

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

*REGULADORES DE VOLTAJE DE PLANTAS DE GENERACIÓN
DE MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA*

TESIS

PRESENTADA A LA
JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA

POR

LUDIN GIOVANNI RECINOS Y RECINOS

AL CONFERIRSE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, AGOSTO DE 1997.

08
T(4038)
C4

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

**REGULADORES DE VOLTAJE DE PLANTAS DE GENERACIÓN
DE MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha noviembre 30 de 1995, bajo referencia EIME. 023.96

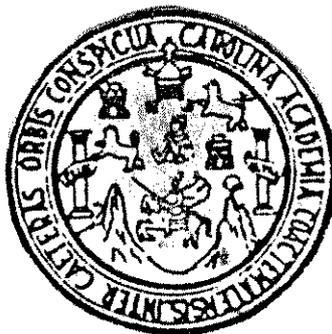


Ludín Giovanni Recinos y Recinos

Guatemala, agosto de 1997..

Guatemala, agosto de 1997.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD INGENIERÍA

MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA

| | |
|-------------|---|
| DECANO: | Ing. Hebert René Miranda Barrios |
| VOCAL 1o: | Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra |
| VOCAL 2o: | Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano |
| VOCAL 3o: | Ing. Juan Adolfo Echeverría Méndez |
| VOCAL 4o: | Br. Víctor Rafael Lobos Aldana |
| VOCAL 5o: | Br. Wagner López Cáceres |
| SECRETARIO: | Ing. Gilda Marina Castellanos de Illescas |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN
GENERAL PRIVADO

| | |
|-------------|--------------------------------------|
| DECANO: | Ing. Julio Ismael González Podszueck |
| EXAMINADOR: | Ing. José Luis Herrera Gálvez |
| EXAMINADOR: | Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra |
| EXAMINADOR: | Ing. Julio César Solares Peñate |
| SECRETARIO: | Ing. Francisco Javier González López |

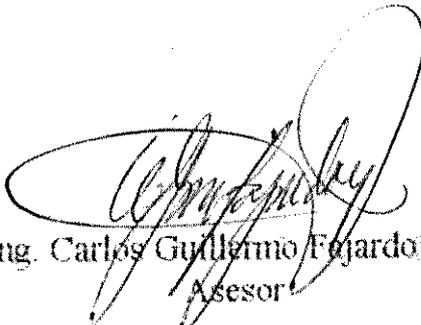
Guatemala, mayo 5 de 1997.

Ing. José Luis Herrera Gálvez
Coordinador del Area de Electrotecnia
Escuela de Ingenieria Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingenieria, USAC.
Ingeniero Herrera:

Atentamente me dirijo a usted, para informarle que he concluido la revisión del trabajo de tesis titulado: **"REGULADORES DE VOLTAJE DE PLANTAS DE GENERACION DE COMBUSTION INTERNA"**, elaborado por el estudiante: **Ludín Giovanni Recinos y Recinos**, previo a optar el título de Ingeniero Electricista.

En mi calidad de asesor de trabajo de tesis, me es grato manifestarle que éste cumple satisfactoriamente con los objetivos requeridos, por lo que me permito sugerir la aprobación de dicho trabajo.

Atentamente,



Ing. Carlos Guillermo Fajardo Godoy
Asesor

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 5 de mayo de 1,997

Señor Director
Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

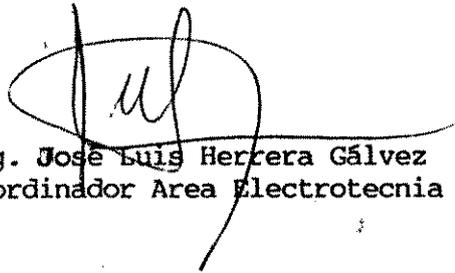
Señor Director.

Me permito dar aprobación al trabajo de tesis titulado: **Reguladores de voltaje de plantas de generación de combustión interna**, desarrollado por el señor **Ludin Giovanni Recinos y Recinos**, ya que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. José Luis Herrera Gálvez
Coordinador Area Electrotecnia

JLHG/sdem.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de
conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de
Area, al trabajo de tesis del estudiante **Ludín Giovanni Recinos y
Recinos**, titulada: **Reguladores de voltaje de plantas de generación de
combustible interna**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Miguel Ángel Sánchez Guerra
Director

Guatemala, 26 de mayo de 1,997.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



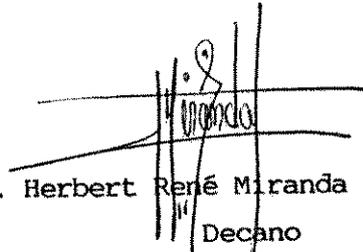
FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de tesis: Reguladores de voltaje de plantas de generación de combustible interna, del estudiante Ludin Giovanni Recinos y Recinos, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:


Ing. Herbert René Miranda Barrios
Decano

Guatemala, 1 de agosto de 1,997.



AGRADECIMIENTO

A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala, especialmente la facultad de Ingeniería.

Cementos Progreso S.A. por la ayuda prestada en la elaboración de este trabajo de tesis.

Todas las personas que colaboraron con mi persona, especialmente los ingenieros José Luis Herrera Gálvez e Ingeniero Carlos Guillermo Fajardo Godoy y al Sr. Isaias Gómez Rosales.

DEDICATORIA

A:

DIOS:

porque él es quien me ha guiado, dándome primeramente la vida, así como el entendimiento, la sabiduría y la fortaleza para poder alcanzar esta meta tan anhelada. **A EL SEA LA GLORIA Y LA HONRA.**

MIS PADRES:

Rubelio y Vilma Recinos, por sus sabios consejos, apoyo incondicional, grandes sacrificios, incomparable dedicación. Por su gran ejemplo de humildad, trabajo, disciplina y honradez. Que Dios les guarde y bendiga siempre **!Muchas gracias queridos padres!**

MI ESPOSA:

Eunice Aguilar de Recinos por su amor, apoyo, comprensión y paciencia; Compañera en éxitos y fracasos, mujer idónea que Dios me ha dado. "Dios te bendiga".

MI HIJO:

Daniel Alejandro, busca primeramente el reino de Dios y su justicia y todas las demás cosas vendrán por añadidura.

MIS HERMANOS:

Norvin y Dave, gracias por sus consejos, ayuda y apoyo que siempre me brindaron, éxitos en sus carreras.

MI FAMILIA Y AMIGOS:

Con mucho aprecio.

INDICE GENERAL

| | Página |
|---|------------|
| LISTA DE ILUSTRACIONES | I |
| GLOSARIO | III |
| INTRODUCCION | 1 |
| | |
| 1. IMPORTANCIA DEL REGULADOR DE VOLTAJE Y LA EXCITACION EN UNA CENTRAL ELECTRICA | 3 |
| 1.1 Formas de operación de generadores | 3 |
| 1.2 Reguladores de tensión | 6 |
| 1.3 Regulación manual de la tensión | 9 |
| 1.4 Sobrerregulación | 16 |
| 1.5 Cualidades de los reguladores de tensión | 16 |
| 1.6 Sistemas clásicos de excitación | 17 |
| 1.7 Velocidad de respuesta de las excitatrices | 18 |
| 1.8 Características de funcionamiento de las excitatrices | 20 |
| 1.9 Sistemas modernos de excitación | 23 |
| | |
| 2. PRINCIPIO BÁSICOS PARA EL CONTROL DE VOLTAJE | 28 |
| 2.1 Principio de funcionamiento aisladamente | 28 |
| 2.2 Generador actuando en vacío | 28 |
| 2.3 Generador aislado alimentando una carga | 33 |
| 2.4 Funcionamiento en paralelo | 38 |
| 2.5 Estatismo | 39 |
| 2.6 Funcionamiento en paralelo con un sistema de potencia | 41 |
| 2.7 Excitación | 42 |
| 2.7.1 Excitación independiente | 42 |

| | | |
|-------|--|-----------|
| 2.7.2 | Excitación propia | 43 |
| 2.8 | Conceptos sobre sistemas de control | 45 |
| 2.8.1 | Función de transferencia | 45 |
| 2.8.2 | Diagrama de bloques | 46 |
| 2.8.3 | Gráficos de flujo de señal | 47 |
| 2.9 | Componentes de un sistema de control | 48 |
| 2.9.1 | Detector de error | 48 |
| 2.9.2 | Regulador o amplificador | 49 |
| 2.9.3 | Actuador | 49 |
| 2.9.4 | Amortiguador | 49 |
| 2.9.5 | Lazo de retroalimentación | 50 |
| | | |
| 3. | NORMALIZACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL DE LA EXCITACIÓN | 51 |
| 3.1 | Primera normalización | 51 |
| 3.2 | Segunda normalización | 51 |
| 3.2.1 | Excitación de corriente directa | 52 |
| 3.2.2 | Excitación de corriente alterna | 52 |
| 3.2.3 | Excitación estática | 52 |
| 3.3 | Sistemas de excitación de corriente directa | 52 |
| 3.4 | Sistemas de excitación de corriente alterna | 52 |
| 3.5 | Sistemas de excitación estática | 52 |
| 3.5.1 | Representación de la excitación estática en un estudio de un sistema de Potencia | 53 |
| 3.6 | Transductor de voltaje y compensador de carga | 54 |
| 3.6.1 | Transductor de voltaje | 55 |

| | | |
|-----------|---|-------------|
| 3.6.2 | Compensador de carga | 57 |
| 3.7 | Estabilizador del sistema de potencia | 57 |
| 3.8 | Representación de límites | 59 |
| 3.9 | Sistemas de excitación estática | 61 |
| 3.10 | Fuente de potencial controlada de un rectificador de de la excitación (IEEE-tipo ST1) | 61 |
| 3.10.1 | Estabilizador del sistema de control de la excitación | 62 |
| 3.10.2 | Regulación del rectificador. | 64 |
| 3.11 | Sistema de una fuente rectificadora de excitación compound (IEEE -Tipo ST2) | 67 |
| 3.12 | Sistema de una fuente controlada rectificadora de excitación compound (IEEE -Tipo ST3) | 68 |
| 4. | EJEMPLO DE UN REGULADOR DE VOLTAJE DE TIPO ESTÁTICO | 71 |
| 4.1 | El regulador RBS 6000 | 72 |
| 4.2 | Excitación inicial | 73 |
| 4.3 | Circuito de filtraje | 75 |
| 4.4 | Control de la excitación inicial | 76 |
| 4.5 | Funcionamiento del regulador bajo condiciones de carga | 78 |
| 4.6 | Funcionamiento en paralelo con otras máquinas | 88 |
| 4.7 | Funcionamiento del regulador shunt en paralelo con un sistema de potencia. | 92 |
| 4.8 | Booster o corrector de corto circuito. | 92 |
| | CONCLUSIONES | V |
| | RECOMENDACIONES | VII |
| | REFERENCIAS | VIII |
| | BIBLIOGRAFÍA | IX |

LISTADO DE ILUSTRACIONES

| No. | NOMBRE | PÁGINA |
|-------|---|--------|
| 1.1. | Esquema de conexiones para el estudio de un generador trifásico síncrono en régimen transitorio. | 8 |
| 1.2. | Curva de regulación de un generador síncrono en régimen transitorio con regulación manual de tensión. | 9 |
| 1.3. | Curva de varicación de voltaje con la corriente de campo a velocidad constante. | 11 |
| 1.4a. | Generador en derivación. | 12 |
| 1.4b. | proceso transitorio de subida de tensión en función del tiempo. | 12 |
| 1.4c. | Curva de magnetización. | 13 |
| 1.5. | Curvas de regulación de un generador en régimen transitorio. | 15 |
| 1.6. | Definición de la velocidad de respuesta según normas americanas. | 19 |
| 1.7. | Esquema elemental del regulador de transductores ASEA para reguladores de tensión en reguladores pequeños con excitatrices autoexcitadas. | 25 |
| 1.8. | Esquema simplificado de un sistema de excitación con excitatriz de corriente alterna. | 26 |
| 1.9. | Regulación de un alternador con excitación alimentada por una red auxiliar. | 27 |
| 1.10. | Ejemplo de un sistema autoexcitado. | 27 |
| 2.1. | Campo magnético giratorio en el interior de una bobina | 29 |
| 2.2. | Plano vectorial | 30 |
| 2.3. | Corriente de excitación necesaria para mantener la tensión nominal en bornes a un factor de potencia constante. | 34 |
| 2.4. | Tensión en bornes en función de la corriente de estator a un factor de potencia cte. | 34 |
| 2.5. | Circuito equivalente de una fase de un generador. | 35 |
| 2.6a. | Carga inductiva. | 36 |
| 2.6b. | Carga resistiva. | 37 |
| 2.6c. | Carga capacitiva. | 37 |
| 2.7. | Variación de voltaje vrs. potencia reactiva. | 38 |
| 2.8. | Curva de estatismo. | 39 |
| 2.9. | Variación de potencia reactiva sin modificar voltaje. | 40 |
| 2.10. | Variación del voltaje sin modificar la potencia reactiva. | 41 |
| 2.11. | Circuito equivalente de un generador con el inductor en paralelo con la armadura. | 43 |
| 2.12. | Curva de magnetización del generador. | 44 |
| 2.13. | Característica de magnetización. | 45 |
| 2.14. | Diagrama de bloques. | 47 |
| 2.15. | Detector de error. | 47 |
| 2.16. | Gráfico de flujo de señal. | 48 |
| 3.1. | Diagrama general de bloques para el sistema de control de la excitación. | 53 |
| 3.2. | Elementos del compensador de carga y transductor de voltaje terminal. | 54 |
| 3.3. | Transductor de voltaje. | 55 |
| 3.4. | Estabilizador del sistema de potencia. | 58 |
| 3.5. | Límites. | 60 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.6 | Modelo de excitación estática tipo ST1. | 61 |
| 3.7. | Característica de regulación del rectificador. | 65 |
| 3.8. | Ecuación de regulación del rectificador. | 66 |
| 3.9. | Modelo de excitación estática tipo ST2. | 67 |
| 3.10 | Modelo de excitación estática Tipo ST3. | 68 |
| 4.1. | Diagrama unifilar de interconexión del regulador de voltaje. | 72 |
| 4.2. | Diagrama de bloques general del funcionamiento del regulador de voltaje. | 73 |
| 4.3. | Forma de sensar el voltaje para la excitación inicial. | 75 |
| 4.4. | Circuito de excitación inicial del generador, filtraje y control de la excitación. | 76 |
| 4.5 | Diagrama de bloques del funcionamiento del regulador de voltaje en condiciones de carga. | 78 |
| 4.6. | Modo de variar la corriente de excitación en condiciones de carga. | 79 |
| 4.6a. | Tarjeta madre. | 80 |
| 4.7. | Diagrama de bloques del lazo de actuación del motor. | 81 |
| 4.8. | Diagrama de ubicación de transformadores de potencia utilizando el regulador de voltaje. | 82 |
| 4.9. | Fuente de alimentación del regulador de voltaje. | 83 |
| 4.10. | Medición de factor de potencia y circuito de ecualización de voltaje. | 84 |
| 4.11. | Circuito de regulación y detección de voltaje. | 85 |
| 4.12. | Circuito oscilador comparador. | 86 |
| 4.13. | Circuito de manejo de potencia. | 86 |
| 4.14. | Transistor de potencia. | 88 |
| 4.15. | Diagrama para comprender el funcionamiento en paralelo. | 89 |
| 4.16. | Factor de potencia resistivo. | 90 |
| 4.17. | Factor de potencia en atraso. | 91 |
| 4.18. | Factor de potencia en adelanto. | 91 |
| 4.19. | Booster. | 93 |

GLOSARIO

Dinamo

Pequeño generador de corriente continua.

Estatismo

Término utilizado para referirse a los cambios de velocidad de un primotor con los aumentos de potencia. Se puede aplicar a las variaciones de voltaje con los aumentos de potencia.

Excitatriz

Pequeño generador de imanes permanentes que proporciona corriente de campo a una máquina principal.

Impedancia

Si los valores de voltaje y corriente se definen como variables senoidales de voltaje y corriente de un elemento de dos terminales, entonces la expresión que relaciona ambos fasores se define como impedancia.

Potencia

Cantidad de trabajo realizada en el tiempo.

Potencia activa

Potencia disipada en un elemento resistivo.

Potencia Reactiva

Potencia disipada en un elemento reactivo como una bobina o un capacitor.

Primotor

Máquina mecánica capaz de mover el rotor de un generador a velocidad constante con el fin de variar el flujo del entrehierro del generador. Como ejemplo se pueden mencionar un motor diesel y una turbina.

Rectificador

Dispositivo que convierte la corriente alterna en corriente directa

Sincronismo

El sincronismo de un generador se refiere a que la frecuencia eléctrica está sincronizada con la frecuencia mecánica.

Sistema de excitación

Fuente de corriente que alimenta el devanado inductor para la excitación de una máquina eléctrica principal.

Tiristor

Dispositivos estáticos con tres terminales que dan paso a una corriente desde su ánodo hasta su cátodo cuando su borne de control o puerta se aplica una determinada señal de control.

Transductor

Aparato que convierte energía de una forma a otra.

Transformada de Laplace

Transforma una función $f(t)$ de variable real a una función $F(s)$ de variable compleja.

Transitorio

Período comprendido desde el momento de una perturbación de corriente hasta el estado estable.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de equipos eléctricos sufren daños al trabajar con voltajes diferentes para los que fueron diseñados. Esta es una de las principales razones por la cual el voltaje debe de ser lo más estable posible en el lugar donde hagamos uso de éste.

Las fuentes encargadas de proporcionar el voltaje (generadores) están sometidas a variaciones constantes de carga que hacen que varíe considerablemente. Es por ello que las plantas generadoras de energía dan mucha importancia a la regulación del voltaje, pese a las condiciones de carga a que puedan estar sometidas. Para lograr esta regulación se han creado sistemas de control automáticos que permiten la constancia en el voltaje actuando directamente sobre la corriente de campo de los generadores.

Los reguladores de voltaje son dispositivos que conjuntamente con la excitación tratan de mantener constante el voltaje, es por ello que la rapidez del regulador de voltaje debe ir directamente relacionada con la rapidez de respuesta de la excitación. La rapidez de respuesta dependerá de la inercia de sus componentes, distancia por recorrer y el par del primotor. Para la regulación de la tensión debe tomarse en cuenta que la rapidez de respuesta debe ser equilibrada para evitar oscilaciones amortiguadas en caso de mucha rapidez o bien que la tensión se reestablezca muy lentamente.

La excitación de los generadores es realizada por medio de corriente continua la cual actúa modificando el flujo creado en el entrehierro del generador, el cual a su vez hace variar el voltaje inducido en el estator aumentándolo o disminuyéndolo conforme sea requerido. Son muchos los sistemas de control de la excitación que existen actualmente, estudiar cada uno de ellos sería demasiado extenso, es por ello que en este trabajo se tratan los siguientes aspectos: En el capítulo uno se evidencia la importancia que tiene la

estabilización del voltaje y su relación con los reguladores de tensión y excitación, no adentrándonos en las particularidades que presenta cada regulador y sistema de excitación.

Es además de mucha importancia conocer los fundamentos teóricos necesarios para el entendimiento de cada sistema de excitación presentado aquí y también como es creada la variable que se desea controlar (voltaje). Por esta razón el capítulo dos muestra los principios que rigen la generación de voltaje y su comportamiento cuando un generador trabaja solo, en paralelo con otras unidades similares o bien en paralelo con un sistema de potencia. En este capítulo también se estudia los principios de los diferentes tipos de excitación y además la teoría de sistemas de control necesaria.

Conforme la tecnología ha ido avanzando se han ido creando sistemas de control de la excitación cada vez más eficientes. Estos sistemas comprenden tanto mecánicos como electrónicos. Por la variedad existente la IEEE presenta su normalización, la cual es mostrada en el capítulo tres, haciendo énfasis en los sistemas de tipo estático, los cuales son de mayor interés hoy en día por las comodidades que presenta.

El capítulo cuatro explica el funcionamiento de un regulador de tipo estático, el cual es utilizado por una planta de generación que tiene como primotor un motor de combustión interna (motor diesel).

1. IMPORTANCIA DEL REGULADOR DE VOLTAJE Y DE LA EXCITATRIZ EN UNA CENTRAL ELÉCTRICA

1.1 FORMAS DE OPERACIÓN DE GENERADORES

Actualmente es muy difícil encontrar generadores trabajando aisladamente, alimentando o suministrando energía a determinada carga; normalmente trabajan en paralelo con otros generadores o bien interconectados a sistemas grandes de potencia, con el fin de lograr una mejor continuidad y estabilidad del servicio.

El funcionamiento de un generador y el comportamiento de cada una de sus características depende de la forma en que éste se encuentre trabajando, ya sea solo y en vacío, solo alimentando una carga, en paralelo a uno o más generadores de características similares o bien interconectado a un sistema grande de potencia como el INDE, EEGSA u otra empresa que supere hasta diez veces más la capacidad instalada.

En cada uno de los casos anteriores las características de potencia activa, frecuencia, factor de potencia, voltaje, potencia reactiva, velocidad, etc. Tienen comportamientos diferentes lo cual hace que su control sea diferente en cada caso. Se analizará exclusivamente las características de voltaje, potencia reactiva y factor de potencia.

Se estudia el comportamiento de estas tres características con un generador trabajando en vacío. En estas condiciones el factor de potencia y potencia reactiva son cero. El voltaje en terminales del generador es el voltaje nominal. En el capítulo 2 se dan los principios de obtención de este voltaje como también otros principios y fundamentos de funcionamiento de generador, los cuales ayudarán a una mejor comprensión del tema.

El voltaje en terminales de generador puede ser modificado sin exceder su capacidad, variando la corriente de campo (excitación) de una manera manual a través de una resistencia variable.

Cuando el generador trabaja solo alimentando una carga a un factor de potencia que está variando constantemente, la potencia reactiva en este caso ya no es cero. En este caso el factor de potencia y la potencia reactiva dependen de la carga y no se pueden hacer ninguna modificación.

El voltaje del generador está sometido a variaciones constantes debido a los cambios de carga, aumentando si la carga que se adhiere es capacitiva o disminuyendo, si es inductiva y resistiva. Cualquiera que sea la variación de carga el voltaje en terminales no debe disminuir ni aumentar, sino permanecer constante.

Esto se logra de dos maneras: La primera es que un operador de la planta, actúe directamente sobre la excitación aumentándola cuando el voltaje baje y disminuyéndola cuando el voltaje suba, tomando como guía visual del voltaje un voltímetro que nos lea el voltaje del generador. La segunda manera, es automáticamente mediante un dispositivo de control que gobierne las variaciones de voltaje.

Si se tienen varios generadores acoplados en paralelo, el funcionamiento es muy similar al anterior ya que el factor de potencia y la potencia reactiva dependerán de la carga, con la diferencia en este caso que pueden ser repartidos entre los generadores que den el suministro, teniendo cuidado de no desestabilizar el voltaje del sistema. Esto puede realizarse manual y automáticamente.

Manualmente, para distribuir la carga reactiva entre varios generadores sin modificar el voltaje se tiene que hacer lo siguiente:

Para entender mejor se estudia el siguiente ejemplo aunque su explicación es más detallada en el capítulo 2. Se tienen dos generadores trabajando en paralelo y se quiere distribuir cierta cantidad de potencia reactiva entre ellos se hace lo siguiente: Se disminuye la excitación del generador 1 y se aumenta la excitación del generador 2, de esta manera el generador 1 queda con menos potencia reactiva y su factor de potencia será mejor, teniendo capacidad para entregar mayor potencia activa, mientras el generador 2 tendrá que entregar mayor potencia reactiva, su factor de potencia es malo y la capacidad para entregar potencia activa es menor.

Si necesitamos aumentar o disminuir el voltaje del sistema sin modificar la carga reactiva y factor de potencia, tiene que aumentarse o disminuirse la excitación de todos los generadores al mismo tiempo.

Automáticamente este proceso es controlado por un dispositivo de control el cual mantiene constante el voltaje con las variaciones de carga mediante un una resistencia variable para ajuste de voltaje, que permite ajustar el voltaje a un valor deseado.

Cuando se trabaja en paralelo con un sistema grande de potencia, el voltaje de la planta es controlado por el sistema. En este caso, ni manualmente ni automáticamente, se puede modificar el voltaje.

La potencia reactiva y factor de potencia sí pueden controlarse automáticamente mediante un factor de potencia que se puede poner de referencia en el control del sistema grande de potencia. El fin de esta referencia es lograr que el factor de potencia de cada máquina, se ajuste a la referencia y de esta manera se logra un factor de potencia constante y una adecuada distribución de potencia entre el sistema y la planta de generación.

