

0551

DEPARTAMENTO

FACULTAD DE INGENIERIA

UNAM

Transformador de Corriente Constante / con
Derivación Magnética Saturable.

T E S I S

Que para obtener el título de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
p r e s e n t a :
JOAQUIN BOUCHEZ RIVERO

MEXICO, D. F.

1963





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.

A mis padres.

A mis hermanos.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

al Pasante señor Joaquín BOUCHER RIVERO
P r e s e n t e

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCIÓN
Núm. 73-
Exp. Núm. 73/214.2/1.-

En atención a su solicitud relativa, me es
grato transcribir a usted a continuación el tema que aprobado por esta
Dirección propuso el señor profesor Ingeniero José Ma. Ramos Salido,
para que lo desarrolle como tesis en su examen profesional de Ingeniero
MECÁNICO ELÉCTRICO.

**TRANSFORMADOR DE CORRIENTE CONSTANTE CON DERIVACION MAGNETICA
SATURABLE**

"Introducción:

Conveniencia de la eliminación de partes móviles en los trans-
formadores de corriente constante.

Capítulo I

Transformador de corriente constante.

Capítulo II

Reactor saturable.

Capítulo III

Transformador de corriente constante con derivación magnética saturable.

Capítulo IV

Dispositivos de regulación para el Transformador estático con derivación magnética saturable.

Capítulo V

Comparación del Transformador de corriente constante convencional con el Transformador de corriente constante con derivación magnética saturable."

Ruego a usted tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentarse examen profesional; así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares, en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Muy atentamente.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
México, D.F. 27 de Julio de 1963.
EL DIRECTOR


Ing. Antonio Dávalos Jaime

AW' MCO'eag

CONTENIDO DE ESTA TESIS

Introducción

<u>Capítulo I</u>	Pag. 1
Transformador de corriente constante.	
<u>Capítulo II</u>	Pag. 8
Reactor saturable.	
<u>Capítulo III</u>	Pag. 18
Transformador de corriente constante con derivación magnética saturable.	
<u>Capítulo IV</u>	Pag. 29
Dispositivo de regulación para el Transformador estático con derivación magnética saturable.	
<u>Capítulo V</u>	Pag. 53
Comparación del Transformador de corriente constante convencional con el Transformador de corriente constante con derivación magnética saturable.	

JOAQUIN ROUCHEZ RIVERO

INTRODUCCION

Desde hace algunos años se ha incrementado grandemente el uso de elementos estáticos en el diseño de los diferentes aparatos eléctricos.

Lo anterior se debe principalmente a la necesidad de tener aparatos más confiables en su operación, especialmente en los que requieran un gran número de componentes, un menor mantenimiento y frecuentemente un menor costo inicial.

Debido a la vida limitada de los bulbos electrónicos en aplicaciones industriales, éstos frecuentemente se están substituyendo por reactores saturables, amplificadores magnéticos y demás elementos estáticos que tienen una vida mayor que el lapso de tiempo que se considere para que dicho equipo resulte obsoleto.

El avance anterior se ha logrado principalmente al perfeccionamiento de los diferentes materiales magnéticos, al aumento de vida, reducción de tamaño y costo de los rectificadores llamados metálicos, a nuevos diseños para aprovechar las características anteriores y a los nuevos sistemas de producción que han hecho posible la reducción en costos para hacer económica y práctica la aplicación de estos productos.

Como ejemplo de lo anterior tenemos la "conmutación estática" para grandes molinos de azúcar que ha substituido cientos de contactos sujetos a desgaste, los cuales frecuentemente eran la causa de paros en la producción sumamente costosos.

El objeto de esta tesis es aprovechar algunas de estas nuevas ideas para el diseño preliminar de un transformador de corriente constante sin partes móviles.

CAPITULO I

TRANSFORMADOR DE CORRIENTE CONSTANTE CONVENCIONAL

a) Razones de su uso.

En el alumbrado de calles donde la distancia entre una y otra lámpara es relativamente grande, la caída de tensión en un sistema múltiple resulta frecuentemente un serio inconveniente, debido al diferente voltaje que recibe cada una de las unidades, lo que trae consigo diferente brillantez en los focos y la operación de éstos a un voltaje diferente al que están diseñados.

Lo anterior queda solucionado si todos los focos se conectan en serie y se hace pasar por el circuito la corriente nominal de ellos.

Para aprovechar más todavía el uso de los focos en serie, las unidades de voltaje medio o bajo del tipo incandescente se fabrican con un filamento más grueso que el que se usaría en el sistema múltiple, lo que trae consigo la posibilidad de operación a una temperatura igual a la del foco de la misma potencia del sistema múltiple, con lo que se aumenta su duración.

Debido a que las corrientes que se usan en sistemas serie son relativamente bajas, las pérdidas en las líneas resultan más bajas que en el circuito múltiple, además de que en sistemas en anillo (frecuentemente usados en iluminación de calles), la longitud del cable usada es menor, debido a que solo se usa un conductor entre lámparas contiguas.

Otra ventaja del sistema serie con transformador de bobina-

móvil sobre el múltiple, es el hecho que aquí mantiene la corriente constante (dentro de $\pm 1\%$), aunque haya una variación de $\pm 10\%$ en el voltaje de la línea de distribución primaria.

En conclusión, el sistema serie tiene las siguientes ventajas:

- 1.- Igual intensidad luminosa en todos los focos.
- 2.- Mayor duración de los focos y/o mayor eficiencia luminosa de éstos.
- 3.- Menores pérdidas en los conductores de las líneas de utilización.
- 4.- En ciertos casos (sistemas en anillo, instalación aérea, espaciamientos grandes entre unidades) un menor costo inicial de la instalación.

b) Inconvenientes del sistema serie.

Contra las anteriores ventajas, el sistema serie presenta los siguientes inconvenientes sobre el sistema múltiple:

- 1.- Uso de voltajes mayores (hasta 5,000 volts.), ésto trae por consecuencia la necesidad de usar aislamiento más costoso en cable, luminaria o transformador de aislamiento.
- 2.- Mayor costo inicial del transformador de corriente constante.
- 3.- Menor eficiencia del transformador de corriente constante.
- 4.- Bajo factor de potencia (sobre todo en cargas medias) del transformador de corriente constante.
- 5.- Inestabilidad para usar el sistema serie para pocas unidades.

c) Conclusiones:

La decisión para usar en un proyecto sistema serie o múltiple, puede hacerse sólo después de haber hecho un estudio económico del mismo.

El diseño de un transformador de corriente constante estático con derivación magnética saturable del cual se ocupará esta tesis tiene el objeto de disminuir o eliminar los inconvenientes del transformador de corriente constante convencional enumerados en los puntos 2, 3, 4 y 5 sin variar las ventajas del sistema serie.

d) Transformador de corriente constante con bobina móvil.

Aunque el método de análisis del transformador de corriente constante con la bobina móvil no difiere mucho comparado con el del transformador de potencia o de distribución, las características son totalmente diferentes debido a que estos últimos son esencialmente de voltaje constante.

Para lograr que un transformador proporcione una corriente constante independientemente de la carga (dentro de ciertos límites) éste debe de tener una impedancia alta y además variable. Lo anterior se logra diseñando el primario y secundario con un alto flujo de dispersión y controlando dicha dispersión moviendo la bobina de uno de ellos con respecto al otro como se muestra en la figura 1.

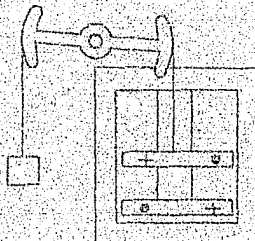


FIG. 1

El circuito magnético tiene un arreglo semejante a los transformadores acorazados, excepto que el núcleo es suficientemente largo para permitir el despiazamiento de los embobinados primarios y secundarios. El núcleo de hierro está operado a una densidad suficientemente alta como para permitir que el flujo en gran parte circule a través del entrehierro formado entre la pierna central y las laterales.

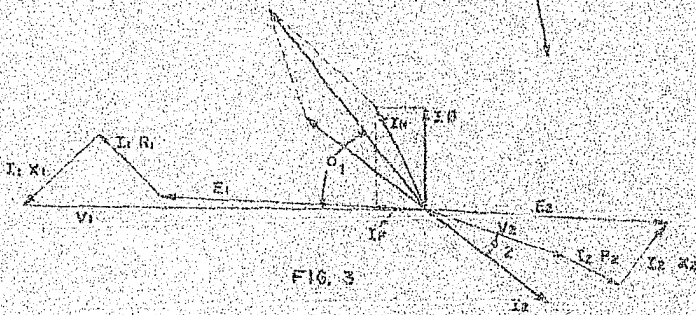
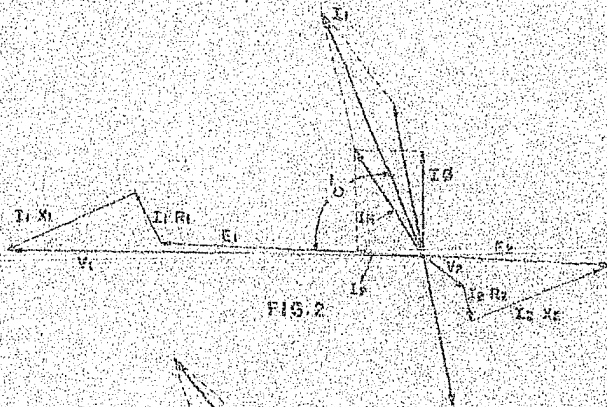
Debido a que una de las bobinas es móvil, el flujo que enlaza el secundario varía dependiendo de la posición de una bobina con respecto a la otra.

En el momento de pasar corriente por la bobina móvil (normalmente la secundaria) se crea una fuerza de repulsión producida por dicha corriente y el flujo de dispersión del primario, que levanta la bobina móvil hasta que dicha fuerza mas la ejercida por el contrapeso, sean iguales al peso de la bobina sumergida en aceite.

La fuerza de repulsión es proporcional al producto de la densidad de flujo en la posición de la bobina móvil por la corriente de éste.

Si el sistema mecánico está en equilibrio, una reducción de carga producida por la eliminación de uno o más focos causará un aumento en la corriente secundaria y su correspondiente aumento en la corriente primaria, lo que hará aumentar la densidad de flujo de dispersión produciendo una mayor fuerza que a su vez, subirá la bobina hasta una posición en donde menos flujo enlaza la bobina produciendo menor F.E.M. y por lo tanto disminuya la corriente hasta alcanzar de nuevo su valor nominal.

El diagrama vectorial unitario del transformador de corriente constante se muestra en la figura 2 con $1/4$ de carga y en la figura 3 con carga plena.



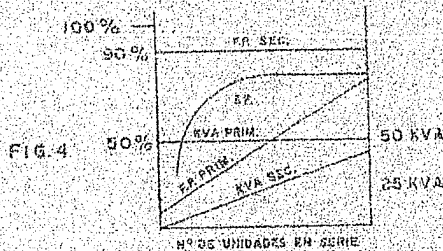
En el diagrama anterior se observan las siguientes diferencias con respecto al transformador de distribución.

- La corriente secundaria no varía con la carga y la primaria es sensiblemente constante también.
- El voltaje secundario es proporcional a la potencia de la carga.
- La variación del vector de voltaje secundario es producida por una variación en la reactancia del primario al se

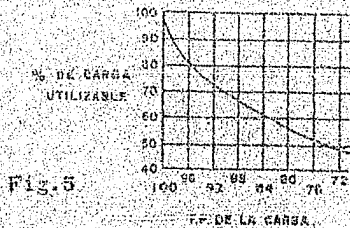
cundario, teniendo muy diferente ángulo y longitud los vectores $X_1 I_1$ y $X_2 I_2$ a medida que varía la carga aun que I_1 e I_2 permanezcan prácticamente constantes.

