

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

"ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE UN GENERADOR
SINCRÓNICO CON EXCITATRIZ Y GOBERNADOR UNIDO A UN
SISTEMA DE POTENCIA"

TESIS DE GRADO

PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:
INGENIERO EN ELECTRICIDAD
ESPECIALIZACIÓN POTENCIA

REALIZADA POR:

JOSE LUIS RIERA PERALTA

GUAYAQUIL - ECUADOR

1986

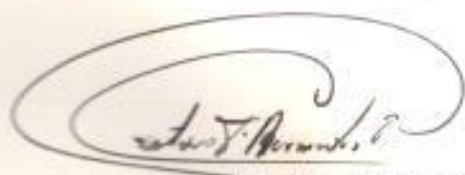
AGRADECIMIENTO

AI ING. MANUEL NUÑEZ,
por su colaboración en
la realización de esta
tesis.

AI ING. ALBERTO HANZE
Director de Tesis, por
su impulso en la
culminación de este
trabajo.

DEDICATORIA

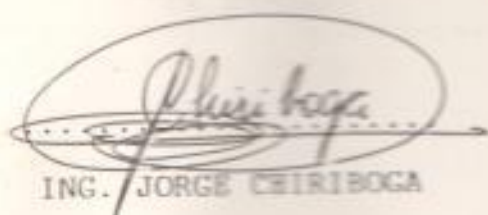
A MIS PADRES
A MIS TIAS
A MIS HERMANOS
A MI ESPOSA



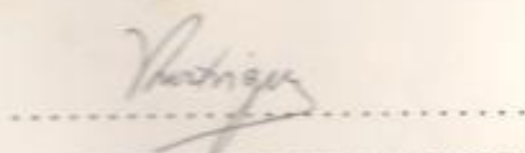
.....
ING. GUSTAVO BERMUDEZ F.
(Presidente del Tribunal)



.....
ING. ALBERTO HANZE BELLO
(Director de Tesis)



.....
ING. JORGE CHIRIBOGA




.....
ING. IVAN RODRIGUEZ RAMOS

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOEL)


.....
JOSE LUIS RIERA PERALTA

INDICE GENERAL

	PAGS.
RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VIII
INDICE DE GRAPICOS	XII
INDICE DE TABLAS	XVII
INDICE DE SIMBOLOS FORTRAN	XVIII
INTRODUCCION	22
CAPITULO 1 : EL PROBLEMA DE LA ESTABILIDAD	24
1.1 Definición	27
1.2 Tipos de estabilidad	28
1.3 Importancia de los estudios de estabilidad en los análisis de los sistemas de potencia	35
1.4 Objetivos y alcance de estos estudios	36
CAPITULO 2 : ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DE UN SISTEMA DE POTENCIA	39
2.1 Elementos que intervienen en un estudio de estabilidad	41
2.1.1 Máquina sincrónica	41
2.1.2 Excitación de la máquina sincrónica	49
2.1.3 Gobernador del turbo-generador	63

	PAGS.
2.1.4 Tipos de carga	68
2.1.5 Redes eléctricas	71
2.2 Análisis matemático de la estabilidad	73
2.2.1 Ecuación de oscilación	73
2.2.2 Métodos de solución de la ecuación de oscilación	80
2.2.3 Interpretación de resultados	94
CAPITULO 3 : MODELO DE UNA MAQUINA SINCRONICA NO REGULADA PARA EL ANALISIS DE LA ESTABILIDAD	95
3.1 Análisis teórico de la máquina sincrónica	97
3.2 Representación de la máquina sincrónica para análisis de estabilidad	121
3.3 Influencia de la saturación	144
3.4 Circuito equivalente de los modelos de máquinas sincrónicas a ser representadas	148
3.5 Restricciones en los parámetros de entrada	150
CAPITULO 4 : MODELO MATEMATICO DEL SISTEMA DE EXCITACION DE UNA MAQUINA SINCRONICA PARA UN ESTUDIO DE ESTABILIDAD	151
4.1 Análisis teórico	152
4.1.1 Comportamiento del sistema de excitación en estudios de estabilidad transiente y de estado estable	155

	PAGS.
4.1.2 Elementos de un sistema de excitación de regulación continua	160
4.2 Representación del sistema de excitación	172
4.2.1 Modelo matemático de la excitación	175
4.2.2 Circuito equivalente de la excitación a representarse	180
4.3 Parámetros de entrada al programa	181
4.4 Diagrama de flujo del modelo a representarse	183
CAPITULO 5: MODELO MATEMATICO DEL GOBERNADOR DE VELOCIDAD PARA UN ESTUDIO DE ESTABILIDAD	188
5.1 Análisis teórico del gobernador de velocidad	189
5.1.1 Definiciones de las características del gobernador de velocidad	195
5.1.2 Funcionamiento del gobernador de velocidad	196
5.1.3 Tipos de gobernadores	200
5.2 Elementos del sistema de regulación de velocidad de un turbo-generador	205
5.2.1 Modelo del gobernador de velocidad mecánico hidráulico	207
5.2.2 Modelo general del gobernador de velocidad	210
5.2.3 Sistema de vapor y turbina	212
5.3 Representación del sistema de regulación de velocidad	218
5.4 Diagrama de flujo de los modelos a representarse	218

	PAGS.
CAPITULO 6 : REPRESENTACION DE LOS ELEMENTOS DE UN SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA	222
6.1 Análisis teórico	224
6.2 Representación de las líneas de transmisión	226
6.3 Representación de las cargas eléctricas	231
6.4 Representación de las fallas en el sistema de potencia	233
CAPITULO 7 : ESTUDIOS TIPICOS DE ESTABILIDAD	240
7.1 Diagrama de flujo general	240
7.2 Ejemplo de una máquina sincrónica sin regulación automática	243
7.3 Ejemplo de una máquina sincrónica con regulación automática de voltaje	253
7.4 Ejemplo de una máquina sincrónica con regulación automática de voltaje y velocidad	263
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	274
APENDICES	277
A. Listado del programa	278
B. Manual del usuario	290
BIBLIOGRAFIA	298

RESUMEN

En el primer capítulo se hace una introducción a la temática de la estabilidad, mostrando los tipos de estabilidad y los objetivos que se persiguen al realizar dichos estudios.

En el segundo capítulo se presenta una descripción de cada uno de los elementos físicos que conforman el sistema eléctrico de potencia, a saber: generador sincrónico, sistema de excitación, gobernador de un turbo-generador, cargas eléctricas y configuración de redes. Además, se hará una revisión de los conceptos matemáticos empleados en un estudio de estabilidad.

En los capítulos tercero, cuarto y quinto se hará un estudio de los modelos matemáticos de: generador sincrónico, sistema de excitación y sistema de regulación de la velocidad, respectivamente.

El sexto capítulo, sirve para establecer las representaciones generales que se tienen de las líneas de transmisión, las cargas eléctricas y las fallas que se pueden presentar.

En el capítulo séptimo se presentan ejemplos típicos para determinar la estabilidad de un generador sincrónico unido a un sistema eléctrico de potencia cuando aquel posee regulación de voltaje y de velocidad, se muestran también los resultados que nos entrega el programa de computadora para las alternativas que se han implementado.

LISTA DE SIMBOLOS PORTRAN

VARIABLE	DEFINICION
ANET	Diferencia de ángulo entre el voltaje de generación y el de la barra infinita
AT1	Constante de tiempo T1 de la excitación
AT2	Constante de tiempo T2 de la excitación
AT3	Constante de tiempo T3 del gobernador
AT4	Retardo de tiempo T4 debido al ingreso de vapor en la turbina
AT5	Retardo T5 debido al precalentador
AT6	Retardo de tiempo T6 asociado a la turbina
DAMP	Constante de amortiguación K_d en pu
EB	Voltaje de prefalla en la barra infinita
EMX	Voltaje máximo del campo de la excitatriz E_{FDMAX}
EMN	Voltaje mínimo del campo de la excitatriz E_{FDMIN}
ET	Voltaje de prefalla del generador
GA	Ganancia del regulador K_a
G2	Constante de la excitatriz K_e
G3	Ganancia K_r en el caso de realimentación
GOVNR	= 0, el gobernador no es representado = 1, el gobernador si es representado
HM	Constante de inercia
HN	Tamaño del intervalo de integración

IPPK	Relación entre el intervalo de impresión y el intervalo de integración
INEXT	= 0, no hay más estudios $\neq 0$, habra otro caso por resolver
K1	Constante K1 usada en el modelo del gobernador
K2	Fracción de la potencia que sale del precalentador o de la turbina
K3	Fracción de la potencia desarrollada por precalentamiento
KEY	= <u>1</u> , indica no excitatriz = 3, la excitatriz será representada
PO	Salida del generador en MW
PMAI	Límite máximo de potencia de la turbina
PMIN	Límite inferior de potencia de la turbina
PQ	Salida del generador en MVAR
RG	Resistencia por fase del circuito del estator
S1	Factor de saturación de la excitatriz a 0.75 del voltaje máximo
S2	Factor de saturación de la excitatriz a voltaje máximo
SAT1	Factor de saturación del generador a V = 1 p.u.
SAT12	Factor de saturación del generador a V = 1.2 p.u.

T1	Constante de la excitatriz relacionada con la auto excitación
T2	Constante de tiempo de amortiguación T2
T10	Constante de tiempo de circuito de campo abierto T_{D0}'
T1Q	Constante de tiempo de circuito abierto asociada con los caminos de hierro T_{q0}'
T11D	Constante de tiempo del circuito amortiguador en el eje "d", T_{D0}''
T11Q	Constante de tiempo del circuito amortiguador en el eje "q", T_{q0}''
TA1	Primera constante de tiempo del regulador T_{a1}
TA2	Constante de tiempo de amortiguación del regulador T_{a2}
TA3	Constante de tiempo de amortiguación del regulador T_{a3}
TF2	Constante de tiempo de realimentación T_{r2}
TF3	Constante de tiempo de realimentación T_{r3}
TC	Tiempo de aclaramiento
TEXT(I)	Título del estudio
TR	Constante de tiempo del rectificador de voltaje
TL	Tiempo de duración del estudio
VEMAX	Límite superior del voltaje del regulador
VEMIN	Límite inferior del voltaje del regulador

XREAL	Componente real de la impedancia
XIMAG	Componente imaginaria de la impedancia
XD	Reactancia sincrónica de eje directo
XD1	Reactancia transiente de eje directo
XD11	Reactancia subtransiente de eje directo
XL	Reactancia de pérdidas del estator
XQ	Reactancia sincrónica de eje en cuadratura
XQ1	Reactancia transiente de eje en cuadratura
XQ11	Reactancia subtransiente de eje en cuadratura

INTRODUCCION

El análisis de la estabilidad de un generador sincrónico unido a un sistema eléctrico de potencia, de tipo radial, se lo realizará mediante el uso de un programa de computadora.

Esto nos obliga a desarrollar los modelos matemáticos, en forma individual, de los elementos que se emplearán en dicho sistema de potencia, para de tal forma obtener los correspondientes diagramas de flujo, los cuales constituyen el esquema fundamental del programa de computación que se implementará para representar el sistema de potencia en cuestión.

Dentro de este análisis de la estabilidad se incorporan los efectos de los sistemas de regulación de voltaje y de velocidad como factores importantes en el mejoramiento de la respuesta de una máquina sincrónica ante la presencia de fallas producidas en el sistema eléctrico de potencia al cual se halla unida.

La operación y su incidencia en los parámetros (voltaje y frecuencia) de los sistemas de excitación y de regulación

de velocidad, son mostrados en los capítulos cuarto y quinto, en los mismos que se analizan los modelos matemáticos de los sistemas a ser representados.

Con el uso del programa de computación que se presenta en esta tesis, se podrán realizar estudios muy variados; desde un sistema en el que se dispongan de muy pocos datos hasta uno en el cual se posean datos suficientes para poder modelar a la máquina sincrónica de una forma bastante completa. Además, dicho programa es muy versátil, en el sentido de poderse simular varias fallas: trifásica, una fase a tierra y dos fases a tierra; también se podría incorporar los elementos de regulación siempre y cuando el usuario lo desee.

CAPITULO PRIMERO

EL PROBLEMA DE LA ESTABILIDAD

A medida que los sistemas eléctricos de potencia han crecido debido al incremento de la demanda del servicio; lo cual da lugar a la aparición de unidades de generación de mayor capacidad, y al crecimiento del área que abarcan dichos sistemas, ha surgido como un reto para las empresas que manejan el suministro de energía eléctrica el proporcionar un servicio continuo y de gran confiabilidad. Estas dos condiciones están íntimamente relacionadas con el hecho de que al ocurrir cualquier tipo de disturbio en el sistema, éste responda de tal manera que el usuario no se vea privado del fluido eléctrico. Un tipo de perturbación que afecta la continuidad y confiabilidad de los sistemas es la inestabilidad que se pueda producir en los mismos, por lo que es necesario diseñar y construir sistemas que sean estables.

En el caso de un sistema eléctrico de potencia la operación estable del mismo requiere de una continua

igualdad entre la energía que entra a los primo-motores, y la carga eléctrica existente en el sistema. Esta carga eléctrica es continuamente cambiante ya que tanto luminarias, artefactos o máquinas eléctricas son en todo momento conectadas o desconectadas, por tanto, en el sentido estricto de la palabra no podemos hablar de un estado estable del sistema. Aun cuando los cambios de carga son pequeños comparados con el tamaño del sistema, por cada aumento o disminución de la carga deberá existir el correspondiente cambio en la entrada de energía a los primo-motores de los generadores del sistema.

Existen cambios mucho más severos en un sistema, tales como la ocurrencia de una falla o cortocircuito.

Estas fallas ocurren generalmente en las líneas de transmisión y en forma muy ocasional en las barras o en los transformadores. Otro tipo de disturbio severo, es la salida repentina de una gran cantidad de generación o la pérdida de una carga considerable.

Cuando un sistema eléctrico se halla operando normalmente, la cantidad más importante es la potencia producida en los generadores y transmitida hacia los consumidores. La "calidad" de la energía producida está definida por la magnitud del voltaje en los terminales de los consumidores y por la frecuencia establecida en el

sistema. La condición de un sistema que viene definida por las cantidades anteriores se la conoce como su ESTADO.

Al producirse cualquiera de los disturbios, si la entrada mecánica no iguala rápidamente a la carga eléctrica, la velocidad (por tanto, la frecuencia) y el voltaje del sistema se desviarán de los valores normales. Para ayudar en la recuperación de los valores correctos del sistema se emplean elementos de control tales como gobernadores, reguladores de voltaje del generador y equipos de control de frecuencia de las líneas de transmisión, cuya función es la de sensar las desviaciones de los parámetros respectivos a partir de su condición normal y actuar de tal forma que se logre restaurar la frecuencia y el voltaje a sus valores normales. Desafortunadamente, los elementos de control no son perfectos y permiten oscilaciones (variaciones periódicas) alrededor de las condiciones deseadas. Cuando las oscilaciones disminuyen con el tiempo, se considera estable al sistema.

En el tratamiento del problema de la estabilidad han habido importantes adelantos sobre todo en lo que tiene que ver con la rapidez de operación de los elementos de desconexión que sirven para aislar la falla. Actualmente se tienen los tiempos de 1 a 2 ciclos para la actuación

del relé y de 2 a 3 ciclos para la apertura del interruptor de potencia.

Otro campo en el cual se han producido mejoras es en lo que tiene que ver con los reguladores de voltaje y los sistemas de excitación. Estos adelantos son importantes por cuanto disminuyen la amplitud de la primera oscilación, la cual es la responsable de la pérdida o no del sincronismo en un estudio de estabilidad transiente.

En lo relacionado con el análisis del problema de la estabilidad se han ido desarrollando conceptos que tienen que ver con la teoría de control, especialmente el criterio de Routh-Hurwitz, que sirve para determinar si un sistema es estable de acuerdo con ciertas condiciones.

En el tratamiento matemático del problema, ha sido el desarrollo de las computadoras digitales lo que le ha venido a dar un impulso verdaderamente importante ya que se han podido introducir modelos muy sofisticados de casi la totalidad de los elementos que intervienen en un sistema eléctrico de potencia.

1.1 DEFINICION

Si la respuesta oscilatoria de un sistema de potencia, durante el período que sigue a un

disturbio, es amortiguada y el sistema alcanza en un tiempo finito un nuevo estado estable operación; entonces diremos que el sistema es estable. Si el sistema no retorna a un nuevo estado de equilibrio, será considerado como inestable.

1.2 TIPOS DE ESTABILIDAD

Para efectos de estudio, la estabilidad se la ha dividido tomando como referencia el intervalo de tiempo en el cual se realiza el análisis y el tipo de disturbio que se tome en consideración, así como también de la operación o no de los elementos de control, actualmente se tienen tres condiciones de estabilidad que deben ser consideradas:

- de estado estable
- transiente
- dinámica

Se dice que esta división es para efectos de estudio ya que como se mencionó inicialmente no hay un período estacionario en el funcionamiento de un sistema eléctrico de potencia pues se trata de un sistema permanentemente cambiante.

ESTABILIDAD DE ESTADO ESTABLE

Se la puede definir como la habilidad de un sistema eléctrico de potencia de mantener el sincronismo entre las máquinas luego de que se produzcan cambios pequeños de carga.

En sistemas muy extensos, la estabilidad de estado estable dependerá, entre otros factores, de: los niveles de transmisión (voltaje de transmisión), de la capacidad de generación y de la efectividad de los dispositivos automáticos de control, particularmente de los reguladores automáticos de voltaje. Estos factores son también importantes en lo relacionado a la estabilidad transiente y dinámica.

Este tipo de estabilidad está relacionada con variaciones pequeñas en la carga o en la generación del sistema. Así, cuando ocurre un cambio en la carga de un generador sincrónico, se produce un avance o un retardo en el valor del ángulo del rotor de la máquina con respecto a su valor inicial. Estas variaciones a partir de la condición de equilibrio continuarán, pudiendo dichas oscilaciones disminuir hasta lograr una posición correcta para la nueva condición de carga. Cuando el rotor logra esta posición con unas pocas oscilaciones, el sistema es

estable y se dice que las oscilaciones son altamente amortiguadas.

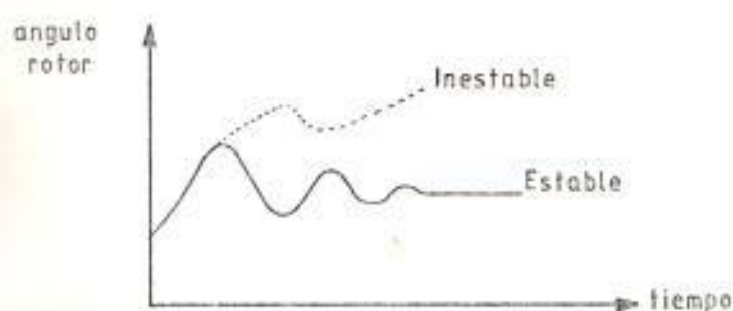


Fig. 1.1

Diagrama ángulo-tiempo para la estabilidad estado estable

Las condiciones de cambio que se tratan en la estabilidad de estado estable están ocurriendo siempre en un sistema eléctrico, ya que en todo momento estará "entrando" o "saliendo" cargas, por lo cual todos los generadores en un sistema interconectado deberán estar reajustando su entrada de energía, su valor del ángulo del rotor y su excitación para de esta forma mantener las condiciones de operación correctas.

ESTABILIDAD TRANSIENTE

Se dice que se produce un disturbio severo cuando una gran cantidad de generación o de carga se pierde en forma repentina o cuando una falla se produce en una

línea de transmisión. Se define pues a la estabilidad transiente como la habilidad del sistema de permanecer en sincronismo luego de que se ha producido una falla severa.

Existen varios factores que afectan la estabilidad transiente de un sistema, entre los cuales citaremos algunos:

a.) Las características mecánicas de las unidades de generación, incluyendo la inercia de sus partes rotativas y sus propiedades eléctricas como, la reactancia transiente y las características magnéticas de saturación del hierro del estator y del rotor.

b.) La velocidad de desconexión de las líneas o equipos que hubieren fallado. En caso de haber recierre automático, se considerará la velocidad de restauración de la línea fallada al servicio.

c.) La velocidad con la cual responderá el sistema de excitación, ya que una falla vendrá acompañada de una reducción de voltaje, por lo cual es importante regresar el voltaje a su valor normal en el mantenimiento de la estabilidad.

Ordinariamente la primera oscilación del rotor de la máquina sincrónica tiene lugar en aproximadamente un tiempo menor de 1 seg. de producido el disturbio; este tiempo no se conoce exactamente por cuanto depende de las características de las máquinas y del sistema de transmisión.

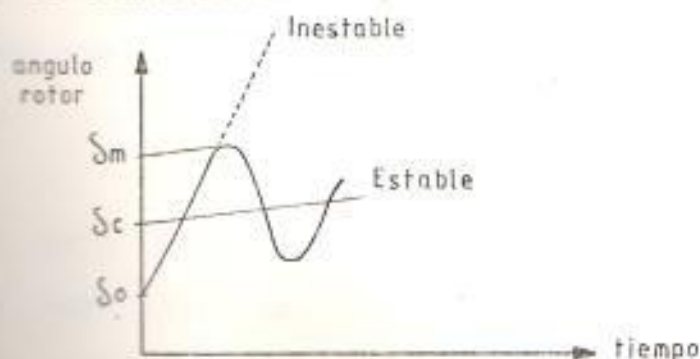


Fig. 1.2

Diagrama ángulo-tiempo para estabilidad transiente

ESTABILIDAD DINÁMICA

La reacción de los gobernadores de los primo-motores ocurre aproximadamente en 1 a 1.5 seg. después de producirse el disturbio. Como ya se ha dicho anteriormente, los gobernadores actúan aumentando o disminuyendo la entrada de energía de acuerdo a como se requiere, para de esta forma restablecer el equilibrio energético del sistema. El período en el cual las características de estabilidad dinámica se manifiestan es aquel comprendido entre el momento en que comienzan a actuar los gobernadores y aquel en el

cual se restablece el equilibrio de estado estable.

La estabilidad dinámica es la habilidad de un sistema eléctrico de potencia de mantenerse en sincronismo luego de la primera oscilación (período de estabilidad transiente) hasta que el sistema haya alcanzado una nueva condición de equilibrio en estado estable.

Durante este período, los gobernadores abren o cierran sus válvulas, de acuerdo a si se quiere aumentar o disminuir la entrada de energía a los primo-motores. Cuando el gobernador siente una caída de velocidad, actuará abriendo las válvulas reguladoras para admitir más vapor hacia una turbina de vapor o más agua hacia una unidad hidrogeneradora, de tal forma que se contrarreste la disminución de velocidad acelerando la máquina hasta lograr la velocidad normal. Sin embargo, esta es una condición de desbalance ya que la energía que ha entrado excede ahora a la carga, por lo cual la velocidad se incrementará más allá de su valor normal, debiendo actuar nuevamente el gobernador para reducir la entrada de energía. Como resultado de este proceso se producirán oscilaciones tanto en la entrada de energía como en el ángulo del rotor.

Si el sistema es dinámicamente estable, las oscilaciones se amortiguarán en magnitud a medida que transcurre el tiempo hasta lograr la nueva condición de equilibrio.

Es posible tener en un sistema, una condición estable en el período transiente pero en cambio dinámicamente inestable. Es decir, que luego de la primera oscilación que sigue a un disturbio, el rotor de la máquina obtiene una velocidad que se halle dentro de los límites normales, en cambio, luego de que el gobernador ha empezado a actuar las oscilaciones se incrementan de tal forma que saquen a la máquina de sincronismo. Lo anterior puede suceder si luego de sentir el gobernador la necesidad de aumentar o disminuir la energía de entrada a la máquina, su operación es demasiado retardada, de tal forma que las oscilaciones en lugar de disminuir se incrementan cada vez más.

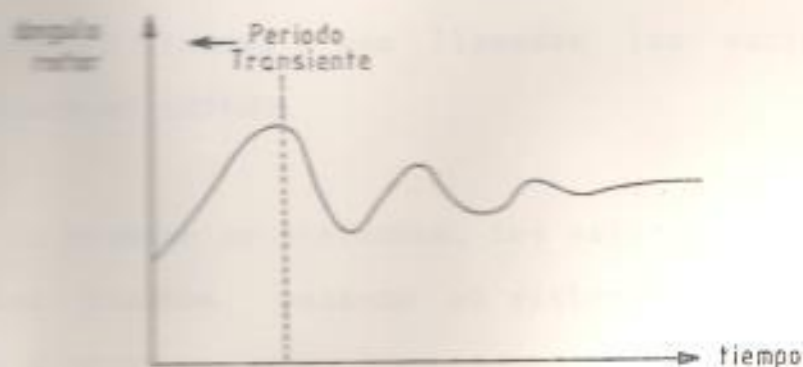


Fig. 1.3

Diagrama ángulo-tiempo de la estabilidad dinámica

1.3 IMPORTANCIA DE LOS ESTUDIOS DE ESTABILIDAD EN LOS ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE POTENCIA

La importancia de los análisis de estabilidad es que forman parte de los estudios de sistemas de potencia, los mismos que permiten controlar la operación correcta de un sistema, de tal forma que se pueda prevenir el colapso total y diseñarlo con los más adecuados dispositivos de protección y de control automático. Estos análisis ayudan al Ingeniero a tener una visión clara y detallada de todos los posibles fenómenos que se pudieren presentar en un sistema de potencia moderno y a preveer lo que le ocurrirá al sistema como resultado de tal o cual cambio durante su operación.

La potencia, el voltaje, la corriente, la frecuencia y el grado de estabilidad, indican la condición de operación del sistema y son llamadas las variables que definen el ESTADO.

Cuando se produce un disturbio, los valores de estas variables cambian, pasando el sistema de un estado estable a otro.

Los cambios producidos por fallas son generalmente

sentidos por relés de protección, los cuales hacen actuar a interruptores de potencia, sin embargo a veces el sistema no reacciona satisfactoriamente después de una falla, produciéndose el colapso total del mismo. Si por el contrario, los valores de las variables luego de una falla no difieren en mucho de los valores que tienen en operación original normal, se tendrá un sistema que ha respondido satisfactoriamente al "shock" causado por la falla.

Por medio de los estudios de sistemas de potencia el Regulator podrá determinar los parámetros adecuados para cada uno de los dispositivos de protección y control para obtener los mejores resultados del sistema operando como un todo o tomando en forma separada a sus partes constitutivas.

1.4 OBJETIVOS Y ALCANCE DE ESTOS ESTUDIOS

Los estudios de estabilidad a ser llevados a cabo en esta Tesis abarcan no solo el período transiente sino también aquel período que le precede y aquel que ocurre después del transiente. Esto se debe a que si bien es cierto que la duración de la condición transiente es incomparablemente pequeña con la que tiene la condición de estado normal; el funcionamiento integral de un sistema eléctrico está

en gran medida determinado por su comportamiento transiente. Un sistema que carezca de estabilidad en el estado transiente tiene muy poco valor práctico, pues lo podemos comparar con un avión que es inestable durante su despegue y aterrizaje, aun cuando funcione de la mejor forma durante el vuelo a velocidad constante.

En el presente estudio de los fenómenos transientes en los sistemas eléctricos se discutirá en primer lugar el pequeño período que dura el proceso transiente, el cual está asociado con cambios en las condiciones electromecánicas del sistema. El estudio de este fenómeno es llevado a cabo no solo por lo que él representa sino porque nos proporciona una ayuda especial para entender los métodos a emplearse para asegurar que un sistema puede resistir el colapso debido a cualquier falla y puede operar en forma estable cuando sea sometido a disturbios pequeños.

Como se ha dicho, es necesario estudiar no solamente la condición transiente, sino también el estado estable normal y el estado en condición de falla, los cuales pueden ser tratados como los estados inicial y final del sistema.

En la actualidad el estudio del fenómeno transiente en sistemas eléctricos de potencia es de una importancia especial debido al incremento en el uso de dispositivos electrónicos de rectificación para control automático y remoto.

La operación de un sistema de potencia bajo control automático consiste en una secuencia continua de efectos transiente, causados por la acción de los dispositivos automáticos y la reacción del sistema a estos cambios. Por tanto, el entendimiento de la naturaleza de un transiente es esencial para poder fijar correctamente la operación de los reguladores automáticos, al igual que su diseño, ajuste y aplicación bajo condiciones normales de operación. Como se podrá notar, la diferencia entre estado transiente y estable tiende a desaparecer bajo estas condiciones, por lo tanto los dispositivos automáticos son elementos evidentemente importantes al determinar el funcionamiento transiente de un sistema.

CAPITULO SEGUNDO

ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DE UN SISTEMA DE POTENCIA

En un estudio de estabilidad se persiguen dos objetivos principales: primero, examinar los efectos relativos al funcionamiento del sistema cuando ocurren cambios en los parámetros de las máquinas y del control, para de esta forma desarrollar representaciones tanto prácticas como adecuadas de los equipos; y segundo, identificar en forma clara la naturaleza del problema de estabilidad del sistema de potencia, para de esta manera hallar las soluciones efectivas y económicas.

Es necesario entonces tener una idea del funcionamiento de los principales componentes de un sistema de potencia, así como de las herramientas matemáticas que emplearemos en el desarrollo de este tema, para poder obtener los resultados propuestos.

Para llevar a efecto los estudios dinámicos de la estabilidad de un sistema de potencia están disponibles programas para computadoras, los cuales presentan

diferencias en lo que se refiere a detalles de representación de las máquinas sincrónicas, los sistemas de excitación, los primo-motores, el sistema de control de velocidad y los sistemas de carga. Sin embargo, aun cuando estos programas fueron desarrollados en forma independiente por diferentes organizaciones, las similitudes en los modelos empleados para representar los elementos de un sistema de potencia son mayores que las diferencias, esto se debe a que los principios básicos para establecer las representaciones para la computadora han sido presentadas tanto en libros como en artículos técnicos por más de cuarenta años.

En la sección 2.1 se presentarán en forma resumida las características principales de los elementos más importantes que forman parte de un sistema eléctrico de potencia, a saber: la máquina sincrónica, el sistema de excitación, el gobernador del turbo-generador, los tipos de carga y las diversas configuraciones que pueden tener una red eléctrica.

La razón de esta descripción, es que se necesitarán conocer las características de funcionamiento de estos elementos para de esta forma poder elaborar los modelos matemáticos de cada uno, los cuales emplearemos en nuestro estudio de estabilidad. Esto se debe a que los análisis de estabilidad los llevaremos a cabo mediante el

uso de una computadora digital lo cual implica que cada elemento físico que compone el sistema eléctrico de potencia deberá ser incluido en el programa para la computadora por medio de expresiones matemáticas que indiquen su funcionamiento.

En la teoría de control automático se presentan modelos matemáticos típicos para sistemas mecánicos y su equivalente sistema eléctrico; son básicamente estos modelos de los que se partirá para tener las expresiones matemáticas que describen el funcionamiento de cada elemento del sistema; estas expresiones son simplificadas (cuando es posible) mediante artificios, hipótesis o transformaciones, para así poder obtener un circuito equivalente. De aquí, pasamos a la representación del circuito por diagramas de bloque, para finalmente obtener el diagrama de flujo como paso previo a la codificación en el lenguaje que se está realizando el programa.

2.1 ELEMENTOS QUE INTERVIENE EN UN ESTUDIO DE ESTABILIDAD

2.1.1 MAQUINA SINCRONICA

Las máquinas síncronas pueden ser generadores o motores, los cuales difieren en lo que a características físicas se refiere. Sin embargo, desde el punto de vista de un estudio de

estabilidad, estaremos interesados solamente en aquellas características como: el voltaje terminal, la corriente de campo, los enlaces de flujo del campo, el ángulo del rotor; las cuales indican el comportamiento de una máquina sincrónica que está conectada a un sistema de potencia.

Para llegar a obtener el modelo matemático de la máquina sincrónica tomando en consideración las expresiones matemáticas que involucran las cantidades antes mencionadas consideraremos una máquina ideal. A esta máquina ideal se la puede describir de varias maneras; para nuestros propósitos la definiremos como:

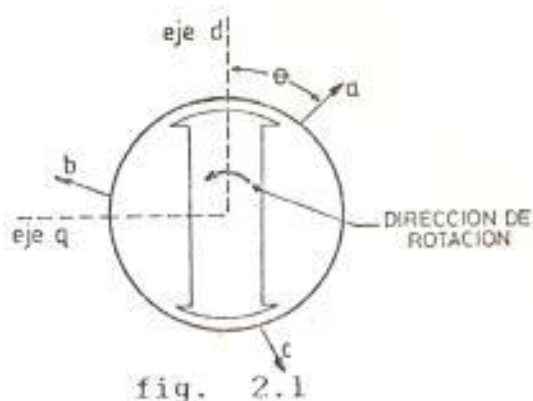
1. Una máquina sin efectos de saturación.
2. Una máquina donde las superficies de su rotor y del estator son de características especiales, y sus devanados eléctricos distribuidos, y en el cual sólo se producen corrientes y voltajes de frecuencia fundamental cuando opera a velocidad sincrónica y en estado estable.

Desde luego que en la práctica las máquinas sincrónicas tienen efectos de saturación, los cuales serán tomados en consideración alterando la

representación de la máquina ideal. La segunda hipótesis es la forma en la cual se espera que funcione la máquina sincrónica en la realidad.

Para representar una máquina sincrónica necesitamos definir ciertas cantidades. La fig. 2.1. muestra un diagrama simplificado de una máquina sincrónica, trifásica, dos polos. En dicha figura se indica la línea central de cada devanado del estator, además se muestra que el rotor tiene dos ejes de simetría, aquel que pasa por la línea central del polo norte y que se lo conoce como eje DIRECTO o eje "d". El otro eje está localizado 90 grados a partir del eje anterior y es llamado eje en CUADRATURA o eje "q". En la fig. 2.1. se ha ubicado al eje en cuadratura 90 grados adelante del eje "d" en la dirección de rotación de la máquina. El ángulo θ es aquel formado por el eje "a" del estator y el eje directo.

Una máquina con más de dos polos puede ser representada por las ecuaciones de una máquina de dos polos siempre que todos los ángulos que en ellas intervengan sean medidos en grados eléctricos en lugar de grados mecánicos.



Maquina sincrónica de dos polos salientes

La forma particular que tiene el rotor de de la fig. 2.1 (la cual ha sido exagerada por motivos de explicación) es la de una máquina de polos salientes. Se puede notar que el entrehierro entre el polo y el estator es menor que el entrehierro 90 grados adelante. Esta construcción es típica de los generadores con turbina hidráulica, de los condensadores sincrónicos y de los motores sincrónicos.

Si el entrehierro es uniforme, la máquina es llamada de rotor cilíndrico, esta construcción es típica de los generadores con turbina de vapor.

Las máquinas de polos salientes tienen rotores laminados (para minimizar las corrientes de Eddy) las máquinas de rotor cilíndrico tienen rotores de acero sólido (en el cual las corrientes de Eddy

pueden circular).

Generalmente, las máquinas de polos salientes tienen un devanado especial cortocircuitado sobre el rotor. Esos devanados pueden tener diversas formas, un arreglo especial se lo muestra a continuación en la fig. 2.2.

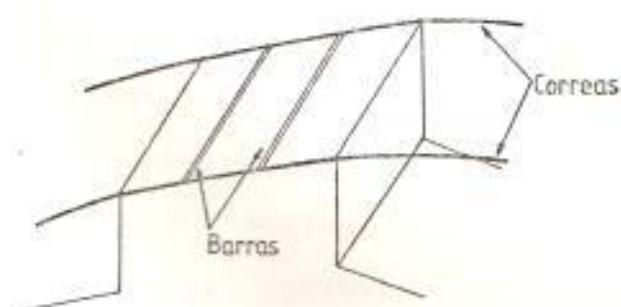


fig. 2.2.

Devanados de amortiguación en máquinas de polos salientes

La fig. 2.2. muestra barras ubicadas en la superficie del polo y cortocircuitadas por medio de dos bandas o correas que van en la periferie del rotor. Las barras y las correas son hechas de material conductor (cobre o aleación de aluminio). Estos devanados de AMORTIGUACION o AMORTIGUADORES.

En el caso de condensadores o motores sincrónicos, estos devanados sirven como devanados de arranque, de la misma forma que los devanados jaula de

ardilla en los motores de inducción.

Se deberá aclarar que una vez que una máquina está operando en sincronismo, por los devanados de amortiguación circulará corriente solo en el caso de producirse una falla en el sistema, la misma que hará que la máquina se aparte de la velocidad sincrónica. En este caso las corrientes que circulan por estos devanados crearán torques que ayudarán a la máquina a mantener su estabilidad; en el caso de que la máquina pierda sincronismo, a través de estos devanados de amortiguación circulará en forma permanente corrientes a frecuencia de deslizamiento.

Los devanados cortocircuitados (de amortiguación) son fácilmente identificables en una máquina de polos salientes, y se podrá escribir un número finito de ecuaciones que describen el efecto de los mismos. Desde el punto de vista del diseñador de máquinas, estas soluciones de todas aquellas ecuaciones que representan a los devanados es importante, ya que a él le interesa la corriente que circula por una barra o por las correas que cierran el circuito. Por el contrario, para un ingeniero que realiza el estudio integral del sistema de potencia, necesita solamente

representar el efecto del devanado de amortiguación en la operación de la máquina buscando siempre minimizar el número de ecuaciones empleadas para el efecto.

Para generadores de polos salientes se ha hallado que el efecto de los devanados de amortiguación sobre el funcionamiento de la máquina puede ser representado mediante dos devanados en cortocircuito equivalentes, el uno ubicado sobre el eje directo y el otro sobre el eje en cuadratura.

Las constantes de estos devanados equivalentes son suministradas por el fabricante, de acuerdo con las definiciones establecidas en Normas o Estándares.

Para las máquinas de polos salientes se tendrán entonces seis devanados por representar, los tres devanados de las fases del estator, el devanado de campo, un devanado de amortiguación de eje directo y uno de eje en cuadratura.

Las corrientes de Eddy que fluyen en el rotor de acero sólido de una máquina de rotor cilíndrico realizan las mismas funciones que las corrientes

de amortiguación, excepto que ellas no pueden ser usadas para el arranque o para cualquier otra condición que conlleve un calentamiento peligroso de la máquina.

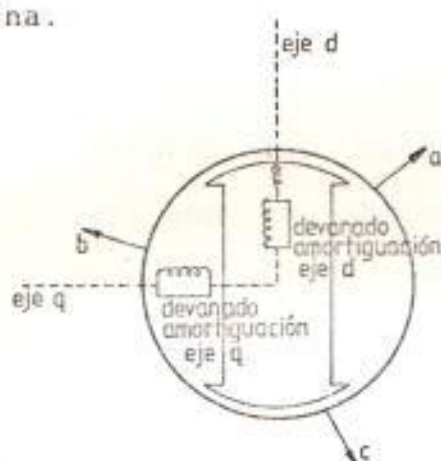


Fig. 2.3.

