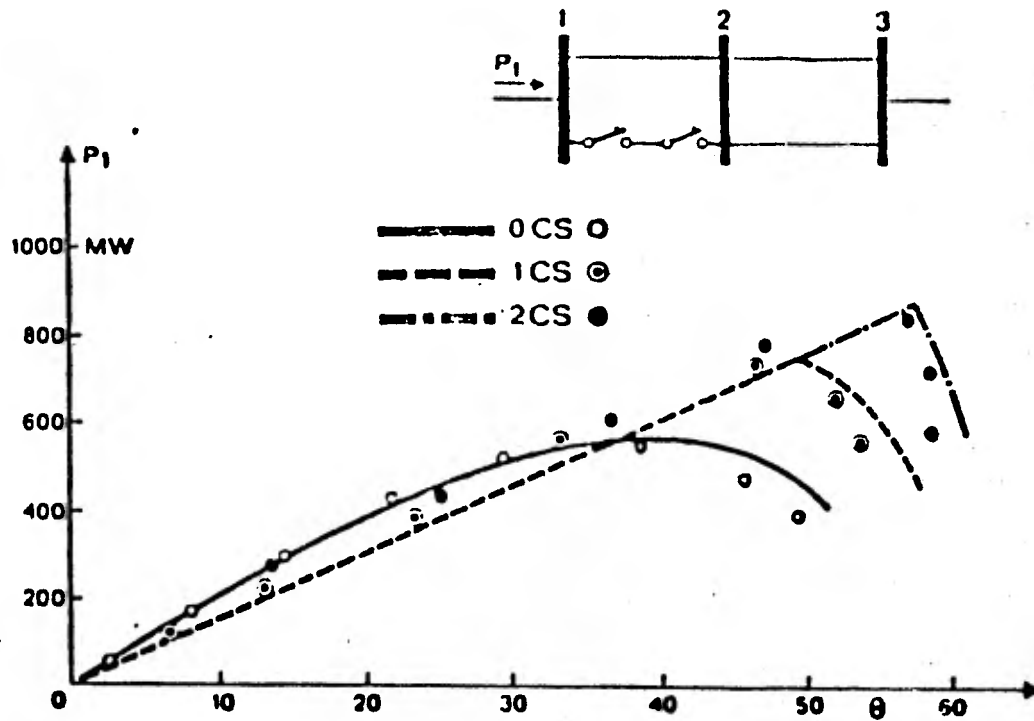


FIGURA 36.- Curvas de potencia con 0, 1 y 2 compensadores.

compensadores en los números 2 y 3, permite hacer pasar la potencia máxima transmisible de 570 MW a 760 y 890 MW; - estas cifras permiten provocar un aumento muy significativo de la capacidad de transporte del sistema por la adición de compensadores. Los puntos de medida en la red miniatura confirman los valores calculados (véase figura 36).

En la figura 37 se ilustra la influencia de la compensación en el mantenimiento del plan de tensión, dándose en dicha figura las tensiones en los nudos 2 y 3 con y sin compensación para una tensión fija en una tensión fijada a 1 p.u. en el extremo emisor (nudo 1). Se comprueba que, sin compensación, las sobretensiones de carga débil son absolutamente inadmisibles y que la presencia de un sólo compensador al extremo de la línea mejora ya muy sensiblemente la situación. Estos perfiles de tensión han sido igualmente confirmados por medidas en la red miniatura.

La marcada mejora de los rendimientos estáticos de una red compensada permite aumentar su capacidad de transporte para un número de circuitos determinados, o bien reducir el número de sus circuitos necesarios para transmitir una potencia determinada.

10.4.2 Mejora de la estabilidad transitoria

Pruebas realizadas con la red miniatura han demostrado que el aumento de las presentaciones estáticas de la red compensada va acompañado por un aumento de la estabilidad transitoria.

Las condiciones de explotación del sistema son las siguientes: la red, infinita, con relación a la cual se busca el límite de estabilidad de los grupos de 1000 MVar, proporciona una potencia activa, P5, fija e igual a 500-MW y una potencia reactiva nula en el nudo 4 (figura 35).

