

FUNCIONAMIENTO EN CORTOCIRCUITO DE LAS MAQUINAS SINCRONICAS

CC-05.PDF

5	Variacion de las corrientes de inductor de las maquinas sincronicas en los laboratorios de potencia	157 / 171
----------	--	------------------

5 - VARIACION DE LAS CORRIENTES DE INDUCTOR DE LAS MAQUINAS SINCRONICAS EN LOS LABORATORIOS DE POTENCIA.

Generalmente la máquina sincronica se utiliza en los laboratorios de potencia en funcionamiento en cortocircuito. Este es realizado estableciendo una falla entre dos o tres fases en el extremo de los circuitos conectados al inducido, cuando la máquina funciona a la velocidad nominal y está excitada para la tensión de ensayo. El funcionamiento mecanico en vacío que precede el funcionamiento en cortocircuito se obtiene con un motor asincrónico. La excitación del funcionamiento en vacío y en cortocircuito se obtiene con una máquina de corriente continua cuyo inductor tiene una baja constante de tiempo. Las fallas se establecen con un contactor de cortocircuito idóneo para establecer corrientes en cualquier instante sincronizable respecto de las alternancias de las tensiones en vacío. El funcionamiento mecanico durante el tiempo de ensayo (es decir mientras perdura el cortocircuito y la máquina permanece excitada) es debido a la energía cinetica en las masas del grupo motor generador.

En la fig. 30 se indica el esquema unifilar de un laboratorio de ensayos de cortocircuito.-

Las características de las máquinas de estos laboratorios son notablemente distintas de las que corresponden a generadores normales. En efecto, para su proyecto se trata de obtener máquinas con las reactancias lo menores posibles y las constantes de tiempo lo mayores posibles y obtener máquinas idoneas para ser excitadas con tensiones muy superiores a las de funcionamiento en vacío, como para funcionar en cortocircuito trifásico o monofásico.

En este paragrafo nos limitaremos al examen del comportamiento de los alternadores de dos polos, ya que es el tipo de máquina mas economica en el estado actual de la técnica de construcción. A fin de obtener reactancias subtransitorias de bajo valor el dimensionamiento de la máquina debe: lograr la densidad de flujo de entrehierro lo mas alto posible, reducir al mínimo la reluctancia opuesta al flujo de dispersión de inducido y de inductor, disponer barras amortiguadoras a lo largo de toda la periferia del rotor. El circuito magnetico es generalmente proporcionado para lograr inducciones magneticas de valores poco superiores a aquellas que se adoptan para las máquinas comerciales en el tramo rectilíneo de la característica de vacío se lleva también el hierro a saturación con excitaciones poco superiores a aquella del codo de la característica de vacío. Este criterio evita sobretensiones peligrosas cuando las máquinas son excitadas con elevadas corrientes. En los flujos de dispersión se incluyen los transversales de las ranuras de inducido, los que atraviesan el entrehierro afectando la parte superior de los dientes del rotor y los concatenados con las conexiones frontales, Por lo tanto la contribución estatorica a la reluctancia de los recorridos que siguen los flujos de dispersión es minimizado por la elección de la forma de las ranuras de estator, realizadas anchas y poco profundas, y por el proyecto de estructuras amortiguadoras dispuestas alrededor de las cabezas de los arrollamientos.

Las dimensiones del espesor del entrehierro y del paso polar, ligadas a la velocidad periferica del rotor no difieren de las correspondientes a máquinas comerciales. El dentado del rotor está repartido uniformemente a lo largo de toda la periferia. Las ranuras ocupadas por el arrollamiento inductor son mas profundas de las ocupadas por solo las barras amortiguadoras.

Las ranuras ocupadas por el arrollamiento inductor están cerradas con cuñas de cierre que lo contienen mecánicamente y actúan también como barras amortiguadoras.

A fin de realizar las dos funciones, las cuñas de cierre están normalmente construidas en secciones conectadas entre si para garantizar la continuidad eléctrica, de manera de permitir los desplazamientos axiales debidos a alargamientos termicos. Todas las barras que ocupan el desarrollo de la circunferencia de los polos y los espacios interpolaes estan conectadas frontalmente de manera de formar una jaula amortiguadora: su eficacia es homogénea a lo largo de la periferia del rotor.

A los fines del presente trabajo se ha juzgado inutil examinar detalles constructivos de las máquinas, indicandose en la bibliografía algunas publicaciones sobre el argumento.

Generalmente también a los generadores de ensayo se les asigna una potencia y una tensión nominal.

