

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Eléctrica y
Electrónica



DISEÑO Y SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL DE
VOLTAJE DE UN GENERADOR SINCRONO DE 17 MVA, PARA
LA CENTRAL HIDROELECTRICA DE MALPASO - CENTROMIN
PERU S.A, EMPLEANDO SENALES ESTABILIZANTES

TESIS

Para Optar el Título Profesional de

INGENIERO ELECTRONICO

ALFREDO CESAR DUEÑAS MENDOZA

PROMOCION : 84 - II

**Lima - Perú
1994**

SUMARIO

En el siguiente trabajo podemos analizar la secuencia que se debe de realizar para la obtención de la función de transferencia para las distintas variables del generador (voltaje en los terminales del generador, velocidad angular, etc), para luego realizar la simulación del comportamiento del generador sincrónico, así la revisión de los conceptos básicos para obtener la respuesta en el tiempo por métodos convencionales de la teoría de control, utilizando un modelo matemático del generador sincrónico desarrollado por Francisco P. Demello-Charles Concordia.

Se efectúa la sintonización del regulador PID de voltaje del generador sincrónico para especificaciones técnicas de funcionamiento, utilizando el procedimiento matemático de Nichols-Ziegler.

Posteriormente aplicamos al regulador PID una señal estabilizante originada de la velocidad angular del generador, para mejorar la estabilidad del Sistema Eléctrico al cual está conectada el generador.

"DISEÑO Y SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL DE VOLTAJE DE UN GENERADOR SINCRONO DE 17 MVA, PARA LA CENTRAL HIDROELECTRICA DE MALPASO-CENTROMIN PERU S.A. EMPLEANDO SENALES ESTABILIZANTES"

TITULO : "DISEÑO Y SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL DE VOLTAJE DE UN GENERADOR SINCRONO DE 17 MVA, PARA LA CENTRAL HIDROELECTRICA DE MALPASO-CENTROMIN PERU S.A. EMPLEANDO SEÑALES ESTABILIZANTES"

AUTOR : ALFREDO CESAR DUEÑAS MENDOZA

GRADO A OPTAR : TITULO PROFESIONAL

ESPECIALIDAD : INGENIERO ELECTRONICO

FACULTAD : INGENIERIA ELECTRICA ELECTRONICA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
LIMA - 1994

EXTRACTO

El presente trabajo titulado "DISEÑO Y SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL DE VOLTAJE DE UN GENERADOR SINCRONO DE 17 MVA, PARA LA CENTRAL HIDROELECTRICA DE MALPASO CENTROMIN PERU S.A, EMPLEANDO SEÑALES ESTABILIZANTES ", fue realizado para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico en la Universidad Nacional de Ingeniería. Este estudio tiene como finalidad el diseño, planteamiento, desarrollo y elaboración de las recomendaciones necesarias para resolver el problema de la simulación aplicando a casos particulares, tal como la operación del generador síncrono a diferentes cargas con miras a establecer criterios generales, que puedan ser útiles a quienes emprendan la realización de otros trabajos de simulaciones.

Los objetivos planteados al estudio fueron logrados a través del desarrollo de cuatro (4) Capítulos, cuya

estructuración permite visualizar fácilmente los casos seguidos para resolver el problema en mención. Así, en el Capítulo I desarrollamos, a nivel matemático el modelo del Generador Síncrono propuesto por Francisco P. Demello y Charles Concordia, la simulación en lazo abierto para efectos de visualización del comportamiento del voltaje en los terminales del generador, la velocidad angular, el ángulo de la rueda polar para diferentes puntos de operación del generador, aplicando perturbaciones tipo escalón en la excitación de campo y un escalón de torque mecánico en el eje de la turbina.

En el capítulo II, se describe el funcionamiento del sistema de regulación de voltaje del sistema actual. También se muestra la configuración del sistema de control propuesta aplicando una señal estabilizante de velocidad angular.

Así en el capítulo III, con las especificaciones de funcionamiento del generador en un sistema eléctrico, se diseña el regulador de voltaje y el compensador de la señal estabilizante, mediante métodos clásicos de sintonización.

En el capítulo IV, teniendo las ecuaciones matemáticas que gobiernan el comportamiento de los distintos bloques del controlador se aplicara la señal estabilizante.

Finalmente, se resume las conclusiones y recomendaciones generales como particulares que se lograron con el desarrollo del presente estudio.

TABLA DE CONTENIDO

	pag.
PROLOGO	1
 CAPITULO I	
MODELO MATEMATICO DEL GENERADOR SINCRONO.	
1.1 Dinámica del generador conectado a un gran Sistema - Conceptos fundamentales	3
1.2 Funcionamiento del generador con flujo constante en el eje directo (E'_q).....	8
1.3 Torques de amortiguamiento y de sincronización (T_D, T_S).....	10
1.4 Funcionamiento del generador con voltaje de campo constante (E_{fd}).....	12
1.5 Función de transferencia del generador, en función del voltaje en terminales y voltaje de excitación (e_t/E_{fd}).....	17
1.6 Cálculo de los parámetros de un generador síncrono.....	23
1.7 Simulación en el tiempo para diferentes puntos de operación del generador.....	33
1.7.1 Voltaje de salida del generador para una aplicación de una excitación tipo escalón.	33
1.7.2 Angulo de la rueda polar para una aplicación de una excitación tipo escalón.....	37
1.7.3 Velocidad angular del rotor (w) para una aplicación de una excitación tipo escalón..	41
1.7.4 Velocidad angular del rotor (w) para una aplicación de torque mecánico T_M tipo escalón.....	42
 CAPITULO II:	
CONFIGURACION DEL SISTEMA DE CONTROL	
2.1 Descripción del funcionamiento del sistema de regulación de voltaje actual.....	48
2.2 Configuración del sistema de control propuesto.....	57

2.3	Configuración matemática del regulador PID práctico comercial.....	59
2.4	Conceptos de la señal estabilizante.....	61
2.4.1	Conceptos básicos de la señal estabilizante.....	62
2.4.2	Tipos de señales estabilizantes	70
2.4.3	Configuración del compensador de la señal estabilizante.....	78

CAPITULO III: ESPECIFICACIONES DE FUNCIONAMIENTO

3.1	Especificaciones técnicas de funcionamiento del sistema.....	81
3.2	Sintonización del regulador PID para el control de voltaje del generador síncrono.....	84
3.3	Sintonización de la señal estabilizante...	95
3.3.1	Límites de estabilidad en estado "estable" o "dinámico".....	95
3.3.2	Modos de oscilación en sistemas eléctricos.....	96
3.3.3	Concepto de sintonía de las señales estabilizantes.....	98
3.3.4	Procedimiento de implementación del estabilizador.	101
3.3.5	Interacción torsional.....	106
3.3.6	Efectos de las variaciones de la potencia mecánica.....	107
3.3.7	Consideraciones de ruido.....	109

CAPITULO IV: SIMULACION DEL SISTEMA

4.1	Verificación de las especificaciones de funcionamiento.....	110
4.2	Cuadro de evaluación de las diferentes formas de control para distintos puntos de operación del generador, aplicando una señal escalón de e_{ref}	112

4.2.1	En lazo cerrado solamente el regulador PID..	112
4.2.2	En lazo cerrado el Regulador PID Generador.....	114
4.2.3	Aplicación de la señal estabilizante al bloque Regulador PID - Generador	115
	CONCLUSIONES.....	122
	ANEXOS.....	126
	BIBLIOGRAFIA.....	134

PROLOGO

El presente estudio tiene como objeto el diseño del sistema de control y elaboración de las recomendaciones para resolver el problema de la estabilidad de los Generadores - Sistema, mediante la utilización del control de voltaje, aplicando las señales estabilizantes con las simulaciones del caso.

Actualmente las unidades generadoras de C.M.P.S.A operan con reguladores de voltaje electromecánicos sin la utilización de señales estabilizantes en las diferentes centrales del sistema, por la urgencia de su modernización a aplicarse, es necesario tener conocimiento de las requerimientos para una buena operación de las unidades, así como la contribución de amortiguamiento a las oscilaciones de potencia originada por la señal estabilizante. El estudio se hará para una unidad de generación de la central hidroeléctrica de Malpaso de 17 MVA mediante la utilización del modelo matemático de Francisco P. Demello y Charles Concordia el cual se resolverá mediante la utilización del software Mathcad, CC.

Así, obtenemos la función de transferencia del generador síncrono, regulador de voltaje y el estabilizador logrando configurar el sistema de control y simular para distintas condiciones de operación del generador observando

características importantes para la investigación de la estabilidad en la red, donde los parámetros pueden modificarse dentro de ciertos límites de estabilidad.

Por lo anteriormente expuesto y teniendo en cuenta las ventajas de la utilización del presente estudio que son las herramientas para contribuir a una adecuada calibración de los equipos de control.

Debo agradecer al Ing. Ruben Aquize Palacios, quien revisó el estudio, por la valiosa ayuda prestada en algunos puntos que precisaban aclaración, contribuyendo de este modo, al mejor logro de este trabajo.

Agradezco también a todos los ingenieros y demás miembros del Departamento de Electricidad y Telecomunicaciones de CENTROMIN PERU S.A. que supieron aportar sus consejos y comentarios para concluir satisfactoriamente el presente estudio.

CAPITULO I MODELO MATEMATICO DEL GENERADOR SINCRONO

1.1 Dinámica del generador conectado a un gran Sistema

Conceptos fundamentales

La planta está constituida por un generador síncrono, las características matemáticas que describen su comportamiento para pequeñas perturbaciones fueron desarrolladas por los autores Francisco P. Demello y Charles Concordia.

El fenómeno de estabilidad del generador síncrono bajo pequeñas perturbaciones, es examinado para el caso de una solo generador conectada a una barra infinita a través de una reactancia externa.

El análisis se desarrolla con el conocimiento de los efectos creados por los sistemas de excitación con tiristores y establece un entendimiento de los requerimientos de estabilización para dichos sistemas. Los requerimientos incluyen el conocer los parámetros del generador como la función característica de la velocidad angular, ángulo, potencia, etc. Dicha señal será superpuesta sobre la referencia del regulador de voltaje (e_{ref}) para proveer amortiguamiento a las oscilaciones de potencia del generador.

El fenómeno de estabilidad del generador síncrono recibe una gran atención, en la parte del estudio económico del

sistema de diseño, donde operara con grandes unidades y altas reactancias de generación así como la línea transmisión, se pone más énfasis sobre los controles para proveer los requerimientos de compensación para reducir los desplazamientos en los márgenes de estabilidad, tendencia inherentes de los equipos de control a diseñar.

En medio de los varios aspectos de operación de la estabilidad de generadores síncronos, una gran importancia es para la estabilidad debido a pequeñas perturbaciones referidos al estado estable, dinámico o estabilidad condicional. Así el incremento de la atención es orientado realmente en los efectos del control de excitación sobre los amortiguamientos a las oscilaciones que se presentan en el sistema eléctrico.

En particular esta señal estabilizante es definido como útil y práctico, para poder incorporar señales estabilizantes derivadas de la velocidad, de la frecuencia desde el terminal o potencia, que estará superpuesta sobre la referencia del voltaje, el cual proveer un adicional amortiguamiento a oscilaciones de potencia.

Por la examinación de un amplio rango de sistemas eléctricos, parámetros de las máquinas y analizando su causas y efectos, unas reglas lógicas y conceptos son desarrollados para explicar la naturaleza del problema luego dar una serie de recomendaciones para estabilizar a través del control de excitación al cual consideramos con una pequeña constante de tiempo de respuesta entre 0.03 y 0.05 segundos típico de un sistema con tiristores.

El método de análisis puede ser fácilmente extendido en sistemas de excitación con diferentes características dinámicas el cual cubre un amplio rango de condiciones para el caso de un simple generador, además se puede proyectar recomendaciones para estabilización de sistemas multimáquinas.

El fenómeno de estabilidad y amortiguamiento de generadores síncronos para el modelo de "pequeñas perturbaciones" puede ser examinado con la ayuda de los diagramas de bloques relacionando las pertinentes variables de torque eléctrico, velocidad, ángulo, voltaje en el terminal y flujo concatenado. Las relaciones de los diagramas de bloques de la fig. 1-1, discutido aquí para la representación del generador en los 2 ejes, uno en el eje directo representado por el circuito de campo sin considerar los efectos de amortiguamiento, aunque para una más rigurosa representación se puede incluir el amortiguamiento o los efectos de la corriente Eddy en el núcleo de ambos ejes, esta simple representación es suficiente para establecer los efectos básicos y desarrollar los conceptos necesarios.

El fenómeno básico en cuestión de la estabilidad del lazo Torque - Angulo, por ejemplo el comportamiento del ángulo de rotor y la velocidad seguido de un pequeño disturbio, es semejante al disturbio creado por el pequeño torque mecánico. Aunque en muchos de estos temas se tiene que verificar por varias técnicas de estabilidad como criterio de Routh's, análisis de los eigenvalores etc,

considerable valores son definidos en el análisis del fenómeno dentro de los elementos del servomecanismo y teoría de respuesta en frecuencia, así el desarrollo y el entendimiento están en los elementos básicos de la causa de varios efectos en la operación del generador.

Se dará a relatar conceptos familiares para pequeñas perturbaciones de una solo generador síncrono que alimenta a una barra infinita a través de una impedancia externa por los elementos y relaciones presentadas en la fig. 1-1.

Estas relaciones y diagramas de bloques son derivadas desde el análisis de pequeñas perturbaciones, sobre el

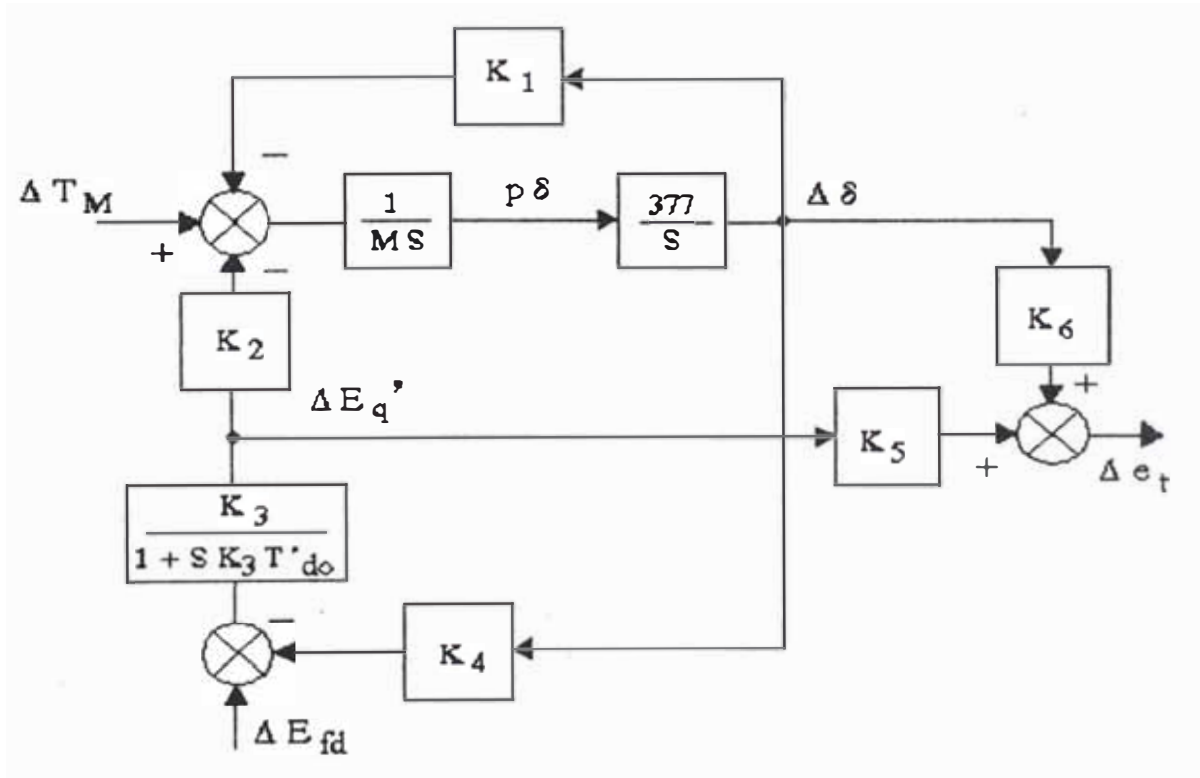


fig. 1-1. Modelo para pequeñas perturbaciones linealizadas para un solo generador alimentado a una barra infinita a través de una impedancia externa.

generador síncrono fundamental y por lo tanto estas funciones de la máquina e impedancias del sistema en un punto determinado de operación.