Como podemos darnos cuenta la regulación del voltaje, potencia reactiva y factor de potencia, están directamente relacionados con el control de la

corriente de campo del generador ó **EXCITATRIZ** y conforme el tiempo ha ido avanzando y la tecnología creciendo, se han inventado diferentes controladores de la corriente de campo de un generador llamados **REGULADORES DE VOLTAJE**.

Los reguladores de voltaje son dispositivos capaces de mantener el voltaje constante en las terminales de un generador, pese a las variaciones de carga a que puede estar sometido.

En vista de la relación existente entre la excitatriz y el voltaje, es necesario estudiar los diferentes tipos de excitatriz que se usan actualmente y su normalización, la explicación se desarrolla en capítulo 2 de este trabajo, donde se analiza detalladamente cada sistema.

Mencionamos anteriormente que el voltaje de un generador debe permanecer constante, aunque esté sometido a variaciones de carga. La excitatriz de un generador es el medio por el cual se cumple lo anterior, o sea que gobernando adecuadamente este sistema se logra la constancia en el voltaje.

1.2 REGULADORES DE TENSIÓN

A los generadores de las centrales eléctricas se les exige que mantengan la tensión constante. Estando sometidos los mismos a continuas variaciones de carga, se precisa, por consiguiente una regulación también continua de la excitación. Para limitar ésta en todo lo posible, los alternadores se construían antes con pequeña reactancia de dispersión y pequeña reacción de inducido (gran entrehierro). Hoy para lograr generadores más económicos, se construyen, por el contrario, con gran reactancia de dispersión y pequeño entrehierro, lo que equivale a una mayor reacción de inducido, resultando así las famosas máquinas blandas, en las cuales, al oscilar la carga, la excitación tienen que variarse en cuantía sensiblemente superior. Esta regulación de tensión es imperfecta si se

hace a mano, y para despreocupar de ella al personal se recurre a dispositivos automáticos, a los llamados reguladores rápidos, los cuales cuando se producen las fluctuaciones de carga, acomodan la excitación del modo más rápido posible, a las nuevas circunstancias.

Los generadores trifásicos síncronos de centrales eléctricas pueden funcionar en dos regímenes diferentes. En primer lugar, el régimen estable es decir, durante los períodos en que la carga permanece constante; en segundo lugar, en régimen transitorio, es decir, cuando la carga se modifica lentamente o, en otro caso, instantáneamente.

Naturalmente, como los reguladores de tensión tienen por objeto hacer que la tensión del generador vuelva a un valor de régimen después de una perturbación, interesa estudiar el régimen transitorio.

Para hacer más fácil estos estudios se supone un generador a velocidad constante, cualquiera sea la carga, por otra parte, es el caso más corriente en la práctica.

Supongamos (figura 1.1) que este generador marcha en vacío, a velocidad normal, y proporciona su tensión normal; la excitatriz posee un solo reostato de excitación que actúa sobre el campo inductor de la misma excitatriz. Por medio de un interruptor S, se puede poner el generador a plena carga; normalmente, esta carga será parcialmente reactiva.

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

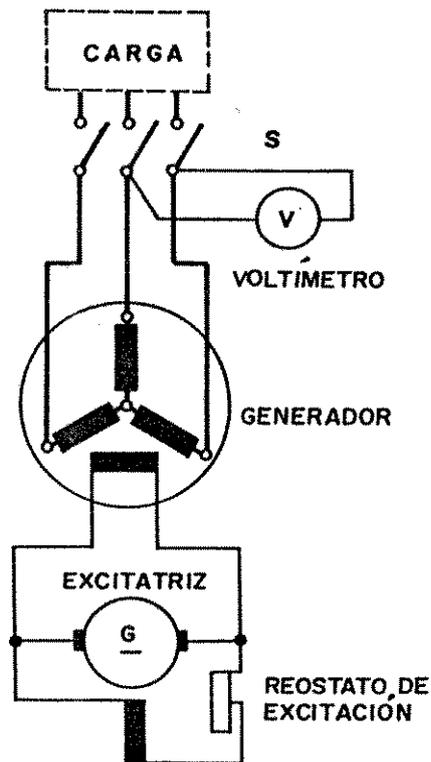


Fig.1.1 Esquema de conexiones para el estudio de un generador trifásico sincrónico en régimen transitorio.

Se cerrará el interruptor S, observando los aparatos de medida; de forma instantánea; la tensión indicada por el voltímetro baja bruscamente, tal como está representado en la curva de la fig.1.2. La parte vertical AB, que es la caída instantánea, se debe a la reactancia del generador, y la parte BC (en que ya interviene el tiempo), es el efecto de la reacción de inducido que depende de la componente reactiva de la carga. Si no se actuará sobre el reostato de campo de la excitatriz, la tensión continuaría bajando para alcanzar un valor muy bajo, tal como se representa en línea de trazos, en la fig.1.2.

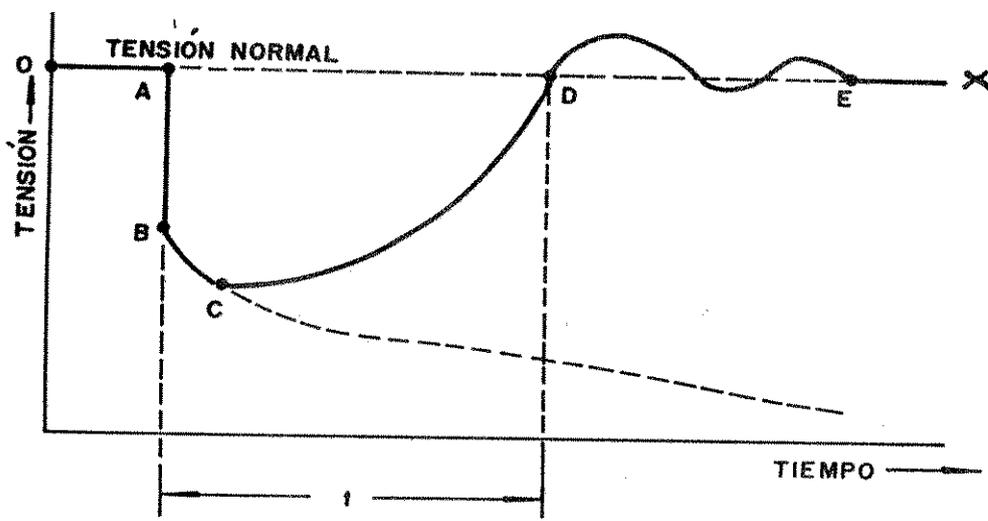


Fig. 1.2 Curva de regulación de un generador síncrono en régimen transitorio con regulación manual de tensión

Por lo tanto, si la parte vertical de la curva de caída de tensión, tiene lugar en un tiempo nulo, el regulador no puede suprimirla, ya que es esta misma caída la que pone en funcionamiento dicho regulador; es decir, que habría de construirse un dispositivo que adivinara la perturbación lo que, naturalmente, resulta imposible.

Es decir que un regulador tendrá tanta más caída cuanto el punto de intersección se acerque más al punto B de la curva representada en la figura 1.2. Un regulador rápido tiene su punto de acción infinitamente cerca del punto B.

1.3 REGULACIÓN MANUAL DE LA TENSIÓN

Vamos a suponer que encontramos un operador extraordinariamente experto al que asignamos la labor de regular manualmente la tensión del generador.

Este operador cuando aprecia que la tensión comienza a bajar, maniobra inmediatamente sobre el reóstato de excitación poniéndolo en corto circuito. La tensión sube, pero cuando el voltímetro indica un valor próximo al valor de

consigna, maniobra sobre la palanca del reostato para insertar resistencias pues de lo contrario, la tensión crecería demasiado; por último, este operador habrá de buscar, por tanteo, el punto correspondiente a la tensión normal. Volvamos ahora a la figura 1.2, esta regulación manual consigue los siguiente efectos:

Rama ABC: Bajada de tensión

Rama CD: Elevación de tensión

Rama DE: Oscilación alrededor del punto definitivo de regulación.

Todo ello nos demuestra que, a pesar de la rápida puesta en corto circuito del reostato de excitación (por otro lado no se puede hacer nada más), el tiempo t comprendido entre el punto A y el punto D, necesario para llevar la tensión a su valor normal, no es, ni mucho menos, despreciable. Vamos a ver cuál es la causa de este retardo.

Para compensar la caída de tensión debido a la reactancia del generador, hay que aumentar el flujo magnético emitido por el inductor; para esto hay que aumentar el flujo de la excitatriz que alimenta este inductor y para aumentar esta tensión, hay que elevar la intensidad de la corriente que circula por los arrollamientos de excitación de la excitatriz.

En resumen, se puede analizar la figura 1.3 se observa que para llevar la tensión a su valor normal, hay que variar la resistencia R_0 del circuito inductor-reostato, a un nuevo valor R_1 menor que el anterior. por lo tanto, la intensidad de corriente será $I_0 = E/R_0$ y para R_1 $I_1 = E/R_1$

La figura 1.3 nos muestra de mejor manera la dependencia del voltaje del generador en función de la corriente de campo, para dos diferentes valores de resistencia de campo a velocidad constante.

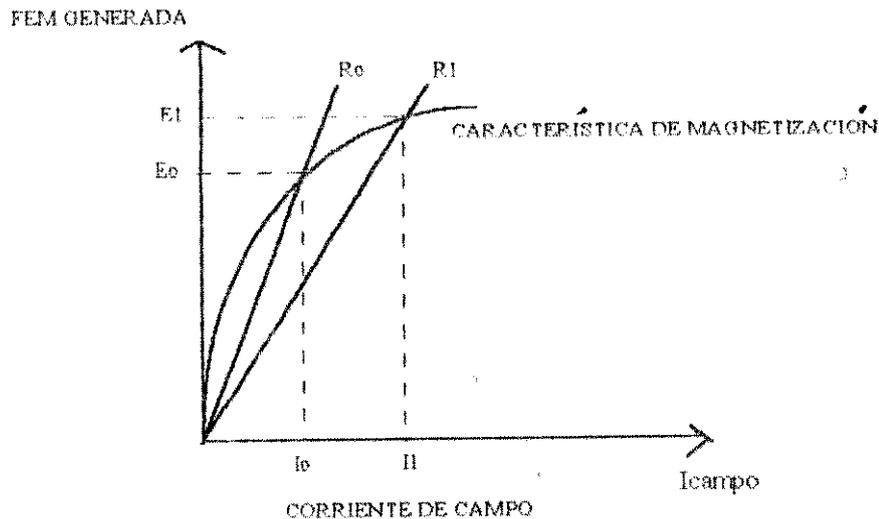


Figura 1.3 Curva que muestra la variación de voltaje con la variación de la corriente de campo, se considera la velocidad constante

Se puede observar que el tiempo no interviene, porque casi siempre ocurre que los circuitos eléctricos se estudian, cuando ya se ha establecido la corriente, es decir, en régimen permanente y se desprecia el tiempo de establecimiento de la corriente, porque, generalmente, es muy pequeño.

Pero nuestro caso es diferente, ya que los circuitos estudiados (inductores y rueda polar) tienen inductancias considerables e intervienen, por tanto, los efectos de las corrientes de autoinducción; el tiempo de establecimiento de la corriente o período transitorio, ya no se puede despreciar y es, en nuestro caso, este período el que interesa, más particularmente.

Al analizar el siguiente circuito de un generador en derivación este ayuda a entender mejor el período transitorio. figura 1.4a

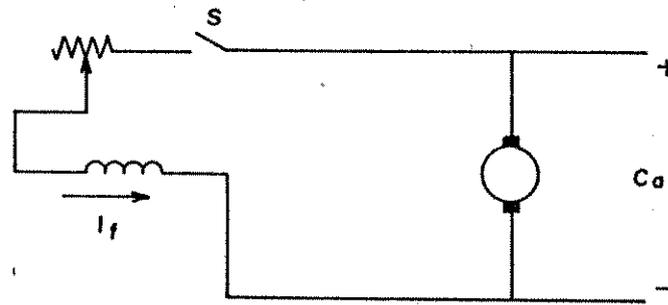


Figura 1.4a Generador en derivación

La figura 1.4b da la tensión en bornes del inducido en función del tiempo, a partir del momento de cierre del interruptor del circuito de excitación: Puesto que la tensión inducida C_a es la que se aplica al circuito inductor, la ecuación de tensión en el mismo puede escribirse:

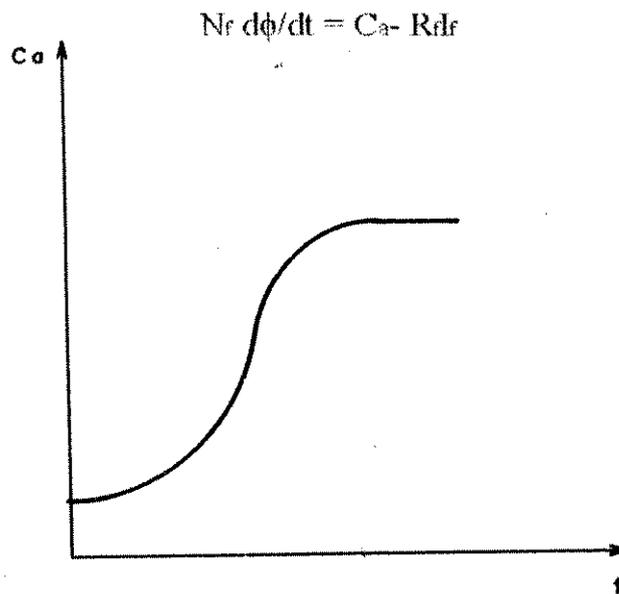


Figura 1.4b. Proceso transitorio de la subida tensión en función del tiempo

Siendo ϕ el flujo de excitación por polo y N_f el número de espiras del devanado inductor. Por consiguiente el aumento de flujo en un momento dado, y por consiguiente el de la tensión inducida, es proporcional a la diferencia vertical entre la curva de magnetización y la recta de resistencia del inductor. (figura 1.4c).

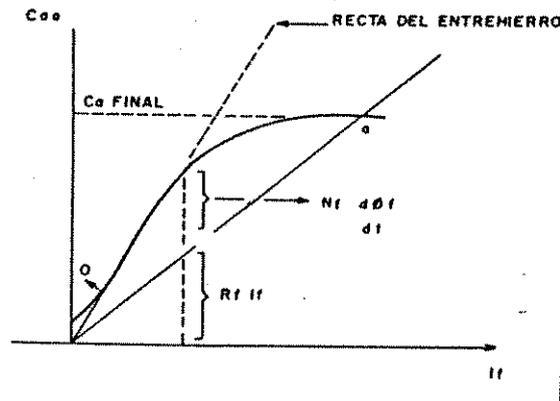


Figura 1.4c Curva de magnetización

La curva C_a en función del tiempo puede determinarse despejando las variables integrando gráficamente, sabiendo que $Ni d\phi/dt = (1/k_g) d(L_{ff} C_{ao})/dt$ donde L_{ff} es coeficiente de autoinducción y K_g una constante tenemos:

$$dt = (L_{ff}/K_g) dC_{ao} / (C_{ao} - R_f I_f)$$

El tiempo requerido para que la tensión pase desde un valor inicial C_r hasta otro C_a es:

$$t = \frac{L_{ff}}{K_g} \int_{C_r}^{C_a} \left(\frac{1}{C_{ao} - R_f I_f} \right) dC_{ao}$$

La conclusión a la que se puede llegar es que, después de una perturbación importante sobre un generador, aunque se accione instantáneamente sobre el reostato, de excitación habrá un periodo transitorio (ABCD de la fig.1.2), que es imposible suprimir en el estado actual de la técnica de los generadores; la misión del regulador de tensión será reducir, en lo posible, este periodo transitorio, actuando sobre la parte ABC de la curva anterior.

Si en lugar de una carga, se trata de una descarga brusca, se pudo encontrar la misma forma de curva, pero en sentido inverso y, en lugar de una caída de tensión, una sobretensión.

Hemos observado que en caso de una perturbación del régimen de un generador síncrono (por ejemplo una puesta a plena carga), es necesario que el generador actúe lo más rápidamente posible. La rapidez de un regulador, depende de varios factores que son:

- a-La inercia
- b-La distancia a recorrer.
- c-El par del órgano motor.

Supongamos que nuestro regulador actúa muy rápidamente y al máximo de las posibilidades de la excitatriz; por lo tanto la tensión aumentará de valor muy rápidamente. Pero si la parte de la curva CD, corta la recta OX (figura 1.3) en este momento el regulador actúa para hacerla bajar pero, por efecto de la elevada autoinducción de los circuitos inductores, la tensión crece, después decrece, cortando nuevamente el eje OX. Si el amortiguamiento del regulador resulta insuficiente es decir, si el regulador actúa con demasiada rapidez, en relación con el tiempo que necesita el generador síncrono para excitarse, se obtiene una función periódica no amortiguada, que provoca oscilaciones de tensión, con grandes amplitudes alrededor el eje OX (curva I de la fig.1.3). Por lo tanto, hay que dar al regulador un amortiguamiento apropiado para retardar la regulación.

Examinando detenidamente las curvas de la figura 1.3, observamos que:

- 1- La curva I tiene un amortiguamiento insuficiente como hemos visto; por lo tanto, se obtiene oscilaciones no amortiguadas y el regulador no llega nunca a la posición de equilibrio.
- 2- Si aumentamos el amortiguamiento, las oscilaciones del regulador se hacen rápidamente amortiguadas (curva II), y el regulador llega a la posición de equilibrio.

3- Con un amortiguamiento perfecto, el funcionamiento del regulador se hace aperiódico (curva III), es decir, se llega a la posición de equilibrio, sin ninguna oscilación.

4- Con un amortiguamiento excesivo, el tiempo de perturbación se hace muy largo y aunque el funcionamiento del regulador es también aperiódico (curva IV), tarda un tiempo excesivo en volver a la posición de equilibrio o, en su caso, no llega nunca a alcanzar esta posición.

Por lo tanto el buen funcionamiento de un regulador de tensión constituye un compromiso entre estos dos factores:

a- Si la tensión aumenta muy rápidamente, existe el peligro de que aparezca una serie de oscilaciones amortiguadas (curva II de la figura 1.3)

b- Si la tensión aumenta lentamente, puede suceder que la duración total del restablecimiento de la tensión se alargue innecesariamente (curva III de la figura 1.3)

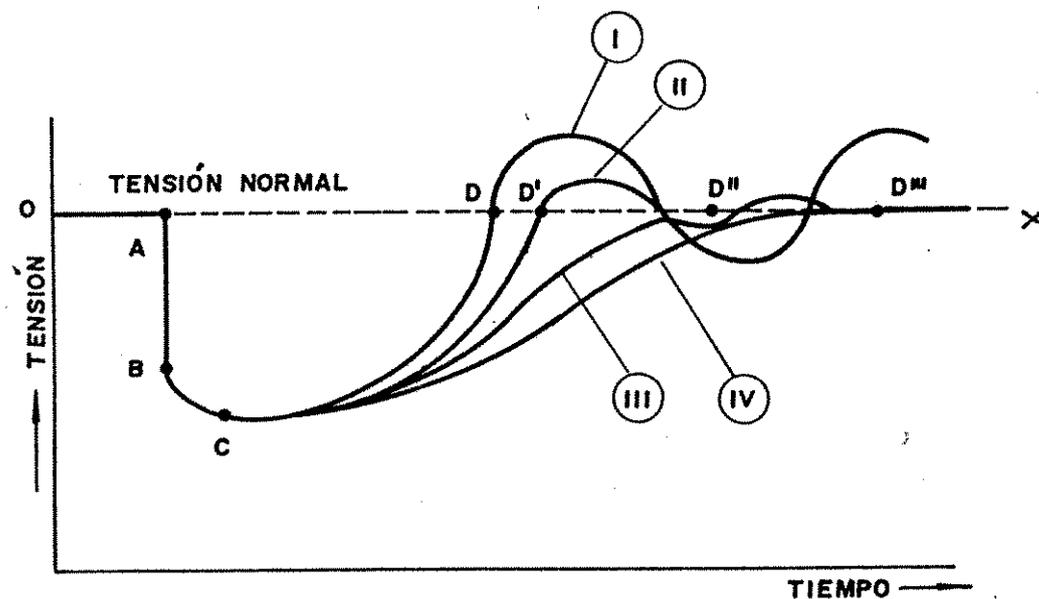


Fig. 1.5 Curvas de regulación de un generador en régimen transitorio, en diferentes formas de regulación automática.

1.4 SOBRRERREGULACION

Al estudiar la regulación manual de un generador hemos visto que, para disminuir el tiempo comprendido entre A y D, se hacía necesario poner el reostato de campo de la excitatriz en cortocircuito en el momento de la aplicación de la carga; de esta forma, podíamos hacer crecer rápidamente la tensión. O sea, que, llevámos el reostato de excitación más allá del valor estrictamente necesario para que la tensión volviera a su valor primitivo; en resumen, aplicábamos una sobrerregulación. Para entender mejor este proceso, vamos a regular de nuevo manualmente, el generador de la forma siguiente:

Con el generador todavía en vacío, se señalará el punto del reostato de excitación que corresponde al valor de la tensión normal a plena carga, se se cierra enseguida el interruptor poniendo el generador a plena carga y se conecta a continuación la palanca del reostato sobre el punto señalado. Se observará entonces que la tensión crece rápidamente al principio y, después, más lentamente; en realidad, no se obtiene nunca el primitivo valor de la tensión del generador en vacío es tan pequeña, que se puede admitir que sea la misma. Pero, en este caso, el tiempo de la perturbación es de 4 a 5 veces más largo que en el caso anterior. Es decir, que, con sobrerregulación se obtendrá una característica de funcionamiento parecida a la curva III de la figura 1.3 mientras que sin sobrerregulación, esta característica es parecida a la curva IV de la figura 1.3.

1.5 CUALIDADES DE LOS REGULADORES DE TENSION

De acuerdo con lo que se ha estudiado hasta ahora, se puede decir que un buen regulador de tensión ha de tener las siguiente cualidades:

- a- **Rapidez de respuesta.** Es decir, ha de intervenir rápidamente después de unavariación de la carga, para evitar que la tensión caiga rápidamente. Para ello ha de tener poca inercia, elevado par motor y corto recorrido.
- b- **Exactitud.** Para llevar exactamente la tensión al valor de régimen, después de una perturbación.
- c- **Sensibilidad.** Para reaccionar a las perturbaciones débiles.
- d- **Amortiguación eficaz.** Para evitar la producción de oscilaciones. de ser posible el amortiguamiento ha de ser ajustable para que el usuario pueda ajustarlo a las características de su generador.
- e- **Sobrerregulación.** Para aprovechar al máximo las posibilidades del generador.

1.6 SISTEMAS CLÁSICOS DE EXCITACIÓN

La excitación de los alternadores se realiza por medio de corriente continua que recorre el circuito de las bobinas inductoras del rotor.

El sistema de excitación consta de los aparatos y máquinas cuyo objeto es suministrar una potencia fija, sino que deben desarrollar la potencia que convenga y modificarla tan rápidamente como sea posible, es decir poseer una gran velocidad de respuesta, según ciertas leyes bien determinadas.

Es sabido que en la práctico no es posible mantener constante las tensión de un generador, y por lo tanto evitar las variaciones que causan las perturbaciones o los cambios en la carga. Por ello se puede evaluar las cualidades intrínsecas de un sistema de excitación según la rapidez con la cual es capaz de establecer el valor deseado de la tensión. La misión que debe realizar el sistema de excitación puede, por tanto, descomponerse en dos partes: La

primera consiste en contener la intensidad de corriente rotórica en el valor necesario durante la perturbación o el cambio de carga, y la segunda precisa el establecimiento tan rápido como sea posible del valor prescrito de la tensión en los bornes del generador desde que se produce la variación de la tensión. Se puede resumir las dos misiones expresadas de esta manera: mantenimiento de la tensión en el entrehierro, concepto que se define como la tensión inducida correspondiente al flujo en el entrehierro, y mantenimiento de la tensión en los bornes del alternador.

1.7 VELOCIDAD DE RESPUESTA DE LAS EXCITATRICES

Para apreciar una máquina de corriente continua como la excitatriz e preciso por consiguiente, conocer la rapidez con la cual reacciona a un impulso de corriente, y la potencia que precisa poner en juego para provoca esta reacción.

La velocidad de respuesta de una excitatriz se expresa en voltios por segundo. De una máquina se dice que es una excitatriz de respuesta rápida cuando siendo su tensión nominal de 200 V, la elevación de tensión es al menos de 600 V/seg, o, en función de la tensión nominal, de 300%/seg.