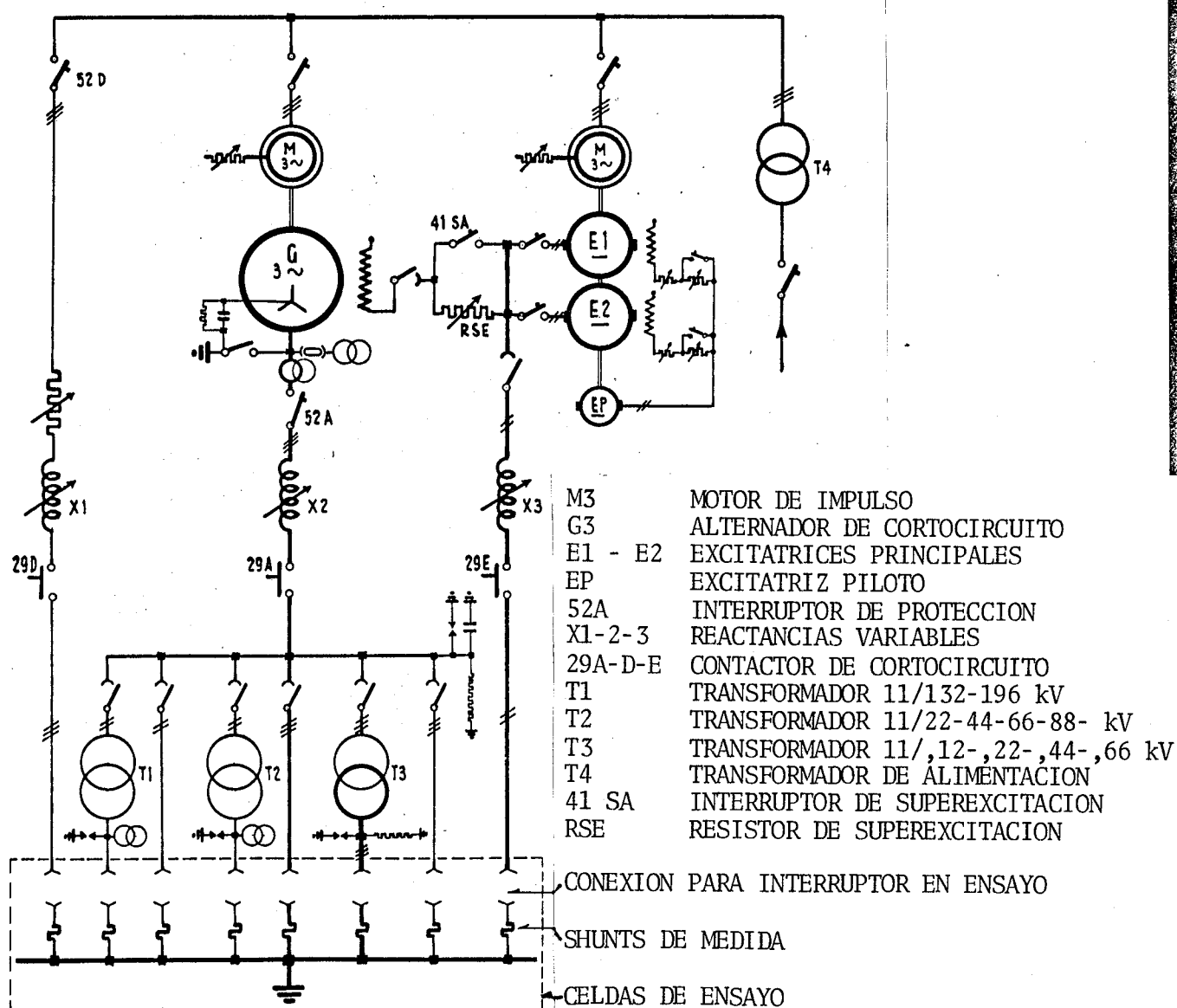
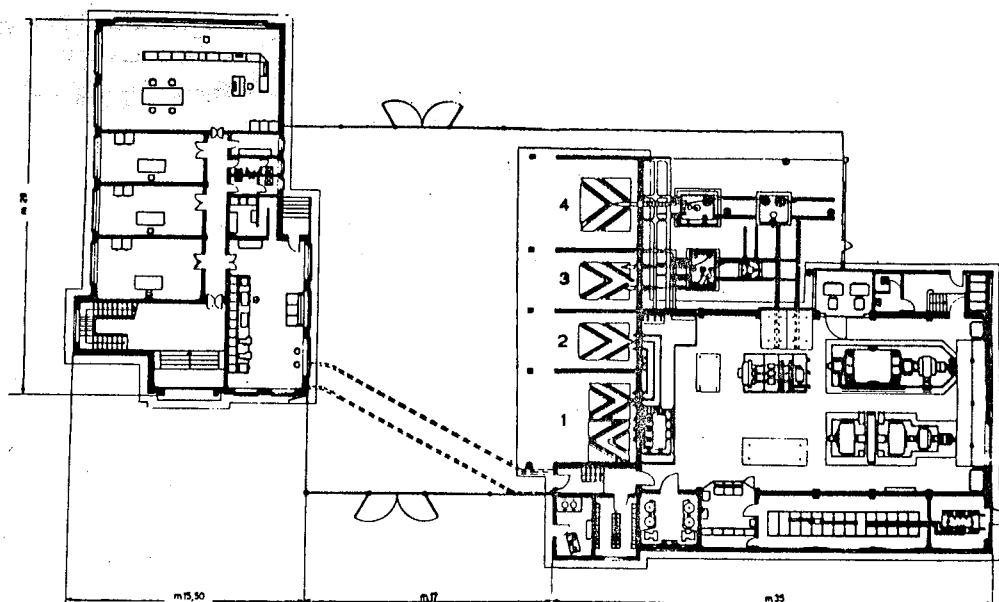


Fig. 30

Esto para plantear los calculos de proyecto según relaciones usuales y para referir los parametros característicos a valores unitarios o porcentuales. En la tabla I se comparan los valores de los parametros característicos de los alternadores de dos polos destinados a las estaciones de ensayo con los de construcción normal.



Pianta del Laboratorio grande potencia della Magrini M.S.M.

En las figuras 31a y 31b se representan antetodo las curvas de excitación de dos alternadores especiales, además las variaciones de las corrientes alternas de cortocircuito para fallas en bornes, y fallas después de reactancias de valor igual al 125% del valor de las respectivas reactancias subtransitorias.-

TABLA I

alternador de dos polos	reactancia en valor unitario			constnate de tiempo en segundos		
	(1) $X_d'' = X_q''$	(1) X_d'	(2) X_d	T_{d0}'	T_d''	T_a
construcción normal	0,07 ÷ 0,14	0,12 ÷ 0,21	0,95 ÷ 1,45	5 ÷ 10	0,02 ÷ 0,05	0,04 ÷ 0,24
construcción especial 33 MVA 10 kV	0,06	0,075	0,66	4,0	0,023	0,1
construcción especial 150 MVA 16,5 kV	0,02	0,038	0,63	8,3	0,04	0,1

(1) Valores calculados a la tensión nominal

(2) Valores calculados en ausencia de saturación

La tensión máxima de superexcitación es 2300 V para la máquina de 33 MVA,
3000 V para la máquina de 150 MVA.

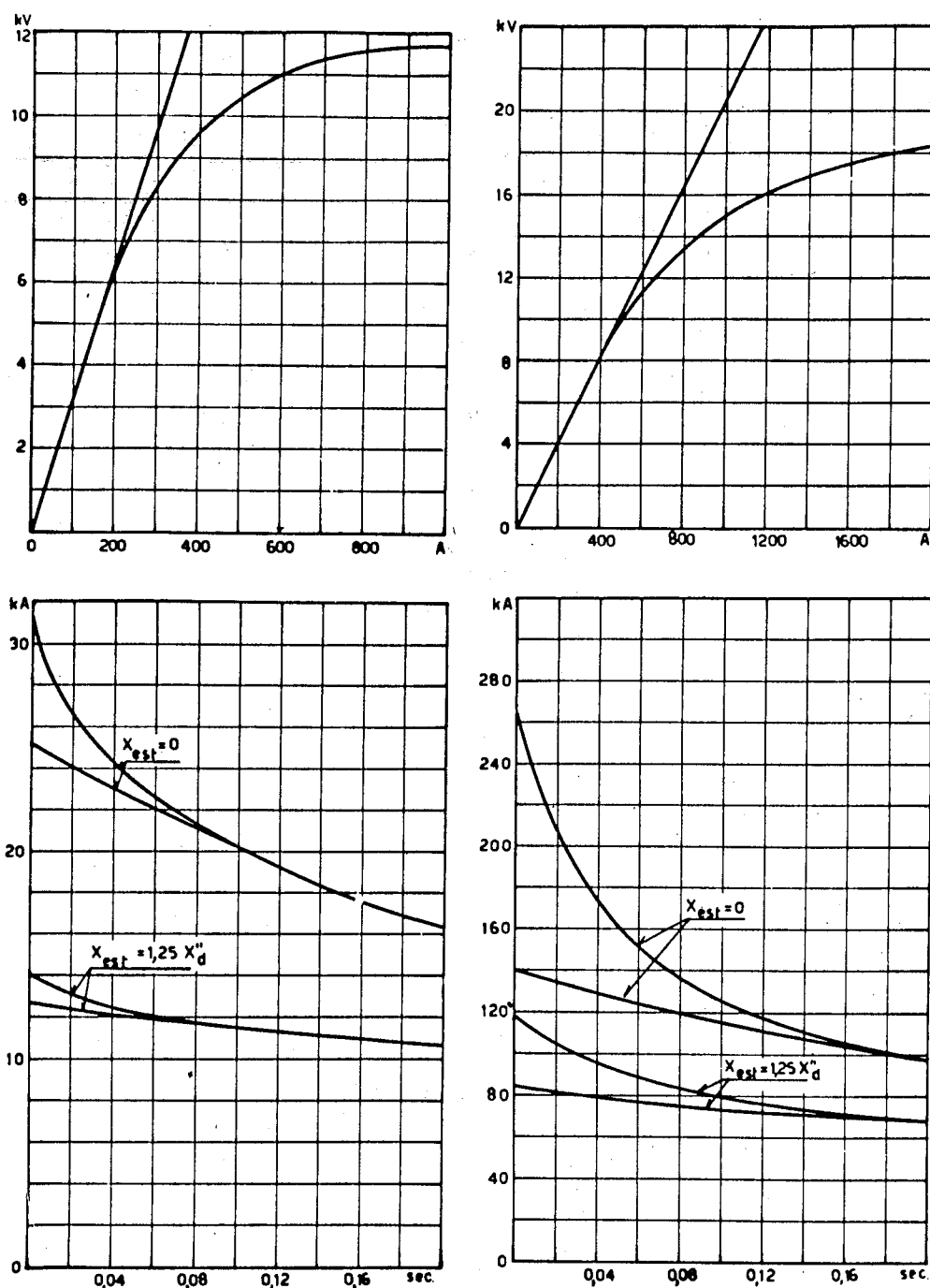


Fig. 31 a e b.