- d) El factor de potencia del primario y del secundario difieren bastante, siendo el primario muy bajo para pequeñas cargas.

La figura 4 muestra las características típicas tomadas de datos de prueba de un transformador de corriente constante las cuales comprueban y amplían lo encontrado por medio del diagrama vectorial.



Las anteriores características son típicas de un transformador con carga resistiva (lámparas incandescentes o mercuriales sin transformador de aislamiento), sin embargo, difieren mucho si la carga es inductiva, disminuyendo fuertemente la capacidad en watts de transformador como se muestra en la figura 5.



Se notará por la pendiente de la curva que el efecto más grande de disminución en la capacidad del transformador, es a factores de potencia cercanos al unitario.

Lo anterior debe ser tomado muy en cuenta cuando se diseña un sistema de alumbrado serie con transformadores de aislamiento ya sea incandescente, mercurial o fluorescente.

Los transformadores de corriente constante se diseñan para operación de 8 horas a una temperatura ambiente de 30°C , sin embargo, debido a que la temperatura en la noche a la intemperie es generalmente más baja, pueden operarse durante más tiempo. Esta última característica ayuda a su operación en invierno, durante el cual las noches son más largas.

La capacidad de un transformador de corriente constante se acostumbra expresarla por la capacidad de salida en KW cuando el factor de potencia de la carga es de 99.5%

Debido a las mayores pérdidas en el hierro cuando operan con poca carga, estos transformadores alcanzan su temperatura máxima no cuando operan con carga completa, sino cuando operan sin carga, esto se debe a que toda la corriente primaria (la cual se mantiene sensiblemente constante independientemente de la carga) se emplea en excitar el núcleo resultando una densidad de flujo muy alta en éste lo cual trae consigo pérdidas muy altas en el hierro cuando el transformador opera con muy poca carga. Por esta razón los fabricantes especifican que la carga mínima de operación sea de un 50%.

CAPITULO II

REACTOR SATURABLE

El reactor saturable es un dispositivo electromagnético a en el cual se controla la impedancia utilizando las propiedades no lineales de los materiales ferromagnéticos variando su saturación por medio de una señal de corriente directa.

En su forma más sencilla consta de un núcleo de hierro, con dos bobinas, una que se conecta en serie con la carga y por donde circulará corriente alterna y la otra por donde se hará pasar corriente directa para saturar el núcleo. (Figura 6)

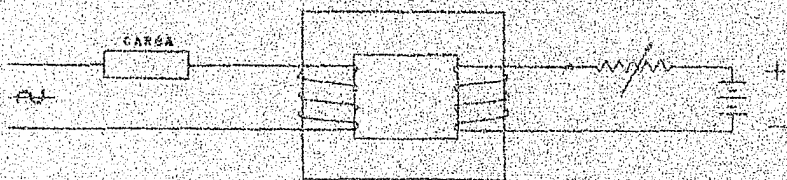


FIG. Nº 6

En una bobina con núcleo de hierro, la permeabilidad viene expresada por:

$$M = \frac{B}{H}$$

Esta ecuación define el valor de M ; el cual no es constante sino que varía con B como se aprecia en la curva de magnetización de un material ferromagnético.

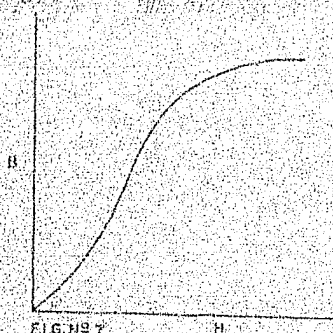


FIG. Nº 7

Sin embargo, debido a que el flujo es alterno y el material tiene histéresis el valor de M también depende de los cambios previos de magnetización a que ha estado sujeto.

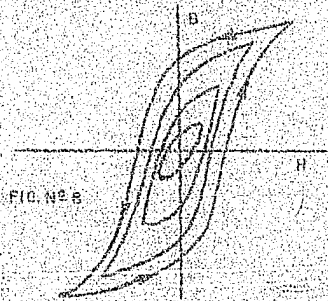


FIG. N° 8

En general, la permeabilidad (M) se define partiendo de la curva de magnetización, la cual es prácticamente coincidente con la formada por la unión de los puntos máximos de las curvas de histéresis menores.

Si al flujo alterno se le superpone un flujo unidireccional, resultará una ciclo de histéresis asimétrico y para varios valores de corriente continua en el campo los ciclos de histéresis tomarán la forma de la figura 9.

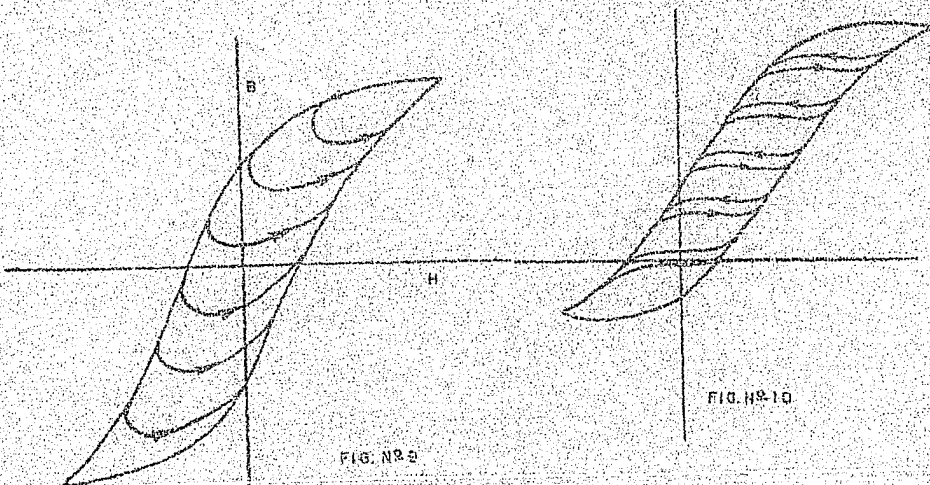


FIG. N° 9

FIG. N° 10

En todos los materiales, la permeabilidad va creciendo a medida que crece la intensidad de campo H hasta un valor en que empieza a decrecer. Esto limita el valor de la densidad de flujo B hasta el punto llamado flujo de saturación del material el cual varía de uno a otro y también con la temperatura.

El flujo magnético total que pasa por un área uniforme se define por: $\Phi = B a$

Substituyendo B por μH tenemos:

$$\Phi = \mu H a$$

$$\text{como } H = \frac{NI}{l}$$

$$\Phi = \frac{\mu NI^2 a}{l}$$

Pero como $e = \frac{d\Phi}{dt}$; una variación en la permeabilidad del núcleo del reactor trae consigo una variación en la fuerza electromotriz inducida en él y como está en serie con la carga, se podrá variar el voltaje aplicado a la misma.

Una importante característica de los materiales ferromagnéticos es su "permeabilidad incremental" cuando están sujetos a componentes directas y alternas de fuerzas magnetizantes y se define por:

$$\mu_{ac} = \frac{B_{rms}}{H_{rms}}$$

La densidad de flujo eficaz es el valor "raíz cuadrática medio" de la componente alterna de la densidad de flujo que induce una F.E.M. alterna en la bobina, y la fuerza magnetizante eficaz es también el valor "raíz cuadrático medio" de la componente de la fuerza magnetizante senoidal en fase con el flujo.

Debido a que los componentes alternos de B y H no tienen la misma forma de onda, la permeabilidad representa solamente el valor promedio.

De las curvas de histéresis con flujos superpuestos podemos sacar las siguientes conclusiones:

- La permeabilidad incremental es de un valor inferior a medida que se aumenta el flujo de corriente directa manteniendo constante cualquier valor de corriente alterna.
- Debido a que las relaciones matemáticas no son sencillas, generalmente, las características de un reactor saturable se expresan por medio de gráficas.

A continuación se muestra una gráfica de las características de la permeabilidad incremental:

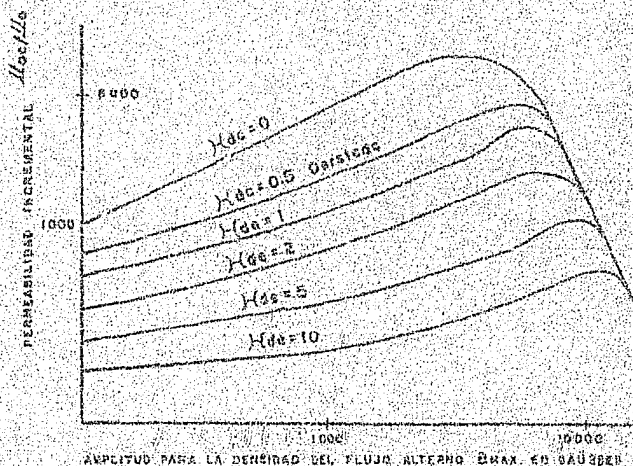
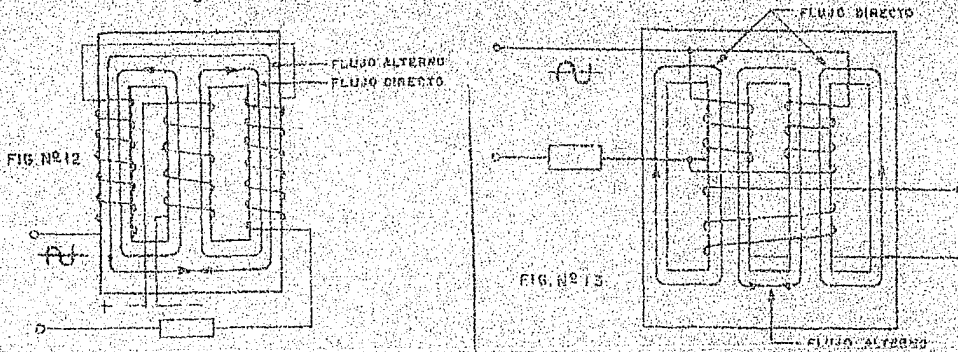


FIG. H2.11

El reactor elemental de la figura 6 tiene poca aplicación, debido a que en el embobinado de corriente directa se induce por efecto de transformador una F.E.M. alterna, la cual resulta un serio inconveniente en algunos casos.

El arreglo de tres y cuatro piernas eliminan casi totalmente el voltaje inducido en la bobina de control.



En el arreglo de tres piernas el flujo alterno circula como se muestra en la figura 12 por las piernas laterales pero no por la central por lo que no se induce voltaje en la bobina de control. Cuando se aplica una fuerza magnetomotriz directa, produce un flujo unidireccional que invade las zonas donde circula el flujo alterno que se suma a él en una de las piernas exteriores y se resta en la otra. Sin embargo, debido a la saturación, el flujo sumado a una pierna no es igual al restado a la otra, por lo que la superposición lineal no se puede aplicar.

El arreglo que más frecuentemente se usa es el de 4 piernas debido a que representa un camino más corto al flujo alterno. Figura 13.

Características de Operación

Los reactores saturables, para todos los propósitos prácticos, son una inductancia pura y su caída IZ se suma vectorialmente a la caída IR de una carga de factor de potencia unitario.

Un diseño económico evita que la corriente de excitación sea elevada suficientemente para eliminar totalmente la caída por-IZ y por lo tanto, el voltaje máximo de operación de la carga debe ser calculado tomando en cuenta la caída IZ a través del reactor cuando esté completamente saturado.