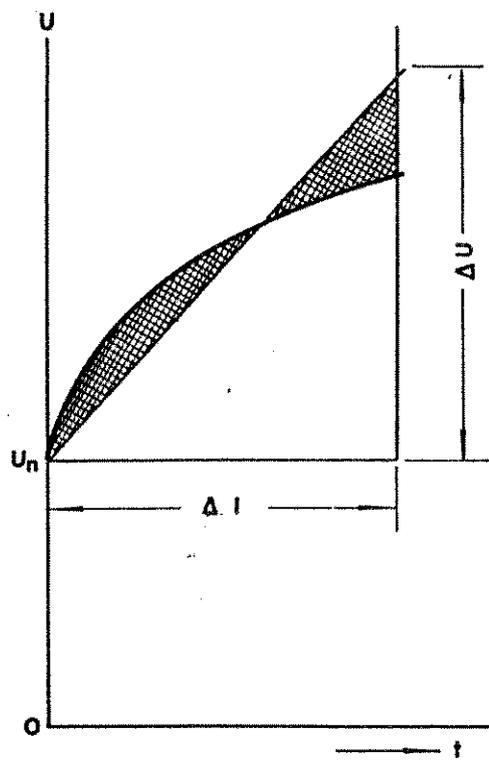


Fig. 1.6. Definición de la velocidad de respuesta, según normas americanas

Dicha velocidad de respuesta, según las norma americanas, se define como sigue:

La excitatriz girando en vacío a velocidad nominal, se regula a la tensión excitadora nominal necesaria para el servicio nominal del alternador. Ahora se pone bruscamente en corto circuito la resistencia reguladora en el circuito de campo de excitatriz y se determina la curva $U=f(t)$ (figura 1.4).

Se elige delta t igual a 0.5 segundos y se sustituye la curva por una recta, de tal modo que la superficie a sea igual a la superficie b de la figura anterior y la relación delta U dividido delta t corresponde entonces a la velocidad de respuesta o de excitación.

En redes que trabajan en común y en las que se adjudica valor a la estabilidad n el transporte de energía, es necesario que, al producirse cortocircuitos lejanos, la tensión de las centrales que han de trabajar juntas

sincrónicamente no baje demasiado durante el tiempo que transcurre hasta la desconexión del corto circuito, ya que de otro modo desaparecería el sincronismo. Aquí importa tanto la velocidad de respuesta como tener un exceso de potencia suficiente en la excitatriz. En efecto, en caso de cortocircuito, el arrollamiento de inducido provoca un campo opuesto potente, el cual exige, para su compensación, elevado número de amperivoltas en la excitación; es decir, que la excitatriz tiene que suministrar entonces una potencia más alta que en servicio nominal. Según las circunstancias habrá que contar en los casos difíciles con un exceso de tensión de un 20 a un 50% de la que corresponde al servicio nominal; la máxima tensión de la excitatriz obtenible se designa techo de la tensión (Ceiling voltage).

1.8 CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS EXCITATRICES

La tensión de excitación generalmente utilizada, es de 125 voltios en las centrales de pequeña y mediana potencia. Generalmente se utilizan dinamos de característica derivación y, en algunos casos, de característica compuesta o compound.

Con un tipo normal de excitatriz, el alternador puede trabajar con tensiones que no exceden de un 15% sobre la tensión normal de servicio lo que, en casi todos los casos resulta suficiente.

La potencia del equipo de excitación depende de la importancia de la central y del tipo de generadores empleado. Para generadores de pequeña potencia y baja velocidad, es necesaria una potencia de excitación de aproximadamente, un 3% de la potencia total del generador. En generadores de gran potencia y elevada velocidad. (por ejemplo, los turbogeneradores) basta con una potencia de excitación equivalente a un 0.5% de la potencia total del

generador. Estos datos son solamente orientados y deben seguirse, en todos los casos, las indicaciones del fabricante. En el caso de barras comunes de excitación para varios generadores, la potencia total de excitación debe resultar suficiente para suministrar toda la corriente de excitación, con el equipo de reserva está comprendida, en la práctica, entre el doble y el triple de la potencia de excitación total necesaria.

En las excitatrices normales de autoexcitación, el límite máximo de tensión es de 135% de la tensión normal de servicio y su velocidad de respuesta es del orden de 125 voltios por segundo. El régimen estable de trabajo de estas excitatrices, está comprendido entre el 75% y el 125% de la tensión nominal de la excitatriz.

En las excitatrices de respuesta rápida, la tensión máxima que se puede obtener es de unos 320 voltios para 250 voltios de tensión nominal; la velocidad de respuesta es de 400 a 600 voltios por segundo.

Moderadamente se adoptan velocidades de respuesta de la excitatrices del orden de 6,000 a 7,000 voltios por segundo, aplicándose al conjunto de estos dispositivos el nombre de superexcitación. Las excitatrices construidas para funcionamiento en superexcitación son de tensión nominal más elevadas: por ejemplo, 600V si la tensión de excitación es de 250 V, por lo tanto, su tensión límite de funcionamiento alcanza los 1000 V.

Como veremos al hablar de los sistemas de excitación, para conseguir una elevada velocidad de respuesta de una excitatriz, es conveniente el empleo de una excitatriz piloto, que suministre la corriente de excitación a la excitatriz principal. Casi siempre, la excitatriz piloto está directamente acoplada al eje del generador principal aunque, en algunas ocasiones, se dispone con accionamiento por motores eléctricos independientes.

Para una excitación de respuesta rápida, la potencia de excitatriz piloto, es aproximadamente, de 1.5% a 5% de la potencia desarrollada por la excitatriz principal. En caso de superexcitación, la potencia de la excitatriz piloto está comprendida entre el 15% y 25% de la potencia de la excitatriz principal.

Los sistemas de excitación para generadores síncronos más empleados son:

-Excitación independiente

En la que un solo grupo excitatriz formado por un dínamo de tensión constante y un motor eléctrico o una turbina auxiliar, sirve para la excitación de varios alternadores regulándose la corriente de estos por un reostato de campo.

-Excitación propia

Por medio de una excitatriz autoexcitada en derivación, con regulación de la corriente de excitación del alternador, por medio del reostato de campo de la excitatriz.

-Excitación con excitatriz auxiliar y piloto

Construido por una excitatriz principal excitada por medio de una excitatriz piloto funcionando a la tensión constante.

-Excitación por medio de un grupo

Montado sobre el eje del alternador formado por una excitatriz principal autoexcitada y de una dínamo elevadora piloto funcionando a tensión constante,

que alimenta el arrollamiento de la excitatriz principal, sumando su tensión a la del dínamo autoexcitada principal.

-Excitación con tensión auxiliar constante

Dicho sistema permite hacer estable la regulación en las tensiones bajas con un gasto mínimo.

-Excitación de cada generador por medio de un grupo

Excitatriz independiente por el alternador, formado por una excitatriz principal y una excitatriz piloto coaxiales accionadas por un motor eléctrico, por una turbina auxiliar o por una caja de engranajes multiplicadores acoplada al eje del alternador.

1.9 SISTEMAS MODERNOS DE EXCITACIÓN

Desde hace algunos años, los sistemas clásicos de excitación, que se mencionan anteriormente, están dando paso a otros sistemas de excitación que utilizan, de una manera u otra, dispositivos electrónicos varios: diodos, tiristores, amplificadores magnéticos, etc. Con estos nuevos procedimientos, algunos de los cuales aun están en periodo de ensayo, se consiguen ventajas sustanciales, tales como mayor velocidad de respuesta, menor oscilación en la tensión del alternador, ausencia de aparatos móviles, etc.

Unas veces se emplean excitatrices normales pero cuya tensión está regulada por procedimientos electrónicos; en otras ocasiones, se suprimen el colector y las escobillas, sustituyendo la excitatriz clásica por un conjunto alternador de excitación-dispositivo rectificador; finalmente, en otra ocasiones, se suprime totalmente la excitatriz, sustituyéndola por dispositivos estáticos de

excitación. En todos los casos citados, la regulación de tensión se efectúa por medio de equipos electrónicos. Son muchos los casos de estos sistemas, por lo que solo se mencionan los grupos en los cuales se encuentra incluidos gran variedad de excitatrices, estos grupos son:

1- Sistemas de excitación con excitatriz de corriente continua

2- Sistemas de excitación con excitatriz de corriente alterna.

3- Generadores excitados por una fuente independiente de energía

4- Sistemas de excitación autoexcitados

A continuación se muestra un ejemplo de cada uno de los sistemas de excitación mencionados anteriormente.

Sistema de excitación con excitatriz de corriente continua

- 1- Generador
- 2- Transductor
- 3- Rectificador
- 4- Resistencia de limitación en el circuito de la excitatriz
- 5- Excitatriz

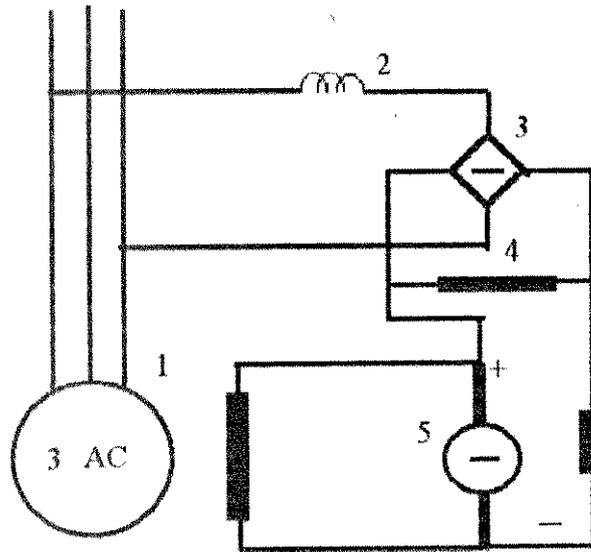


Figura 1.7 Esquema elemental del regulador de transductores ASEA, para reguladores de tensión en reguladores pequeños con excitatrices autoexcitadas

Sistemas de excitación con excitatriz de corriente alterna.

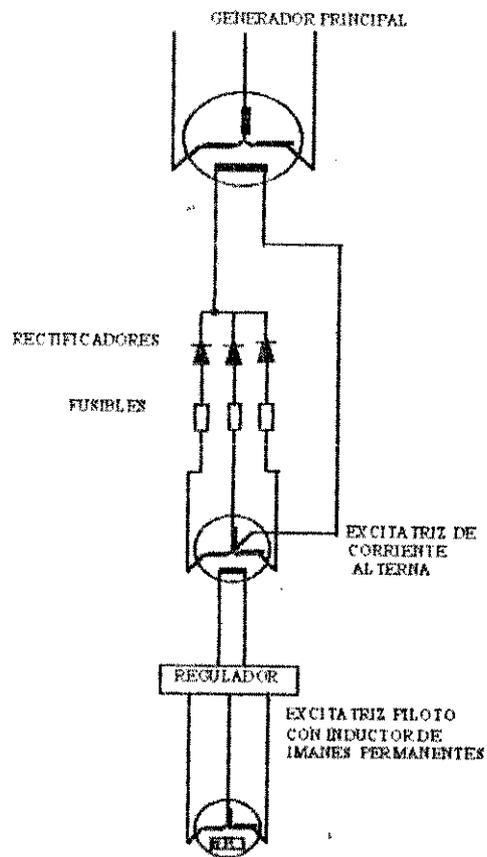


Figura 1.8 Esquema simplificado de un sistema de excitación con excitatriz de corriente alterna

Sistemas de excitación autoexcitados

- 1- Alternador
- 2- Transformador de tensión
- 3- Regulador de tensión
- 4- Transductor
- 5- Transductor
- 6- Red auxiliar de corriente alterna

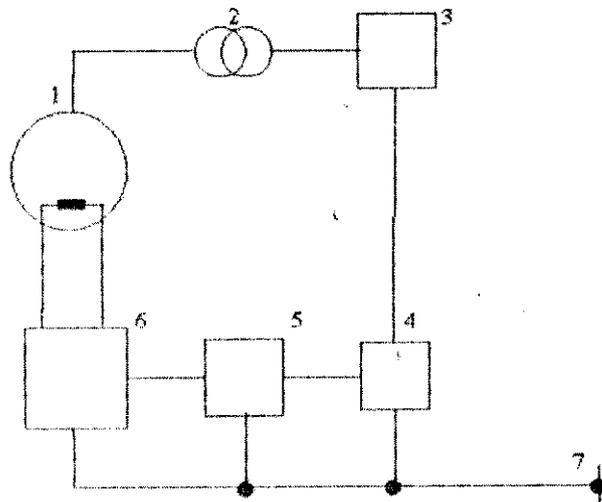


Figura 1.9 Regulación de un alternador con excitación alimentada por una red auxiliar.

Sistema de excitación autoexcitado

- 1- Alternador
- 2- Bobina
- 3- Transformador
- 4- Rectificador

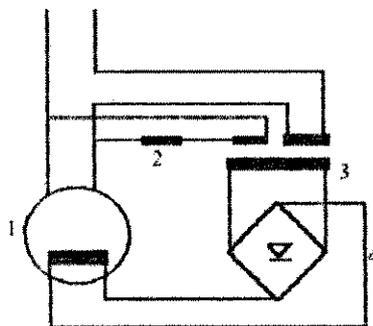


Figura 1.10 Ejemplo de un sistema autoexcitado.

2. PRINCIPIOS BÁSICOS PARA EL CONTROL DE VOLTAJE

2.1 PRINCIPIO DEL FUNCIONAMIENTO AISLADAMENTE

El funcionamiento aislado de un generador sincrónico puede analizarse separadamente considerándolo actuando en vacío o bien alimentando una carga con diferente factor de potencia. Este análisis incluye variables como: corriente de excitación, fuerza magnetomotriz engendrada por el rotor, voltaje inducido en el estator, corriente de armadura, fuerza magnetomotriz de reacción de armadura (f_{im}), fuerza magnetomotriz resultante, velocidad de la máquina, potencia y otras. Sin embargo, se hace referencia a ellas únicamente para comprender como se induce el voltaje en la armadura del generador y su relación con la corriente de excitación y el flujo asociado a ésta.

2.2 GENERADOR ACTUANDO EN VACÍO

El análisis matemático del voltaje inducido en un generador utiliza la ley de Faraday encontrando el voltaje inducido en una bobina y sumando luego las tensiones individuales de las demás tomando en cuenta la forma en que estas se conectan.

La ley de Faraday dice que un campo magnético variable en el tiempo es capaz de producir una fuerza electromotriz que puede producir una corriente en un circuito cerrado adecuado.

La ecuación del voltaje inducido en un conductor es:

$$e_i = (v \times B) \cdot L$$

v=Velocidad del conductor con respecto al campo magnético.

B= Densidad del campo magnético.

L= Longitud del conductor.

Aunque esta ecuación es deducida para el caso de un conductor que se mueve en un campo magnético estacionario, se puede adecuar a un campo magnético en movimiento y un conductor estacionario ubicándonos en el campo magnético como marco de referencia. De esta manera parece que lo que se mueve es el conductor.

se observa en la Fig. 2.1 un campo magnético girando dentro de una bobina estacionaria.

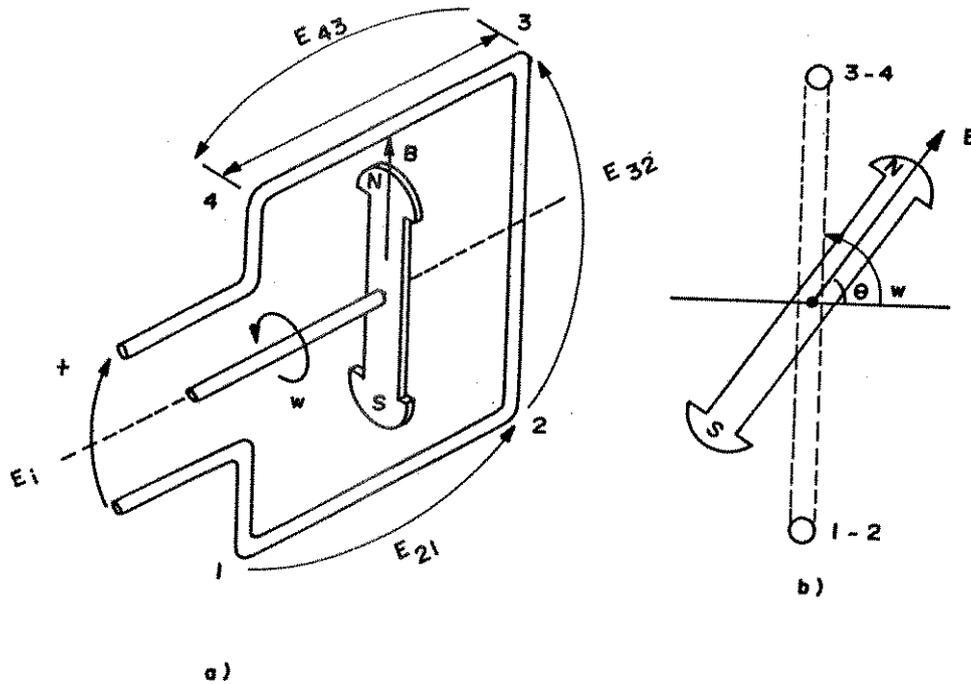


Figura 2.1 Campo magnético giratorio en el interior de una espira
a) Vista en perspectiva. b) Vista axial

Si se ubicase en el campo magnético como referencia se puede obtener la velocidad relativa y campos magnéticos de los lados de las bobinas en el siguiente plano vectorial. Figura 2.2

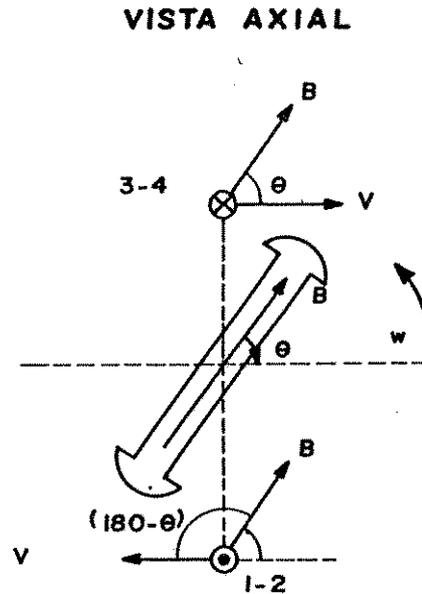


Figura 2.2. Plano vectorial

Encontrando el voltaje inducido en cada lado de la bobina:

1) Lado 2,1.

$$e_{2,1} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{L}$$

$$= vBL \sin(180 - \theta) \text{ hacia adentro de la página}$$

por identidad trigonométrica: $\sin(180 - \theta) = \sin \theta$ se tiene

$$e_{2,1} = vBL \sin \theta$$

2) Lado 2,3.

El lado L es Perpendicular a $(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ por lo tanto $e_{2,3} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{L} = 0$

3) Lado 3,4 .

$$e_{3,4} = (v \times B) \cdot L$$

= $vBL \sin(\theta)$ Hacia afuera de la página.

El voltaje total en la bobina es la suma de los dos segmentos.

$$e_i = 2vBL \sin(\theta)$$

Siendo el extremo 4 positivo con respecto al extremo 1, puesto que $\theta = \omega_e t$ donde $\omega_e = 2\pi f$ (grados eléctricos). Entonces

$$e_i = 2vBL \sin(\omega_e t)$$

Además se sabe que: velocidad tangencial es igual al radio por la velocidad angular mecánica, $v = r\omega_m$ donde:

r = radio

ω_m = velocidad angular (grados mecánicos)

además el área transversal de una espira es $2rL$ entonces:

$$e_i = 2(\omega_m r) BL \sin(\omega_e t)$$

$$e_{ind} = 2rL\omega_m B \sin(\omega_e t)$$

$$e_{ind} = AB\omega_m \sin(\omega_e t).$$

si se sustituye $\phi = AB$ tendremos

$$e_i = \phi\omega_m \sin(\omega_e t)$$

Para un estator de dos polos $\omega_e(\text{eléctrica}) = \omega_m(\text{mecánica}) = \omega$ ya que por cada vuelta mecánica hay un ciclo de 360 grados eléctricos por lo tanto.

$$e_i = N_c \phi \omega \sin(\omega t)$$

N_c = Número de espiras.

Frecuentemente los generadores se construyen con más de dos polos, y las bobinas del estator se distribuyen de tal manera que se atenúan drásticamente los componentes de armónicas de frecuencias superiores en el voltaje logrando así una onda más uniforme de tensión a la salida de la máquina.

En resumen se puede decir que el generador sincrónico funciona al alimentar el devanado del rotor con corriente continua la cual produce un campo magnético giratorio en el entrehierro el cual a su vez induce un sistema trifásico de voltajes en los arrollamientos del inducido. Este voltaje es igual al encontrado anteriormente. Los estatores reales no tienen una sola bobina por fase. Con el fin de lograr valores

adecuados en los voltajes de salida de las máquinas, se deben tener varias bobinas, cada una con un gran número de espiras. Esto exige que el devanado se haga distribuido en todo el estator. Al distribuir los devanados el voltaje de salida se ve disminuido pero físicamente se facilita la colocación de un mayor número de bobinas.

Las consideraciones anteriores modifican la ecuación de voltaje en un factor que llamaremos K , que depende en sí de la construcción de la máquina y que para objeto de análisis de voltaje se considera constante. La ecuación modificada queda así:

$$e = N_c \phi \omega \sin(\omega t)$$

$$e_{rms} = N_c \phi \omega$$

$$e_{rms} = N_c K \phi \omega \text{ donde: } N_c K = K$$

$$e_{rms} = K \phi \omega$$

$$e = K \phi \omega$$

$K = \text{cte.}$ depende de la construcción del generador.

$\phi =$ flujo producido por la corriente de excitación

$\omega =$ Velocidad de rotación

Este voltaje puede ser modificado variando el flujo (ϕ), quien a la vez depende de la corriente de excitación que alimenta el rotor. Por lo tanto si variamos la corriente de excitación podremos controlar el voltaje. Más adelante veremos los tipos de excitación que hay y haremos énfasis al tipo de excitación estática. Por el momento se debe tener claro que en un generador actuando solo y sin carga el voltaje inducido y por lo tanto el de terminales depende de la corriente de excitación.

2.3 GENERADOR AISLADO ALIMENTANDO UNA CARGA

Cuando un generador de voltaje es sometido a variaciones de carga el voltaje en terminales tiende a bajar o a subir dependiendo del factor de potencia de la carga que se adhiera. Para entender mejor lo anterior se considera un generador alimentando una carga en régimen permanente. En estas condiciones la velocidad de la máquina y la excitación están a determinado valor, al hacer un aumento de carga, la potencia demandada al generador aumenta, esto significa que aumentará la corriente como la velocidad y el flujo son constantes el voltaje inducido $E = K\phi\omega$ permanecerá constante.

Las características de regulación Fig. 2.3 son de mucha importancia ya que indican la corriente de excitación necesaria para mantener la tensión nominal en bornes al variar la carga con un factor de potencia constante. Otras curvas de importancia son las mostradas en la Fig. 2.4 donde pueden verse distintas curvas que dan la tensión en bornes en función de la corriente en el estator siendo el factor de potencia constante pero diferente en cada curva. Estas curvas constituyen la característica de tensión o característica externa. Cada curva está trazada con una corriente de excitación distinta, que en cada caso es la necesaria

para tener la tensión nominal en terminales cuando la corriente en el estator es la correspondiente a la carga nominal.

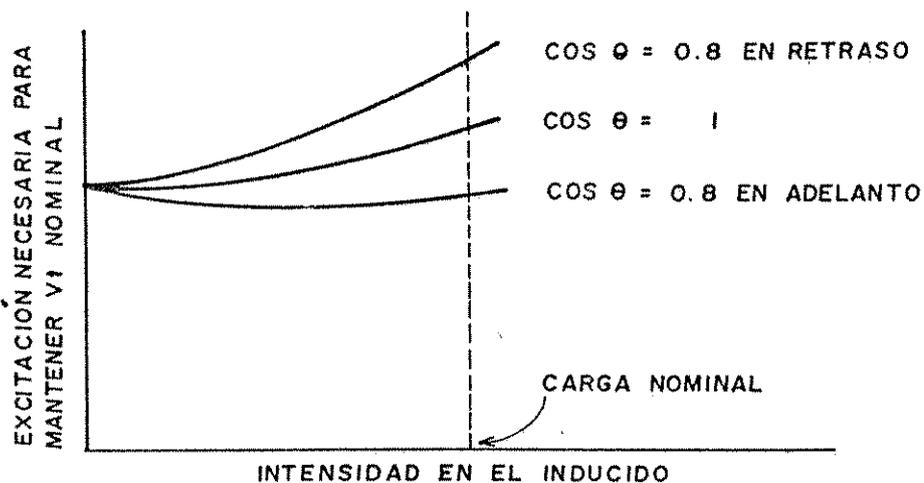


Figura 2.3 Corriente de excitación necesaria para mantener la tensión nominal en bornes a un factor de potencia constante.