Devanados necesarios para representar una máquina de polos salientes

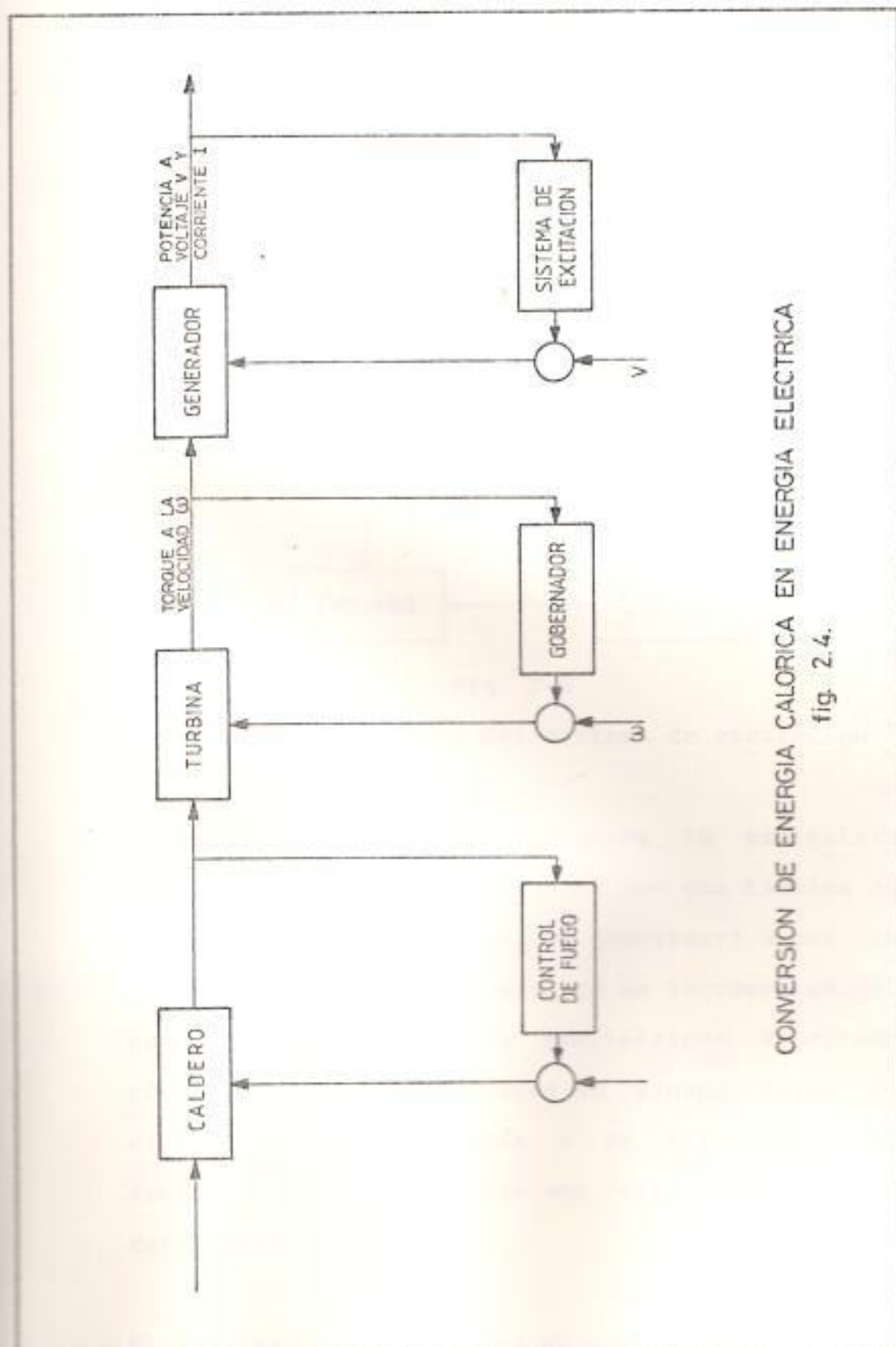
La diferencia básica en esta representación es que ahora hay un número infinito de devanados cortocircuitados y que los caminos que toma la corriente son una función compleja de la corriente y de los efectos de saturación. Los caminos que sigue la corriente en una máquina de rotor cilíndrico se los conoce como "circuitos del hierro" y a las corrientes se las llama "corrientes de hierro". Los Ingenieros que realizan estudios de los sistemas de potencia están interesados solamente en el efecto de estas corrientes de hierro y se halla que usualmente es

necesario identificar solamente un número limitado de circuitos de hierro equivalentes para satisfacer los requerimientos establecidos. De acuerdo a los datos proporcionados por los fabricantes de máquinas sincrónicas se puede establecer que existen tres circuitos de hierro equivalentes: el uno es ubicado sobre el eje directo y dos son centrados sobre el eje en cuadratura.

2.1.2 EXCITACION DE LA MAQUINA SINCRONICA

Asumiendo una unidad de generación libre de pérdidas, lo cual no es una mala hipótesis cuando comparamos las pérdidas totales de la turbina y del generador con la potencia de salida de la máquina; bajo esta hipótesis toda la potencia recibida como vapor deberá abandonar los terminales del generador como potencia eléctrica.

En la fig. 2.4 de la página siguiente, se presenta un diagrama que muestra el cambio de energía calorífica del vapor, en energía eléctrica en los terminales de la máquina. La cantidad de vapor admitida a la turbina es controlada por el gobernador. El sistema de excitación controla la f.e.m. del generador y por tanto tiene incidencia



CONVERSION DE ENERGIA CALORICA EN ENERGIA ELECTRICA

fig. 2.4.

no solamente sobre el voltaje de salida sino también sobre el factor de potencia y la magnitud de la corriente.

A continuación se presenta un diagrama esquemático de los principales elementos que conforman un sistema de excitación.



Fig. 2.5

Diagrama esquemático del sistema de excitación

En muchos de los sistemas actuales, la excitatriz es un generador d.c. manejado por una turbina de vapor (sobre el mismo eje del generador) o por un motor de inducción. Además, se ha incrementado el número de sistemas con excitatrices de estado sólido, los cuales consisten de alguna forma de sistema de rectificación o de tiristores, que reciben alimentación desde una barra a.c. o de una excitatriz-alternador.

El regulador de voltaje es el cerebro del sistema

de excitación, el cual controla la salida de la excitatriz de forma tal que, los cambios en el voltaje generado y en la potencia reactiva se los haga en forma adecuada. En los sistemas primitivos el regulador de voltaje era enteramente manual, así, el operador observaba el voltaje terminal y ajustaba el restato de campo (regulador de voltaje) hasta que las condiciones deseadas volvían a ser obtenidas. En los sistemas modernos, el regulador de voltaje es un controlador que sensa el voltaje de salida del generador (a veces la corriente) e inicia entonces su acción correctiva, cambiando el control de la excitatriz en la dirección deseada. La velocidad de operación de este dispositivo es de gran importancia en los estudios de estabilidad. Debido a la alta inductancia que tiene el devanado de campo del generador, es difícil efectuar variaciones rápidas de la corriente de campo, esto introduce un considerable atraso en la función de control y es uno de los mayores obstáculos a los que se enfrentan los diseñadores de los sistemas de regulación.

El control auxiliar mostrado en la fig. 2.5. puede incluir algunos dispositivos adicionales; por ejemplo, la amortiguación es a veces introducida

para evitar sobredisparos de la excitación. También se podrá emplear un comparador para fijar el límite inferior de la excitación, especialmente cuando se está operando con factor de potencia en adelanto por prevención de inestabilidad debido a un acoplamiento muy débil a través del entrehierro. Otros controles auxiliares son a veces deseables para realimentación de velocidad, frecuencia, aceleración u otro parámetro.

MODELOS TÍPICOS DE SISTEMAS DE EXCITACION

A continuación presentamos cuatro modelos típicos de sistemas de excitación, los cuales han ido apareciendo de acuerdo a como se iba desarrollando la tecnología en el área de los sistemas de control.

SISTEMAS PRIMITIVOS

Estos sistemas pueden ser clasificados en forma general como "de respuesta lenta". Un arreglo característico de un sistema primitivo se lo presenta en la fig. 2.6., el cual consiste de una excitatriz principal que puede tener un control de campo manual o automático.

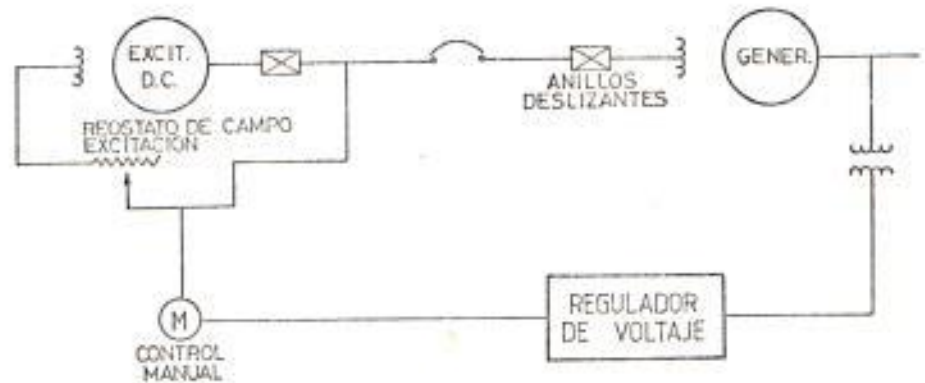


Fig. 2.6.

Sistema primitivo de excitación

El "regulador" detecta el nivel de voltaje e incluye un dispositivo mecánico que sirve para cambiar la resistencia del reóstato de control.

Un dispositivo ampliamente utilizado fue el regulador SILVERSTAT, el cual consiste de una bobina de regulación, la misma que hace actuar o cambiar de posición a un tap a lo largo de una fila de terminales de plata sistemáticamente espaciados que forman el reóstato. Este dispositivo es conectado de acuerdo a como se muestra en la fig. 2.7. Cuando el sistema se halla en operación, un incremento en el voltaje d.c. del rectificador; esto hará que la mayor corriente que fluye por la bobina de regulación opere mecánicamente a un solenoide y sea aumentada la resistencia del campo de la excitatriz. Esto

reducirá a su vez el flujo de campo y el voltaje de la excitación, de lo que se sigue que la corriente de campo del generador se verá entonces disminuida y por último decrecerá el voltaje en los terminales del generador.

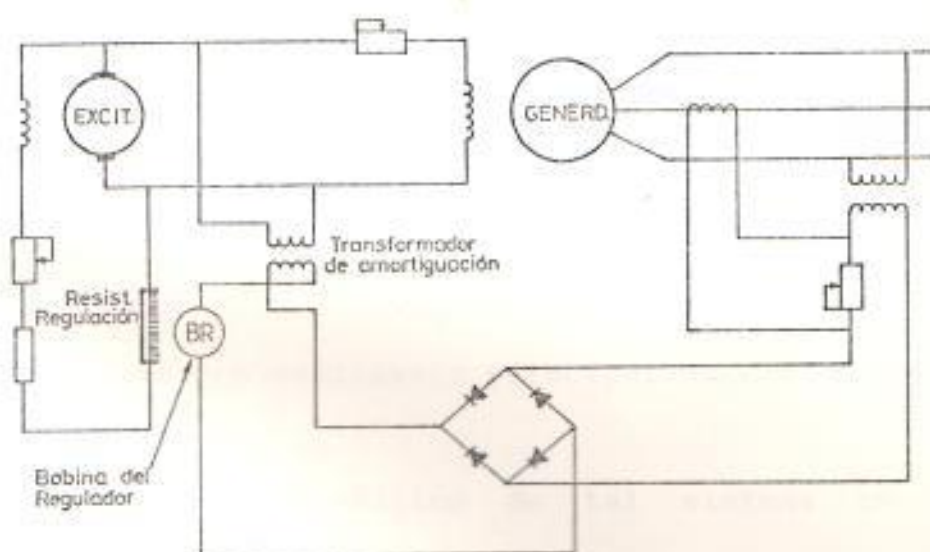


fig. 2.7.

Regulador SILVERSTAT

Dentro de este tipo de sistemas de excitación podemos incluir a un sistema cuya respuesta es más rápida que el antes visto, y que incluye una excitatriz principal y una excitatriz piloto. Aun cuando el control de voltaje es llevado a cabo de la misma forma que para un sistema con excitatriz principal auto-excitada, la respuesta es más rápida por cuanto el control de campo de la excitatriz es independiente del voltaje de salida

de dicha excitatriz.

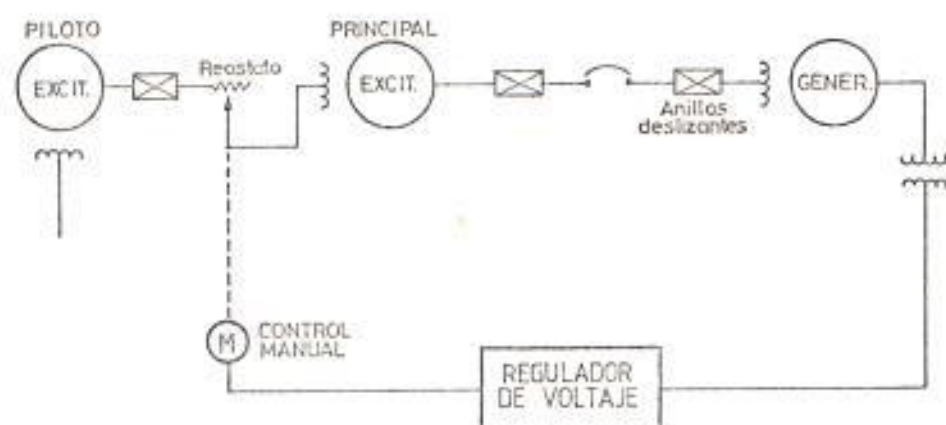


Fig. 2.8.

Sistema con excitatriz principal auto-excitada

Un diagrama esquemático de tal sistema se lo muestra en la fig. 2.8.

Los sistemas antes expuestos son considerados como "obsoletos", por cuanto el control de la excitación es realizado de una forma muy simple. En términos de una tecnología como la actual, los sistemas de control deberán incluir en el camino de realimentación un amplificador, el mismo que deberá tener una acción rápida y magnificar el error de voltaje que aparece y de esta forma lograr que se produzca rápidamente los cambios deseados.

SISTEMAS DE EXCITACION CON EXCITATRIZ CONMUTADOR -
GENERADOR D.C.

Este tipo de sistema de excitación presenta dos alternativas, si bien ambos tienen amplificador en el sistema de realimentación; el uno tiene un amplificador rotativo y el otro un amplificador magnético.

En la fig. 2.9. se muestra un sistema que incorpora un amplificador rotativo o amplidina en el circuito de campo de la excitatriz.

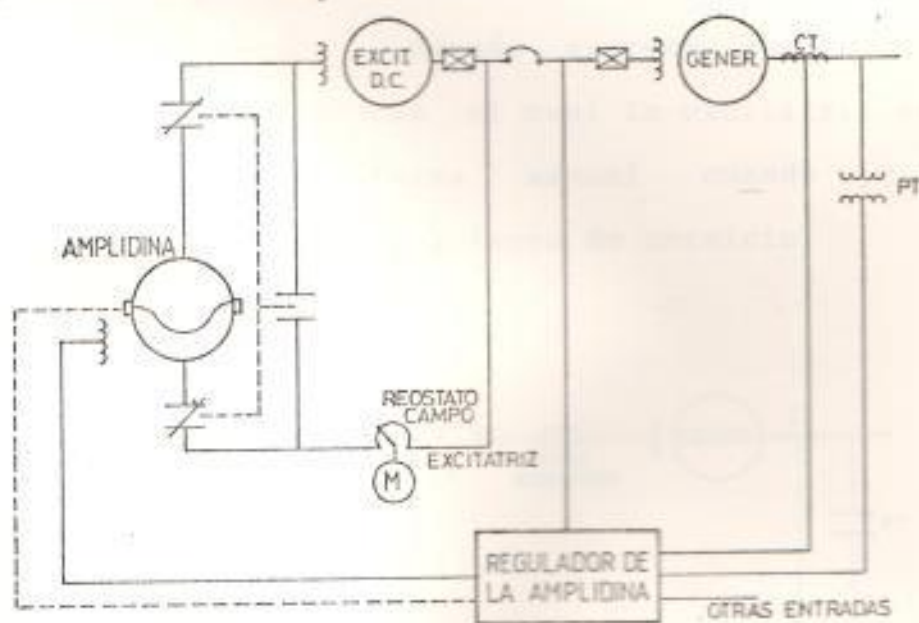


fig. 2.9.

Sistema con amplificador rotativo o amplidina

Este amplificador es utilizado para tener un control sobre el campo de la excitatriz en la

dirección adecuada, teniéndose como resultado final una respuesta mucho más rápida que con una máquina autoexcitada.

Otro sistema con una excitatriz similar es aquel mostrado en la fig. 2.10., donde el amplificador es del tipo magnético estático, cuya fuente de alimentación se deriva de un conjunto motor-generador de magneto permanente. Se deberá notar que la excitatriz en este sistema tiene dos devanados para realizar las correcciones adecuadas, pues uno de ellos es utilizado como booster o refuerzo. Además aparece un tercer devanado de campo con el cual la excitatriz es auto-excitada en forma manual cuando el amplificador se encuentra fuera de servicio.

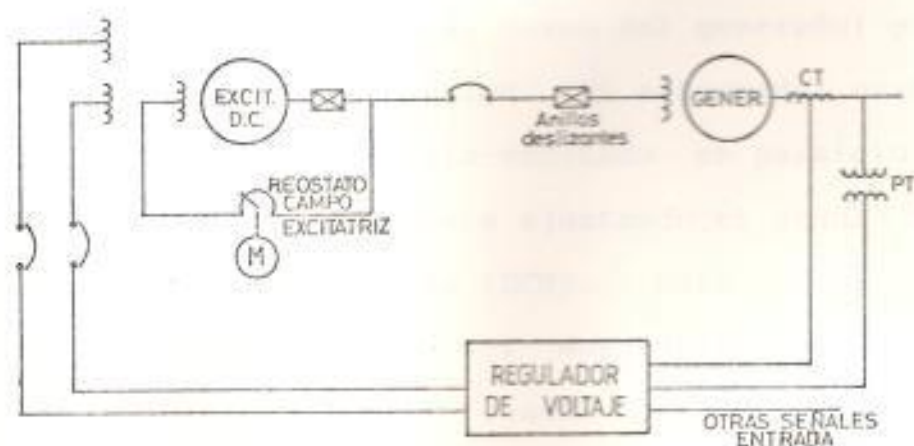


fig. 2.10.

Sistema con amplificador magnético-estático

SISTEMAS DE EXCITACION CON EXCITATRIZ ALTERNADOR
- RECTIFICADOR

Con la llegada de la tecnología del estado sólido y la disponibilidad de rectificadores que manejan elevadas corrientes, se ha desarrollado este tipo de sistema de excitación. En este sistema, la excitatriz es un generador a.c. cuya salida es rectificadora para de esta forma obtener la corriente que circulará por el campo del generador. Generalmente el circuito de control es también de estado sólido y su respuesta es muy rápida. Un ejemplo de un sistema alternador-rectificador es mostrado en la fig. 2.11.

En este sistema la salida del alternador es rectificadora y conectada al campo del generador por medio de anillos deslizantes. El alternador usado como excitatriz es auto-excitado en paralelo y controlado electrónicamente ajustando el ángulo de disparo de los tiristores (SCR). Esto significa que el control puede ser muy rápido ya que el ángulo de disparo se lo ajusta comparándolo de manera instantánea con otras constantes de tiempo involucradas.

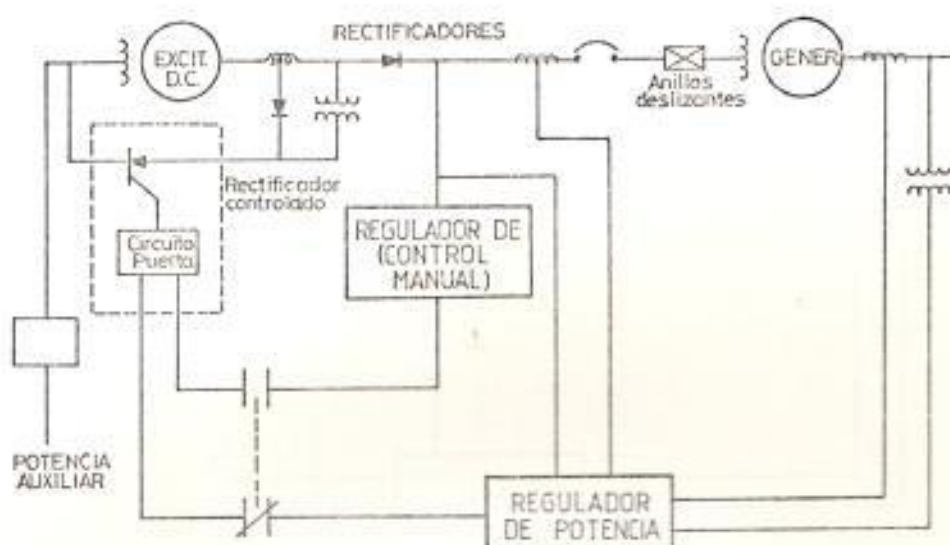


fig. 2.11.

Sistema de excitatriz alternador-rectificador

Otro sistema que emplea una excitatriz alternador-rectificador se lo muestra en la fig. 2.12. Este sistema es especial ya que no necesita anillos deslizantes por cuanto la excitatriz alternador y los diodos rectificadores están rotando sobre el mismo eje.

Este sistema incorpora un generador piloto de magneto permanente (PMG), el cual posee un imán permanente para alimentar al campo estacionario de la excitatriz alternador. Se puede concluir pues que todo el acoplamiento entre los componentes estáticos y rotativos es enteramente electromagnético.

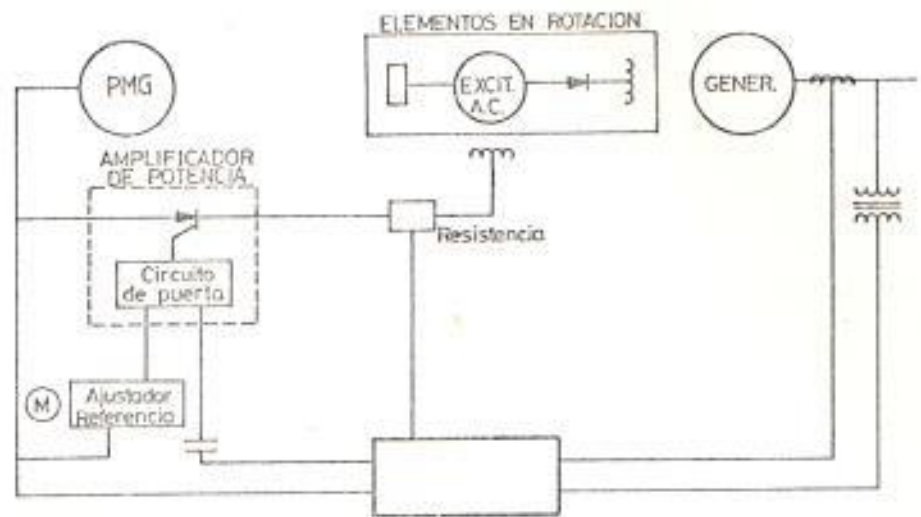


fig. 2.12.

Sistema con generador de magneto permanente

Se deberá notar que es imposible medir cualquier cantidad del campo del generador en forma directa ya que todos los componentes están en movimiento con el rotor y no se utilizan anillos deslizantes.

La respuesta de sistemas de excitación que emplean excitatriz alternador-rectificador puede ser mejorada diseñando al alternador para que opere a frecuencias superiores a la que posee el generador principal.

SISTEMAS DE EXCITACION CON EXCITATRIZ ALTERNADOR - SCR

Otro importante adelanto en el desarrollo de los

sistemas de excitación ha sido el diseño de un sistema que posee alternador-SCR, el cual se muestra a continuación en la fig. 2.13.

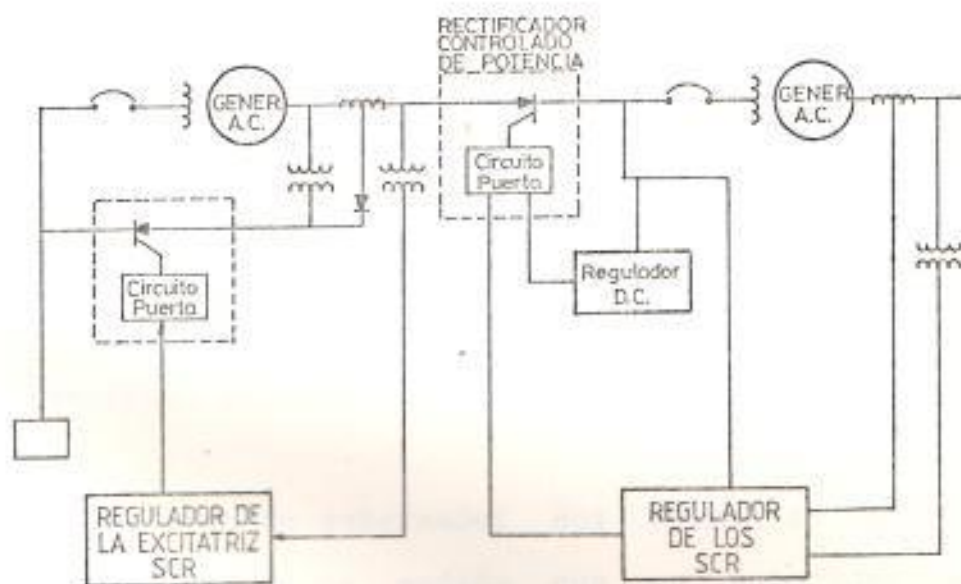


Fig. 2.13.

Sistema con excitatriz alternador - SCR

En este sistema la excitación del generador es alimentada directamente desde un sistema compuesto por SCR, el cual a su vez es alimentado mediante un alternador empleado como excitatriz. De aquí, que solamente es necesario ajustar el ángulo de disparo de los SCR para cambiar el nivel de la excitación, lo cual esencialmente no involucra retardo de tiempo.

2.1.3 GOBERNADOR DEL TURBO - GENERADOR

Se presentará a continuación el mecanismo elemental del gobernador de una turbina de vapor y de una turbina de agua, apuntando las diferencias existentes entre ambos cuando fuere necesario. Un diagrama esquemático de un sistema de gobernador se muestra en la fig. 2.14. El dispositivo sensor a los cambios de velocidad es el gobernador centrífugo de Watt.

En este tipo de gobernador dos pesos se mueven radicalmente y a medida que su velocidad de rotación se incrementa se moverá una leva en el eje central. El movimiento de la leva es transmitido por medio de un mecanismo inferior hacia una válvula de pistón piloto, la cual hará operar el servo-motor.

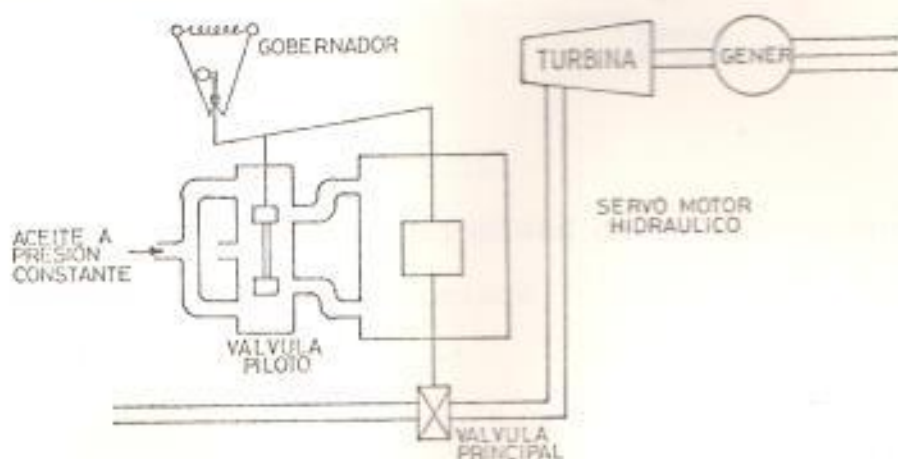


fig. 2.14.

Sistema de gobernador de velocidad

Este mecanismo presenta banda muerta, es decir que, la velocidad deberá cambiar en una cierta cantidad antes de que la válvula principal comience a operar. El tiempo que le toma a la válvula principal del vapor en abrirse es apreciable, de 0,2 a 0,3 seg.; debido al retardo que incorporan la apertura de la válvula piloto y la operación del sistema del servo-motor.

La característica ideal del gobernador de un turbo-alternador de vapor se muestra en la fig. 2.15.

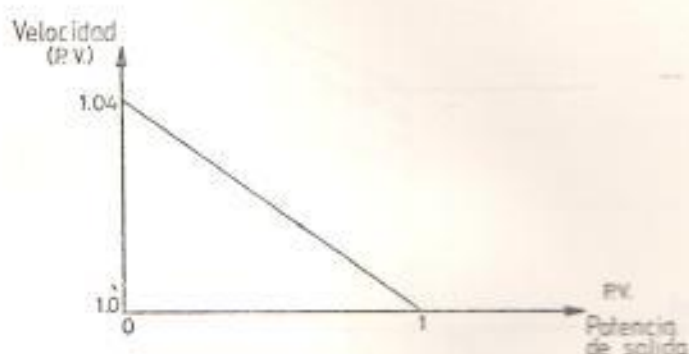


fig. 2.15.

Característica potencia-velocidad de un gobernador de velocidad

Se puede observar que existe una caída del 4% en la velocidad entre el estado sin carga y de plena carga de la turbina. Una cuestión importante en

el sistema del gobernador es el mecanismo por medio del cual la leva del gobernador y por tanto la posición de la válvula principal pueden ser ajustadas en forma separadas, de acuerdo a los cambios de velocidad requeridos. Esto se lo realiza por medio de un cambiador de velocidad o motor veloz como se lo conoce. El efecto de este ajuste de la válvula principal se lo puede notar en la producción de una familia de características paralelas a la mostrada en la fig. 2.15.

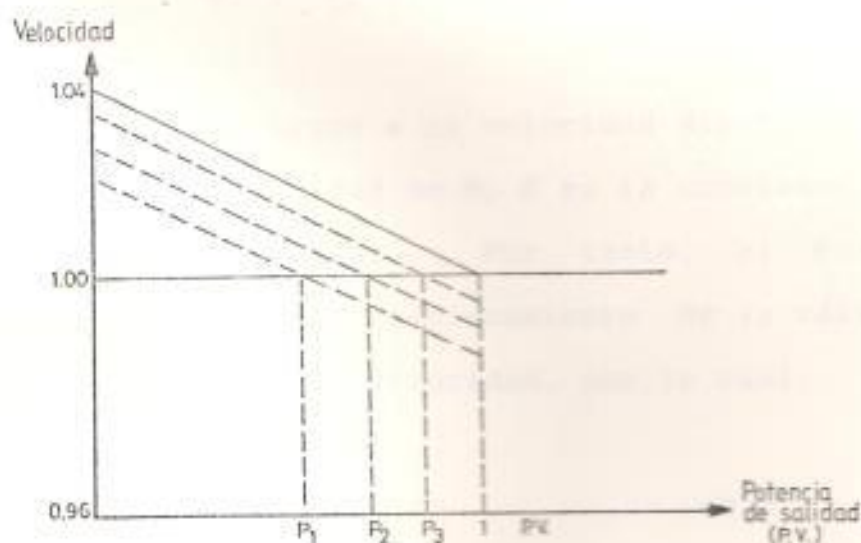


Fig. 2.16

Familia de curvas características de un gobernador

Por tanto, la potencia de salida de un generador a una velocidad determinada puede ser ajustada a otra velocidad, lo cual es de extrema importancia desde el punto de vista económico de operación de

una máquina, puesto que se empleará el vapor o agua requerida por la turbina sin que haya un gasto innecesario de energía.

El torque de la turbina se lo puede considerar aproximadamente proporcional al desplazamiento de la válvula principal, a lo cual llamaremos "d". Además, la expresión que indica el cambio del torque con la velocidad es:

$$T = T_0 (1 - K N) \quad (2.1)$$

donde T_0 es el torque a la velocidad N_0 y T es el torque a la velocidad de N ; K es la constante del sistema del gobernador. Por tanto, el torque depende tanto del desplazamiento de la válvula principal como de la velocidad, por lo cual:

$$T = f(d, N) \quad (2.2)$$

Existe un retardo de tiempo entre el cambio de carga y las nuevas condiciones de operación. Este retardo es debido no solamente al mecanismo del gobernador sino también al hecho de que habrá un nuevo flujo nominal de vapor o de agua para acelerar o desacelerar el rotor y obtener la nueva velocidad.

A continuación en la fig. 2.17. se muestran curvas típicas de un turbo-generador, el cual tiene una disminución repentina en su demanda de energía, lo que hace que el torque de resistencia mecánica sobre el eje de la turbina sea mucho menor. En el caso de un sistema sin gobernador, el retardo de tiempo entre el cambio de carga y el alcance de una nueva velocidad estable, es considerable. En el caso de una máquina regulada, a consecuencia de la banda muerta que tiene el mecanismo del gobernador, la curva tiempo-velocidad empieza a elevarse, entonces la válvula opera y el suministro del fluido a la turbina es debidamente ajustado.

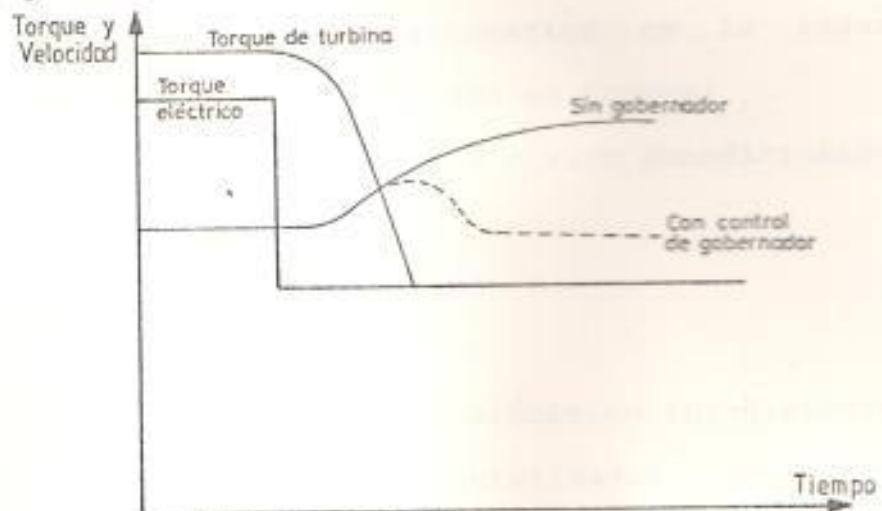


fig. 2.17

Respuesta de un turbo-generador ante una
disminución de la demanda

2.1.4 TIPOS DE CARGA

En forma general, el término CARGA se refiere a un aparato o grupo de aparatos que toman energía de una red eléctrica. En una situación práctica los dispositivos de carga pueden ser desde una lámpara de noche de unos cuantos vatios hasta un motor de inducción de algunos megavatios.

Un sistema de potencia diseñado en forma correcta deberá estar en capacidad de suministrar energía a todas las cargas a él conectadas. Es posible dividir a los dispositivos de carga en las siguientes categorías:

1. Motores (tanto estacionarios en la industria como portátiles utilizados en trenes)
2. Equipos de calefacción o aire acondicionado
3. Equipos electrónicos
4. Elementos de alumbrado

Desde el punto de vista eléctrico los dispositivos de carga estarán caracterizados por algunas diferencias como:

1. Tamaño
2. Simetría (monofásica o trifásica)

3. Carga constante con respecto al:

.Tiempo

.Frecuencia

.Voltaje

4. Utilización (regular o por periodos pequeños de tiempo)

Por ejemplo, las cargas industriales tendrán pocas o talvez ninguna semejanza con las cargas de tipo doméstico, de acuerdo con las categorías arriba señaladas. Un cierto tipo de carga industrial estará formada por sobre el 95% de motores trifásicos y su ciclo de carga es facilmente predecible sobre un periodo de tiempo (de 8:00 a 17:00 Horas). Una carga doméstica, por el contrario, consiste en la mayoría de los casos de artefactos monofásicos operados de manera impredecible por las amas de casa. Por tanto, el problema de poder determinar el funcionamiento o variación de la carga deberá ser resuelto utilizando métodos estadísticos. Se puede decir que mientras las cargas individuales tienen un carácter enteramente impredecible, a nivel de distribución y subtransmisión existen un funcionamiento promedio en lo que se refiere a la variación que tiene la carga. A nivel de distribución siempre las cargas monofásicas son

repartidas en las tres fases. Finalmente, a nivel de transmisión, la situación de variación de la carga es casi siempre predecible.

A continuación se darán características típicas de las cargas de un sistema:

1. Las cargas a nivel de subtransmisión y transmisión son de carácter predecible.
2. Estas cargas varían en forma predecible con el tiempo. Se muestra en la fig. 2.18., una curva típica de carga. Como se puede observar, existirá una variación no solamente a través de las horas de un día, sino también entre semanas, meses, estaciones, etc..

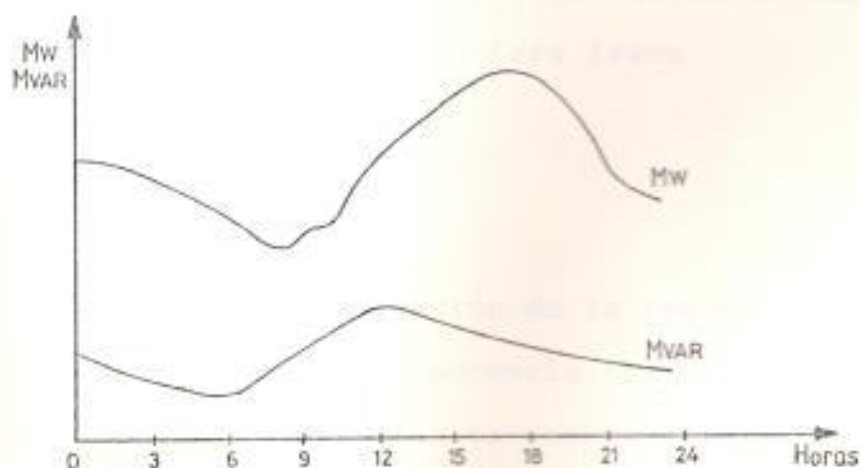


fig. 2.18

Curva característica de carga

Aún cuando la carga varía con el tiempo, estas variaciones son relativamente lentas, especialmente si el sistema está operando en forma estable, en un período de un minuto no se van a producir cambios perceptibles.

4. Las cargas generalmente consumen potencia reactiva. Esto se debe a que los motores, quienes constituyen la mayoría de la carga, son siempre inductivos, con excepción de la máquina sincrónica sobreexcitada.

5. Las cargas son siempre simétricas. En el caso de motores más o menos grandes, la simetría es automática, puesto que ellos son diseñados para una operación trifásica balanceada. En el caso de aparatos monofásicos, estos son distribuidos en forma intencional entre las tres fases.

2.1.5 REDES ELÉCTRICAS

La transmisión y distribución de la energía en un sistema eléctrico de potencia se lo realiza mediante líneas que llevan la energía eléctrica. Estas líneas las constituyen cables hechos de material conductor, los cuales pueden ir en forma aérea o subterránea; el número de líneas empleadas

en el transporte de energía será determinado por el tipo de servicio que se quiere prestar, el cual puede ser monofásico o trifásico.

Hasta un sistema eléctrico de potencia pequeño constituye una red eléctrica compleja, siendo el factor número uno que determina la estructura de la red, el tamaño del sistema.

Sin embargo, no existen reglas generales que normen la estructura que deberán tener todos los sistemas; es posible determinar solo ciertas características que se hallan presentes en todos ellos.

Para el análisis de estabilidad es conveniente distinguir dos tipos de redes: Radial y en forma de malla. Todos los sistemas tienen una cosa en común: operan a varios niveles de voltaje, separados por transformadores, empezando por el nivel más bajo de voltaje distinguiamos los siguientes:

- a. Nivel de distribución (primario y secundario)
- b. Nivel de subtransmisión
- c. Nivel de transmisión

2.2 ANÁLISIS MATEMÁTICO DE LA ESTABILIDAD

A continuación se realizará un análisis de las herramientas matemáticas utilizadas en el tratamiento de problemas de estabilidad; principalmente se presentará la ecuación de oscilación y se desarrollarán métodos que llevan a su solución. Al hablar de estabilidad de un sistema se ha creído conveniente utilizar la medida del ángulo del rotor con respecto a una medida de referencia como una cantidad adecuada para determinar cuan estable es el sistema.

Se emplea la ecuación de oscilación en la determinación de la estabilidad de un sistema eléctrico de potencia, puesto que ella relaciona el movimiento del rotor de la máquina síncrona con el torque resultante (entre el torque eléctrico y el torque mecánico) sobre dicho rotor.

2.2.1 ECUACION DE OSCILACION

La ecuación de oscilación es:

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_s - P_e \quad (2.3)$$

donde:

M : constante de inercia

P_a : potencia acelerante

P_s : potencia mecánica de entrada

P_e : potencia eléctrica de salida

: diferencia entre el ángulo interno de una máquina y aquel tomado como referencia

El ángulo para una máquina conectada a una barra infinita es la diferencia entre el ángulo interior de la máquina y el ángulo del sistema giratorio sincrónico de referencia que en este caso, es la barra infinita. Para un sistema de dos máquinas, son necesarias dos ecuaciones de oscilación, una para cada máquina. El momento angular " M " de una máquina no es constante, puesto que varía con la velocidad angular; sin embargo, puede considerarse constante, ya que la velocidad de la máquina no difiere mucho de la velocidad de sincronismo a menos que se sobrepase el límite de estabilidad. La constante de inercia, es realmente constante por definición, ya que es el momento angular a la velocidad de sincronismo. Para un generador, se considera que la potencia en el árbol " P_s " es constante, esta hipótesis esta justificada, aunque la entrada desde el accionamiento este controlada por la acción de un

regulador, porque estos reguladores no actúan hasta que detectan un cambio de velocidad y, en todo caso, su respuesta no es instantánea.

Para el caso de un generador unido a una barra infinita a través de una red de resistencia cero operando en el punto donde P_0 se produce a δ_0 , como se muestra en la fig. 2.19..

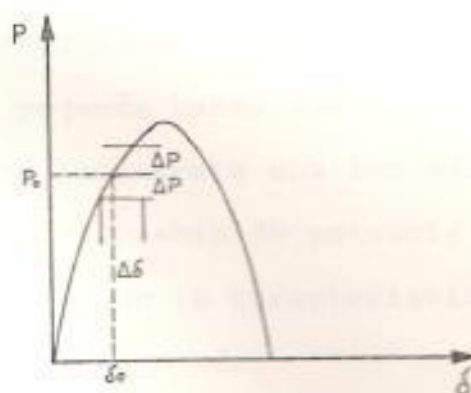


Fig. 2.19.

Característica potencia-ángulo

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = - \Delta P = - \Delta \delta \left(\frac{\partial P}{\partial \delta} \right)_0 \quad (2.4.a)$$

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \left(\frac{\partial P}{\partial \delta} \right)_0 \Delta \delta = 0 \quad (2.4.b)$$

Si se toma en cuenta la amortiguación:

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + Kd \frac{d \Delta \delta}{dt} + \left(\frac{\partial P}{\partial \delta} \right)_0 \Delta \delta = 0 \quad (2.5)$$

donde, Kd es el coeficiente de amortiguación.