Los reactores fabricados comercialmente permiten un voltaje máximo de operación en la carga de 93%, cuando ésta tiene factor de potencia unitario; basándose en el mismo grado de saturación en el reactor, el voltaje varía con el factor de potencia de la carga de la siguiente forma:

Factor de Potencia	Voltaje máximo de la carga en porcentaje del voltaje de línea.
1.00	93 %
.98	87 %
.95	84 %
.90	80 %
.85	77 %
.80	75 %
.75	73 %
.70	72 %
.65	71 %

Condiciones Mínimas de Carga

El mínimo voltaje aplicado a la carga para un reactor dado dependerá de la excitación del reactor y de las características de ésta, y es mínima cuando no se aplica excitación de C.D. Los reactores comerciales aplican aproximadamente 10% del voltaje, lo que --

corresponde en el caso de una carga resistiva de capacidad de corriente igual a la del reactor a una potencia del 1% de la nominal. Como se nota, la potencia entregada a la carga puede variarse en un rango muy amplio.

Clasificación en K.V.A del Reactor

La capacidad de un reactor está expresada por la carga máxima de factor de potencia unitario que pueden manejar.

$$\text{K.V.A del reactor} = \frac{0.93 V \times I}{1000}$$

Si el factor de potencia de la carga no es unitario sino atrasado, el voltaje máximo será menor de 93% del de línea y la capacidad del reactor comercial deberá de ser nominalmente mayor a la carga, tomándose en cuenta la tabla dada anteriormente.

Corriente de Excitación

La potencia empleada en la excitación es solo una pequeña fracción de la de la carga que controlan y varía según el tamaño del reactor, teniendo aproximadamente los siguientes valores:

<u>K.V.A. Reactor</u>	<u>Watts de Control</u>	<u>K.V.A.Reactor</u>	<u>Watts de Control</u>
1	20	50	200
5	50	100	400
15	70	333	1,200

Se observará por la tabla anterior tomada de uno de los fabricantes de reactores que la potencia en C.D. en tamaños mayores de 5 K.V.A. es menor del 1% de la potencia entregada a la carga.

Las curvas de operación del reactor saturable, están mostradas en las figuras 13, 14, 15 y 16.

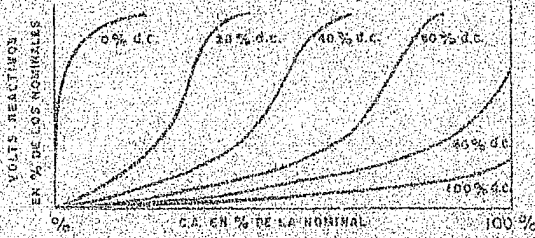


FIG. Nº 14

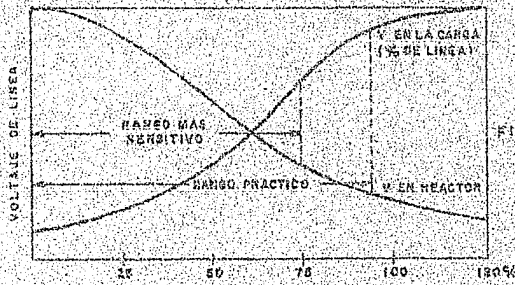


FIG. Nº 15

CURVA CARACTERISTICA PARA CARGA CON FACTOR DE POTENCIA UNITARIO.

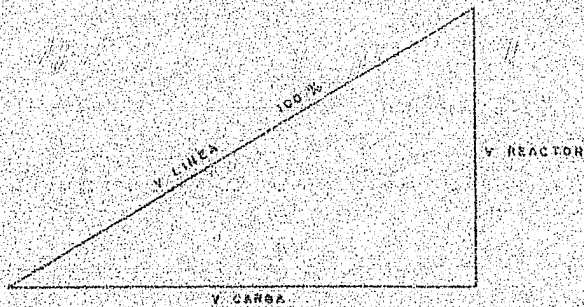
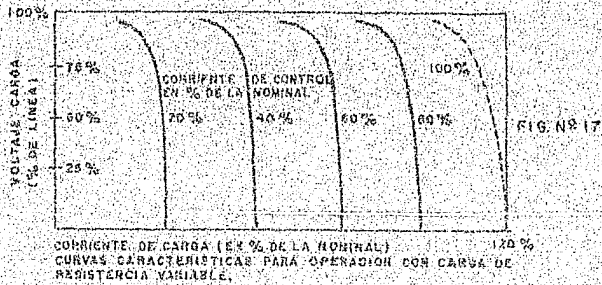


FIG. Nº 16



En la figura 17 se indica como cambia la corriente con una resistencia variable. Como se nota, hay una fuerte variación de la corriente de carga con una pequeña variación en la corriente de excitación; más adelante se hará uso de esta característica del reactor saturable aplicándola a la derivación magnética del transformador de corriente constante.

Velocidad de respuesta.- El cambio en la impedancia del reactor saturable sufre un retraso de tiempo al aplicar la señal de corriente directa, el cual depende bastante del tamaño del reactor, diseño, material magnético, etc. Experimentalmente se ha encontrado que este retraso es de aproximadamente $\frac{1}{3}$ segundo en reactores del orden de 1 K.V.A. y llega a ser de 5 segundos en reactores del orden de 300 K.V.A. Este es el tiempo en que se efectúa un cambio del 63% del total y se le designa con el nombre de "constante de tiempo".

Aplicaciones del Reactor Saturable

Donde se requiere control de la potencia entregada a la carga como en el caso de algunos hornos eléctricos, el reactor saturable se puede usar en conjunto con termopares y amplificadores mag

néticos, manteniendo constante la temperatura.

Se usan también en aplicaciones donde hay que limitar la demanda máxima de dos o más hornos. Cada uno de los hornos es llevado a la temperatura de operación mientras el otro se mantiene a -- temperatura de trabajo con baja potencia.

Una de las aplicaciones más antiguas del reactor saturable, es el control de tensión para el encendido de focos en los teatros.

Para aplicaciones donde se requiera corriente constante, como en el caso de líneas electrolíticas.

Para arranque o control de motores, ésta es una de las aplicaciones que se están extendiendo más actualmente sobre todo en el uso de control de motores para grúa, en el cual se pueden eliminar un gran número de contactores y efectuar aceleraciones y desaceleraciones con más suavidad.

Conclusiones

El reactor saturable es un dispositivo electromagnético de gran aplicación en los sistemas de control, de construcción sencilla y durable, muy eficiente el cual tiene un campo de aplicación creciente.

Parte de la información de este capítulo será utilizada para el diseño del transformador de corriente constante con derivación magnética saturable y para su sistema de control.

CAPITULO III

Transformador de Corriente Constante con Derivación Magnética Saturable (T.C.C.D.S.)

Debido a que esta tesis está hecha acerca de un aparato que se ha construido a escala y muy principalmente debido a que el sujeto no contó con todas las facilidades de laboratorio, esta tesis analiza cualitativamente más que cuantitativamente algunos aspectos del transformador de corriente constante con derivación saturable.

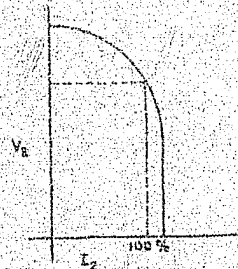
Con objeto de encontrar un transformador de corriente constante que elimine los inconvenientes del convencional, mencionados en el Capítulo I, el que escribe esta tesis ha diseñado un transformador de corriente constante cuyo principio de operación se basa en la saturación por medio de corriente directa de una derivación magnética entre el primario y secundario.

Transformador de Alta Reactancia.

Cuando se observan las características de un transformador de alta reactancia se nota la semejanza que hay entre éste y el transformador de corriente constante, de bobina móvil (Figura 18).



FIG. N.º 18

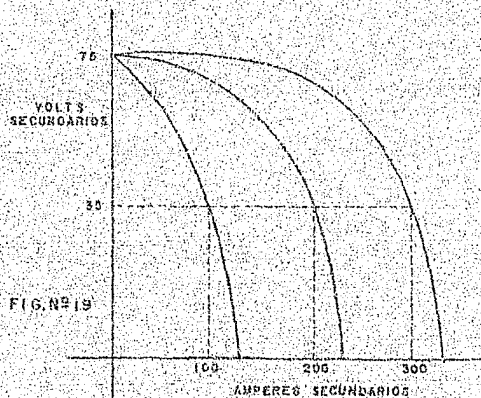


Estos transformadores se usan principalmente donde se requiere un voltaje en circuito abierto alto y una corriente de corto circuito baja (aproximadamente 20% mayor que la nominal). Sus principales aplicaciones son en tubos neón fluorescentes y mercuriales; para ignición de quemadores, etc.

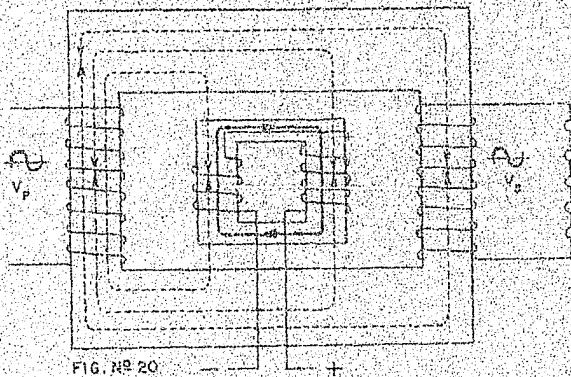
Como se nota en la curva de regulación del transformador de alta reactancia, después de ciertos límites, el crecimiento de la corriente es relativamente pequeño.

En el diseño de estos transformadores la corriente de corto circuito, así como la corriente con resistencias de carga bajas, se puede controlar por medio de una variación en el entrehierro, lo cual en algunos transformadores de soldadura de arco se hace por medio de una derivación magnética móvil con la que se hace variar el entrehierro y por lo tanto la corriente de corto circuito.

La figura 18 muestra la forma característica de las curvas de regulación para diferentes entrehierros en los transformadores de soldadura.



Se podría construir un transformador de corriente constante que funcionara con este principio, sin embargo, resultaría aún más complicado mecánicamente que el transformador con bobina móvil. Como se vió en el Capítulo del reactor saturable, se puede variar la reluctancia del circuito magnético por medio de una circulación de corriente directa. La saturación se puede limitar casi exclusivamente a la derivación magnética, pudiendo variar su intensidad, -- con lo cual se logra el mismo efecto que si se aumentara y disminuyera el entrehierro en el transformador de alta reactancia.



En la figura 20 se muestra en forma esquemática el transformador de corriente constante con derivación magnética saturable.

Si se aplica un voltaje alterno en el primario se formará un flujo en la pierna que abraza su bobina, este flujo será prácticamente constante mientras no haya variación en el voltaje aplicado, pero dicho flujo tratará de cerrar su circuito por el camino que le ofrezca menos oposición, que en el caso de que no haya carga será principalmente a través de la pierna del secundario. Hay que hacer notar que la parte del núcleo donde circula el flujo al-

terno trabaja a una densidad moderada, no como en el caso del transformador de corriente constante con bobina móvil donde se trabaja con altas densidades con objeto de obtener bastante flujo de dispersión; el voltaje obtenido en el secundario cuando no hay carga será prácticamente $V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1$

Cuando se aplica carga al secundario, éste creará una fuerza contramagnetomotriz que se opondrá a la circulación del flujo producido por el primario, por lo que éste, al encontrar una oposición en la pierna del secundario, en parte pasará por el entrehierro para cerrar su circuito. La fuerza contramagnetomotriz producida por el secundario es proporcional a la corriente que circula por él, y si no hay saturación en la derivación magnética el flujo que circula por ella es prácticamente proporcional a la corriente del secundario (para determinado factor de potencia). Ahora bien, si se coloca una carga resistiva y de valor fijo y se va aumentando la reluctancia de la derivación magnética al hacer circular una corriente directa por su bobina, la corriente que circule por dicha resistencia irá aumentando, lo anterior es debido a que al irse saturando la derivación magnética, el flujo (prácticamente constante) que abraza el primario, encontrará una mayor reluctancia a su paso por la derivación y un camino menos difícil si una mayor parte de él circula por la pierna del secundario, lo cual inducirá una mayor F.E.M. en el secundario y consecuentemente una mayor corriente circulará por la carga.