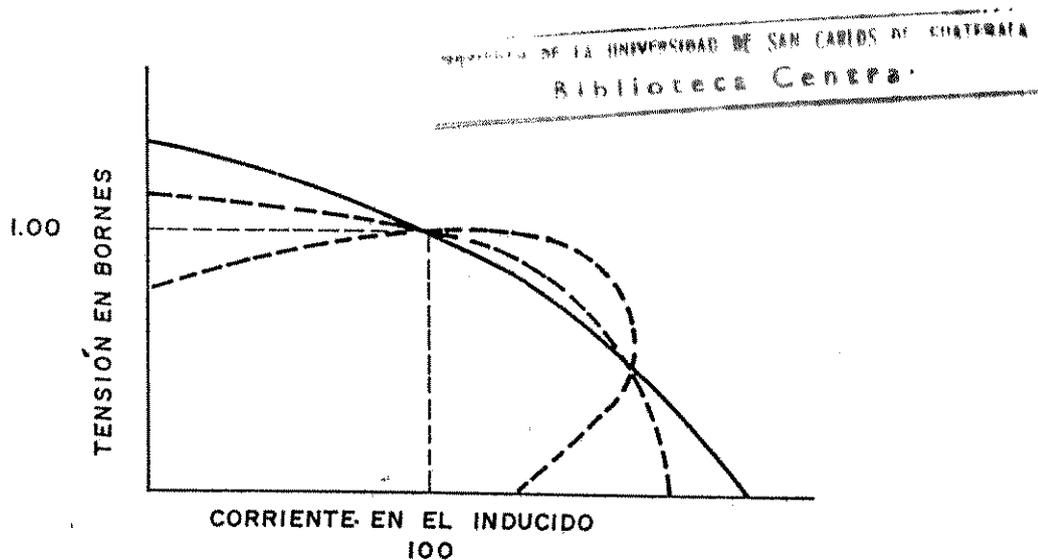


Figura. 2.4 Tensión en bornes en función de la corriente de estator a un factor de potencia etc.

Otra manera de observar como varia el voltaje al variar la carga es fasorialmente, para ello necesitamos el circuito equivalente de una fase de un generador. La Fig.2.5 nos muestra el circuito considerando la resistencia de los devanados despreciable.

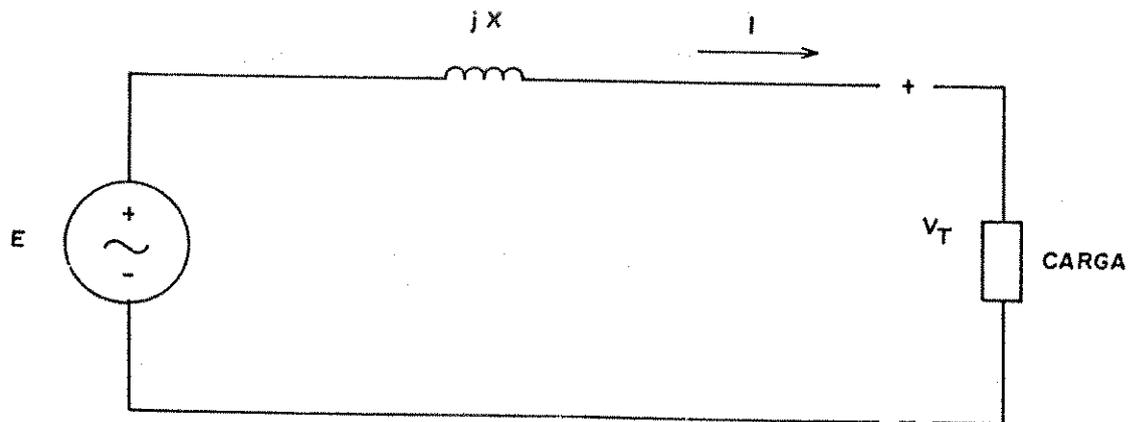


Figura 2.5. Circuito equivalente de una fase de un generador

Donde:

X_s = Reactancia síncrona

E= Voltaje inducido en el estator

V_T = Voltaje en terminales.

$$E = I X_s + V_T$$

Consideremos el generador en las condiciones anteriormente mencionadas velocidad cte, flujo constante por lo tanto $E = K\phi\omega = \text{cte}$. Los respectivos diagramas fasoriales, para los diferentes tipos de carga se puede observar en la figura 2.6.

- 1- Si inicialmente trabaja con una carga inductiva y le aumentamos carga también inductiva o sea factor de potencia en atraso el diagrama fasorial quedaria como en la Fig. 2.6a.
En este caso el voltaje en terminales tiende a disminuir porque aumenta la caída la reactancia sincrónica y E se mantiene constante.
- 2- Si inicialmente tiene carga resistiva y se le aumenta carga también resistiva. Fig. 2.6b
En este caso sucede lo mismo que el caso anterior aunque la disminución de V_t es menor.
- 3- Si inicialmente tiene carga capacitiva y se le aumenta carga también capacitiva. Fig. 2.6c
A diferencia de los casos anteriores, en este caso tiende a aumentar el voltaje en terminales.

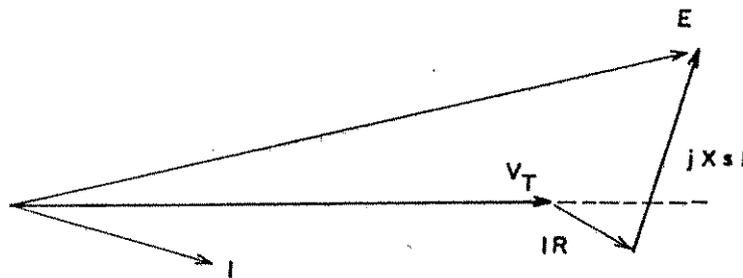


Figura. 2.6 a. Carga Inductiva

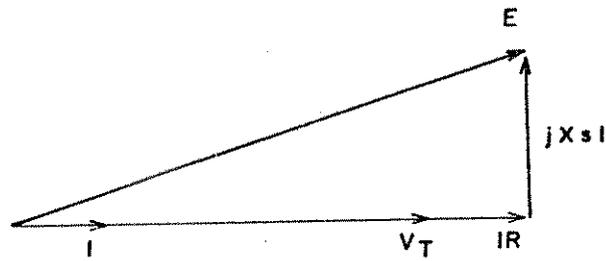


Figura. 2.6 b. Carga resistiva

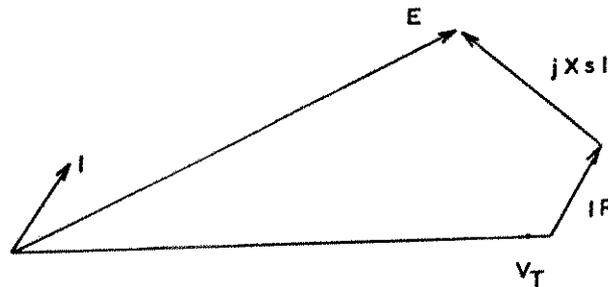


Figura. 2.6 c. Carga capacitiva

Figura 2.6 Variación del voltaje al aumentar la carga.
 a) Carga inductiva. b) Carga resistiva.
 c) carga capacitiva

Se ha estudiado como el voltaje terminal varia con los aumentos de carga, sin embargo, cualquiera sea el tipo de carga que se suma a un generador el voltaje debe permanecer constante y es allí donde actua el operador modificando manualmente la corriente de excitación o bien el regulador de voltaje modificando automáticamente la corriente de excitación. La carga reactiva que el generador entregue dependerá de la que la carga le solicite.

2.4 FUNCIONAMIENTO EN PARALELO.

Actualmente los generadores comparten la carga a distribuir con otros generadores conectados en paralelo excepto cuando su fin es servir como de emergencia. Las características de los generadores tienden a ser diferentes cuando trabajan en paralelo que cuando trabajan solos. En el caso del voltaje, característica de nuestro interés su comportamiento es un poco distinto al caso del generador aislado, y se debe a que este depende no solo de una máquina sino de varias, esto significa que una ligera variación en la corriente de campo de uno de ellos puede modificar la carga reactiva y voltaje total del sistema. A continuación analizará lo anteriormente dicho:

Al referirse a los generadores actuando aisladamente se demuestra que el voltaje disminuye cuando se le aumenta carga inductiva o resistiva y aumenta cuando se le aumenta carga capacitiva. Puede representarse esta variación de voltaje vs. potencia reactiva en curva Fig. 2.7

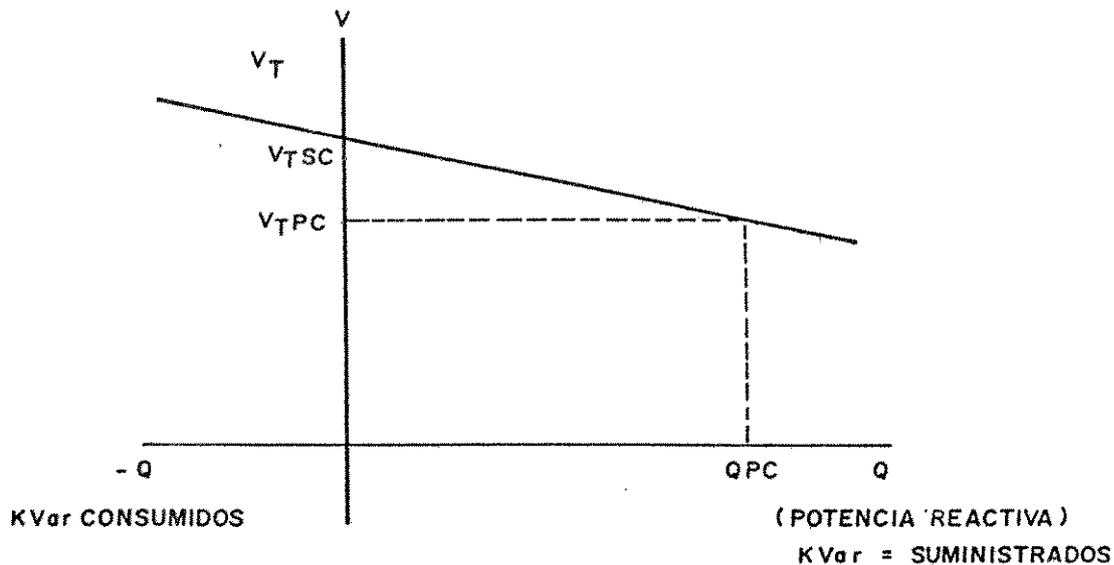


Figura. 2.7 Variación de voltaje Vrs. Potencia reactiva

donde:

V_{TSC} = Voltaje sin aumento de carga.

El generador 2 funciona a mitad de carga para 380 V mientras que el generador 1 trabaja a 3/4 de carga para un mismo voltaje lo cual significa que la carga reactiva esta mal distribuida.

Cuando se habla de un generador actuando aisladamente se anotó que el voltaje en terminales puede controlarse con la corriente de campo y que la carga reactiva que éste entregue depende de lo que la carga requiriera. Cuando se trabaja en paralelo el principio es similar con la diferencia que tienen que controlarse varios generadores. El control de esto se realiza de la siguiente manera: Si se tiene cierta carga reactiva distribuida entre dos generadores conectados en paralelo y se aumenta la corriente de campo en uno de ellos, el voltaje del sistema aumentará, la carga reactiva entregada por éste generador aumentará y la carga reactiva entregada por el otro generador disminuirá. Si se quiere modificar la potencia reactiva entre los dos generadores sin variar el voltaje se debe aumentar la corriente de excitación de uno mientras disminuye la corriente de excitación del otro. La curva 2.9 muestra el procedimiento anterior.

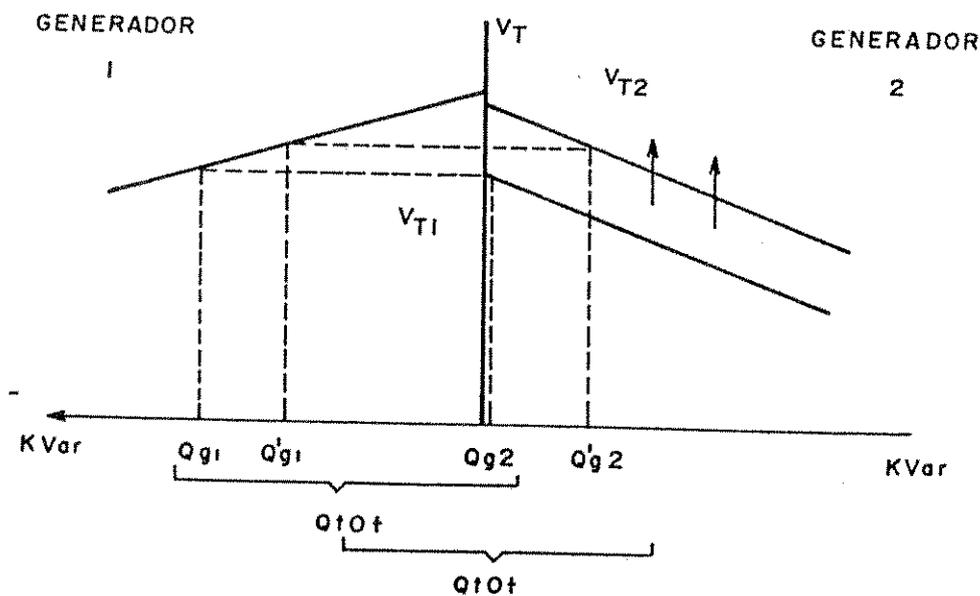


Figura 2.9. Variación de la potencia sin modificar el voltaje

Para modificar el voltaje terminal sin modificar la repartición de potencia reactiva se tiene que aumentar o disminuir al mismo tiempo ambas corrientes de campo la fig. 2.10 muestra lo anteriormente dicho.

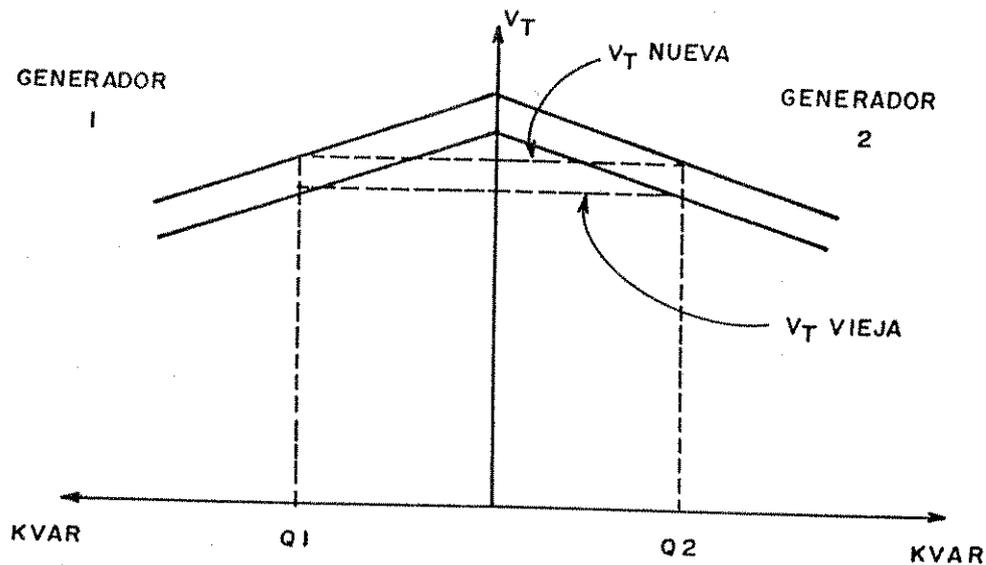


Figura 2.10. Variación del voltaje sin modificar La potencia reactiva.

2.6 FUNCIONAMIENTO, EN PARALELO, CON UN SISTEMA DE POTENCIA.

Cuando un generador trabaja conectado a un sistema de potencia muy grande la frecuencia y el voltaje son gobernados por éste, nada de lo que e haga modificará considerablemente estas dos características. Por lo tanto se dirá que cuando un generador o varios generadores trabajan en paralelo con un sistema grande de potencia el voltaje y frecuencia de los generadores permanecen gobernados por el sistema mucho más grande.

2.7 EXCITACIÓN

Un sistema de excitación es la fuente de corriente que alimenta el devanado inductor o de campo para la excitación de una máquina eléctrica principal, incluyendo diferentes elementos o dispositivos para su control.

En el caso de generadores se pueden dividir en:

- a- excitación independiente
- b- excitación propia.

2.7.1 Excitación independiente

Este tipo de excitación puede hacerse de dos maneras: La primera es suministrando corriente directa por medio de anillos rozantes y escobillas, y la segunda forma es proveer dicha corriente por medio de una fuente colocada directamente sobre el eje del generador.

Cuando se excita una máquina usando anillos rozantes y escobillas se tiene la desventaja que necesitan mantenimientos muy frecuentes, y cuando son generadores grandes la caída de voltaje en las escobillas son de consideración. La ventaja que tiene este método es que es muy económico.

Cuando se excita la máquina por medio de una fuente se usa un pequeño generador de corriente alterna con el circuito de campo montado en el estator y la armadura en el eje del rotor, esta corriente es convertida a corriente directa por medio de un circuito rectificador inyectada a su circuito de campo. Algunos sistemas utilizan una pequeña excitatriz, que consiste en un generador pequeño de imanes permanentes, este proporciona la corriente de campo de la excitatriz la cual a su vez proporciona la energía de campo de la máquina principal.

2.7.2 Excitación propia

Los casos mencionados anteriormente son fácil de estudiar ya que en ellos la corriente de campo no depende de la tensión inducida por el propio generador.

En los generadores autoexcitados, la excitación depende de la tensión en terminales del generador y la excitación serie de la corriente en el inducido. La relación entre la tensión en bornes en función de la corriente de excitación puede representarse gráficamente por la recta de resistencia del inductor.

Para comprender mejor este tipo de excitación se hará referencia las figuras 2.11 y 2.12.

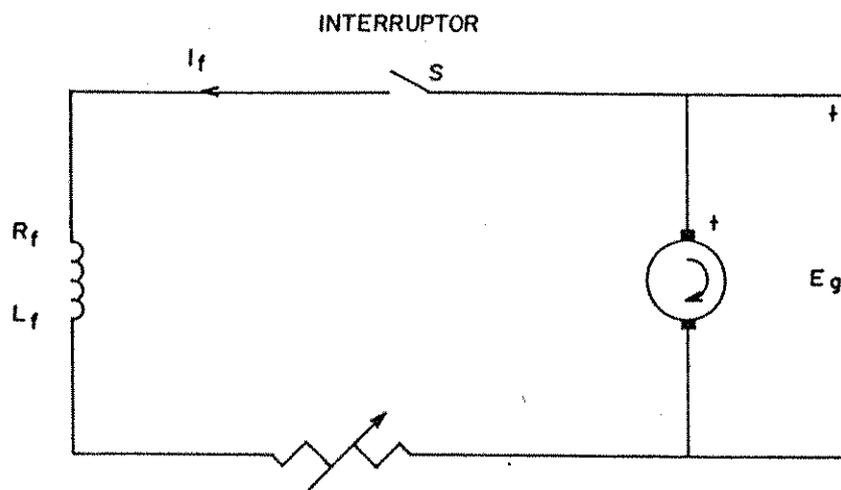


Figura 2.11 Circuito equivalente de un generador con el inductor en paralelo con la armadura

La figura 2.11 representa un circuito equivalente del generador cuando, el inductor está conectado en paralelo con la armadura.

La siguiente figura 2.12 no es más que la curva de magnetización del generador (AP) relacionada con la resistencia de campo (OP).

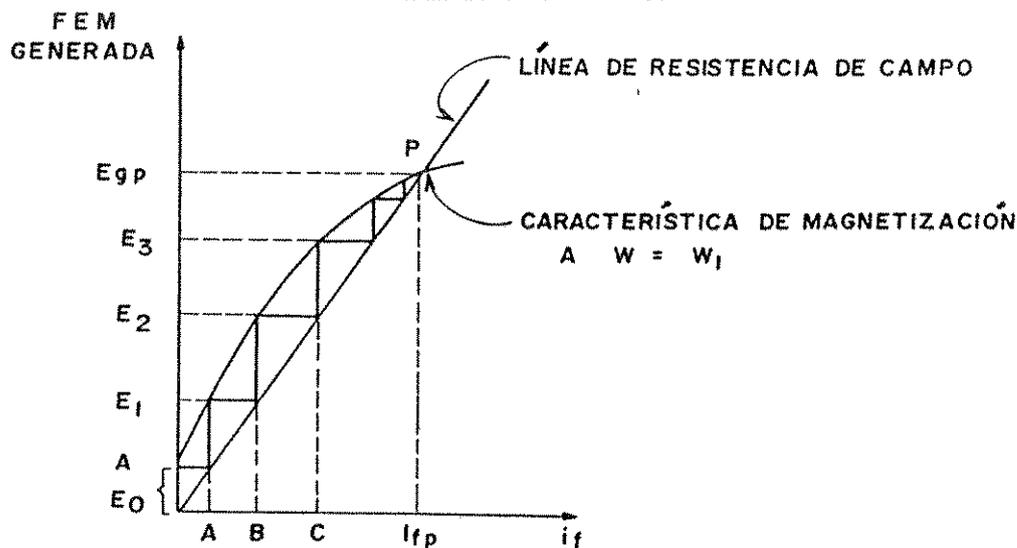


Figura 2.12. Curva de magnetización del generador representado en la figura 2.11

Al cerrar el interruptor S en la Fig. 2.11, el pequeño voltaje E_0 debido al magnetismo remanente, da origen a una pequeña corriente de excitación, así esta corriente produce un flujo que se suma al flujo residual, de esta manera el voltaje y la excitación irán aumentando hasta la saturación.

Analizando lo anterior en la gráfica se observa que el voltaje E produce una corriente I_{fA} donde $I_{fA} = E_0/R_o$. Esta corriente I_{fA} genera un voltaje E_1 . Este voltaje E_1 genera una corriente I_{fB} que a su vez genera un voltaje E_2 y así sucesivamente.

Si la resistencia del inductor es demasiado alta, la intersección de las dos características se da para un voltaje muy bajo, lo cual hace que la máquina no se excite a su voltaje nominal.

En la figura 2.13 se puede observar este caso.

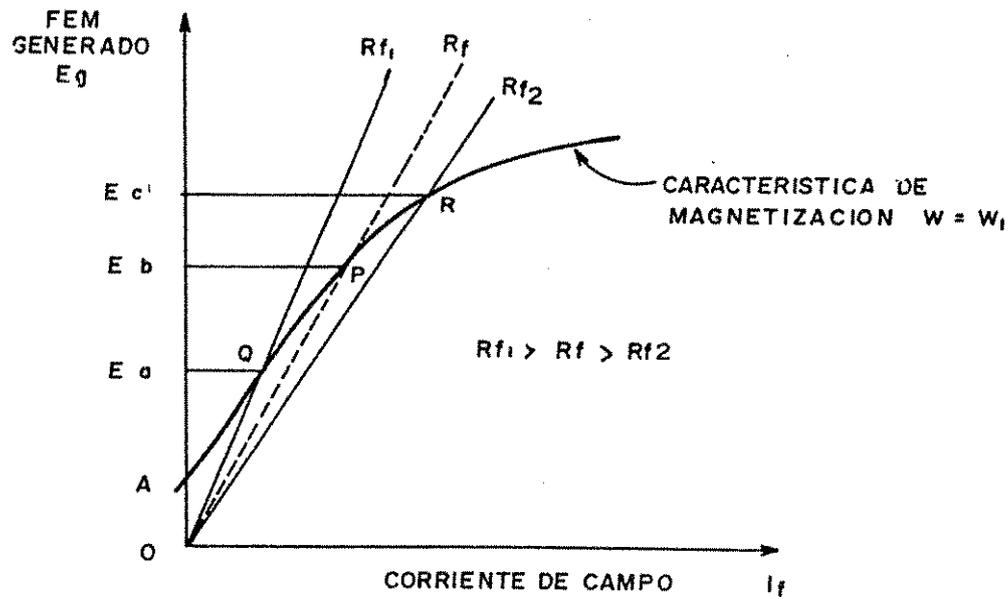


Figura 2.13 Característica de magnetización

Si la recta de resistencia es muy tangente a la parte baja de la curva de magnetización (línea punteada) la intersección puede darse en cualquier punto comprendiendo entre E_b y E_c , resultando así un funcionamiento muy inestable, a esta resistencia se le llama **resistencia crítica**.