En el análisis sobre las ecuaciones fundamentales de un generador síncrono, donde los siguientes parámetros definimos como:

$$K_1 = \frac{\Delta T_e}{\Delta \delta} \Big|_{E'_q} \dots \dots \dots (1-1)$$

$$K_2 = \frac{\Delta T_e}{\Delta E'_q} \Big|_{\delta} \dots \dots \dots (1-2)$$

$$K_3 = \frac{X'_d + X_e}{X_d + X_e} \dots \dots \dots (1-3)$$

$$K_4 = \frac{1}{K_3} \frac{\Delta E'_q}{\Delta \delta} \dots \dots \dots (1-4)$$

$$K_5 = \frac{\Delta e_t}{\Delta \delta} \Big|_{E'_q} \dots \dots \dots (1-5)$$

$$K_6 = \frac{\Delta e_t}{\Delta E'_q} \Big|_{\delta} \dots \dots \dots (1-6)$$

$$T'_{do}$$

$$T'_{dz} = K_3 T'_{do}$$

Donde:

K_1 Cambio en el torque eléctrico debido a una variación en el ángulo del rotor, con un flujo concatenado en el eje "d" constante.

K_2 Cambio en el torque eléctrico debido a una variación del flujo concatenado en el eje "d" manteniendo constante el ángulo del rotor.

- K_3 Factor de impedancia.
- K_4 Efecto de desmagnetización debido a un cambio en el ángulo del rotor.
- K_5 Cambio de voltaje en los terminales debido a una variación en el ángulo del rotor manteniendo constante E'_q .
- K_6 Cambio en el terminal de voltaje debido a un cambio de E'_q manteniendo constante el ángulo del rotor.
- T'_{d0} Constante de tiempo para el circuito de campo abierto.
- T'_{dz} Constante de tiempo de campo efectiva bajo carga.

Es importante reconocer estas expresiones, con la excepción de K_3 el cual es solamente función de la relación de reactancia de la línea y la del generador, los otros parámetros se combinan con la carga, haciendo las condiciones dinámicas del generador para diferentes puntos de operación.

Estos parámetros son complejos, entonces esto dificulta alcanzar conclusiones basadas sobre valores de parámetros para un punto de operación solamente.

1.2 Funcionamiento del generador con flujo constante en el eje directo (E'_q).

Viendo la fig. 1-1 para una porción presentada en la fig. 1-2 para una condición de flujo constante en el eje directo.

Esta porción presenta Torque - Velocidad - Angulo el cual tiene una frecuencia de oscilación natural $\omega_n = \sqrt{(377K_1/M)}$ rad/seg, despreciando el amortiguamiento

eléctrico debido a las características de la carga.

Se puede notar que el lazo Torque - Velocidad - Angulo es un oscilador con cero de amortiguamiento, en las grandes máquinas (de pequeñas M momento de inercia) y de elevado coeficiente de sincronización K_1 tienen una elevada frecuencia de oscilación.

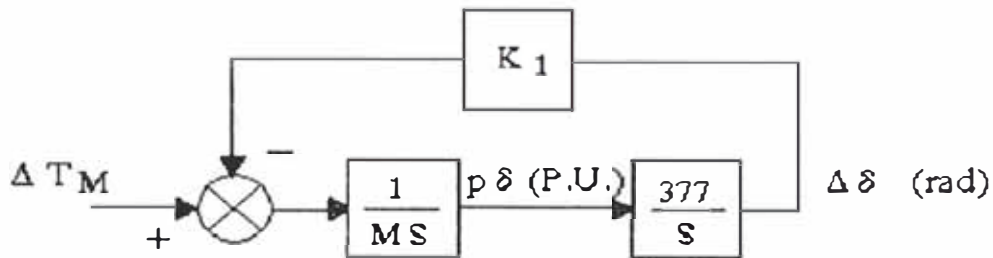


fig. 1-2. Relaciones Torque - Angulo, linealizadas manteniendo el flujo constante en el eje d

K_1 decrece por el incremento de las reactancias del generador y del sistema, afectado por la carga y debido a efectos transitorios de los polos salientes.

En muchos casos prácticos K_1 es positivo dando elevaciones de oscilaciones. Pero también es posible ver en muchos casos inusuales donde las líneas de transmisión son muy largas con una elevada carga sobre estas líneas para dar una K_1 negativa. En estos casos si mantenemos el flujo constante concatenado en el eje d, la máquina puede ser inestable, en un cálculo real de las raíces de

estabilización, idénticamente los ángulos de la máquina funcionan lejos de la monotonía y exponencialmente con el tiempo. Con una señal especial de estabilización en el control de excitación es posible que el sistema sea estable. Así estas razones académicas es prácticamente interesante.

1.3 Torques de amortiguamiento y de sincronización (T_D, T_S)

Antes de introducirnos a los efectos por pérdidas del campo y al control de excitación, es deseable para desarrollar alguno conceptos de los sistemas de segundo orden, en la fig. 1-3 se introduce el término amortiguamiento D .

En este sistema el amortiguamiento provee un torque negativo proporcional y a la vez en fase con la velocidad angular $p\delta = \omega$. La característica resultante es la ecuación:

$$S^2 + \left(\frac{D}{M}\right)S + \left(K_1 \frac{377}{M}\right) = 0 \dots \dots \dots (1-7)$$

Con una frecuencia de oscilación amortiguada $W_n \sqrt{(1-\xi^2)}$ y ξ es la relación de amortiguamiento donde:

$$W_n = \sqrt{K_1} 377 \dots \dots \dots (1-8)$$

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{D}{\sqrt{K_1 M} 377} \dots \dots \dots (1-9)$$

Una forma de estabilidad se alcanza cuando la relación de amortiguamiento está cerca de cero, para valores normales de amortiguamiento (ξ) la frecuencia no necesariamente es cero, para valores adecuados de rangos de inercia.

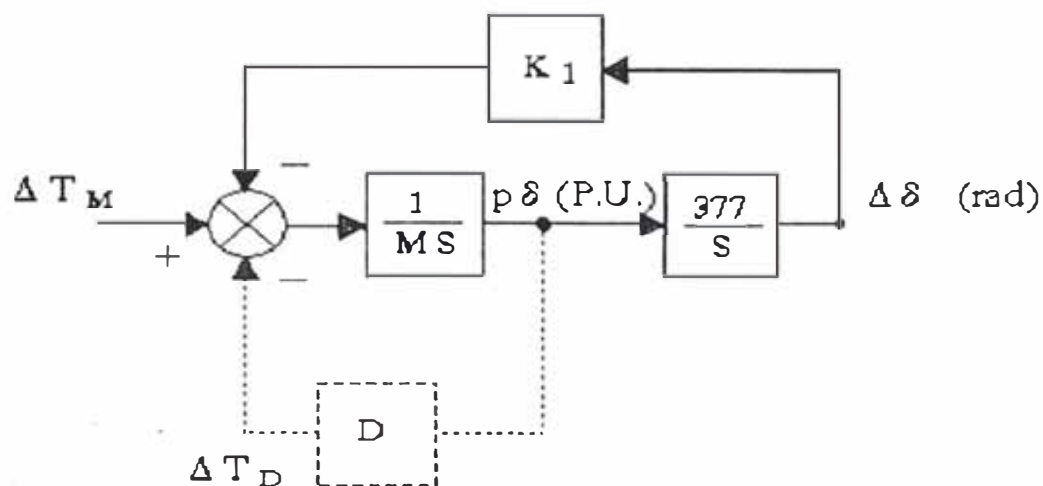


fig 1-3: Lazo de Torque - Angulo, definiendo torque de sincronización ΔT_s y torque de amortiguamiento ΔT_D .

impedancias de la carga, la frecuencia de oscilación ($\omega_n \sqrt{1-\xi^2}$) puede ser alrededor de 0.5 a 2 Hz extendiéndose a valores extremos de 0.1 a 4 Hz.

Para estos puntos es apropiado introducir el concepto de torques de sincronización y de amortiguamiento. Para cualquier valor de oscilación, los torques de "frenado" son desarrollados en fase con el ángulo del rotor y en fase con la velocidad del rotor. Originado por el torque de sincronización y luego por el torque de amortiguamiento.

Las oscilaciones desarrolladas por el torque, creado por

cualquier medio puede caer dentro de los componentes anteriores, para dar una comprensión sobre los efectos de estabilidad.

La estabilidad puede ser peligroso por la carencia de torque de sincronización y/o amortiguamiento. El criterio tradicional de la estabilidad con el cual la industria está más familiarizado concierne a las pruebas de torques de sincronización que se determina ya sea sin forzar el rotor para poder restablecer el ángulo de la máquina siguiendo un desplazamiento pequeño arbitrario de este ángulo. No corresponde a una simple regla que tiene que ser desarrollada para la prueba, la otra posibilidad es de estabilidad con la cual se aplica para los casos donde los torques de amortiguamiento son negativos. Esta forma de estabilidad está tomando importancia para dar una operación estable del generador es más en algunos casos dependen del control automático de excitación.

1.4 Funcionamiento del generador con voltaje de campo constante (E_{fd})

Introduciendo ahora los efectos de las pérdidas del campo nos referimos a la fig. 1-4 al cual se adiciona la reacción de la armadura los términos expresados como una influencia de desmagnetización el cual incrementa con el ángulo del rotor a través del bloque K_4 .

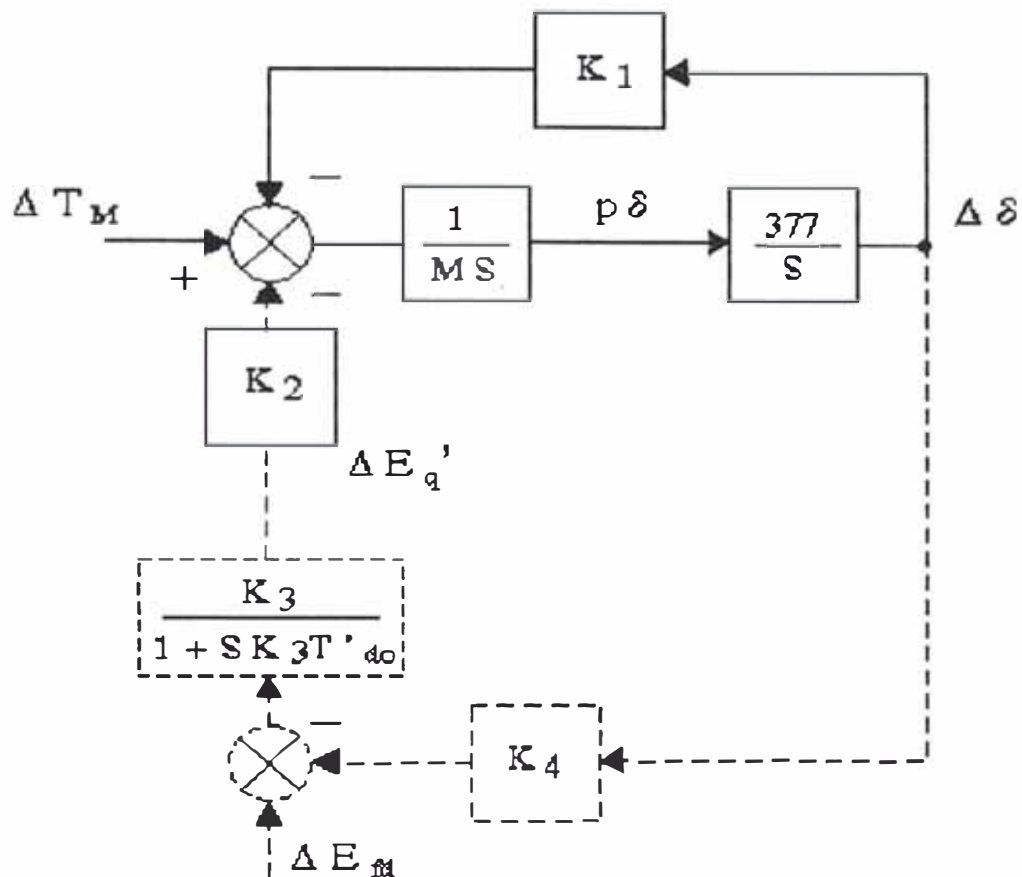


fig. 1-4. Lazo Torque - Angulo, incluyendo efectos de campo en el eje d.

Examinamos ahora la contribución del torque debido a los efectos mostrados por las líneas entrecortadas en la siguiente fig. 1-4.

Los efectos de los componentes del torque pueden ser descritos por la expresión.

$$\frac{\Delta T_e}{\Delta \delta} \Big|_{\text{debido } \Delta E'_q} = - \frac{K_2 K_3 K_4}{1 + S T'_{do} K_3} \dots \dots \dots (1-10)$$

Estos coeficientes son siempre positivos, por lo tanto para una condición de estado estable o con frecuencia de

oscilación cero, esta componente de desmagnetización del torque es $(-k_2 k_3 k_4) \Delta\delta$ el cual es opuesto en signo a la componente transitoria de sincronización discutido en la sección previa $+K_1 \Delta\delta$.

El criterio familiar de la estabilidad en estado estable (es necesario entender que en estado estable $s=0$) con el voltaje de campo constante y la condición de estabilidad limite para la cual el "coeficiente de potencia de sincronización" $(K_1 - k_2 k_3 k_4)$ es cero.

Se puede observar una alta frecuencia de oscilación, si $\omega \gg 1 / (K_j T'_{d0})$, el ángulo en fase de la componente del torque esta dada por la ecu. (1-10) es mas de 90° grados para estas altas frecuencias, estos torques son casi enteramente torques de amortiguamiento. La magnitud de los torques en el curso son atenuados con el incremento de la frecuencia.