Estableciendo un cortocircuito trifásico en bornes de una máquina sin crónica excitada para mantener en vacío la tensión nominal, las corrientes alternas en las tres fases de inducido asumen inicialmente el valor subtransitorio. Decrecen sucesivamente en el tiempo y cuando el cortocircuito es eliminado en todas las fases, las tensiones de retorno, a régimen establecido tienen valores eficaces proporcionales a la tensión nominal según un factor menor de la unidad. El factor depende de la disminución de velocidad del rotor, de la relación entre valores eficaces presuntos de la corriente de cortocircui-

to en el instante de interrupción y en el instante inicial. Por estas razones la potencia de cortocircuito utilizable en los ensayos de los aparatos de interrupción se reduce respecto a aquella de cortocircuito suministrado por la máquina y entonces también a su potencia de cortocircuito nominal. En efecto, en los ensayos los retardos entre el instante en el cual es establecido el cortocircuito y la extinción del arco entre los contactos de los aparatos ensayados., pueden tener duración de algunos ciclos.

Se reduce esta limitación actuando sobre la excitación de la máquina.-

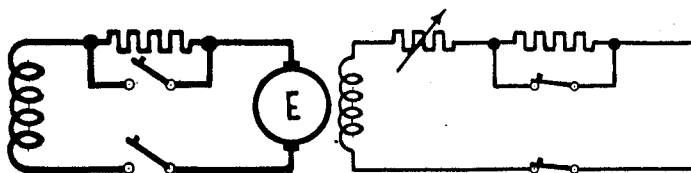
Esto en línea de principio puede obtenerse de dos maneras.

- a) incrementando la excitación en el instante en el cual se establece el cortocircuito o bien algunos centesimos de segundo antes. El aparato en ensayo se hace actuar cuando el incremento del flujo de entrehierro es adecuado para contrastar el efecto desmagnetizante de la reacción de inducido y a compensar la disminución de la tensión interna causada por la disminución de velocidad de la máquina.-
- b) Incrementando la excitación y estableciendo el cortocircuito cuando la tensión en vacío de la máquina es aumentada respecto de la nominal. El instante es elegido de manera que la tensión en vacío supere el valor nominal en el porcentaje que corresponde a lo que decrece la corriente de cortocircuito mientras dura el cortocircuito mismo.-

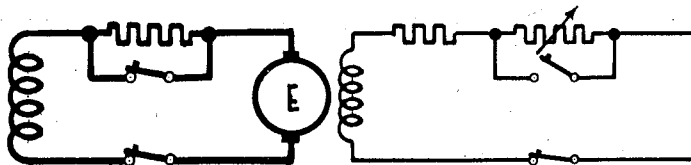
El primer método es denominado generalmente superexcitación.

La corriente de excitación debe alcanzar en un tiempo breve (igual o poco superior a la duración del funcionamiento de la máquina en cortocircuito) un valor elevado respecto al del funcionamiento en vacío. La excitatriz que permite lograr este resultado es una máquina de corriente continua de alta tensión, el inductor de la máquina sincronica es alimentado en serie con un resistor de superexcitación, oportunamente predispuesto para ser cortocircuitado. La máquina de continua tiene generalmente polos y yugos en hierro laminado, los circuitos de los polos de inductor divididos en varias ramas dispuestas en paralelo dotadas cada una de resistores adicionales. En serie con el normal resistor que regula la corriente de inductor de la excitatriz principal, se incluye un resistor adicional también predispuesto para ser cortocircuitado. La sucesión de las operaciones que deben efectuarse para la superexcitación se indica en la figura 32. Antes de excitar el alternador se regula la tensión en vacío actuando sobre la normal resistencia de regulación y manteniendo cortocircuitado todo el resistor adicional. Después de haber cortocircuitado el resistor de superexcitación y agregando el resistor adicional, se excita el alternador hasta alcanzar la tensión de ensayo actuando sobre el resistor adicional. Realizados los controles se incluye el resistor de superexcitación y simultáneamente se cortocircuita el resistor adicional. De esta manera la tensión de la excitatriz es llevada al valor requerido por la superexcitación, la tensión de la máquina sincronica se mantiene al valor de ensayo, porque la corriente de excitación se limita por la resistencia de superexcitación. La condición se mantiene hasta algunos ciclos antes del cortocircuito, una vez producido el cortocircuito y hasta el termino del ensayo, el resistor de superexcitación, y el adicional se mantienen cortocircuitados.-

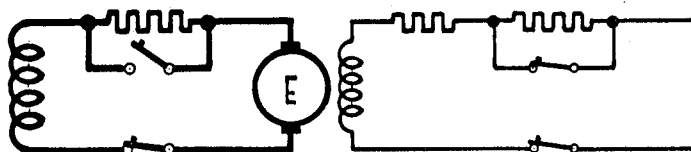
La ejecución de los ciclos de ensayo sobre los interruptores con recierre requiere artificios particulares, ya que la disminución de velocidad de la máquina influye notablemente sobre la tensión de retorno de la última interrupción. El efecto se compensa anticipando el inicio de la superexcitación respecto del instante en el cual se establece el cortocircuito.-



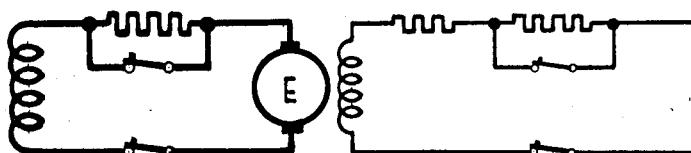
REGULACION DE LA TENSION EN VACIO DE LA EXCITATRIZ PARA EL VALOR REQUERIDO DE LA SUPEREXCITACION



REGULACION DE LA CORRIENTE DE EXCITACION PARA EL VALOR REQUERIDO POR EL FUNCIONAMIENTO EN VACIO DEL ALTERNADOR



CONDICION PRECEDENTE AL ENSAYO



CONDICION DURANTE EL ENSAYO

Siempre es necesaria la utilización de máquinas de corriente continua de elevada potencia para la superexcitación. Un generador de 33 MVA con una potencia de cortocircuito subtransitoria de 550 MVA a 10 kV requiere en los ensayos de cortocircuito trifasicos a plena potencia y a la tensión de retorno de 10 kV una potencia de excitación de 17,5 MW es decir una tensión de excitación de 2280 V y una corriente de excitación a régimen establecido de 7600A.