2.8 CONCEPTOS SOBRE SISTEMAS DE CONTROL

2.8.1 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Existen varios métodos para el análisis de sistemas de control. El primero lo constituye el de función de transferencia, que es una forma de representar la relación existente entre la entrada y la salida de un sistema lineal invariante en el

tiempo. Estos sistemas utilizan para su definición la siguiente ecuación diferencial:

$$a_0 Y^n + a_1 Y^{n-1} + \dots + a_{n-1} Y + a_n Y = b_0 X^m + b_1 X^{m-1} + \dots + b_{m-1} X + b_m X$$

En donde $Y(t)$ es la variable de salida y $X(t)$ es la variable de entrada. Los coeficientes a_0, a_1, \dots, a_n y b_0, \dots, b_1 son constantes y n es mayor o igual que m .

La solución de esta ecuación es un trabajo muy laborioso; la teoría de control moderna establece que se puede obtener esta información, encontrando la función de transferencia mediante la aplicación de una técnica matemática llamada transformada de Laplace.

Entonces si se toma la transformada de Laplace en ambos miembros de la ecuación anterior, suponiendo que todas las condiciones iniciales son cero, se tiene

$$G(s) = \frac{b_0 s^m}{\dots}$$

2.8.2 DIAGRAMAS DE BLOQUES

Los componentes de un sistema físico se pueden representar cada uno mediante bloques funcionales, los cuales pueden relacionarse con un gráfico, indicando en cada bloque las funciones realizadas y el flujo de señales. En cada bloque se coloca la operación matemática que produce a la salida, sobre la señal que tiene en la entrada.

Con el diagrama de bloques podemos tener una visión global del sistema aunque no proporciona ninguna información de la constitución física de cada componente. La señal de salida de un bloque es la magnitud de la señal de

entrada multiplicada por la función de transferencia en el bloque, tal como se observa en la figura. 2.14



Figura 2.14. Diagrama de bloques

Un elemento importante en la representación de diagramas de bloques es el detector de error, que produce un señal de error la cual es la suma o diferencia de retroalimentación del sistema de control, este se representa a continuación. Figura 2.15

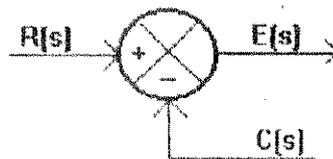


Figura 2.15. Detector de error

2.8.3 GRÁFICOS DE FLUJOS DE SEÑAL

La reducción de un diagrama de bloques se representa muy complicada cuando el sistema representado es muy complejo. En estos casos se utiliza los gráficos de flujo de señal, que son diagramas que representan un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales simultáneas. El primer paso para su construcción es la transformación de las ecuaciones diferenciales lineales en ecuaciones algebraicas en función de variable "s" de la transformada de Laplace.

Un gráfico de flujo de señal consiste en una red en la cual los nodos están conectados por ramas con dirección y sentido. Cada nodo representa una variable del sistema y cada rama conectada entre dos nodos, actúa como un multiplicador de señal (Fig.2.16). En ella se indica el sentido del flujo de señal por una flecha ubicada en la rama y el factor de multiplicación aparece a lo largo de la rama.

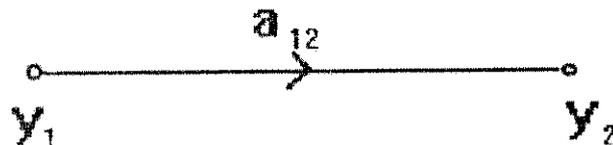


Figura 2.16. Gráfico de flujo de señal

2.9 COMPONENTES DE UN SISTEMA DE CONTROL

Con el empleo de sistemas de control retroalimentados en general, es posible controlar automáticamente, gran número de magnitudes físicas. Esto ha sido posible mediante el empleo de la teoría de control automática la cual posee los siguientes elementos comunes:

2.9.1 1-Detector de error

Esta unidad realiza tres funciones:

- a) Medición de las variaciones de la cantidad física controlada empleando transductores apropiados para convertir las diversas cantidades físicas medibles en cantidades eléctricas.

b) Comparación entre magnitudes relativas y sentidos de las dos cantidades de entrada; éstas son la señal de mando o entrada de referencia y la salida controlada.

c) Generación de error de una señal de error de magnitud y sentido adecuados para manifestar la diferencia entre las dos entradas en cualquier instante.

2.9.2 2-Regulador o amplificador:

Esta unidad es un amplificador de potencia que sirve para amplificar la señal de error. Puede ser un amplificador electrónico, magnético, rotativo, hidráulico o neumático.

2.9.3 3- Actuador

Es el elemento accionador que responde a la señal amplificada producida por el regulador. El actuador acciona el mecanismo de salida y, en dicha acción, produce una modificación en la variable o cantidad física a ser controlada en respuesta a la señal de mando.

2.9.4 4- Amortiguador

Se requiere un amortiguador para reducir la oscilación o la inestabilidad en la respuesta del sistema de control a la señales de mando. Este se coloca en algunos sistemas en el lazo de retroalimentación.

2.9.5 5- Lazo de retroalimentación

Contiene elementos que convierten las variaciones de la salida (variable controlada) a cantidades apropiadas para la entrada y comparación en el propio detector de error.

Un sistema de control retroalimentado completo, por tanto, detecta y compara la entrada en función de la salida y genera una señal de error de potencia amplificada tal como se requiera y sea suficiente para corregir el error y de esta forma produce un cero, es decir, una correspondencia entre la entrada y salida.

3. NORMALIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE LA EXCITACIÓN

La amplia variedad de sistema de excitación utilizados creo la necesidad de normalizar estos sistemas.

“La IEEE actualmente tiene dos versiones de modelos normalizados el primero titulado IEEE Transactions Power Apparatus and Systems”.^a “La versión más moderna que incluye cualquier sistema de excitación hasta la fecha la cual se presentó en 1,981. IEEE Transactions Power Apparatus and Systems.”^b La cual podemos clasificar de la siguiente manera:

3.1 PRIMERA NORMALIZACIÓN DE IEEE.

La primera normalización fue la siguiente:

- 1- Regulador y Excitatriz de acción continua (TIPO 1)
- 2- Sistema de Rectificador controlado alimentado por tensión solamente (TIPO 1S)
- 3- Sistema de Rectificador Rotativo (TIPO 2)
- 4- Sistema Estático con alimentación de tensión y corriente (TIPO 3)
- 5- Sistema de acción no continua . (TIPO 4)

Para mayor información de estos modelos puede consultarse IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Junio 1,968 Pag. (1,460-1,465).

3.2 SEGUNDA NORMALIZACIÓN:

Los modelos de la primera normalización son muy buenos y útiles sin embargo conforme la tecnología fue abanzando fueron necesarios modelos más

a: Consultar referencia 1. b: consultar referencia 2

precisos, la IEEE publicó en 1,981 su segunda propuesta de normalización donde se incluye la excitación estática con mejores detalles.

Se mencionan los modelos de esta normalización pero se hace énfasis en el caso de excitación estática tema que en este trabajo se estudia.

En estos modelos la IEEE presenta tres tipos de sistemas de excitación .

3.2.1 1- Excitación de corriente directa:

En este tipo de excitatriz se hace uso de un generador de corriente continua para la creación de la corriente de campo.

3.2.2 2- Excitación de corriente alterna:

Este hace uso de un generador de AC y un rectificador para producir la corriente de campo.

3.2.3 3- Excitación estática

Utiliza transformadores (PT'S Y CT'S) los cuales se colocan en la salida del alternador llevando posteriormente la señal a rectificadores quienes conviertan la señal alterna a continua para la excitación del generador.

3.3 SISTEMAS DE EXCITACIÓN DE CORRIENTE DIRECTA

(Modelo Transductor Compensador)

-Modelo Tipo DC1

-Modelo Tipo DC2

-Modelo Tipo DC3

3.4 SISTEMA DE EXCITACIÓN DE CORRIENTE ALTERNA

-Modelo rectificador

-Modelo alternador excitado

-Modelo tipo AC1

- Modelo tipo AC2
- Modelo tipo AC3
- Modelo tipo AC4

3.5 SISTEMAS DE EXCITACIÓN ESTÁTICA

3.5.1 REPRESENTACIÓN DE LA EXCITACIÓN DE UN GENERADOR EN UN ESTUDIO DE UN SISTEMA DE POTENCIA

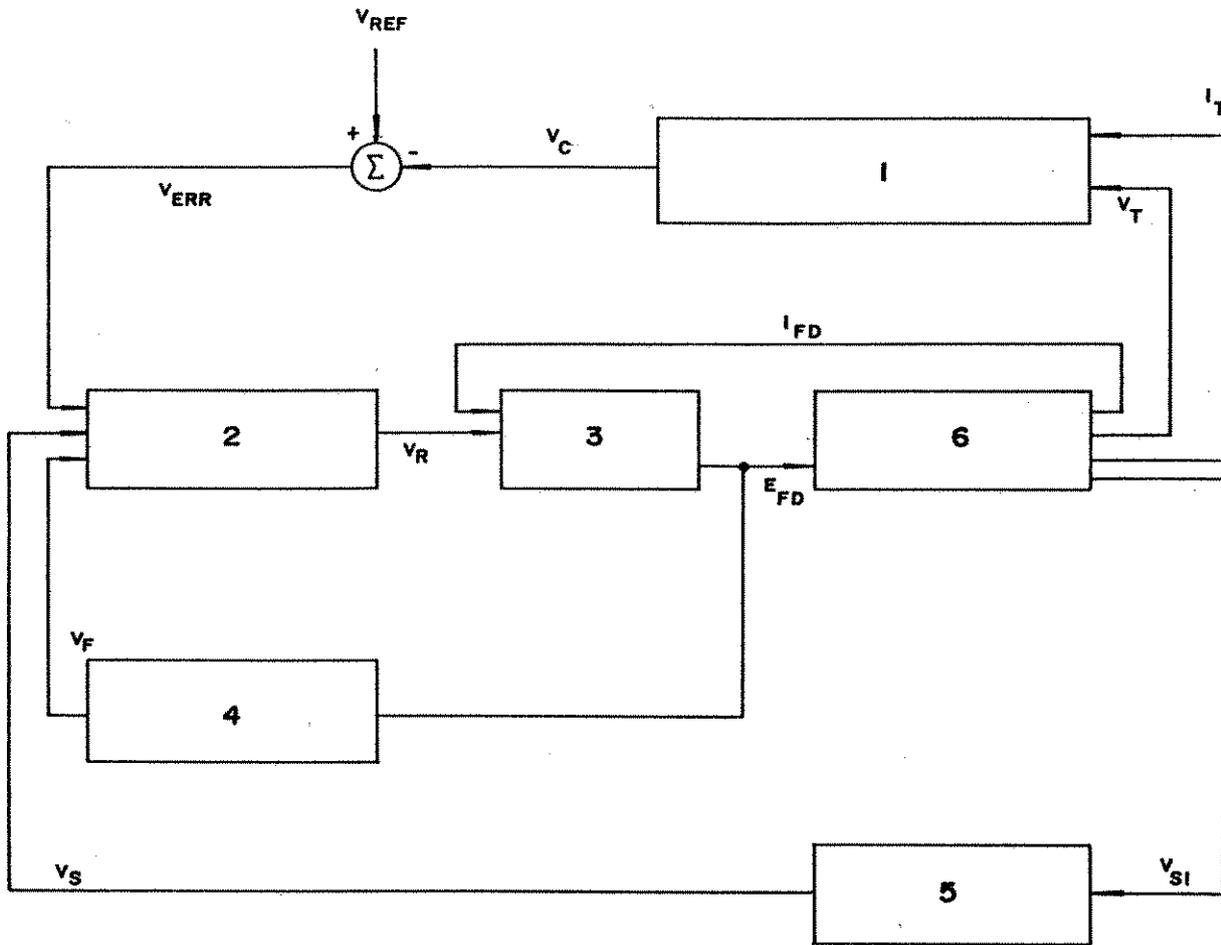


Figura 3.1. Diagrama general de bloques para el sistema de control de la excitación

El diagrama de bloques de la fig.3.1 enseña los distintos subsistemas que forman parte de un sistema completo generalizado para todos los sistemas de

control de la excitación mencionados anteriormente, incluye los siguientes bloques:

- 1- Un transductor y un compensador de carga
- 2- Un regulador de voltaje
- 3- Excitatriz
- 4- Sistema de estabilización de la excitación
- 5- Estabilizador del sistema de potencia
- 6- Generador con el sistema de potencia.

Como se mencionó, este diagrama de bloques es aplicado a todos los sistemas de potencia mencionados anteriormente, y contiene dos elementos comunes a todos los sistemas que por ser incluidos en la excitación estática se estudiarán a continuación:

- a- Transductor de voltaje y compensador de carga.
- b- Estabilizador del sistema de potencia.

3.6 TRANSDUCTOR DE VOLTAJE Y COMPENSADOR DE CARGA.

La figura 3.2 enseña el transductor y compensador de carga en terminales del generador en forma de diagrama de bloques.

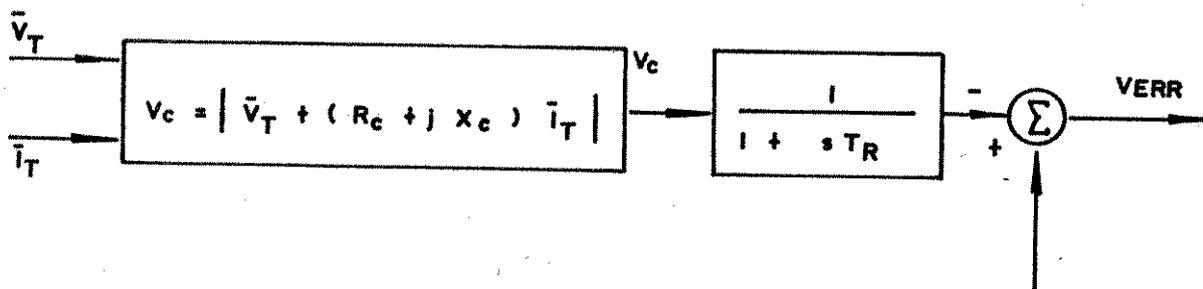


Figura 3.2. Elementos del compensador de carga y transductor de voltaje terminal

El primer bloque representa el compensador de carga donde V_t es el voltaje terminal de generador e I_t la corriente requerida en terminales del generador, R_c y X_c representan los valores de impedancia, V_c es el voltaje a la salida del compensador. El segundo bloque representa el transductor de voltaje y por último se encuentra un sumador donde se comparan el voltaje de referencia (V_{REF}) y el voltaje obtenido del transductor para luego obtener la señal de error.

3.6.1 Transductor de voltaje

Analizando el diagrama se puede observar que cuando $R_c=X_c=0$, el diagrama de bloques se reduce a un simple circuito sensor y un sumador. El voltaje terminal del generador es sentido y convertido usualmente en corriente directa. Mientras la filtración asociada con el transductor de voltaje puede ser compleja, para propósitos de modelos matemáticos puede ser reducida a la constante de tiempo mostrada. En algunos sistemas es reducido a cero.

La salida del transductor de voltaje es comparada con una referencia, la cual es representada por el voltaje terminal deseado. El voltaje de referencia del regulador de voltaje es determinado de tal manera que satisfaga las condiciones iniciales de operación, su valor es tomado sobre un valor que depende de las condiciones de carga existentes del generador.

La señal de error es retroalimentada al regulador de voltaje, quien junto a la excitatriz intentan mantener constante el voltaje en terminales del generador.

El transductor de voltaje que generalmente esta constituido por PT's y un rectificador se pueden representar por una red de primer orden. Figura 3.3

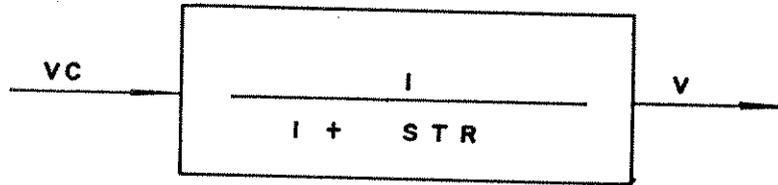


Figura. 3.3 Transductor de voltaje.

Se encontrará la ecuación de este diagrama de bloque en dominio del tiempo. Los demás diagramas se trabajan de manera similar.

De la figura anterior se sabe que:

$$V_c = [V_t + (R_c + JX_c)It]$$

$$V = V_{REF} - V_{ERR}$$

Entonces

$$1/(1+sT_R) = V[s]/V_c[s]$$

$$V_c[s] = V[s] + Vs[s]T_R$$

$$SV[s] + 1/T_R V[s] = V_c[s]/T_R \quad \text{Antitransformando}$$

$$dV(t)/dt + [1/T_R]V(t) = V_c(t)/T_R \quad \text{Ecuación 1}$$

La ecuación 1 es una ecuación de primer orden cuya solución es:

$f(t) + Pf(t) = Q(t)$ y tiene una solución general de la siguiente forma

$f(t) = \text{Exp}(-pt) * \text{integral} [Q(t) * \text{Exp}(pt)] * dt + K * \text{Exp}(-pt)$ donde:

$f(t) = \text{Exp}(-pt) * \text{integral} [Q(t) * \text{Exp}(pt)] * dt$ Respuesta particular y

$f(t) = K * \text{Exp}(-pt)$ Respuesta complementaria

Si sustituye la ecuación de primer orden en la solución general sabiendo que:

$P = 1/T_R$ y $Q = V_c(t)/T_R$ se obtiene

$$V(t) = \text{Exp}(-t/T_R) * \text{Integral} [V_c(t)/T_R * \text{Exp}(t/T_R)] * dt + K \text{Exp}(-t/T_R)$$

3.6.2 COMPENSADOR DE CARGA

Cuando se usa el compensador de carga X_c y R_c no son cero y sus valores son apropiadamente escogidos dependiendo del uso que se le de. Las variables de entrada V_t e I_t que son voltaje y corriente respectivamente del generador, deben estar representadas en forma fasorial para el cálculo de la compensación de carga. La compensación de carga es de mucha importancia en la estabilización y normalmente se usa en uno de los siguientes dos casos.

1- Cuando las unidades se interconectan sin una impedancia significativa entre ellas, el compensador se usa para crear una impedancia de acoplamiento artificial de tal manera que se pueda distribuir apropiadamente la potencia reactiva. Esto corresponde a la elección de un punto de regulación dentro del generador. Para este caso X_c y R_c adquieren valores positivos.

2- Cuando una unidad está conectada mediante una impedancia significativa al sistema, como es el caso de una línea de transmisión, o bien cuando dos o más unidades están conectadas mediante transformadores es deseable regular el voltaje en un punto lejos del generador. El modelo de transductor - Compensador mostrado anteriormente es un ejemplo de la ubicación del compensador en este caso. Los valores que adquieren X_c y R_c son negativos aunque R_c en muchos casos es despreciable y X_c es únicamente requerida. Algunos circuitos compensadores actúan a modificar el voltaje terminal como una función de la potencia reactiva y real preferentemente la componente de corriente.

3.7 ESTABILIZADOR DEL SISTEMA DE POTENCIA

El estabilizador del sistema de potencia mostrado en el bloque 5 de la fig.3.4 recibe un voltaje V_{s1} tomado directamente de las terminales del generador. Observemos la siguiente figura:

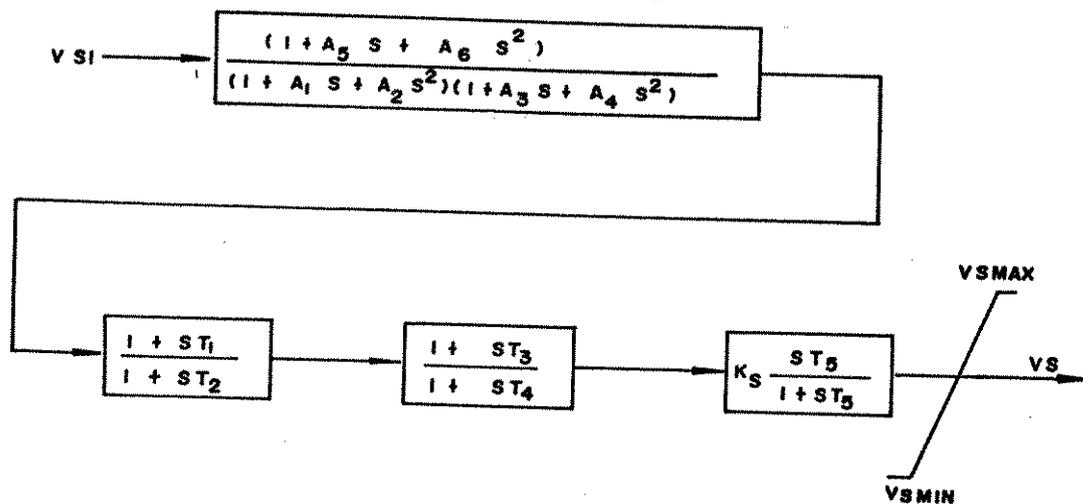


Figura. 3.4 Estabilizador del sistema de potencia

Esta figura nos muestra la forma generalizada de estabilizar un sistema de potencia. Algunas señales comunes de estabilización a V_{SI} son: potencia de aceleración, velocidad, frecuencia y voltaje terminal.

El primer bloque es el modelo de un filtro de alta frecuencia donde se uso es recomendado para frecuencias mayores a 3Hz. Las letras A1 a la A6 son constantes del filtro. En el siguiente bloque t_1 y t_2 son constantes de tiempo de

compensación. La estabilización de ganancia se logra con la constante K_s y la señal de deslizamiento es puesta por la constante de tiempo T_5 .

La estabilización de la salida puede hacerse de varias maneras. Para algunos sistemas la estabilización de la salida es removida si el voltaje terminal del generador es movido un extremo (No se muestra en esta figura). En otros sistemas la estabilización de la salida es limitada en función del voltaje terminal del generador. (no mostrado en esta figura.)

La señal V_s estabilizada se suma a la señal de error de el voltaje terminal.

3.8 REPRESENTACIÓN DE LÍMITES

Al igual que los dos componentes analizados anteriormente es muy importante entender los límites que aparecen en los diagramans de bloques para una mejor interpretación de estos.

Los modelos descritos en la fig. E.1 y E.2 nos muestran la diferencia entre límites terminados y no terminados, y además los efectos que estos causan sobre la salida de un bloque cuya función de transferencia tiene una constante de tiempo.

En el caso de un límite terminado la variable "y" no es limitada. Por consiguiente la variable de salida "X", cuando esto afecta un límite, no puede venir fuera de el límite hasta lo definido por la variable "Y". En el caso de un límite no terminado la variable y es limitada. Si " $y=A$ " o " $Y=B$ ", la entrada se amplia a $u>A$ o $u<B$ respectivamente. Con estas limitaciones, la salida viene fuera de el límite tan pronto como la entrada "U" vuelve a entrar al rango dentro de el límite definido por $B<u<A$.

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

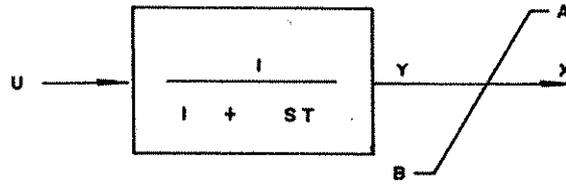


Figura 3.5 a.

Sistema de ecuaciones

$$dy/dt=(u-y)/T$$

Si B menor o igual que "Y" y "Y" menor o igual A, entonces $X=Y$

Si Y mayor que A, entonces $X=A$

Si Y menor que B, entonces $X=B$

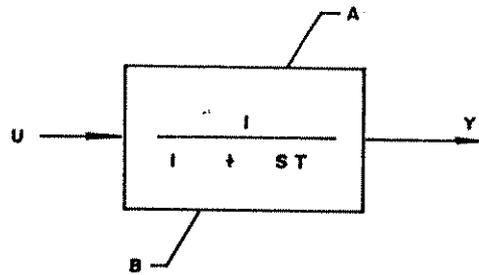


Figura 3.5 b.

$$f = (u-y)/T$$

Si $Y=A$ y f mayor que cero, entonces dy/dt es cero

Si $Y=B$ y f menor que cero, entonces dy/dt es cero

de lo contrario $dy/dt = f$

B menor o igual que "y" y "y" menor o igual que f

Figura 3.5 Límites

3.9 SISTEMA DE EXCITACIÓN ESTÁTICA

Estos sistemas son muy utilizados por plantas de generación de combustión interna, utilizan transformadores (PT'S Y CT'S) ubicados en la salida del generador los cuales convierten la señal a valores utilizables y de fácil rectificación para que luego exciten el generador. Se tienen 3 Tipos:

3.10 Tipo ST 1 (Potential Source Controlled-Rectifier Exciter)

Este sistema es mostrado en la fig. 3.6, muestra todo el sistema de control de la excitación y como la potencia de excitación es suplida mediante un transformador en las terminales del generador y es regulada por un rectificador de control. Para entender mejor esta descripción, se puede hacer referencia a los estudiado en el transductor de voltaje y compensador de carga, de donde se obtuvo la señal de error V_{ERR} , si se observa este modelo es aplicada al sumador junto con las variables V_s y V_f , donde V_s es la señal obtenida del estabilizador del sistema de potencia y V_f es la señal obtenida del sistema de estabilización de la excitación que se observa más adelante. El máximo voltaje de regulación permitido está relacionado con el voltaje terminal del generador.