Para generadores sincronicos y los parámetros de un sistema típico da como resultado para oscilaciones alrededor de 1 Hz, el campo puede contribuir con una relación de amortiguamiento entre 0.03 y 0.05.

En términos del comportamiento en el dominio del tiempo. La serie de gráficos en la fig. 1-5 ayuda a describir el significado de los efectos discutidos, los dibujos son respuestas en el tiempo del ángulo del generador después de un pequeño cambio escalonado del torque mecánico ΔT_M .

La fig. 1-5a presenta el caso de E'_q constante y $K_1 > 0$, las características de amortiguamiento de la oscilación es nula, como mencionamos anteriormente, el

amortiguamiento es debido a las cargas, el que es despreciado en este caso.

La fig. 1-5b presenta los efectos de la desmagnetización resultando con el mismo tipo de oscilaciones con un suave amortiguamiento superpuesto sobre un desplazamiento así el generador establece un nuevo estado estable de las condiciones del nivel de flujo. Este caso es para cual coeficiente de potencia de sincronización $K_1 - k_2 k_3 k_4 > 0$, el generador tiene una estabilidad en estado estable o estabilidad bajo el control manual cerrado dentro del tradicional sentido (coeficiente de potencia de sincronización positivo).

La fig. 1-5c ilustra la respuesta del ángulo para el caso donde el generador está operando con voltaje de campo constante E'_q , más allá de los límites de estado estable. Allí observamos las oscilaciones, sin embargo ellos están superpuestos sobre una componente permanente inestable. Para semejantes puntos de operación, puede ser conseguido por la superposición de los efectos de control excitación el cual cancela la permanente componente inestable.

En esta región de operación bajo el control del regulador tiene que ser referido como una operación de estabilidad dinámica o condicionalmente estable. Provee estabilidad dado por el control de excitación donde se requiere cancelar la señal permanente de inestabilidad sin deteriorar el amortiguamiento o una elevación del amortiguamiento negativo.

Finalmente la fig. 1-5d presenta para el caso raro donde

Curvas del ángulo de la rueda polar para una torque mecánico ΔT_M .

$E'_q = \text{constante}$
 $K_1 > 0$

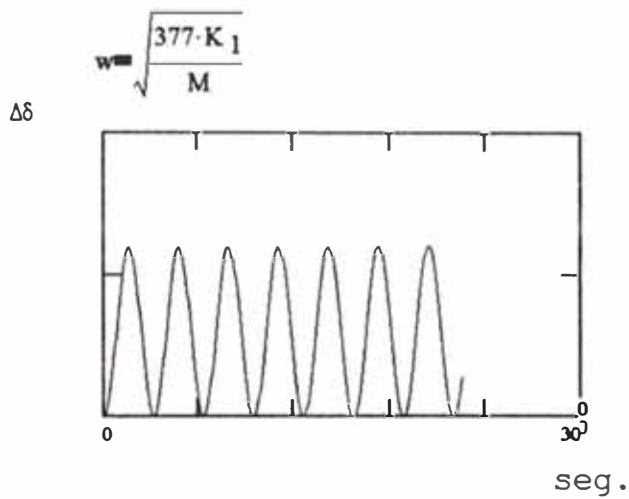


fig. 3-5a

$E_{fd} = \text{constante}$
 $K_1 - K_2 K_3 K_4 > 0$

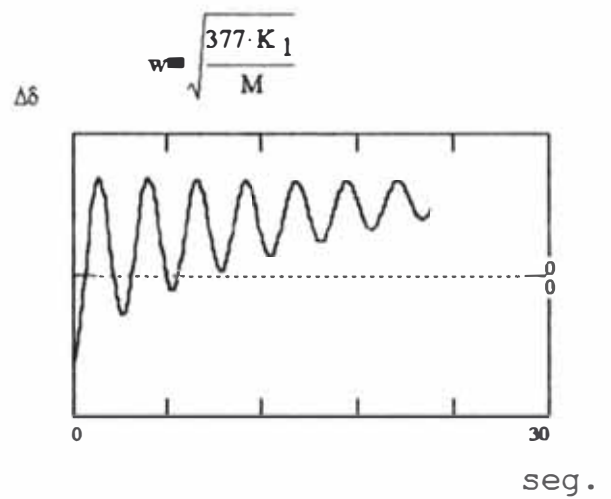


fig. 3-5b

$E_{fd} = \text{constante}$
 $K_1 - K_2 K_3 K_4 < 0$

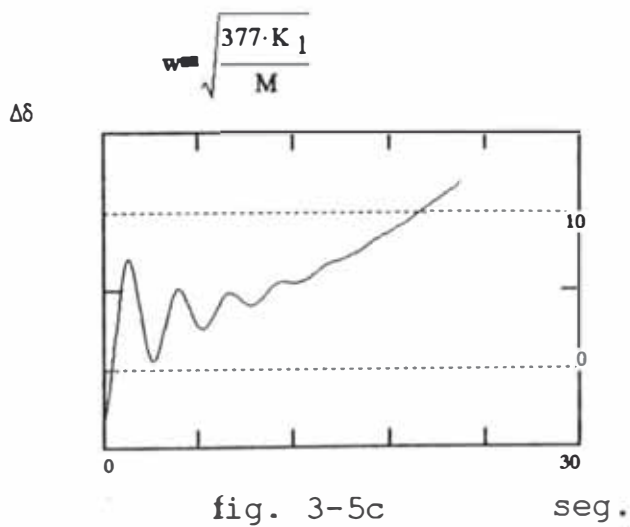


fig. 3-5c

$E'_q = \text{constante}$
 $K_1 < 0$

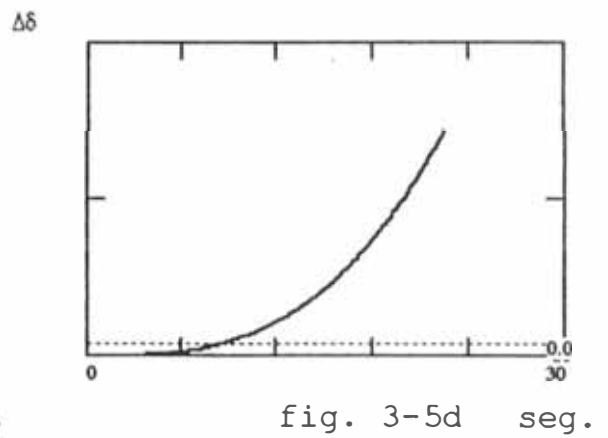


fig. 3-5d

la constante K_1 es muy pequeña o negativo en el sistema manifiesta inestabilidad sin oscilaciones bajo la condición asumida de flujo constante concatenado E'_q .

1.5 Función de transferencia del generador, en función del voltaje en terminales y voltaje de excitación (e_t/E_{fd})

De acuerdo al modelo explicado anteriormente procedemos a simplificar los bloques de control del generador equivalente secuencialmente de acuerdo a los 6 pasos para hallar la función de transferencia (e_t/E_{fd}) , con la ayuda de los siguientes fig. 1-6 al 10, según se muestra a continuación.

Para lo cual consideramos $\Delta T_M = 0$.

Donde:

e_t - Voltaje en el terminal del generador.

E_{fd} - Voltaje de excitación en el rotor del generador.

M - Momento de inercia del generador.

D - Coeficiente de amortiguamiento del generador.

T'_{d0} - Constante de tiempo longitudinal del generador a circuito abierto.

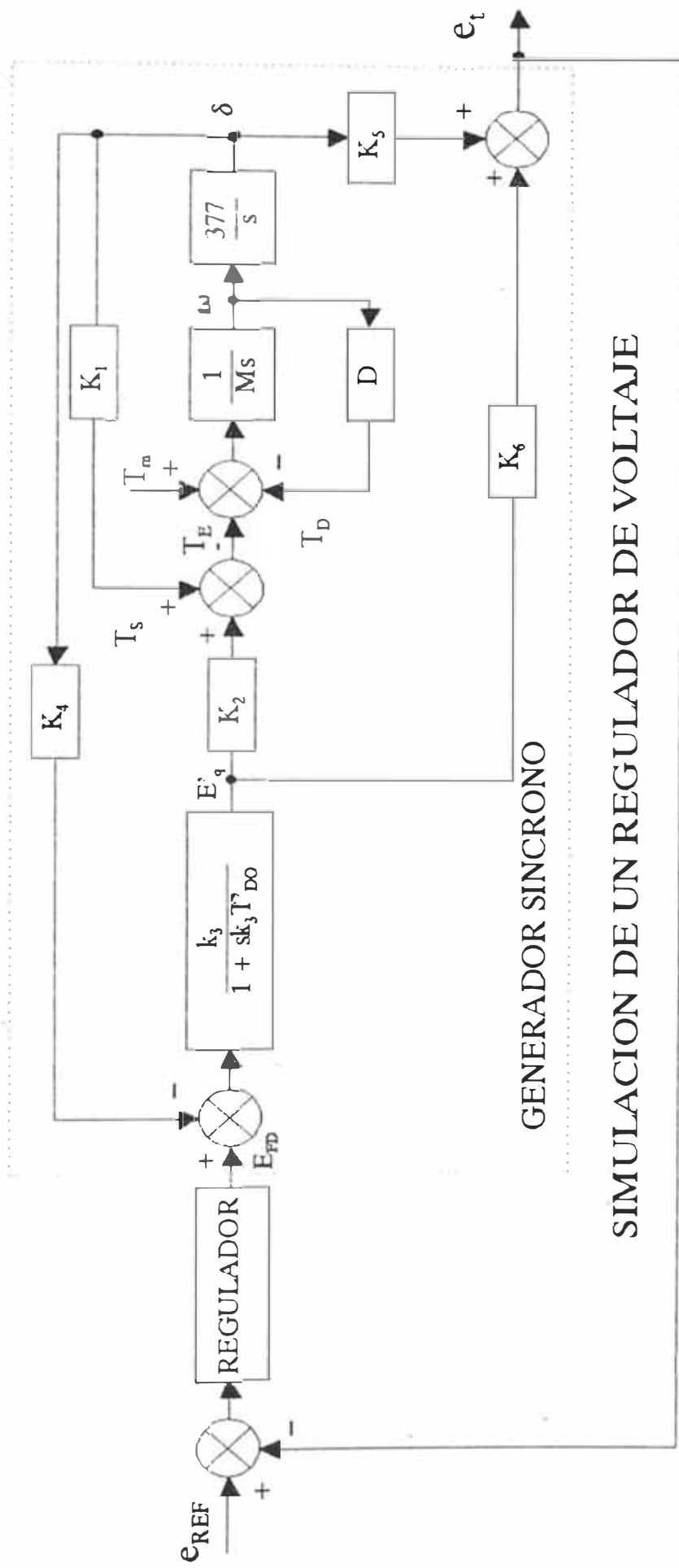


fig. 1-6 Diagrama de bloques del control de voltaje, Regulador - Generador

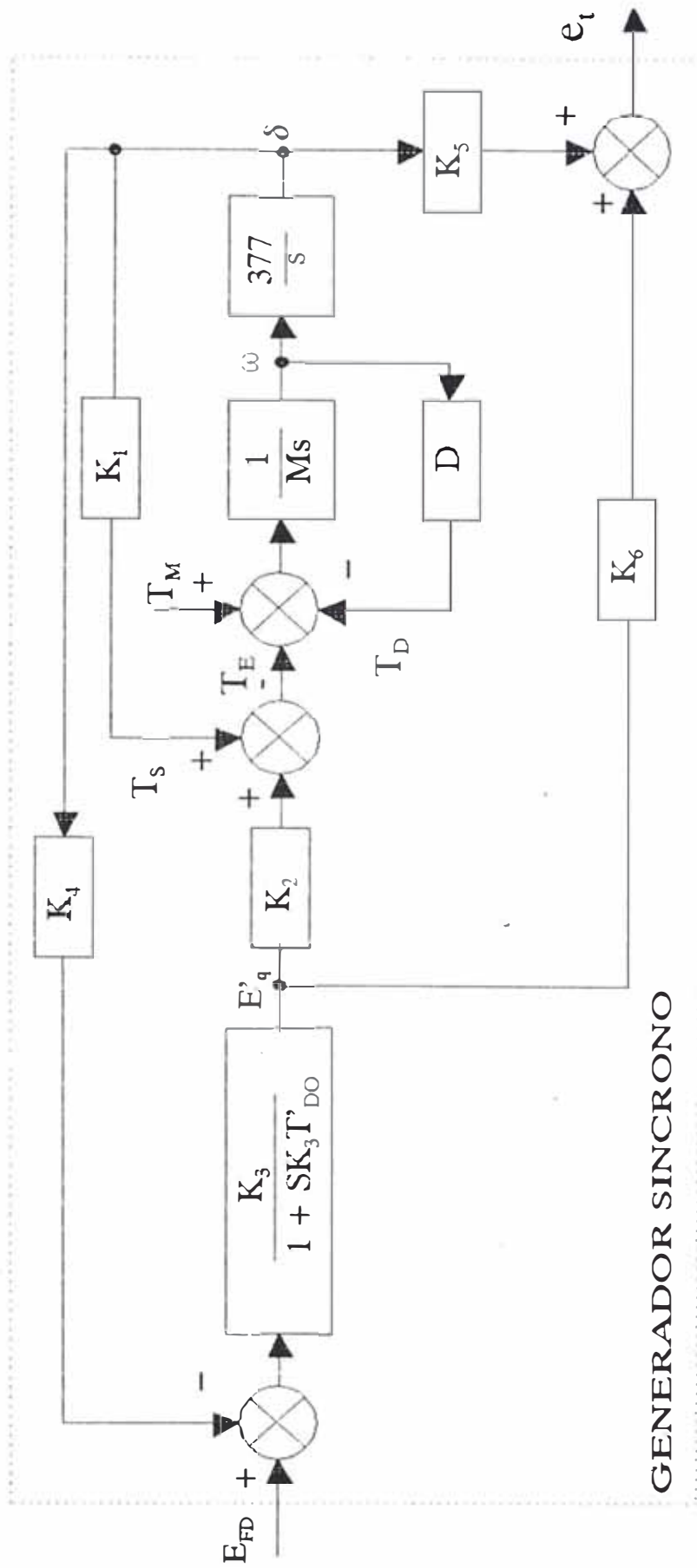


fig. 1-7 Diagrama de bloques del modelo matemático del generador sincrónico.