El segundo método propuesto para regular los valores de las tensiones de retorno a la frecuencia de ejercicio, presenta respecto del primero algunas ventajas pero su aplicación es menos general.-

En efecto este método consiste en excitar el generador antes de establecer el cortocircuito, de manera que su tensión en vacío sea superior a la de ensayo. Establecido el cortocircuito el aparato en ensayo se hace actuar de manera que la interrupción se produzca cuando la corriente y la tensión de retorno a la frecuencia de ejercicio hayan alcanzado los valores preelejididos para la prueba, llevando por ejemplo antes del ensayo el alternador a tensión 20% superior en comparación con la tensión de retorno requerida, la interrupción deberá producirse antes que la corriente de cortocircuito haya disminuido del 20% respecto de su valor subtransitorio inicial.

El método no requiere una excitatriz de mucha potencia. La puesta en tensión del alternador se puede realizar, en efecto, en un tiempo muy largo, del orden de segundos, y el cortocircuito puede establecerse cuando el generador haya alcanzado una condición de funcionamiento en régimen.

El alternador de 33 MVA a 10 kV ya tomado en consideración puede ser excitado para una tensión en vacío de 12 kV ampliando una potencia de aproximadamente 0.2 MW.-

Las corrientes de cortocircuito que solicitan la instalación son superiores a las interrumpidas y aprovechadas en los ensayos. Para realizar un ensayo de cortocircuito a la tensión nominal y a plena potencia del alternador requiriendo una tensión en vacío igual al 120% de la nominal, el generador y la instalación deben ser idóneos para soportar solicitaciones electrodinámicas superiores del 44% a las correspondientes a la corriente interrumpida. En general todos los alternadores especiales para laboratorios de potencia en condición de ser superexcitados pueden funcionar por varios segundos a tensiones superiores del 20% de la nominal, pero no son necesariamente idóneos para soportar las solicitaciones electrodinámicas consecuencia de corrientes superiores del 120% de la corriente inicial subtransitoria nominal.-

En muchos laboratorios está difundido el empleo de ambos métodos para forzar la excitación, la elección del tipo se hace según el ensayo.

En todos los ensayos con corrientes y tensiones de valores poco distintos a los nominales y cuando el ciclo incluye recierres es necesario recurrir a superexcitación.-

En cambio es ventajoso recurrir a sobreexcitar la máquina en vacío antes de establecer el cortocircuito en los ensayos de interrupción de corrientes asimétricas que no impliquen la plena potencia de cortocircuito de la máquina. En efecto, en estos ensayos el instante de apertura del interruptor es regulado para que la interrupción se produzca con poco retardo respecto del inicio del cortocircuito permitiendo así aprovechar de interrumpir una corriente asimétrica con un valor poco distinto del inicial.

A fin de aclarar las modalidades con las cuales se realizan las superexcitaciones en los ensayos de cortocircuito trifásico y monofásico, se recuerdan algunas consideraciones sobre la variación en el tiempo de las corrientes de inducido y de inductor presentadas en los capítulos precedentes.

Tomemos en consideración solo las superexcitaciones que inician simultáneamente con el cortocircuito y los ensayos en los cuales el decremento de la tensión de retorno a la frecuencia de ejercicio debido a la disminución de velocidad del rotor resulta de entidad despreciable.-

Tomemos en consideración una falla trifásica que presenta reactancias externas a la máquina de valor despreciable respecto al valor de la subtransitoria. La corriente alterna asume un valor inicial igual a la relación entre la tensión U del funcionamiento en vacío y la reactancia subtransitoria.-

$$I''_{d(0)} = (\dot{U} / \dot{X}_d'') I_n$$

El valor sostenido de esta corriente es en cambio directamente proporcional a la tensión de entrehierro E_δ (correspondiente a la excitación del funcionamiento en vacío) e inversamente proporcional a la reactancia sincrónica.

$$I_d = (\dot{E}_\delta / \dot{X}_d) I_n$$

El valor de I_d expresado en función de la tensión U requiere la definición de una reactancia inferior a la sincronica pero superior a la dispersión.

$$E_d / \dot{X}_d = U / k \dot{X}_{ld}$$

Creciendo la excitación, la tensión en vacío tiende a un valor constante, a causa de la saturación de los circuitos magnéticos. La corriente de cortocircuito permanente, por el contrario tiende a la relación entre la tensión en vacío y la reactancia de dispersión. Esta tiene generalmente un valor inferior al de la reactancia subtransitoria. Con oportunas corrientes de excitación se puede hacer asumir a la corriente de cortocircuito sostenida un valor igual, y aun superior, a aquel inicial subtransitorio de la máquina excitada a la tensión nominal.-

Al inicio del cortocircuito, las corrientes alternas de las fases de inducido generan un campo rotante, que es estacionario respecto del rotor y tiende a variar la tensión magnética del entrehierro. Al efecto desmagnetizante de la reacción de armadura se oponen los efectos conservativos de las corrientes inducidas en los circuitos amortiguadores y en el circuito de excitación. Estas corrientes a su vez no siendo sostenidas por fuerzas electromotrices decrecen en el tiempo y disipan en parte la energía electromagnética de la máquina. En consecuencia las corrientes alternas, en las fases de inducido decrecen simultáneamente a las corrientes unidireccionales de los circuitos rotoricos según constantes de tiempo iguales.-

Imponiendo en el instante en el cual se establece el cortocircuito un oportuno incremento de la corriente de excitación, se puede tender a compensar la reacción de armadura y a mantener constante la tensión magnética del entrehierro, y entonces también las amplitudes de las corrientes alternas de las fases de inducido. La compensación sin embargo debe ser conseguida en todos los instantes del funcionamiento dinámico de la máquina (teóricamente entonces por un lapso que es infinito) prácticamente hasta que las corrientes alternas de inducido asumen su valor permanente o sostenido.-

Tendiendo la duración del cortocircuito a infinito, las corrientes alternas de inducido pueden conservar sus valores iniciales si la corriente de excitación se incrementa de una oportuna cantidad ΔI_f . La ΔI_f debe ser suficiente para producir una fuerza magnetomotriz de valor igual al inicial de las corrientes alternas de inducido.-

Expresada en valor unitario (respecto de la corriente de excitación I_{fn} del funcionamiento en vacío a la tensión $X_{ad} I_n$) ellas deben satisfacer la condición:

$$\dot{X}_{ad} \dot{I}_{d(0)} = \dot{X}_{ff} \Delta \dot{I}_f$$

de la cual

$$\Delta \dot{I}_f = \frac{\dot{X}_{ad}}{\dot{X}_{ff}} \dot{I}_{d(0)}$$

tal corriente en (A) resulta

$$\Delta I_f = \left(\frac{\dot{X}_{ad}}{\dot{X}_{ff}} \right) i_{d(0)}'' \cdot I_{fn}$$

La corriente de excitación límite:

$$I_{f(0)} + \Delta I_f = I_{f(0)} + (\dot{X}_{ad} / \dot{X}_{ff}) i_{d(0)}'' I_{fn}$$

puede ser obtenida aplicando al rotor en el instante en el cual se establece el cortocircuito una tensión.