En otras palabras, lo que se obtiene al variar la saturación de la derivación magnética, es una variación en la reactan

cia de las bobinas primaria y secundaria del transformador, el cual es el mismo efecto que se obtiene al desplazar una bobina con respecto a otra en el transformador de corriente constante convencional.

Debido a que en la derivación magnética circula un flujo alterno se inducirá un voltaje en cada una de sus bobinas, lo que traería efectos no deseables en la alimentación de corriente directa, sin embargo, este efecto se elimina casi totalmente conectando los voltajes alternos producidos en las bobinas en oposición, lo que además nos proporciona un flujo directo que circule por la derivación magnética casi exclusivamente por estar separada ésta del núcleo del transformador propiamente dicho, por medio de un pequeño entrehierro.

Pérdidas Comparativas entre el Transformador de Corriente constante convencional y el Transformador de corriente constante con derivación saturable.

En el transformador de corriente constante con derivación saturable la corriente de excitación es menor debido a que en la parte del transformador donde circula flujo alterno, la densidad es semejante a la usada en los transformadores de distribución (15 kilogausses/cm² aproximadamente), para lo que se necesitaría aproximadamente 5 voltz-ampere/ca de excitación, con una pérdida de 2 watts/Kg aproximadamente usando acero al silicio y una frecuencia de 60 ciclos. En los transformadores de corriente constante convencionales, como se dijo anteriormente, se trabaja la laminación a una alta densidad con objeto de obtener un flujo elevado entre las piernas laterales y la central,

lo que trae consigo que la corriente primaria sin carga sea prácticamente igual a la obtenida con carga plena y las pérdidas en el hierro lleguen a ser varias veces mayores y a su vez muy superiores que en el transformador de corriente constante con derivación saturable. Además, hay que tomar en cuenta que éste se puede hacer más compacto por no necesitar espacio para que se desplace una de las bobinas y por lo tanto usar menor cantidad de hierro. Es interesante hacer notar que las pérdidas en el transformador de corriente constante convencional son mayores sin carga que a plena carga, esto es debido como se dijo anteriormente, a que la mayor parte del núcleo trabaja a una alta densidad de flujo sin carga porque la bobina secundaria no produce una fuerza contramagnetomotriz, la cual disminuye la densidad de flujo en ciertas zonas del núcleo.

Si lo anterior lo comparamos con las pérdidas en el hierro de un transformador de distribución pequeño (que trabaja a una densidad de flujo semejante al T.C.C.D.S.) las cuales son aproximadamente 2% de su capacidad, nos damos cuenta de las enormes pérdidas en el hierro del transformador de corriente constante convencional.

Respecto a la derivación magnética del T.C.C.D.S. el análisis de las pérdidas en el hierro son semejantes a las del reactor saturable. Esto es, las pérdidas en el hierro son variables y disminuyen a medida que la corriente directa lo satura debido a que la curva de histéresis tiene un área menor, por ser menor la variación de flujo; por otra parte, las corrientes parásitas también son de menor magnitud.

Respecto a las pérdidas en el cobre, es difícil comparar entre la de los dos transformadores, sin embargo, encontramos que debido a la alta densidad de flujo con que opera el transformador de corriente constante convencional, el núcleo resulta de menor sección para un mismo número de vueltas primarias y para una misma densidad de corriente en el cobre, la bobina resulta de menor peso debido a que el perímetro promedio de las vueltas es menor. Lo anterior no es rigurosamente cierto debido a que en un diseño se pueda aumentar o disminuir el número de vueltas primarias y secundarias, disminuyendo o aumentando la sección recta del hierro, manteniendo una densidad de flujo constante, lo cual hace variar la relación de las pérdidas de hierro y cobre.

Para darnos una idea numérica de las pérdidas de hierro y cobre a continuación anotamos las de un transformador de 15 K. W. de corriente constante con bobina móvil, las de uno de 15 K. V.A. de distribución publicadas por un fabricante y las pérdidas estimadas del transformador de corriente constante con derivación saturable:

	Tra. Dist.	Tra. C.C.	Tra. C.C.D.S.
Pérdidas Fe	95 Watts	*350 Watts	130 Watts
Pérdidas Cu	180 Watts	370 Watts	230 Watts
Pérdidas Totales	275 Watts	720 Watts	360 Watts
% Ef. a FP=1 y plena carga resistiva.	96 %	95.2 %	97.5 %

*Las pérdidas del hierro suben con cargas medias.

Indudablemente que las pérdidas totales del transformador de corriente constante con derivación saturable, son mayores (con iguales materiales y trabajando a igual densidad de corriente y flujo) que los de distribución, debido a que tiene otro elemento que es la derivación saturable, sin embargo, sabemos por datos obtenidos en reactores que son pequeñas aunque no despreciables. Por ejemplo, sabemos que la potencia necesaria para saturar un reactor (dentro de los límites prácticos) es aproximadamente 1/2% (para 15 K.V.A.) y que las pérdidas en el hierro son aproximadamente 0.25%, de aquí se han tomado los datos anotados en la tabla anterior.

Si evaluamos las pérdidas durante la vida del transformador, aceptando la cifra de 12 pesos por watt de pérdida en operación de 24 horas y 5 pesos para operación de 10 horas diarias como es el caso de los transformadores de alumbrado público, encontramos que el valor en pesos se debe acreditar al transformador de corriente constante con derivación saturable es:

$$(720 - 360) 5 = 1\ 700 \text{ pesos.}$$

Formación de Armónicas.

En los transformadores debido a que el material ferromagnético del núcleo tiene una curva de magnetización en la que la densidad de flujo no es una función lineal de la fuerza magnetomotriz, se forman armónicas en la corriente de excitación; en los transformadores de potencia y distribución, en los que el voltaje aplicado es esencialmente senoidal, el flujo se debe ajustar a una senoide también para poder inducir una F.E.M. de

igual forma; para poderse efectuar lo anterior la corriente resulta con multitud de armónicas, sin embargo, la F.E.M. en el secundario debe de tener igual forma de onda que el flujo que la produjo, o sea senoidal.

En lo que respecta a la forma de onda, lo anterior no se aplica a los transformadores en los que el enbobinado secundario no abraza totalmente al flujo senoidal producido por el primario. En algunos diseños se busca que la forma de onda de la F.E.M. secundaria difiera de la senoidal como ocurre en el caso de los transformadores usados para suministrar el voltaje de ignición en algunos rectificadores gaseosos. (Figura 21)

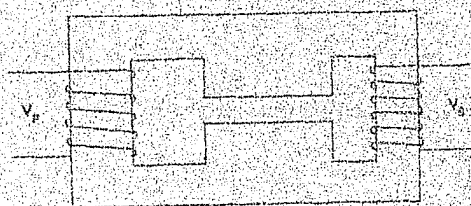
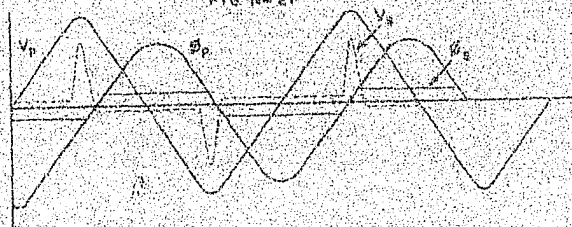


FIG. N.º 21



En el transformador de la figura anterior, el área de la sección recta del núcleo del secundario es bastante más pequeña que la del primario, con objeto de que se sature mucho antes que el resto del circuito magnético, lo que trae consigo que el máximo valor de flujo sea alcanzado en un período de tiempo mucho menor que en el núcleo primario, resultando que en el se-

secundario solo se induce un voltaje apreciable durante parte del ciclo. En el transformador de corriente constante con derivación magnética saturable, sucede algo semejante excepto que la pierna secundaria no se satura sino la derivación magnética.

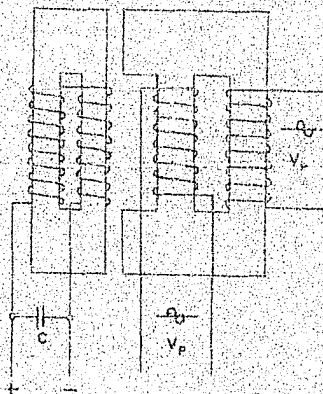


FIG. Nº 22

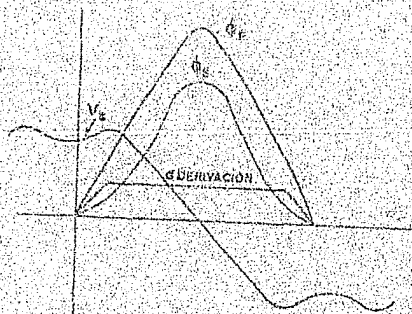


Fig. 21a

En la figura 21a se muestran los flujos y las F.E.M.'s. inducidas cuando la derivación magnética está parcialmente saturada con C.D.

Debido a que al primario se le está aplicando un voltaje senoidal, el flujo primario es también senoidal, pero como la derivación se satura, el flujo que circula por ella no es senoidal y como el flujo primario es igual a $\phi_p = \phi_s + \phi_d + \phi_{\text{aire}}$ el flujo que circula por el secundario y por el aire tampoco serán senoidales debido a que se suman con flujo de la derivación, dando por resultado un voltaje secundario con armónicas como se muestra en la figura 21, lo anterior se elimina parcialmente in

tercalando un condensador en las bobinas de excitación para hacer circular el voltaje inducido en una de las piernas de la derivación.

CAPITULO IV

Dispositivos de Regulación para el Transformador
Estático con Derivación Magnética Saturable

En el transformador de corriente constante convencional no se necesita un dispositivo extra para mantener la corriente constante debido a sus características eléctricas, sin embargo, en el de derivación magnética no se puede lograr una muy buena regulación de la corriente si no se emplea un sistema de "Control Cerrado".

Aplicando la teoría y por medio de pruebas realizadas se encontró que sin usar regulador de corriente, se obtiene una corriente casi constante cuando se coloca un condensador con una capacitancia adecuada en paralelo con la carga como se muestra en la figura 22a.

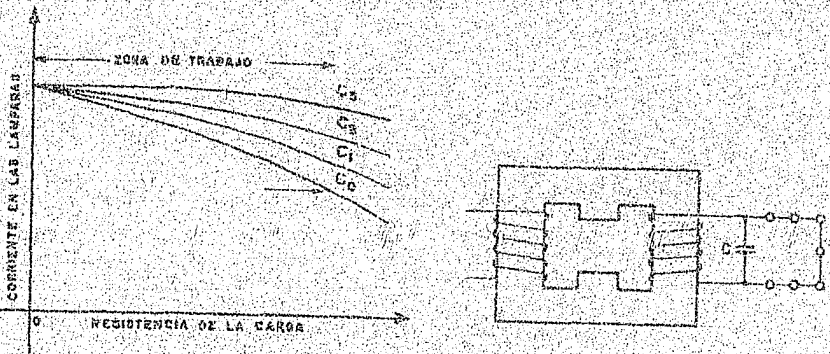


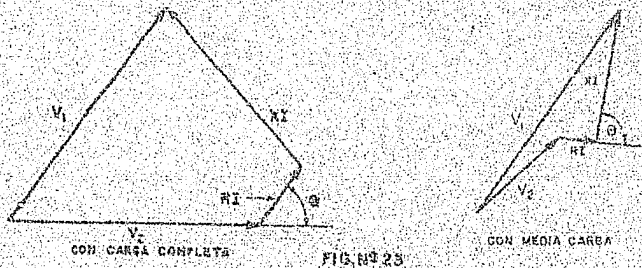
FIG. Nº 22A.