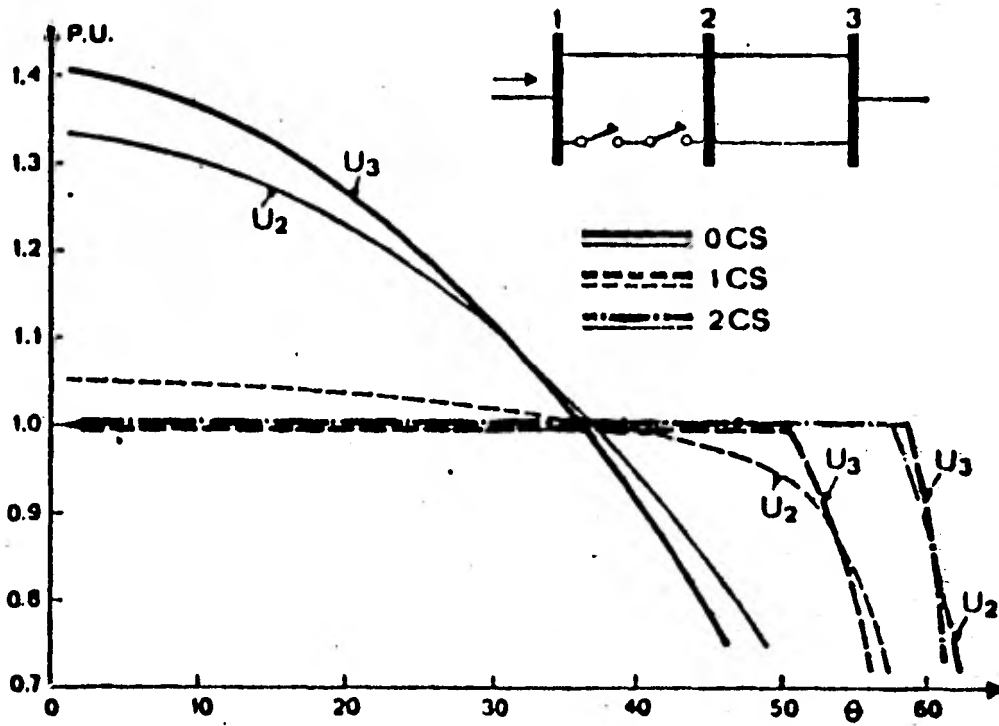


FIGURA 37.- Curvas de tensión en los nudos 2 y 3 con 0, 1 y 2 compensadores.

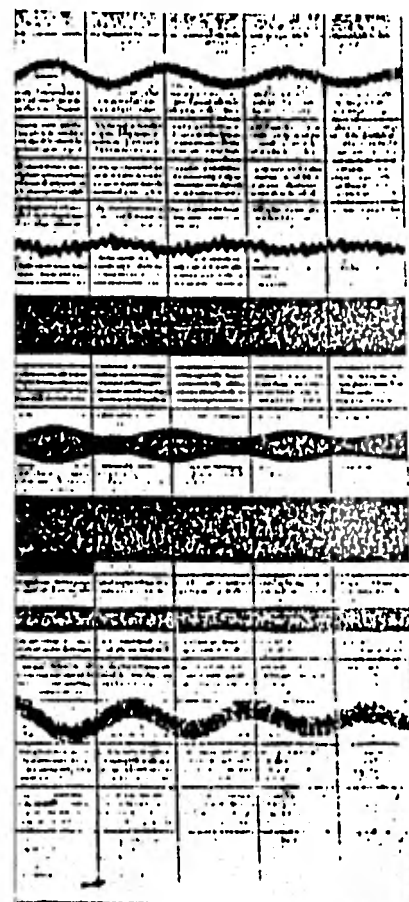
El límite de estabilidad transitoria ha sido investigado para diferentes criterios; un criterio posible es el de la partida fase-tierra de una duración de 7 ciclos (0 a 14 seg), seguida por la desconexión de la sección de línea afectada por el fallo. Los oscilogramas de las figuras 38 y 39, que corresponden a una localización del defecto en la sección 1-2, cerca de las barras colectoras 1, proporcionan un ejemplo de los resultados obtenidos. El ángulo θ representa la posición del rotor de los grupos de 1000 MVAR con relación a la red infinita. En el caso de una red sin compensación (figura 38) la desconexión de los grupos se produce en la primera oscilación de potencia (un segundo aproximadamente después de la desconexión de una sección 1-2) para una potencia transmitida P_1 , de 490 MW.