$$E_\infty = R_{rot} (I_{f(0)} + \Delta I_f)$$

Si la constante de tiempo (T_e) de respuesta de la superexcitación fuera breve respecto de la subtransitoria, los incrementos de la corriente de excitación entre el valor inicial $I_{f(0)}$ y el valor límite $I_{f(0)} + \Delta I_f$ seguirían una ley poco diferente de aquella de los decrementos de las corrientes alterna de inducido. En la práctica satisfaciendo la condición correspondiente a la corriente de excitación límite, se realizan también aquellas que permiten no hacer sufrir a la tensión magnética de entrehierro variaciones importantes.-

Las resistencias de superexcitación se calculan con la relación

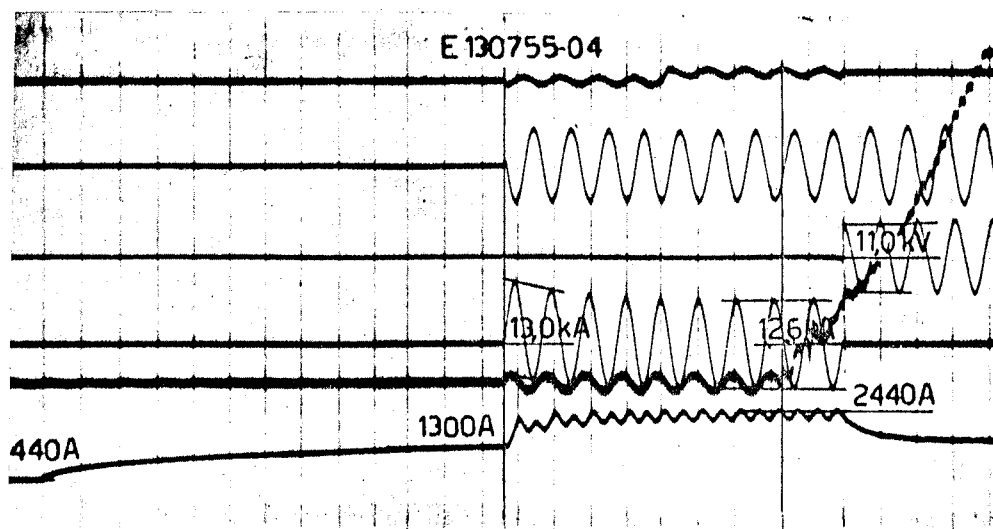
$$R_{s.ecc.} = R_{rot} [(I_{f(0)} + \Delta I_f) / I_{f(0)}] - R_{rot} = R_{rot} (\Delta I_f / I_{f(0)})$$

Porque la caída de tensión en la resistencia de superexcitación durante el funcionamiento de la máquina en vacío debe ser igual a la caída de tensión en las resistencias del arrollamiento de inductor recorrido por la corriente ΔI_f .-

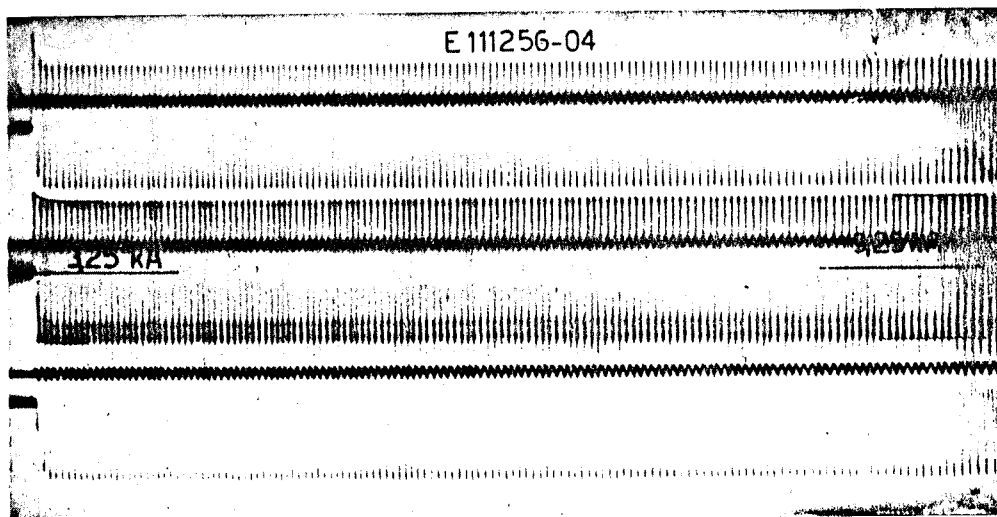
En los ensayos de cortocircuito monofásicos, las corrientes de excitación deben ser incrementadas en una cantidad ΔI_f igual a dos tercios de los valores respectivos para los correspondientes ensayos trifásicos.-

En los ciclos de ensayo que a causa de su duración, implican disminuciones apreciables de la velocidad de rotación del rotor las tensiones de retorno a la frecuencia fundamental y las corrientes alternas de cortocircuito deben ser sostenidas anticipando el inicio de la superexcitación respecto del instante en el cual se establece el cortocircuito. Generalmente si se regula la duración de la superexcitación que precede el cortocircuito y el valor de la tensión de superexcitación es posible hacer alcanzar a la corriente alterna de cortocircuito y a la tensión de retorno los valores prescritos para el ensayo.-

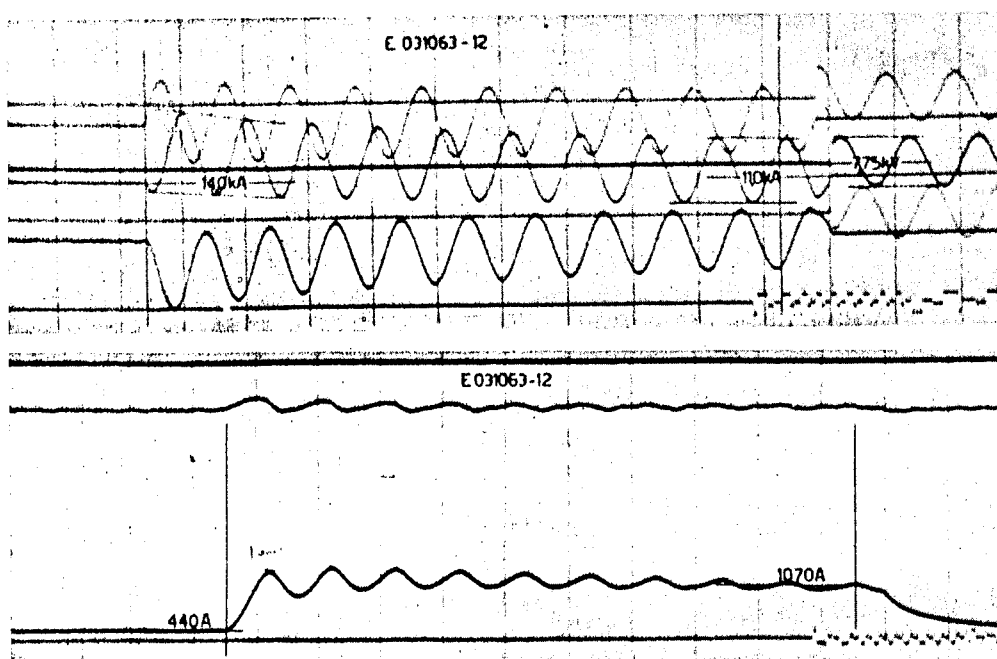
Los oscilogramas que siguen se refieren a ensayos de cortocircuito realizados sobre la máquina de 33 MVA (cuyas características se indicaron en la tabla I) y muestran la variación de las siguientes magnitudes: las corrientes en las fases de inducido, las tensiones de retorno, las corrientes del arrollamiento inductor. Explicando estos oscilogramas, en la tabla II se indican los valores de todas las magnitudes. Para cada valor de la corriente de cortocircuito se han realizado ensayos sin superexcitación, con superexcitación iniciada simultáneamente con el cortocircuito y con superexcitación anticipado.-