En corto circuito la corriente será la nominal, (el transformador se diseña con un 100% de impedancia) el factor de potencia

cia es muy bajo. Hay que hacer notar que en estas condiciones el efecto del condensador es nulo.

A medida que se van colocando lámparas en serie, el factor de potencia va subiendo debido a que se introduce en el circuito una carga resistiva y al efecto del condensador, hasta un punto en que el factor de potencia es adelantado.

La operación del transformador en estas condiciones, es similar a la de una línea de transmisión con reactancia muy elevada. Suponiendo un transformador con relación 1:1 se obtendrá el diagrama vectorial de la figura 23.



Como se nota, con plena carga el factor de potencia es adelantado, pero con poca carga es atrasado. Lo anterior se debe a que el condensador conectado a la salida del transformador suministra una corriente proporcional al voltaje aplicado, siendo éste desde luego, mayor mientras más carga haya.

Para evitar un sobrevoltaje peligroso en el condensador cuando por cualquier circunstancia el circuito de la carga quedara abierto se debe discurrir la pierna secundaria con una densidad de flujo cercana a la saturación, así si el circuito de la carga queda abierto el voltaje no aumentará más de un 20 ó 30% del nominal secundario con plena carga. Cabe hacer notar que ---

los diagramas vectoriales no son aplicables (sino con grandes correcciones, lo cual los hace imprácticos) cuando se trabaja el material magnético más allá de la "Rodilla" de saturación.

El circuito de transformador-condensador descrito anteriormente se puede calibrar para obtener una corriente razonable constante desde corto circuito a plena carga, siempre que el voltaje primario sea constante, sin embargo, debido a que ésto rara vez sucede, deberá diseñarse con un sistema de control adecuado para que el transformador proporcione una corriente prácticamente constante desde corto circuito a plena carga aun con la variación que normalmente se registra en las líneas primarias.

Reguladores de Corriente y de Voltaje

Los reguladores de corriente que pueden ser usados en el transformador de corriente constante con derivación magnética saturable son básicamente iguales a los reguladores de voltaje de los generadores los cuales constan principalmente de los siguientes elementos:

- 1.- Elemento comparador entre el voltaje o corriente de salida y un "Patrón" que puede ser magnético, mecánico o eléctrico; de este elemento saldrá una señal de error, dicho error será la diferencia entre la señal de salida y el patrón.
- 2.- Amplificador de error; debido a que la potencia de la señal de error es comparativamente muy pequeña, ésta debe ser amplificada antes de alimentarla al transformador o generador, la señal amplificada debe

rá ser conectada de tal manera que tienda a anular el error. (Figura 24)

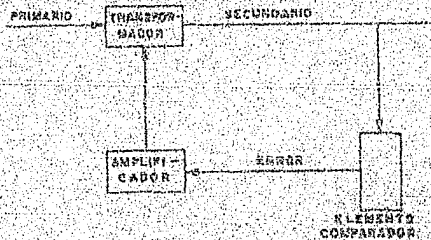


FIG. Nº 24. DIAGRAMA ELEMENTAL DEL REGULADOR

Cuando los alternadores se operan en paralelo los reguladores se deben de proveer de un elemento que divida la carga reactiva proporcionalmente a la capacidad de cada uno de ellos, además de tener un % de regulación y velocidad de respuesta semejantes.

En ciertos casos los reguladores de voltaje se proveen de un elemento compensador de caída de voltaje en la línea.

Como elementos auxiliares los reguladores generalmente llevan un elemento amortiguador para evitar el efecto de oscilación (Hunting).

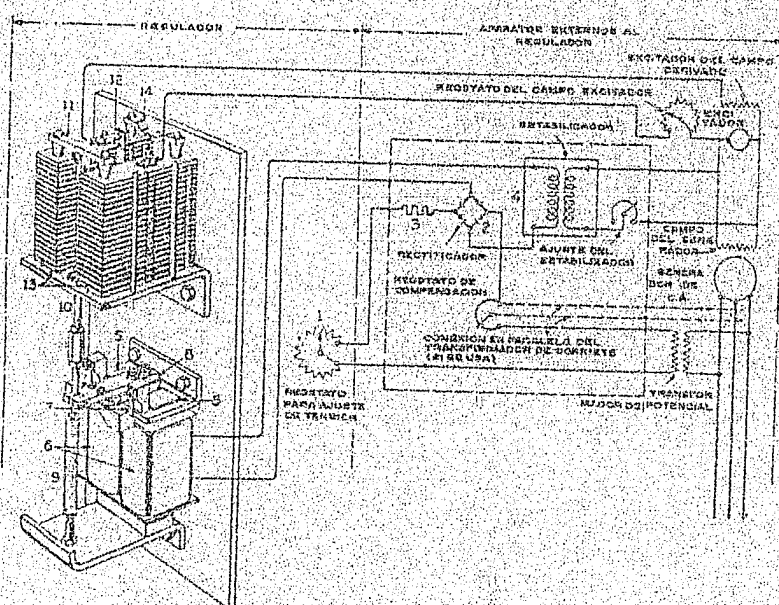
Los principales tipos de reguladores de voltaje de generador son los siguientes:

- 1.- Reostático directo.
- 2.- Vibratorio.
- 3.- De voltmetro de contacto con reóstato motorizado (in directo).
- 4.- De amplificador rotatorio.
- 5.- Estático de amplificador magnético.

6.- Estático de rectificador controlado.

1).- En los reguladores con partes móviles del tipo reo-
tático el "Patrón" es un resorte que actúa en oposición a la --
fuerza producida por un solenoide; la fuerza producida por cada
uno de ellos será igual y contraria y para cada valor de la --
fuerza del solenoide (Valor proporcional al voltaje o corriente)
el dispositivo mantendrá una posición determinada y debido a --
que está mecánicamente conectado con un reóstato éste variará --
la excitación del generador o transformador.

Este tipo de regulador se usa en generadores de 5 hasta
25000 K.V.A., habiendo una variedad muy grande de ellos (Figura
25)



2).- Los reguladores del tipo vibratorio se han usado casi universal y exclusivamente para regular el voltaje y la corriente de los automóviles y camiones, sus principales ventajas son su bajo precio y peso.

En la década de los treinta debido al aumento de la carga eléctrica en los automóviles y al deseo de mantener el acumulador en un tamaño razonable, se encontró la necesidad de substituir el generador de tres escobillas sin regulador adicional, por un generador con excitación derivada convencional y un regulador de voltaje apropiado.

El sistema de regulación debe mantener un nivel de voltaje suficiente para conservar la batería cargada y proteger el generador de una sobrecarga.

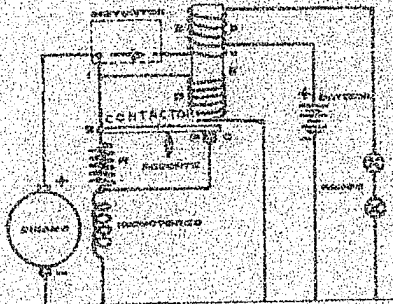


FIG-26

En los últimos años se han experimentado y construido reguladores de voltaje para uso automotriz totalmente estáticos; debido a su alto costo todavía no se han hecho de uso general, pero por su muy larga duración se espera que eventualmente substituyan a los de tipo vibratorio.

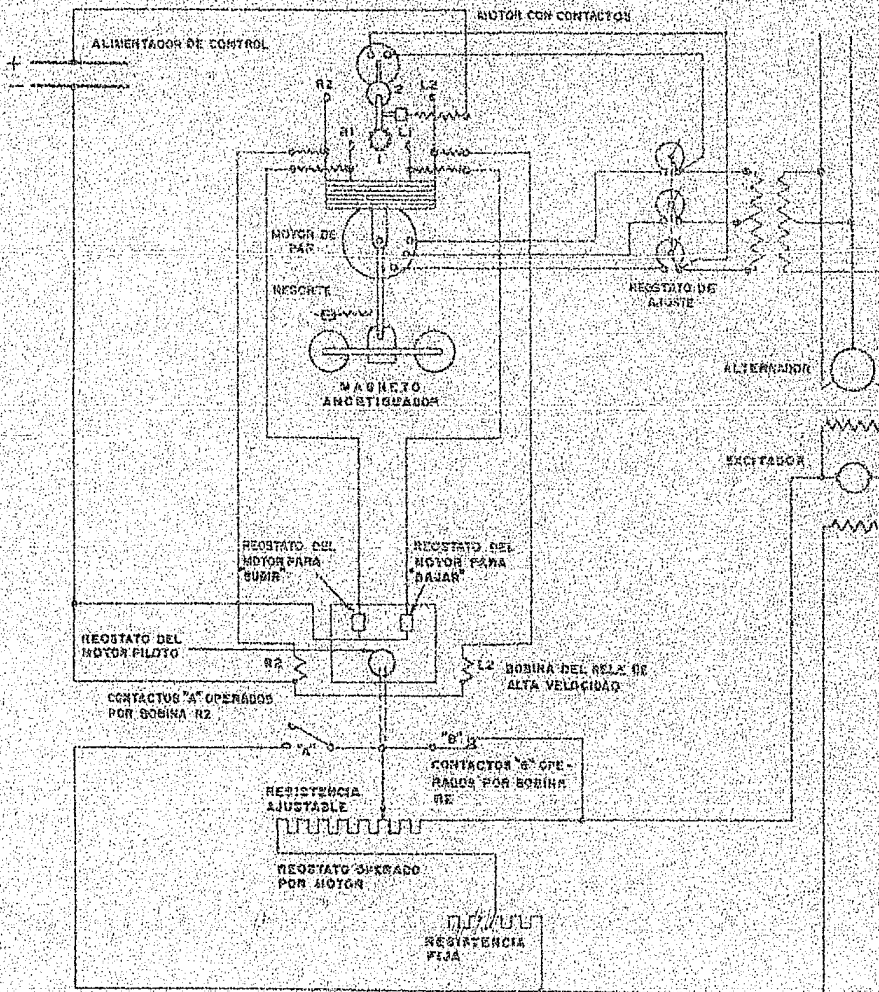


FIG-27

3).-- Regulador de acción indirecta. Este tipo se usa para grandes alternadores (generalmente mayores de 10,000 K.V.A. de baja velocidad) cuyos excitadores están más allá del rango -

de los reguladores de acción directa. Usan un reóstato de campo del excitador operado por un motor energizado por medio de unos contactos sensitivos a pequeños cambios de voltaje, y unos contactos de respuesta rápida que ponen en corto circuito o introducen un grupo de resistencias en caso de un cambio brusco de voltaje hasta que el reóstato motorizado se mueve para tener el control.

4).- Regulador de amplificador rotatorio. Cuando el generador es muy grande (generalmente más de 25,000 K.V.A.) y se requiere una velocidad de respuesta muy rápida y eliminar los contactos del regulador indirecto de reóstato motorizado, se usan generalmente los reguladores con amplificador rotatorio que reciben los nombres comerciales de "amplidyne", "rototrol" y "regulax".

Frecuentemente dicho sistema de regulación lleva amplificadores magnéticos en los primeros pasos de amplificación como el que se muestra en la figura 28.