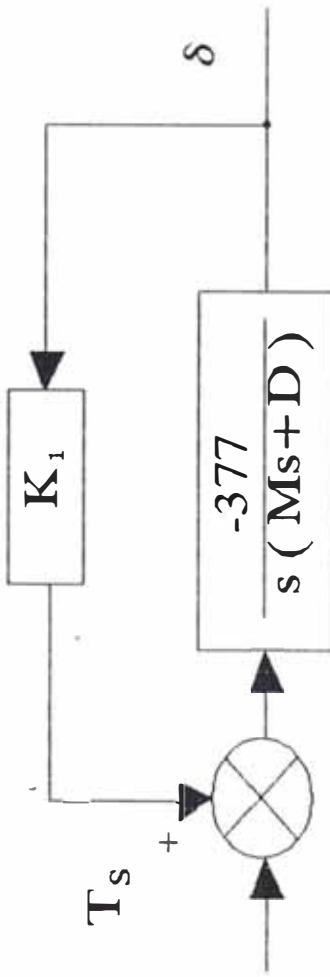
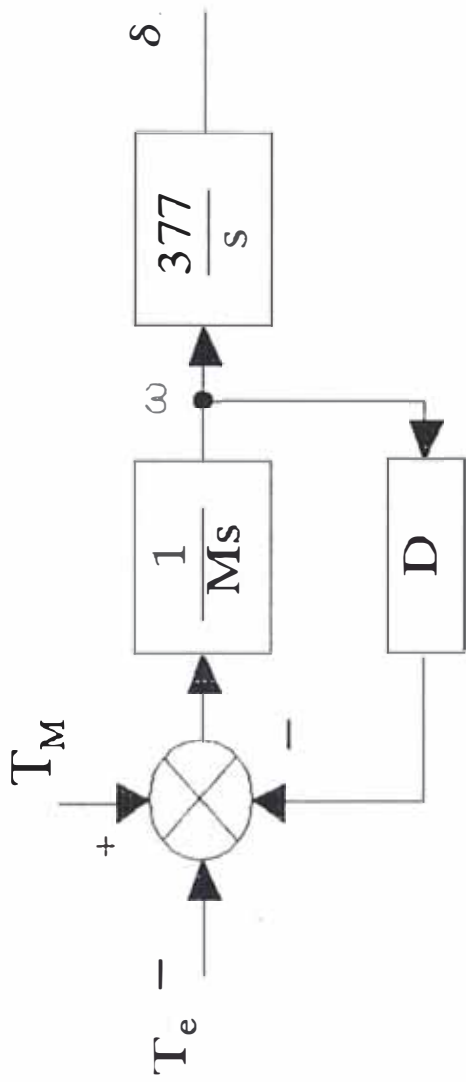


fig. 1-8 Cálculo de la función de transferencia del modelo del generador síncrono.

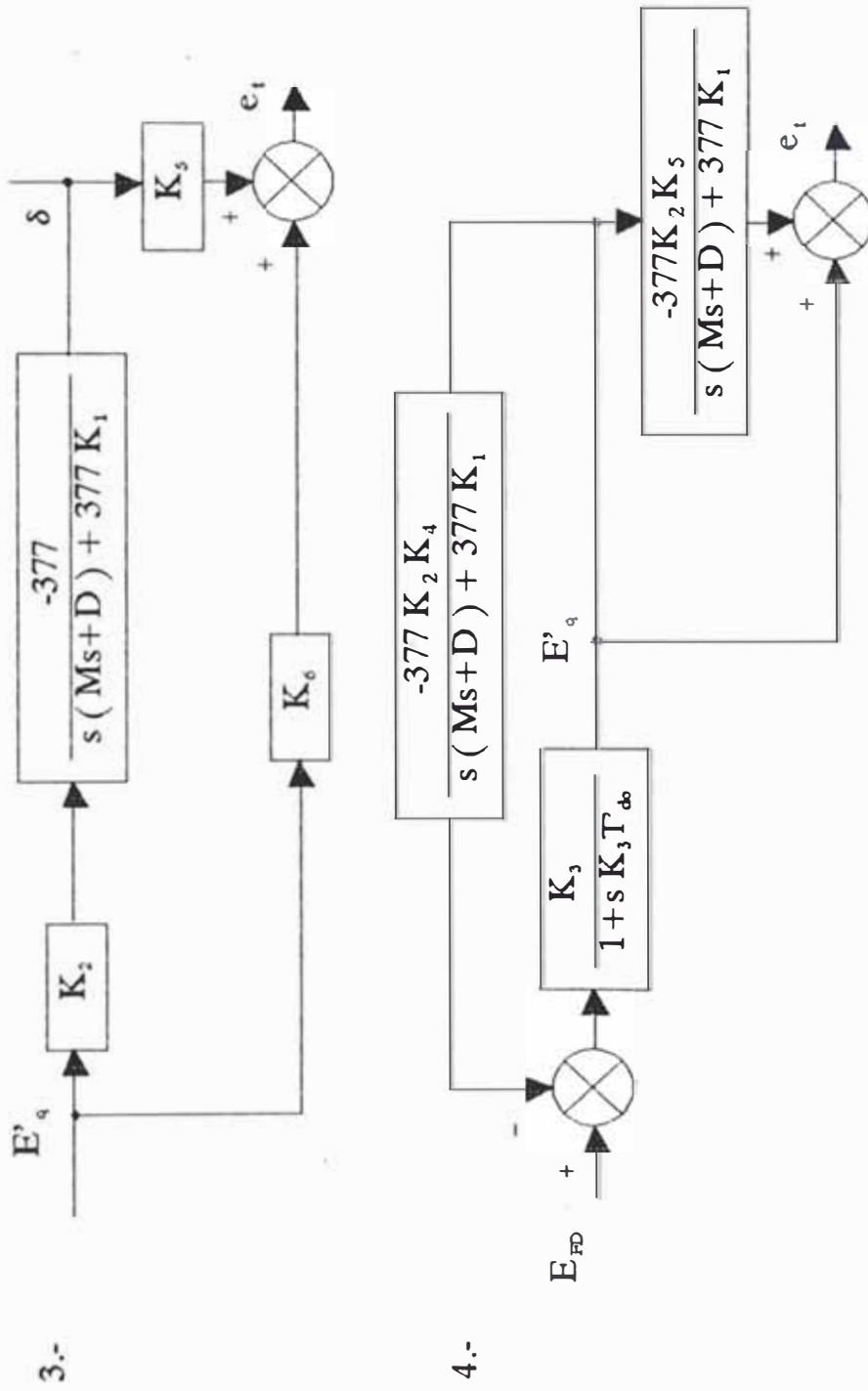


fig. 1-9 Cálculo de la función de transferencia simplificada.

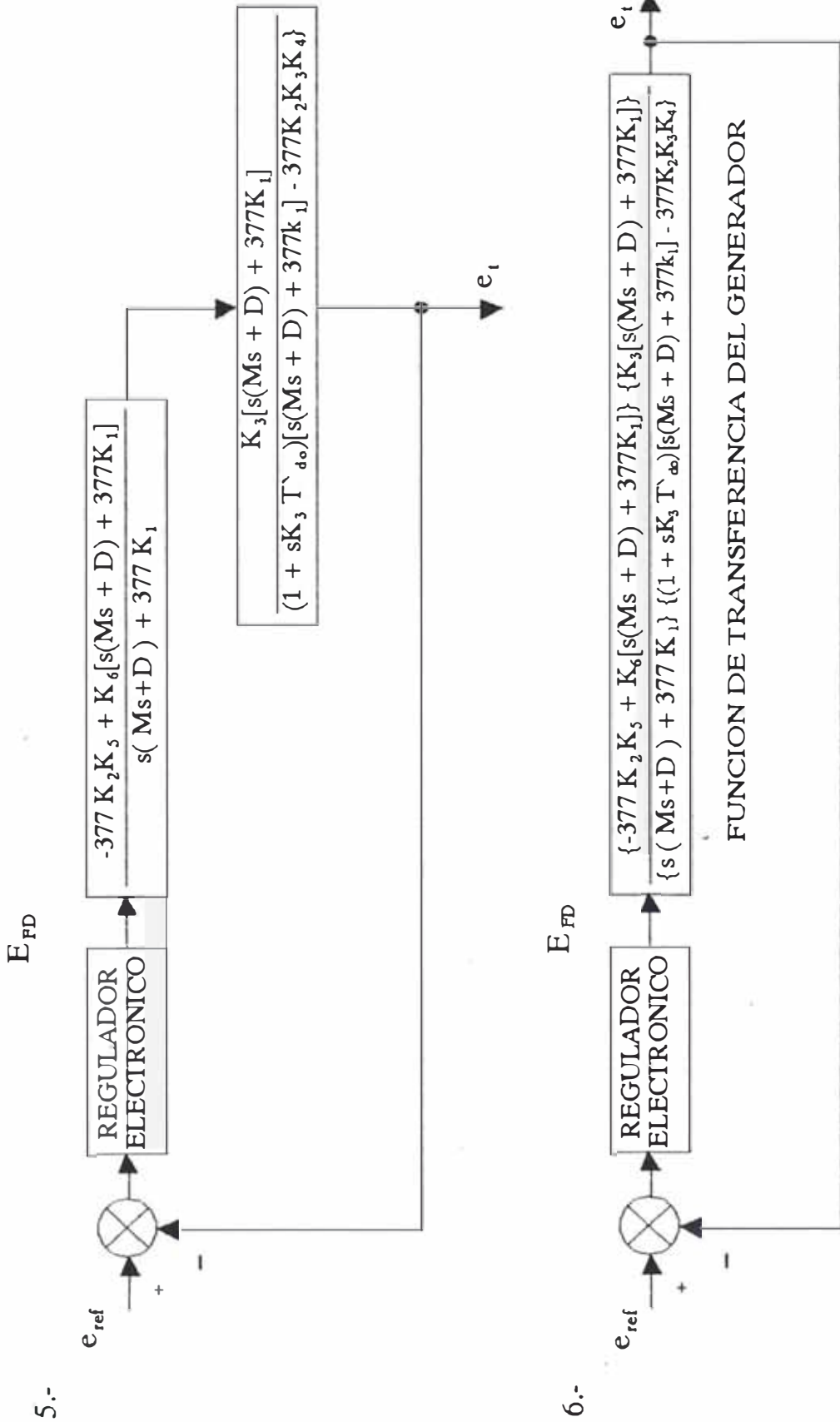


fig. 1-10 Función de transferencia simplificada del generador.

1.6 Cálculo de los parámetros de un generador sincrónico

Parámetros físicos y eléctricos del sistema y generador, en por unidad p.u..

$e_{to} := 1.28$	Voltaje en los bornes del generador
$I_{qo} := .2$	Corriente reactiva del generador
$n := 1.6$	
$I_{po} := 0.1, 0.4 \dots n$	Corriente activa del generador (variación)
$X_d := 1.2$	Reactancia en el eje directo
$X_{d1} := 0.2$	Reactancia transitoria en el eje directo
$X_q := 0.66$	Reactancia transversal del generador
$X_e := 0.3$	Reactancia del sistema (línea, transformador)
$r_e := 0$	Resistencia local
$M := 1.2$	Momento de inercia del generador
$D_a := 0.5$	Coefficiente de amortiguamiento del generador
$T_{do} := 4$	Constante de tiempo longitudinal del generador a circuito abierto

Voltajes y corrientes del generador en función de la corriente activa como variable

$E_{qo}(I_{po}) := \sqrt{(e_{to} + I_{qo} \cdot X_q)^2 + (I_{po} \cdot X_q)^2}$ Voltaje proporcional al flujo en el eje directo.

$P(I_{po}) := I_{po}$ Corriente activa variable.

$E_o(I_{po}) := \sqrt{(e_{to} - I_{po} \cdot r_e - I_{qo} \cdot X_e)^2 + (I_{po} \cdot X_e - I_{qo} \cdot r_e)^2}$ Voltaje en la barra infinita

$x_{sen}(I_{po}) := \frac{[e_{to} \cdot I_{po} \cdot (X_q + X_e) - r_e \cdot X_q \cdot (I_{po}^2 + I_{qo}^2)]}{(E_{qo}(I_{po}) \cdot E_o(I_{po}))}$ Seno del ángulo que forma E_{fm} y el voltaje en la barra infinita E_o

$$x_{\cos}(I_{po}) := \frac{[e_{to} \cdot [e_{to} - I_{qo} \cdot (X_q - X_e) - I_{po} \cdot r_e]]}{(E_{qo}(I_{po}) \cdot E_o(I_{po}))} - \frac{[X_e \cdot X_q \cdot (I_{po}^2 + I_{qo}^2)]}{(E_{qo}(I_{po}) \cdot E_o(I_{po}))}$$

$$\delta_{rp}(I_{po}) := \arccos(x_{\cos}(I_{po})) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$\delta l_{rp}(I_{po}) := \arcsin(x_{\text{sen}}(I_{po})) \cdot \frac{180}{\pi}$$

Angulo de la
rueda polar
entre E_{qo} y
 E_o

Valores que toman al variar I_{po} :

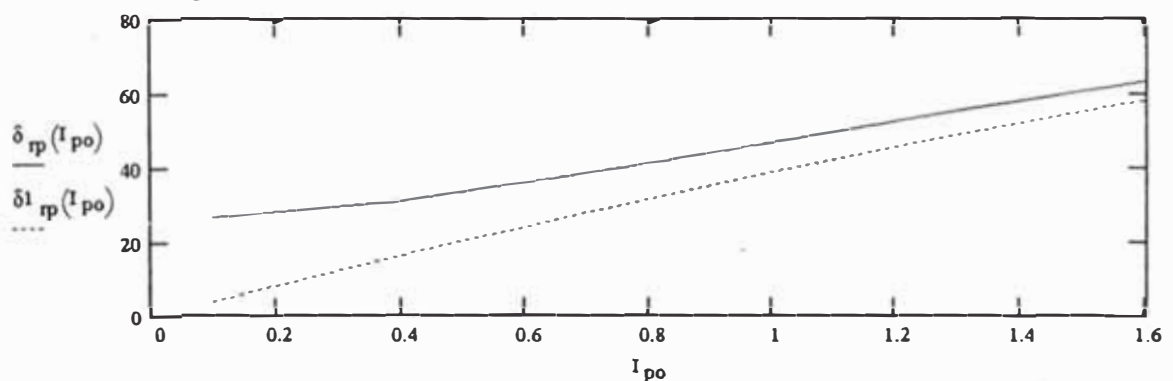
$p(I_{po})$	$x_{\cos}(I_{po})$	$x_{\text{sen}}(I_{po})$	$\delta_{rp}(I_{po})$	$\delta l_{rp}(I_{po})$	$E_{qo}(I_{po})$	$E_o(I_{po})$
0.1	0.89061	0.07123	27.04998	4.08481	1.41354	1.22037
0.4	0.85558	0.27912	31.17562	16.20783	1.43647	1.22589
0.7	0.78367	0.46769	38.40195	27.88454	1.48566	1.23794
1	0.68447	0.62752	46.80593	38.86745	1.55864	1.25634
1.3	0.5688	0.75485	55.33373	49.01253	1.65224	1.28082
1.6	0.4462	0.85052	63.49988	58.2687	1.7632	1.31103

El modelo matemático del generador presenta en este caso una buena aproximación en la evaluación del seno del ángulo de la rueda polar (E_{qo} , E_o), sin embargo para el coseno del ángulo no presenta una buena aproximación aunque tiene una tendencia aceptable.