Si la excitación de un generador es controlada mediante un regulador automático de voltaje, el cual tiene una pequeña banda muerta, el voltaje de la excitación se incrementa con los aumentos en la carga, por tanto el cambio de potencia puede ser obtenido linealizando la característica P-V en el punto 1 de operación, donde,

$$\Delta P = \left(\frac{\partial P}{\partial E} \right) \Delta E \quad (2.6)$$

la ecuación completa será ahora:

$$M \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + Kd \frac{d \Delta \delta}{dt} + \left(\frac{\partial P}{\partial \delta} \right)_0 \Delta \delta + \left(\frac{\partial P}{\partial E} \right)_0 \Delta E = 0 \quad (2.7)$$

En el análisis anterior los efectos que produce la operación del gobernador han sido ignorados. Luego de transcurrido cierto tiempo la característica de control del gobernador empieza a hacer sentir su influencia sobre la potencia de entrada de la turbina y por tanto sobre la frecuencia.

Consideremos un sistema de gobernador con una constante de tiempo τ_g y una caída de velocidad de N_1 rad/seg. desde la condición de vacío hasta plena carga. Si δ es el cambio en el ángulo del rotor, entonces:

$$\frac{d\delta_1}{dt} - \frac{d\delta_2}{dt} = \frac{d(\delta_1 - \delta_2)}{dt} = \frac{d\delta}{dt} \quad (2.8)$$

donde $d\delta/dt$ es el cambio de velocidad debido a ΔP . El gobernador causa que la entrada de vapor a la turbina cambie con el tiempo de acuerdo a la desviación de velocidad, es decir:

$$\frac{d\Delta P}{dt} = \frac{P_1}{N_1 \tau_g} \frac{d\delta}{dt} \frac{1}{\omega} \quad (2.9)$$

τ_g varía entre 0.5 y 10 segundos.

Además, el movimiento de la válvula piloto influenciado por la potencia, por tanto:

$$\frac{d\Delta P}{dt} = \frac{P_s}{N_s \tau_g} \frac{d\delta}{dt} - \frac{1}{\omega} \frac{\Delta P}{\tau_g} \quad (2.10)$$

$$\tau_g \frac{d\Delta P}{dt} + \Delta P = \frac{P_s}{N_s} \frac{d\delta}{dt} - \frac{1}{\omega} \quad (2.11)$$

para una máquina unida a una barra infinita.

$dP/d\delta$ = coeficiente asociado con la potencia sincronizante

$$dP/d\delta = K_s$$

y,

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} + K_s \delta + \Delta P = 0 \quad (2.12)$$

de lo cual:

$$\frac{d \Delta P}{dt} = -M \frac{d^2 \delta}{dt^2} - K_S \frac{d \delta}{dt} \quad (2.13)$$

$$\Delta P = -K_S \delta - M \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (2.14)$$

combinando las tres últimas ecuaciones, obtendremos:

$$\frac{d^3 \delta}{dt^3} + \frac{d^2 \delta}{dt^2} \left[1 + \frac{K_S}{M} \right] + \frac{d \delta}{dt} \left[\frac{P_s}{\omega N} + \frac{K_S}{M} \right] + \delta \frac{K_S}{M} = 0 \quad (2.15)$$

Cuando no se considera la acción del gobernador:

$T_S \rightarrow \infty$ y la última ecuación tiende a:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} + \frac{K_S}{M} \delta = 0 \quad (2.16)$$

que es la ecuación original de oscilación.

2.2.2 MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE LA ECUACION DE OSCILACION

La ecuación de oscilación de una máquina con respecto a una barra infinita:

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_s - P_{\max} \text{ Sen} \quad (2.17)$$

En un sistema de varias máquinas y, por tanto, de varias ecuaciones de oscilación, es casi imposible hallar la solución formal de la ecuación. Incluso en el caso sencillo de una sola máquina y una barra infinita, despreciando la resistencia, solo es posible la solución formal de la ecuación anterior, si $P_s = 0$ y exige el empleo de integrales elípticas. La solución de los valores de δ para distintos tiempos, gráficamente, suele representarse δ en función de "t". La curva obtenida se llama CURVA DE OSCILACION. Si la curva de oscilación indica que el ángulo δ empieza a disminuir después de pasar por un máximo, se supone, normalmente, que el sistema no perderá la estabilidad y que las oscilaciones de δ alrededor del punto de equilibrio se harán cada vez más pequeñas, hasta desaparecer.

En la determinación de la curva de oscilación y por tanto en la solución de la ecuación de oscilación pueden emplearse dos procedimientos, los mismos que dependen de la naturaleza del problema. Así, en el caso de un sistema en el que una máquina oscila, respecto a una barra infinita, no es necesario representar y estudiar las curvas de oscilación para determinar si el ángulo de par de la máquina aumenta indefinidamente u oscila alrededor de una posición de equilibrio. El principio por el que se determina la estabilidad en condiciones de régimen transiente, sin resolver la ecuación de oscilación, es el llamado criterio de la igualdad de áreas. Aunque no es aplicable a sistemas de varias máquinas, este método ayuda a comprender en que forma influyen ciertos factores en la estabilidad en régimen transitorio de un sistema cualquiera.

El criterio de igualdad de áreas es muy utilizado para entender un sistema de dos máquinas, pero para hallar el tiempo de corte crítico, aquel en el cual podrán operar las protecciones sin que el sistema pierda estabilidad, debemos encontrar como función de "t". Para grandes sistemas dependemos de la computadora, que determina

contra "t" para todas las máquinas en las cuales estamos interesados; y δ puede dibujarse contra "t" para una máquina a fin de obtener la curva de oscilación de esa máquina. El ángulo δ se calcula como función del tiempo sobre un período lo suficientemente largo para determinar si δ se incrementa sin límite o logra un máximo y comienza a disminuir. Aunque el último resultado generalmente indica estabilidad, en un sistema real donde un cierto número de variables se tienen en cuenta puede ser necesario dibujar contra "t" sobre un intervalo suficientemente largo para asegurar que no se incremente otra vez.

Existe un cierto número de métodos para la resolución numérica de las ecuaciones diferenciales de segundo orden por medio de cálculos paso a paso, para incrementos pequeños de la variable independiente. Los métodos más perfeccionados son solamente practicables cuando se dispone de una computadora digital. Existen programas extremadamente sofisticados para determinar la estabilidad transiente de sistemas grandes de potencia.

Los sistemas de potencia están formados por un grupo de elementos electromecánicos

interconectados, cuyos movimientos pueden ser representados por ecuaciones diferenciales. Cuando se producen grandes disturbios en el sistema, dichas ecuaciones son no lineales, en cambio cuando ocurren cambios pequeños, ellas pueden ser linealizadas con una pérdida pequeña de exactitud. Las ecuaciones diferenciales que determinan la ecuación característica del sistema tienen una solución de la forma:

$$d = K_1 e^{\alpha_1 t} + K_2 e^{\alpha_2 t} + \dots + K_n e^{\alpha_n t} \quad (2.18)$$

donde K_1, K_2, K_n son constantes de integración y $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_n$ son las raíces de la ecuación característica. Si cualquiera de las raíces tiene término real positivo entonces ó se incrementa en forma continua y la condición original no podrá ser reestablecida. El criterio para la estabilidad será por tanto, que todas las partes reales de las raíces de la ecuación característica sean NEGATIVAS; partes imaginarias indicarán la presencia de oscilación. A continuación se mostrarán los dos tipos de movimiento.

La determinación de las raíces es a menudo difícil y tediosa por lo cual se han desarrollado métodos indirectos para predecir la estabilidad, por

ejemplo, el criterio de Routh-Hurwitz es empleado para predecir la estabilidad sin tener que resolver la ecuación de oscilación. En estos métodos podremos incluir la característica de control asociada con los gobernadores y los reguladores automáticos de voltaje, los cuales son generalmente incorporados en el tratamiento general del problema.

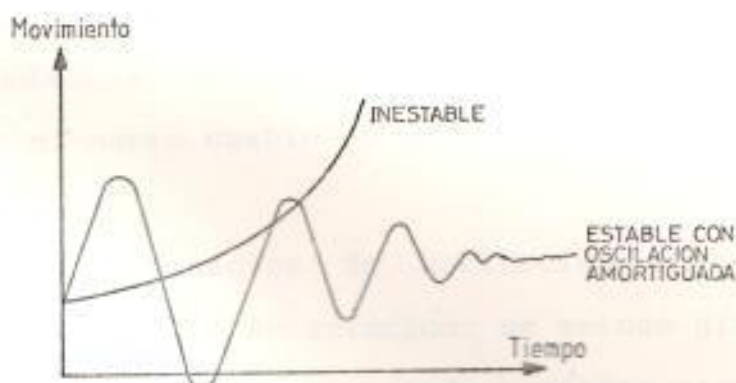


fig. 2.20.

Movimientos típicos de un sistema

Cuando se emplea una computadora, ésta utiliza un procedimiento paso a paso para calcular el cambio en la posición angular de cada máquina sobre intervalos cuya duración se especifica cuando se hacen entrar los datos. El programa de carga suministra los valores iniciales para los cálculos, los que comienzan con una perturbación debido a una falla o interrupción. El computador

determina el voltaje interno de cada máquina y, así, el cambio en δ para cada máquina durante intervalos sucesivos por métodos numéricos complejos y más exactos. Cuando los nuevos ángulos de todas las máquinas se determinan al final de un intervalo, el computador emplea el dato del programa de carga para resolver la red y encontrar la potencia eléctrica "Pe" para cada máquina. El valor "Pe" sustraído de "Ps" es la nueva potencia acelerante de la máquina para calcular el nuevo cambio de δ .

Resumiendo, la ecuación de oscilación tiene en general dos métodos de solución: un método gráfico y un método numérico. El método numérico resuelve la ecuación de oscilación mediante algún tipo de técnica; en nuestro trabajo utilizamos el método de Runge-Kutta para resolver la ecuación diferencial.

METODO DE RUNGE - KUTTA

Siendo la ecuación de oscilación una ecuación diferencial ordinaria o de primer orden, a continuación vamos a considerar una técnica de solución de dichas ecuaciones, a fin de aplicarla posteriormente a nuestro estudio de estabilidad de

un sistema de potencia; ya que habrán ecuaciones diferenciales ordinarias en los modelos matemáticos que representan a los diversos elementos que forman el sistema eléctrico de potencia.

El método a ser empleado en esta tesis es el de Runge-Kutta, el cual emplea una fórmula de recurrencia de la forma:

$$y_{i+1} = y_i + a_1 k_1 + a_2 k_2 + a_3 k_3 + \dots + a_n k_n \quad (2.19)$$

para calcular valores sucesivos de la variable dependiente "y", de la ecuación diferencial

$$\frac{dy}{dx} = y' = f(x, y) \quad (2.20)$$

en donde:

$$\begin{aligned} k_1 &= (\Delta x) f(x_i, y_i) \\ k_2 &= (\Delta x) f(x_i + p_1 \Delta x, y_i + q_{11} k_1) \\ k_3 &= (\Delta x) f(x_i + p_2 \Delta x, y_i + q_{21} k_1 + q_{22} k_2) \\ &\dots \\ k_n &= (\Delta x) f(x_i + p_{n-1} \Delta x, y_i + q_{n-1,1} k_1 + q_{n-1,2} k_2 + \dots + q_{n-1,n-1} k_{n-1}) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Las variables a , p , q , deben adoptar valores tales que la ecuación (2.26) suministre con precisión valores sucesivos de y . Como se mostrará posteriormente, estos valores se determinarán haciendo la ecuación (2.26) equivalente a cierto número especificado de términos de un desarrollo en serie de Taylor de " y " con respecto a " x ".

Los métodos de Runge-Kutta empiezan por sí mismos, y teóricamente es posible desarrollar un método que tenga cualquier grado deseado de precisión. Estos fueron de los primeros que se emplearon en la solución numérica de ecuaciones diferenciales, y todavía se utilizan con bastante frecuencia. Como ocurre con cualquier método, poseen ciertas ventajas y desventajas que se deben balancear al considerar su adaptabilidad a una aplicación particular. La ventaja principal de los métodos de Runge-Kutta es que empiezan por sí mismos y que resultan fáciles de programar, y una desventaja es el requisito de que la función $f(x,y)$ se debe evaluar para varios valores ligeramente diferentes de x y y en cada paso de la solución (en cada incremento de x en Δx). Esta determinación repetitiva de $f(x,y)$ produce generalmente un método menos eficiente en lo que toca a tiempo de computación, que otros métodos de precisión

comparable, en que los valores previamente determinados de la variable dependiente se utilizan en pasos sucesivos. Otra desventaja es que resulta más difícil estimar el error en cada paso para las soluciones de orden superior de Runge-Kutta que para las soluciones obtenidas por otros procedimientos utilizados comúnmente.

La ecuación de Runge-Kutta de segundo orden es:

$$y_{i+1} = y_i + a_1 k_1 + a_2 k_2 \quad (2.22)$$

en donde:

$$k_1 = (\Delta x) f(x_i, y_i)$$

$$k_2 = (\Delta x) f(x_i + p, \Delta x, y_i + q_{11} k_1)$$

(2.23)

Nuestro problema consiste en determinar valores para a_1 , a_2 , p , y q_{11} , de manera que la ecuación (2.22) suministre un valor preciso de y_{i+1} . Una interpretación gráfica de las funciones k se ilustra en la fig. 2.21.

El área sombreada con trazos representa k_1 , y el área sombreada con puntos, k_2 . Para el método de segundo orden que se está considerando, la ecuación (2.19) se puede escribir en la forma:

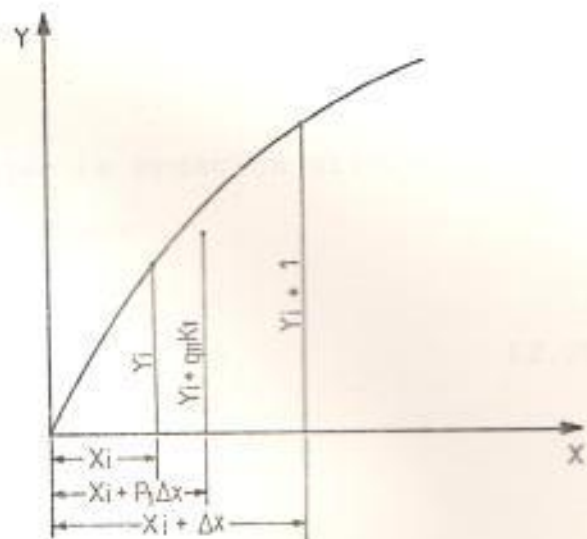
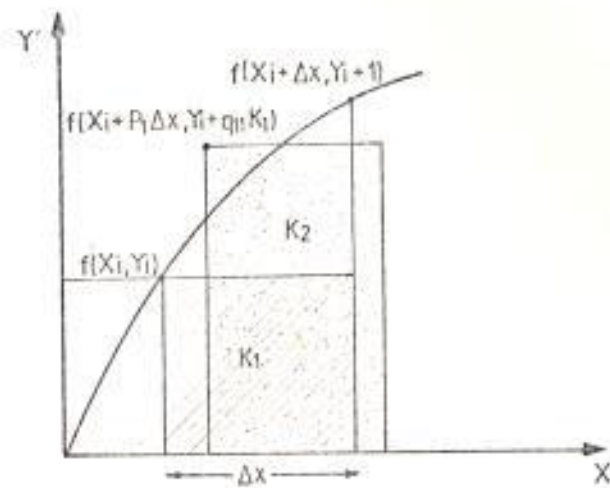


Fig. 2.21

Interpretación gráfica de las funciones k

$y_{i+1} = y_i + a_1$ (área sombreada con trazos)
 $+ a_2$ (área sombreada con puntos)

Debe ser evidente que el tamaño del área sombreada que representa k_2 depende de los valores determinandos para p , y q .

Determinaremos valores para a_1 , a_2 , p_1 , y q_1 , haciendo la ecuación (2.22) equivalente a un desarrollo en serie truncada de Taylor de y con respecto a x_i . Como primer paso desarrollaremos y_{i+1} con respecto a x_i . Obtenemos:

$$y_{i+1} = y_i + (\Delta X) y'_i + \frac{(\Delta X)^2}{2!} y''_i + \dots (2.24)$$

Recordando que la ecuación diferencial dada es $y' = f(x, y)$, escribimos:

$$y'_i = f(x_i, y_i) \quad (2.25)$$

Por tanto:

$$y''_i = \frac{\partial f}{\partial x}(x_i, y_i) + \frac{\partial f}{\partial y}(x_i, y_i) [f(x_i, y_i)] \quad (2.26)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.25) y (2.26) en la ecuación (2.24) obtenemos el desarrollo de la forma siguiente:

$$y_{i+1} = y_i + (\Delta x) f(x_i, y_i) + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \left\{ \begin{array}{l} f \\ x \end{array} \right.$$

$$(x_i, y_i) + \left[\frac{\partial f}{\partial y} (x_i, y_i) \right] \left[f(x, y) \right] \left. \right\} +$$

$$\frac{(\Delta x)^3}{3!} \dots \quad (2.27)$$

Observando las ecuaciones (2.22), (2.23) y (2.27) vemos que k se debe expresar en función de $f(x_i, y_i)$, $\partial f / \partial x (x_i, y_i)$ y $\partial f / \partial y (x_i, y_i)$ si las ecuaciones (2.22) y (2.27) van a contener términos similares. Esto se puede lograr desarrollando k_2 en una serie de Taylor para funciones de dos variables con respecto a x_i y y_i . Utilizando los tres primeros términos de la serie de Taylor y observando que $h = p \cdot \Delta x$ y $j = q \cdot \Delta x$, podemos escribir:

$$k_2 = \Delta x \left\{ f(x_i, y_i) + p \cdot \Delta x \left[\frac{\partial f}{\partial x} (x_i, y_i) \right] \right.$$

que contienen cuatro incógnitas. Asignando arbitrariamente un valor a una de las incógnitas y resolviendo el sistema para determinar las otras tres, podemos obtener tantos conjuntos diferentes de valores y a la vez, tantos conjuntos diferentes de ecuaciones (2.22) y (2.23) como se desee.

Una solución que se obtenga utilizando la ecuación (2.22) en una integración paso por paso, tendrá un error por truncamiento en cada paso del orden de (x) , ya que en este desarrollo se despreciaron los términos que contienen (x) y potencias de mayor orden de x . Entonces este se conoce como un método de Runge-Kutta de segundo orden.

Si se define un método particular de segundo orden haciendo $a =$, en la ecuación (2.30) se tendrá:

$$\begin{aligned} a &= - \\ p &= 1 \\ q &= 1 \end{aligned} \quad (2.40a)$$

Las ecuaciones (2.22) y (2.23) dan entonces:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{2} (k_1 + k_2) \quad (2.31)$$

$$k_1 = (\Delta x) f(x_i, y_i)$$

$$k_2 = (\Delta x) f(x_i + \Delta x, y_i + k_1)$$

Como el método de Runge-Kutta de segundo orden tiene un orden de precisión modesto, en nuestro trabajo consideraremos el método de Runge-Kutta de cuarto orden, cuyo desarrollo aumenta considerablemente en complejidad pero al mismo tiempo se incrementa la precisión. Este método resulta de hacer $n = 4$ en la ecuación (2.19), igualar términos hasta los que contienen (x) y seleccionar un conjunto particular de dos parámetros arbitrarios, se lo expresa de la forma siguiente:

$$y_{i+1} = y_i + 1/6 (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2.32)$$

$$k_1 = (\Delta x) f(x_i, y_i)$$

$$k_2 = (\Delta x) f\left(x_i + \frac{\Delta x}{2}, y_i + \frac{k_1}{2}\right)$$

$$k_3 = (\Delta x) f\left(x_i + \frac{\Delta x}{2}, y_i + \frac{k_2}{2}\right)$$

$$k_4 = (\Delta x) f(x_i + \Delta x, y_i + k_3)$$

En este método el error por paso es del orden de $(\Delta x)^5$.

2.2.3 INTERPRETACION DE RESULTADOS

Al implementar un programa de computación para hallar la solución de la ecuación de oscilación, podremos además considerar otros parámetros como son: la acción del campo de la excitación y la acción del gobernador de velocidad.

La salida impresa del computador nos mostrará los resultados en forma gráfica sobre un plano ángulo vs. tiempo, pudiéndose fácilmente interpretar si el sistema eléctrico de potencia se mantiene en estado estable o tiende a volverse inestable.

CAPITULO TERCERO

MODELO DE UNA MAQUINA SINCRONICA NO REGULADA PARA EL ANALISIS DE LA ESTABILIDAD

Al realizarse la descripción general de una máquina sincrónica, y su relación con el análisis de estabilidad, inicialmente se establecieron representaciones de las máquinas sincrónicas empleando las herramientas matemáticas y del área de computación de las que disponía, cuya exactitud fuera lo suficientemente apropiada para analizar los problemas referentes al funcionamiento de la máquina. Algunos de los problemas del análisis transiente de estabilidad pueden ser analizados representando solamente dos máquinas; en este caso es posible utilizar representaciones relativamente complejas de las máquinas. En los análisis de estabilidad que son necesarios representar el funcionamiento de un mayor número de máquinas interconectadas, es esencial hallar representaciones simplificadas para todas las máquinas. En base a lo anterior, se han realizado un sinnúmero de investigaciones a partir de las cuales se han obtenido

los criterios a ser empleados en los métodos de análisis de la estabilidad de un sistema de potencia, según el punto de vista que se quiera analizar.

Una de las conclusiones obtenidas de estos estudios indica que la interacción entre la máquina sincrónica y su sistema de excitación afecta en forma directa las simplificaciones que pueden hacerse en la representación de la máquina. Basándose en los sistemas de excitación primitivos se desarrolló un modelo "CLÁSICO" de la máquina sincrónica. Sin embargo, a través de los años se han desarrollado sistemas de excitación cuya naturaleza y características han cambiado, al igual que las máquinas sincrónicas y los sistemas de potencia a los que ellas se hallan conectadas; estas alteraciones se han producido por presiones tanto técnicas como económicas. Como resultado se tiene que la representación clásica de la máquina sincrónica ya no es adecuada para todos los casos de análisis de estabilidad que se presentaren y por tanto, se deberá seleccionar la representación más adecuada, de acuerdo a la exactitud requerida y a los datos disponibles del problema que se tiene.

Por esta razón actualmente se tienen algunos modelos para representar a la máquina sincrónica. A lo largo de este capítulo se desarrollará inicialmente la teoría matemática en lo que se sustenta todos los modelos y a

continuación se presentarán los cuatro modelos de la máquina sincrónica que emplea el programa para el estudio de la estabilidad de un sistema eléctrico de potencia.

3.1 ANALISIS TEORICO DE LA MAQUINA SINCRONICA

A continuación se presentará la teoría matemática utilizada en el desarrollo del modelo que representa a la máquina sincrónica; en este desarrollo se introducirá una transformación que sirve para convertir las ecuaciones diferenciales que representan el funcionamiento de la máquina sincrónica, en ecuaciones algebraicas; esta es la transformación de Park.

TEORIA ELECTROMAGNETICA

La siguiente teoría matemática es derivada partiendo del punto fundamental de que la máquina consiste de algunos circuitos inductivos acoplados, las inductancias propias y mutuas, las cuales varían periódicamente con la posición angular del rotor. Se considerará para el análisis una máquina sincrónica de polos salientes sin devanado amortiguador. Las pérdidas del hierro y la saturación serán despreciadas. De esta manera, la máquina tiene cuatro devanados: el devanado de campo y tres

devanados de armadura.

El voltaje terminal instantaneo de uno de estos devanados puede ser escrito en la forma:

$$v = r i + \frac{d\psi}{dt} \quad (3.1)$$

donde r es la resistencia del devanado, i es la corriente y ψ es el enlace de flujo del devanado, el cual depende de la inductancia propia del devanado, de la inductancia mutua entre este y otro devanado y de la corriente en todos los devanados acoplados, asi:

$$\psi = \sum L_i i \quad (3.2)$$

Denotando a los devanados de la armadura por los subindices a , b , c y el devanado de campo por f , tendremos:

$$v_a = r i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \quad (3.3.a)$$

$$d\psi_b$$

$$V_b = r \dot{i}_b + \frac{d\psi_b}{dt} \quad (3.3.b)$$

$$V_c = r \dot{i}_c + \frac{d\psi_c}{dt} \quad (3.3.c)$$

$$V_f = r_f \dot{i}_f + \frac{d\psi_f}{dt} \quad (3.3.d)$$

donde:

$$\psi_a = L_{aa} \dot{i}_a + L_{ab} \dot{i}_b + L_{ac} \dot{i}_c + L_{af} \dot{i}_f \quad (3.4.a)$$

$$\psi_b = L_{ba} \dot{i}_a + L_{bb} \dot{i}_b + L_{bc} \dot{i}_c + L_{bf} \dot{i}_f \quad (3.4.b)$$

$$\psi_c = L_{ca} \dot{i}_a + L_{cb} \dot{i}_b + L_{cc} \dot{i}_c + L_{cf} \dot{i}_f \quad (3.4.c)$$

$$\psi_f = L_{fa} \dot{i}_a + L_{fb} \dot{i}_b + L_{fc} \dot{i}_c + L_{ff} \dot{i}_f \quad (3.4.d)$$

r : representa la resistencia de cada fase de la armadura, y

r_f : representa la resistencia de campo

Como muchas de las inductancias varían con el tiempo, es difícil resolver las ecuaciones diferenciales

anteriores con el objeto de encontrar las corrientes para un voltaje dado sin conocer la función del tiempo. Una forma de conocer la variación con respecto al tiempo es expresándolas en términos de la posición del rotor θ , la cual cambia con el tiempo.

$$\theta = \omega t + \theta_0 \quad (3.5)$$

donde ω es la velocidad angular, la cual para nuestros propósitos puede ser considerada constante, y θ_0 es el valor inicial de θ .

INDUCTANCIAS DE LOS DEVANADOS COMO FUNCIONES DE LA POSICION DEL ROTOR

La convención adoptada para las direcciones positivas de las corrientes y ángulo será tomada de acuerdo a la figura siguiente. (fig. 3.1)

Los ejes magnéticos de las 3 fases de la armadura están apartados 120 grados eléctricos. Los ejes directo y cuadratura del campo están apartados 90 grados eléctricos entre si, con el eje en cuadratura en adelante. La posición del rotor está dada por el ángulo θ mediante el cual el eje directo del campo está apartado del eje de la fase "a" de la armadura.

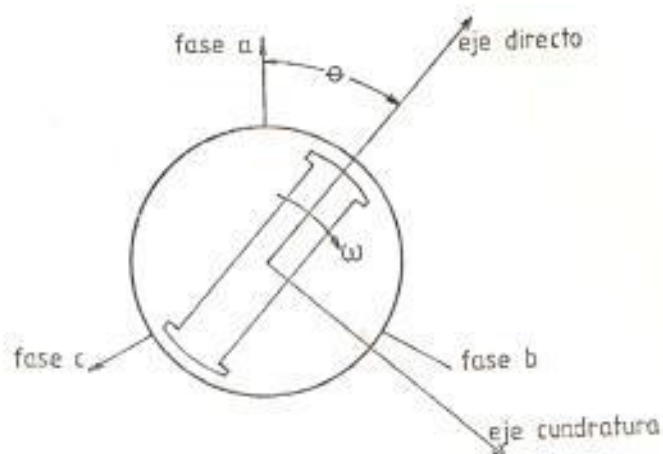


fig. 3.1

Referencias asumidas para corrientes, voltajes y $i_{m\alpha}$.

La inductancia propia de cada fase de la armadura es siempre positiva pero varía con la posición del rotor, será de un valor elevado cuando el eje directo del campo coincida con el eje de la fase de la armadura y será pequeño cuando el eje en cuadratura coincida con él. La variación de la inductancia propia entre estas dos posiciones puede ser calculada por medio de valores dados por el fabricante o por medio de valores medidos; por los dos métodos se encuentra que dicha variación es prácticamente sinusoidal, tal afirmación se la presenta en la fig. 3.2.

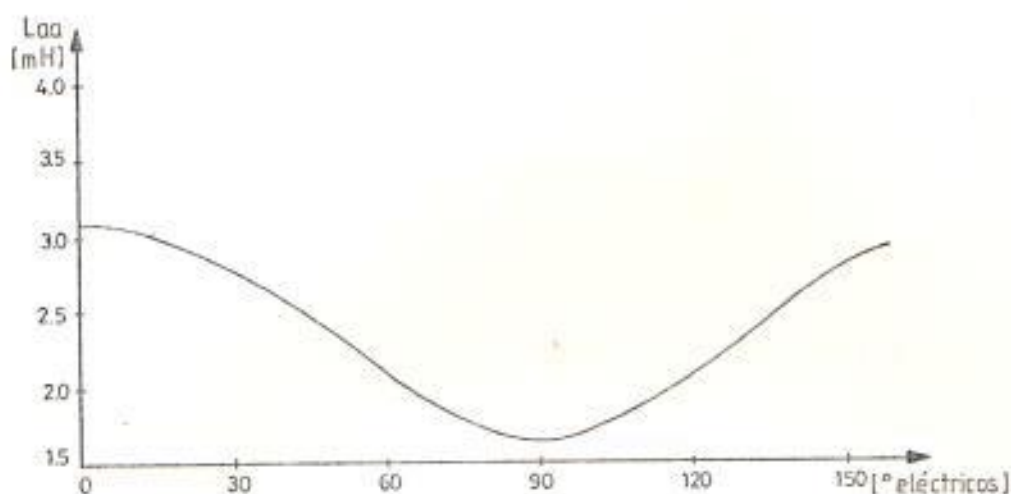


Fig. 3.2

Variación de la inductancia propia del devanado de la fase a con la posición del campo.

La variación de la inductancia propia de la fase a puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$L_{aa} = L_s + L_m \cos 2\theta \quad (3.6)$$

L_s : inductancia medida del devando como si se tratara de una bobina aislada.

L_m : variación de la inductancia propia del devanado debido a la posición del rotor.

Se cumple que $L_s > L_m$. Esta inductancia tiene un valor máximo a $\theta = 0^\circ$ y 180° y un valor mínimo a $\theta = 90^\circ$ y 270° . Para la fase b la variación de la inductancia propia es similar excepto que el valor máximo ocurre donde el eje directo coincide con el

eje de la fase b, esto es, a $\theta = 120^\circ$ o -60° . De aquí, la ecuación propia para la fase b es obtenida reemplazando θ en la ecuación anterior por $(\theta - 120)$:

$$L_{bb} = L_s + L_m \cos 2(\theta - 120) \quad (3.7.a)$$

$$L_{bb} = L_s + L_m \cos (2\theta + 120) \quad (3.7.b)$$

Similarmente, para la inductancia propia de la fase c:

$$L_{cc} = L_s + L_m \cos 2(\theta + 120) \quad (3.8.a)$$

$$L_{cc} = L_s + L_m \cos (2\theta - 120) \quad (3.8.b)$$

La inductancia mutua entre dos fases de la armadura también varía con la posición del campo. Es siempre negativa y su valor más alto ocurre donde el eje directo se encuentra en la mitad entre el eje de una fase y el eje inverso de la otra fase. Así, el valor máximo absoluto de la inductancia mutua entre las fases a y b ocurre a $\theta = -30^\circ$ o 150° , entre las fases a y c, a $\theta = -150^\circ$ o 30° y entre las fases b y c, a $\theta = 90^\circ$ o 270° .

Es hallado, ya sea por cálculo o por pruebas, que la variación de la inductancia mutua entre dos fases del estator es prácticamente la misma que la variación de

la inductancia propia de una fase del estator, consecuentemente la denotaremos con el mismo símbolo L_m .

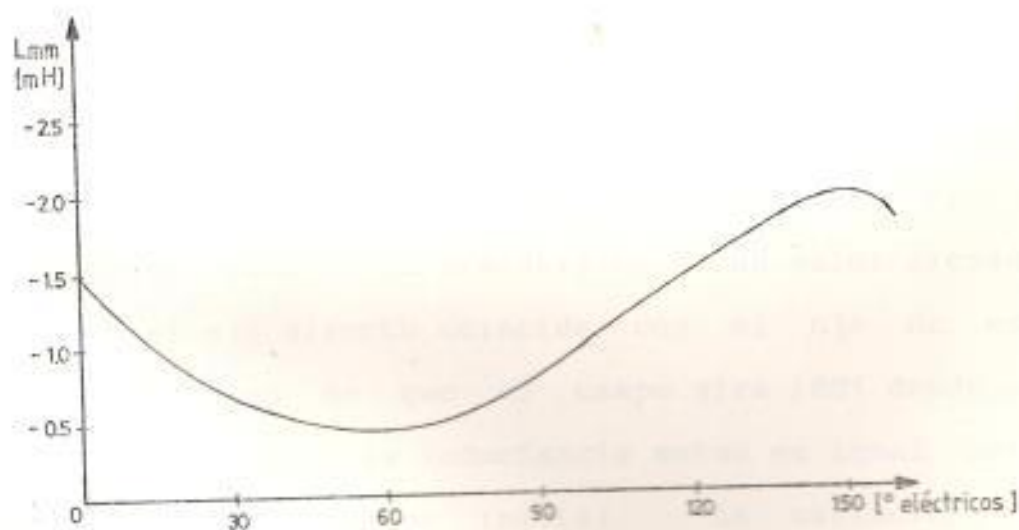


fig. 3.3

Variación de la inductancia mutua entre las fases a y b de la armadura con la posición del rotor.

Las expresiones para las inductancias mutuas son las siguientes:

$$L_{ab} = L_{ba} = - [M_s + L_m \cos 2 (\theta + 30)] \quad (3.9.a)$$

$$L_{ab} = L_{ba} = - M_s + L_m \cos (2\theta - 120) \quad (3.9.b)$$

$$L_{bc} = L_{cb} = - [M_s + L_m \cos 2 (\theta - 90)] \quad (3.10.a)$$

$$L_{bc} = L_{cb} = - M_s + L_m \cos 2 \quad (3.10.b)$$

$$L_{ca} = L_{ac} = - [M_s + L_m \cos 2(\theta + 150)] \quad (3.11.a)$$

$$L_{ca} = L_{ac} = - M_s + L_m \cos (2\theta + 120) \quad (3.11.b)$$

M_s : inductancia mutua entre dos devanados del estator.
 L_m : variación de la inductancia mutua entre dos devanados del estator.

La inductancia mutua entre el devanado de campo y cualquier fase de la armadura es de un valor elevado cuando el eje directo coincide con el eje de esa fase. Luego de que el campo gira 180° desde su posición original la inductancia mutua es igual pero opuesta a su valor inicial. La variación es sinusoidal: para mostrar la variación sinusoidal de la inductancia mutua es necesario proporcionar un voltaje sinusoidal del circuito abierto, lo cual es usualmente conseguido en máquinas comerciales. La inductancia propia del devanado de campo L_{ff} es constante. Las expresiones para las inductancias mutuas son:

$$L_{af} = L_{fa} = M_f \cos \theta \quad (3.12)$$

$$L_{bf} = L_{fb} = M_f \cos (\theta - 120) \quad (3.13)$$

$$L_{cf} = L_{fc} = M_f \cos (\theta + 120) \quad (3.14)$$

Reemplazando las expresiones (3.6) a (3.14) en las

ecuaciones de enlaces de flujo, obtendremos:

$$\psi_a = (L_s + L_m \cos 2\theta) \dot{i}_a + [-M_s + L_m \cos (2\theta - 120)] \dot{i}_b + [-M_s + L_m \cos (2\theta + 120)] \dot{i}_c + (M_f \cos \theta) \dot{i}_f \quad (3.15)$$

$$\psi_b = [-M_s + L_m \cos (2\theta - 120)] \dot{i}_a + [L_s + L_m \cos (2\theta + 120)] \dot{i}_b + (-M_s + L_m \cos 2\theta) \dot{i}_c + [M_f \cos (\theta - 120)] \dot{i}_f \quad (3.16)$$

$$\psi_c = [-M_s + L_m \cos (2\theta + 120)] \dot{i}_a + (-M_s + L_m \cos 2\theta) \dot{i}_b + [L_s + L_m \cos (2\theta - 120)] \dot{i}_c + [M_f \cos (\theta + 120)] \dot{i}_f \quad (3.17)$$

$$\psi_f = (M_f \cos \theta) \dot{i}_a + [M_f \cos (\theta - 120)] \dot{i}_b + [M_f \cos (\theta + 120)] \dot{i}_c + L_f \dot{i}_f \quad (3.18)$$

Asumiendo ahora que los voltajes en los cuatro devanados son funciones conocidas en el tiempo y estas expresiones son requeridas para las corrientes, que son también funciones del tiempo. Se requieren cuatro ecuaciones diferenciales, las cuales tienen como incógnitas las cuatro corrientes y sus derivadas del tiempo. Para obtener estas ecuaciones, se pondrá $\theta = \omega t + \theta_0$ en las expresiones (3.15 a 3.18) y asumiendo que ω es constante, tomamos la derivada de

tiempo de estas ecuaciones y sustituimos el resultado en las ecuaciones (3.3). Las ecuaciones resultantes son muy complicadas:

$$\begin{aligned}
 V_a = & \left[r - 2\omega L_m \text{Sen } 2(\omega t + \theta_0) \right] \dot{I}_a - \left[2\omega L_m \text{Sen} \right. \\
 & \left. (2\omega t + 2\theta_0 - 120^\circ) \right] \dot{I}_b - \left[2\omega L_m \text{Sen} (2\omega t + 2\theta_0 \right. \\
 & \left. + 120^\circ) \right] \dot{I}_c - \left[\omega M_f \text{Sen} (\omega t + \theta_0) \right] \dot{I}_f + \left[L_s + \right. \\
 & \left. L_m \text{Cos } 2(\omega t + \theta_0) \right] \frac{d\dot{I}_a}{dt} + \left[M_s + L_m \text{Cos} (2\omega t \right. \\
 & \left. + 2\theta_0 - 120^\circ) \right] \frac{d\dot{I}_b}{dt} + \left[M_s + L_m \text{Cos} (2\omega t + \right. \\
 & \left. 2\theta_0 + 120^\circ) \right] \frac{d\dot{I}_c}{dt} + \left[M_f \text{Cos} (\omega t + \theta_0) \right] \frac{d\dot{I}_f}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{3.19}$$

$$\begin{aligned}
 V_b = & \left[-2L_m \text{Sen} (2\omega t + 2\theta_0 + 120^\circ) \right] \dot{I}_a + \left[r - 2\omega L_m \right. \\
 & \left. \text{Sen} (2\omega t + 2\theta_0 + 120^\circ) \right] \dot{I}_b + \left[-2\omega L_m \text{Sen} (2\omega \right. \\
 & \left. t + 2\theta_0) \right] \dot{I}_c + \left[-\omega M_f \text{Sen} (\omega t + \theta_0 - 120^\circ) \right] \dot{I}_f \\
 & + \left[M_s + L_m \text{Cos} (2\omega t + 2\theta_0 - 120^\circ) \right] \frac{d\dot{I}_a}{dt} \\
 & + \left[L_s + L_m \text{Cos} (2\omega t + 2\theta_0 + 120^\circ) \right] \frac{d\dot{I}_b}{dt}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left[M_s + L_m \cos (2\omega t + 2\theta_0) \right] \frac{d i_c}{dt} + M_f \\
 & \cos (\omega t + \theta_0 - 120^\circ) \frac{d i_f}{dt} \quad (3.20)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_c = & \left[-2 L_m \sin (2\omega t + 2\theta_0 + 120^\circ) \right] i_a + \left[-2\omega L_m \right. \\
 & \left. \sin (2\omega t + 2\theta_0) \right] i_b + \left[r - 2\omega L_m \sin (2\omega t + \right. \\
 & \left. 2\theta_0 - 120^\circ) \right] i_c + \left[-\omega M_f \sin (\omega t + \theta_0 + 120^\circ) \right] \\
 & i_f + \left[M_s + L_m \cos (2\omega t + 120^\circ) \right] \frac{d i_a}{dt} + \left[M_s \right. \\
 & \left. + L_m \cos (2\omega t + 2\theta_0) \right] \frac{d i_b}{dt} + \left[L_s + L_m \cos (2\omega t \right. \\
 & \left. + 2\theta_0 - 120^\circ) \right] \frac{d i_c}{dt} + \left[M_f \cos (\omega t + \theta_0 + 120^\circ) \right] \\
 & i_f + \left[M_f \cos (\omega t + \theta_0) \right] \frac{d i_a}{dt} + \left[M_f \cos (\omega t + \theta_0) \right. \\
 & \left. + M_s \cos (\omega t + \theta_0 + 120^\circ) \right] \frac{d i_b}{dt} + \left[M_s \cos (\omega t + \theta_0 + 120^\circ) \right. \\
 & \left. + M_f \cos (\omega t + \theta_0) \right] \frac{d i_c}{dt} + r_f i_f \quad (3.21)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_f = & \left[-\omega M_f \sin (\omega t + \theta_0) \right] i_a + \left[-\omega M_f \sin (\omega t + \theta_0 - \right. \\
 & \left. 120^\circ) \right] i_b + \left[-\omega M_f \sin (\omega t + \theta_0 + 120^\circ) \right] i_c + r_f i_f \\
 & + \left[M_f \cos (\omega t + \theta_0) \right] \frac{d i_a}{dt} + \left[M_f \cos (\omega t + \theta_0) \right. \\
 & \left. + M_s \cos (\omega t + \theta_0 + 120^\circ) \right] \frac{d i_b}{dt} + \left[M_s \cos (\omega t + \theta_0 + 120^\circ) \right. \\
 & \left. + M_f \cos (\omega t + \theta_0) \right] \frac{d i_c}{dt} + r_f i_f
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{d \dot{b}}{dt} + \left[M_f \cos (\omega t + \theta_0 + 120^\circ) \right] \frac{d \dot{c}}{dt} \\
 & - 120^\circ \left. \right] \frac{d \dot{b}}{dt} + \left[M_f \cos (\omega t + \theta_0 + 120^\circ) \right] \frac{d \dot{c}}{dt} \\
 & + L_{ff} \frac{d \dot{f}}{dt} \qquad \qquad \qquad (3.22)
 \end{aligned}$$

Aún cuando la solución de cuatro ecuaciones diferenciales simultáneas de esta forma es teóricamente posible, ello no sería práctico en la forma en que se encuentran en las actuales expresiones.