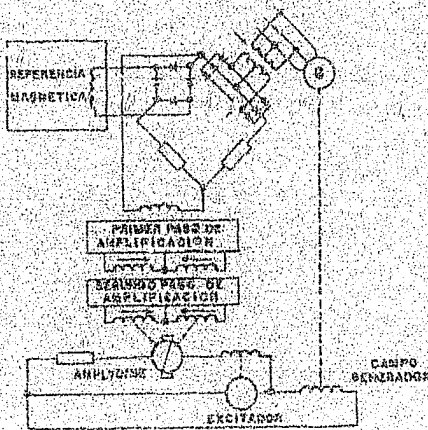


FIG. N° 28

Dichos amplificadores rotatorios tienen una capacidad de amplificación de 1: 10,000 por lo que se puede lograr una regulación de 1% o mejor. Algunos de dichos sistemas de regulación usan buibos electrónicos, sin embargo la tendencia general en la industria es hacia la substitución de amplificadores electrónicos por amplificadores magnéticos debido a su mayor seguridad de operación y vida casi ilimitada, sin embargo el amplificador magnético tiene ciertas limitaciones respecto a su tamaño, esto es, en el uso práctico se ha encontrado que sus aplicaciones se limitan generalmente a capacidades de salida entre 1 y 10,000 V. A. en tamaños mayores resulta más conveniente usar el amplificador rotatorio, principalmente debido a su costo.

5).- Regulador estático con amplificador magnético. En las primeras etapas de amplificación del regulador descrito en el punto anterior se usaron amplificadores estáticos, cuando la potencia de excitación requerida no es muy grande se puede alimentar el campo directamente de estos amplificadores. Debido a que este sistema resulta uno de los más convenientes para el transformador de corriente constante, a su menor divulgación y a su mayor uso en el futuro se describirá más ampliamente el funcionamiento de cada uno de sus componentes.

Aunque el reactor saturable descrito en el capítulo 17, es también un amplificador magnético y su teoría en ciertos aspectos es semejante a la del amplificador magnético moderno, debido a sus diferentes aplicaciones, circuitos usados y características, éste requiere un estudio separado.

Materiales del Núcleo para el Amplificador Magnético

Los materiales magnéticos para amplificador deben de tener básicamente las siguientes características:

- a) Una curva del ciclo de histéresis lo más cercano posible a un rectángulo con objeto de obtener una saturación brusca del material magnético.
- b) Una alta permeabilidad con objeto de reducir la corriente de magnetización.
- c) Bajas pérdidas de histéresis y de corrientes de Foucault.

Además de las características anteriores se procura que el material tenga estabilidad en sus propiedades a diferentes temperaturas, facilidad de fabricación tanto del material como de los núcleos, precio razonable, etc.

Las aleaciones que se usan en los materiales de alta rectangularidad, tienen una composición de 50% de níquel aproximadamente, recibiendo los nombres comerciales de Deltamax, Orthonol, 48 Alloy e Hypernik.

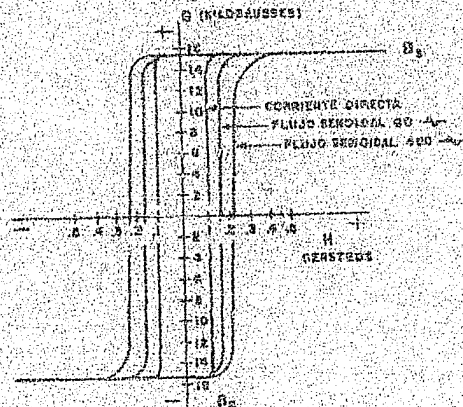


FIG. Nº 23 CICLO DE HISTÉRESIS PARA "DELTA MAX"

Los núcleos se fabrican en forma de toroide es decir -- continuamente una cinta de 0.002 a 0.004 pulgadas de grueso o -- bien, anillos en forma de rodaja un poco más gruesos; en otros -- casos se usan laminaciones colocadas en una manera semejante a -- las laminaciones de transformador; el núcleo toroidal por no te -- ner entre-hierros presenta mejores características ya que tiene -- menor corriente de excitación, sin embargo se necesita una má-- quina especial para embobinarlos.

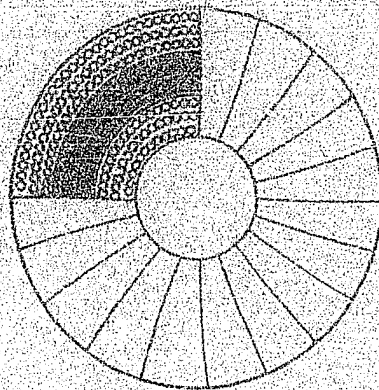


FIG. N° 20 REACTOR TOROIDAL

Voltaje de Saturación

En el ciclo de histéresis de los materiales con caracte-- rísticas "rectangulares" (Fig. 20) salta a la vista que una vez -- llegando el material a la densidad de flujo de saturación (B_s) -- la reactancia del reactor cae bruscamente casi como si se subs-- tituyera el núcleo de material ferro magnético por aire.

Aplicando un voltaje senoidal al reactor, mientras la --

densidad máxima de flujo esté abajo de $\pm B_s$, la corriente magnetizante tomada de la línea será relativamente baja; la ley de Faraday relaciona el flujo con el voltaje, en la ecuación usada en transformadores: $E = 4.44 NAFB \times 10^{-8}$.

La ecuación anterior define el valor específico de voltaje para una densidad máxima de flujo en el núcleo.

Si el voltaje a través del reactor se aumenta, manteniendo constante los demás factores, la densidad máxima de flujo también aumenta hasta llegar a la densidad de saturación, $\pm B_s$. Cualquier mayor aumento en voltaje terminal no puede elevar dicha densidad, debido a que el material ha sido llevado a su saturación magnética.

Como resultado una descarga muy alta de corriente es extraída de la línea, y todo el voltaje aplicado es absorbido como una caída de voltaje en la impedancia de la fuente, la resistencia y la impedancia inductiva del reactor saturado.

Es interesante hacer notar que en el instante que la densidad de flujo alcanza el valor de saturación, no puede existir voltaje a través del reactor, despreciando las caídas resistivas.

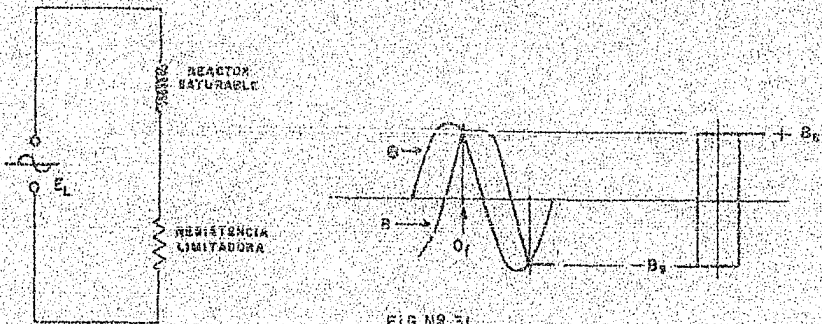


FIG. Nº 51

En la figura 31 se muestra un reactor en el cual $B_m > 0.44$
 $NANF \times 10^{-8}$ al cual se le ha colocado una resistencia limitadora.

La mayor parte del voltaje de la línea aparecerá a través del reactor, debido a que la caída a través de la resistencia es baja. En θ_1 el flujo llega a la densidad B_s , el reactor se satura, y al no haber cambio de flujo su voltaje terminal se vuelve cero. Ahora todo el voltaje aparece a través de la resistencia y la corriente aumenta a un valor $I = \frac{E}{R}$, puesto que la reactancia del reactor es prácticamente cero, debido a que el valor de ω es muy pequeño en un reactor bien diseñado.

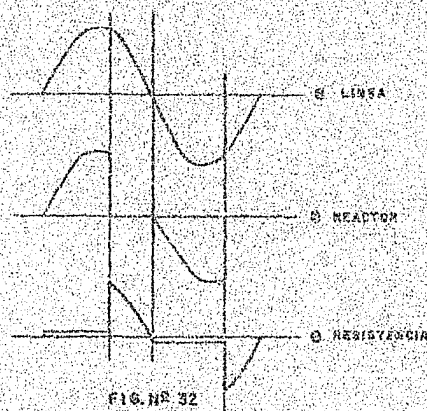


FIG. Nº 32

En la figura 32 se muestra como van variando los voltajes en los diferentes elementos.

De lo anterior podemos deducir que aplicando una pequeñísima C.D. de saturación en un bobinado extra tendremos un reactor saturable con magníficas características de amplificación.

Cuando se desea un amplificador magnético con salida de corriente directa, se usó un arreglo semejante al de la figura 33.

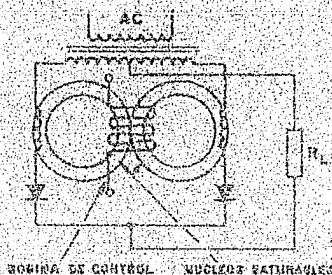


FIG. Nº 33

La operación del amplificador magnético puede explicarse por medio de la figura anterior. Las bobinas de C.A. están en los núcleos saturables, conectados en serie con la carga a través de dos rectificadores. Cuando un voltaje alterno (ver Fig. 34) se le aplica al circuito la forma de onda de la corriente que fluye en el circuito de C.A. se muestra en la figura B. Durante la primera parte del ciclo (X-Y) la corriente es bloqueada por el rectificador. Durante el comienzo del siguiente medio ciclo, la corriente es limitada por la inductancia del reactor. La corriente aumenta lentamente (Y-Z) causando que más y más flujo se almacene en el núcleo, hasta que llega a saturarse. La inductancia entonces cae a un valor muy bajo, y la corriente es limitada sólo por el valor de la impedancia de la carga, aumentando bruscamente (Z-M).

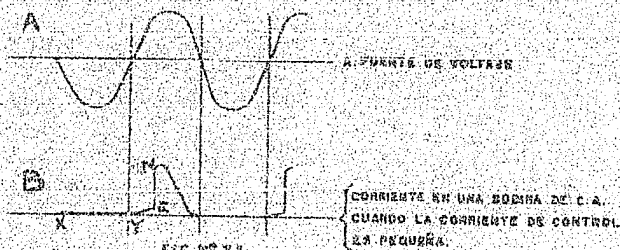


FIG. Nº 34

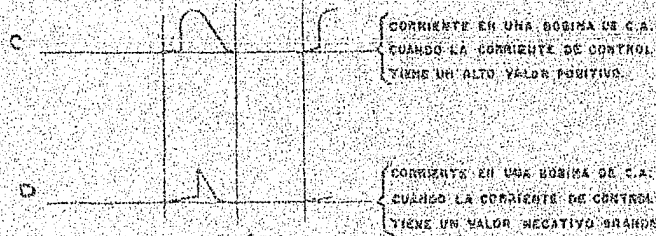


FIG. Nº 34

Durante el siguiente medio ciclo N-O (cuando el voltaje de línea se invierte) el flujo en el núcleo decae y el rectificador bloquea de nuevo el flujo de corriente.

Como el núcleo solo puede almacenar una cantidad finita de flujo, un flujo de otra fuente (producido por la bobina de control) influye el "punto de disparo" que es el de saturación del núcleo. Este flujo de control se surte por medio de una bobina C.D. separada en la misma forma que en el reactor saturable. La magnitud y polaridad de esta C.D. determinará la corriente de carga. Las ondas de corriente C y D de la figura 34 son típicas para señales positivas y negativas. El alto factor de amplificación puede ser observado por el hecho de que la corriente de control es del orden de miliamperes, mientras que la corriente de carga es del orden de amperes; en los amplificadores comerciales es de 2000 a 15000.

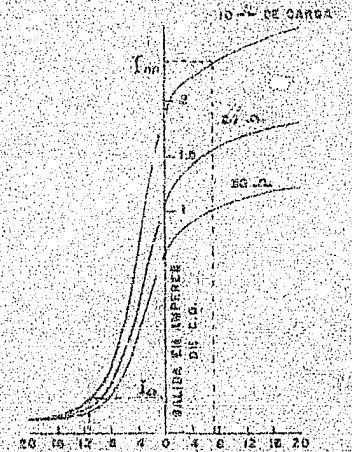


FIG. Nº 35 SEÑAL DE C.D. EN AMPER VUELTAS

En las pruebas realizadas de un transformador de corriente constante con derivación magnética saturable (a escala) se utilizó un regulador de corriente sin partes móviles, usando amplificadores estáticos.