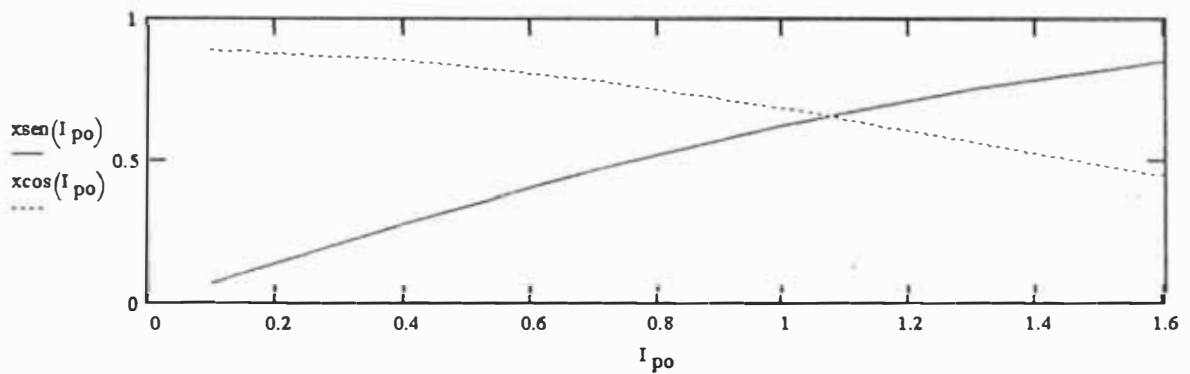
En el siguiente gráfico podemos apreciar dicha variación.

Variación del ángulo de la rueda polar

grados sexg.



Variación del seno, coseno del ángulo de la rueda polar

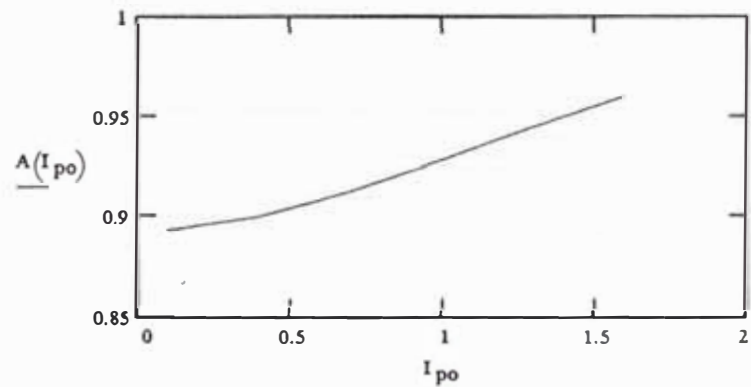


$$A(I_{po}) := \sqrt{x_{sen}(I_{po})^2 + x_{cos}(I_{po})^2}$$

Verificación del seno, coseno

$A(I_{po})$

0.89345
0.89996
0.91262
0.92859
0.94516
0.96046



- Corrientes y voltajes en el eje directo y transversal

$$i_{qo}(I_{po}) := \frac{[I_{po} \cdot (e_{to} + I_{qo} \cdot X_q) - I_{qo} \cdot I_{po} \cdot X_q]}{E_{qo}(I_{po})}$$

Corriente en el eje de cuadratura

$$i_{do}(I_{po}) := \frac{[I_{po}^2 \cdot X_q + I_{qo} \cdot (e_{to} + I_{qo} \cdot X_q)]}{E_{qo}(I_{po})}$$

Corriente en el eje directo

$$e_{qo}(I_{po}) := \left[\frac{(e_{to} + I_{qo} \cdot X_q)}{E_{qo}(I_{po})} \right] \cdot e_{to}$$

Voltaje en el eje de cuadratura

$$e_{do}(I_{po}) := i_{qo}(I_{po}) \cdot X_q$$

Voltaje en el eje directo

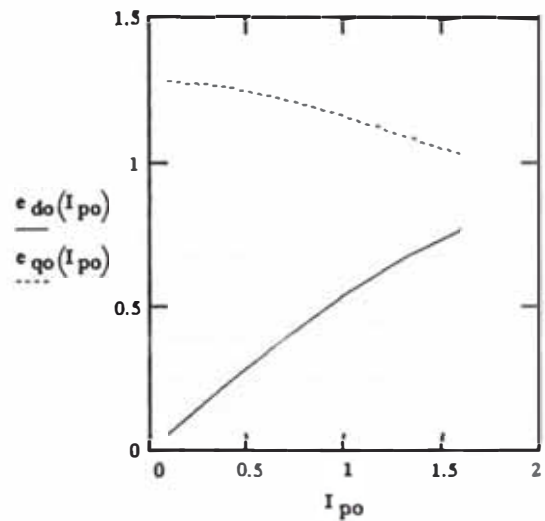
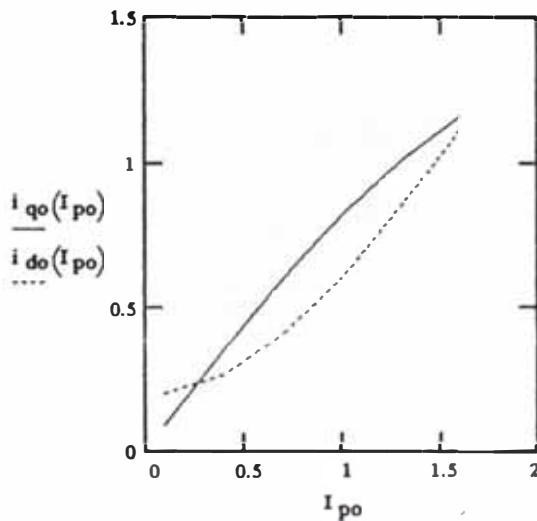
Valores que toman al variar I_{po}

$i_{qo}(I_{po})$
0.09055
0.35643
0.6031
0.82123
1.00712
1.16152

$i_{do}(I_{po})$
0.20445
0.27011
0.40776
0.60463
0.846
1.11842

$e_{qo}(I_{po})$
1.2786
1.2582
1.21654
1.15958
1.09388
1.02504

$e_{do}(I_{po})$
0.05976
0.23524
0.39805
0.54201
0.6647
0.76661



Se puede apreciar que aumentando la corriente $I_{qo}=0.2$ a $I_{qo}=0.8$ (corriente reactiva del generador en p.u.) la variación más elevada es realizada por la corriente i_{do} en 0.5 p.u. aprox. sin alterarse los demás voltajes o corrientes significativamente.

También aumenta en pequeña escala la discrepancia del ángulo de la rueda polar.

Parámetros de un generador $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ según (Francisco P. Demello, Charles Concordia)

$$K_1(I_{po}) := \frac{(X_q - X_{dl})}{(X_e + X_{dl})} \cdot i_{qo}(I_{po}) \cdot E_o(I_{po}) \cdot x_{sen}(I_{po}) + \frac{(E_{qo}(I_{po}) \cdot E_o(I_{po}) \cdot x_{cos}(I_{po}))}{(X_e + X_q)}$$

$$K_2(I_{po}) := E_o(I_{po}) \cdot \frac{x_{sen}(I_{po})}{(X_e + X_{dl})}$$

$$K_3 := \frac{(X_{dl} + X_e)}{(X_d + X_e)}$$

$$K_4(I_{po}) := \frac{(X_d - X_{dl})}{(X_e + X_{dl})} \cdot E_o(I_{po}) \cdot x_{sen}(I_{po})$$

$$K_5(I_{po}) := \frac{X_q}{(X_e + X_q)} \cdot \frac{e_{do}(I_{po})}{e_{to}} \cdot E_o(I_{po}) \cdot x_{cos}(I_{po}) - \frac{X_{dl}}{(X_e + X_{dl})} \cdot \frac{e_{qo}(I_{po})}{e_{to}} \cdot E_o(I_{po}) \cdot x_{sen}(I_{po})$$

$$K_6(I_{po}) := \frac{X_e}{(X_e + X_{dl})} \cdot \frac{e_{qo}(I_{po})}{e_{to}}$$

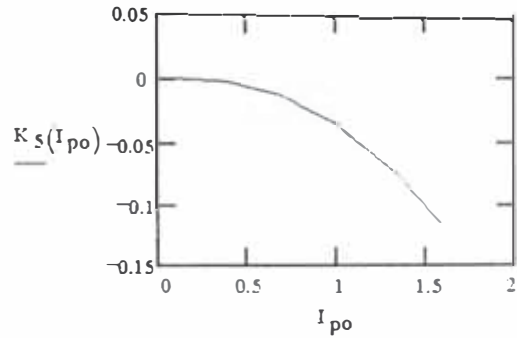
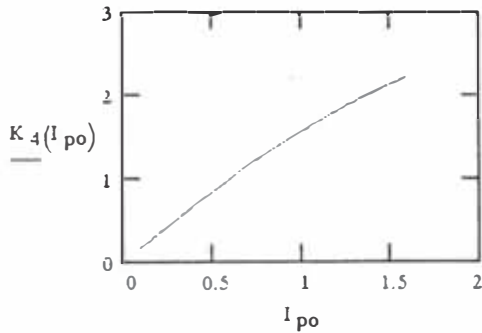
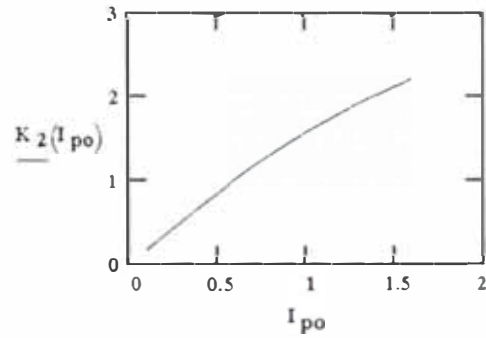
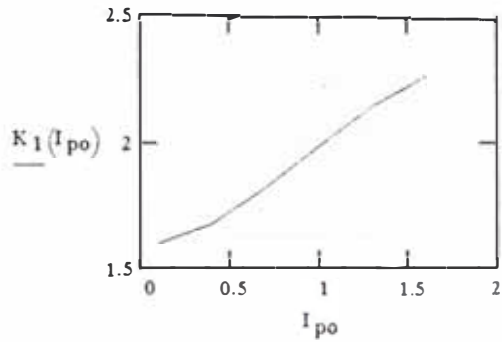
Se puede ver las variaciones de los distintos parámetros que conforma el diagrama de bloques del modelo matemático de un generador.

Valores que toma los parámetros del generador sincrónico:

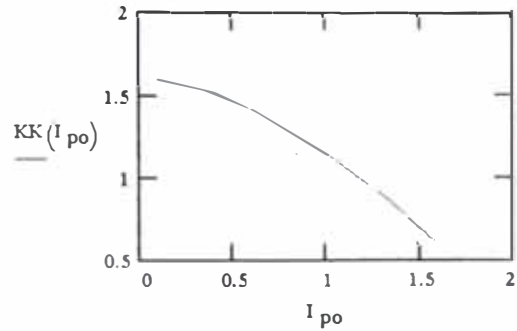
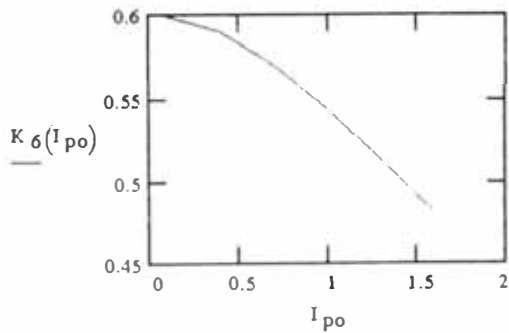
$K_1(I_{po})$	$K_2(I_{po})$	$K_3 = 0.33333$	$K_4(I_{po})$	$K_5(I_{no})$	$K_6(I_{po})$
1.6076	0.17386		0.17386	0.00015	0.59935
1.68162	0.68435		0.68435	-0.00201	0.58978
1.8226	1.15795		1.15795	-0.0127	0.57025
1.99182	1.57676		1.57676	-0.03534	0.54355
2.14967	1.93366		1.93366	-0.07041	0.51276
2.26597	2.23012		2.23012	-0.11632	0.48049

Variación gráfica de los parámetros del generador sincrónico según el modelo propuesto, con la variación de la corriente activa desde 0.1 a 1.6 p.u y la corriente reactiva 0.2 p.u constante en todo el análisis.

Gráfico de valores que toma los parámetros del generador síncrono:



$$KK(I_{po}) := K_1(I_{po}) - K_2(I_{po}) \cdot K_3 \cdot K_4(I_{po})$$



- Cálculo de los parámetros de la función de transferencia del generador síncrono, A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,N,M donde:

$$F_t(S) = \frac{(A s^2 + B s + C) (D s^2 + E s + F)}{(G s^3 + H s^2 + I s + J) (K s^2 + M s + N s)}$$

Donde definimos las siguientes variables de la F.T

del generador :

$$A = M \cdot K_3$$

$$H = M + K_3 \cdot T_{do} \cdot D_a$$

$$B = D_a \cdot K_3$$

$$I(I_{po}) = D_a + 377 \cdot (K_1(I_{po}) - K_2(I_{po}) \cdot K_3 \cdot K_4(I_{po})) \cdot K_3 \cdot T_{do}$$

$$C(I_{po}) = 377 \cdot K_1(I_{po}) \cdot K_3$$

$$J(I_{po}) = 377 \cdot (K_1(I_{po}) - K_2(I_{po}) \cdot K_3 \cdot K_4(I_{po}))$$

$$D(I_{po}) = M \cdot K_6(I_{po})$$

$$K = M$$

$$E(I_{po}) = D_a \cdot K_6(I_{po})$$

$$M = D_a$$

$$G = K_3 \cdot T_{do} \cdot M$$

$$N(I_{po}) = 377 \cdot K_1(I_{po})$$

$$F(I_{po}) = 377 \cdot (K_1(I_{po}) \cdot K_6(I_{po}) - K_2(I_{po}) \cdot K_5(I_{po}))$$

De $F_t(s)$ se puede simplificar el numerador a $K_3 (D s^2 + E s + F)$ que se elimina con la expresión del denominador quedando reducido a la siguiente expresión :

$$F_t(s) = \frac{K_3 (D s^2 + E s + F)}{(G s^3 + H s^2 + I s + J)}$$

Donde : $A_0 = K_3 \cdot D$ $B_0 = K_3 \cdot E$ $C_0 = K_3 \cdot F$ $G_0 = G$ $H_0 = H$ $I_0 = I$ $J_0 = J$

$$A_0(I_{po}) := M \cdot K_3 \cdot K_6(I_{po})$$

$$E_0 := M + D_a \cdot K_3 \cdot T_{do}$$

$$B_0(I_{po}) := D_a \cdot K_3 \cdot K_6(I_{po})$$

$$F_0(I_{po}) := D_a + 377 \cdot (K_1(I_{po}) - K_2(I_{po}) \cdot K_3 \cdot K_4(I_{po})) \cdot K_3 \cdot T_{do}$$

$$C_0(I_{po}) := 377 \cdot K_3 \cdot (K_1(I_{po}) \cdot K_6(I_{po}) - K_2(I_{po}) \cdot K_5(I_{po}))$$

$$D_0 := M \cdot K_3 \cdot T_{do}$$

$$G_0(I_{po}) := 377 \cdot (K_1(I_{po}) - K_2(I_{po}) \cdot K_3 \cdot K_4(I_{po}))$$