TRANSFORMACION DE PARK

Las ecuaciones de la máquina sincrónica pueden ser grandemente simplificadas por una sustitución (transformación) de variables. Esto es, ciertas corrientes, voltajes y enlaces de flujo ficticios pueden ser definidas como funciones de las corrientes, voltajes y enlaces de flujo actuales reales, de tal forma que las ecuaciones serán puestas en términos de estas nuevas variables.

Las ecuaciones pueden ser resueltas para una nueva variable como función del tiempo. La sustitución de

las cantidades eléctricas actuales puede ser hecha de manera puramente matemática y desde este punto de vista no sería necesario dar ninguna interpretación física a las nuevas cantidades ficticias. Pero, la sustitución particular usada está basada en razonamientos físicos y por tanto a las nuevas variables se les puede dar una interpretación física, y además serán escogidas de manera que las ecuaciones sean simplificadas por la sustitución.

La sustitución de la que haremos uso es de R. H. Park. Por esto se la llama "transformación de Park", y las variables nuevas son llamadas variables de Park.

La transformación de Park define unas nuevas variables del estator, corrientes, voltajes o enlaces de flujo en términos de las variables conocidas de cada uno de los devanados.

Las nuevas cantidades son obtenidas de la proyección de las variables actuales sobre tres ejes, uno a lo largo del eje directo de los devanados de campo del rotor, llamado de eje directo; la segunda a lo largo del eje neutro de los devanados de campo, llamado de eje en cuadratura, y la tercera sobre un eje estacionario.

APLICACION DE LA TRANSFORMACION DE PARK A LAS
ECUACIONES DE LA MAQUINA SINCRONICA

A continuación aplicaremos la transformación de Park a las cantidades eléctricas que son empleadas en la representación de la máquina sincrónica.

Las corrientes de fase de la armadura i_a , i_b e i_c son reemplazadas por las nuevas corrientes ficticias i_d , i_q e i_o de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$i_a = i_d \cos \theta - i_q \sin \theta + i_o \quad (3.23)$$

$$i_b = i_d \cos (\theta - 120) - i_q \sin (\theta - 120) + i_o \quad (3.24)$$

$$i_c = i_d \cos (\theta + 120) - i_q \sin (\theta + 120) + i_o \quad (3.25)$$

Sustituciones similares son hechas para los voltajes y para los enlaces de flujo de la armadura. La transformación inversa de las ecuaciones de corriente es:

$$\begin{cases} i_a \\ i_b \\ i_c \end{cases} = \frac{2}{3} \begin{cases} i_d \cos \theta + i_q \sin \theta + i_o \\ i_d \cos (\theta - 120) + i_q \sin (\theta - 120) + i_o \\ i_d \cos (\theta + 120) + i_q \sin (\theta + 120) + i_o \end{cases} \quad (3.26)$$

$$i_q = 2/3 [i_a \text{ Sen } \theta + i_b \text{ Sen } (\theta - 120^\circ) + i_c \text{ Sen } (\theta + 120^\circ)]$$

(3.27)

$$i_o = 1/3 (i_a + i_b + i_c)$$

(3.28)

Para la obtención de estas ecuaciones inversas a partir de las ecuaciones normales se requiere del uso de algunas identidades trigonométricas y de cierto trabajo matemático.

A continuación presentaremos las ecuaciones correspondientes a los enlaces de flujo para ψ_d , ψ_q , ψ_o en términos de ψ_a , ψ_b , y ψ_c .

$$\psi_d = (L_s + M_s + 3/2 L_m) i_d + M_f i_f$$

(3.29.a)

$$\psi_q = (L_s + M_s - 3/2 L_m) i_q$$

(3.29.b)

$$\psi_o = (L_s - 2 M_s) i_o$$

(3.29.c)

$$\psi_f = 3/2 M_f i_d + L_{ff} i_f$$

(3.29.d)

Estas ecuaciones son muy simples ya que; primero, todos los coeficientes son constantes e independientes de la posición del rotor; y segundo,

que existe casi una completa separación de variables. Las cantidades en parentesis son las relaciones de los enlaces de flujo directo, en cuadratura y neutro con sus respectivas corrientes; obviamente ellas son las inductancias en el nuevo sistema de variables; por tanto

$$L_d = L_s + M_s + \frac{3}{2} L_m \quad (3.30)$$

$$L_q = L_s + M_s - \frac{3}{2} L_m \quad (3.31)$$

$$L_o = L_s - 2 M_s \quad (3.32)$$

De esta forma, las ecuaciones (3.29) pueden ser escritas como:

$$\psi_d = L_d \dot{i}_d + M_f \dot{i}_f \quad (3.33.a)$$

$$\psi_q = L_q \dot{i}_q \quad (3.33.b)$$

$$\psi_o = L_o \dot{i}_o \quad (3.33.c)$$

$$\psi_f = \frac{3}{2} M_f \dot{i}_d + L_{ff} \dot{i}_f \quad (3.33.d)$$

A continuación estableceremos las ecuaciones de los

voltajes en los ejes d, q y cero partiendo de las expresiones para los voltajes empleando la transformación de Park:

$$V_d = \frac{2}{3} \left[V_a \cos \theta + V_b \cos (\theta - 120^\circ) + V_c \cos (\theta + 120^\circ) \right] \quad (3.34.a)$$

$$V_q = -\frac{2}{3} \left[V_a \operatorname{Sen} \theta + V_b \operatorname{Sen} (\theta - 120^\circ) + V_c \operatorname{Sen} (\theta + 120^\circ) \right] \quad (3.34.b)$$

$$V_0 = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \quad (3.34.c)$$

Sustituyendo en (3.34) los voltajes de cada una de las fases por la expresión:

$$V = r i + d\psi/dt$$

$$V_d = \frac{2}{3} \left[\left(r l_a + \frac{d\psi_a}{dt} \right) \cos \theta + \left(r l_b + \frac{d\psi_b}{dt} \right) \cos (\theta - 120^\circ) + \left(r l_c + \frac{d\psi_c}{dt} \right) \cos (\theta + 120^\circ) \right] \quad (3.35.a)$$

Multiplicando y agrupando términos:

$$V_d = \frac{2}{3} r \left[l_a \cos \theta + l_b \cos (\theta - 120^\circ) + l_c \cos (\theta + 120^\circ) \right] + \frac{2}{3} \left[\frac{d\psi_a}{dt} \cos \theta + \frac{d\psi_b}{dt} \cos (\theta - 120^\circ) + \frac{d\psi_c}{dt} \cos (\theta + 120^\circ) \right]$$

$$\left(\theta - 120^\circ \right) + \frac{d\psi_c}{dt} \cos \left(\theta + 120^\circ \right) \quad (3.35.b)$$

$$\dot{\psi}_d = r \dot{\theta} + \left[\frac{d\psi}{dt} \right]_d \quad (3.35.c)$$

donde $\left[\frac{d\psi}{dt} \right]_d$ es un término empleado para abreviar la expresión que se halla dentro del corchete; sin embargo no se la debe confundir con $d\psi_d/dt$, la cual se la halla derivando la expresión de los enlaces de flujo ψ_d :

$$\psi_d = \frac{2}{3} \left[\psi_a \cos \theta + \psi_b \cos \left(\theta - 120^\circ \right) + \psi_c \cos \left(\theta + 120^\circ \right) \right] \quad (3.36)$$

reemplazando:

$$\theta = \omega t + \theta_0$$

$$\frac{d\psi_d}{dt} = \frac{2}{3} \left[\frac{d\psi_a}{dt} \cos \theta + \frac{d\psi_b}{dt} \cos \left(\theta - 120^\circ \right) + \frac{d\psi_c}{dt} \cos \left(\theta + 120^\circ \right) \right] - \frac{2}{3} \left[\psi_a \operatorname{Sen} \theta + \psi_b \operatorname{Sen} \left(\theta - 120^\circ \right) + \psi_c \operatorname{Sen} \left(\theta + 120^\circ \right) \right] \quad (3.37.a)$$

d

d

$$\frac{d\psi_d}{dt} = \left[\frac{d\psi}{dt} \right]_d + \omega \psi_q \quad (3.37.b)$$

de forma que:

$$\left[\frac{d\psi}{dt} \right]_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q \quad (3.38)$$

luego:

$$V_d = r \dot{\psi}_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q \quad (3.35.d)$$

en forma similar:

$$V_q = r \dot{\psi}_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d \quad (3.39)$$

$$V_0 = r \dot{\psi}_0 + \frac{d\psi_0}{dt} \quad (3.40)$$

Reemplazando los valores hallados de ψ_d , ψ_q , ψ_0 , $d\psi_d/dt$, $d\psi_q/dt$ y $d\psi_0/dt$ en las expresiones anteriores, obtendremos:

$$V_d = r i_d + L_d \frac{d i_d}{dt} - \omega L_g i_g + M_f \frac{d i_f}{dt} \quad (3.41)$$

$$V_q = r i_q + L_q \frac{d i_q}{dt} + \omega (L_d i_d + M_f i_f) \quad (3.41.b)$$

$$V_o = r i_o + L_o \frac{d i_o}{dt} \quad (3.41.c)$$

$$V_f = r_f i_f + L_{ff} \frac{d i_f}{dt} + \frac{3}{2} M_f \frac{d i_d}{dt}$$

Estas ecuaciones son mucho más simples que aquellas presentadas para los voltajes a, b, c (3.19) a (3.22); pues solamente tienen dos, tres o cuatro términos en lugar de ocho términos como se tenía en las expresiones antes mencionadas.

Una vez presentadas las herramientas matemáticas que normarán el funcionamiento de una máquina sincrónica, se expondrán a continuación las bases teóricas para llegar al circuito eléctrico equivalente que

representa a la máquina sincrónica. Este circuito es de mucha utilidad en los estudios de estabilidad de sistemas eléctricos de potencia.

3.1.4 CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA MAQUINA SINCRONICA PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD

La f.e.m. de la máquina, es decir, el voltaje correspondiente a la corriente que fluye por el devanado de campo, se lo considera que posee dos componentes: una componente E que corresponde a los enlaces de flujo del devanado de campo y una componente que contrarresta la reacción de armadura. La última componente puede variar en forma instantánea porque ella corresponde a las corrientes, en cambio la primera componente, que corresponde a los enlaces de flujo, no puede variar en forma instantánea.

Cuando se produce un cambio repentino en la red eléctrica, los enlaces de flujo (y por tanto E) no cambiarán, pero se producirán corrientes en la armadura, por lo cual se deberán inducir otras corrientes en los circuitos del rotor para de esta forma mantener los enlaces de flujo constantes. Las corrientes de armadura y del rotor tienen componentes a.c. y d.c., las cuales se requieren

para igualar los ampere-vuelta de las diversas bobinas acopladas. El flujo disminuirá de acuerdo a la constante de tiempo efectiva del circuito de campo. Sin carga, esta constante de tiempo es del orden de algunos segundos, mientras que bajo carga ella se reduce considerablemente hasta el orden de 1 seg. o mas.

De lo anterior podemos ver que para un período inferior a 1 seg. la característica natural del devanado de campo de una máquina sincrónica tiende a mantener los enlaces de flujo constantes y por tanto también E' . Las excitatrices de tipo convencional generalmente tienen una respuesta lenta y sus valores máximos y mínimos no son lo suficientemente altos como para alterar en forma apreciable el cuadro antes descrito. Mas aún, se ha observado que durante un disturbio el efecto combinado de la reacción de armadura y del sistema de excitación ayuda a mantener los enlaces de flujo constantes durante un periodo de tiempo de un segundo o dos. Este período se lo considera adecuado para determinar la estabilidad de la máquina. De esta forma, en estudios de estabilidad se considerarán que los enlaces de flujo del campo permanecen constantes.

El flujo del devanado de campo es por lo regular igual a un flujo ficticio que crearía una f.e.m. detrás de la reactancia transiente de eje directo. El modelo usado para una máquina sincrónica se muestra en la fig. 3.4., donde X_d' es la reactancia transiente de eje directo.

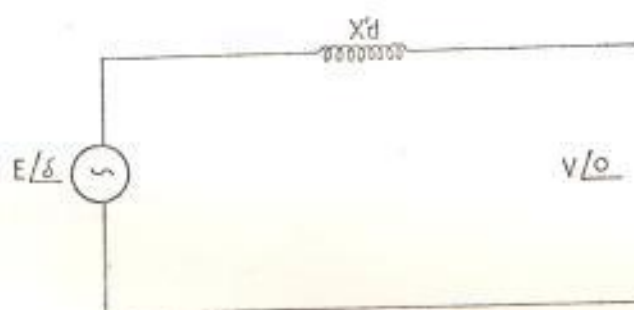


fig. 3.4.

Circuito equivalente de una máquina sincrónica.

La fuente de voltaje constante E/δ es determinada de las condiciones iniciales, es decir de las condiciones anteriores al transiente. Durante el transiente la magnitud E se la mantiene constante, mientras que el ángulo δ se lo considera como el ángulo entre la posición del rotor y el voltaje terminal V .

En la sección 3.2 se presentarán los modelos matemáticos de la máquina sincrónica, en cuyo desarrollo se emplearán los conceptos hasta este punto tratados. Es decir, el circuito equivalente

antes presentado para el estado transiente tendrá sus variaciones de acuerdo al grado de complejidad que involucre cada uno de los modelos, de igual forma se aplicará la teoría matemática en la resolución de las ecuaciones diferenciales que conllevan cada representación de la máquina sincrónica.

3.2 REPRESENTACION DE LA MAQUINA SINCRONICA PARA ANALISIS DE ESTABILIDAD

Para cualquier tipo de análisis que involucre el funcionamiento de la máquina sincrónica, se usarán las ecuaciones derivadas de una máquina ideal, tomando en cuenta las correcciones a ser hechas debido a los efectos de saturación. La representación de tales efectos se lo hará como variaciones sustanciales de velocidad, también pueden ser considerados las armónicas y las corrientes desbalanceadas que aparecen luego de producirse un disturbio en el sistema.

Si la máquina sincrónica es representada considerando todos los detalles anteriores, entonces el sistema de potencia deberá ser representado en un nivel de detalles comparable, pues si no, los resultados obtenidos pueden ser incorrectos. Sin embargo, al

representar los transformadores y las líneas de transmisión mediante sus ecuaciones diferenciales para de esta forma ser consistentes con la representación de la máquina sincrónica, se incrementa la complejidad de los cálculos al punto de que para tratar el análisis de un sistema relativamente sencillo se requerirá el empleo de un computador digital. Debido a lo anterior, al realizarse estudios de estabilidad generalmente se emplean hipótesis simplificadoras las cuales deberán ser utilizadas en forma adecuada. Al realizar el análisis de la estabilidad de un sistema eléctrico de potencia se emplearán las siguientes hipótesis principales:

1. Solo serán representadas las corrientes y voltajes de frecuencia fundamental, tanto del estator como del sistema al cual se halla conectada la máquina. Consecuentemente, no serán consideradas las corrientes ni voltajes desbalanceados en su componente directa, tampoco se considerarán las armónicas.
2. Para representar las condiciones desbalanceadas se emplearán componentes simétricas.
3. No se considerará el efecto que pueda tener las

variaciones de velocidad de la máquina sobre el voltaje generado.

La primera hipótesis nos permitirá representar a todas las corrientes y los voltajes de la máquina mediante FASORES. Estos fasores serán utilizados en las ecuaciones algebraicas y diferenciales que representarán a la máquina sincrónica. Esta primera hipótesis da resultados correctos en un análisis de estabilidad excepto para un caso cuando ocurre una falla cerca de los terminales de la máquina. Al producirse este tipo de falla, circularán corrientes desbalanceadas producidas en el estator de la máquina, las cuales producirán un torque significativo, aun cuando la duración de este torque es muy corta, su magnitud puede tener efectos importantes sobre los cambios en la velocidad y el ángulo de la máquina sincrónica durante la falla. Cuando se omite este torque al representar al generador, el sistema aparece más inestable de lo que realmente es, por tanto se hace necesario representar el efecto del torque de desbalance durante una falla. El cálculo de este torque se lo hace separadamente y se procede a corregir el torque eléctrico durante el período de falla.

La segunda hipótesis es necesaria si la primera es

hecha. La última hipótesis tiene poco efecto en un estudio de estabilidad, a menos que se produzcan cambios sustanciales en la frecuencia del sistema.

Con las tres hipótesis anteriores se podrán obtener las ecuaciones necesarias para representar a una máquina sincrónica dentro de un estudio de estabilidad de un sistema eléctrico de potencia, sin embargo, estas ecuaciones son relativamente complejas y por lo tanto se realizarán nuevas asunciones simplificadoras de acuerdo a las situaciones específicas que se presentaren.

A continuación se mostrarán cuatro modelos para representar a una máquina sincrónica en un análisis de estabilidad, el orden en que se presentarán los modelos matemáticos será desde el de menor complejidad (MODELO I) hasta el modelo más completo y sofisticado (MODELO IV).

MODELO I

En este modelo a más de las tres hipótesis ya mencionadas se harán otras tres consideraciones como son:

a. Se asumirá que los enlaces de flujo de campo

permanecerán constantes en magnitud.

- b. Se despreciarán todas las corrientes de amortiguación y sus efectos.
- c. Se asumirá que los enlaces de flujo de campo tendrán la misma magnitud que el voltaje detrás de la reactancia transiente, y que el ángulo de eje en cuadratura es el mismo del ángulo de E' . Lo antes dicho se lo hará en forma matemática igualando las reactancias X_d y X'_d a X_d en las ecuaciones empleadas.

El diagrama fasorial de este modelo es el siguiente:

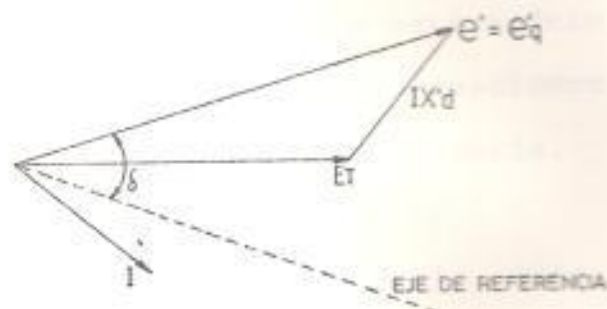


fig. 3.5.

Diagrama fasorial modelo I

La única ecuación diferencial a ser resuelta es la ecuación de aceleración:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{180 f}{E} (T_m - T_e) \quad (3.42)$$

δ : ángulo entre el eje q y el eje de referencia

T_m : torque mecánico

T_e : torque eléctrico

En todo instante de tiempo, el ángulo δ es conocido a partir de la solución de la ecuación (3.42). Ya que los enlaces de flujo del campo se los asume constante, entonces el voltaje E' tiene una magnitud constante. Por tanto, en todo instante serán conocidas la magnitud y el ángulo del voltaje E' , de lo cual se concluye que este modelo nos ofrece la solución más sencilla de las ecuaciones de la máquina sincrónica y del sistema de potencia.

Las limitaciones que presenta este modelo son producto de las hipótesis hechas. Cuando una máquina es sometida a un disturbio, la potencia reactiva entregada al sistema se incrementa, por lo cual los enlaces de flujo del campo tienden a disminuir con el tiempo. Si una falla es aplicada, los enlaces de flujo de campo decrecen durante el tiempo de falla, este efecto se produce por la "REACCION DE ARMADURA". Si la máquina sincrónica posee un regulador

automático de voltaje, la disminución del voltaje terminal hará que el voltaje de campo se incremente y este incremento en el voltaje de campo causará un incremento de los enlaces de flujo del campo. Se puede entonces concluir que el comportamiento de los enlaces de flujo del campo, es la combinación del efecto de la reacción de armadura y del sistema de excitación. La hipótesis de que los enlaces de flujo del campo son constantes es válida para un período de estudio promedio, durante este período el valor de los enlaces de flujo actuales no difieren mucho del valor inicial anterior a la falla, por lo cual el valor promedio se lo considerará igual a su valor inicial. Por tanto, la validez de esta hipótesis depende de la severidad y duración de la falla, así como de la respuesta del sistema de excitación. Para fallas severas y de larga duración (mayor a seis ciclos), la hipótesis de enlaces de flujo constantes es optimista y este modelo clásico nos dará una indicación inapropiada del grado de estabilidad.

El asumir enlaces de flujo constantes no nos permite detectar la presencia de amortiguación negativa producto de la acción del sistema de excitación, por tanto, este modelo no es adecuado para realizar un estudio de estabilidad dinámica en donde la amortiguación de las oscilaciones es una

consideración importante.

Los datos de la máquina requeridos para representar el modelo I son los siguientes:

- a) La resistencia del estator
- b) X'_d
- c) H (la constante de inercia)

En este modelo, la amortiguación no es representada y la hipótesis de enlaces de flujo constantes es válida para un periodo limitado de tiempo, por lo cual esta representación de la máquina sincrónica es adecuada para un estudio de la estabilidad transiente. Para analizar la estabilidad dinámica y la de estado estable, se deberá utilizar un modelo diferente.

Las ventajas del modelo I tienen que ver con su simplicidad, facilidad en los cálculos y en la necesidad de un mínimo de datos. Por esto, es la representación de la máquina más usada sobre todo para un análisis de estabilidad transiente. Las desventajas residen en las limitaciones ya anotadas y en el hecho de que no puede ser usado para estudiar los efectos del sistema de excitación sobre la estabilidad.

MODELO II

Este modelo hace una hipótesis adicional a las tres asunciones básicas, las cuales:

Se desprecian todas las corrientes de amortiguación y sus efectos.

El diagrama fasorial de este modelo es mostrado a continuación en la fig.3.6.

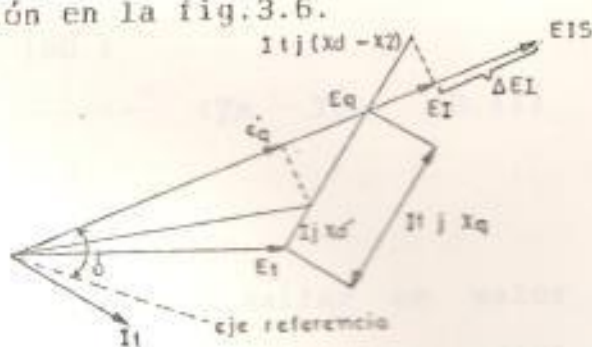


Fig. 3.6

Diagrama fasorial modelo II

Este modelo requiere 6 constantes de la máquina a más de los datos necesarios para representar la saturación:

- Resistencia del estator
- Reactancia transiente de eje directo
- Reactancia sincrónica de eje directo
- Reactancia sincrónica de eje cuadratura
- Constante de tiempo transiente de circuito abierto de eje directo
- Constante de inercia.

En cualquier momento, el ángulo δ y la magnitud de los enlaces de flujo de campo e'_q son conocidos a partir de las ecuaciones diferenciales siguientes:

$$\frac{de'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}} (E'_{fd} - E_f) \quad (3.43)$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{180 f}{H} (T_m - T_e) \quad (3.44)$$

Es necesario entonces hallar un valor de E_q que satisfaga simultáneamente las condiciones conocidas de cada máquina y del sistema de potencia, por tanto se requiere de un proceso iterativo de cálculos. Una vez que E_q es conocida, la corriente de campo puede ser determinada a partir de las relaciones fasoriales. La corriente y el voltaje de campo, calculados a partir de las ecuaciones del sistema de excitación son utilizados para determinar el cambio en e'_q empleando la ecuación (3.43).

Este modelo es el más simple en el cual se consideran los efectos del campo, por tanto un modelo con este grado de complejidad se deberá emplear si se quiere

analizar los efectos del sistema de excitación sobre la estabilidad.

El despreciar las corrientes de amortiguación nos llevan a ignorar 2 aspectos principales: 1) No se toman en cuenta la amortiguación de las oscilaciones y 2) El efecto de protección que ofrecen entre el estator y el campo no es considerado durante el transiente. El efecto de la amortiguación puede ser aproximado adicionando un torque de amortiguación que sea función de la velocidad de la máquina al torque eléctrico calculado directamente al emplear este modelo. El efecto de protección que ofrecen los devanados de amortiguación no es importante para excitatrices rotativas convencionales, pero adquiere importancia cuando se trata de sistemas de excitación estáticos.

El modelo II requiere de una mayor cantidad de cálculos que el modelo I, pero sin embargo es el modelo más simple que incluye los transientes del campo. Se lo puede emplear inclusive para un análisis de estabilidad dinámica.

MODELO III

Este modelo se lo usa para representar una máquina de

rotor cilíndrico, con el rotor de hierro sólido, en donde se tomarán en cuenta los circuitos de hierro de amortiguación. Este modelo hace una asunción adicional a las 3 Hipótesis básicas hechas para estudios de estabilidad.

Se despreciarán las corrientes de hierro de eje directo, mientras que el circuito de hierro de eje en cuadratura es representado por un circuito cuyas constantes son establecidas para una corriente del rotor a la frecuencia de 1 Hertz.

El diagrama fasorial es el siguiente:

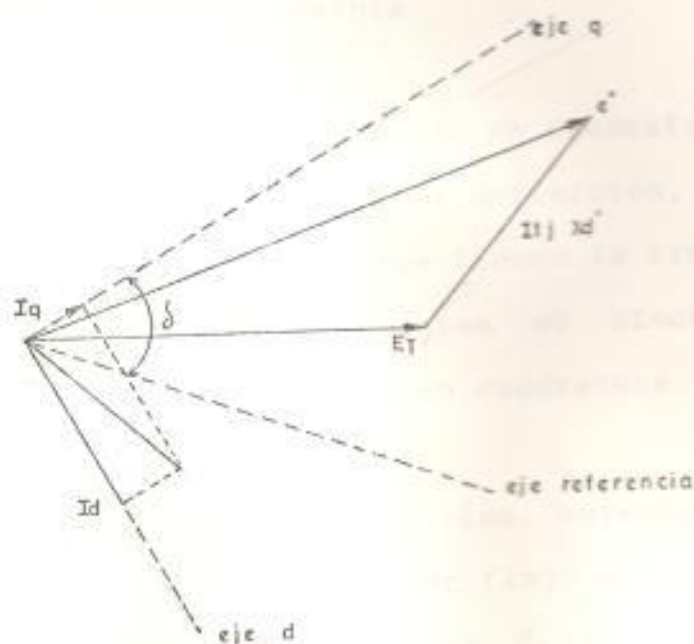


Fig 3.7

Diagrama fasorial modelo III

Este modelo requiere 8 constantes de la máquina más los datos necesarios para representar saturación, las constantes son:

- 1.) Resistencia del estator
- 2.) Reactancia transiente de eje directo
- 3.) Reactancia sincrónica de eje directo
- 4.) Reactancia transiente de eje en cuadratura
- 5.) Reactancia sincrónica de eje en cuadratura
- 6.) Constante de tiempo transiente de circuito abierto de eje directo.
- 7.) Constante de tiempo transiente de circuito abierto de eje en cuadratura
- 8.) Constante de inercia

La reactancia transiente de eje en cuadratura X'_d y la constante de tiempo T'_{d0} son, por definición, calculadas para corrientes del rotor que tienen la frecuencia de 1Hz. Estos valores representan el efecto de los circuitos de hierro del eje en cuadratura.

En todo momento, el ángulo δ , los enlaces de flujo del campo \mathcal{E}'_d y los enlaces de flujo de los circuitos de hierro del eje en cuadratura \mathcal{E}'_q son conocidos a partir de la solución de las ecuaciones diferenciales siguientes:

$$\bar{e}' = \left\{ e'_3 + j \left[e'_d - (x'_3 - x'_d) i_q \right] \right\} e^{j\delta} \quad (3.45)$$

$$\frac{de'_3}{dt} = \frac{1}{T_{d0}} (E_{fd} - E_r) \quad (3.46)$$

$$\frac{de'_d}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}} (-E_{ixq}) \quad (3.47)$$

$$E_{ixq} = e'_d + (X_q - X'd) i_q \quad (3.48)$$

$$E_r = e'_d + (X_d - X'd) i_d + \Delta E_r \quad (3.49)$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{180 f}{H} (T_m - T_e) \quad (3.50)$$

donde:

\bar{e}' es un fasor, pero e'_3 , e'_d e i_q son solo magnitudes de estas variables.
 $\Delta E_r = f$ (índice de saturación)

La ecuación (3.45) es la más importante dentro de las ecuaciones algebraicas.

En todo momento, todas las cantidades excepto la componente de eje en cuadratura de la corriente del estator i_q son conocidas. Ya que $X'q$ y $X'd$ generalmente tienen valores un tanto diferentes, es necesario hallar un valor de i_q que satisfaga simultáneamente las condiciones tanto de la máquina

como del sistema de potencia. Un procedimiento a seguirse puede ser el asumir un valor de \bar{e} con el cual se hallaría la solución de las ecuaciones del sistema. Al determinarse el valor de i_q , se obtendrá un valor mejorado de \bar{e}' . Este proceso iterativo se lo continuará hasta satisfacer la ecuación para \bar{e}' , (3.45). Luego de esto, se determinarán la corriente de campo y la corriente de hierro a partir de las ecuaciones (3.48) y (3.49); estas corrientes se las emplea para determinar las variaciones en los enlaces de flujo del rotor.

Si se asume que $X'd$ y $X'q$ son iguales, lo cual es una forma de despreciar el aspecto de la forma de los polos durante un transiente, entonces la ecuación (3.45) se transforma en:

$$\bar{e}' = \begin{bmatrix} e'_q & e'_d \end{bmatrix} e^{j\delta} \quad (3.51)$$

Si se asumen constantes los enlaces de flujo en ambos ejes entonces la magnitud de \bar{e}' es constante y el modelo III se convierte en el modelo I.

El modelo III representa directamente el efecto de amortiguación de los circuitos de hierro, mediante los circuitos de hierro del eje en cuadratura cuyas constantes son las apropiadas de acuerdo a la

magnitud de las oscilaciones. En condiciones de vacío (sin carga), todo el efecto de amortiguación lo producen los circuitos de hierro del eje en cuadratura. En cambio, a plena carga, para un rango normal de las reactancias, los circuitos de hierro de eje en cuadratura nos proporcionan la mayor cantidad de esta forma de amortiguación. Ajustando los valores de $X'q$ y $T'q_0$ se podrían representar a más del efecto total de amortiguación de los circuitos del hierro, a frecuencias diferentes a la de 1 Hz., sin embargo, la información que se requiere no siempre está disponible.

La representación de los circuitos de hierro de eje en cuadratura nos proporciona una representación directa de la amortiguación de las oscilaciones pero el efecto de los circuitos de hierro sobre la interacción entre el campo y el estator no puede ser aún representado; este efecto se lo puede ver en un modelo más sofisticado, tal como el modelo IV.

La reactancia y la constante de tiempo apropiada para representar los devanados de amortiguación de eje en cuadratura de una máquina de polos salientes serán $X''q$ y $T''q_0$. En particular, $T''q_0$ es mucho más pequeña que $T'q_0$. El resultado es que para representar la amortiguación de una máquina de polos

salientes con este modelo se requerirá de al menos 200 pasos por segundo. Si se requiere de un intervalo tan pequeño, resultará más económico emplear el modelo IV.

MODELO IV

A más de las tres hipótesis hechas para los estudios de estabilidad, se hará una asunción más:

Se despreciará el efecto que puedan tener la forma de los polos durante un período subtransiente de la máquina. Esto es, la reactancia subtransiente de eje directo X''_d .

La hipótesis anterior es verdadera para un generador de rotor cilíndrico. Para un generador de polos salientes X''_q es un tanto mayor que X''_d , pero el efecto de asumir que X''_q es igual a X''_d es despreciable en el caso de análisis de estabilidad.

Este modelo representa los devanados de amortiguación tanto de eje directo como de eje en cuadratura. Su diagrama fasorial es el siguiente:

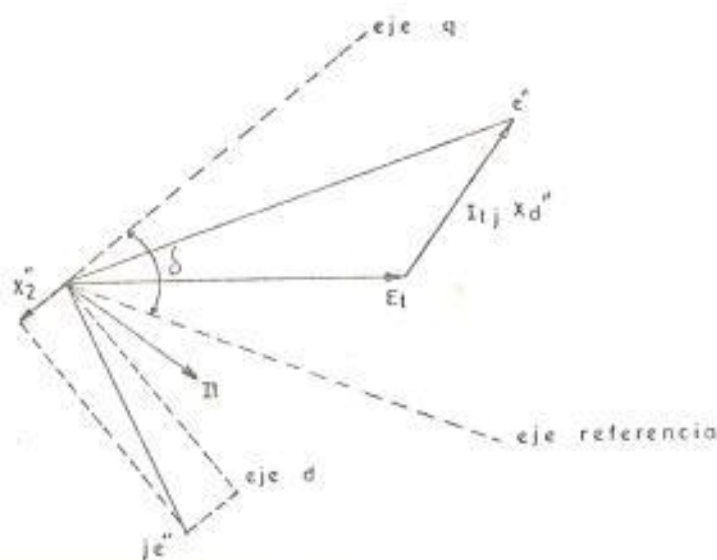


Fig. 3.8

Diagrama fasorial modelo IV

Una vez que se han representado los devanados de amortiguación en ambos ejes y que se ha despreciado el efecto de la forma de los polos durante un período subtransiente, el diagrama fasorial no se ve afectado por el número de circuitos de amortiguación que deban ser representados. Las ecuaciones cambian pero no el diagrama fasorial ni la técnica para resolver las ecuaciones del sistema.

Las ecuaciones descritas son para un devanado amortiguador de eje directo y uno de eje en cuadratura. El modelo requiere de 10 constantes de la máquina a más de los datos necesarios para

representar la saturación, estas constantes son:

- 1.) Resistencia del estator
- 2.) Reactancia subtransiente de eje directo
- 3.) Reactancia transiente de eje directo
- 4.) Reactancia sincrónica de eje directo
- 5.) Reactancia sincrónica de eje cuadratura
- 6.) Constante de tiempo transiente de circuito abierto de eje directo
- 7.) Constante de tiempo subtransiente de circuito abierto de eje directo
- 8.) Constante de tiempo subtransiente de circuito abierto de eje en cuadratura
- 9.) Reactancias de pérdidas del estator
- 10.) Constante de inercia

En todo momento, el ángulo δ , la componente de eje directo de flujo subtransiente ψ_d' y la componente de eje en cuadratura del flujo subtransiente ψ_q' , son conocidas. Por tanto \hat{e} es conocida. El circuito equivalente sería el de una fuente de voltaje constante detrás de una reactancia también constante en cualquier instante, por tanto este modelo es tan simple como el modelo I en lo que concierne a las soluciones de las ecuaciones del sistema. Una vez que las condiciones del sistema son establecidas, el proceso de cálculo de las corrientes del estator y

del rotor así como la variación de los enlaces de flujo del rotor, es relativamente simple. Las ecuaciones son:

$$\psi_d'' = \psi_{kd} + \left[\frac{X''_d - X_t}{X'_d - X_t} \right] (e'_q - \psi_{kd}) \quad (3.52)$$

$$\psi'_q = e'_d \quad (3.53)$$

$$\frac{de'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} (E_{fd} - E'_d) \quad (3.54)$$

$$\frac{d\psi_{kd}}{dt} = \frac{\left[\frac{(X''_d - X_t)^2}{(X'_d - X''_d) T'_{do}} \right] i_{kd}}{1} \quad (3.55)$$

$$\frac{de'_d}{dt} = \frac{1}{T''_{do}} (-E_{rxq}) \quad (3.56)$$

$$E_x = e'_q + (X_d - X'_d) (i_d - i_w) + \Delta E_x \quad (3.57)$$

$$i_{kd} = \frac{(X'_d - X''_d)}{(X'_d - X_t)^2} \left[\psi_{kd} - e'_q + (X'_d - X_t) i_d \right] \quad (3.58)$$

$$E_{rxq} = e'_d + (X_q - X''_d) i_q \quad (3.59)$$

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{180 f}{\pi} (\tau_m - \tau_e) \quad (3.60)$$

$$\Delta E_x = f (\text{índice de saturación})$$

La ventaja de este modelo es que puede representar los efectos del campo, los efectos de los devanados de amortiguación sobre las oscilaciones y los efectos de estos devanados sobre la interacción que existe entre el campo y el estator.

Para una máquina de rotor cilíndrico, sin embargo es necesario representar dos circuitos de hierro de eje en cuadratura para tener la certeza de que se han representado todos los efectos de amortiguación. Aún cuando se siguen haciendo estudios para determinar el número correcto de circuitos de hierro de eje directo que son necesarios para una completa representación de los efectos de amortiguación; actualmente los datos que proporcionan los fabricantes de máquinas sincrónicas limitan la representación a un máximo de dos circuitos de hierro en el eje en cuadratura y uno en el eje directo.

Aun cuando este modelo nos presenta un diagrama fasorial relativamente sencillo que puede emplearse en la solución de las ecuaciones del sistema, sin embargo existen dos desventajas en su empleo. La primera y más importante es que requieren de más tiempo para realizar los cálculos que cualquier otro de los modelos, y la segunda es la cantidad de datos

que se requieren para la representación de este modelo:

SIMBOLOS UTILIZADOS EN LOS MODELOS QUE REPRESENTAN A LA MAQUINA SINCRONICA

A continuación se presentarán las principales cantidades utilizadas tanto en las ecuaciones como en los diagramas fasoriales que han servido para la representación de las máquinas sincrónicas.

δ = Angulo entre el eje q y el eje de referencia

t = Tiempo (seg.)

f = Frecuencia (Hz.)

H = Constante de inercia (Mw. seg. /MVA)

T_m = Torque mecánico (pu)

T_e = Torque eléctrico (pu)

X_e = Reactancia de pérdidas del estator (pu)

X''_d = Reactancia subtransiente de eje directo (pu)

X'_d = Reactancia transiente de eje directo (pu)

X_d = Reactancia sincronica de eje directo (pu)

X''_q = Reactancia subtransiente de eje en cuadratura (pu)

X'_q = Reactancia transiente de eje en cuadratura (pu)

X_q = Reactancia sincronica de eje en cuadratura (pu)

T'_{d0} = Constante de tiempo subtransiente de circuito abierto de eje directo (pu)

- T''_{d0} = Constante de tiempo subtransiente de circuito abierto de eje en cuadratura (pu)
- T'_{d0} = Constante de tiempo transiente de circuito abierto de eje directo (pu)
- l_q = Componente de eje en cuadratura de la corriente del estator (pu)
- l_d = Componente de eje directo de la corriente del estator
- l_{kq} = Componente de eje directo de la corriente de amortiguación (pu)
- E_{fkq} = Componente de eje en cuadratura de la corriente de amortiguación
- E_f = Corriente de campo (pu)
- ΔE_f = Corrección de la corriente de campo debido a la saturación (pu)
- \bar{e}' = Fasor de voltaje detrás de la reactancia transiente
- \bar{e}'' = Fasor de voltaje detrás de la reactancia subtransiente
- \bar{e}_q = Enlaces de flujo del campo
- \bar{e}_d = Enlaces de flujo de los circuitos de hierro de eje en cuadratura (pu)
- \bar{e}_d^a = Enlaces de flujo de los devanados de amortiguación de eje en cuadratura (pu)
- E_{fd} = Voltaje de campo (pu)
- γ_{ed} = Enlaces de flujo de los devanados de amortiguación de eje directo (pu)

ψ_a'' = Componente de eje directo de los enlaces de flujo subtransientes del rotor (pu)

ψ_q'' = Componente de eje en cuadratura de los enlaces de flujo subtransientes del rotor (pu)

3.3 INFLUENCIA DE LA SATURACION

La saturación nos presenta un problema en el análisis de las máquinas sincrónicas. Se obtiene una considerable simplificación al asumir que las reactancias de pérdidas de todos los devanados son independientes a la saturación. Las reactancias mutuas serán afectadas de la siguiente manera:

$$X_{ad} = K_{sd} X_{ad0} \quad (3.61)$$

$$X_{aq} = K_{sq} X_{aq0} \quad (3.62)$$

en las máquinas de rotor cilíndrico K_{sd} y K_{sq} dependen de los enlaces de flujo mutuo totales y sus valores se los puede considerar iguales:

$$K_{sd} = K_{sq} = K_{sat} \quad (3.63)$$

El efecto de la saturación es representado usando un factor de saturación K_{sat} y los valores corregidos de X_d y X_q son expresados como:

$$X_d = K_{sat} X_{d0} \quad (3.64)$$

$$X_q = K_{sat} X_{q0} \quad (3.65)$$

Los valores iniciales tanto del ángulo δ como del voltaje de campo son funciones de X_d y X_q , por tanto se verán afectados al representar la saturación.