El transformador experimental que se construyó era aproximadamente de 1 000 V A, después de repetidas experiencias y ajustes se logró una regulación de $\pm 3\%$ lo cual es suficientemente buena para propósitos experimentales hechos con el objeto de demostrar el funcionamiento del aparato.

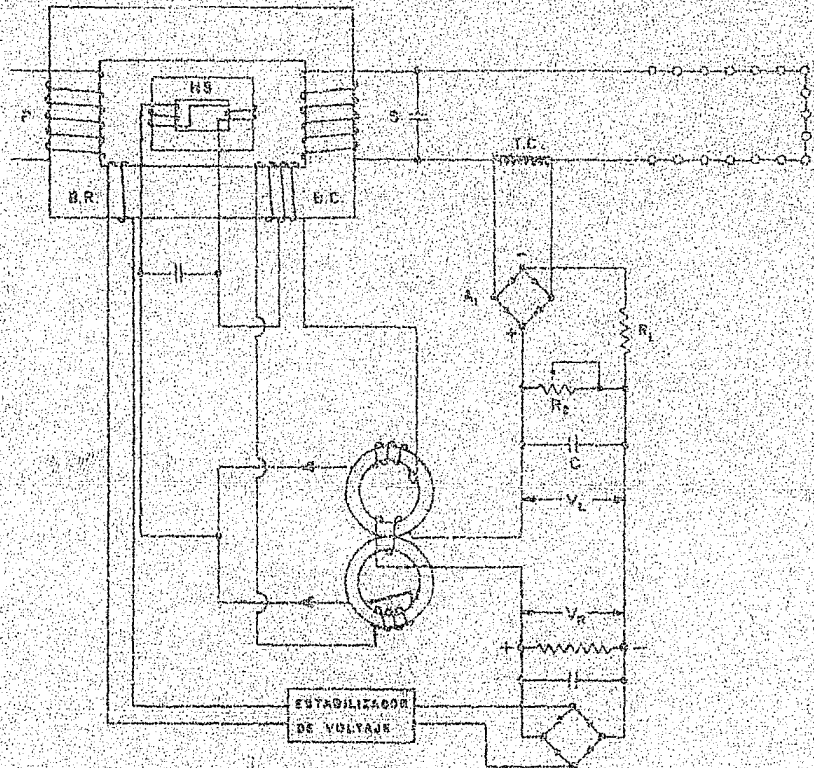


FIG. Nº 25

En la figura 36 se muestra el aparato completo: el transformador en si consta de cinco bobinas:

- 1.- Primario (P)
- 2.- Secundario (S)
- 3.- Secundario (BR) de voltaje casi constante, el cual alimenta un estabilizador de voltaje con objeto de tener un voltaje de referencia; esta bobina tiene una capacidad de unos cuantos VA.
- 4.- Secundario (BC) que alimenta la corriente de carga del núcleo saturable controlada por el amplificador magnético. Este embobinado está situado junto al secundario con objeto de lograr un voltaje de salida proporcional a éste lo cual nos da mejor regulación actuando como otro paso de amplificación, debido a que suministra un voltaje más o menos proporcional a la corriente requerida por el núcleo saturable. Su capacidad debe ser algo mayor que la tomada por la bobina del núcleo saturable debido a las pérdidas en el rectificador, pero principalmente debido al factor de corrección que se aplica por operar cada una de sus ramas alternativamente por el arreglo de derivación central usada en este caso.
- 5.- Bobina del núcleo saturable que opera como se describió en los capítulos II y III.

La operación de regulación funciona en la siguiente forma: El transformador de corriente T.C. envía al rectificador AI una corriente proporcional a la corriente de la carga, dicha corriente una vez rectificad, se hace pasar por la resisten-

R_1 y el reóstato R_2 , en este último se ajusta la tensión con respecto a la tensión de referencia. La caída de potencial en el reóstato R_2 será $V_I = R_2 I$. Con lo anterior se logra una "transformación" de corriente alterna en un voltaje directo, siendo éste directamente proporcional a la corriente del primario del T. C.

Teniendo un voltaje de referencia (V_r) con el estabilizador de voltaje, sus rectificadores y filtro, podemos comparar el voltaje producido por la corriente de la carga con el de referencia V_r .

En la figura 35 pag. 43 se muestran las curvas típicas de las características del amplificador; en el diseño se tratará de obtener una variación en el rango de la potencia de salida lo más amplio posible, dentro de una sensibilidad razonable. Supongamos que experimentalmente encontramos que la saturación adecuada de la derivación magnética se logra con I_m amperes, (ésta lectura de corriente se deberá tomar con la carga máxima en el circuito de alumbrado y con el límite mínimo de voltaje aplicado al primario) como se ve en la figura 35, para producir, $I_m = 2.5$ amperes en la salida del amplificador se necesita una señal "positiva" de 7 amper vueltas, lo que quiere decir que la corriente en la bobina del amplificador circulará de la fuente de referencia hacia la fuente de señal y por lo tanto el voltaje V_I (Fig. 36) deberá de ser inferior a V_r .

Ahora bien, si se va quitando carga en el circuito, la excitación de la derivación saturable deberá disminuir, para disminuir la tensión secundaria a un valor determinado y mantener la corriente constante. Supongamos que estando con carga plena se funde una de las lámparas, en ese momento sube la corriente de la carga, lo cual

hace que suba la tensión V_1 , haciendo que la corriente de la señal en el amplificador magnético disminuya (o incluso cambio de sentido) como vemos en la Fig. 35, al suceder lo anterior la potencia de salida del amplificador disminuirá, siendo precisamente éste el efecto deseado con objeto de disminuir la saturación de la derivación magnética y por lo tanto el voltaje del secundario.

Al anterior efecto, hay que sumar el producido por la disminución del voltaje del secundario BC, lo cual hará que no sea necesario disminuir tanto la señal de corriente (de acuerdo con la Fig. 35) a la bobina de control del amplificador magnético y por lo tanto se tenga una mejor regulación.

En el caso extremo de un corto circuito firme en la línea secundaria sucederá lo siguiente :

Durante unos cuantos ciclos habrá una corriente transitoria bastante superior a la nominal debido a que :

- a) La derivación magnética está saturada y tiene cierta "inercia" magnética para eliminar dicha saturación.
- b) Durante unos cuantos ciclos seguirá circulando corriente directa por la bobina de la derivación magnética debido a que el condensador de dicha bobina está cargado.

La sobrecorriente transitoria de corto circuito es eliminada por las siguientes causas :

- 1.- La fuerza contramagnetomotriz proporcionada por los amperevueltas que circulan por el secundario hará que el flujo que circula por la perra en que está secundario BC (Fig. 36), (el cual proporciona la corriente de excitación de la derivación

magnética) disminuya a una fracción del flujo normal y por lo tanto la F.E.M. inducida en esta bobina disminuye, disminuyendo también la corriente de excitación.

2.- La corriente de la señal en el amplificador magnético disminuye hasta llegar a un valor negativo y por lo tanto la potencia de salida del amplificador disminuye rápidamente, la rapidez con que sucede este fenómeno, está sólo prácticamente limitada por la carga del condensador C del filtro.

En las pruebas realizadas no se encontró ningún problema de oscilaciones (hunting); lo anterior se debe principalmente a que los condensadores usados para el filtrado sirvan como "amortiguadores" de las variaciones.

REGULADOR DE VOLTAJE DE LINEA

Hasta ahora no se ha mencionado la posibilidad de aplicar el principio del transformador de corriente constante con derivación magnética saturable en el diseño de un regulador de voltaje por no ser el objeto principal de esta tesis; esto se puede lograr haciendo las siguientes modificaciones: (Ver Fig. 36A)

- a) Un autotransformador en la pierna primaria.
- b) Cambiando el T.C. por un transformador de potencial en el lado de la carga.
- c) Agregando un reactor con núcleo magnético en el lado de la carga, que se sature (y que tome una corriente suficiente) en el caso que la carga tienda a ser nula, evitando sobrevoltajes.
- d) Un devanado serie en la pierna secundaria.

Es interesante hacer notar que la bobina en la pierna secundaria funciona como bobina serie de autotransformador elevando el voltaje si la derivación magnética está saturada, pero si no

hay saturación en dicha derivación, la bobina de la pierna secundaria actuará como reactor en serie con la carga y por lo tanto hará que el voltaje caiga. Lo anterior se debe a que el flujo de la pierna secundaria varía de sentido (con respecto a la pierna primaria) dependiendo de la saturación de la derivación magnética y de la característica de la carga.

REGULADOR DE VOLTAJE DE LINEA

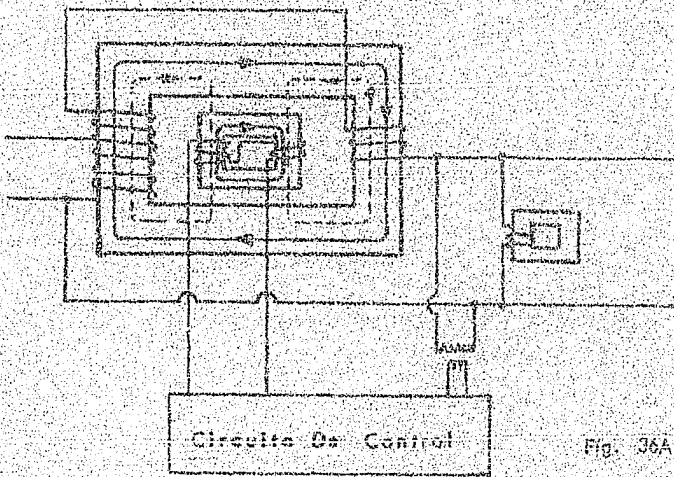


Fig. 36A

- Circulación del flujo cuando la derivación está saturada.
- - - - - Circulación del flujo cuando la derivación no está saturada.

5.- Regulador estático con rectificador controlado.

Aunque en pruebas hechas con transformador de corriente constante con derivación magnética saturable, se utilizó amplificador magnético para su sistema de regulación, éste se pudo haber sustituido haciendo algunos cambios al circuito por un rectificador controlado.

Muy recientemente se ha logrado desarrollar este rectificador hecho de material semiconductor (Silicio) el cual consta de tres elementos; cátodo, ánodo y "rejilla" de control. Su operación se asemeja a la del Thyatron y a la de los amplificadores magnéticos.

Actualmente se fabrican rectificadores controlados con capacidades hasta de varios K W.

La operación del rectificador controlado se explica mejor comparándola con la de un Thyatron, que es un dispositivo rectificador en el cual el período de conducción está controlado por una señal aplicada a un tercer electrodo (rejilla) como en el caso del Thyatron. La conducción se realiza ya sea excediendo un voltaje crítico de ánodo a cátodo o bien aplicando una señal al tercer electrodo.

Considérese al rectificador controlado sin señal aplicada a la rejilla y con un voltaje de disparo de 2.00 Volts, supóngase que el voltaje en sentido contrario que rompe el aislamiento con un valor bastante más alto que 2.00 Volts. Las características del voltaje y corriente serán como se muestra en la figura 37.

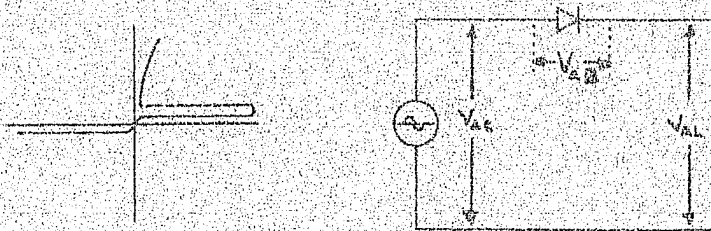


FIG. Nº 37

y las relaciones de voltaje de C.A. del dispositivo serán como se muestra en la figura 38.