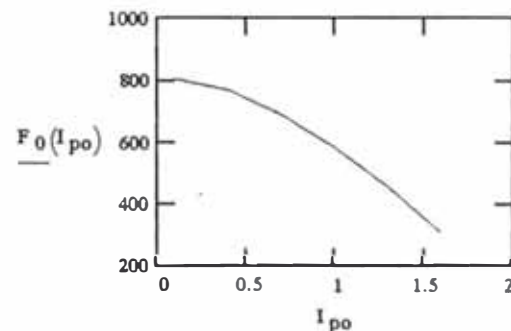
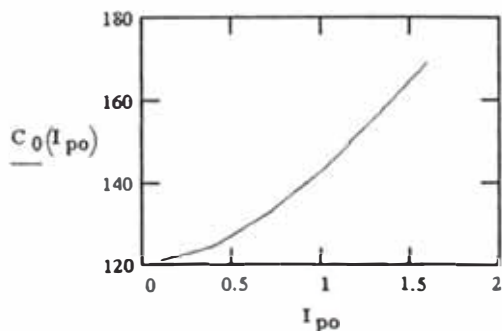
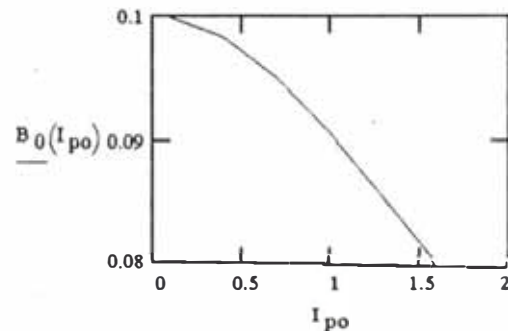
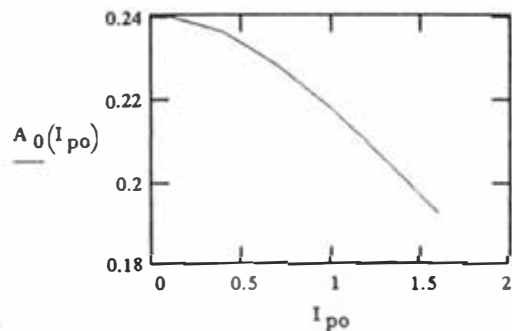
$$FT(I_{po}, S) := \frac{(A_0(I_{po}) \cdot S^2 + B_0(I_{po}) \cdot S + C_0(I_{po}))}{(D_0 \cdot S^3 + E_0 \cdot S^2 + F_0(I_{po}) \cdot S + G_0(I_{po}))}$$

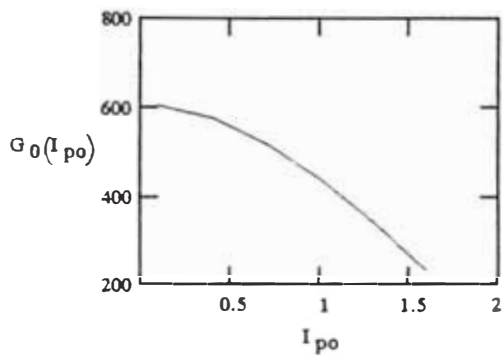
Los parámetros toman los siguientes valores:

$A_0(I_{po})$	$B_0(I_{po})$	$C_0(I_{po})$	$D_0 = 1.6$	$E_0 = 1.86667$	$F_0(I_{po})$	$G_0(I_{po})$	I_{po}
0.23974	0.09989	121.07718			803.52021	602.26516	0.1
0.23591	0.0983	124.80763			767.32347	575.1176	0.4
0.2281	0.09504	132.45797			691.99329	518.61997	0.7
0.21742	0.09059	143.05651			585.14499	438.48374	1
0.2051	0.08546	155.62551			454.56804	340.55103	1.3
0.1922	0.08008	169.42117			306.19926	229.27445	1.6

Variación de los parámetros de la función de transferencia del generador de acuerdo a la variación de la corriente activa desde 0.1 a 1.6 p.u con $I_{q0} = 0.2$ p.u

Gráfico de Valores que toma los parámetros de la F.T:





- Casos que se presentan al modificarse la función de transferencia (aplicación en lazo abierto)

Aquí estableceremos la evaluación en la frecuencia de la función de transferencia del generador con las condiciones antes referidas, podemos notar la ganancia del generador como el desfase causado por éste cuando se incrementa la frecuencia, es de notar el uso de varios investigadores la utilización de una coherente ecuación simplificada que cumpla con los requerimientos del generador para la simulación de la tensión de salida ante una excitación de campo está dada por la ecuación $FT_t(S)$, donde tiene involucrado algunos parámetros del generador, donde la ganancia está determinado por el numerador, normalmente se considera K_3 .

Para establecer una comparación, hemos evaluado en los siguientes gráficos observando la aproximación que ésta ofrece (solamente cuando se requiere $FT = V_t / E_{fd}$).

$$FT(I_{po}, S) := \frac{(A_0(I_{po}) \cdot S^2 + B_0(I_{po}) \cdot S + C_0(I_{po}))}{(D_0 \cdot S^3 + E_0 \cdot S^2 + F_0(I_{po}) \cdot S + G_0(I_{po}))} \quad \text{Ecuación General}$$

$$FT(s) := \frac{K_3}{K_3 \cdot T_{do} \cdot s + 1}$$

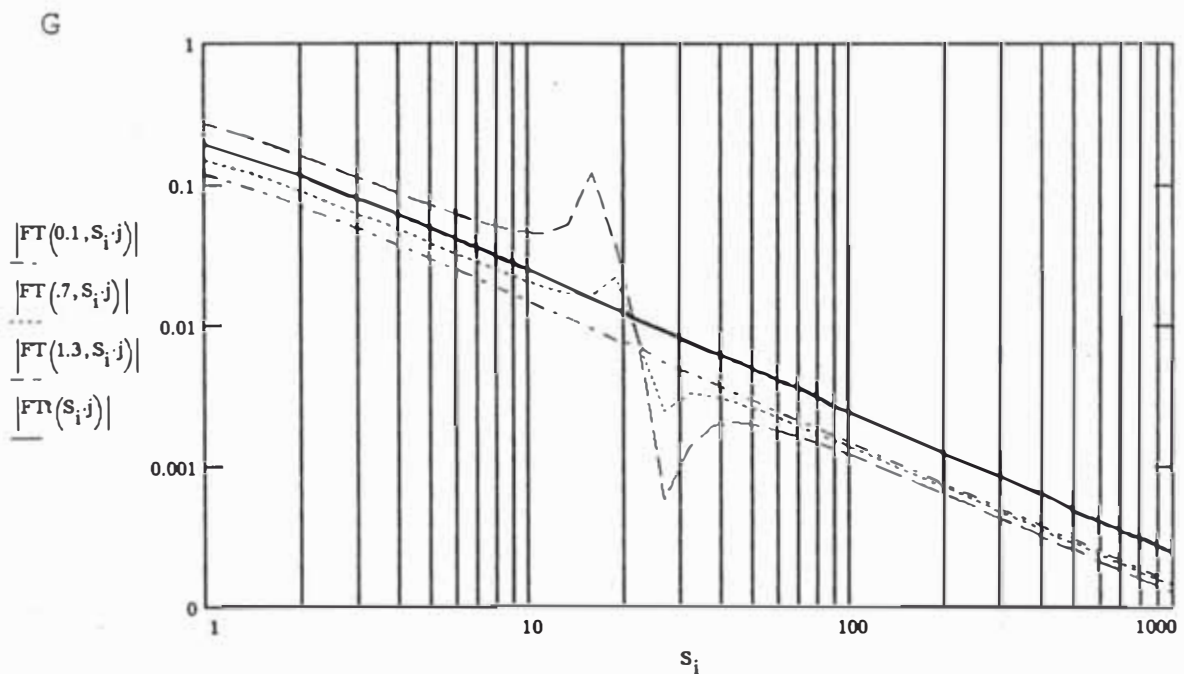
Ecuación Simplificada

Esta ecuación es utilizada solamente para obtener el voltaje en los terminales del generador por efecto de la excitación de campo.

$$m := 40 \quad i := 0..m \quad \max := 1000 \quad \min := 1$$

$$r := \ln\left(\frac{\max}{\min}\right) \quad S_i := \min \cdot \exp\left(i \cdot \frac{r}{m}\right) \quad j := \sqrt{-1}$$

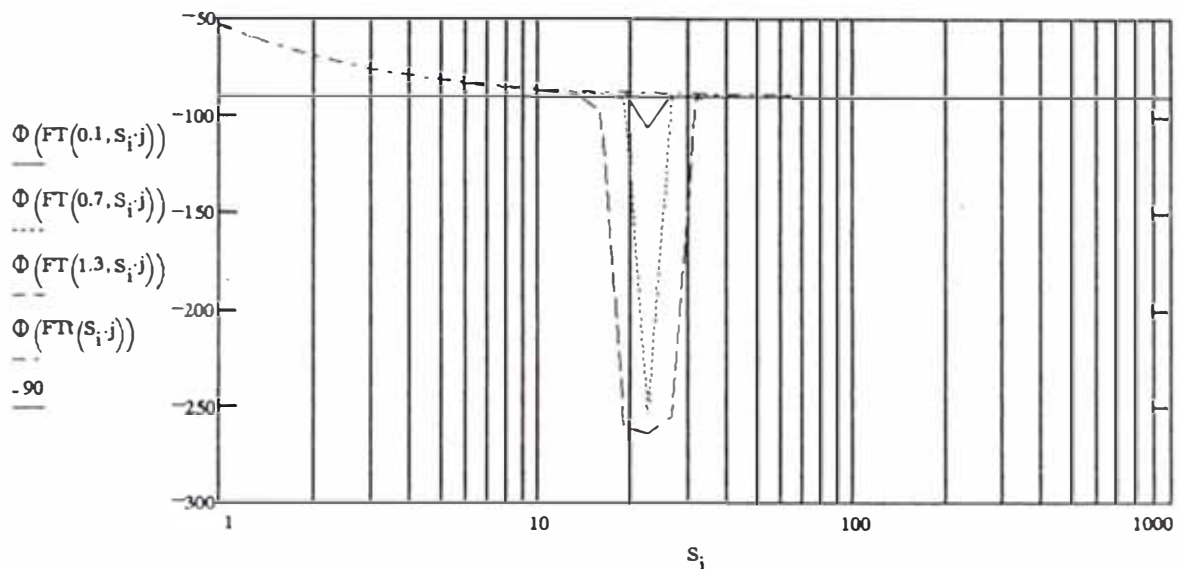
Función de transferencia de los modelos del generador para distintos casos de operación (con carga) en lazo abierto.



Se describe en el software de Mathcad el ángulo de F.T de la siguiente forma:

$$\Phi(\theta) = \text{angle}(\text{Re}(\theta), \text{Im}(\theta)) \cdot \frac{360}{2 \cdot \pi} - 360$$

Angulo de la F.T del generador en lazo abierto



w

Podemos notar la variación del ángulo en atraso que refleja el motor, por ejemplo para la frecuencia de 60 Hz que aproximadamente es:

$$\Phi(F\Gamma(377; j)) = -89.88602 \text{ grados}$$

1.7 Simulación en el tiempo para diferentes puntos de operación del generador

1.7.1 Voltaje de salida del generador para una aplicación de una excitación tipo escalón

Luego de la evaluación de la función de transferencia que relaciona la tensión de salida, con la excitación de campo del generador, las expresiones están dadas en Laplace (en frecuencia) por lo que procedemos a hacer la conversión en el tiempo (para esta conversión se utilizó el paquete de software CC), al cual aplicamos una excitación de campo tipo escalón, para observar la

respuesta en el tiempo de la tensión de salida del generador.

Para que dicha evaluación sea más dinámica se procedió luego para las 3 condiciones de operación del generador para $I_{p0} = 0.1, 0.7, 1.3$ p.u.

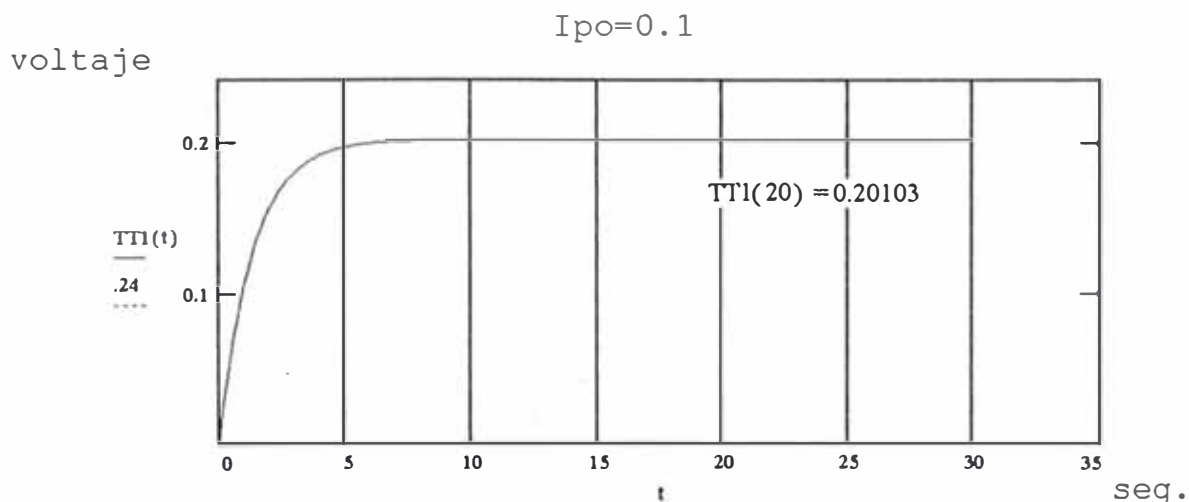
Estos datos fueron calculados por el paquete de software CC que calcula la Inversa de Laplace.

- CALCULO PARA $I_{p0} = 0.1$

$$\begin{aligned} A0 &:= .20103 & D0 &:= 2.322 \cdot 10^{-2} & G0 &:= .749 \\ B0 &:= 6.252 \cdot 10^{-5} & E0 &:= .206 \\ C0 &:= 22.401 & F0 &:= .201 & t &:= 0, .1..30 \end{aligned}$$

$$TT1(t) := A0 - B0 \cdot \sin(C0 \cdot t + D0) \cdot \exp(-E0 \cdot t) - F0 \cdot \exp(-G0 \cdot t)$$

Respuesta del voltaje en terminales del generador para $I_{p0} = .1$ p.u.