El factor de saturación K_{sat} es una función de los enlaces de flujo del entrehierro $\Psi_{at} = \sqrt{\Psi_{ad}^2 + \Psi_{aq}^2}$ cuya relación es obtenida a partir de la curva de saturación de circuito abierto.

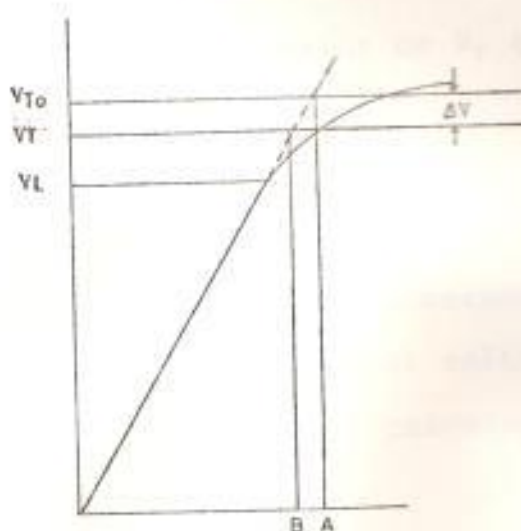


Fig. 3.9

Determinación del factor saturación

$$K_{sat} = \frac{V_T}{V_{T0}} \quad (3.66.a)$$

$$K_{sat} = \frac{V_T}{V_T + \Delta V} \quad (3.66.b)$$

K_{sat} puede ser expresada como una función de V_T en la región no lineal:

$$\Delta V = A_{sat} e^{B_{sat} (V_T - 0.8)} \quad (3.67)$$

En la fig. 3.9 V_L es un valor de V_T que se lo asume igual a 0.8

Dentro del programa se considera la función de saturación tanto para el generador como para la excitatriz. La disminución del voltaje debido a la saturación, V , puede ser calculada a partir de la función de saturación.

Por semejanza de triángulos en la fig. 3.9 se obtienen las siguientes relaciones:

$$\frac{\Delta V}{A - B} = \frac{V_T}{B} \quad (3.68.a)$$

por tanto:

$$\Delta V = \frac{A - B}{B} V_T \quad (3.68.b)$$

$$\Delta v = S V_T \quad (3.69)$$

siendo S la función de saturación, luego:

$$\Delta V = S V_T = A_{\text{sat}} e^{\frac{B_{\text{sat}} (V_T - 0.8)}{e}} \quad (3.70)$$

Si se considera S_1 , la función de saturación para $V = 1.0$ y S_2 la función de saturación para $V = 1.2$, entonces:

$$(S_1) (1.0) = A_{\text{sat}} e^{\frac{B_{\text{sat}} (0.2)}{e}} \quad (3.71)$$

$$(S_2) (1.2) = A_{\text{sat}} e^{\frac{B_{\text{sat}} (0.4)}{e}} \quad (3.72)$$

y a partir de estas dos ecuaciones A_{sat} y B_{sat} pueden ser calculadas.

3.4 CIRCUITO EQUIVALENTE DE LOS MODELOS DE MAQUINAS SINCRONICAS A SER REPRESENTADOS

El programa ha sido diseñado de tal forma que reconozca cuatro variaciones del modelo básico de un generador sincrónico. El modelo IV representa en forma completa al turbo generador, los otros modelos son empleados de acuerdo a la cantidad de datos que se tienen o cuando el análisis puede ser hecho con un modelo simplificado. En la tabla 3.1 se muestran los cuatro modelos que pueden ser representados en nuestro programa:

TABLA 3.1

MODELO	Nº DE DEVANADOS DE AMORTIGUACION		CONSTANTE DE TIEMPO	REACTANCIA		
	eje q	eje d		x_d	x_d'	x_d''
I	-	-	T_{do}	x_d	x_d'	
II	1	-	T_{do} T_{qo}	x_d	x_d'	
III	1	1	T_{do} T_{qo} T_{d0}''	x_d	x_d'	x_d''
IV	2	1	T_{do} T_{qo} T_{d0}'' T_{q0}''	x_d	x_d'	x_d''

A continuación se muestran los circuitos equivalentes de los generadores sincrónicos. Los modelos I, II, III pueden ser derivados a partir del modelo IV ajustando ciertas reactancias al infinito.

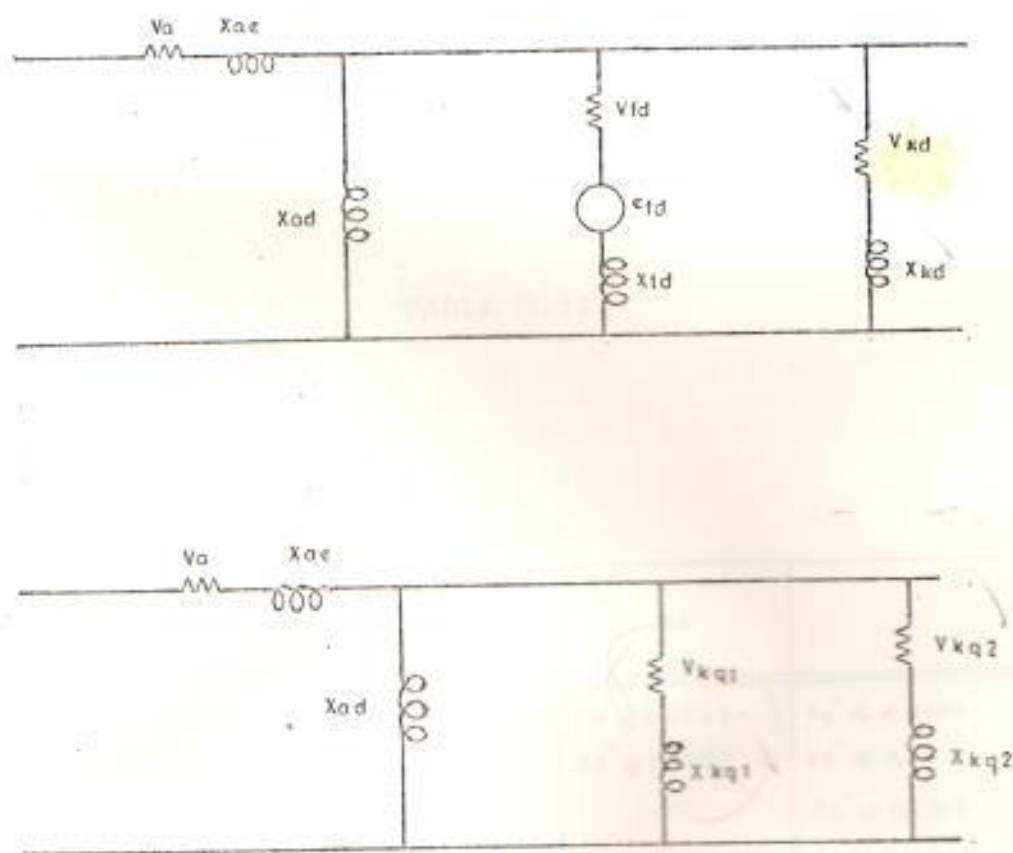


Fig. 3.10

Circuito equivalente a representarse

En el modelo III, X es infinita.

En el modelo II, X y X son infinitas.

En el modelo I, X , X y X son infinitas.

3.5 RESTRICCIONES EN LOS PARAMETROS DE ENTRADA AL PROGRAMA QUE REPRESENTA A LA MAQUINA SINCRONICA

En la tabla 3.II se muestra como son ajustadas las reactancias del generador sincrónico en cada modelo cuando dichas reactancias cumplen ciertas relaciones. De esta forma, se podrá escoger el modelo deseado de acuerdo con la selección apropiada de las reactancias.

TABLA 3.II

	IV	III	II	I
Si Los Parámetros Satisfacen La Relación		$X_q'' \leq 0.0002$	$X_q' \leq 0.0002$ $X_d'' \leq 0.0002$	$X_q' \leq 0.0001$ $X_d'' \leq 0.0002$ $X_q'' \leq 0.0002$
El Programa Ajustará		$X_{kq2} = .9999 \times 10^6$ $R_{kq2} = 0.0$	$X_{kq2} = .9999 \times 10^6$ $R_{kq2} = 0.0$ $X_{kd1} = 99.99 \times 10^6$ $R_{kd} = 0.0$	$X_{kq2} = 9999 \times 10^6$ $R_{kq2} = 0.0$ $X_{kd1} = 99.99 \times 10^6$ $R_{kd} = 0.0$ $X_{kq1} = 9999 \times 10^6$ $R_{kq} = 0.0$

CAPITULO CUARTO

MODELO MATEMATICO DEL SISTEMA DE EXCITACION DE UNA MAQUINA

SINCRONICA PARA UN ESTUDIO DE ESTABILIDAD

Existen tres sistemas principales de control que afectan directamente el funcionamiento de un generador sincrónico, estos son: el control del caldero, el gobernador y la excitatriz. En este capítulo trataremos lo relacionado con el sistema de excitación, dejando para el siguiente lo que tiene que ver con la generación de vapor y el gobernador.

Durante el desarrollo del capítulo segundo se habló en forma general del sistema de excitación, en lo que se refiere a su necesidad dentro de un sistema, su forma de actuar, los diferentes modelos que han ido apareciendo a medida que alcanzaba niveles superiores de desarrollo tanto la tecnología como la ingeniería de control, y, en forma muy escueta, se trato de las ventajas que ofrecía dentro del funcionamiento estable de un sistema de potencia. En este capítulo se hará un estudio más detenido del sistema de excitación, es así como

presentaremos inicialmente los fundamentos teóricos acerca de los elementos que conforman el sistema de excitación, su funcionamiento y la incidencia que tiene sobre la estabilidad de un sistema de potencia. Posteriormente se mostrara el sistema de excitación que emplearemos en este tesis, para finalmente presentar el modelo matemático y su introducción al programa de computación que emplearemos en nuestro estudio de estabilidad.

4.1 ANÁLISIS TEÓRICO

El sistema de excitación controla la fuerza electromotriz (f.e.m.) generada en los terminales del generador sincrónico y por tanto posee un control no solo sobre el voltaje de salida, sino también sobre el factor de potencia y la magnitud de la corriente; lo cual podrá ser observado mediante el diagrama fasorial de la fig. 4.1. que muestra a una máquina sincrónica unida a una barra infinita. Para realizar este diagrama presentaremos dos hipótesis muy valederas desde el punto de vista práctico; asumiremos: 1) Que el voltaje de la barra infinita permanece constante y, 2) La potencia de salida también permanece constante.

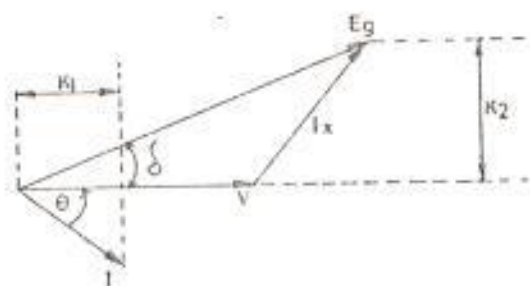


Fig. 4.1.

Diagrama fasorial de las condiciones iniciales.

La potencia de salida puede ser expresada como:

$$P = V I \cos \theta$$

donde:

V: Voltaje terminal del generador sincrónico.

$\cos \theta$: Factor de potencia.

y en términos del ángulo de torque (δ), como:

$$P = \frac{E_g V}{X} \text{ Sen } \delta$$

donde:

E_g : Voltaje interno del generador sincrónico.

X: Reactancia de la línea

Utilizando las dos hipótesis, tendremos que:

$$K_1 = I \cos \theta$$

$$K_2 = E_g \text{ Sen } \delta$$

En la fig. 4.2. a continuación se han considerado los valores constantes de K_1 y K_2 , pudiendo observar que al existir un aumento de E_g , la corriente del generador también se ve incrementada y que el factor de potencia disminuye.

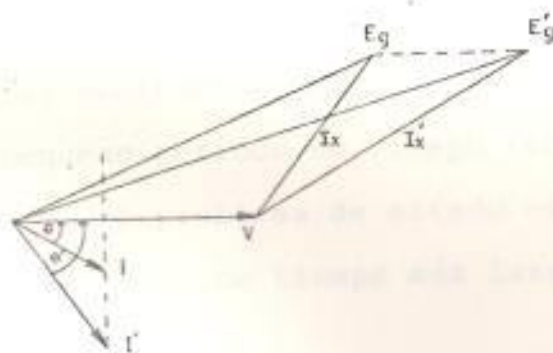


Fig. 4.2.

Diagrama fasorial considerando un incremento en E_g y manteniendo constantes P y V

Mediante estudios y por experiencia se ha establecido que el control de la excitación mejora el funcionamiento dinámico del sistema de potencia, lo cual ha llevado a los ingenieros de control a ampliar y mejorar los sistemas de excitación. Si bien es cierto que este control está limitado en lo referente a su efectividad, entonces el trabajo de los ingenieros es determinar este límite, lo cual

consiste en hallar los parámetros de diseño y control de la excitatriz, los cuales ofrezcan un buen funcionamiento del sistema a un costo razonable.

Como se observará mas adelante, los requerimientos del sistema de control de la excitación son diferentes al momento de producirse un disturbio que algunos segundos después; por tanto, ello nos lleva a pensar en dos tipos de estudios en lo referente al control de la excitación: el problema transitorio que abarca un pequeño período de tiempo (menor o igual a un seg.), y el problema de estado estable, el cual considera un período de tiempo más largo.

4.1.1 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE EXCITACION EN ESTUDIOS DE ESTABILIDAD TRANSIENTE Y DE ESTADO ESTABLE

En un estudio de estabilidad transiente, la máquina esta sujeta a un gran disturbio, usualmente una falla, la cual es mantenida por un corto tiempo, causando una reducción significativa en el voltaje terminal de la máquina y por tanto, en la capacidad de transferir la potencia adecuada. Si consideramos el problema de una máquina unida a una barra infinita (fig.4.3.); la potencia transferida esta dada por:

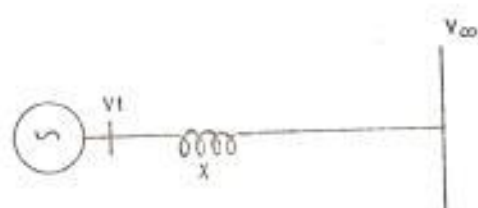


Fig. 4.3.

Sistema de máquina sincrónica unida a barra infinita

$$P = \frac{V_t V_\infty}{X} \text{ Sen } \delta \quad (4.4)$$

Donde V_t es el voltaje terminal de la máquina y V_∞ es el voltaje de la barra infinita. Nótese que si V_t se reduce entonces P se reduce en una cantidad similar. Para prevenir este tipo de reducción en P se requerirá de un sistema de excitación de acción muy rápida, para de esta manera forzar a que el campo mantenga sus valores normales y poder fijar V_t en valores razonables. Los atributos que deberá tener un regulador de voltaje para enfrentar una situación como la anterior, son: velocidad y un rango elevado del voltaje máximo que se puede alcanzar, esto es, el valor al cual

podrá llegar el voltaje en los terminales de la excitatriz cuando el sistema de excitación opera, esto aumenta la posibilidad de mantener a V_t en niveles normales. También, cuando la falla es despejada la reactancia X de la ecuación (4.4) cambia de valor, deberá haber una nueva actuación del sistema de excitación. Estos tipos de cambios violentos afectarán la habilidad que tiene la máquina sincrónica de entregar potencia eléctrica a partir de la potencia mecánica que recibe desde la turbina. Estos cambios pueden ser efectivamente controlados mediante cambios muy rápidos en el sistema de excitación.

Por otro lado, el problema de la estabilidad de estado estable es diferente del problema de la estabilidad transiente [de muchas maneras], por lo cual los requerimientos del sistema de excitación para este nuevo período son también diferentes. Como se mencionó en el capítulo primero, sección 1.2.1, entendemos por estabilidad de estado estable a la habilidad que tienen todas las máquinas de un sistema a ajustarse o mantenerse en sincronismo cuando se produce un cambio pequeño en el sistema, el cual puede ser una variación de carga.

Podemos considerar un sistema de varias máquinas que alimentan a una carga constante. Pues bien, asumiendo que en un momento dado la carga sufre un cambio en una cantidad pequeña; se notara que las máquinas que se hallen más cerca de la carga eléctrica sentirán más el cambio, mientras que aquellas que se encuentran alejadas de la carga experimentarán un cambio cada vez menor hasta que la variación no sea perceptible a aquellas máquinas que se hallen muy alejadas del lugar en el cual entro la carga.

Pasaremos a visualizar el funcionamiento del sistema de excitación en esta situación. En los sistemas electromecánicos, cuyo regulador de voltaje poseía banda muerta, a menos que el generador se hallara relativamente cercano al cambio de carga, la excitación de estas máquinas permanecía invariable únicamente aquellas máquinas que se hallaban cerca del cambio de carga reconocían la necesidad de incrementar su excitación, lo cual se lo llevaba a cabo en forma lenta. Los sistemas de excitación actuales presentan un tipo diferente de operación. Estos sistemas reconocen un cambio en la carga en forma inmediata; sea este un cambio perceptible en el voltaje en la corriente terminal o en ambos. Las

oscilaciones de cada máquina producirán una reacción en el sistema de excitación para tratar de corregirlas de tal forma que, con la misma rapidez con que se produce un cambio en el voltaje terminal deberá cambiar el voltaje de campo de la excitación.

Como se verá en las secciones siguientes, cuando se analicen los elementos que conforman el sistema de excitación; apareceran constantes de tiempo, las cuales conllevan un retardo, es por esto que existirá un retardo de tiempo entre el reconocimiento de la forma como debe variar el sistema de excitación y la conclusión de la operación de cambio, el cual es inevitable. Durante este retardo de tiempo el estado del sistema oscilante cambiará, causando un nuevo ajuste en el sistema de excitación. Este retraso en el sistema va en detrimento de su operación estable.

El tratamiento del problema variará de acuerdo al tipo de disturbio bajo consideración. Para un gran disturbio, tal como una falla, se forzará al máximo el campo de la excitación; se trata pues de un problema no lineal, y deberemos considerar la forma de la curva de magnetización en su

tratamiento. En el caso de un disturbio pequeño, el problema de la estabilidad puede ser abordado considerando la linealización del mismo, ya que en realidad no nos estamos apartando demasiado del punto de operación normal del sistema.

Para comprender el funcionamiento del sistema de excitación, consideraremos en forma separada cada uno de los elementos que lo constituyen.

4.1.2 ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE EXCITACION DE REGULACION CONTINUA

A continuación describiremos un sistema de control de acción continua, es decir, aquel en el cual la señal de control está siempre presente, la cual hace actuar al sistema en forma proporcional al error. La mayoría de los sistemas de control de excitación actualmente funcionan de esta manera. Analizaremos en particular el sistema "Boost-Buck", por cuanto será uno similar a este el que se implementará en nuestro programa de computadora.

Este sistema de excitación toma el voltaje de los terminales del generador sincrónico (V_t) y mediante transformadores de potencial logra una señal adecuada para que a través de un sistema rectificador obtener la señal d.c. que al ser

comparada con una señal de referencia V_{ref} , nos da una señal de error V_e .

Esta señal V_e será amplificada al pasar por el amplificador (en este caso del tipo rotativo) para ser utilizado este valor en el circuito de la excitatriz. La excitatriz es del tipo autoexcitada en paralelo.

Al producirse una variación en V_t variarán también V_e y V_r con lo cual el voltaje de salida de la excitatriz V cambiará de valor, de tal forma que también lo hará tratando siempre de mantener el voltaje de salida del generador síncrono V_t en su valor nominal.

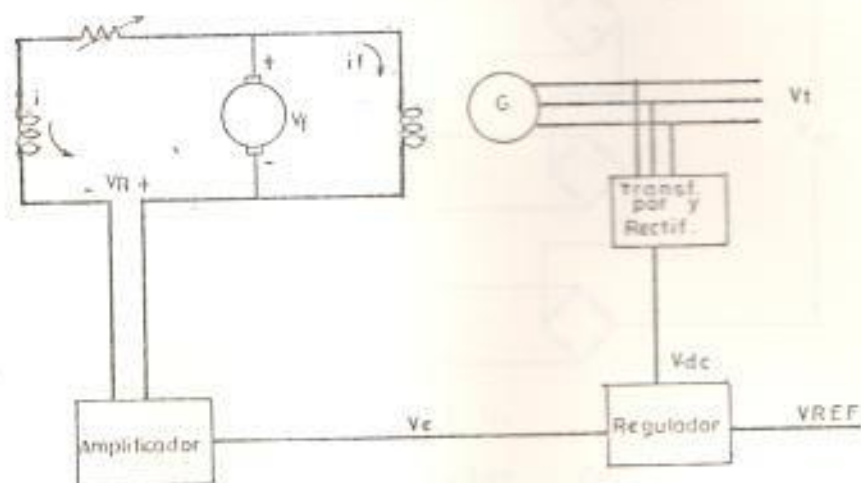


Fig. 4.4.

Diagrama de un sistema Boost-Buck

Presentaremos este tipo de sistema en sus componentes fundamentales y analizaremos cada uno de los mismos, para luego por analogía mostrar el sistema de excitación que se empleará en nuestro estudio.

TRANSFORMADOR DE POTENCIAL Y RECTIFICACION

Una configuración posible puede ser la de conectar los secundarios de los transformadores de potencial a los puentes rectificadores en serie (fig. 4.5). De esta forma el voltaje de salida V es proporcional a la suma o promedio de los valores RMS de los voltajes trifásicos.

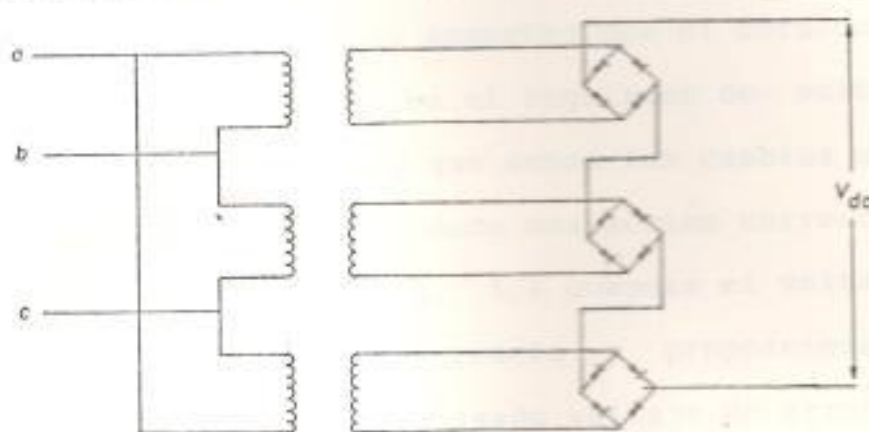


Fig. 4.5.

Conexión del transformador de potencial y rectificador

Este sistema introduce una constante de tiempo, la

cual viene dada por los elementos resistivos y capacitivos que conforman el elemento rectificador; este retardo del sistema es pequeño y se lo puede asumir como $0 < \tau_r < 0.05$ seg.

Si tomamos al voltaje promedio RMS como V_t , tendremos:

$$V_{dc} = K_R V_t / (1 + \tau_r s) \quad (4.5)$$

donde K_R es una constante de proporcionalidad y τ_r es la constante de tiempo del rectificador.

REGULADOR DE VOLTAJE

Se considera en muchos aspectos que el corazón del sistema de excitación es el regulador de voltaje. Este es un dispositivo que sensa los cambios en el voltaje de salida y produce una acción correctiva. De acuerdo a la fig. 4.4 compara el voltaje V con un voltaje de referencia y proporciona el voltaje de salida V_e , llamado voltaje de error, el cual es proporcional a la diferencia entre los voltajes primero nombrados:

$$V_e = k (V_{ref} - V_{dc}) \quad (4.6)$$

Sin importar la velocidad de respuesta de la excitatriz, ella no alterará su salida hasta que no sea instruida en tal sentido por el regulador de voltaje. La calidad del sistema de excitación dependerá principalmente del tipo de regulador de voltaje que se emplee.

EL AMPLIFICADOR

En nuestro caso, se empleará un regulador de voltaje con amplificador rotativo, el cual se lo analizará a continuación.

En sistemas que emplean amplificador rotativo para variar el campo de una excitatriz piloto; aun no se ha dilucidado claramente si el amplificador rotativo es una parte del regulador de voltaje o si se trata de una parte de la excitatriz piloto. Nosotros tomaremos la primera hipótesis, es decir, consideraremos al amplificador rotativo como la última etapa de elevada ganancia, del regulador de voltaje.

La operación de un sistema con amplificador rotativo se lo analizará tomando en cuenta la fig. 4.6, la cual es similar a la fig. 2.9 del segundo capítulo. Esta conexión se la llama conexión

"boost-buck", ya que dependiendo de la polaridad el amplificador rotativo está en posición de ayudar o de oponerse al campo de la excitatriz y de esta forma elevar o disminuir la excitación.

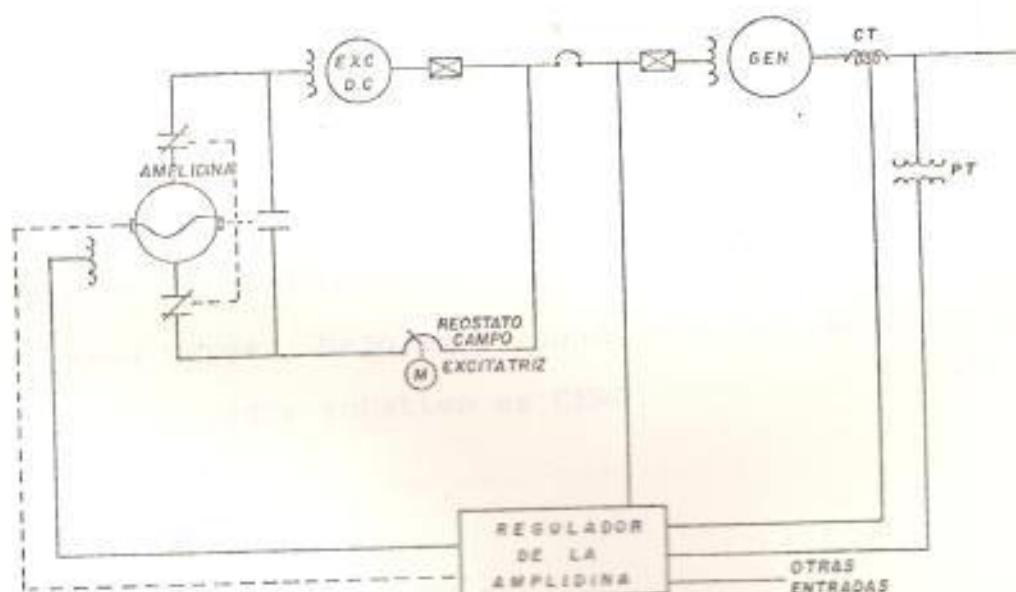


Fig. 4.6.

Sistema de excitación con excitatriz conmutador-generador d.c.

Como se puede ver en la fig. 4.6., el generador sincrónico es excitado por una excitatriz que a su vez es autoexcitada en paralelo. El circuito de campo de la excitatriz puede ser controlado ya sea en forma manual al eliminar el amplificador rotativo mediante el cierre de los contactos de un relé; o en forma automática con el amplificador, dando una retroalimentación de acuerdo al voltaje

de error, para incrementar o disminuir la corriente de campo.

La característica de control puede ser mejor entendida examinando la fig. 4.7. El réostato de campo es ajustado para intersectar la curva de magnetización del generador sincrónico en el punto correspondiente al voltaje terminal nominal, es decir, el voltaje de la excitatriz necesario para mantener el voltaje generado en su valor nominal de plena carga. Bajo esta condición el voltaje del amplificador rotativo es CERO.

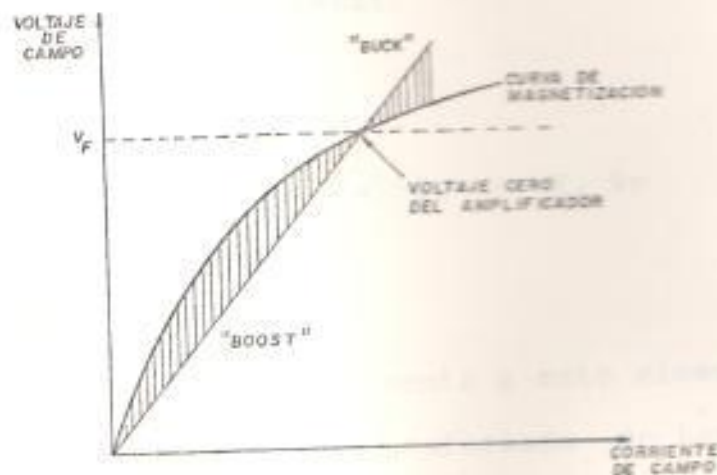


Fig. 4.7.

Característica V-I que define las regiones "boost y buck"

Si la carga del generador se reduce, el voltaje

terminal del generador se incrementa. El circuito sensor de voltaje detecta este aumento y produce que el amplificador rotativo reduzca la corriente de campo en el campo de la excitatriz. Esto reduce el voltaje de la excitatriz, lo cual a su vez reduce I_f , la corriente de campo del generador. De esta forma el área sombreada sobre el punto de ajuste es llamada la región BUCK de voltaje. Razonando de manera similar se definirá el área bajo el punto de referencia como la región BOOST de voltaje.

En cualquier caso asumiremos una amplificación de voltaje en forma lineal:

$$\tau_A \frac{dV_R}{dt} + V_R = K_A V_e$$

La expresión que representa a este elemento se le puede aplicar la transformada de Laplace, para llevar la expresión al dominio de la frecuencia:

$$V_R = K_A V_e / (1 + \tau_A s)$$

Se ha considerado al amplificador con una constante de tiempo τ_A y una constante K_A .

LA EXCITATRIZ

Es de interés nuestro el realizar el análisis de las ecuaciones que representan a la excitatriz para el sistema de regulación "Boost-Buck".

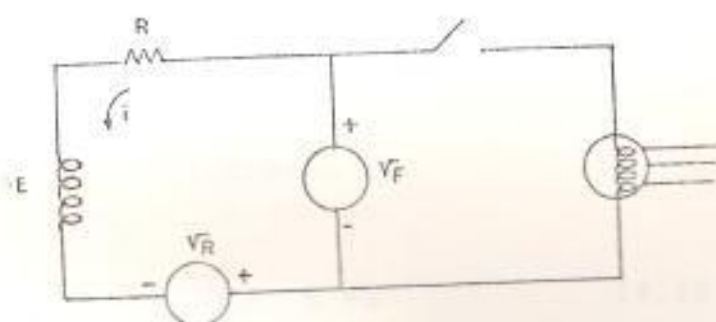


Fig. 4.8.

Excitatriz autoexcitada con un amplificador rotativo

Haciendo la sumatoria de voltajes del circuito anterior obtendremos:

$$\frac{d\psi_c}{dt} + R i = V_F + V_R \quad (4.8)$$

es preferible pensar en terminos del flujo de campo ψ_c en vez de en los enlaces de flujo ψ_L . Si asumimos que el flujo de campo enlaza N vueltas, tendremos:

$$N \frac{d\phi_e}{dt} + R \dot{I} = \dot{V}_F + \dot{V}_R \quad (4.9)$$

Ya que las curvas de magnetización son hechas tomando como coordenadas a las variables \dot{I} y \dot{V}_F , reemplazaremos $\dot{\phi}_e$ en la ecuación (4.9) por un término que involucre \dot{V}_F . Asumiendo que la excitatriz rota a velocidad constante, su voltaje \dot{V}_F es proporcional al flujo del entrehierro ϕ_a .

$$\dot{V}_F = K \phi_a \quad (4.10)$$

El flujo de campo tiene dos componentes; la componente de pérdidas que comprende del 10% al 20% del total, atraviesa un camino de elevada reluctancia a través del espacio entre los polos. Este flujo no enlaza a todas las N vueltas de los polos y se lo trata como proporcional a ϕ_a o proporcional a la corriente \dot{I} . Entonces:

$$\phi_e = C \phi_a \quad (4.11)$$

Además:

$$\phi_e = \phi_a + \phi_c \quad (4.12)$$

$$\phi_e = (1 + C) \phi_a$$

$$\phi_E = \sigma \phi_a \quad (4.13)$$

σ es llamado el coeficiente de dispersión y toma valores comprendidos entre 1.1 a 1.2.

Sustituyendo la ecuación (4.13) en la (4.9)

$$N \frac{d(\sigma \phi_a)}{dt} + R \dot{I} = \mathcal{V}_F + \mathcal{V}_R \quad (4.14)$$

Utilizando la ecuación (4.10):

$$\frac{N \sigma}{K} \left(\frac{d \mathcal{V}_F}{dt} \right) + R \dot{I} = \mathcal{V}_F + \mathcal{V}_R$$

$$\mathcal{T}_E \frac{d \mathcal{V}_F}{dt} + R \dot{I} = \mathcal{V}_F + \mathcal{V}_R \quad (4.15)$$

donde $\mathcal{T}_E = (N \sigma / K)$; esta ecuación (4.15) es no lineal ya que \mathcal{V}_F es una función no lineal de \dot{I} .

Si tomamos en consideración el efecto de saturación, la solución tendrá resultados más realistas. A continuación presentaremos la curva de magnetización.

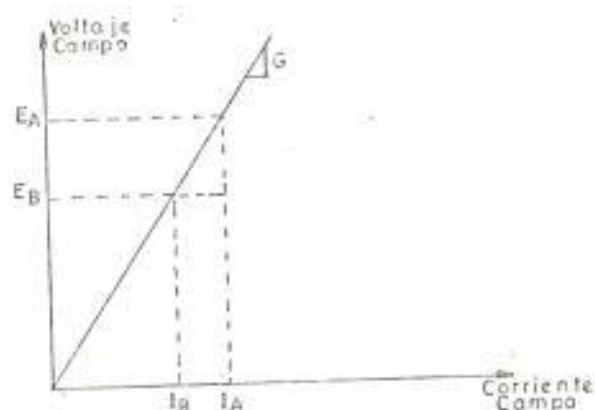


Fig. 4.9.

Curva de magnetización de la excitatriz

Se define a la función de saturación como:

$$S_s = (I_A - I_B) / I_B \quad (4.16)$$

y se podrá mostrar que:

$$I_A = (1 - S_s) / I_B \quad E_A = (1 + S_s) E_B \quad (4.17)$$

La función S_s es no lineal y puede ser aproximada por una función no lineal conveniente a través del rango de operación. Si la línea del entrehierro tiene una pendiente de $1/G$, se podrá escribir a la corriente total como:

$$I = G \mathcal{V}_F (1 + S_s) \quad (4.18)$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación (4.15):

$$\mathcal{T}_E \frac{dV_F}{dt} = (V_F + V_R) - R G V_F - R G V_F S_E \quad (4.19)$$

Si consideramos el voltaje de la excitatriz en forma normalizada ($E_{FD} = V_F$), la ecuación que representa al sistema será:

$$E_{FD} = (V_R - E_{FD} S_E) / (K_E + \mathcal{T}_E S) \quad (4.20)$$

$$K_E = R G - 1$$

4.2 REPRESENTACION DEL SISTEMA DE EXCITACION

A continuación se presentará el modelo matemático del sistema de excitación a ser utilizado en este trabajo. Inicialmente se hará una breve reseña histórica del desarrollo de los modelos matemáticos como herramientas de trabajo dentro de los estudios de los sistemas de excitación, posteriormente presentaremos el tipo de sistema en el cual estaremos trabajando con sus respectivas ecuaciones y el diagrama de bloques que resulte, para finalmente presentar el circuito equivalente del sistema de excitación ha ser implementado en nuestro programa de computadora.

Como el uso de las computadoras se ha visto incrementado en los últimos años y de igual forma los programas para representar al sistema de excitación, se ha podido observar que las diferencias entre estas representaciones matemáticas consistían más en la forma de empleo de los datos que en la exactitud de la misma. Reconociendo este hecho, la IEEE forma un grupo de trabajo alrededor de 1960 para lograr la estandarización de dichos modelos; este grupo presentó el reporte final en 1967, normalizando la representación de los sistemas de excitación en cuatro tipos diferentes e identificando el sistema comercial al cual pertenecía cada uno. Estos modelos permiten alcanzar un cierto grado de complejidad de acuerdo a los datos de que se disponga o a la importancia que tenga una excitatriz en particular dentro del funcionamiento de un sistema eléctrico de potencia. Basándose en las descripciones generalizadas de estos cuatro modelos se han desarrollado representaciones lineales sencillas, así como no lineales muy complejas de los sistemas de excitación.

Los modelos que describen al sistema de excitación utilizan un sistema en pot. unidad (p.u.), ajustando a 1 pu el voltaje nominal del generador y 1 pu el

voltaje requerido por la excitatriz para producir el voltaje nominal del generador sobre la curva del entrehierro del mismo. Lo anterior significa que en un sistema sin carga y despreciando la saturación $E = 1$ pu da exactamente $V = 1$ pu.

A continuación se presentan los símbolos utilizados en los modelos descritos por la IEEE, y que concuerdan con cada uno de los elementos que forman un sistema típico de regulación continua, tal como el que se emplea en nuestro estudio.

E_{fd} = Voltaje de salida de la excitatriz.

I_f = Corriente de campo del generador.

V_t = Voltaje terminal del generador.

I_t = Corriente terminal del generador.

K_A = Ganancia del regulador.

K_E = Constante de la excitatriz relacionada con un campo autoexcitado

K_F = Ganancia del circuito estabilizador del regulador

S_E = Función de saturación de la excitatriz.

V_S = Señal auxiliar de entrada (estabilizadora).

T_A = Constante de tiempo del amplificador del regulador

T_E = Constante de tiempo de la excitatriz.

T_F = Constante de tiempo del circuito estabilizador

del regulador

T_{R_1}, T_{R_2} = Igual que T_R pero para el sistema que emplea
rectificador rotativo

T_R = Constante de tiempo del filtro de entrada del
regulador

V_{Rmax} = Valor máximo de V .

V_{Rmin} = Valor mínimo de V .

V_{REF} = Voltaje de referencia para ajuste del regulador

V_{RU} = Ajuste del reóstato de campo.

Describiremos únicamente el modelo empleado en nuestro estudio, el cual es implementado por la Westinghouse Electric Corp.; y que a su vez es una versión mejorada y ampliada del Modelo Tipo 2 presentado por el comité de estudio de la IEEE. A continuación presentaremos en forma simplificada al modelo tipo 2 tanto en sus expresiones matemáticas como en su diagrama de bloques del sistema de excitación.

4.2.1 MODELO MATEMATICO DE LA EXCITACION

El tipo de excitación presentado en el modelo tipo 2, es el modelo con rectificador rotativo mostrado en el segundo capítulo (fig. 2.12) y que ahora lo presentamos en la fig. 4.10.

Este modelo incorpora un lazo de retroalimentación que se origina de la salida del regulador de voltaje en lugar de tomar como señal de referencia al voltaje de la excitación. Lo anterior se debe a la no presencia de escobillas, lo cual hace imposible tener disponible el voltaje de la excitación para la retroalimentación. La descripción de la IEEE de este sistema se lo muestra en la fig. 4.11.

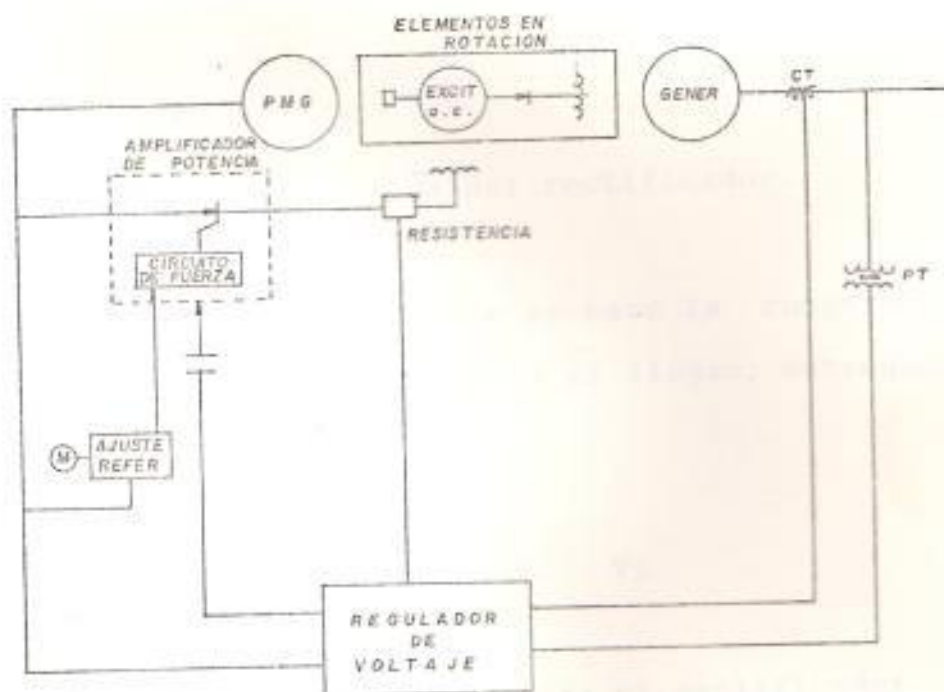


Fig. 4.10

Sistema de excitación con excitatriz
alternador-rectificador

Para llegar al diagrama de bloques de la fig.

anterior, emplearemos ecuaciones similares a aquellas presentadas para cada uno de los elementos que conforman el sistema de excitación en la sección 4.1.2.