Si se compara la fig. 3.1 con la fig.3.6 se puede notar que el primer bloque equivale al regulador de voltaje, el siguiente bloque equivale a la excitatriz y el bloque de la realimentación corresponde al sistema de estabilización de la excitación.

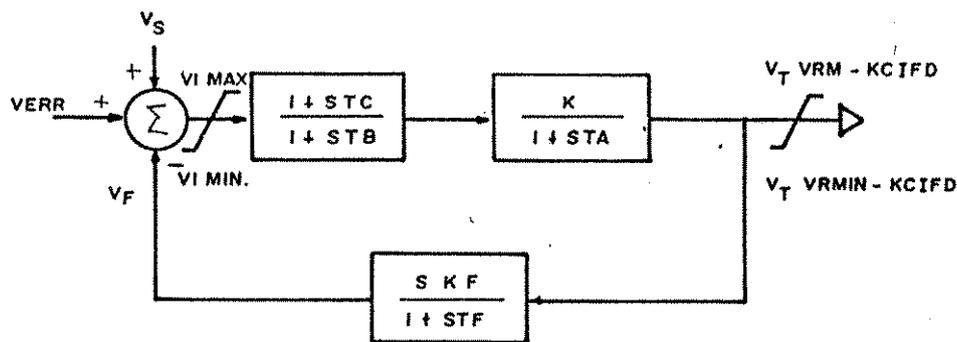


Figura 3.6. Modelo de excitación estática tipo ST1

3.10.1 ESTABILIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA EXCITACIÓN Y REDUCCIÓN DE LA GANANCIA DEL TRACIENTE

La estabilización del sistema de control de la excitación es un término que describe el principio de reacción del circuito de excitación. La señal de reacción es normalmente derivada del voltaje de campo del generador. Se acostumbra compensar parcialmente la reacción con las constantes de tiempo de la excitación y de esta manera se logra la operación estable del sistema sin el estabilizador.

Por otro lado usar la estabilización de la excitación ayuda a la reducción de la ganancia del transiente del sistema. Esta reacción es requerida para una operación estable fuera de línea, cuando las constantes de tiempo de excitación son significativas. Mientras antiguamente se empleaba para la estabilización fuera de línea, esta estabilización puede ser empleada actualmente para modificar el funcionamiento en línea del generador.

Con alta respuesta inicial del sistema de excitación, la estabilización no es normalmente requerida para una operación fuera de línea, sin embargo para la operación en línea esto es deseable ya que reduce la onda de ganancia del lazo

de regulador de voltaje a altas frecuencias, minimiza la contribución negativa del regulador, amortigua el sistema de potencia. Esto es particularmente aplicable cuando el damping no es aumentado por el uso de un estabilizador del sistema de potencia.

La reducción de la ganancia del transiente puede ser representada por una adecuada elección de lag-lead de las constantes de tiempo en la trayectoria de adelante del regulador de la excitación en el diagrama de bloques (T_B y T_C en la fig. 3.1) o por elección conveniente de los parámetros (K_F y T_F) en la trayectoria de estabilización de la excitatriz.

El modelo mostrado es lo suficientemente versátil para representar la ganancia del transiente mediante el camino directo por las constantes T_B y T_C (en cuyo caso K_F normalmente es puesta a cero) o bien eligiendo adecuadamente los valores de K_F y T_F en la trayectoria de retroalimentación. La ganancia del regulador de voltaje y cualquier sistema de excitación está representado por las constantes K_A y T_A .

En muchos casos los límites V_{MIN} y V_{MAX} que están después de el sumador pueden ser eliminados, pero los límites de voltaje de campo, $V_T V_{RMAX} - K_c I_{FD}$ y $V_T V_{RMIN} - K_c I_{FD}$ los cuales están función de ambas terminales de voltaje (excepto cuando la tensión es suplida de un bus auxiliar y no de las terminales del generador) y la corriente de campo del generador debe estar en el modelo mostrado. La representación de los límites de voltaje de campo como funciones lineales de la corriente de campo del generador, es posible porque la operación del puente rectificador de tal sistema es confinada al modo 1 como se describe a continuación:

3.10.2 REGULACIÓN DEL RECTIFICADOR

Toda fuente de corriente alterna, la cual suple un circuito rectificador que puede o no poseer controladores, fuese cual fuese el caso tienen una impedancia interna que es predominantemente inductiva. Los efectos de esta impedancia son alterar el proceso de conmutación de corriente entre la conducción de rectificadores y produce una disminución en el voltaje de salida promedio en el rectificador, incrementándose la corriente de carga del rectificador. La reactancia de la fuente de fase a neutro se opone a la transferencia de corriente entre rectificadores y se define como reactancia de conmutación.

La reactancia de conmutación tiene el efecto de prevenir transferencias instantaneas de corriente de un rectificador a otro. Así, la conmutación requiere un tiempo finito el cual es definido por la conmutación o traslape del ángulo (μ) figura 3.7, y también depende de la magnitud de la corriente de carga producida en el retardo definido por un ángulo (α)(Note que este ángulo no es el ángulo de retardo asociado con rectificadores controlados) en el inicio del proceso de conmutación. Ambos ángulos están expresados en ángulos eléctricos.

Los últimos circuitos rectificadores aplicados en sistemas de excitación son circuitos de seis fases doble forma, también referidos a circuitos de tres fases con puente de onda completa. Puede ser mostrado que este tipo de circuito permite operar en uno de tres diferentes modos, dependiendo de como la corriente de carga del rectificador es variada de cero carga al valor de corto circuito. El modo de operación depende del producto de la reactancia de conmutación y la corriente de carga.

En el modo de operación I, la conmutación del ángulo (μ) se incrementa de 0 a 60 y el inherente retardo del ángulo α es cero con incremento en la corriente de carga. En modo II, la conmutación del ángulo (μ) es fija a 60 grados pero el

inicio de la conmutación es retardado por el inerente ángulo de retardo (α) el cual varía de 0 a 30 grados.

En el modo de operación III, el inerente retardo de tiempo del ángulo (α) es fijo a 30 y la conmutación del ángulo (μ) varía de 60 a 120.

La ecuación característica de estos tres modos de operación que define la regulación del rectificador como una función de conmutación de voltaje drop como rectificador de corriente de carga es variado de cero carga hasta el valor de corto circuito.

La característica de regulación del rectificador definida por esta ecuación puede ser planteada como una curva uniforme mostrada a continuación. Figura 3.7

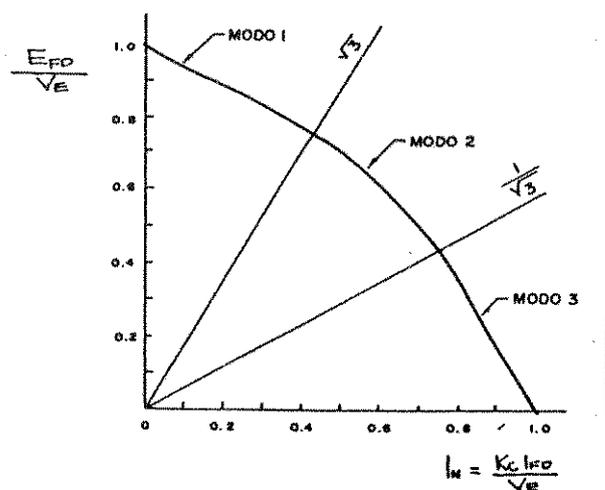


Figura 3.7 Caraterística de regulación del rectificador

Las cantidades, E_{FD} , I_{FO} , V_E y K_C están todas por unidad sobre la base de campo del generador ac. La curva de la figura 3.7 está dividida en tres segmentos y la ecuación se muestra en la figura 3.8.

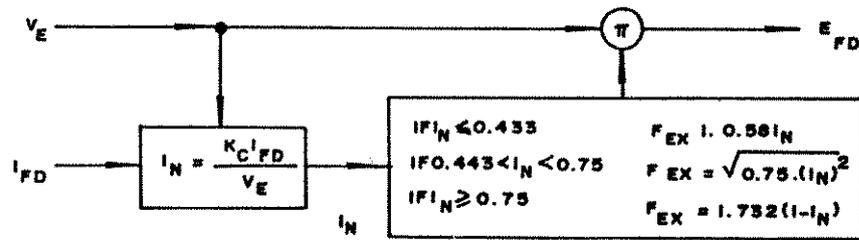


Figura 3.8 Ecuación de regulación del rectificador

En suma para sistemas con mayor cantidad de transformadores, K_c es bastante pequeña, permitiendo despreciarla para muchos estudios.

Mientras para la mayoría de estos sistemas de excitación, un puente de onda completa es empleado, el modelo es aplicable a sistemas semicontrolados. En cualquier caso el tope máximo negativo es puesto a cero.

Para la mayoría de estos sistemas, la característica de coseno relacionada con el ángulo de disparo del tiristor a la salida del puente es compensada por una función de coseno inverso entre la salida del regulador y el ángulo de disparo. En tal sistema la ganancia K_A es una constante y es independiente de la fuente de voltaje de excitación. En muy pocos sistemas ésta compensación de coseno inverso no es empleada y el término K_A llega a ser una función coseno, dependiente de la fuente de voltaje.

3.11 MODELO TIPO ST2 (Compound Source Rectifier Excitation System)

Algunos sistemas utilizan fuentes de corriente y voltaje para componer la fuente de poder. Este tipo de sistema mostrado en la figura 3.8, es llamado compound o compuesto. Para convinar la fuente de poder, es necesario un fasor conuinado del voltaje terminal V_t y corriente terminal I_t . El rectificador de carga y los efectos de conmutación son iguales al descrito para el tipo ST1. E_{FDMAX} representa el limite sobre el voltaje de excitación debido a la saturación de los componentes magnéticos. El regulador controla la salida de excitación mediante el control de saturación de los componentes del transformador de potencial. T_e representa el rango de integración asociado con la inductancia de el control de debanados. K_p es la ganancia del circuito de potencial y K_f la ganancia del circuito de corriente. Los bloques mostrados al final se utilizan cuando la excitación se hace a través de un transformador de núcleo saturable.

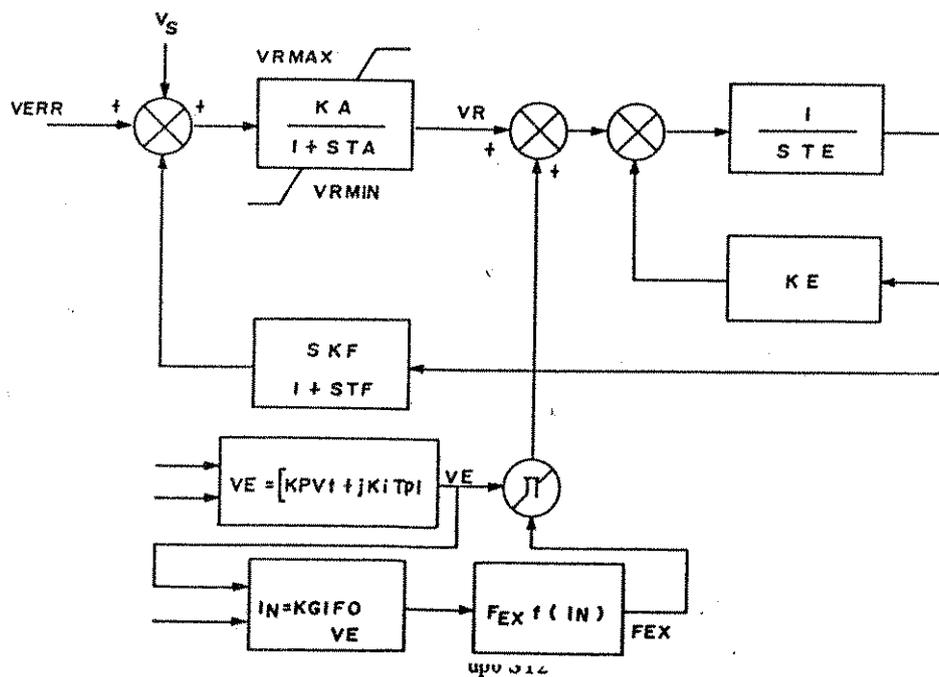


Figura. 3.9. Modelo de excitación estática tipo ST2

3.12 TIPO ST3 (Compound Source controled-Rectifier excitación system)

Algunos sistemas estáticos utilizan cantidades internas dentro del generador (Las cuales se representan como una combinación del fasor del voltaje terminal del generador y el de corriente), para formar la fuente de poder de excitación.

La estabilización del sistemas de excitación para estos sistemas es provista por una serie de elementos lag-lead, representados por las constantes de tiempo T_a y T_c . Luego del sumador del lazo superior encontramos el regulador de voltaje el cual contiene la constante de tiempo T_A y el lazo sobre el bloque del regulador nos muestra la ganancia K_G . El rectificador de carga y los efectos de conmutación son explicados en el modelo ST1. E_{FDMAX} es el límite de estabilidad causada por el nivel de saturación de los componentes de potencia.

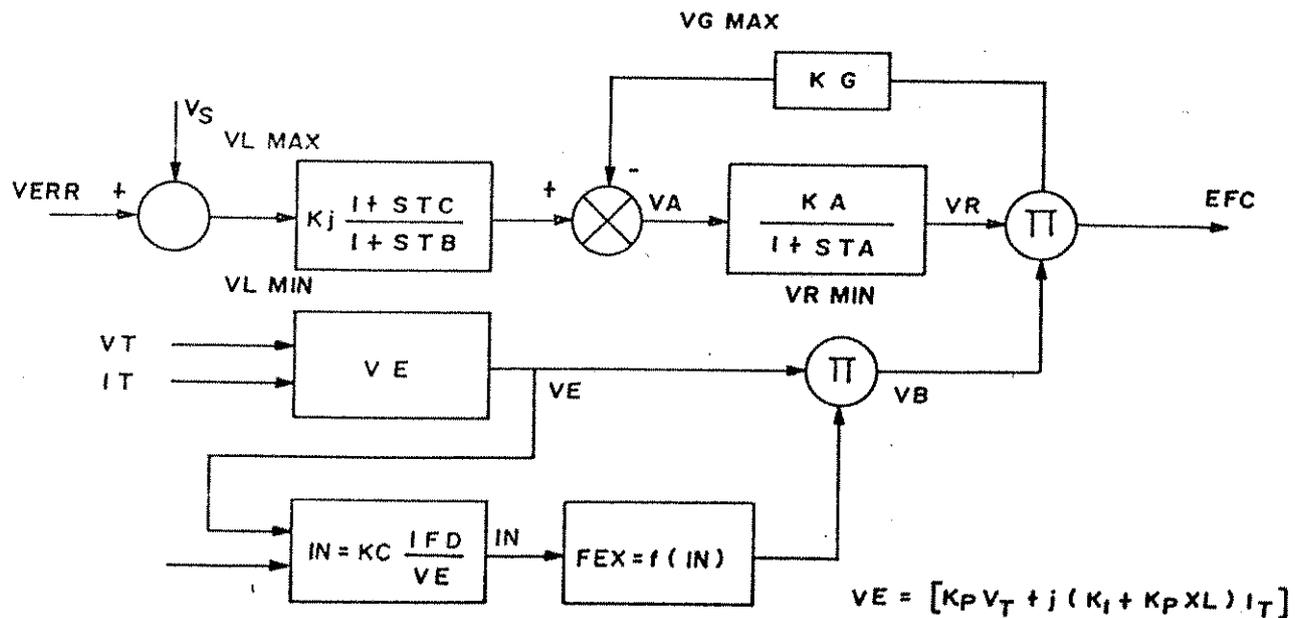


Figura 3.10. Modelo de excitación estática tipo ST3

Variables de los diagramas de bloques

| | |
|------------|---|
| EFD | Voltaje de salida de la excitatriz (Voltaje de campo del generador) |
| FEX | Factor de carga del rectificador |
| IFD | Corriente de campo del generador |
| IN | Corriente de carga nominal de la excitatriz |
| KA | Ganancia del regulador de voltaje |
| KC | Factor de carga del rectificador relacionado a la reactancia de conmutación |
| KE | Constante de la excitatriz relacionado al mismo campo de la excitatriz |
| KF | Ganancia de la estabilización del sistema de control de la excitación |
| KG | Constante de reacción del lazo interior |
| KI | Coefficiente de ganancia del circuito de corriente |
| KJ | Incremento de la primera etapa del regulador |
| KP | Coefficiente de ganancia del circuito de potencia |
| TA, TB, TC | Constantes de tiempo del regulador de voltaje |
| TE | Constante de excitación (Rango de integración asociado con el control de la excitación) |
| TF | Constante de tiempo del estabilizador del sistema de control de la excitación |
| TI | Constante de tiempo de estabilizador de carga del estabilizador del sistema de potencia |
| VA | Voltaje interno del regulador |
| VB | Voltaje permitido del excitador |

| | |
|-----------|--|
| V_E | Realimentación del voltaje de excitación de la reactancia de conmutación |
| V_F | Salida del estabilizador del sistema de potencia |
| V_{ERR} | Señal de error de voltaje |
| V_G | Voltaje de reacción del lazo interior |
| V_L | Señal de reacción de la corriente de campo de la excitación |
| V_R | Salida del regulador de voltaje |
| V_S | Estabilización de la salida del sistema de potencia |
| V_T | Voltaje terminal del generador |
| I_T | Corriente terminal del generador |
| X_L | Reactancia relacionada con la fuente de potencial |
| V_{SI} | Entrada del estabilizador del sistema de potencia |
| $A1-A6$ | Constantes del filtro de alta frecuencia del estabilizador del sistema de potencia |
| K_s | Ganancia del estabilizador del sistema de potencia |
| R_c | Componente resistiva del compensador de carga |
| T_R | Constante de tiempo del filtro del entrada del regulador |
| V_c | Salida de voltaje del compensador |
| X_c | Componente reactiva del compensador de carga |

Se sensa la tensión de salida del generador por medio de transformadores de potencial esta señal se compara con un valor de referencia el cual proporciona el valor al cual debe estar el voltaje. La señal de error obtenida es amplificada y llevada a la excitatriz.

Los reguladores de voltaje han ido evolucionando conforme las necesidades de estabilidad, precisión, sensibilidad, ganancia, etc. Inicialmente los reguladores de voltaje eran resistencias variables en serie con el devanado de excitación o bien actuaban con un conjunto de resistencias conectándolas o desconectándolas según se requiera aumentar o disminuir la corriente de campo. Este era un tipo de regulación manual donde una persona aumentaba o disminuía la resistencia para obtener el voltaje deseado, posteriormente surgieron los electromecánicos, entre los cuales están los vibradores y reostáticos de acción directa e indirecta. Ejemplos de estos tenemos los reguladores de fabricación estadounidense Tirril y Silverstat. En el primero de estos, la tensión detectada por un transformador de potencial alimentaba una bobina que conectaba y desconectaba las resistencias de la excitatriz a un ritmo de acuerdo a las variaciones de voltaje de salida. Un regulador como este puede gobernar una o varias excitatrices por medio de un aparato de regulación central y, un grupo de uno o más relevadores en derivación para cada excitatriz las cuales tienen que tener ciertas características en común.

El segundo incluyó importantes cambios, adaptando una resistencia reguladora cuya acción se realizaba por medio del movimiento de un brazo sobre una serie de contactos, posibilidad de ajuste para conexión en paralelo, etc. Estos reguladores tipo vibrador tienen la ventaja de ser muy precisos y de

respuesta rápida. Su desventaja es que a sus piezas móviles necesitan mantenimiento frecuentemente.

Los reguladores anteriormente mencionados actuaban sobre el campo de un generador de corriente continua y no directamente sobre la excitatriz del generador principal.

A continuación se estudia un ejemplo de un regulador de voltaje que hace uso la excitación de tipo estático. Este tipo de regulador es muy utilizado actualmene en plantas de generación que tienen como primotor motores diesel.

4.1 EL REGULADOR RBS 6000

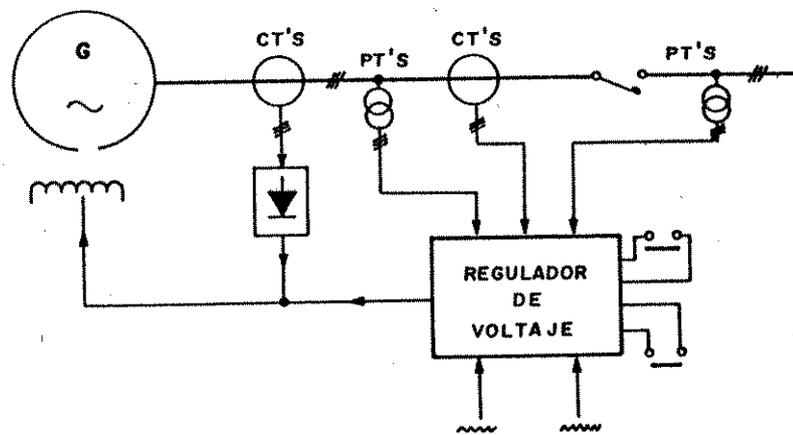


Figura 4.1 Diagrama unifilar de interconexión del regulador de voltaje

La figura 4.1 muestra un diagrama unifilar donde se puede observar la forma en que está interconectado el regulador de voltaje con algunos

componentes auxiliares, los cuales llevan la información de los diferentes cambios que se den y que puedan afectar la estabilidad del sistema. Estos auxiliares lo componen transformadores de potencial y transformadores de corriente, que son los encargados de obtener el voltaje y corrientes respectivamente a niveles altos de voltajes y convertirlos a niveles aprovechables por los circuitos electrónicos del regulador de voltaje para que estos hagan las correcciones en la corriente de excitación y así evitar que el voltaje baje hasta niveles donde tenga que actuar la protección de bajo voltaje. En esta misma figura podemos observar un rectificador que es otro componente auxiliar encargado de convertir la corriente alterna a corriente continua para la excitación del generador.

El diagrama de bloques de la figura. 4.2 nos da una secuencia de forma en que se analiza el funcionamiento de este regulador de tipo estático.

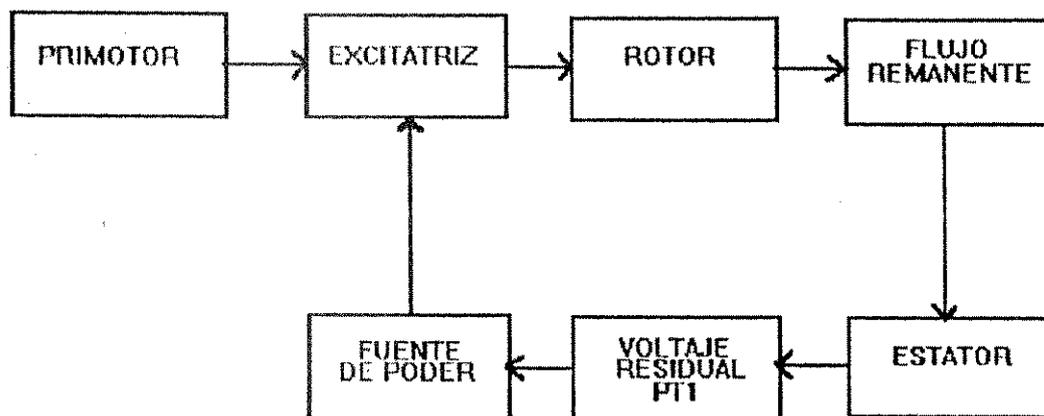


Figura 4.2. Diagrama de bloques general del funcionamiento del regulador de voltaje

Se menciona anteriormente que la excitación estática hace uso del flujo residual o remanente almacenado en el generador. Este flujo se debe a las propiedades del material con que está fabricado el generador.

En este capítulo se menciona un ejemplo de un excitador estático. Para comprender el funcionamiento más claramente se puede dividir la excitación en dos etapas:

- 1- Excitación inicial
- 2- Excitación en régimen permanente

4.2 EXCITACIÓN INICIAL

El regulador RBS serie 6000, fabricado por ACEO (Ateliers de constructions électriques d'Orleans) es un regulador muy completo el cual tiene la capacidad de controlar en distintas condiciones de funcionamiento variables eléctricas que tienen relación directa con la excitación, tales como voltaje y potencia, más adelante se estudia detenidamente su funcionamiento a continuación se estudia cómo controla la excitación inicial.