Aquí procedemos a hacer una observación de las componentes que están involucradas en la respuesta de la tensión de salida del generador. Realmente la componente

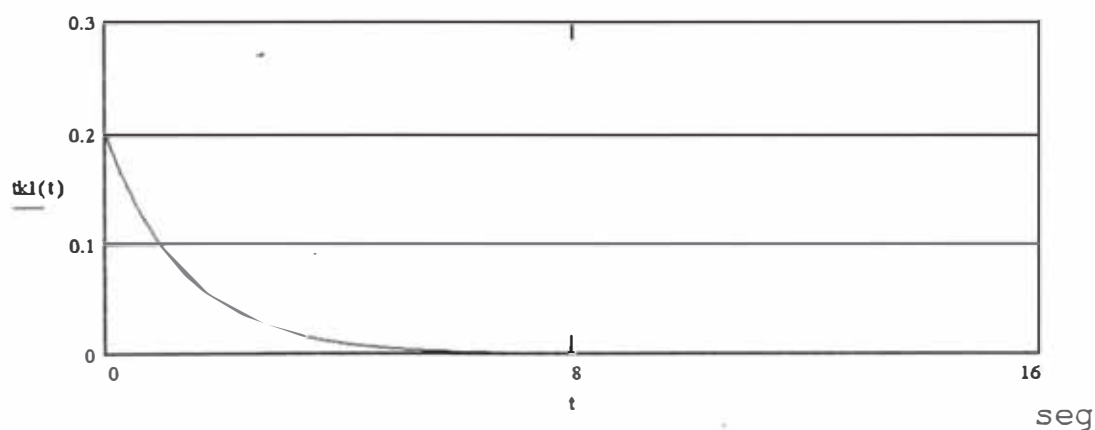
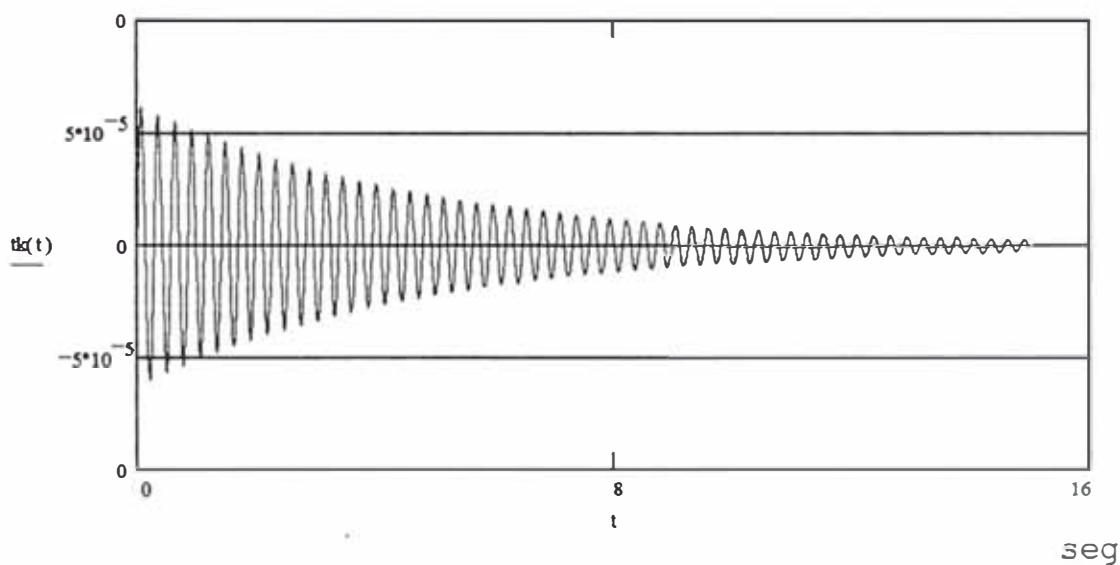
$tk_1(t)$ es la determinante del tiempo de respuesta.

$$tk(t) := B0 \cdot \sin(C0 \cdot t + D0) \cdot \exp(-E0 \cdot t)$$

$$tk_1(t) := F0 \cdot \exp(-G0 \cdot t)$$

$$t := 0, .01 .. 15$$

Gráfico de las componentes de respuesta del voltaje en terminales del generador para $I_{po} = 0.1$ p.u.



- CALCULO PARA $I_{po} = 0.7$

$$A0 := .255 \quad D0 := 1.86 \cdot 10^{-2} \quad G0 := .75$$

$$B0 := 2.6 \cdot 10^{-3} \quad E0 := .206$$

$$C0 := 20.786 \quad F0 := .255 \quad t := 0, .1 .. 30$$

$$TT2(t) := A0 - B0 \cdot \sin(C0 \cdot t + D0) \cdot \exp(-E0 \cdot t) - F0 \cdot \exp(-G0 \cdot t)$$

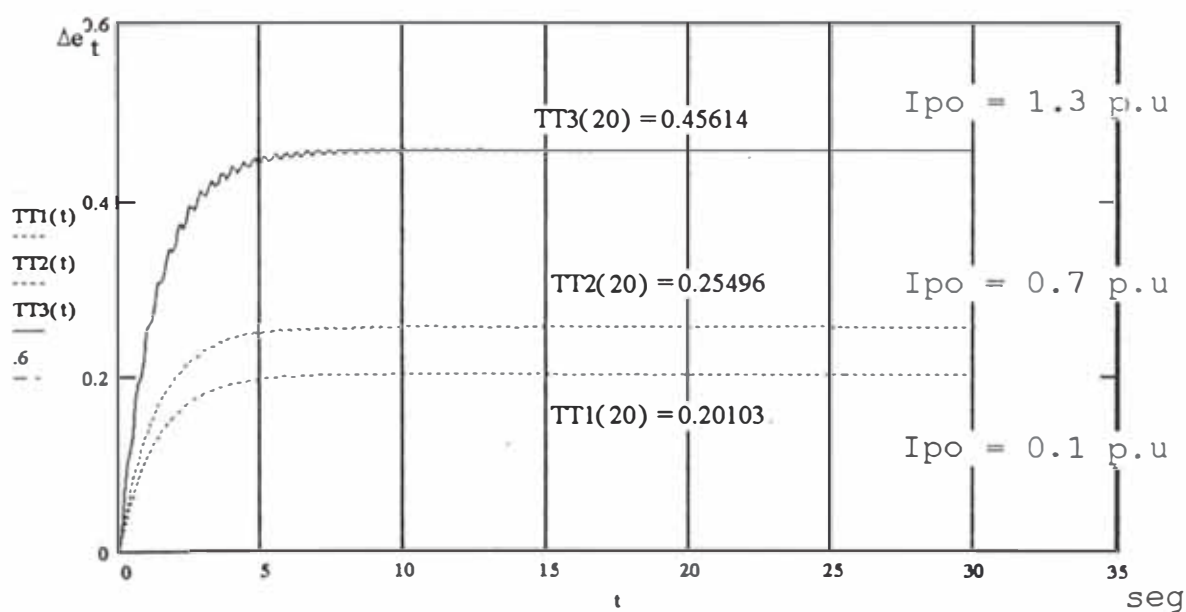
- CALCULO PARA $I_{po} = 1.3$

$$\begin{aligned} A0 &:= .456 & D0 &:= 2.01 \cdot 10^{-2} & G0 &:= .75 \\ B0 &:= 1.273 \cdot 10^{-2} & E0 &:= .206 \\ C0 &:= 16.844 & F0 &:= .456 & t &:= 0, 1 \dots 30 \end{aligned}$$

$$TT3(t) := A0 - B0 \cdot \sin(C0 \cdot t + D0) \cdot \exp(-E0 \cdot t) - F0 \cdot \exp(-G0 \cdot t)$$

Luego hacemos un gráfico comparativo de las distintas condiciones de operación del generador, cabe recordar en este momento que la excitación de campo del generador es alterado repentinamente $\Delta E_{fd} = 1 \text{ p.u.}$ Además es necesario tener en cuenta que la variación de la carga es netamente Potencia Activa, manteniendo en este caso la Potencia Reactiva entregada por el generador constante, entonces podemos concluir que el incremento de excitación contribuye a un incremento adicional de la tensión de salida del generador, como un incremento de potencia reactiva.

Respuesta de la simulación de un generador para una excitación tipo escalón para : $I_{po} = 0.1, 0.7, 1.3 \text{ p.u}$ y $I_{qo} = 0.2 \text{ p.u.}$ es constante



Se observa que la sensibilidad del generador es mayor cuando está plenamente cargado y su tiempo de establecimiento de la tensión es mas prologado, con una mayor contribución de energía reactiva al sistema, es apreciable que no se note los efectos de saturación en el modelo del generador (este modelo es para pequeñas perturbaciones), pero hemos efectuado disturbios considerables solamente por estudio del modelo.

1.7.2 Angulo de la rueda polar para una aplicación de de una excitación tipo escalón

De la misma manera que se calculó la función de transferencia del generador utilizando diagramas de bloques del modelo, la salida de voltaje de éste en función de la excitación, calcularemos para la variación del ángulo de la rueda polar en función de la excitación, la función de transferencia (FTTO) es :

$$\frac{\Delta\delta}{\Delta E_{fd}} \Rightarrow \text{FTTO}(I_{po}, S) = \frac{A1(I_{po})}{B1 \cdot S^3 + C1 \cdot S^2 + D1(I_{po}) \cdot S + E1(I_{po})}$$

Donde :

$$A1(I_{po}) := -377 \cdot K_2(I_{po}) \cdot K_3$$

$$B1 := K_3 \cdot T_{do} \cdot M \qquad D1(I_{po}) := D_a + 377 \cdot (K_1(I_{po}) - K_2(I_{po}) \cdot K_3 \cdot K_4(I_{po})) \cdot K_3 \cdot T_{do}$$

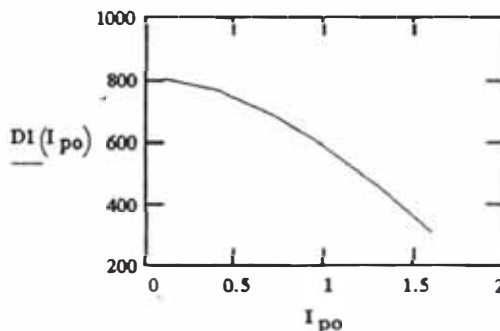
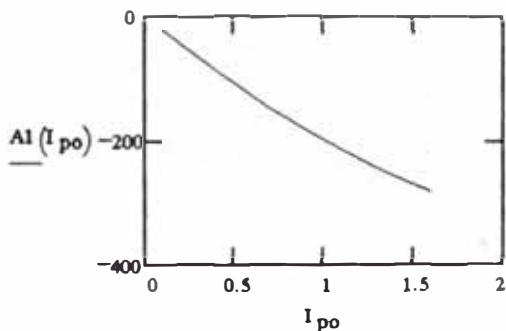
$$C1 := M + K_3 \cdot T_{do} \cdot D_a \qquad E1(I_{po}) := 377 \cdot (K_1(I_{po}) - K_2(I_{po}) \cdot K_3 \cdot K_4(I_{po}))$$

Variación de los parámetros de la función de transferencia para distintas condiciones de operación :

$A1(I_{po})$	$B1 = 1.6$	$C1 = 1.86667$	$D1(I_{po})$	$E1(I_{po})$	I_{po}
-21.84855			803.52021	602.26516	0.1
-85.99939			767.32347	575.1176	0.4
-145.51564			691.99329	518.61997	0.7
-198.14667			585.14499	438.48374	1
-242.99685			454.56804	340.55103	1.3
-280.25237			306.19926	229.27445	1.6

Para un análisis más detallado en forma matemática de la ecuación de la función de transferencia del ángulo podemos graficar las tendencias que tienen los parámetros de la ecuación, con la variación de potencia activa.

graficar las tendencias que tienen los parámetros de la F.T de FTTO.



$$FTTO(I_{po}, S) := \frac{A1(I_{po})}{B1 \cdot S^3 + C1 \cdot S^2 + D1(I_{po}) \cdot S + E1(I_{po})}$$

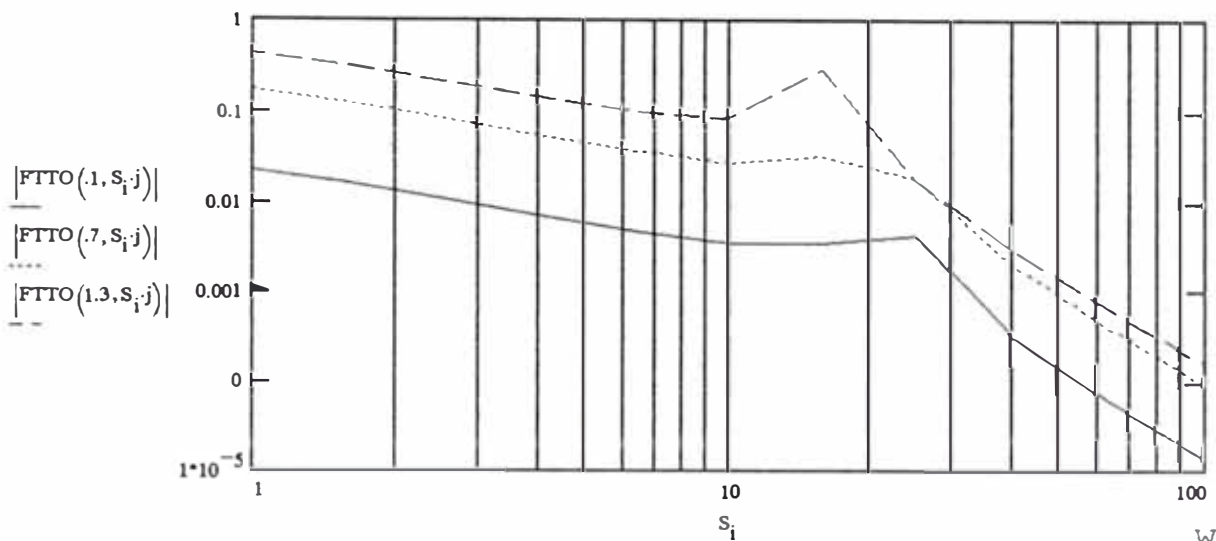
Ecuación de la F.T ángulo de la rueda polar en función de la excitación.