Empezando con el elemento rectificador, tendremos:

$$\tau_R \frac{dV_1}{dt} + V_1 = V_t$$

donde:

V_1 : Voltaje a la salida del rectificador.

En el regulador de voltaje se hace la comparación de todas las señales que a él llegan; entregando una señal de error:

$$V_e = V_{REF} + V_s - V_1 - V_3$$

La expresión en el tiempo para el amplificador es similar a la mostrada en la sección 4.1.2, esto es:

$$\tau_A \frac{dV_R}{dt} + V_R = K_A V_e$$

La señal de retroalimentación que incorpora este sistema viene dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{d^2 V_3}{dt^2} + \left(\frac{\tau_{F1} + \tau_{F2}}{\tau_{F1} \tau_{F2}} \right) \frac{dV_3}{dt} + \frac{1}{\tau_{F1} \tau_{F2}} V_3 = \frac{K_F}{\tau_{F1} \tau_{F2}} \frac{dV_R}{dt}$$

Utilizando la expresión anterior y manipulando las ecuaciones, obtendremos:

$$V_3 = \frac{K_F s V_R}{(1 + \tau_{F1} s)(1 + \tau_{F2} s)}$$

La ecuación que describe la excitatriz será:

$$E_{FD} (K_E + S_E) = V_R - \tau_E \frac{d E_{FD}}{dt}$$

en el dominio de la frecuencia:

$$E_{FD} = \frac{V_R}{K_E + \tau_E s + S_E}$$

Con las ecuaciones anteriores podemos ahora proceder a unificarlas mediante un diagrama de bloques en el dominio de la frecuencia que muestre el funcionamiento integral del sistema.

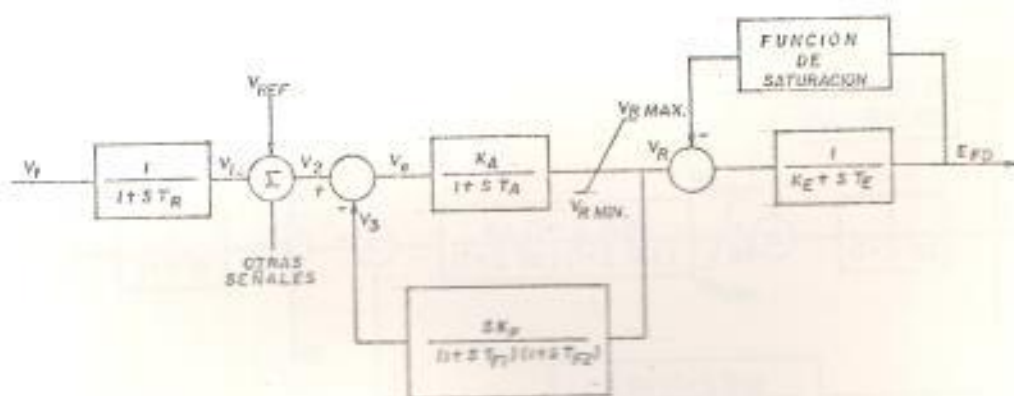


Fig. 4.11.

Diagrama de bloques del sistema de excitación

Se deberá notar que en el cambio de retroalimentación aparecen dos constantes de tiempo, T_p y T_{p2} , una de las cuales proporciona el retraso de tiempo de la excitatriz y es considerada como la "amortiguación mayor" y la segunda o "amortiguación menor", la cual está presente para amortiguar altas frecuencias.

4.2.2 CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA EXCITACION A REPRESENTARSE

La representación del sistema de excitación empleado en el programa ha sido simulada y desarrollada por la compañía Westinghouse.

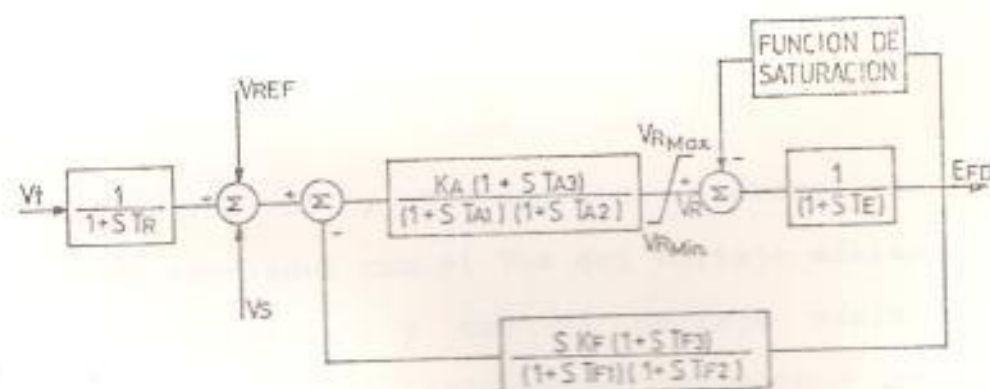


Fig. 4.12.

Diagrama de bloques del sistema de excitación a ser implementado.

El modelo desarrollado por el fabricante presenta un equipo físicamente más exacto, y su representación se la puede mostrar en la fig. 4.12. Las ecuaciones matemáticas de las cuales se deriva este circuito son similares a las presentadas en la sección 4.2.1 en el desarrollo del modelo tipo 2 del sistema de excitación.

4.3 PARAMETROS DE ENTRADA AL PROGRAMA

Algunos de los parámetros de entrada al programa han sido mencionados en el desarrollo de este capítulo, otros han sido definidos; a más de ellos, se mostrará en esta sección la manera de calcular dos parámetros empleados en el programa, los cuales son factores asociados con el problema de la saturación.

Los parámetros S_1 y S_2 son los factores de saturación asociados con el 75% del voltaje máximo de la excitatriz y con el voltaje máximo respectivamente. Estos valores son calculados en forma gráfica a partir de la curva de la excitatriz de acuerdo a lo mostrado en la fig. 4.13.

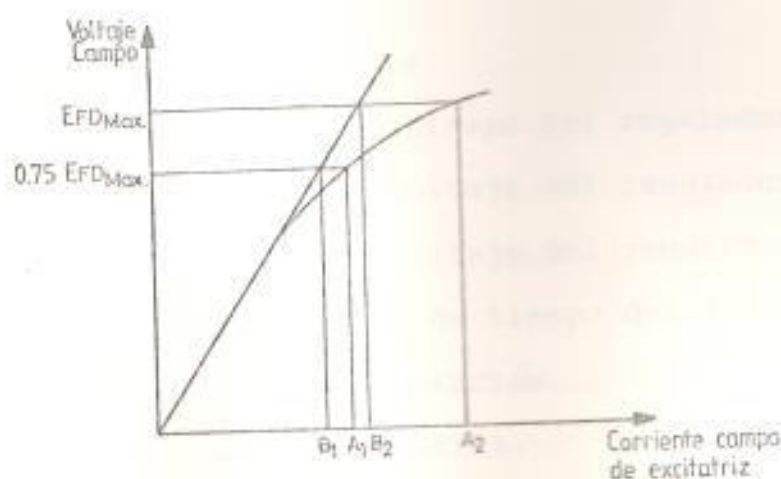


Fig. 4.13.

Cálculo de los parámetros S_1 y S_2 .

A 0.75 de E_{FD} :

$$S1 = \frac{A1 - B1}{B1}$$

A E_{FD} :

$$S2 = \frac{A2 - B2}{B2}$$

A continuación se van a enunciar las variables empleadas en el programa referentes al sistema de excitación, con una pequeña explicación de las mismas.

K_A = Ganancia del regulador.

T_{A1} = Primera constante de tiempo del regulador.

V_{Rmax} = Límite superior del voltaje del regulador.

V_{Rmin} = Límite inferior del voltaje del regulador.

T_{A2} , T_{A3} , T_{E3} = Constantes de tiempo del regulador y del camino de retroalimentación.

K_E = Constante de la excitatriz.

T_E = Constante de tiempo de la excitatriz.

$S1$ = Factor de saturación de la excitatriz al 75%

del voltaje máximo.

S_2 = Factor de saturación de la excitatriz al voltaje máximo.

$E_{FD\max}$, $E_{FD\min}$ = Voltajes máximo y mínimo de salida de la excitatriz.

T_{F1} , T_{F2} = Constantes de tiempo del camino de retroalimentación de la función de transferencia.

T_R = Constante de tiempo del transductor de voltaje terminal del generador.

4.4 DIAGRAMA DE FLUJO DEL MODELO A REPRESENTARSE

Una vez presentado el diagrama de bloques del modelo a ser implementado, se presentará a continuación el diagrama de flujo, el cual constituye el esquema fundamental del programa de computación ha ser implementado para representar al sistema de excitación.

En el diagrama de flujo aparecerán una serie de nuevas variables que son equivalentes a las que se usaron en los diagramas de bloques. Las razones de este cambio de variables se deben a la elaboración en sí del programa, dentro del cual tenemos arreglos que son definidos con un nombre característico, así como parámetros nombrados con sílabas bastantes similares que podrán ocasionar

dificultades en la interpretación de las ecuaciones.

Para facilidad de análisis, cada una de las nuevas variables se hallan definidas en el ANEXO correspondiente al final de esta tesis.

EMPEZAR

$$VX = XC(14) - AEX \ominus BEX - XC(9)$$

$$\frac{dXC(9)}{dt} = \frac{VX - KE \cdot XC(9)}{TE}$$

ES
TR=0 ?

NO

SI

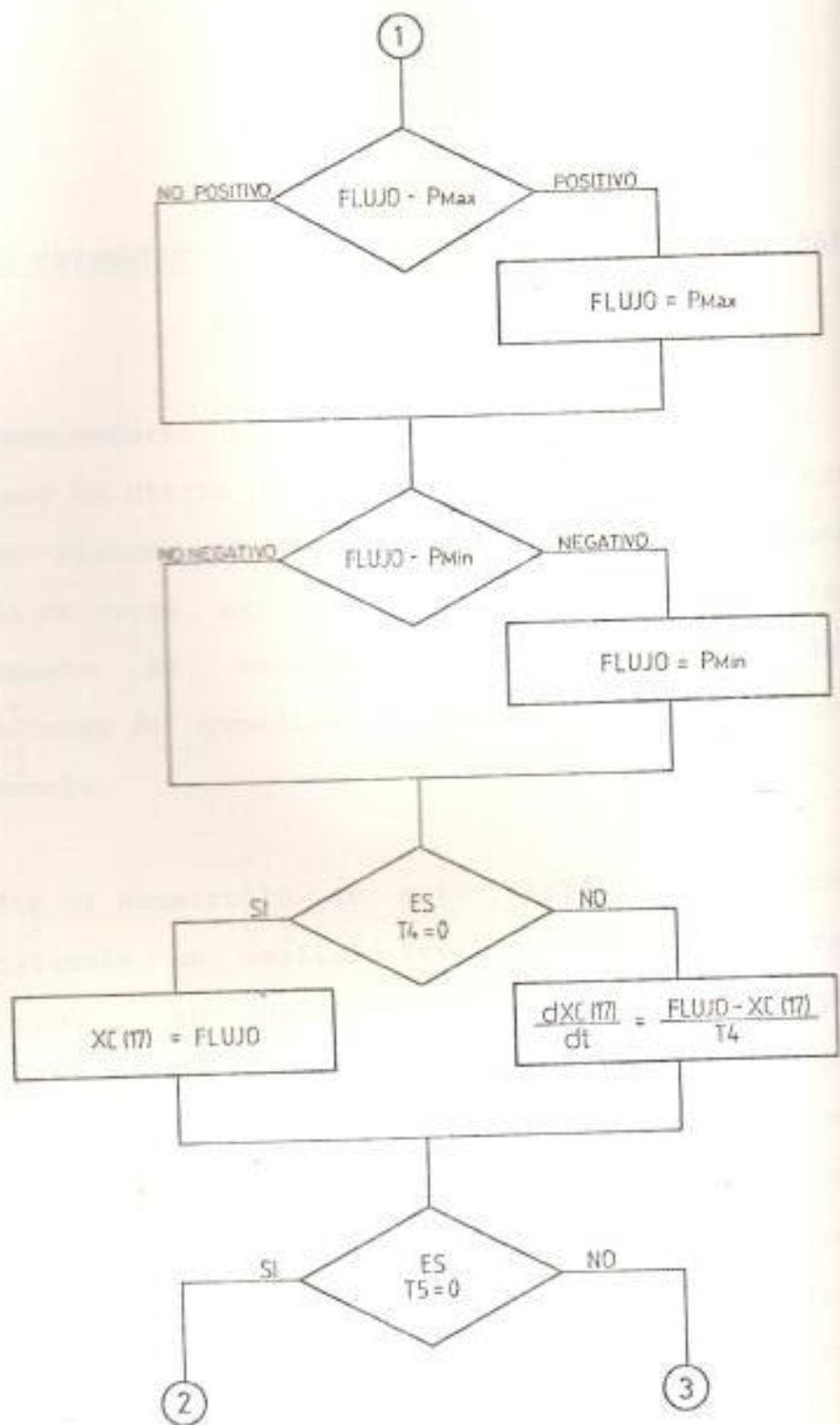
$$XC(13) = ET$$

$$\frac{dXC(13)}{dt} = \frac{ET - XC(13)}{TR}$$

$$VX2 = ER - XC(13) - XC(12)$$

$$\frac{dXC(10)}{dt} = \frac{KA \cdot VX2 - XC(10)}{TA1}$$

1



CAPITULO QUINTO

MODELO MATEMATICO DEL GOBERNADOR DE VELOCIDAD PARA EL ESTUDIO DE ESTABILIDAD

Los gobernadores de velocidad han sido empleados para mantener un cierto grado de estabilidad de estado estacionario de un sistema de potencia sometido a condiciones de cambio de carga, así como para prevenir que ocurra un incremento de velocidad demasiado grande durante condiciones de conexión o disparo en situaciones de emergencia.

Durante el desarrollo de este capítulo se presentará inicialmente un análisis teórico acerca del gobernador, indicando: su funcionamiento, diferentes tipos que existen, su utilización y las características que los diferencian. Se analizarán luego, los elementos principales que conforman el sistema de regulación de velocidad, presentándose en diagramas de bloques la operación de cada uno. Finalmente, se agruparán los diagramas de bloques para conformar la representación del sistema de regulación de velocidad y a partir de aquí presentaremos el diagrama de flujo de dicho sistema.

cual formará parte del programa que se implementa en esta tesis.

5.1 ANALISIS TEORICO DEL GOBERNADOR DE VELOCIDAD

Al operar un sistema eléctrico, la frecuencia debe mantenerse casi constante. Esto se logra mediante el gobernador, que es la parte esencial de las turbinas de vapor, hidráulicas y de gas. Sin embargo por si solo no puede realizar esto satisfactoriamente cuando el sistema se compone de varias estaciones generadoras interconectadas mediante líneas de transmisión de alto voltaje. Para mantener una operación estable y económica, se requieren medios adicionales de control.



Fig. 5.1

Diagrama de bloques del sistema de control de velocidad

En la fig. 5.1 se muestran los elementos que conforman el sistema de control de velocidad, en forma de diagrama de bloques.

El sistema está en equilibrio de velocidad únicamente cuando el torque de la turbina T_T es igual al torque resistente del generador, T_e , este último depende principalmente de la demanda eléctrica de los consumidores en todo instante.

En años recientes el uso extensivo de relojes eléctricos ha enfatizado la necesidad de una cuidadosa regulación de la frecuencia en los sistemas eléctricos; ya que se espera que los relojes se mantengan con errores mínimos en segundos. Aunque aparentemente esta es la razón principal para la regulación de la frecuencia, en realidad la verdadera importancia es la necesidad de mantener operando correctamente las estaciones generadoras conectadas en paralelo. El mantener la hora exacta es sólo un subproducto del propósito fundamental de una cuidadosa regulación de la frecuencia.

Otro factor es la relación entre la frecuencia de un sistema y la velocidad de los motores que trabajan dentro del mismo. Puesto que en muchos casos la velocidad del motor varía según la frecuencia en e

sistema, se requiere un control bastante cuidadoso de la misma.

Puesto que el control de carga y frecuencia del sistema depende de los gobernadores de las turbinas, debemos conocer el funcionamiento del gobernador. La fig. 5.2 muestra las características principales del gobernador. Mediante un ajuste determinado, existe una relación definida entre la velocidad de la turbina y la carga que acopla a la turbina. Si se reduce la carga de la turbina, aumenta la velocidad. Por ejemplo, en la fig. 5.2, supóngase que en el punto A la turbina lleva una carga del 75% a una velocidad del 97%. Al bajar la carga al 50%, la velocidad aumentara al 98%, si no se cambia el ajuste del gobernador.

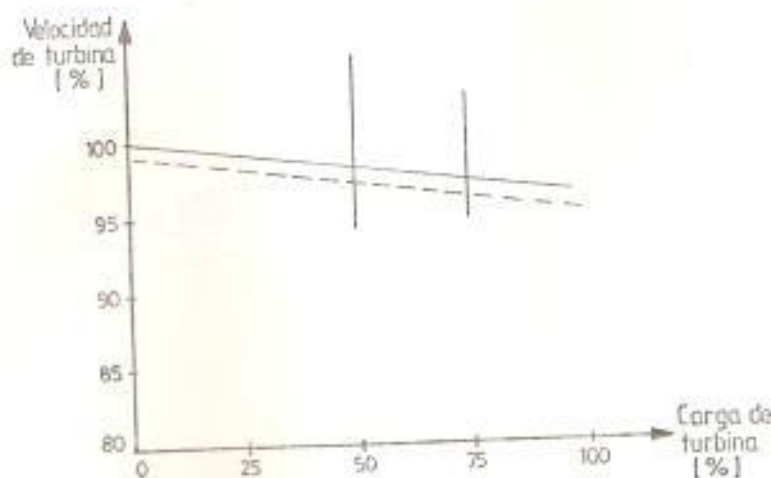


Fig. 5.2

Característica carga-velocidad de una turbina

La relación velocidad-carga puede ajustarse cambiando el ajuste del gobernador, mediante la alteración de la tensión del resorte en el gobernador del tipo de contrapeso giratorio (el cual será explicado más adelante). En la fig. 5.2 la línea punteada muestra el nuevo ajuste requerido para llevar la nueva carga del 50% a la velocidad original del 97%.

En la práctica este cambio en las características del gobernador se realiza operando a distancia, desde el tablero de mando, el motor de control del gobernador. Puede ajustarse una turbina para llevar una carga dada con la velocidad requerida. Aun cuando las características del gobernador mostradas en la fig. 5.2 representan una relación ideal, en la práctica las características se alejan de la relación en la línea recta.

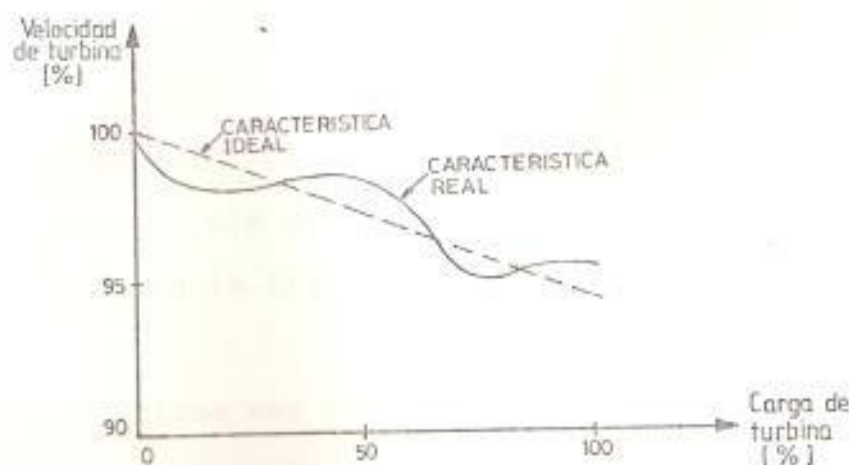


Fig. 5.3

Característica real carga-velocidad de la turbina

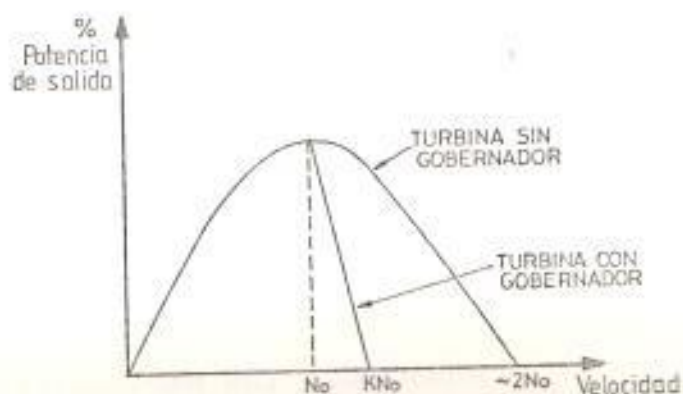
La fig. 5.3 muestra las características típicas de un turbo-generador grande de vapor. Las características se complican por los diversos puntos de apertura de válvulas en la operación de la turbina, donde se tiene un cambio brusco en la relación velocidad-carga.

Como ya se ha dicho, el gobernador está diseñado para controlar la turbina, de tal forma que dará una característica descendente de la potencia de salida cuando ocurre una elevación en la velocidad del eje por encima de su valor nominal. La potencia de salida de la turbina es controlada variando el flujo de vapor mediante el cierre o la apertura de válvulas de paso ubicadas entre el caldero y la turbina. Estas válvulas son controladas por el gobernador de velocidad.

La característica de operación, ante un disturbio, de una turbina sin gobernador y de una que lo posee es mostrada en la fig. 5.4.

Al producirse una variación correspondiente al 100% en la potencia de salida de una turbina, existirá un cambio en la velocidad de la misma, el porcentaje de cambio K a partir de la velocidad nominal, es llamado

la REGULACION DE LA TURBINA. Un valor normal de la regulación es de aproximadamente un 4% de la velocidad nominal.



N_o : Velocidad nominal

K : Regulacion

Fig. 5.4

Característica potencia-velocidad de una turbina

Además, los elementos del sistema de gobernación nos proporcionan:

1.- Control de velocidad de la turbina cuando ella se encuentra operando en vacío, para permitir que la unidad sea sincronizada a la red.

2.- Control de la carga de la turbina cuando opera en paralelo con otras unidades de generación.

3.- Protección, para asegurar la operación

correcta de la turbina.

5.1.1 DEFINICIONES DE LAS CARACTERISTICAS DEL GOBERNADOR DE VELOCIDAD

Al tratar sobre gobernadores y su uso en la operación del control de energía del sistema, debemos conocer ciertas definiciones básicas, como:

Sensibilidad del gobernador

Es el grado del cambio de velocidad requerido para ocasionar un cambio en la producción de energía de la turbina.

Estabilidad del gobernador

Es la habilidad para evitar cambios falsos o excesivos en la entrada de energía a la turbina.

Caida de velocidad

Es la reducción del valor de la velocidad al cambiar la turbina de cero a carga completa.

Tiempo muerto

Es el tiempo transcurrido desde el cambio inicial de la velocidad hasta el primer movimiento del regulador de la turbina.

5.1.2 FUNCIONAMIENTO DEL GOBERNADOR DE VELOCIDAD

El gobernador de velocidad requiere de un mecanismo complejo, de acción rápida y segura, cuyos elementos principales y sus funciones son:

- a) un elemento de acción inmediata a los cambios de velocidad, constituido generalmente por un regulador de bolas.
- b) una válvula de control en forma de carrete que suministra aceite a presión al servomotor o actuador, que acciona el mecanismo de control de la turbina, conectada a un tanque de presión con sistema de bombeo para el rápido suministro de aceite al sistema.
- c) el servomotor, constituido en principio por uno o dos pistones que reciben aceite a presión de la válvula de control y accionan el mecanismo de control de la turbina.

d) un mecanismo de recuperación, que vuelve el servomotor a su punto muerto, correspondiente al equilibrio entre la demanda de carga y la potencia desarrollada por la turbina.

Siguiendo el esquema de la fig. 5.5, en el cual las líneas llenas corresponden a la posición de equilibrio, o de carga y velocidad constantes, y las líneas de puntos a la posición desplazada por un cambio de velocidad, tenemos:

- Un aumento rápido en la carga frena ligeramente el eje de la turbina y hace que un motor eléctrico que actúa sobre el regulador de bolas (1 y 2 en la fig. 5.5) que recibe corriente de un generador separado, operando en sincronismo con la turbina, reduzca su velocidad. La fuerza centrífuga del sistema 2 se reduce entonces y la palanca flotante (3) baja, basculando alrededor del punto B y desplaza hacia abajo de su posición central o muerta a la válvula de control (4), mientras el extremo B de la palanca continúa aun en su posición original, sostenido por el sistema de conexiones al servomotor.

Apenas la válvula de control (4) es desplazada hacia abajo queda descubierta la entrada del

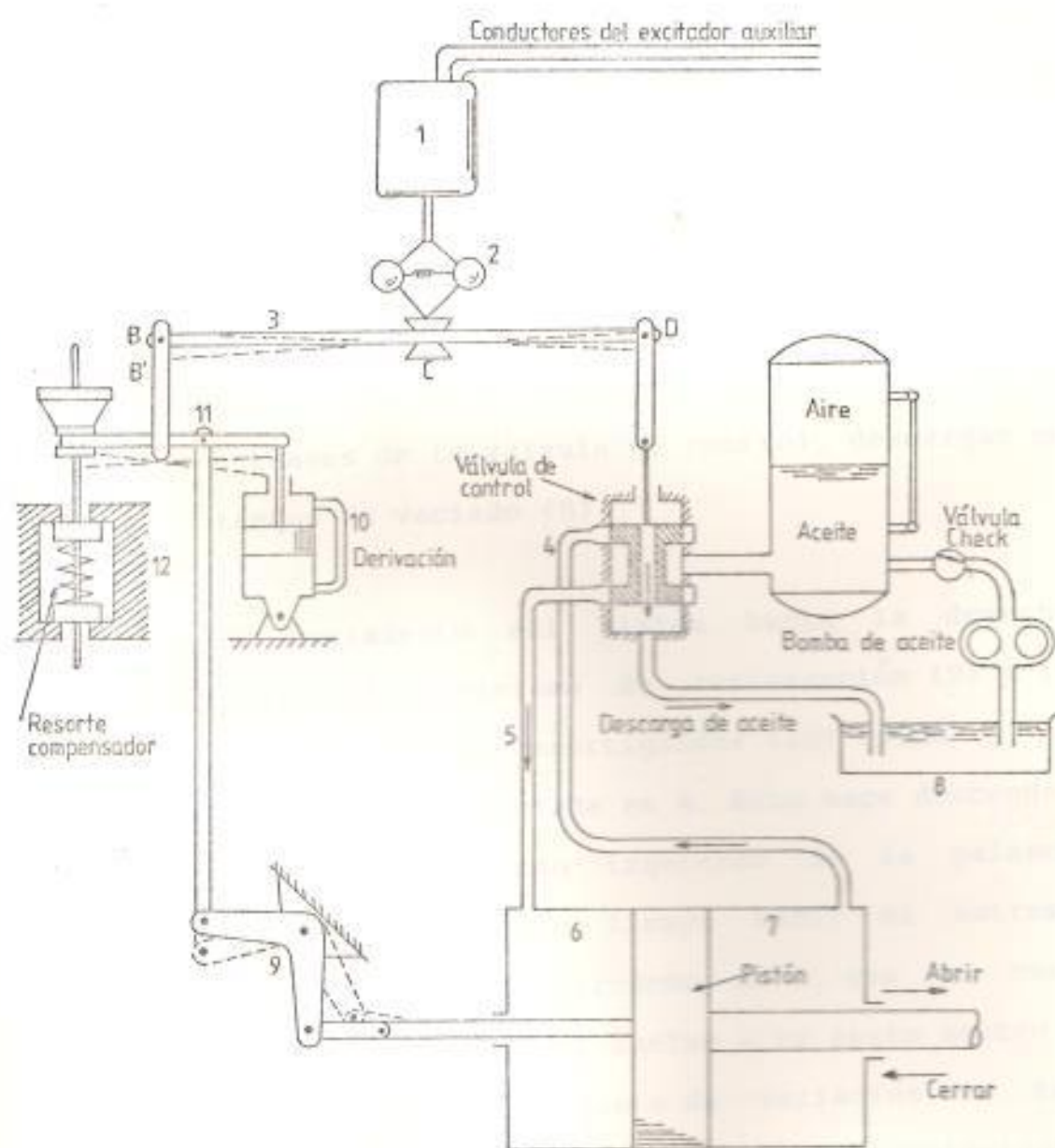


fig. 5.5.
GOBERNADOR DE VELOCIDAD

conducto superior (5) que va al servomotor, pasando aceite forzado desde el tanque a presión hasta el extremo izquierdo del cilindro (6) del servomotor, por el conducto que rodea al carrete de la válvula. La apertura del conducto inferior que sale de la válvula y va al extremo derecho del cilindro (7) es también descubierta en el mismo movimiento, haciendo de esta manera que el aceite contenido en el cilindro suba por dicho conducto y, a través de la válvula de control, descargue en el tanque de vaciado (8).

El movimiento del pistón hacia la derecha desplaza el mecanismo de restauración (9) y lo atrae hasta el tope amortiguador (10) unido a la palanca (11) articulada en A. Esto hace descender de B a B el extremo izquierdo de la palanca flotante y, al mismo tiempo subir el extremo derecho por rotación alrededor de C, con lo cual la válvula de control vuelve a su punto neutro y se suspende todo movimiento de variación en las válvulas o en las paletas del distribuidor, volviendo también a su posición normal el regulador de bolas.

La operación inicial por supresión de carga es, desde luego, inversa de la anterior.

El tope amortiguador (10) y el resorte espiral de compensación (12) tienen por objeto retardar los movimientos demasiado rápidos y amplios en la válvula de control y en el sistema restaurador, que darían lugar a variaciones bruscas y a inestabilidad en el sistema generador.

5.1.3 TIPOS DE GOBERNADORES

Existen 3 tipos generales de gobernadores de velocidad:

- a.) Mecánicos
- b.) Hidráulicos
- c.) Eléctricos

GOBERNADORES MECANICOS

Actualmente todas las turbinas operadas de acuerdo con las normas son controladas mediante un "Gobernador centrífugo" (mecánico), el cual es manejado desde el eje principal a través de engranajes, este gobernador de velocidad mecánico constituye un sistema de fuerzas balanceadas. La fuerza centrífuga de rotación de los pesos es balanceada por la fuerza elástica de un resorte y

la posición radial que tomen los pesos dependerá de la velocidad de rotación. A continuación nos referiremos al caso simplificado de un solo peso y de un resorte cuyo peso lo consideraremos despreciable, de acuerdo al esquema mostrado a continuación en la fig. 5.6.

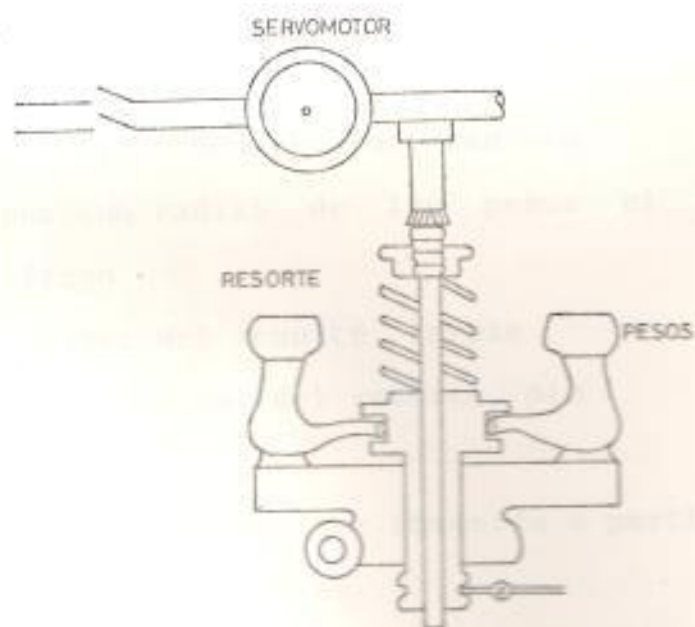


Fig.5.6

Gobernador centrífugo

La fuerza centrífuga de los pesos viene dada por:

$$F = m \omega^2 R$$

y la fuerza del resorte por:

$$F_s = S (R - a)$$

En las expresiones anteriores tenemos que:

W = peso en lbs.

ω = velocidad de rotación, rad/seg.

R = posición radial de los pesos el gobernador centrífugo

S = rigidez del resorte, lb/pie

a = radio natural del resorte, pie

El valor de R puede ser obtenido a partir de las expresiones anteriores.

El tipo de gobernador de velocidad presentado en la fig. 5.6 tiene un rango de operación tan amplio como la fuerza del resorte pueda ser ajustada por el tornillo. El resorte no es afectado por la fuerza centrífuga, el gobernador es fácil de diseñar aun cuando las fuerzas de fricción sobre los soportes del gobernador tienen valores superiores a los empleados para efectos de diseño. El cambio en el radio de los pesos es transmitido por medio de palancas a un collar de deslizamiento

y el movimiento axial de este collar hace actuar la palanca de control.

Para asegurar una respuesta rápida a los cambios de velocidad la inercia radial y las fuerzas de fricción deben ser pequeñas. La fricción en seco debe ser evitada ya que esto producirá que el aparato se vuelva insensible y produzca que la característica de gobernación de la velocidad tenga banda muerta y que para un cambio en la velocidad no proporcione el respectivo cambio en la potencia de salida. La excesiva fricción viscosa también se la deberá evitar, para prevenir que la respuesta del gobernador sea oscilatoria. La masa de los pesos y la rigidez del resorte deberán ser cuidadosamente escogidas para evitar la resonancia dentro del rango de velocidad en el que opera. Por tanto, un buen gobernador de velocidad deberá ser diseñado con pesos pequeños y la velocidad de rotación podrá ser incrementada para compensar las pérdidas que tiene la fuerza de salida. Los soportes o ejes del gobernador deberán ser bien lubricados para reducir la fricción.

GOBERNADORES HIDRAULICOS

El gobernador hidráulico para una turbina consiste de una bomba centrífuga manejada desde un eje principal, la cual suministra aceite a un cilindro, el cual contiene un resorte que podrá ser comprimido por un pistón o fuelle. La presión es proporcional al cuadrado de la velocidad, por tanto la posición del pistón o fuelle es una función de la velocidad.

GOBERNADORES ELECTRICOS

Un tipo de gobernador de velocidad eléctrico toma la forma de un generador de magneto permanente manejado a través del eje, el cual produce una onda a.c. cuya frecuencia es directamente proporcional a la velocidad del eje. Esta onda alimenta a un filtro eléctrico, el cual entra en resonancia a una frecuencia correspondiente a la velocidad nominal, y la salida es rectificadora para producir una señal d.c. proporcional a la diferencia entre la velocidad nominal y la actual. La señal d.c. de la velocidad de error es luego amplificada para producir la señal correctiva de velocidad f/K .

Otro diseño de gobernador de velocidad eléctrico utiliza una señal digital emitida por un generador de onda cuadrada, cuya señal es comparada con una señal de onda cuadrada de referencia generada por un cristal. La salida del comparador es rectificadora y amplificada para formar la señal de control requerida.

La principal ventaja del gobernador de velocidad eléctrico es la facilidad y exactitud con la cual la señal de velocidad puede ser formada y manipulada.

5.2 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE REGULACION DE VELOCIDAD DE UN TURBO-GENERADOR

En el diagrama de bloques de la fig. 5.7. se presenta la correlación que tienen el cambiador de velocidad del gobernador y el control automático de la generación con el sistema de control de la velocidad. El intervalo de tiempo empleado en la mayoría de los estudios de estabilidad es pequeño comparado con el tiempo que se requiere para que existan cambios significativos en la carga, por este motivo los equipos para llevar a cabo el cambio de carga no son representados.

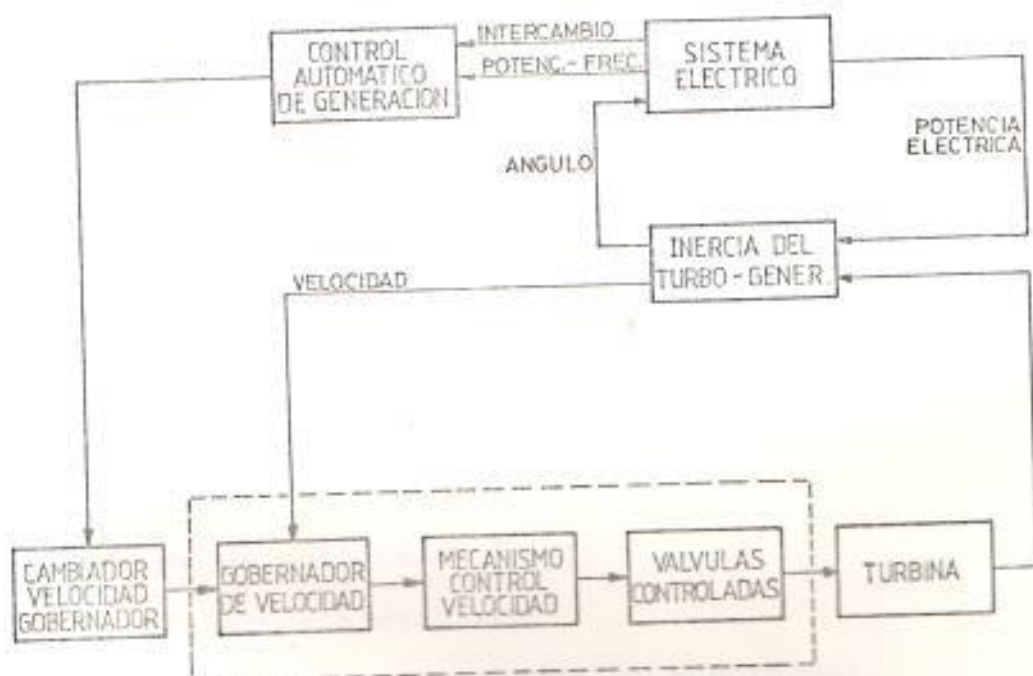


Fig. 5.7.

Sistema de regulación de velocidad

Se asumirá que el control de la turbina se lo realiza mediante válvulas controladas por el gobernador. No se considerará banda muerta en el gobernador, pues ello se lo consideraría si se estuviera estudiando exclusivamente el sistema de control de velocidad.

El sistema de regulación de velocidad para efectos de estudio se lo puede considerar formado por dos elementos principales a saber: 1) el gobernador de velocidad y 2) el sistema de vapor y la turbina. A continuación analizaremos en forma separada cada elemento, mostrando su configuración, el modelo matemático y su diagrama de bloques.

5.2.1 MODELO DE GOBERNADOR DE VELOCIDAD

MECANICO-HIDRAULICO

Un sistema de control de velocidad mecánico-hidráulico consta de los siguientes elementos:

- . gobernador de velocidad.
- . relé de velocidad.
- . servomotor hidráulico.
- . válvulas controladas por el gobernador.

Estos elementos se hallan relacionados de la manera como se muestra en la fig. 5.8.



fig. 5.8.

Diagrama de bloques

Haciendo referencia a la fig. 5.8., tenemos que el gobernador de velocidad produce una posición, la

cual se la asume como lineal, esta indicación de velocidad es instantánea, este elemento se lo puede representar como un transductor con una ganancia K , la cual es igual al recíproco de la regulación de dicho gobernador. La señal obtenida del CAMBIADOR DE VELOCIDAD DEL GOBERNADOR representa una especie de referencia tanto de carga como de velocidad y se la asume constante para el intervalo de tiempo que se toma en un estudio de estabilidad.

El rele de velocidad es representado con un amplificador con una constante de tiempo y una realimentación directa. Una curva no lineal, para compensar la no linealidad de las válvulas es ubicada entre el rele de velocidad y el servomotor. Este último es representado por un integrador con una constante de tiempo y una realimentación directa; este servomotor es el encargado de mover a las válvulas. Este dispositivo posee también límites en lo referente a su operación y ello es indicado a la entrada del integrador que lo representa. Además, tenemos un límite de posición, el cual tiene que ver con la máxima apertura que tienen las válvulas.

En un estudio de sistemas de potencia, la no

linealidad que presentan los mecanismos de control de velocidad es generalmente despreciado, excepto lo que tiene que ver con los límites nominales del servomotor y la posición de las válvulas, como se muestra a continuación en la fig. 5.9.