Cuando el primotor, en este caso un motor diesel hace girar el generador el flujo remanente induce un voltaje el cual es sentido por un transformador de potencial (PT1). Este voltaje es llevado a la platina del regulador de voltaje bonera 1 de la fuente de poder del regulador de voltaje. Figura 4.3

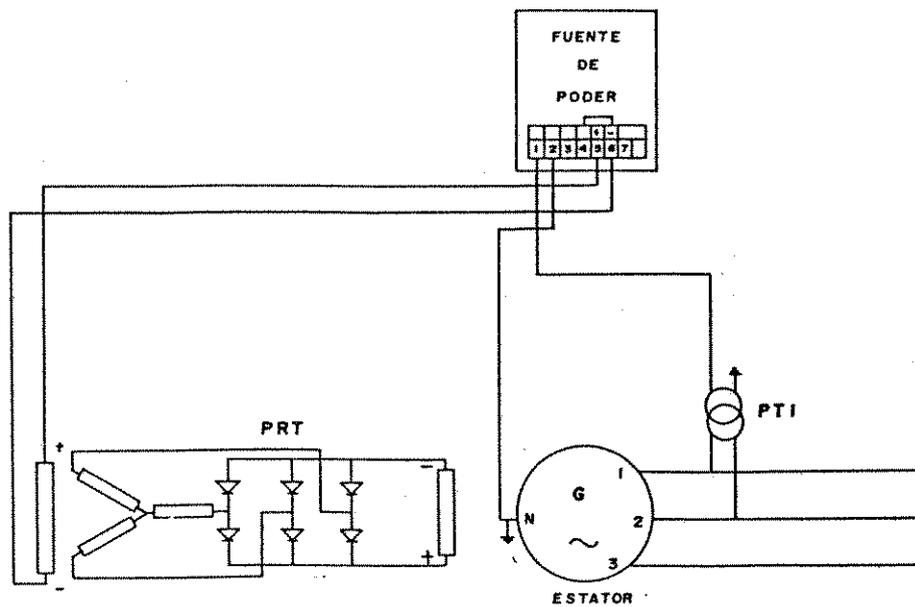


Figura 4.3 Forma en que es sentido el voltaje para la excitación inicial.

En esta figura se puede observar un circuito de potencia que ejemplifica el proceso de capturar el voltaje inducido por el flujo remanente. El transformador de potencial PT1 colocado en la fase 1 a la salida del alternador proporciona el voltaje que dará inicio a la excitación. Este voltaje es llevado a la fuente de poder del regulador de voltaje y se encarga de amplificar la señal a valores de excitación aprovechables por el regulador. Esta fuente de poder posee dos circuitos uno de filtraje y otro de control inicial de la excitación.

4.3 CIRCUITO DE FILTRAJE

La tensión obtenida del alternador alimenta a dos transformadores cuyos secundarios pueden estar conectados en serie o en paralelo. La tensión obtenida de los secundarios de estos transformadores es rectificadora y filtrada por medio del puente rectificador CR10 y los capacitores CO2, CO3 Fig. 4.4 Este circuito

posee un diodo de rueda libre del excitador así como un diodo antiretorno del corrector de corto circuito el cual se analiza más adelante.

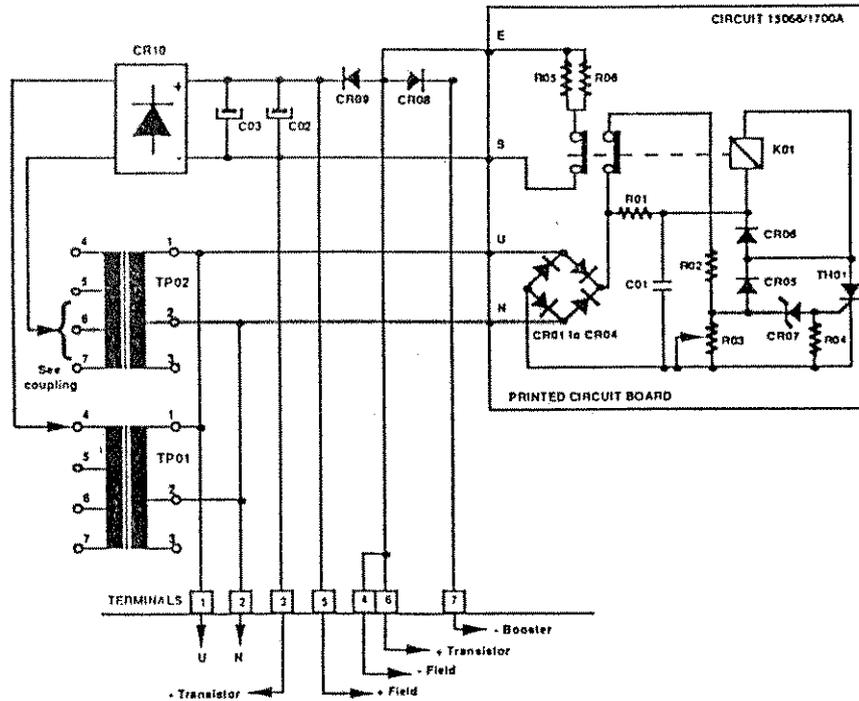


Figura. 4.4 Circuito de excitación inicial del generador, filtraje y control de excitación

4.4 CONTROL DE LA EXCITACIÓN INICIAL

Como su nombre lo indica controla la excitación inicial del generador y luego queda neutralizado.

La tensión que se obtiene del transformador de potencial PT1 que además es utilizada en el circuito de filtraje, también es aprovechada aquí. Si se observa la fig. 4.4 esta tensión es rectificada mediante un puente rectificador de onda completa, en este momento se tiene el voltaje residual entre el positivo y negativo del rectificador CR10 y además el contacto K01 se encuentra cerrado

esto permite que circule una pequeña corriente de excitación a través del terminal 6 y 5 de la fuente de poder, esta corriente es llevada al rotor del generador, luego rectificadas por medio del puente rectificador trifásico PRT fig. 4.3 el cual proporciona la corriente de excitación que hace que el voltaje terminal vaya aumentando y por tanto también la corriente. Este proceso se repite hasta que el voltaje de generador sea el nominal y el contacto KO1 abra el circuito de excitación. Fig. 4.4

El objetivo principal de este circuito es activar el rele KO1 en el momento que el generador alcanza su voltaje nominal para poder desexcitar el generador mediante el contacto KO1. Para lograr lo anterior, este circuito consta con 2 resistencias que actúan como divisoras de tensión y polarizan a los diodos CR06 y CR05 de tal manera que están en estado de corte. El diodo Zener actúa como disparo para el SCR TH01. Debido a la corriente de campo, el voltaje sentido del transformador de voltaje aumenta en razón proporcional al aumento de flujo por lo tanto el voltaje en diodo Zener CR07 también aumentará hasta lograr que conduzca esto se dará cuando el voltaje del generador tenga su voltaje nominal, en este momento se activa el SCR TH01 llegando voltaje a la bobina de relé KO1 el cual abre el circuito de excitación del generador. Este circuito posee además una resistencia variable R03 la cual permite ajustar el valor del voltaje de disparo del diodo Zener y un capacitor que filtra la señal de entrada y permite mantener constante el voltaje en la bobina del relé KO1.

El control de este circuito es automático y lo que el operador tiene que hacer es únicamente arrancar el motor diesel.

4.5 FUNCIONAMIENTO DEL GENERADOR BAJO CONDICIONES DE CARGA.

Luego que el generador está excitado su función es proporcionar energía al consumidor. Desde este momento el generador está sometido a variaciones de carga. El diagrama de bloques de la fig. 4.5 no muestra la secuencia con que se regula el voltaje en condiciones de carga.

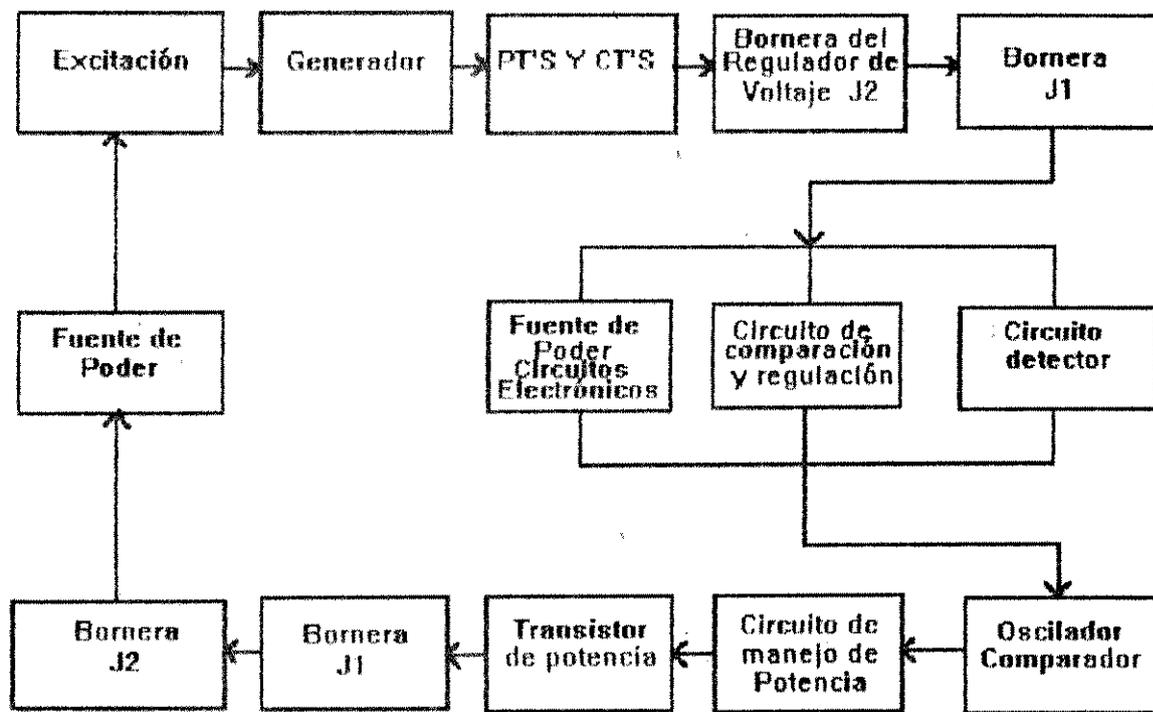


figura 4.5 Diagrama de bloques del funcionamiento del regulador de voltaje en condiciones de carga

El regulador en estudio posee un sistema de excitación independiente al de excitación inicial que permite al generador aumentar o disminuir la corriente de

campo segun sea necesario. Cuando se trabaja en estas condiciones se actúan directamente sobre el regulador de voltaje variando una resistencia de $10K\Omega$ (fig. 4.6) por medio de un motor de control.

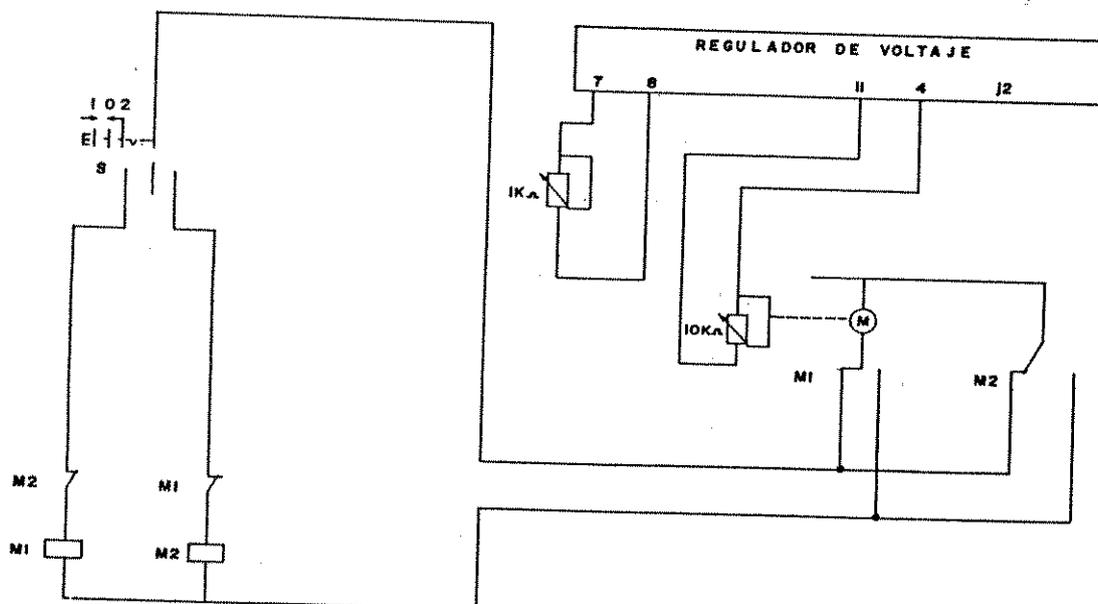


Figura 4.6 Modo de variar la corriente de excitación en condiciones de carga

El circuito de la figura 4.6 funciona de la siguiente manera: Si se necesita aumentar la excitación para que el voltaje suba se actúa sobre dos relés M1 y M2. Estos controlan dos contactos M1 y M2 que permiten invertir la rotación del motor de control. El motor varía una resistencia la cual actúa sobre el punto 11 y 4 de la bornera J2 del regulador de voltaje. Esta señal es llevada a los puntos 3 y 11 de la bornera J1. De esta bornera son tomadas las diferentes

señales que son utilizadas por el conjunto de tarjetas electrónicas al que le daremos el nombre de tarjeta madre. Esta tarjeta es mostrada en la figura 4.6A, donde se puede observar las borneras internas del regulador de voltaje J1 y J3.

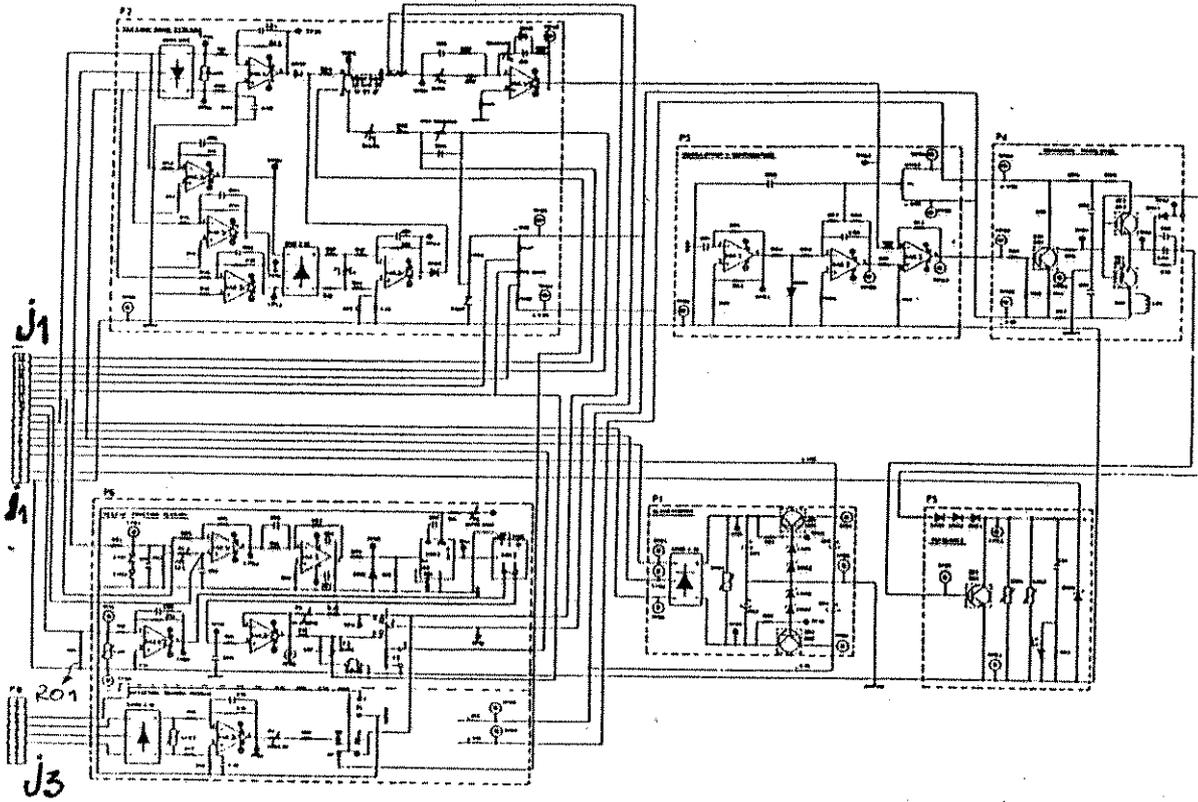


Figura 4.6 A. Tarjeta madre

La resistencia variable controlada por el motor puntos 4 y 11 de la bornera J1 actúan sobre una tarjeta electrónica, la cual en conjunto con las demás tarjetas se encargan de ajustar la corriente de excitación del generador para reestablecer el voltaje.

El diagrama de bloques de la figura 4.7 aclara la secuencia mencionada anteriormente.



Figura 4.7 Diagrama de bloques del lazo de actuación del motor

A continuación se analizará como es llevada la señal de los transformadores de potencial hacia el regulador de voltaje. En la fig.4.8 se observa la manera de capturar el voltaje que sirve de referencia para el regulador.

La secuencia del lazo de regulación fue mostrada en el diagrama de bloques de la figura 4.5, sin embargo para una mejor comprensión se explicará la secuencia: La señal obtenida de los transductores es llevada a la bornera externa del regulador de voltaje que se llama J2. Esta bornera está interconectada con dos borneras internas a la cual estan conectados los circuitos electrónicos que componen la tarjeta madre(conjunto de circuitos electrónicos), estas borneras se llaman J1 y J3.

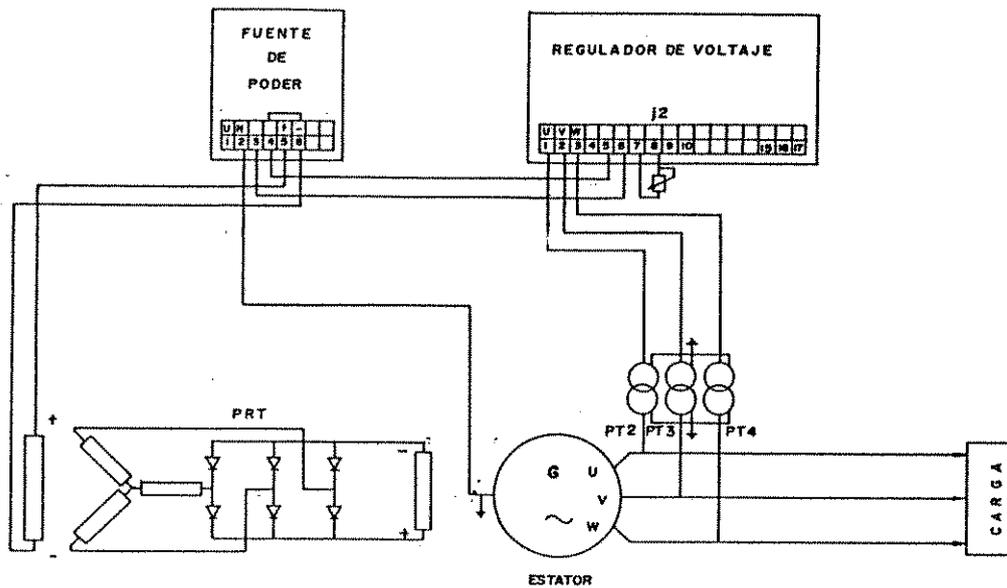


Figura. 4.8 Diagrama de ubicación de PT's utilizado en el regulador de voltaje.

En la figura 4.8 se puede observar que hay tres transformadores de potencial: PT2, PT3 y PT4. Estos tres voltajes (punto 1,2 y 3 de la bornera J2 y 6,7 y 8 de la bornera J1 que está internamente en el regulador de voltaje) uno de cada fase proporcionados por los PT's son utilizados en el regulador de varias maneras, las cuales analizaremos a continuación: La primera es que sirve para alimentar la fuente de voltaje que proporciona la alimentación a los circuitos electrónicos. La fig. 4.9 nos muestra esta fuente compuesta por un rectificador, una resistencia RVO1 y dos capacitores CO1 y CO2 que sirven de filtraje de entrada, además posee dos circuitos estabilizadores compuestos cada uno por un transistor un diodo zener y un capacitor a la salida.

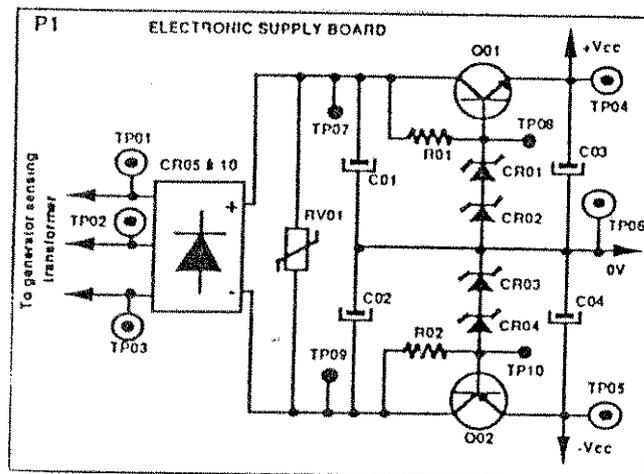


Fig. 4.9 Fuente de alimentación del regulador de voltaje

El segundo uso es proporcionar señal al amplificador MA1/1 de la fig. 4.10, (analizada posteriormente) cuya señal se compara con otra señal obtenida del CT04 ubicada en el BOOSTER de marcha en paralelo fig. 4.19 (El booster se analiza más adelante).

La tercera es proporcionar señal al circuito de comparación de la fig. 4.11. que se estudia posteriormente.

4.5.1 Funcionamiento en conjunto de los circuitos electrónicos

Por medio del TI05 ubicado en el booster (fig. 4.19) se mide el valor instantáneo de la corriente del estator del alternador en la resistencia R01 cada vez que pasa por cero la tensión de la misma fase. Este valor se mantiene en el condensador C08 hasta la siguiente medida. Fig. 4.10

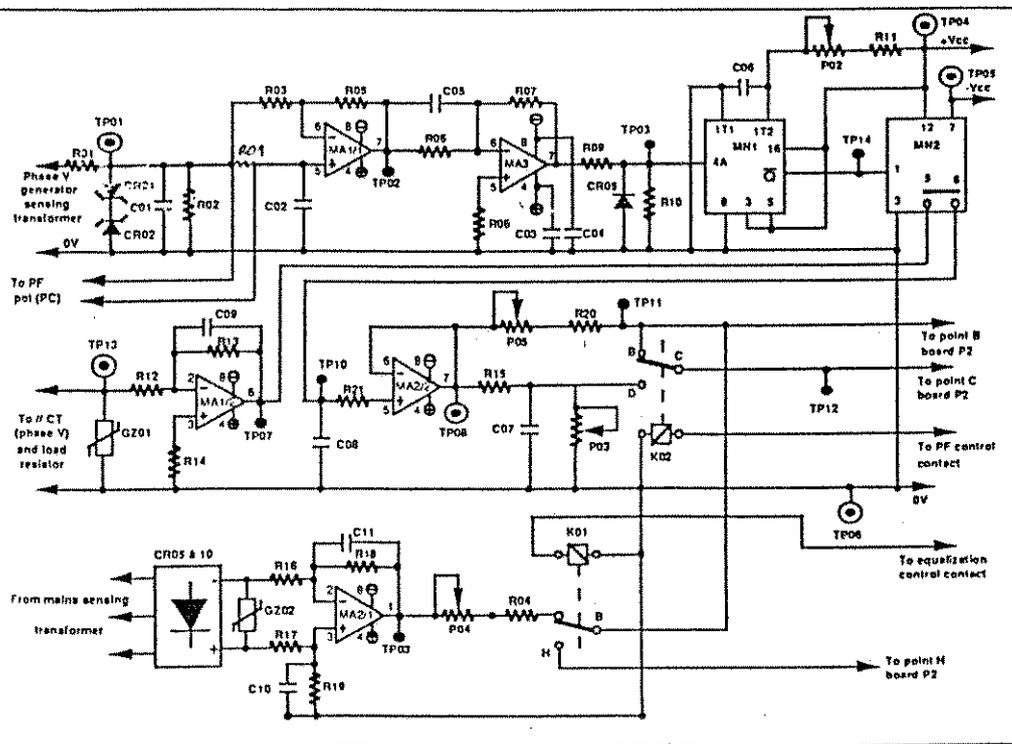


Figura 4.10 Medición de factor de potencia y circuito de ecualización de voltaje

La tensión a la salida del amplificador MA 2/2 será la imagen $I \text{seno}(\theta)$ del alternador, esta tensión se utiliza en funcionamiento normal junto con la tensión del circuito de la figura 4.11 que es la tarjeta de detección de tensión y circuito de regulación. La comparación de ambas permite la regulación del voltaje del alternador.