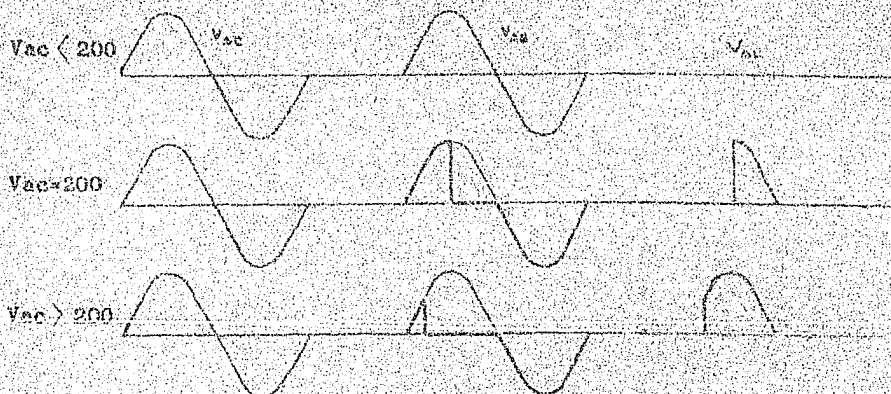


FIG. N° 38

Se notará que el rectificador controlado bloqueará la corriente en ambas direcciones hasta que el voltaje de "disparo" hacia adelante es excedido; en este momento comenzará a conducir hasta que el voltaje llegue a cero. Ahora considérese el mismo dispositivo con una señal aplicada a la rejilla, esta señal es de varios volts. y se aplica a través de una alta impedancia y puede ser C. A. o C.D., la impedancia de la rejilla varía generalmente entre 10 y 100 ohms.

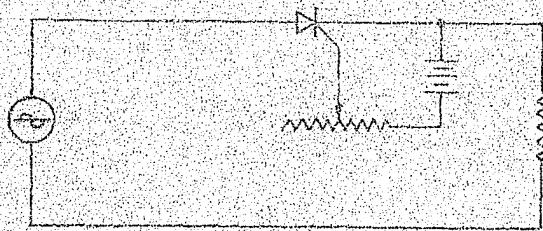


FIG. N° 39

A medida que la corriente de la rejilla se aumenta, se llegará al punto crítico en que comenzará a conducir corriente no obstante que el voltaje de ánodo a cátodo sea relativamente bajo. Después de iniciar la conducción la impedancia será muy baja y la corriente será limitada sólo por la carga. El "disparo" del rectificador controlado puede ser hecho en una de tantas formas usadas para controlar el thyatron.

El rectificador controlado de silicio tiene un gran poder amplificador habiéndose logrado relaciones de potencia de salida a potencia de señal de 1 00 000 a 1.

CAPITULO V

Comparación del Transformador de Corriente
Constante Convencional con el Transformador de Corriente Constante
con Derivación Magnética Saturable.

Las principales características que un aparato síéctrico de
he tener, son las siguientes:

- 1.- Confiabilidad en la operación.
- 2.- Bajos costos de conservación.
- 3.- Bajo costo inicial.
- 4.- Alta eficiencia.
- 5.- Poco peso.
- 6.- Seguridad del personal al operario.

En realidad, como en toda la ingeniería lo anterior se resu-
me a un problema económico, en el que intervienen estadísticas so-
bre el número de fallas, costos de reparación, costo del daño a --
consecuencia de una falla por falta de energía, costo de instala-
ción, etc.

En un nuevo diseño (y aún en ciertos diseños que ya están -
en operación) no es posible o práctico hacer un análisis cusntitu-
tivo muy exacto de todos los puntos anteriores por carecer de da-
tos, (siendo algunos cuestión de opinión personal), sin embargo, en
este caso enunciaremos las generalidades sobre cada uno de ellos,

1.- Al primer golpe de vista la disponibilidad de la opera-
ción resulta en favor del transformador convencional por tener me-
nos componentes, sin embargo, teniendo en cuenta que las componen-

tes adicionales de transformador de núcleo saturable también tienen una gran duración, éste no resulta desventajoso en este punto. La eliminación de partes móviles da por resultado la eliminación de las fallas mecánicas, además de poderse construir las bobinas más resistentes mecánicamente.

Conviene recordar que los reguladores de generadores que contienen rectificadores, condensadores resistencias, etc., raras veces presentan problemas de operación.

A los amplificadores magnéticos se les considera una vida casi ilimitada por trabajar sus aislamientos con temperaturas relativamente bajas. A los rectificadores modernos se les considera una vida de 50,000 horas, encontrándose en ciertos tipos que solamente 1 de cada 10,000 falla al año. Tomando en cuenta lo anterior se puede considerar una vida de 25 años para cualquier de los dos transformadores. Este período de uso se puede aumentar utilizando mejores materiales, sin embargo cualquier aumento en el costo de un aparato para aumentar su vida en más de 25 años es incosteable si se considera que la inversión adicional podría capitalizarse por separado obteniendo una cantidad de dinero al cabo de 25 años superior al valor del aparato mismo (con solo el 9.23% del costo del aparato al 10% de interés anual en 25 años puede tenerse un capital igual al costo del mismo). Otro factor que hace indeseable una duración muy grande a costa de un aumento de precio es la obsolescencia del aparato. Históricamente se ha visto que en la mayoría de los aparatos eléctricos, resulta incosteable su operación después de 10 a 40 años de haberse diseñado. Es probable, que con el gran desarrollo tecnológico actual ese período se reduzca aún más.

Conclusión: Una vez que un transformador con núcleo saturable haya sido construido y experimentalmente ajustados todos sus detalles, operará en forma tan confiable como el transformador de corriente constante convencional.

2.- Los costos de conservación están sumamente ligados con el punto anterior. Si un transformador es de operación segura y confiable, sus gastos de conservación serán muy bajos. Con los aislamientos de papel modernos se ha eliminado la formación de agua y si el transformador se opera a una temperatura correcta, la contaminación del aceite aislante es prácticamente nula, especialmente en el caso de transformadores (como es éste) que nunca están sujetos a sobrecargas.

Conclusión: Los costos de conservación de cualquier transformador diseñado, instalado y operado correctamente son prácticamente nulos.

3.- Costo inicial. Una de las principales ventajas del transformador propuesto es su bajo costo inicial.

En el Capítulo III se mencionó que el transformador propuesto tiene un primario, secundario y núcleo, desde el punto de vista costo, igual al del transformador de distribución monofásico. A lo anterior, hay que agregarle el costo del núcleo saturable y sus bobinas y el costo del sistema de regulación.

Tomemos como ejemplo, un transformador de distribución de 15 K.V.A. y un transformador de corriente constante convencional de 15 K.W. ambos construidos con materiales de primera calidad; su costo actual es de 5,000 y 12,000 pesos respectivamente. El costo-

del núcleo saturable, del transformador de corriente, (éste no tiene que ser del tipo "instrumento"), del regulador de voltaje y del condensador se estima en 3,000.00 pesos y el aumento de costo por tanque mayor que el de distribución y su respectivo aceite es de aproximadamente 500 pesos, por lo que el costo total del transformador propuesto es del orden de 8,500.00 pesos, o sea 30% menor que el transformador convencional.

Como una ventaja adicional, como se mencionó en el Capítulo I, el transformador de corriente constante convencional tiene que tener una capacidad en K.V. mucho mayor que la de la carga en el caso de que ésta no sea de factor de potencia unitario como es en alumbrado serie mercurial o fluorescente.

4.- Eficiencia: En este aspecto también resulta ventajoso el transformador propuesto en esta tesis. Como se indicó en el Capítulo III, en las comparaciones de transformadores de 15 K.V., se encontró que el convencional tiene 720 watts de pérdidas, mientras que el de núcleo saturable tiene 380. Los 340 watts de diferencia, deben ser evaluados en pesos. Las compañías de servicio público en México aplican, generalmente, un cargo de 12 pesos por watt de pérdida en el hierro de sus transformadores. Este cargo es aplicado (más el cargo de pérdida del cobre el cual varía según el tipo de transformador y su uso) al precio de compra con objeto de evaluar las ofertas de varios fabricantes. En el caso de los transformadores de corriente constante se pueden mezclar las pérdidas del cobre y del hierro, debido a que no hay variación de la carga a diferentes horas del día o diferentes temporadas, sino que éstos siempre que estén conectados tendrán las mismas pérdidas. El cargo

de 12 pesos por watt se aplica a transformadores que están conectados 24 horas diarias; en el caso de transformadores de corriente constante convencional que sólo están conectadas 10 horas diarias, deberá hacerse una corrección: $\frac{12 \times 10}{24} = 5$; que multiplicados por el ahorro en pérdidas: $5 \times 240 = 1\ 200$ pesos que deberán sustraerse del costo cuando se hace una comparación económica.

Otra posibilidad de ahorro que se puede aprovechar en el transformador de derivación saturable, es el hecho de poder disminuir la corriente de la carga a la hora que no se necesite una iluminación plena. La conveniencia anterior viene del hecho que el nivel de iluminación guarda relación con la densidad de tráfico de automóviles y peatones, la cual es generalmente, 10 o más veces mayor a las 8 P.M. que a la 1 A.M., por lo cual se puede disminuir por ejemplo el 20% el nivel de iluminación después de la 1 P.M. la cual se logra, disminuyendo aproximadamente 10% la corriente alimentada a una lámpara incandescente, trayendo además una mayor duración de éstas y, por lo tanto, un menor costo de reposición. Lo anterior es un refinamiento que no se ha utilizado hasta ahora porque en los sistemas convencionales resulta algo complicado.

5.- El menor peso del transformador de núcleo saturable sobre el convencional, es otra ventaja más a favor del primero. Para dar una idea, la diferencia en peso entre el transformador de corriente constante convencional y el de distribución escojamos de nuevo el ejemplo de 15 K.W. y 15 K.V.A.; un fabricante publica los siguientes pesos: 150Kg. para el de distribución y 395 para el de corriente constante. Tomando en cuenta que la derivación magnética tiene aproximadamente 60% del peso del núcleo y bobinas del de distribución de la misma capacidad y el peso de dicho núcleo y bo-

binus es de 83 Kg. el aumento de peso en material magnético y cobre es de 50 Kg., además hay que aumentar el peso del aceite, del condensador y del regulador de voltaje, lo cual representa aproximadamente al 20% del peso de transformador de distribución por lo que el peso estimado del transformador con derivación saturable es de 230 Kg. lo cual representa un 42% menos que el del transformador convencional.

La principal ventaja del poco peso es el menor costo de transporte e instalación.

6.- La seguridad del personal en la operación de cualquiera de los dos tipos es prácticamente igual, en ambos casos se necesita personal especializado para la operación e instalación para evitar accidentes.

CONCLUSIONES GENERALES

En los seis puntos mencionados anteriormente, resulta ventaja en 3 de ellos (menor costo inicial, mayor eficiencia y menor peso) al transformador de corriente constante con derivación magnética saturable. En los otros tres (confiabilidad en la operación, costos de conservación y seguridad del personal al operario) resultan iguales ventajas para uno y otro.

Se puede concluir que evaluando las ventajas, el transformador con derivación saturable resultará de un 25 a un 40% más económico por K.W.H. suministrado a la carga.

Bibliografía

Magnetic Circuits and Transformers

M.I.T.

Magnetic Amplifier Engineering

Pattuna

Standard Handbook for Electrical Engineers

A. N. Kutlton

Principles of Alternating Current Machinery

Lawrence

Design of Electrical Apparatus

Kuhmann

Publicaciones General Electric.