Se observa, por el contrario, que cuando la red está compensada en los nudos 2 y 3 (figura 39), la estabilidad transitoria queda asegurada para una potencia transmitida de 670 MW. Se observa pues que se consigue una importante ganancia de aproximadamente un 40% (480 MW a 680 MW) sobre el límite de estabilidad transitoria, en el caso considerado.

10.4.3 Limitación de las sobretensiones dinámicas

La segunda red de transporte considerada en el estudio de las sobretensiones dinámicas se esquematiza en la figura 40; se trata de una red de 735 KV que incluye dos líneas, por cada una de las cuales transitan 10,000 MW. Se han investigado diversos casos de descarga de líneas, de descargas secuenciales y de descargas después de falla. El estudio se ha realizado sobre un analizador de red, con modelos reducidos de 4 compensadores estáticos de 1000 MVAR cada uno.

A título de ejemplo, se considera la descarga total de la red LG consecutiva a una apertura de todas las partes



transitoria sin compensa-

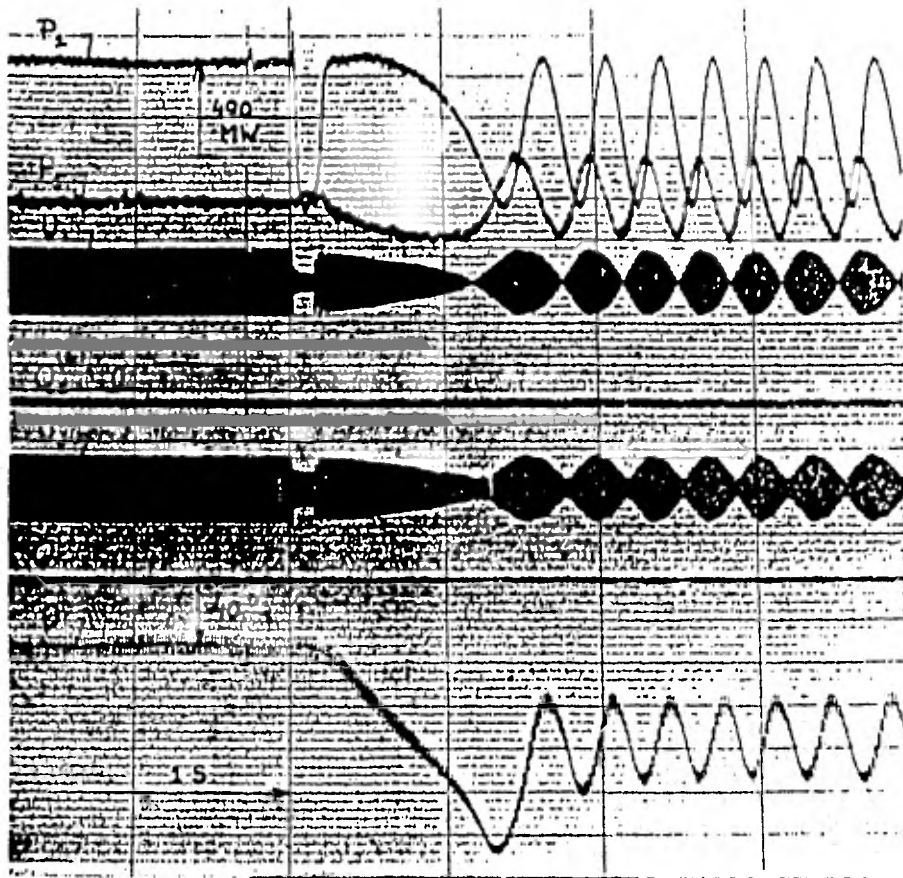


FIGURA 39.- Oscilograma de estabilidad transitoria con 2 compensadores.