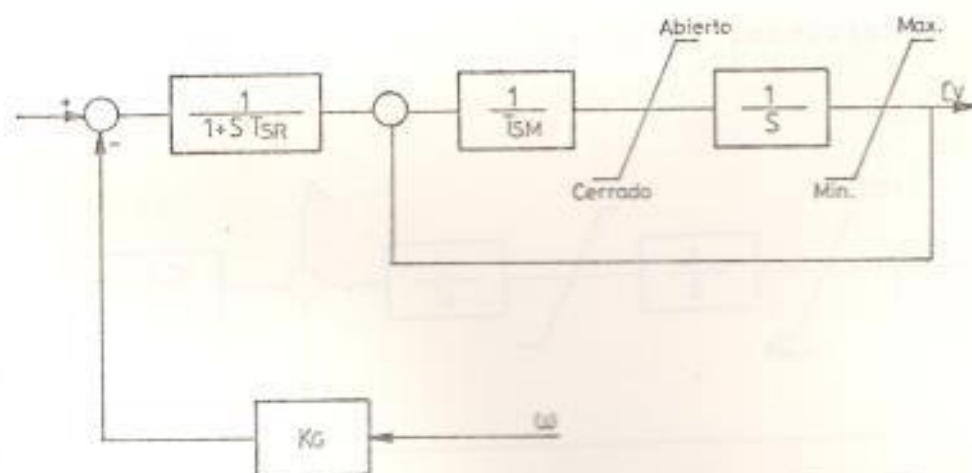


fig. 5.9.

Representación del gobernador mecánico-hidráulico

Los parámetros típicos para un sistema mecánico-hidráulico son:

$$K_G = 20$$

$$T_{SR} = 0.1 \text{ seg.}$$

$$T_M = 0.2 \text{ a } 0.3 \text{ seg.}$$

$$C_v = 0.1 \text{ pu/seg/válvula}$$

$$C_v = 1.0 \text{ pu/seg/válvula}$$

5.2.2 MODELO GENERAL DEL GOBERNADOR DE VELOCIDAD

El modelo del gobernador de velocidad de la fig. 5.10 puede ser usado para representar tanto a un sistema mecánico-hidráulico, como a un sistema eléctrico-hidráulico, mediante la selección apropiada de los parámetros que en él intervienen.

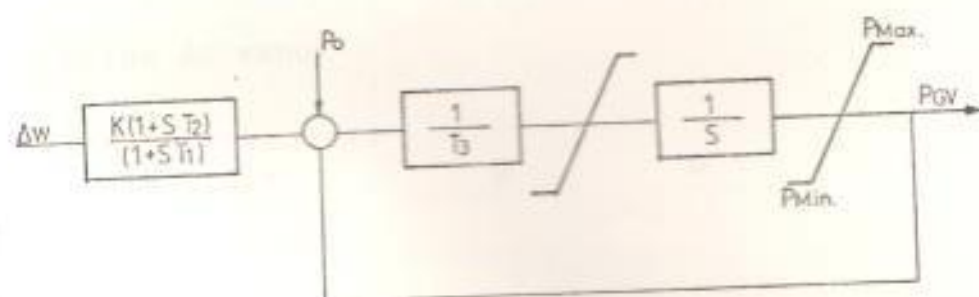


fig. 5.10.

Representación general del gobernador de velocidad

La tabla 5.1. contiene una lista de los parámetros típicos que se emplean en este diagrama de bloques para cada uno de los sistemas de control de velocidad que existen en el mercado.

Como se observa en la fig. 5.10, este modelo muestra una carga de referencia con una potencia inicial P_0 . Este valor inicial es combinado con los incrementos debido a la desviación de

TABLA 5.1

SISTEMA	CONSTANTES DE TIEMPO (seg.)		
	T	T	T
Mecánico-hidráulico	0.2-0.3	0	0.1
General Electric con + realimentación de vapor	0	0	0.025
General Electric sin realimentación de vapor	0	0	0.1
Westinghouse con + realimentación de vapor	2.8*	1*	0.15
Westinghouse sin realimentación de vapor	0	0	0.1

* La realimentación de vapor incluye la constante de tiempo T correspondiente a la caja de vapor.

+ Estos valores pueden variar considerablemente de una unidad a otra.

velocidad hasta obtener la potencia total, P_{GV} , sujeta a un retardo de tiempo T_3 , el cual es introducido por el mecanismo del servomotor.

5.2.3 SISTEMA DE VAPOR Y TURBINA

Todos los sistemas compuestos de turbina de vapor utilizan válvulas controladas por el gobernador a la entrada de la turbina de alta presión para controlar el flujo de vapor. La caldera y la tubería de entrada al primer cilindro de la turbina, así como los precalentadores y las tuberías de paso introducen retardos entre el movimiento de la válvula y el cambio en el flujo de vapor. El objetivo principal del modelar el sistema de vapor para estudios de estabilidad es tomar en consideración estos retardos. El flujo de adentro hacia afuera o viceversa a cualquier recipiente de vapor, se lo relaciona por una simple constante de tiempo.

Los cambios de presión a la entrada de las válvulas controladas por el gobernador pueden ser importantes en algunos estudios de estabilidad. Los controles del caldero son diseñados para regular la presión de la válvula, pero la respuesta del caldero no es lo suficientemente

rápida para compensar las variaciones de presión debidas al movimiento de las válvulas controladas por el gobernador. Se puede asumir que existe una presión en el generador de vapor, la cual permanece constante para el intervalo de tiempo que dura el estudio de estabilidad, y que un cambio de presión, que depende del cuadrado del flujo de vapor, ocurre en los tubos del caldero desde un punto de presión constante hacia las válvulas. En un caldero de tipo horizontal, el punto de presión constante se lo asume como que se encuentra dentro del hogar.

La variación de presión de las válvulas puede ser significativa al simular disturbios, lo cual dará como resultado cambios en la frecuencia muy grandes y prolongados.

CALDERO Y TUBERIA DE ALTA PRESION



Fig. 5.11

Caldero y válvulas controladas

Entre las válvulas controladas por el gobernador y la turbina de alta presión se encuentra un depósito de vapor llamado caldero, como se muestra en la fig. 5.11.

El caldero introduce un retardo de tiempo entre los cambios en el vapor que fluye por la válvula y el vapor que fluye en la turbina de alta presión. El modelo matemático de la fig. 5.12, muestra este efecto como una constante de tiempo.

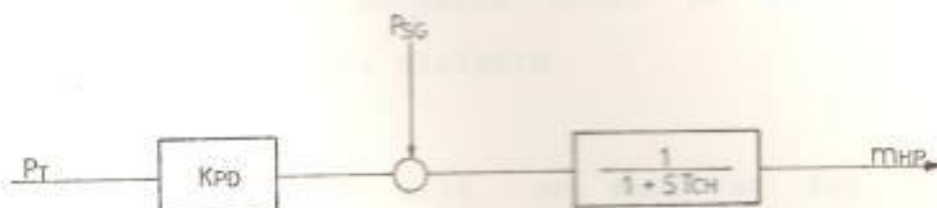


Fig. 5.12.

Modelo matemático de caldero y tubería de alta presión

La presión P_S es una presión interna del caldero, la cual se la asume como constante para nuestro intervalo de estudio y P_{SG} es una presión variable a la salida de las válvulas controladas por el gobernador. El parámetro K_{PD} es un coeficiente de caída de presión en las turbinas.

SISTEMAS DE TURBINA CON PRECALENTAMIENTO

A continuación presentaremos aquellos dos sistemas a ser empleados en nuestro estudio. Las constantes de tiempo T_{cH} , T_{RH} y T_{cO} representan retardos debido al caldero, tubería de entrada, precalentadores y tubería de paso, respectivamente.

Las fracciones F_{VHP} , F_{HP} , F_{IP} y F_{LP} son las porciones de la potencia total de la turbina desarrollada en cada cilindro.

En las fig. 5.13. y 5.14. se muestran los dos sistemas de turbinas con su correspondiente diagrama de bloques.



SISTEMA TANDEM COMPOUND
Simple precalentamiento

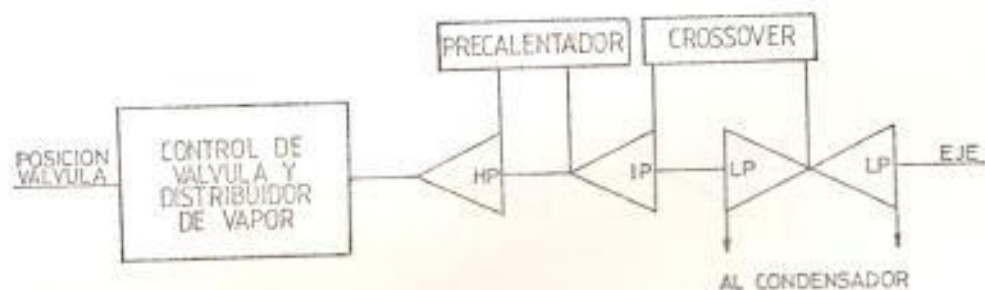


Diagrama esquemático

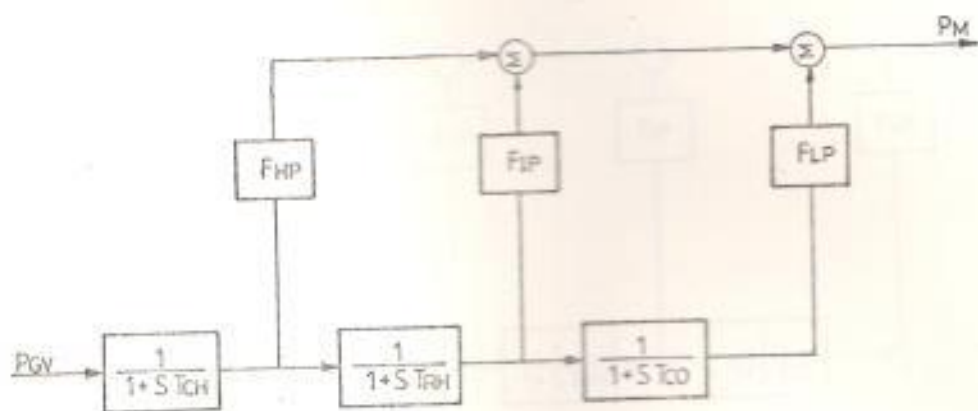


Fig. 5.13.

Diagrama de bloques de sistema con simple precalentamiento

SISTEMA TANDEM COMPOUND
Doble precalentamiento

ESUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Dpto. de Ingeniería Eléctrica
BIBLIOTECA
Inv. No. PGT-075

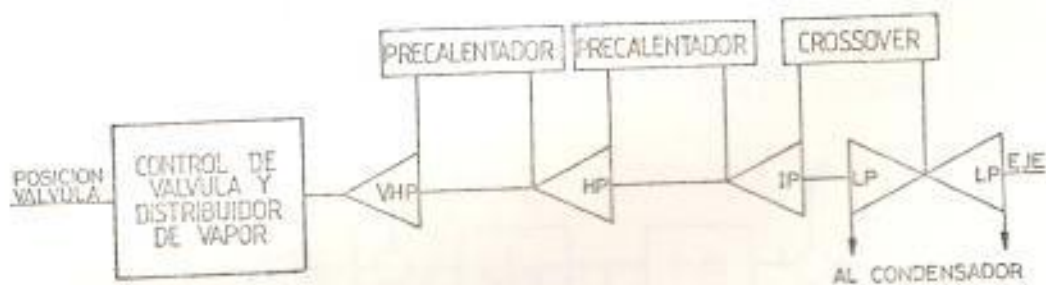


Diagrama esquemático

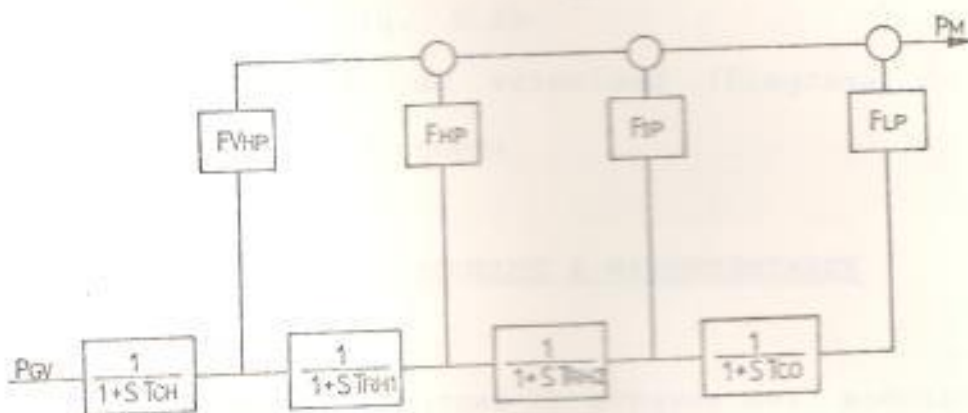


Fig. 5.14.

Diagrama de bloques de sistema con doble precalentamiento.

5.3 REPRESENTACION DEL SISTEMA DE REGULACION DE VELOCIDAD

Agrupando los diagramas de bloques obtenidos para cada uno de los elementos que conforman el sistema de regulación de velocidad (Sección 5.2), se puede llegar a su representación general, a partir de la cual se establecerá el diagrama de flujo respectivo.

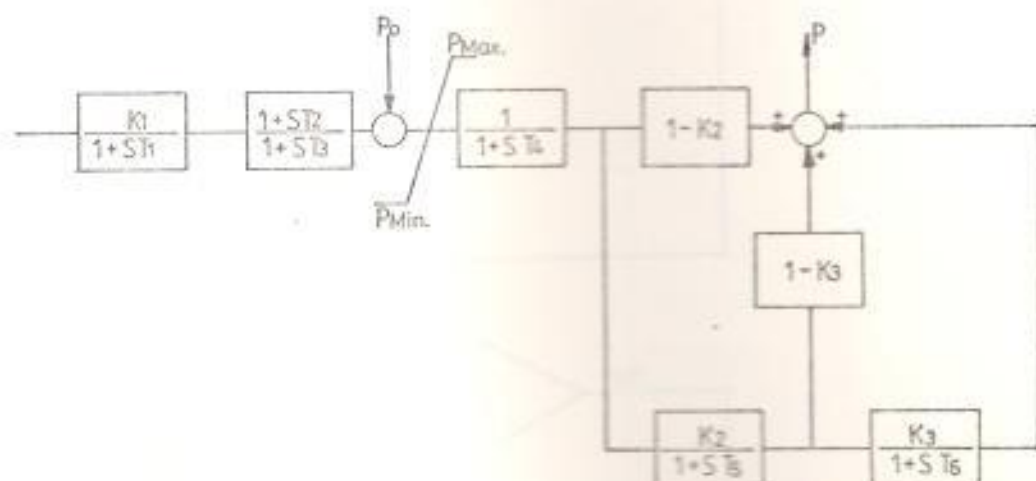
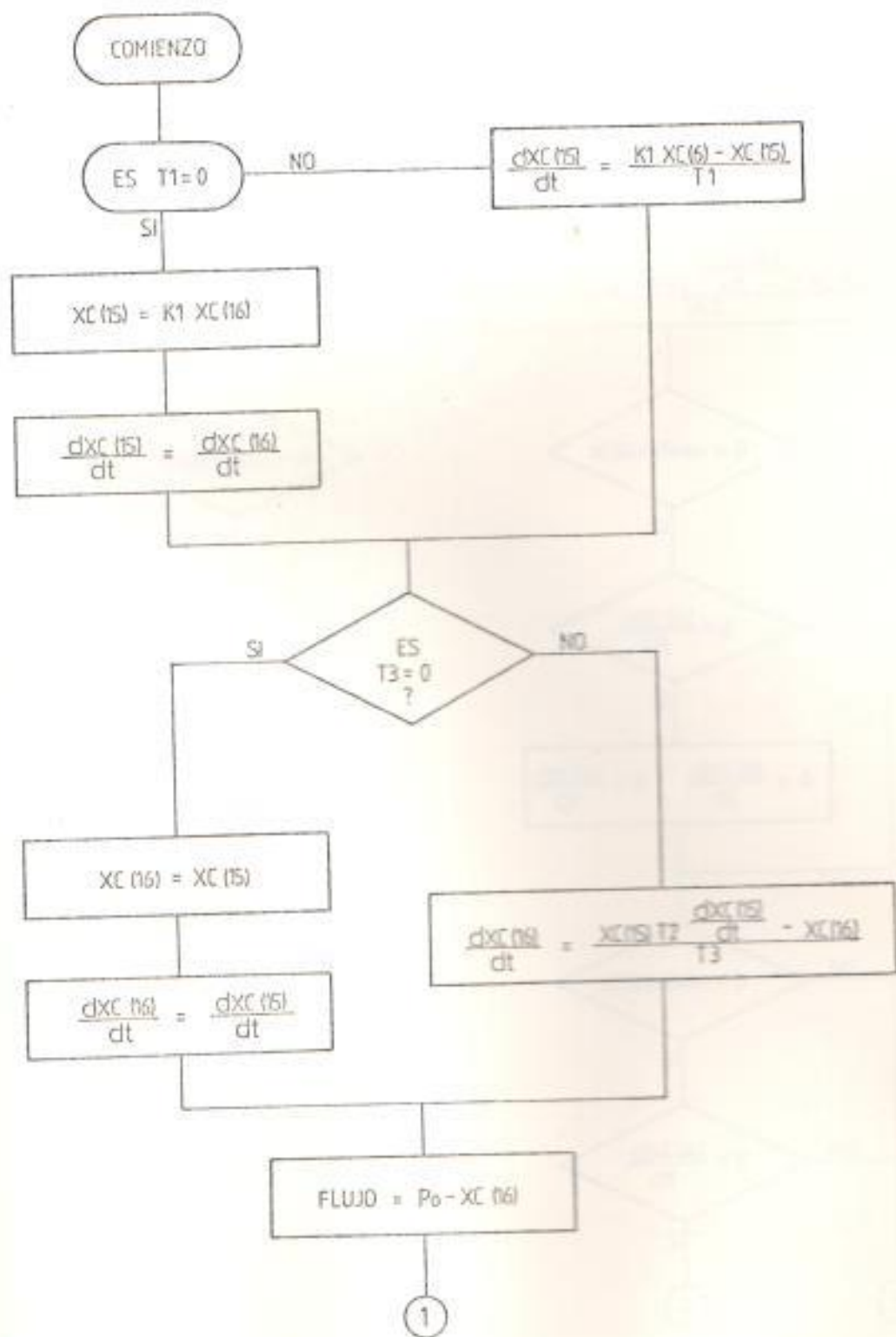


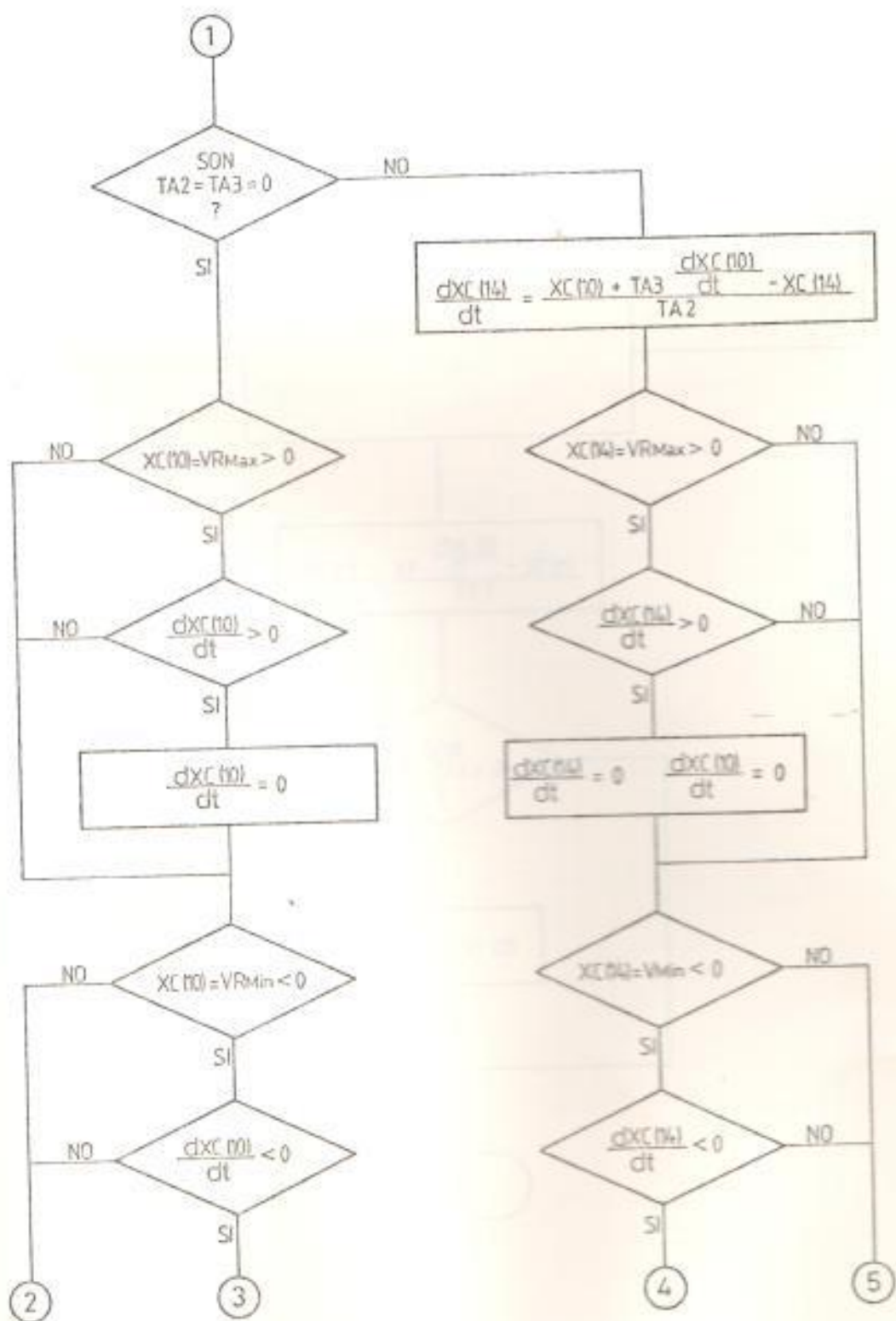
Fig. 5.15.

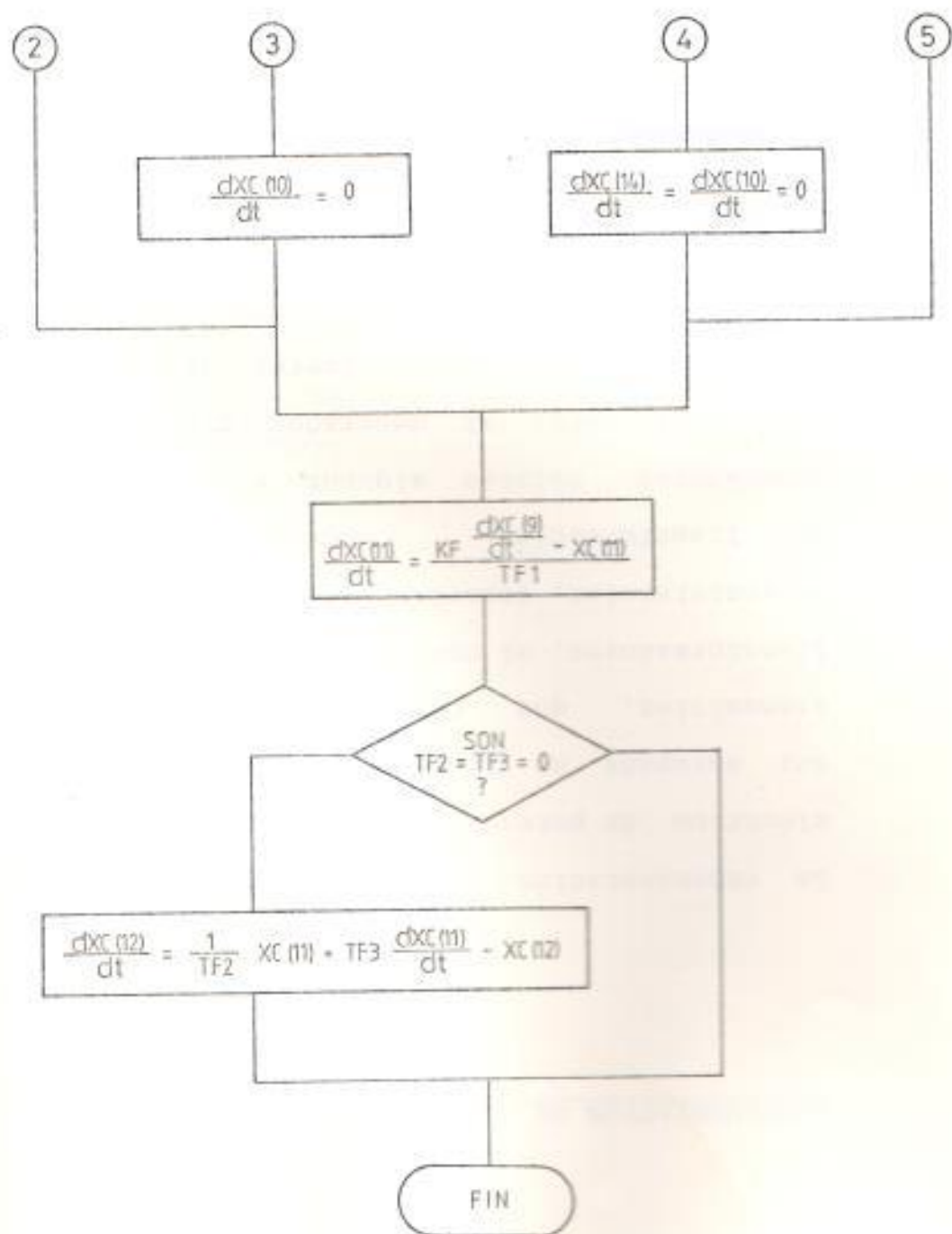
Sistema de regulación de velocidad (Diagrama de bloques)

5.4 DIAGRAMA DE FLUJO DE LOS MODELOS A REPRESENTARSE

Una vez presentado el diagrama de bloques del modelo a ser implementado, se mostrará a continuación el diagrama de flujo, el cual constituye el esquema fundamental del programa de computación a ser implementado para representar al sistema de regulación de velocidad.







CAPITULO SEXTO

REPRESENTACION DE LOS ELEMENTOS DE UN SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA

La representación de los elementos de un sistema eléctrico de potencia para estudios de estabilidad puede ser agrupada en tres categorías. El sistema de transmisión, que consiste de líneas, barras y transformadores, el cual es representado como un arreglo de resistencias, inductancias, capacitancias y relaciones de transformación. Segundo, bajo el título de generadores, existen algunos modelos electromecánicos para representar al generador sistema de excitación y gobernador. Estos dos primeros grupos, debido a su importancia dentro de un estudio de estabilidad y a su naturaleza relativamente bien conocida, han recibido mucha atención y estudios por parte de ingenieros de control y de aquellos analistas que se dedican a desarrollar programas de computadora que representen los distintos elementos con la mayor exactitud.

Actualmente, la repuesta que tienen las cargas de

sistema a un transiente producido en la red, está teniendo cierta importancia dentro de la industria, aun cuando la importancia que tiene la característica de la carga ya había sido mencionada alrededor de 1.935.

Inicialmente los estudios de estabilidad de un sistema de potencia consideraban pocos elementos, ya sea por el tamaño mismo de los sistemas como por la falta de argumentos matemáticos para representar todos los elementos que los conformaban con un grado de exactitud elevado. El sistema de potencia espleado en nuestro estudio, consta de: un barra de generación, una barra de carga y una barra infinita; interconectadas todas ellas por medio de líneas de transmisión. Este sistema puede ser dividido en tres bloques para su estudio, a saber:

- a) Representación de las máquinas incluyendo sus elementos de excitación y regulación.
- b) Las condiciones iniciales y finales de operación del sistema
- c) La representación de los elementos pasivos como:
 - derivaciones en serie con resistencia
 - derivaciones en paralelo:
 - i) capacitancias en paralelo
 - ii) cargas en paralelo
 - iii) fallas

Durante el desarrollo de este capítulo se analizarán las representaciones de: las líneas de transmisión, considerando las resistencias y reactivancias en serie y las capacitancias en paralelo, la representación de las cargas eléctricas y finalmente la representación de las fallas que se producen con mayor frecuencia dentro de un sistema de potencia.

6.1 ANÁLISIS TEÓRICO

Para ilustrar la explicación, consideremos un sistema de transmisión de dos máquinas, cuyo diagrama unifilar se muestra en la fig. 6.1.

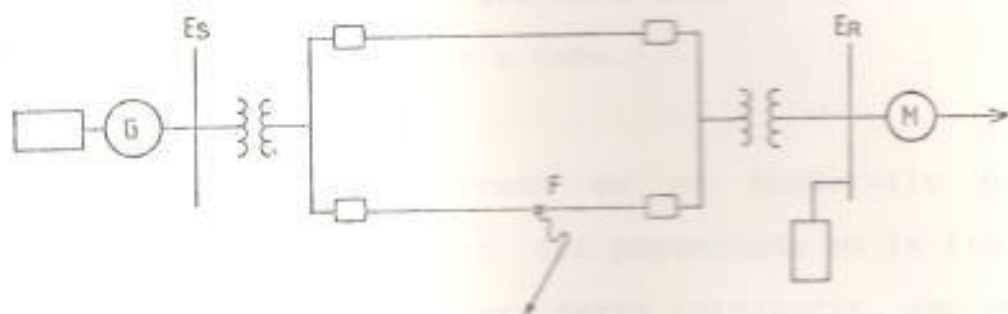


Fig. 6.1

Sistema de transmisión de 2 máquinas

Est: sistema contendrá resistencias en serie, capacitancias en paralelo, cargas conectadas en

paralelo, voltaje sostenidos en las barras de envío y recepción, y se supondrá una falla desbalanceada en el punto F la cual, será despejada desconectando la línea de transmisión del sistema.

Al realizarse el análisis del sistema mostrado de la fig. 6.1, se deberán considerar los efectos de las resistencias y capacitancias, pues ellas forman parte de las líneas de transmisión. Si se consideran que los voltajes en los terminales de envío y recepción permanecen invariables, es conveniente obtener una representación adecuada de la red que conecta dichos terminales, la representación mas usada es el equivalente π de la red. Con el empleo del equivalente de la red pasiva, se podrá obtener un diagrama potencia-ángulo que será útil en el análisis que nos proponemos llevar a cabo.

El sistema que emplearemos en el desarrollo de nuestro programa difiere del presentado en la fig. 6.1 en que posee una tercera barra intermedia, que se la considera barra de carga. Pues bien, con la presencia de esta barra dentro de un sistema de potencia, los valores máximos de potencia en los terminales de envío y recepción tendrán lugar bajo desplazamientos angulares diferentes.

Si bajo condiciones de estado estable, se establece un punto en el cual la máxima entrada al primo-motor de la unidad de generación corresponde a la máxima salida que tiene un motor que constituye la carga; dos fenómenos interesantes se producirán cuando la carga en el eje del motor se vea levemente incrementada. El motor en cualquier caso disminuirá su velocidad en tanto que el generador: 1) se saldrá de sincronismo con respecto al motor y adquirirá una velocidad superior a la normal, o 2) permanecerá en sincronismo con respecto al motor, operando a su misma velocidad, este funcionamiento dependerá principalmente de las inercias relativas del generador y del motor. Estos fenómenos son de interés más bien teórico, pues desde un punto de vista práctico nos muestran márgenes indicativos, pues sucede que las condiciones importantes de carga corresponden a las entregas máximas de potencia por parte de la red y consecuentemente no hay la gran dependencia de las inercias relativas de las máquinas.

6.2 REPRESENTACION DE LAS LINEAS DE TRANSMISION

Los circuitos equivalentes desarrollados para representar a las líneas de transmisión, se los ha hecho considerando el efecto que tienen las

capacitancias; el programa empleado considera a las líneas de transmisión como impedancias, es decir que se hace uso de la representación de una línea de transmisión "corta".

Se considera una línea de transmisión corta a aquellas que no sobrepasan las treinta millas de longitud o cuyo nivel de voltaje es inferior a los 40KV. La importancia de la capacitancia distribuida y su corriente de carga varía no solamente con la característica de la línea sino también con los diferentes tipos de problemas, es por esta razón que la longitud no es un punto definitivo para diferenciar las líneas cortas de las largas.

Despreciando la capacitancia, una línea de transmisión puede ser tratada como una impedancia constante:

$$Z = R + jX = zs$$

donde:

- z: impedancia en serie de un conductor en ohmios por milla
- s: longitud de la línea en millas

El circuito correspondiente por fase o equivalente monofásico es mostrado a continuación junto con el

diagrama fasorial que relaciona la corriente de línea con los voltajes terminales de líneas a neutro de dicha línea.

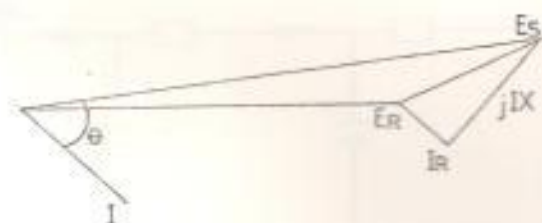
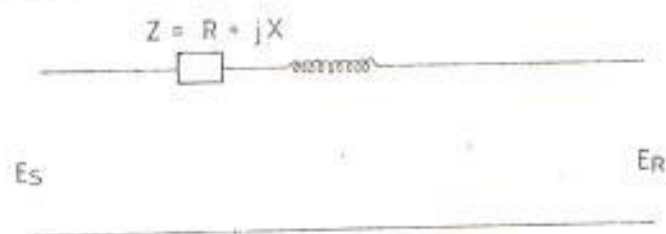


Fig. 6.2

Circuito equivalente y diagrama fasorial
de una línea de transmisión

La expresión analítica para la relación dada por el diagrama fasorial se la presenta en la ecuación:

$$E_s = E_r + Z I$$

La importancia relativa de la corriente de carga de una línea de transmisión, para cualquier tipo de problema, varía directamente con el voltaje e inversamente con la corriente de carga, para poder

apreciar en forma completa el hecho anterior es necesario considerar el análisis de una línea "larga" de transmisión.

Las líneas de transmisión largas pueden ser consideradas como un número infinito de impedancias en serie y capacitancias en paralelo como se muestra a continuación en la fig. 6.3.

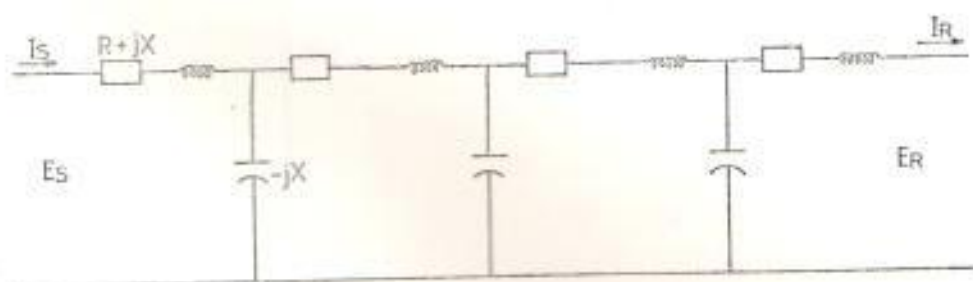


Fig. 6.3

Representación de una línea de transmisión larga

La corriente I_r no es igual a I_s ni en magnitud ni en ángulo, debido a que parte de la corriente derivada a través de la capacitancia entre fase y neutro. Las relaciones entre E_r y E_s para una línea larga son diferentes que las presentadas para el caso de una línea de transmisión corta, debido al cambio progresivo en la corriente de línea por efecto de la capacitancia en paralelo.

Existen algunos circuitos equivalentes que representan a las ecuaciones de la línea de transmisión y por tanto pueden ser empleados para representar dichas líneas. Uno de tales circuitos es el equivalente π mostrado a continuación.

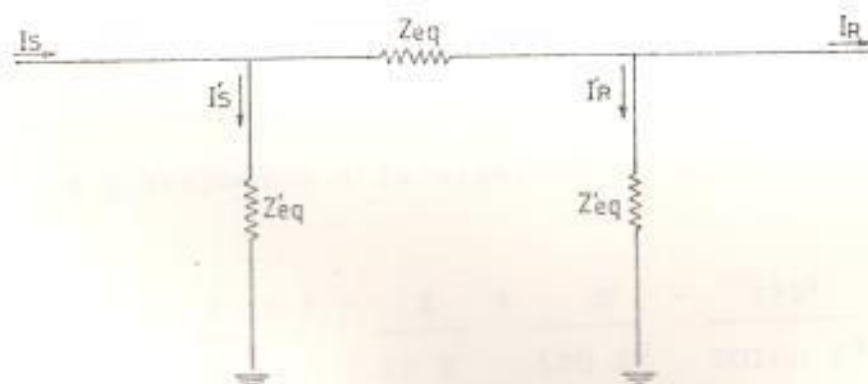


Fig. 6.4

Circuito equivalente de una línea de transmisión

Las expresiones de Z_{eq} y Z'_{eq} son un tanto complicadas pues involucran funciones hiperbólicas.

Otro circuito equivalente para una línea de transmisión es el equivalente T, cuya representación es la siguiente:

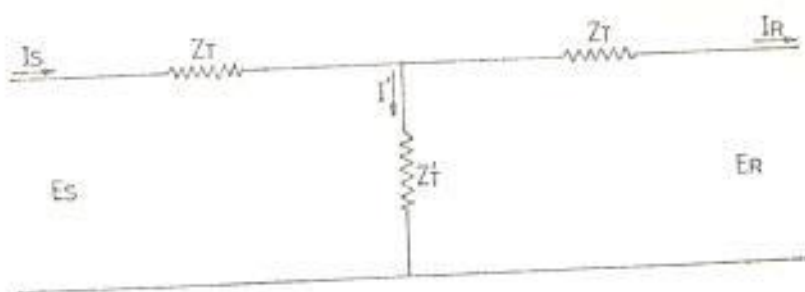


Fig. 6.5

Circuito equivalente T de una línea de transmisión

Las expresiones para Z_T y Z'_T son presentadas en forma de serie y responden a la siguiente ecuación:

$$Z_T = \frac{Z}{2} \left(1 - \frac{Z}{12Z'} + \frac{Z^2}{120Z'^2} - \frac{17Z^3}{20160Z'^3} \right.$$

$$\left. + \frac{31Z^4}{3628800Z'^4} - \dots \right)$$

$$Z'_T = Z' \left(1 - \frac{Z}{6Z'} + \frac{7Z^2}{360Z'^2} - \frac{31Z^3}{15120Z'^3} \right.$$

$$\left. + \frac{127Z^4}{604800Z'^4} - \dots \right)$$

6.3 REPRESENTACION DE LAS CARGAS ELECTRICAS

Hasta hace pocos años, las cargas eléctricas para estudios de estabilidad fueron representadas como

impedancias, las cuales permanecían constantes aún en condiciones de variación de voltaje y frecuencia. Esta práctica fue aceptada por una o varias de las siguientes razones:

a.) Para estudios que involucran solo la primera oscilación (estabilidad transiente) de un sistema de potencia, cuya generación es pequeña y alimenta en forma radial a una área de carga. En este caso la representación de la carga no tiene una importancia determinante.

b.) Los elementos de impedancia constante, ofrecen por su propia naturaleza modelos muy simples, aun en el caso de estudios digitales, su representación se la hará mediante ecuaciones lineales simultáneas. Hasta la aparición de las grandes computadoras digitales era impráctico emplear otro tipo de asunción para la respuesta que tenía la carga.

c.) Los datos acerca de la respuesta que tiene la carga en una sistema cuando se produce un disturbio, no están disponibles en libros que tratan del tema de la carga y más aun son difíciles de obtener del sistema.

d.) Las cargas que tenían los sistemas de potencia de

hace 20 o 30 años atrás, eran en gran porcentaje dispositivos de impedancia constante a diferencia de lo que ocurre actualmente.

Como los sistemas de potencia han crecido en tamaño y capacidad, la interconexión de los mismos tiene lugar en forma común, igualmente, los períodos de oscilación debido a disturbios transientes se han visto incrementados en lo referente a su duración. Estos períodos muy prolongados de oscilación hacen que el hecho de asumir un modelo clásico para representar las máquinas y las cargas se vuelva inservible, los programas modernos que tratan de la estabilidad transiente cubren este tipo de inconveniente dejando la puerta abierta para la investigación del comportamiento y representación de la carga en forma diferente a tratarla como una impedancia constante. Sin embargo, en nuestro programa, las cargas son tratadas como impedancias constantes debido a que se trata de un sistema relativamente pequeño y radial aquel ha ser estudiado.

6.4 REPRESENTACION DE LAS PALLAS EN EL SISTEMA DE POTENCIA

En nuestra discusión sobre estabilidad, solamente han

recibido consideración los sistemas simétricos; consideraremos ahora que las fallas que se producen en un sistema de potencia no son completamente balanceadas en las 3 fases, por tanto, los voltajes de fase serán considerados desbalanceados y el voltaje de la fase o fase falladas o no falladas no podrán ser considerados como una medida del voltaje disponible en la transmisión de energía, será pues, el voltaje de secuencia positiva la cantidad ha ser tomada en cuenta.