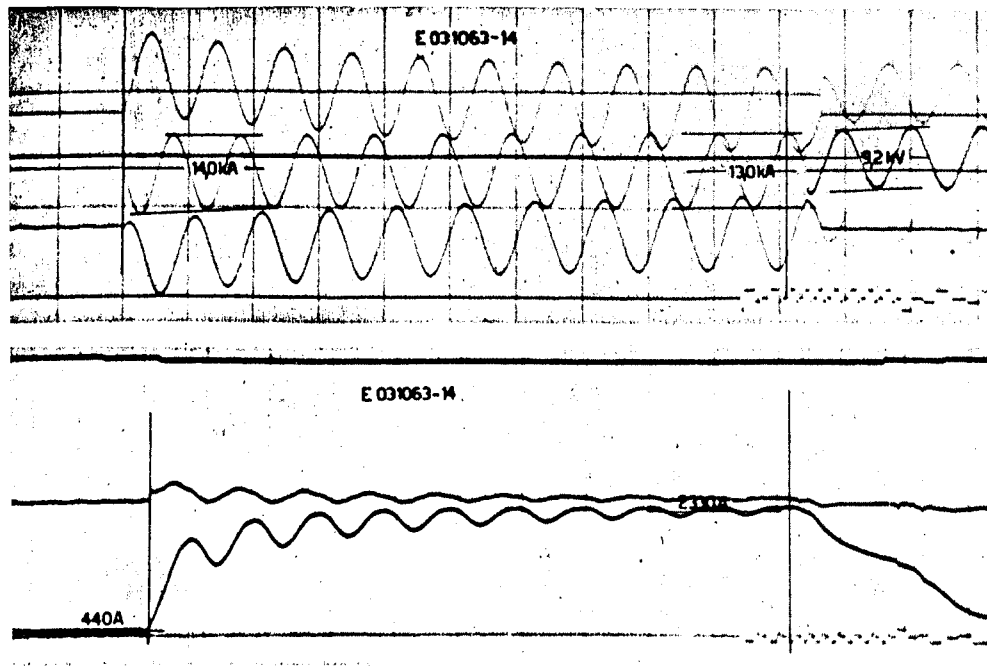
Ensayo monofásico a 11 kV con superexcitación



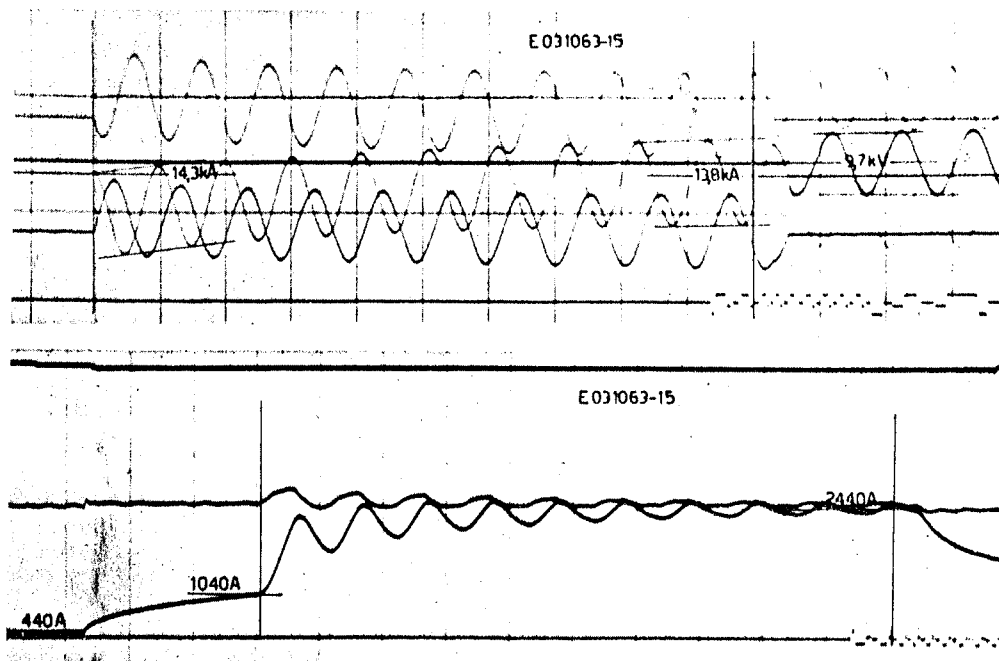
Ensayo trifásico de sobrecarga por 3 seg. con superexcitación



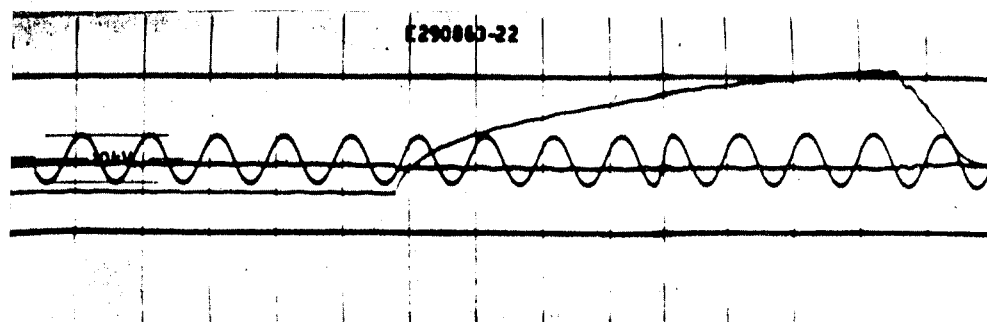
Ensayo trifásico a 10 kV - 14 kA sin superexcitación



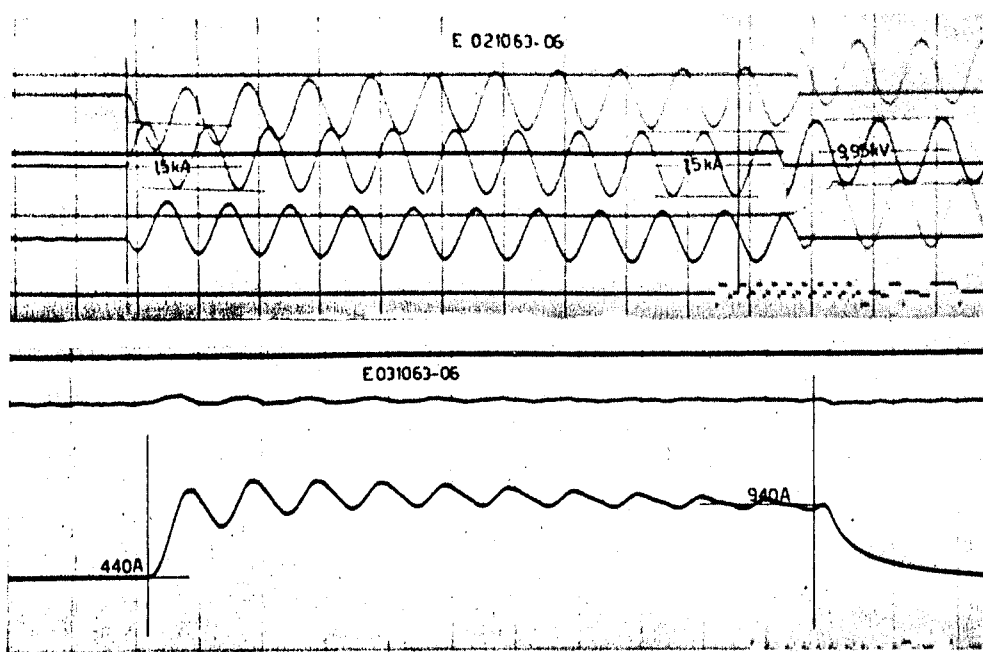
Ensayo trifásico 10 kV - 14 kA con superexcitación