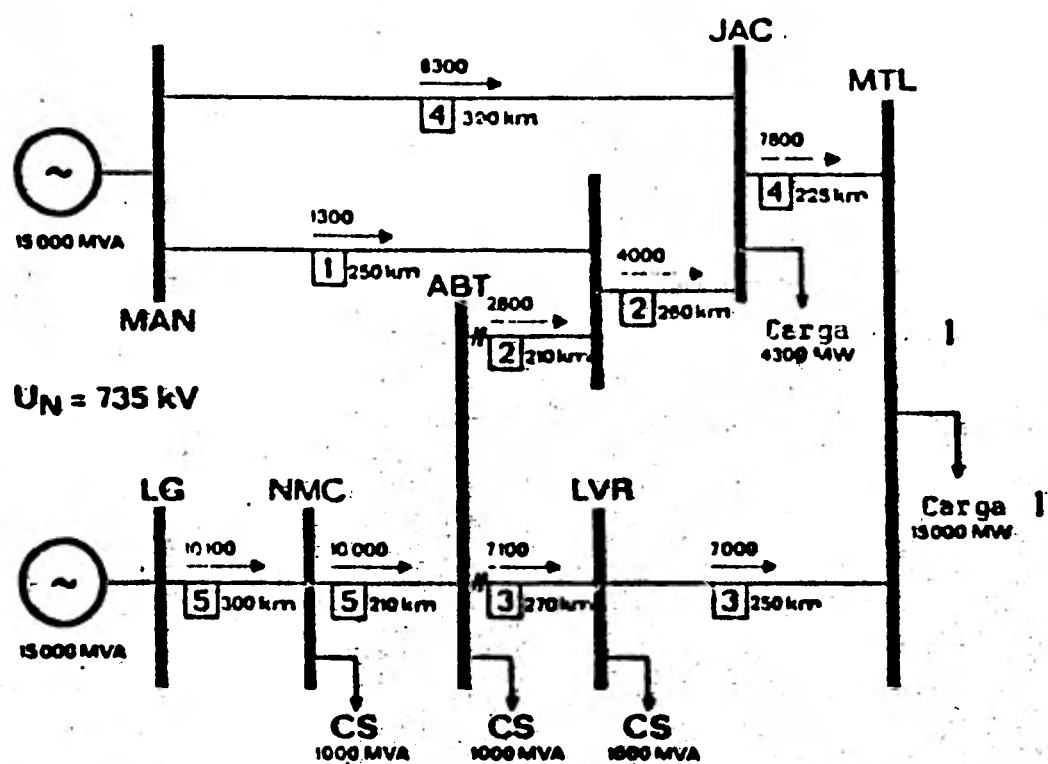


FIGURA 40.- Esquema unifilar de redes de 735 KV.

1. Carga.

de línea en el puesto ABT; la potencia descargada es pues de 10,000 MW, y no hay presente ninguna compensación derivada, aparte de un transformador de vacío de 1020 MVA_r en el puesto ABT. Los compensadores de 1000 MVA_r poseen una capacidad de sobrecarga transitoria muy importante (4.0 - p.u.) por la saturación del transformador elevador que los conecta a las barras de 735 KV y por la inercia térmica importante de su autosaturación.

Se comparan tres casos: 1) no está conectado ningún compensador, 2) se coloca un compensador de 1000 MVA_r en los puestos NMC y ABT 3) se ajusta la protección de sobretensión del condensador corrector de pendiente a un nivel tal que funciona idéntico al 2) pero no se inicia la protección contra sobretensiones. Las sobretensiones dinámicas medidas en los tres casos son, en p.u.:

Caso	LG	NMC	ABT
1	1.7	2.0	2.25
2	1.4	1.5	1.5
3	1.2	1.1	1.1

La tabla anterior ilustra la gran eficiencia de los compensadores estáticos, incluso de tamaño relativamente pequeño (2000 MVA_r) con relación a la potencia capacitiva (7000 MVA_r) de las líneas descargadas, para limitar las sobretensiones dinámicas de frecuencia industrial.

11.- CONCLUSIONES

Del exámen antes expuesto, surge que los diferentes problemas relacionados con la compensación de la potencia reactiva y con la regulación de la tensión, estrictamente relacionados entre sí, necesitan de un análisis global que tome en cuenta estas relaciones de interdependencia.

En particular los clásicos problemas que se refieren a los sistemas de transmisión de alta tensión surgen las conclusiones siguientes:

Por lo que se refiere al control de la tensión y de la potencia

reactiva en el funcionamiento a régimen es indispensable estudiar con mucho cuidado el tipo, el valor y la ubicación de la compensación derivada y de la eventual compensación serie.

Tipo, valor y ubicación de la compensación serie y derivada, que tienen una notable importancia también para los transitorios - - electromecánicos; la posibilidad de modular los elementos de compensación, sea con intervenciones discontinuas, o bien con elementos especiales de control continuo, puede llevar a grandes - ventajas para la estabilidad transitoria y dinámica de los sistemas.

Las sobretensiones dinámicas por pérdidas de carga en el extremo receptor de largos sistemas de transmisión ponen serias limitaciones para el funcionamiento del sistema, y su control está notablemente influenciado por el tipo de compensación derivada y - de las características de los reguladores de tensión.