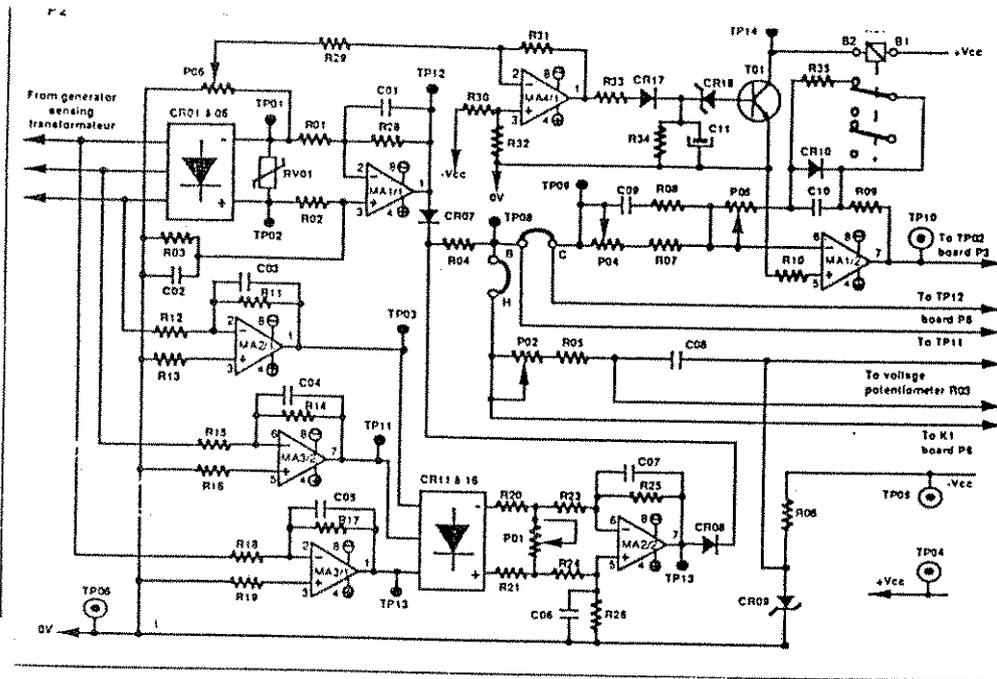


Figura 4.11 Circuito de regulación y detección de voltaje

La tensión obtenida de MA2/2 es comparada con la tensión de detección. Este voltaje de detección es obtenido de transformadores de potencial: PT2 PT3 y PT4, cuyos secundarios alimentan un puente rectificador, la salida de este puente ataca una etapa de adaptación MA1/1 montada en diferencial la cual filtra la señal y cuya salida se compara con la tensión obtenida del circuito del amplificador MA2/2 la cual como mencionamos puede ser ajustada por el potenciómetro que controla el motor de control.

Luego de comparar las dos tensiones la tensión de error resultante se aplica a un amplificador MA1/2 fig. 4.11 que permite trabajar a error nulo.

La salida de este amplificador opera un integrador MA2 fig. 4.12 con ajuste de cero de manera que la señal de salida la cual es en diente de sierra sea siempre positiva.

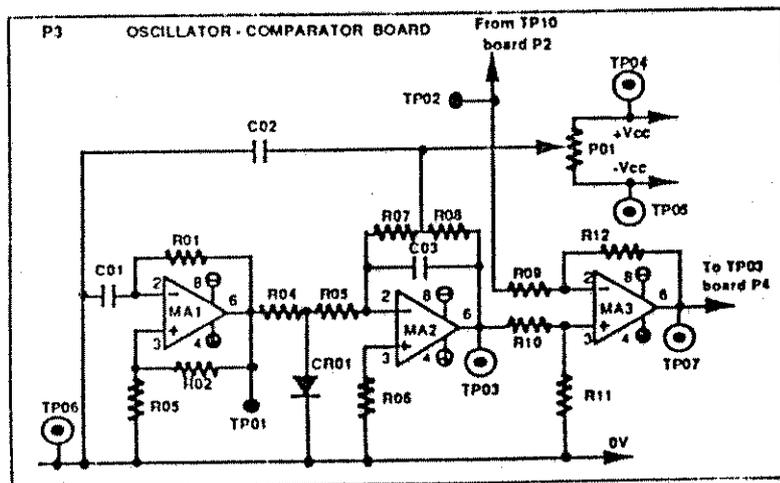


Figura 4.12 Circuito oscilador comparador

Esta señal junto con la señal obtenida de MA1 y MA2 (oscilador) es recibida por un comparador MA3 el cual se encarga de proporcionar una señal rectangular cuya frecuencia es constante pero la relación cíclica depende de la tensión de salida del amplificador operacional MA1/2 esto es el error o separación entre la imagen de la tensión de la máquina y el valor de referencia.

El circuito oscilador proporciona una señal rectangular al circuito de la máquina

fig. 4.13

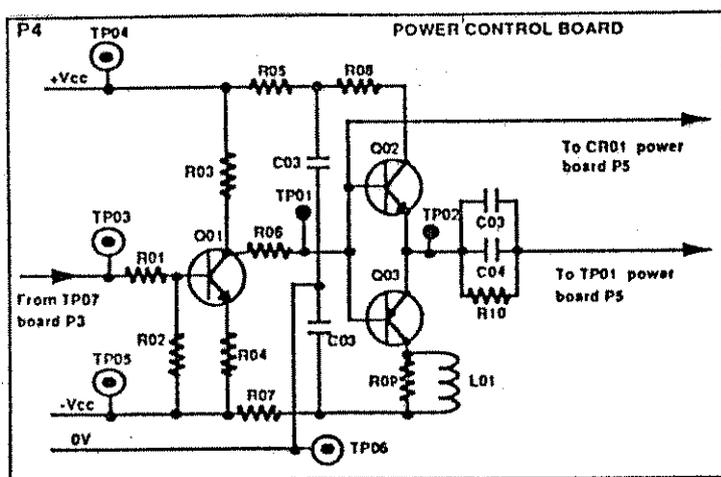


Figura 4.13 Circuito de manejo de potencia

La función de este circuito es proporcionar al transistor de potencia Q02 un manejo de base proporcionándole una buena conmutación y saturación sea cual fuere su tensión colector y corriente de saturación, resumiendo las funciones del este circuito tenemos:

- a- Asegura una adaptación en corriente y proporciona una sobreintensidad en lado positivo de la señal de manejo de base del transistor de potencia Q01 el cual es parte del circuito 4.14 . La sobreintensidad permite saturar este transistor de potencia lo más rápido posible.
- b- Recupera las cargas almacenadas en la base del transistor polarizado negativamente Q03.
- c- Asegura la autosaturación del transistor de potencia independientemente de la corriente sin que los transistores manejadores Q01, Q02 y Q03 vean permanentemente la corriente de base máxima.

Esta autosaturación se hace por acción sobre el manejo de base del transistor de potencia Q01 (CR01, CR02, CR03, Q02).

El transistor de potencia figura 4.14 que es gobernado por el circuito de manejo de potencia mencionado anteriormente tiene su propio circuito impreso compuesto por un darlington de potencia el cual esta protegido contra sobretensiones por una resistencia R01, un capacitor C01 un diodo CR04 por dos limitadores de amplitud RV01 y RV02 (varistores) y por un diodo limitador de respuesta rápida (CR05).

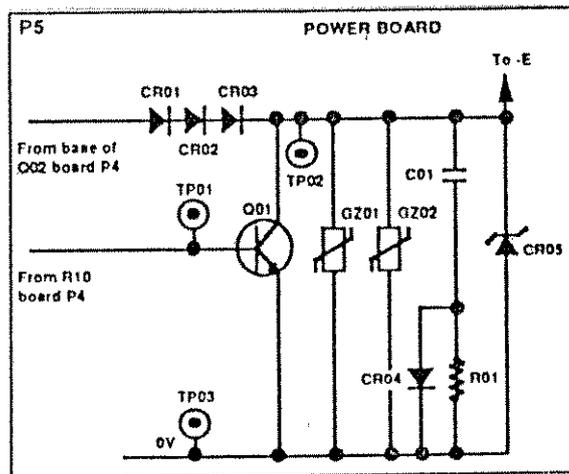


Figura 4.14. Transistor de potencia

La salida del transistor de potencia está conectada a la bornera J1 de la tarjeta madre en el punto 2 de donde se conecta con el punto 5 de la bornera J2 del regulador de voltaje el cual a su vez se conecta al punto 6 de la fuente de poder fig. 4.8. De esta manera el voltaje es regulado aumentando o disminuyendo la excitación del generador.

4.6 FUNCIONAMIENTO EN PARALELO CON OTRAS MÁQUINAS

En esta forma de funcionamiento, el voltaje y potencia reactiva pueden ser gobernados desde el control de los generadores de una manera manual y los diagramas usados son los mismo utilizados cuando hablamos de un generador independiente.

Cuando se trabaja de esta manera el voltaje debe de ser controlado manualmente. El regulador posee un reóstato ubicado en los puntos 7 y 8 de la

capacidad, el voltaje es ajustado a un valor mayor al nominal para que en los arranques de estos no caiga abajo de la protección de bajo voltaje.

El control en modo paralelo es igual al modo de un generador actuando solo alimentando una carga. Se basa en la variación de una resistencia mediante la variación de rotación de un motor de control fig. 4.6 independiente con su regulador de voltaje.

El funcionamiento en paralelo tiene un modo automático de controlar la distribución de potencia reactiva entre las máquinas. Un transformador de corriente insertado en una de las fases de voltaje sensa constantemente la corriente del estator del generador, esta corriente es convertida en señal de voltaje y aplicada a una resistencia RO1 fig. 4.11. De esta manera cuando una carga resistiva ($\cos\theta=1$) se aplica a la máquina la tensión que aparece en las bornas de RO1, está desfasada 90 grados con relación al enrollamiento TO1, y el vector suma de las dos tensiones es prácticamente el mismo que la tensión de detección normal.

Lo dicho anteriormente puede ejemplificarse fasorialmente, para ello se usa el dibujo de un generador con sus tres fases con una resistencia P_s en una de ellas donde llamaremos U_i a la caída de tensión en la resistencia y U_d a la resultante Fig.4.15. Fasorialmente puede verse que para un factor de potencia igual a uno Fig. 4.16

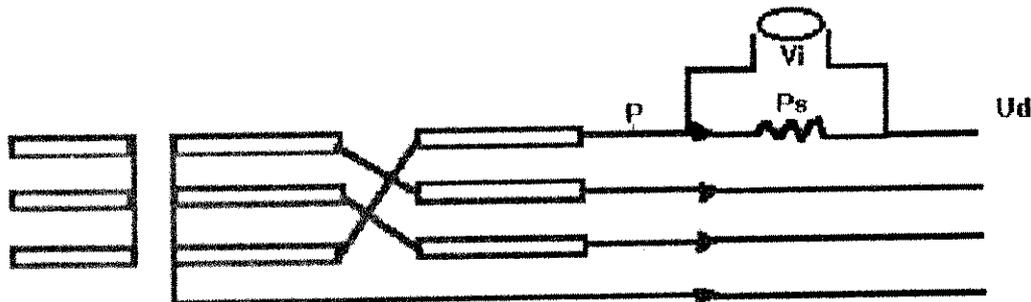


Figura 4.15 Diagrama para comprender el funcionamiento en paralelo

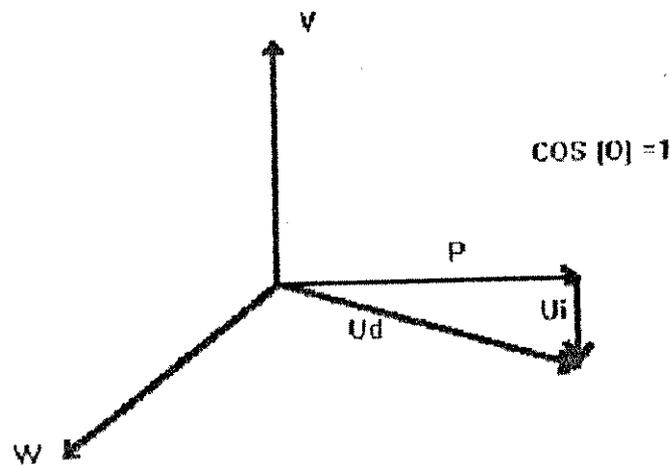


Figura 4.16. Factor de potencia resistivo

En esta misma resistencia es medido el valor instantáneo de la corriente de estator del alternador cada vez que el voltaje de la misma fase pasa por cero y luego es almacenado en el condensador CO8 hasta la siguiente medida. Así mismo se encuentra el amplificador MA 1/2 se utiliza a la entrada de tensión para poder decalar fase y tensión y así obtener un valor nulo a la salida MA2/2 para carga reactiva.

El valor obtenido de MA2/2 es comparado en la tarjeta de comparación de voltaje cuyo valor se traduce en aumentar o disminuir el voltaje del alternador.

Cuando una carga inductiva coseno hacia atrás se aplica al alternador la tensión en la salida de Ps está en fase con la tensión de detección y la composición vectorial de ambas proporciona una tensión resultante menor que la normal. Como el papel del regulador es mantener la tensión constante reaccionará aumentando la tensión de salida del alternador. Fig.4.17

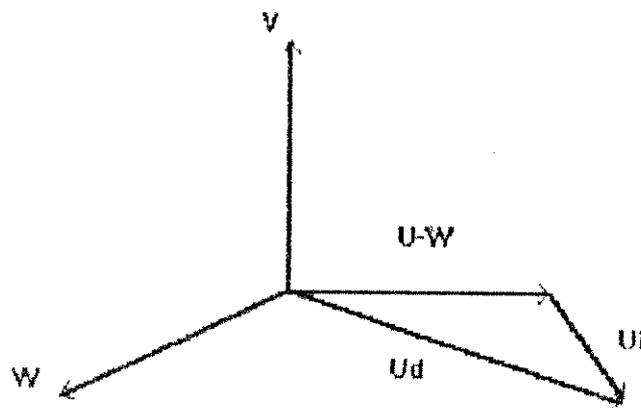


Figura 4.17. Factor de potencia en atraso

Cuando una carga capacitiva coseno hacia adelante se aplica al alternador la tensión de detección y la composición vectorial de ambas proporciona una tensión resultante mayor que la normal. El regulador reaccionará entonces disminuyendo la tensión de salida del alternador. Fig. 4.18.

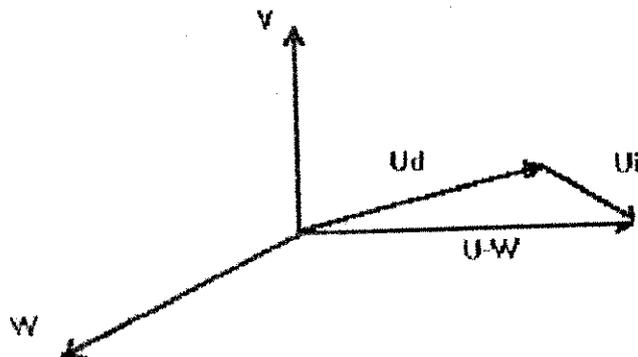


Figura 4.18 factor de potencia en adelanto

Cuando dos máquinas funcionan en paralelo, la corriente de excitación de una de ellas es excesiva y provoca una corriente de circulación, ésta aparece como una carga inductiva para el alternador en sobre excitación y como para carga capacitiva para el otro. El sistema de funcionamiento en paralelo

reacciona de forma que el regulador aumente la excitación de aquella máquina que tenga un $\cos(\theta)$ hacia atrás y disminuya la excitación de aquella máquina que tenga un $\cos(\theta)$ adelantado.

4.7 FUNCIONAMIENTO DEL REGULADOR EN PARALELO CON UN SISTEMA DE POTENCIA

Cuando se trabaja en paralelo con un sistema de potencia los relés K01 y K02 de la figura 4.10 se accionan en el momento de ubicarnos en paralelo. El procedimiento es el siguiente: Los contactos de estos relés permiten habilitar los puntos 15, 16 y 17 de J2 en la figura 4.8. los puntos 15 y 16 actúan sobre los puntos 5 y 4 de la bornera J1 respectivamente, y el punto 17 actúa sobre el punto 6 de la bornera J3 (Las borneras J1 y J3 pueden verse en la figura 4.6 A). De esta manera reciben tensión los relés K01 y K02 quienes se encargan de modificar el funcionamiento de los circuitos de la figura 4.10. para luego distribuir la potencia reactiva y modificar el factor de potencia adecuadamente.

4.8 BOOSTER O CORRECTOR DE CORTO CIRCUITO

En la figura 4.19 encuentra el circuito que representa al booster este se compone principalmente por tres transformadores de corriente TI01, TI02 Y TI03 inyectado uno en cada fase a la salida del alternador los cuales están sensando constantemente la corriente del alternador, la corriente obtenida es convertida a voltaje por los transformadores TI01, TI02 Y TI03 para luego ser rectificado por el puente rectificador CRO1 y aplicado a la excitatriz para ayudar al regulador de voltaje a mantener el voltaje constante en caso de que hayan grandes auxiliares, como arranque de motores de potencias muy altas los cuales requieren corrientes iniciales muy grandes.

El booster está conectado a la excitatriz de la siguiente manera: La terminal positiva se conecta directamente a la terminal positiva de la excitatriz punto 5 de la fuente de poder cerrando el circuito por el punto 6 de la misma fuente de poder seguidamente llega al diodo CRO8 fig. 4.4 y regresa por el punto 7 para cerrar el circuito en -C del booster.

En este circuito encontramos el TI05 mencionado anteriormente que se encarga de proporcionar la información de los cambios de carga que se dan en el generador al circuito de la figura 4.10

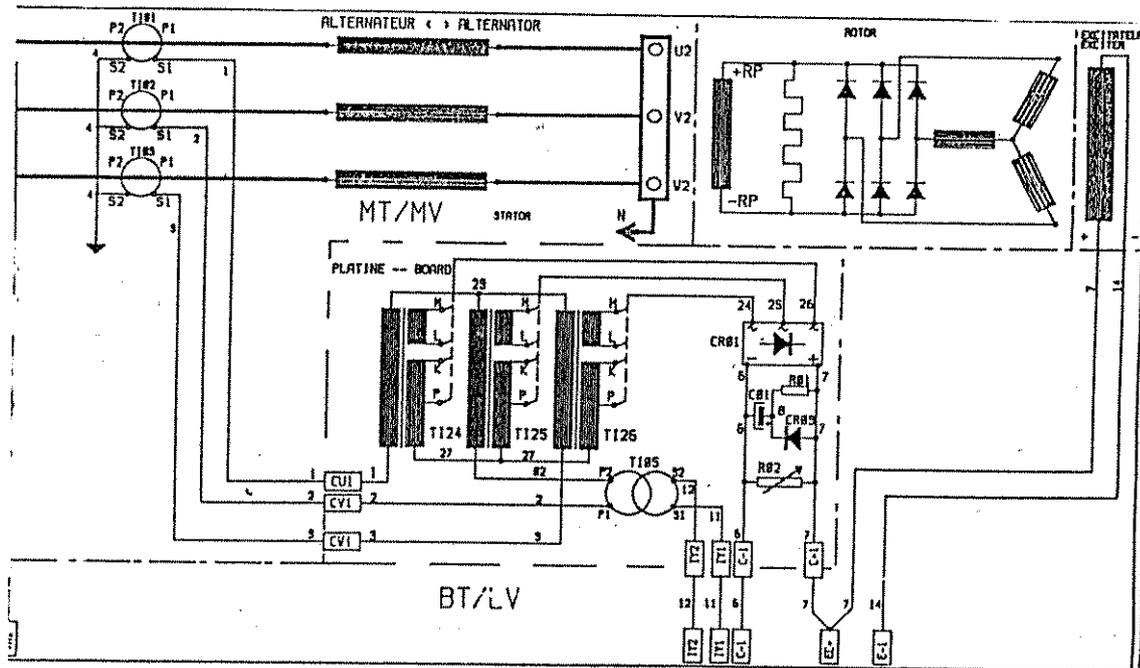


Figura 4.19. Booster

CONCLUSIONES

- 1- El objetivo principal de un regulador de voltaje de un generador sea cual fuere su principio de funcionamiento o su fabricación es el de tratar de mantener constante el voltaje en terminales del generador pese a las condiciones de carga existente.
- 2- Un regulador de voltaje, por muy rápido que este sea no logra suprimir el período transitorio que se da por la perturbación causada por las variaciones de carga.
- 3- La rapidez de un regulador de voltaje depende principalmente de la inercia, distancia a recorrer y el par del primotor.
- 4- El buen funcionamiento de un regulador de tensión se da cuando su rapidez para reestablecer el voltaje no es ni tan rápida que causa oscilaciones amortiguadas en el sistema, ni tan lento para que la duración de reestablecimiento no se alargue innecesariamente. Por lo tanto debe de cumplir con las siguientes características: rapidez de respuesta adecuada, exactitud, sensibilidad, amortiguación eficaz y sobrerregulación.
- 5- El sistema de excitación adecuado será aquel que trate de mantener la corriente rotórica constante en el momento de la perturbación y reestablecer tan rápido como sea posible la tensión en terminales del generador. La potencia de excitación dependerá del tipo de generador empleado y la importancia de la central eléctrica.

6- La normalización que IEEE presenta de los sistemas de control de voltaje y sus modelos cumplen con los requerimientos que tienen los sistemas de control de la excitación moderno.

7- Un sistema de regulación de tipo estático es capaz de inducir el voltaje inicial de un generador automáticamente y en segundos. Además en condiciones de carga puede adaptarse muy rápidamente a las variaciones de voltaje.

RECOMENDACIONES

- 1- Debido a lo nuevo que son sistemas de excitación estática, la información existente en Guatemala es limitada, por lo que se recomienda investigar más sobre el tema, para una mejor comprensión del mismo.
- 2- Cuando se tenga que dar mantenimiento a un regulador de voltaje de tipo estático, debe recordarse que este usa muchos dispositivos electrónicos y digitales, y que su manipulación inadecuada puede causarle serios daños. Además, hay que usar líquidos cuidadosamente seleccionados para su limpieza.
- 3- El mantenimiento de los auxiliares de un regulador de tipo estático tales como transformadores de potencia y transformadores de corriente debe ser hecho muy cuidadosamente y por personal que conozca bien el sistema.
- 4- Si en determinado momento hay que seleccionar un regulador de voltaje de tipo estático, se deben tomar en cuenta las siguientes características:
 - a-Modelo
 - b-Número de fases
 - c-Protección de baja velocidad
 - d-Antiparásitaje (filtros)
 - e-Tensión y frecuencia
 - f- Regulación media de las tres fases
 - g- Margen de tensión
 - h- Funcionamiento en paralelo
 - i-Temperatura de funcionamiento
 - j- Potencia disipada
 - k-Temperatura
 - l- Montaje
 - m-Dimensiones

REFERENCIAS

- 1- IEEE Comitte Report. **Excitación System Dinamic Characteristics.**
IEEE Transaction Power Apparatus and Systems. Junio de 1972 Pag. 55-56
- 2- IEEE Transaction Power Apparatus and Systems. Febrero 1981. Pag. 494-509.

BIBLIOGRAFIA

- 1- José Carlos Farfán Colíndres. **Gobernadores de Velocidad y Tensión en Centrales Hidroeléctricas.** (Tesis: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala) Guatemala 1988.
- 2- Edwards/Pemney: **Ecuaciones Diferenciales Elementales con Aplicaciones:** Primera edición en español: Prentice-Hall, Hispanoamericana, S.A.
- 3- M.E. Van Valkenburg: **Análisis de Redes:** Tercera Edición. México: Editorial Limusa, 1977.
- 4- Fitzgerald A.E. **Teoría y Análisis de las Máquinas Eléctricas.** Segunda Edición. México: Editorial McGraw-Hill, 1988.
- 5- LEROY SOMER. **Automático Voltage Regulador RBS 6000.** Instruction Manual.
- 6- Ogata Katsushiko. **Ingeniería de Control Moderna.** Primera edición. Prentice Hill Hispanoamericana, S.A. México 1980.
- 7- Gourishancar. **Conversión de Energía Electromecánica.** Editorial Alfaomega S.A. de C.V.
- 8- Enciclopedia CEAC de Electricidad. **Máquinas Motrices generadores de Energía Eléctrica.** Primera edición, Ediciones CEAC S.A. 1972. Barcelona-España