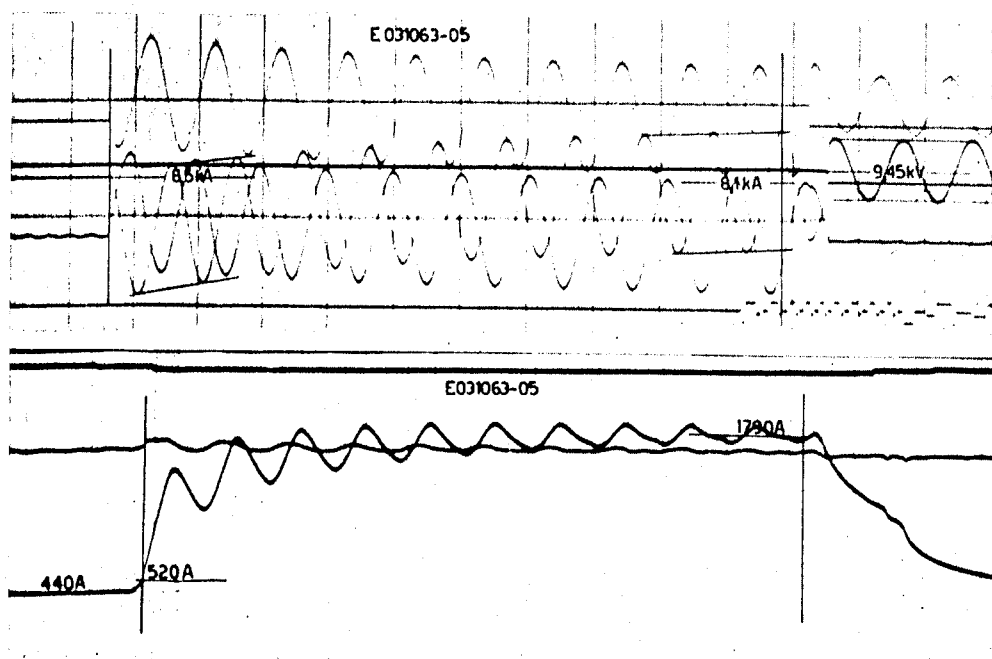
Ensayo trifásico a 10 kV - 14 kA con superexcitación anticipada



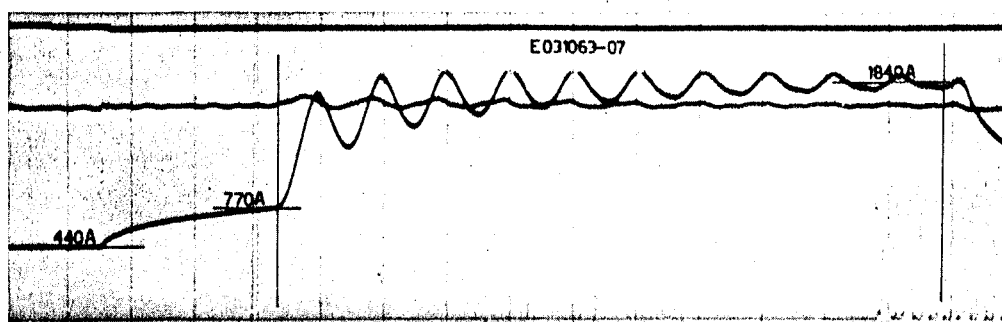
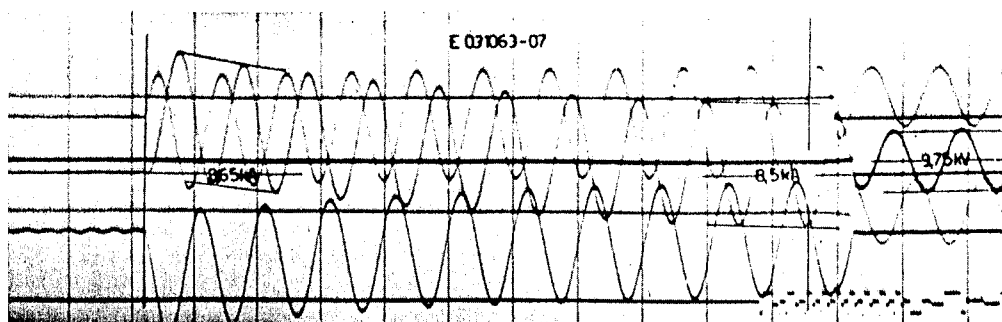
Registro de la tensión en vacío con superexcitación $R = 0,93$
Ensa



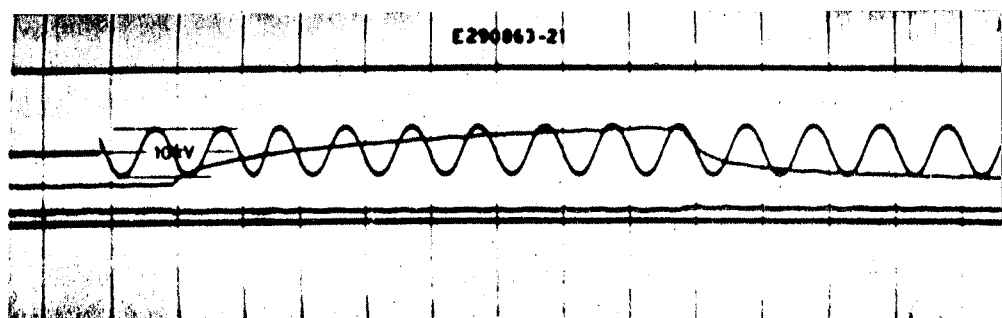
Ensayo trifásico a 10 kV 8,5 kA sin superexcitación