Las sobretensiones de maniobra resultan ser sensiblemente afectadas por la presencia de los medios de compensación derivada y serie que interfieren, entre otros, con los procedimientos que pueden ser utilizados para la reducción de las sobretensiones mismas.

En particular la compensación derivada oportunamente utilizada - lleva siempre a una sensible reducción de las sobretensiones de - maniobras; por el contrario se necesita de especiales cuidados - para evitar que la compensación serie cause el aumento de las - sobretensiones mismas.

Los compensadores estáticos de red aparecen como un auxiliar valioso para resolver los problemas de transporte de gran potencia eléctrica en largo recorrido. Sus propiedades estáticas y dinámicas en prototipos de potencia industrial. Su influencia favorable en la capacidad de transporte en régimen establecido, así como en el mantenimiento del plan de tensión se ha comprobado - por cálculo y en red miniatura.

La mejora de la estabilidad transitoria y la limitación de las - sobretensiones dinámicas han sido establecidas por medidas en el

analizador de redes.

El compensador estático de energía reactiva ofrece ciertamente - ventajas sobre los llamados compensadores síncronos comunmente em pleados:

Todos los componentes, excepto el regulador y el rectificador, - pueden ser instalados exteriormente.

No requieren supervisión después de ser instalados y necesitan so lamente un mínimo de mantenimiento.

Las pérdidas en los compensadores, cuando están en uso, resultan de la energía activa requerida por los diferentes componentes, - son mucho menores que para un compensador síncrono; el sis tático es entonces más económico.

El compensador estático se autosumministra la componente de corrien te armónica requerida por los dispositivos de carga, economizando así el sistema de potencia que ellos suministran y previniendo una distorsión resultante de la forma de onda de la tensión.

Nunca hay ningún peligro de pérdida de sincronización con el sis tema de potencia, siempre que las condiciones de operación son - particularmente malas.

12.- BIBLIOGRAFIA

- 1.- Viqueira, L. J.
Redes Eléctricas, Primera Parte
Primera Reimpresión de la Segunda Edición
pp. 1-462
Ed. Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A.
México, D. F. (1977)
- 2.- Viqueira, L. J.
Redes Eléctricas, Segunda Parte
Primera Reimpresión de la Segunda Edición
p.p. 1-415
Ed. Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A.
México, D. F. (1975)
- 3.- Stevenson, W. D.
Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia
Segunda Edición.
p.p. 1-383
Ed. Mc. Graw Hill
México, D.F. (1979)
- 4.- L.F. Faro Ribeiro, R. Maeconato, G. Ruckstuhl, G. Tagliabue:
Estudio por medio de simulación digital e híbrida de las se-
ñales estabilizantes de los reguladores de tensión de la cen-
tral brasileña de Jupia - Convención anual AEI, Roma 1974.
- 5.- G. Lucchini, R. Manara: Control de los reactivos y de las va-
riaciones de tensión debidas a cargas industriales - Conven-
ción anual A.E.I., Roma 1974.
- 6.- A. Clerici, U. Magagnoli, G. Santagostino: Influencia de ini-
ciación de fallas, eliminación de fallas y sobretensiones en
el aislamiento de líneas de UHV - IEEE 1974 Pwr. Engrg. Soc.
Summer Mtg. & Energy Rescureces Conf.
- 7.- P. Thanassoulis, N. de Franco, A. Clerici, M. Cazzani: Sobre-
tensiones en un sistema de compensación serie a 750 KV para el
proyecto Itaipu de 10 000 MW - Artículo presentado al Summer
Power Meeting de la IEEE 1974.
- 8.- M. Cazzani, A. Clerici, P. Margaritidis, J. Theloudis: Sobre-
tensiones internas en la nueva red Griega de 400 KV - CIGRE
1974, papel 33-03.

- 9.- F. Lliceto: Considerazioni sulla possibilità di trasmissione dell'energia con linee compensate in corrente alternata a distanze superiori a 1 500 Km.- Ponencia A. 78, Convención Annual del AET, Roma 1974.
- 10.- F. Lliceto, E. Cinieri, G. Santagostino, M. Cazzani: Trabisent voltage and currents in series compensated EHV lines -artículo presentado en la Reunión de Bruselas del comité de estudio N. 32 de la CIGRE- septiembre de 1975.