En las siguientes secciones se presentarán las interconexiones de las redes de secuencia para los 3 tipos de fallas en un lugar determinado del sistema, los cuales pueden ser simulados en el programa que se implementa en esta tesis.

Cuando las redes de secuencia son interconectadas en el punto de la falla para representar el tipo particular de cortocircuito; las corrientes y voltajes de secuencia positiva existirán en todos los puntos de la red de secuencia positiva, la cual es la red originalmente balanceada. Ya que solamente las cantidades de secuencia positiva serán usadas en los cálculos, todas las redes interconectadas, excepto la de secuencia positiva, serán reducidas a una impedancia única o equivalente, lo cual simplifica

las operaciones matemáticas. Esta impedancia es una función de las impedancias de secuencia negativa y cero, medidas en el punto de la falla y varía con el tipo de la misma. Así, para una falla de línea a tierra, esta impedancia es $(Z_2 + Z_0)$, conectadas entre el punto de falla y el neutro del sistema, y para una falla de 2 líneas a tierra es:

$$\frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0}$$

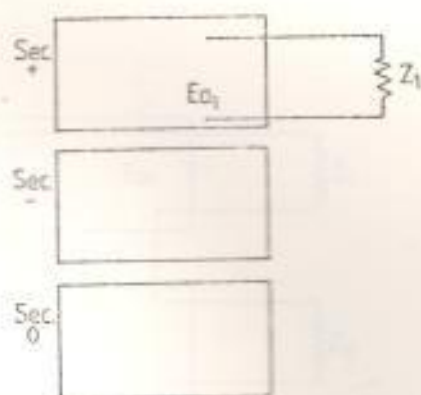
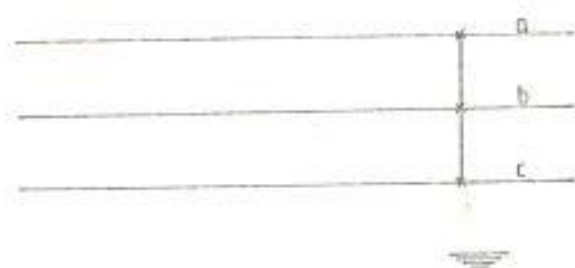
$$Z_2 + Z_0$$

es decir, que Z_2 y Z_0 se hallan en paralelo entre el punto de falla y el neutro del sistema.

De esta forma un problema de estabilidad que involucra una falla desbalanceada en un punto dado del sistema se lo podrá reducir a otro que utiliza un sistema equivalente trifásico y simétrico. Usaremos la red original balanceada para obtener las cantidades normales para la red de secuencia positiva, en todos los puntos de la misma, cuando la impedancia equivalente es conectada a ella.

La interpretación física de este método para manejar las fallas desbalanceadas dentro de un sistema de potencia se la presentara a continuación: la potencia y los KVA reactivos consumidos en las redes de secuencia negativa y cero son generados en las

máquinas como cantidades de secuencia positiva y transmitidos a través del sistema hasta el lugar de la falla, aquí estas cantidades son convertidas, debido a la asimetría que presenta la falla, en cantidades de secuencia negativa y cero, las cuales realimentan al sistema y son consumidas como $I^2 R$ y $I^2 X$ en las secuencias negativa y cero, excepto por el efecto producido por el torque de secuencia negativa sobre la máquina. La potencia de secuencia negativa que entra al rotor de una máquina es consumida en un 50% en forma de pérdidas del hierro ($I R$), mientras que el otro 50% produce el torque de secuencia negativa, el cual trata de llevar a la máquina en la dirección opuesta al sentido normal de rotación.



$$I_F = \frac{E_{01}}{Z_1}$$

I_F ; Corriente de falla

E_{01} ; Voltaje generado en la red de secuencia positiva

Z_1 ; Impedancia equivalente de la red de secuencia positiva

fig. 6.6.
REPRESENTACION DE FALLA TRIFASICA E
INTERCONEXION DE MALLAS DE SECUENCIA

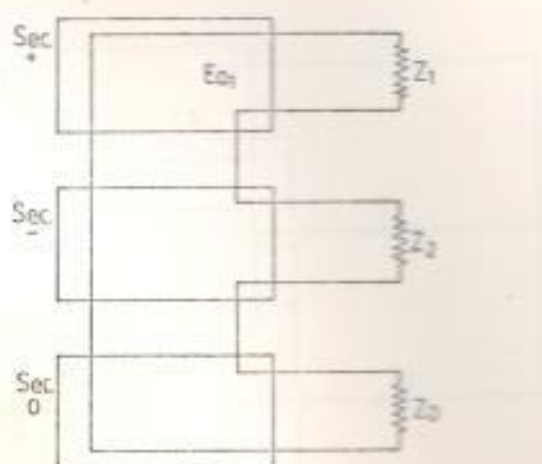
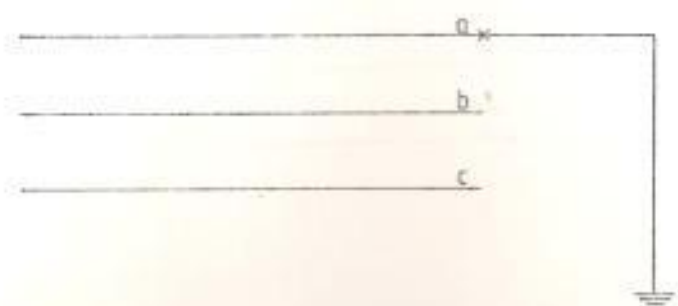


fig. 6.7.
 REPRESENTACION DE FALLA 1 FASE A TIERRA
 E INTERCONEXION DE MALLAS DE SECUENCIA

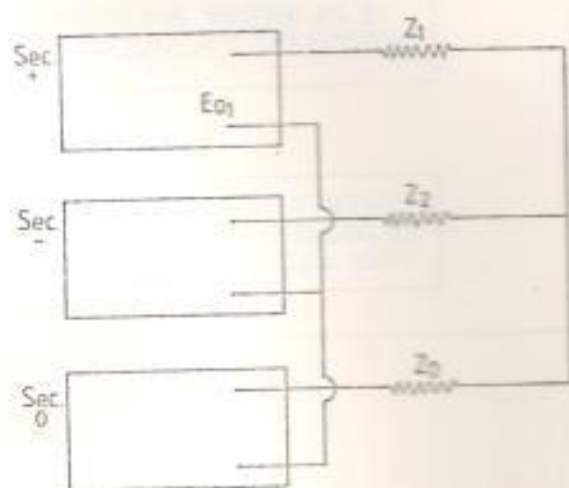
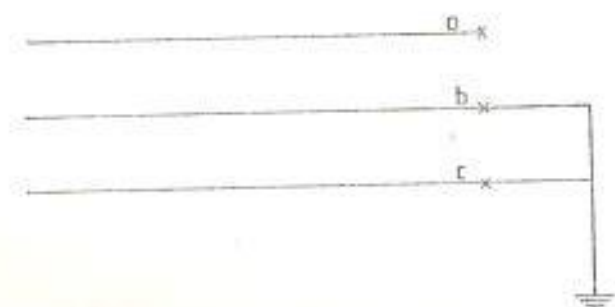


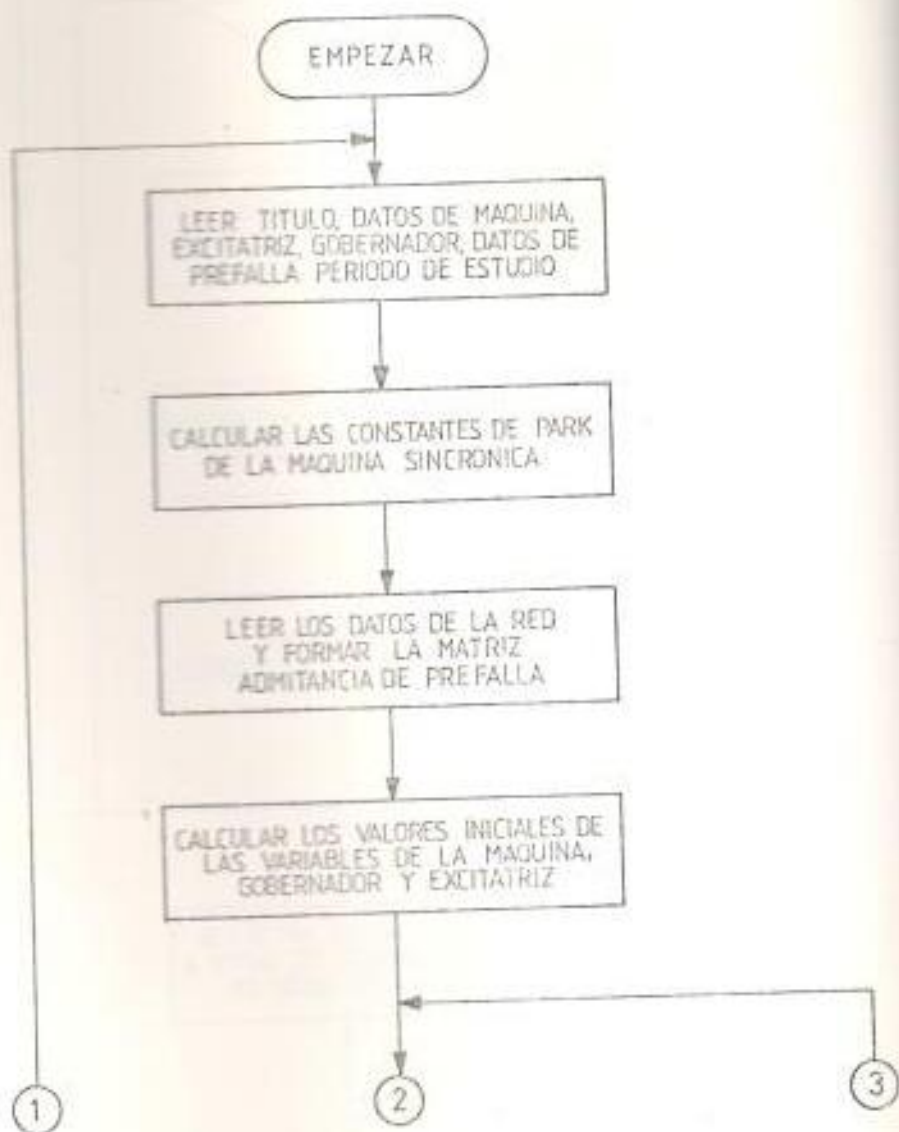
fig 6.8

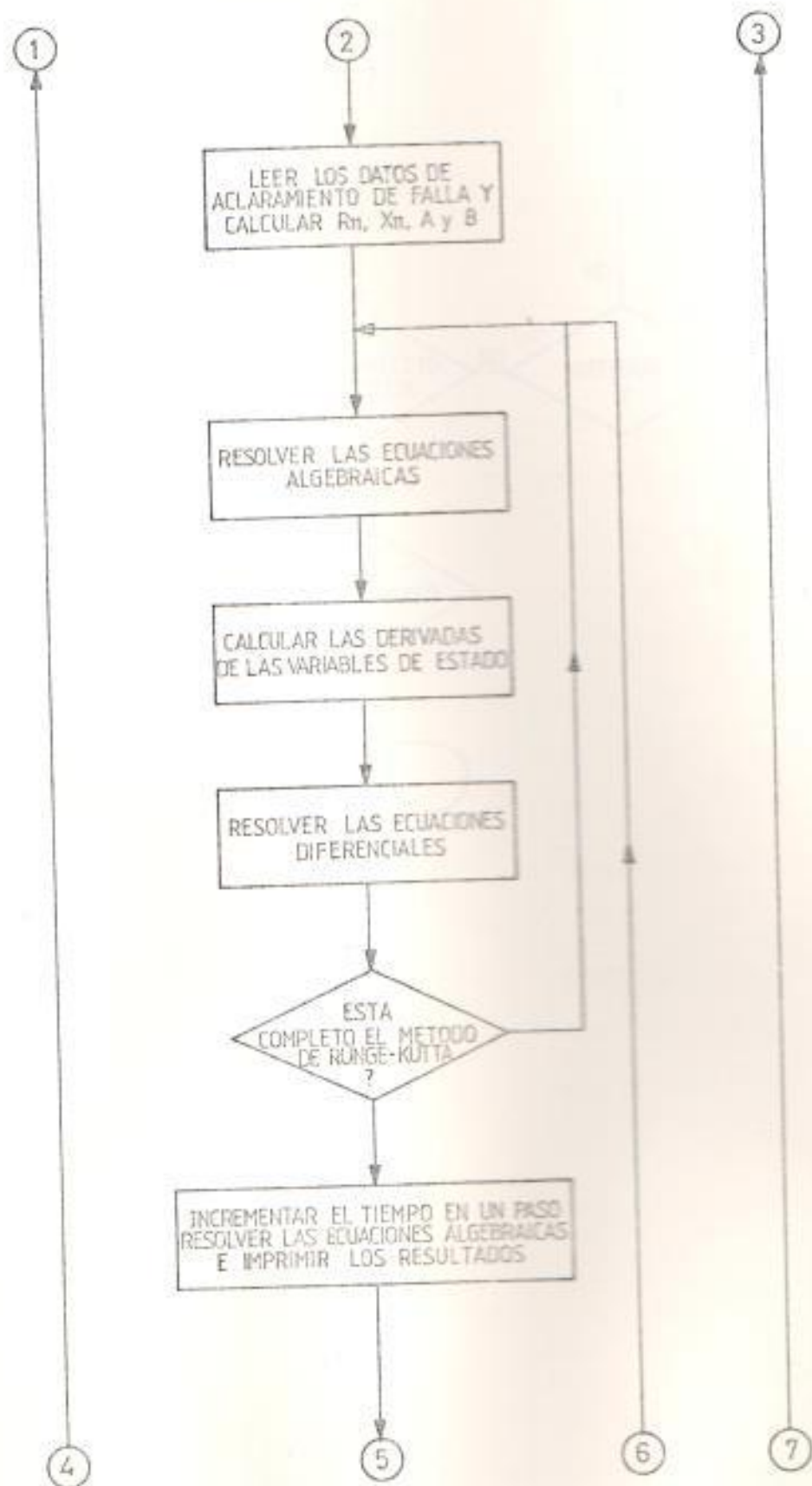
REPRESENTACION DE FALLA DE DOS FASES A TIERRA
E INTERCONEXION DE MALLAS DE SECUENCIA

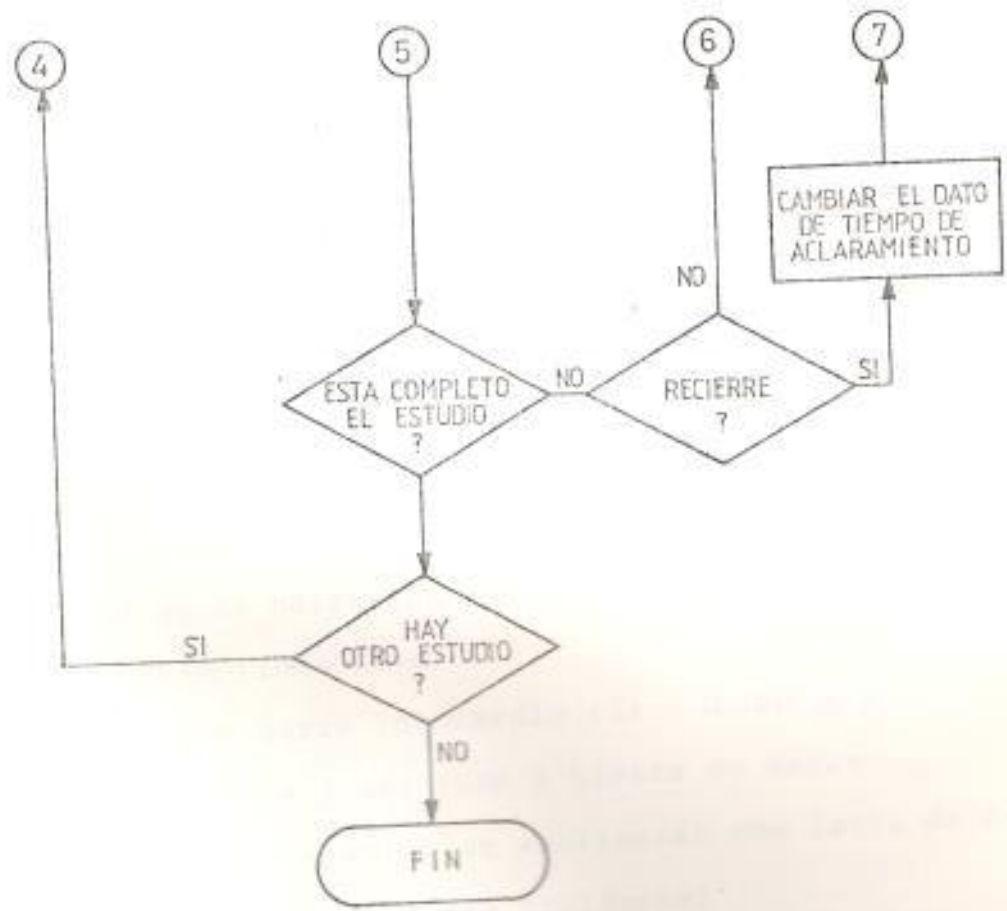
CAPITULO SEPTIMO

ESTUDIOS TÍPICOS DE ESTABILIDAD

7.1 DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL







7.2. EJEMPLO DE UNA MAQUINA SINCRONICA SIN REGULACION AUTOMATICA

Se tiene un sistema de potencia de tipo radial cuyas características se dan a continuación:

- salida del generador = 800 MW
- voltaje en barra de generación (1) = 0.9255 p.u.
- voltaje de barra infinita (2) = 1.117 p.u.
- carga de la barra intermedia (3) = 283.5 MW
26.9 MVAR (inductiva).
- voltaje de barra intermedia (3) = 0.956 p.u.
- tipo de falla : una fase a tierra en barra intermedia (tambien se analizarán con falla de dos fases a tierra y falla trifásica)
- tiempo de aclaramiento de la falla = 0.0667 seg.
- duración del estudio = 5 seg.
- impedancia entre barra 1 y 3 = $0.0008 + j 0.0156$ pu
- impedancia entre barra 3 y 2 = $0.0142 + j 0.0554$ pu
- Los parámetros del generador constan en la hoja de salida del programa.

STUDIO NO. 1 CUMPLE 1 SEL. SERVICIOS

DATOS DE LA MANTILLA

NOV 2.2107 K= 0.2107 X=0.2107 V=0.2107 K10= 0.0000
M=0.0000 T=0.0000 T1=0.0000 T2=0.0000 T3=0.0000
S=0.0000 S1=0.0000 S2=0.0000 S3=0.0000
E=0.0000 E1=0.0000
FUNCION: 1-1/2 V= 1.20 PS S= 1.20 A 1.2 PS 0.450
CORR. AUTOMATICA 2.00000000 PUNTO 12. PU
SATURACION: 1-1/2 V= 1.20 PS S= 1.20 A 1.2 PS 0.450

CONSTANTES DE PUNTO

K=0.2107 K1=0.0000 K2=0.0000 K3=0.0000 K4=0.0000
R=0.0000 R1=0.0000 R2=0.0000 R3=0.0000 R4=0.0000

PERIODO DE ESTUDIO: 5.00 SEC
INCREMENTO DE ESTUDIO: 0.010 SEC
TIPO DE: 0.010 SEC

ELEMENTOS ORIGINALES DE RED

1 1 0.0000 0.0000
2 1 0.0100 0.0000
3 1 0.0000 0.0000

VALORES PREVALES

RED: VOL. SERVICIOS HABERS
POTENCIA PU: 1.20
VARS PU: 1.20
AND: 1.20 2.00000000
VOL. SERVICIOS: 1.20 2.00000000
RED: 1.20 2.00000000
VOL. SERVICIOS: 1.20 2.00000000
FACTOR SATURACION: 0.450

DATOS DEL SIST. DE REGULACION
K=0.2107 K1=0.0000 K2=0.0000 K3=0.0000 K4=0.0000

MODIFICACIONES AL SISTEMA: 0.000000
K=0.2107 K1=0.0000 K2=0.0000 K3=0.0000 K4=0.0000

CONSTANTES DE RED

K=0.2107 K1=0.0000 K2=0.0000 K3=0.0000 K4=0.0000

TIEMPO SEC	ET	P	Q	EF	VELOCIDAD	TORQUE TURBINA	ANGULO GRADOS	ANG. A'DORTIS
0.000	0.851	6.851	0.205	1.99	1.0000	8.031	97.80	0.0000
0.030	0.849	6.954	0.186	1.99	1.0006	8.031	97.98	0.0000
0.060	0.846	6.914	0.172	1.99	1.0011	8.031	98.53	0.0000
0.067	0.845	6.931	0.169	1.99	1.0012	8.031	98.70	0.0000

MODIFICACIONES AL TIEMPO= 0.067SEC

CONSTANTES DE RED

R11= 0.0219 K11= 0.0645 A= 0.9202 B= 0.1454

TIEMPO DE SOLUCION A 0.067 SEC

TIEMPO SEC	ET	P	Q	EF	VELOCIDAD	TORQUE TURBINA	ANGULO GRADOS	ANG. AMORTIG
0.067	0.933	8.181	-1.556	1.99	1.0012	8.031	98.70	0.0000
0.099	0.931	8.250	-1.550	1.99	1.0012	8.031	99.30	0.0000
0.120	0.929	8.327	-1.543	1.99	1.0010	8.031	100.01	0.0000
0.150	0.927	8.389	-1.539	1.99	1.0008	8.031	100.62	0.0000
0.180	0.925	8.435	-1.537	1.99	1.0006	8.031	101.10	0.0000
0.210	0.923	8.453	-1.539	1.99	1.0004	8.031	101.45	0.0000
0.240	0.922	8.474	-1.543	1.99	1.0002	8.031	101.65	0.0000
0.270	0.921	8.467	-1.551	1.99	1.0000	8.031	101.79	0.0000
0.300	0.921	8.443	-1.561	1.99	0.9997	8.031	101.60	0.0000
0.330	0.921	8.403	-1.573	1.99	0.9995	8.031	101.36	0.0000
0.360	0.921	8.350	-1.597	1.99	0.9993	8.031	100.99	0.0000
0.390	0.922	8.284	-1.602	1.99	0.9992	8.031	100.50	0.0000
0.420	0.923	8.208	-1.618	1.99	0.9990	8.031	99.92	0.0000
0.450	0.925	8.126	-1.634	1.99	0.9988	8.031	99.28	0.0000
0.480	0.926	8.039	-1.649	1.99	0.9989	8.031	98.59	0.0000
0.510	0.928	7.951	-1.662	1.99	0.9989	8.031	97.88	0.0000
0.540	0.930	7.856	-1.674	1.99	0.9990	8.031	97.19	0.0000
0.570	0.931	7.787	-1.684	1.99	0.9990	8.031	96.54	0.0000
0.600	0.932	7.710	-1.692	1.99	0.9992	8.031	95.95	0.0000
0.630	0.934	7.640	-1.699	1.99	0.9993	8.031	95.45	0.0000
0.660	0.935	7.617	-1.701	1.99	0.9995	8.031	95.06	0.0000
0.690	0.935	7.590	-1.701	1.99	0.9997	8.031	94.79	0.0000
0.720	0.936	7.590	-1.700	1.99	0.9999	8.031	94.65	0.0000
0.750	0.936	7.518	-1.697	1.99	1.0001	8.031	94.64	0.0000
0.780	0.936	7.613	-1.691	1.99	1.0003	8.031	94.77	0.0000
0.810	0.936	7.653	-1.684	1.99	1.0005	8.031	95.02	0.0000
0.840	0.935	7.706	-1.676	1.99	1.0006	8.031	95.38	0.0000
0.870	0.934	7.770	-1.667	1.99	1.0008	8.031	95.84	0.0000
0.900	0.933	7.842	-1.657	1.99	1.0009	8.031	96.37	0.0000
0.930	0.931	7.919	-1.647	1.99	1.0009	8.031	96.96	0.0000
0.960	0.930	7.995	-1.637	1.99	1.0010	8.031	97.57	0.0000
0.990	0.928	8.070	-1.628	1.99	1.0009	8.031	98.19	0.0000
1.020	0.926	8.140	-1.619	1.99	1.0009	8.031	98.79	0.0000
1.050	0.925	8.202	-1.612	1.99	1.0008	8.031	99.35	0.0000
1.080	0.923	8.255	-1.607	1.99	1.0007	8.031	99.84	0.0000
1.110	0.922	8.297	-1.603	1.99	1.0006	8.031	100.26	0.0000
1.140	0.920	8.327	-1.602	1.99	1.0004	8.031	100.58	0.0000
1.170	0.919	8.344	-1.603	1.99	1.0003	8.031	100.80	0.0000
1.200	0.919	8.348	-1.606	1.99	1.0001	8.031	100.91	0.0000
1.230	0.918	8.339	-1.611	1.99	0.9999	8.031	100.90	0.0000
1.260	0.918	8.318	-1.618	1.99	0.9997	8.031	100.79	0.0000
1.290	0.919	8.285	-1.627	1.99	0.9996	8.031	100.58	0.0000
1.320	0.919	8.243	-1.637	1.99	0.9995	8.031	100.28	0.0000
1.350	0.920	8.192	-1.648	1.99	0.9994	8.031	99.89	0.0000
1.380	0.921	8.135	-1.658	1.99	0.9993	8.031	99.44	0.0000

7.3 EJEMPLO DE UNA MAQUINA SINCRONICA CON REGULACION AUTOMATICA DE VOLTAJE

El sistema es similar al presentado en el ejemplo de la sección 7.2, habiéndose incrementado los datos referentes a las constantes que posee el sistema de excitación.

De igual forma, se simulará una falla de una fase a tierra (de la cual se presentan los resultados completos), de dos fases a tierra y trifásica (de los cuales sólo se está presentando el gráfico que muestra la curva ángulo vs. tiempo).

STUDIO NO. 1 EJEMPLO 2 GENERADOR CON EXCITACION

DATOS DE LA MAQUINA

KW= 0.2107 V₀= 0.2100 X_{L0}= 0.0299 X_{L1}= 0.0343 X_{L2}= 0.0000 X_{L10}= 0.0000
 P= 0.0000 T₁₀= 5.00 T₁₁₀= 0.0000 T₁₀₀= 1.0000 T₁₁₀₀= 0.0000
 S₁₀= 0.0204571
 S₁₁= 8.1980
 T₁₀₀₀= 0.0000
 COEF. EXCITACION = 0.1777000000 PUDES. IZ. PU
 SATURACION: 1.48319 A 1 PU FS= 0.105 A 1.2 PU ES= 0.450

CONSTANTES PARK
 X_{d0}= 0.1982 X_d= 0.1845 X_{d1}= 0.02150 X_{d2}= 0.01143 X_{d3}= 0.0000000000 X_{d4}= 0.0000000000
 R= 0.00040 R_f= 0.00011 R_k= 0.00000 R_{k1}= 0.00000 R_{k2}= 0.00000

PERIODO DE ESTUDIO= 5.00 SEC.
 INTERVALO IMPRESION= 0.030 SEC.
 TIME STEP= 0.030 SEC.

ELEMENTOS ORIGINALES DE REF

Z 1 3 0.00000 0.01500
 Z 2 3 0.01420 0.05000
 Y 3 3 0.00000 -0.20000

VALORES MAXIMOS
 P= 0. VOLT. TERMINAL= 0.0258
 POTENCIA PU= 0.000
 VARS PU= -0.000
 ANG. ITER= 71.7000000
 VOLT. EXCITACION INF. PU= 1.117
 ANG. EXCITACION EJE Q Y VARS INF= 97.8000000
 VOLT. EXCITACION PU= 1.000
 FACTOR SATURACION= 0.948

DATOS DEL SIST. EXCITACION
 SATURACION A 75 EFDMAX= 0.0074 EFDMAX= 0.265 EFDMAX= 4.525
 K_v= 3 K_t= 25.00 T₁= 0.060 K_e= -1.040 T₂= 0.500 K_f= 0.100 T_{PI}= 1.000
 K₁= 0.000 K₂= 0.000 K₃= 0.000 K₄= 0.000 K₅= 0.000 K₆= 0.000
 T₁₀= 0.000 T₁₁= 0.000 T₁₂= 0.000 T₁₃= 0.000 T₁₄= 0.000 T₁₅= 0.000

MODIFICACIONES AL TIEMPO= 0.000000
 Z 1 3 0.00000 0.00000

TIEMPO DE SOLUCION A 0.030 SEC

TIEMPO SEC	ET	P	Q	EF	VELOCIDAD	TORQUE TURBINA	ANGULO GRADOS	ANG. AMORTIC.
0.000	0.851	6.851	0.205	1.99	1.0000	8.031	97.80	0.0000
0.030	0.949	6.854	0.186	2.01	1.0006	8.031	97.98	0.0000
0.060	0.846	6.918	0.174	2.17	1.0011	8.031	98.53	0.0000
0.067	0.845	6.936	0.172	2.08	1.0012	8.031	98.70	0.0000

MODIFICACIONES AL TIEMPO= 0.067SEC

CONSTANTES DE RED

R11= 0.0219 X11= 0.0645 A= 0.9202 B= 0.1454

TIEMPO DE SOLUCION A 0.057 SEC

TIEMPO SEC	ET	P	Q	EF	VELOCIDAD	TORQUE TURBINA	ANGULO GRADOS	ANG. AMORTIG
0.357	0.933	8.186	-1.554	2.08	1.0012	8.031	98.70	0.0000
0.390	0.932	8.261	-1.544	2.12	1.0012	8.031	99.30	0.0000
0.420	0.929	8.346	-1.533	2.14	1.0010	8.031	100.00	0.0000
0.450	0.927	8.418	-1.524	2.13	1.0008	8.031	100.60	0.0000
0.480	0.926	8.471	-1.519	2.11	1.0006	8.031	101.06	0.0000
0.510	0.924	8.503	-1.517	2.09	1.0004	8.031	101.37	0.0000
0.540	0.923	8.514	-1.520	2.08	1.0001	8.031	101.53	0.0000
0.570	0.923	8.505	-1.526	2.06	0.9999	8.031	101.52	0.0000
0.600	0.923	8.477	-1.536	2.05	0.9996	8.031	101.35	0.0000
0.630	0.923	8.431	-1.548	2.04	0.9994	8.031	101.03	0.0000
0.660	0.924	8.369	-1.563	2.03	0.9992	8.031	100.56	0.0000
0.690	0.925	8.294	-1.579	2.03	0.9990	8.031	99.98	0.0000
0.720	0.927	8.208	-1.595	2.02	0.9989	8.031	99.30	0.0000
0.750	0.929	8.115	-1.611	2.02	0.9988	8.031	98.55	0.0000
0.780	0.930	8.017	-1.625	2.01	0.9988	8.031	97.76	0.0000
0.810	0.932	7.920	-1.640	2.01	0.9988	8.031	96.96	0.0000
0.840	0.934	7.825	-1.652	2.00	0.9988	8.031	96.19	0.0000
0.870	0.936	7.738	-1.662	2.00	0.9989	8.031	95.47	0.0000
0.900	0.937	7.651	-1.670	1.99	0.9991	8.031	94.83	0.0000
0.930	0.938	7.579	-1.675	1.98	0.9993	8.031	94.29	0.0000
0.960	0.939	7.533	-1.678	1.97	0.9995	8.031	93.87	0.0000
0.990	0.940	7.525	-1.679	1.96	0.9997	8.031	93.62	0.0000
1.020	0.941	7.518	-1.677	1.95	0.9999	8.031	93.50	0.0000
1.050	0.941	7.510	-1.674	1.94	1.0002	8.031	93.54	0.0000
1.080	0.940	7.560	-1.669	1.93	1.0004	8.031	93.73	0.0000
1.110	0.940	7.603	-1.662	1.92	1.0006	8.031	94.07	0.0000
1.140	0.939	7.671	-1.656	1.92	1.0008	8.031	94.52	0.0000
1.170	0.938	7.745	-1.645	1.92	1.0009	8.031	95.07	0.0000
1.200	0.936	7.823	-1.636	1.92	1.0011	8.031	95.74	0.0000
1.230	0.934	7.915	-1.624	1.92	1.0011	8.031	96.45	0.0000
1.260	0.932	8.003	-1.614	1.92	1.0011	8.031	97.18	0.0000
1.290	0.930	8.088	-1.607	1.92	1.0011	8.031	97.92	0.0000
1.320	0.928	8.167	-1.599	1.93	1.0011	8.031	98.64	0.0000
1.350	0.926	8.238	-1.592	1.94	1.0010	8.031	99.33	0.0000
1.380	0.924	8.298	-1.587	1.95	1.0009	8.031	99.89	0.0000
1.410	0.922	8.346	-1.584	1.96	1.0007	8.031	100.38	0.0000
1.440	0.921	8.381	-1.583	1.97	1.0005	8.031	100.78	0.0000
1.470	0.919	8.471	-1.584	1.98	1.0003	8.031	101.05	0.0000
1.500	0.919	8.406	-1.587	1.99	1.0001	8.031	101.19	0.0000
1.530	0.918	8.398	-1.593	2.00	0.9999	8.031	101.20	0.0000
1.560	0.918	8.375	-1.601	2.01	0.9997	8.031	101.09	0.0000
1.590	0.917	8.341	-1.610	2.01	0.9995	8.031	100.85	0.0000
1.620	0.917	8.295	-1.620	2.02	0.9994	8.031	100.51	0.0000
1.650	0.920	8.238	-1.632	2.02	0.9993	8.031	100.06	0.0000
1.680	0.921	8.174	-1.642	2.03	0.9991	8.031	99.54	0.0000

7.4 EJEMPLO DE UNA MAQUINA SINCRONICA CON REGULACION AUTOMATICA DE VOLTAJE Y VELOCIDAD

El sistema es similar al presentado en el ejemplo de la sección 7.2, habiéndose incrementado los datos referentes a las constantes que poseen los sistemas de excitación y de turbina y gobernador de velocidad.

De igual forma, se simulará una falla de una fase a tierra (de la cual se presentan los resultados completos), de dos fases a tierra y trifásica (de los cuales sólo se está presentando el gráfico que muestra la curva ángulo vs. tiempo).

STUDIO NR. 1 EJEMPLO 3 GENERADOR CON EXCITATRIZ Y CONDENSADOR

DATOS DE LA MAQUINA

P₀ = 0.2187 K₀ = 7.2103 K₁ = 0.0350 K₂ = 0.0363 K₁₀ = 0.0525 K₁₁ = 0.0587 K₁₂ = 0.0000
 R₀ = 0.0060 T₀ = 5.22 T₁ = 0.0000 T₂ = 1.9600 T₁₀ = 0.0000
 A₀ = 0.0204071
 A₁ = 0.1393
 I₀ = 30.500 A₀ = 0.0000
 CODE EXCIT. = 0. MODULO DE PUNDES 12. PU
 SATURACION 1A-3173 A 1 3U ES = 0.125 A 1.2 PU ES = 0.450

CONSTANTES PARK K₀ = 3.1065 K₁ = 0.02350 K₂ = 7.01143 K₃ = 0.00000 K₄ = 0.00000
 K₅ = 0.00000 K₆ = 0.00011 K₇ = 0.00000 K₈ = 0.00000 K₉ = 0.00000
 K₁₀ = 0.00000 K₁₁ = 0.04119 K₁₂ = 0.00000

PERIODO DE ESTUDIO = 4.00 SEC.
 INTERVALO INCREMENTAL = 0.020 SFC
 TIME STEP = 0.030 SEC

ELEMENTOS ORIGINALES DE REF

Z	1 3	0.00000	0.01560
Z	2 3	0.01520	0.05540
Y	3 3	3.07900	-0.27600

VALORES PORFALLA
 P₀ VOLY YENKLE 0.0000
 ROTACION A 75 PERCENTE 0.0000
 WARS PUK 0.0000
 A₀ = 0.1393
 A₁ = 0.0204071
 A₂ = 0.00000
 A₃ = 0.00000
 A₄ = 0.00000
 A₅ = 0.00000
 A₆ = 0.00000
 A₇ = 0.00000
 A₈ = 0.00000
 A₉ = 0.00000
 A₁₀ = 0.00000
 A₁₁ = 0.00000
 A₁₂ = 0.00000

DATOS DEL TEST. EXCITACION
 SATURACION A 75 PERCENTE 0.0000
 PERIODO 3 K₀ = 7.2103 K₁ = 0.0350 K₂ = 0.0363 K₃ = 0.00000
 K₄ = 0.00000 K₅ = 0.00000 K₆ = 0.00000 K₇ = 0.00000 K₈ = 0.00000
 K₉ = 0.00000 K₁₀ = 0.00000 K₁₁ = 0.00000 K₁₂ = 0.00000
 T₀ = 5.22 T₁ = 0.0000 T₂ = 1.9600 T₃ = 0.0000
 T₄ = 0.0000 T₅ = 0.0000 T₆ = 0.0000 T₇ = 0.0000
 T₈ = 0.0000 T₉ = 0.0000 T₁₀ = 0.0000 T₁₁ = 0.0000
 T₁₂ = 0.0000

APROXIMACION DEL CONDUCTOR A 75 PERCENTE
 K₀ = 3.1065 K₁ = 0.02350 K₂ = 7.01143 K₃ = 0.00000
 K₄ = 0.00000 K₅ = 0.00011 K₆ = 0.00000 K₇ = 0.00000
 K₈ = 0.00000 K₉ = 0.00000 K₁₀ = 0.00000 K₁₁ = 0.04119
 K₁₂ = 0.00000

MODIFICACIONES AL TIEMPO = 0.200 SEC
 Z 1 3 0.00000 0.27200

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez que se ha presentado durante el desarrollo de este trabajo los argumentos teóricos en los que se basa, y habiéndose simulado un pequeño sistema de potencia a manera de ejemplo, podemos arribar a las siguientes conclusiones:

- 1.- Al desarrollar un estudio típico de la estabilidad de un sistema de potencia de tipo radial, se deberá considerar que el funcionamiento de una máquina de generación de energía eléctrica está controlada por medio de sistemas de regulación de sus parámetros de salida. Por lo anteriormente dicho, es válido el argumento de realizar el estudio considerando al generador sincrónico, el sistema de excitación y al sistema de turbina y gobernador de velocidad.
- 2.- El programa que hemos desarrollado, nos puede entregar un análisis de estabilidad transiente, de estado estable o de estabilidad dinámica, con el simple hecho de elegir los tiempos adecuados para la duración de dicho estudio y la utilización o no de los sistemas de regulación de voltaje y velocidad.

- 3.- De los resultados que nos arroja la salida del programa de computadora, se puede observar que existe un mejoramiento en la estabilidad del generador sincrónico cuando se considera que están actuando los sistemas de regulación de voltaje y velocidad, que cuando se lo considera actuando en forma individual.
- 4.- Si bien es cierto, que el programa simula dos modelos para representar a los sistemas de regulación de voltaje y velocidad, debemos tomar en cuenta que aquellos no son los más modernos, tal cual se ha explicado en los capítulos correspondientes. De poder simularse modelos más sofisticados, cuyas constantes de tiempo son menores y cuyas ganancias se han incrementado; estaremos en condiciones de lograr un incremento en el nivel de estabilidad que puede alcanzar un sistema eléctrico de potencia.
- 5.- De la conclusión anterior se desprende que se lograría una mayor confiabilidad y por ende la rentabilidad del sistema se vería incrementada.

A manera de recomendaciones se puede plantear lo siguiente:

- 1.- Aún cuando el programa simula un sistema de potencia bastante elemental, es sin lugar a dudas importante desde el punto de vista docente pues, capta el grupo de generación en todos y cada uno de sus componentes.

- 2.- El programa podría ser extendido a tener una o dos barras más, y lograr interconectar dichas barras por líneas, tal como lo hace actualmente.
Trabajando en el aspecto matemático, lograr transformar el sistema radial de 3 barras en un sistema en forma de malla, manteniendo el mismo número de barras. De la forma anterior, el programa ganaría en versatilidad.

- 3.- Haciendo las variaciones propuestas se llegaría a un programa muy útil para análisis de estabilidad de un sistema de potencia como el que tenemos en nuestra Ciudad y más aún para cualquiera de los sistemas eléctricos del País.

BIBLIOGRAFIA

1. ANDERSON AND FOUAD. Power System Control and Stability, The Iowa State University Press
2. IEEE Tutorial Course. Modern Concepts of Power System Dynamics
3. IEEE. Stability of Large Network
4. ELGERD Oile. Electric Energy System Theory, Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltda., New Delhi, 477p.
5. WREEDY B. M. Electric Power Systems, John Wiley & Sons Ltda., 254p.
6. WESTINGHOUSE Transmission and Distribution Reference Book, Westinghouse Electric Corporation, East Pittsburgh, Pennsylvania, 433 p.
7. JAMES, SMITH Y WOLFORD. Métodos numéricos aplicados a la computación digital con FORTRAN, Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A., México, 1970, 379 p.
8. STEVENSON William. Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia, Editorial McGraw-Hill Latinoamericana S.A., Colombia, 1979, 332 p.
9. KIMBARK E. W. Power System Stability