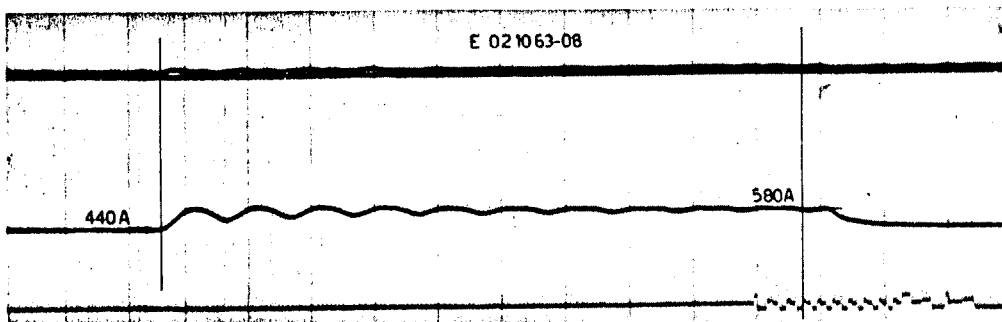
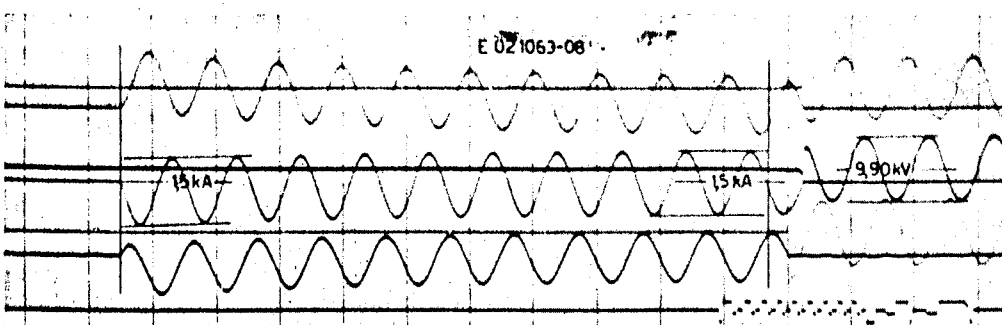
Ensayo trifásico a 10 kV 8,5 kA son superexcitación



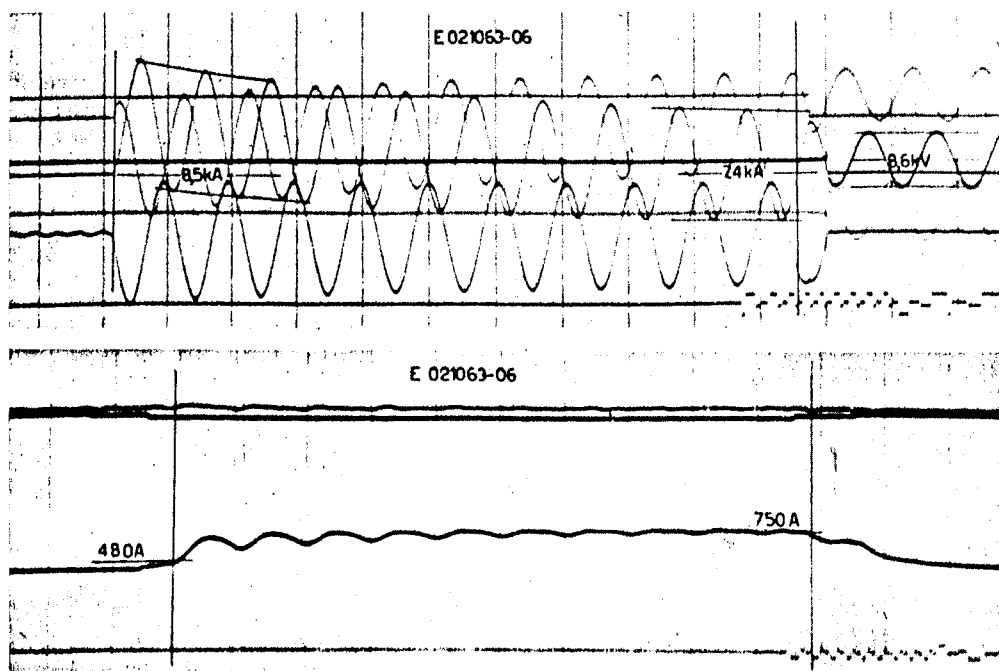
Ensayo trifásico a 10 kV 8,5 kA con superexcitación anticipada



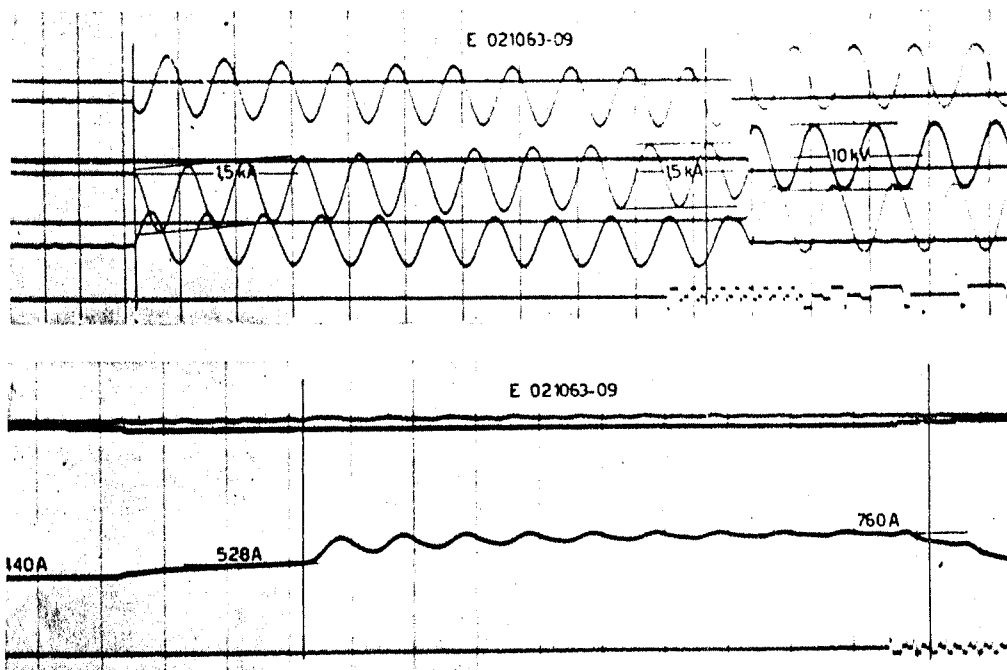
Registro de la tensión en vacío con superexcitación $R = 0,048$



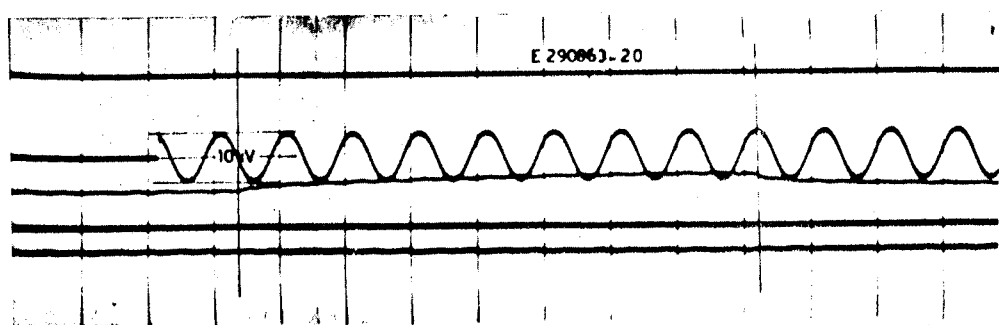
Ensayo a 10 kV 1,5 kA sin superexcitación



Ensayo a 10 kV 1,5 kA con superexcitación



Ensayo trifásico a 10 kV 1,5 kA con superexcitación anticipada



Registro de la tensión en vacío con superexcitación $R = 0,105$