- Evaluación gráfica en el dominio de la frecuencia de la magnitud y ángulo de fase.

$$m := 10 \quad i := 0..m \quad max := 100 \quad min := 1$$

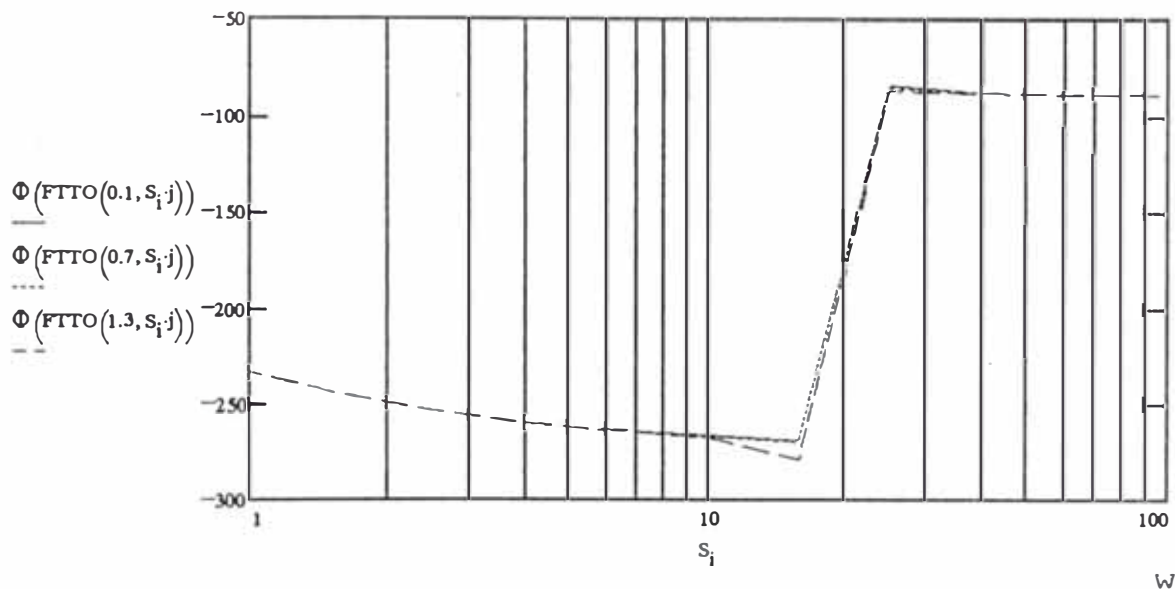
$$r := \ln\left(\frac{max}{min}\right) \quad S_i := min \cdot \exp\left(i \cdot \frac{r}{m}\right) \quad j := \sqrt{-1}$$

Magnitud de la función de transferencia del ángulo de la rueda polar



$$\Phi(\theta) \equiv \text{angle}(\text{Re}(\theta), \text{Im}(\theta)) \cdot \frac{360}{2 \cdot \pi} - 360$$

Angulo de la F.T del ángulo de la rueda polar del generador en lazo abierto



Cálculo de la respuesta en el tiempo:

- PARA $I_{po} = 0.1$

$$\begin{aligned} A0 &:= 3.62 \cdot 10^{-2} & E0 &:= .206 \\ B0 &:= 1.213 \cdot 10^{-3} & F0 &:= 3.64 \cdot 10^{-2} \\ C0 &:= 22.401 & G0 &:= .745 \\ D0 &:= 1.506 \cdot 10^{-2} & t &:= 0, .1 \dots 30 \end{aligned}$$

$$TTT1(t) := (-A0 + B0 \cdot \sin(C0 \cdot t + D0)) \cdot \exp(-E0 \cdot t) + F0 \cdot \exp(-G0 \cdot t)$$

- PARA $I_{po} = 0.7$

A01 := .28 E01 := .206
 B01 := $1.012 \cdot 10^{-2}$ F01 := .280
 C01 := 20.786 G01 := .75
 D01 := $1.623 \cdot 10^{-2}$ t := 0, .1 .. 30

$$TTT2(t) := (-A01 + B01 \cdot \sin(C01 \cdot t + D01)) \cdot \exp(-E01 \cdot t) + F01 \cdot \exp(-G01 \cdot t)$$

- PARA $I_{po} = 1.3$

A02 := .713 E02 := .206
 B02 := $3.174 \cdot 10^{-2}$ F02 := .712
 C02 := 16.844 G02 := .75
 D02 := $2.0 \cdot 10^{-2}$ t := 0, .1 .. 30

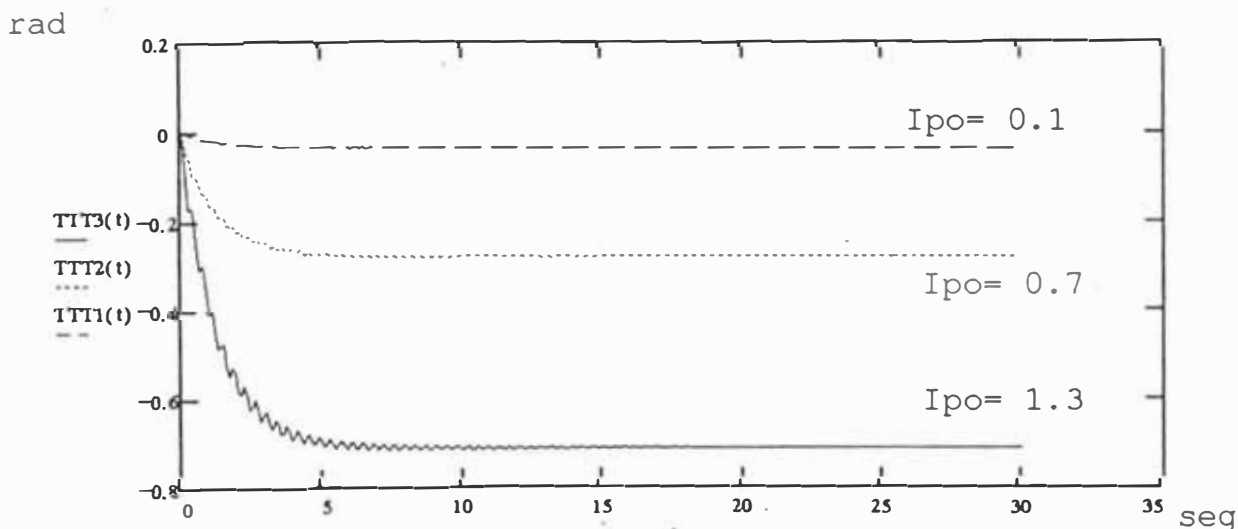
$$\delta l_{rp}(I_{po}) \cdot \frac{\pi}{180}$$

0.07129
0.28288
0.48668
0.67836
0.85543
1.01698

$$TTT3(t) := (-A02 + B02 \cdot \sin(C02 \cdot t + D02)) \cdot \exp(-E02 \cdot t) + F02 \cdot \exp(-G02 \cdot t)$$

Desplazamiento del ángulo del rotor al aplicar una variación de una excitación escalón para distintas condiciones de operación del generador.

El siguiente gráfico ilustra el desplazamiento del ángulo



1.7.3 Velocidad angular del rotor (w) para una aplicación de una excitación tipo escalón

Para cada punto de operación tomamos la derivada del ángulo, obteniendo la velocidad angular.

$$w\alpha(t) = \frac{d}{dt}(TTT1(t)) \cdot \left(\frac{1}{377}\right) \quad w1(t) = \frac{d}{dt}(TTT2(t)) \cdot \left(\frac{1}{377}\right) \quad w2(t) = \frac{d}{dt}(TTT3(t)) \cdot \left(\frac{1}{377}\right)$$

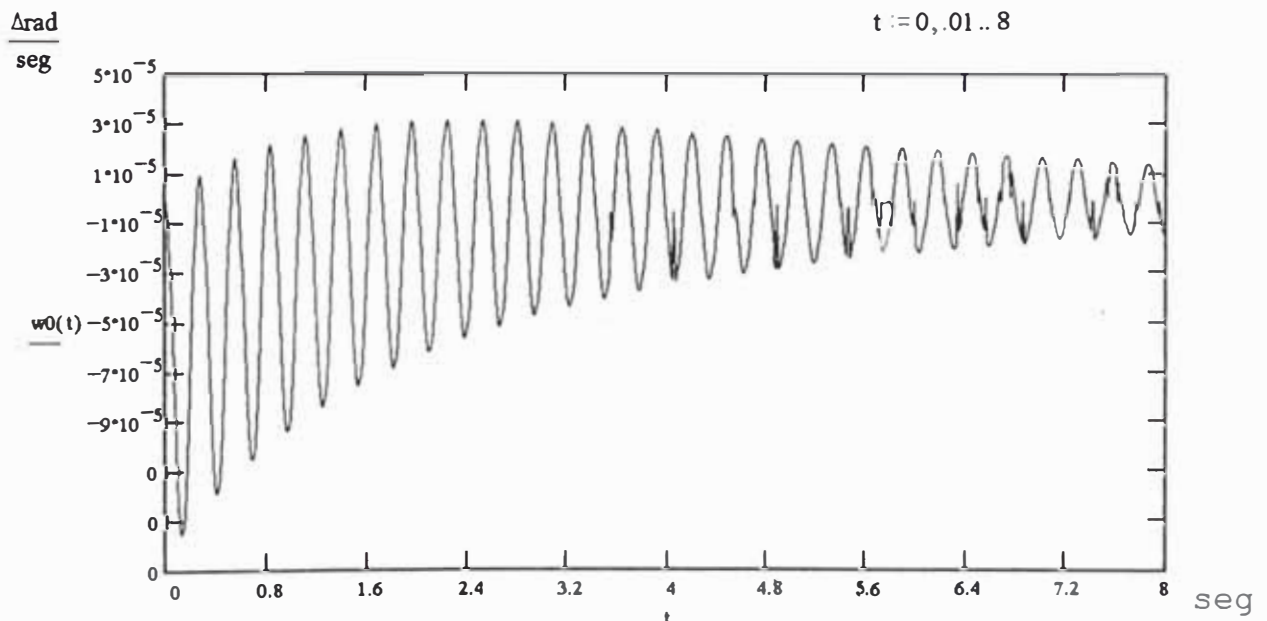
$$w\alpha(t) := \left[\frac{d}{dt}(-A0 + B0 \cdot \sin(C0 \cdot t + D0) \cdot \exp(-E0 \cdot t) + F0 \cdot \exp(-G0 \cdot t)) \right] \cdot \left(\frac{1}{377}\right)$$

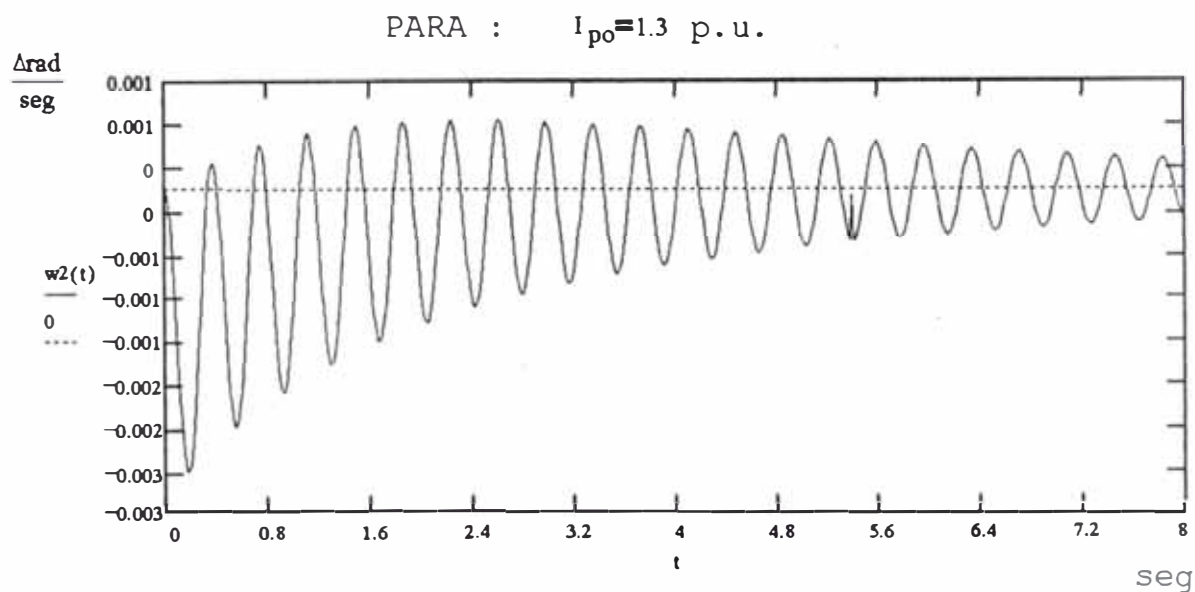
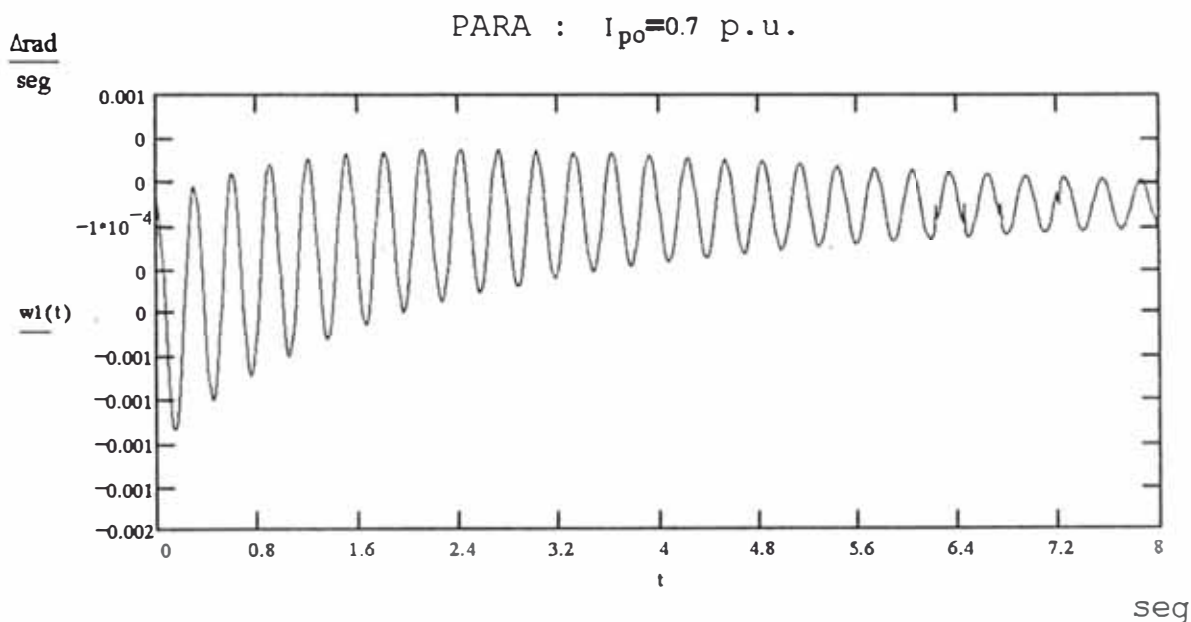
$$w1(t) := \left[\frac{d}{dt}(-A01 + B01 \cdot \sin(C01 \cdot t + D01) \cdot \exp(-E01 \cdot t) + F01 \cdot \exp(-G01 \cdot t)) \right] \cdot \left(\frac{1}{377}\right)$$

$$w2(t) := \left[\frac{d}{dt}(-A02 + B02 \cdot \sin(C02 \cdot t + D02) \cdot \exp(-E02 \cdot t) + F02 \cdot \exp(-G02 \cdot t)) \right] \cdot \left(\frac{1}{377}\right)$$

Variación de la velocidad angular :

PARA : $I_{po} = 0.1$ p.u.





1.7.4 Velocidad angular del rotor (w) para una aplicación de torque mecánico T_M tipo escalón

Su función de transferencia (FTT) es :

$$\frac{\Delta \delta}{T_M} E_{fd} = cte \Rightarrow FTT(I_{po}, S) = \frac{377 \cdot (A2 \cdot S + 1)}{B2 \cdot S^3 + C2 \cdot S^2 + D2(I_{po}) \cdot S + E2(I_{po})}$$

Donde :

$$A2 := K_3 \cdot T_{do}$$

$$D2(I_{po}) := D_a + 377 \cdot (K_1(I_{po}) - K_2(I_{po}) \cdot K_3 \cdot K_4(I_{po})) \cdot K_3 \cdot T_{do}$$

$$B2 := M \cdot K_3 \cdot T_{do}$$

$$E2(I_{po}) := 377 \cdot (K_1(I_{po}) - K_2(I_{po}) \cdot K_3 \cdot K_4(I_{po}))$$

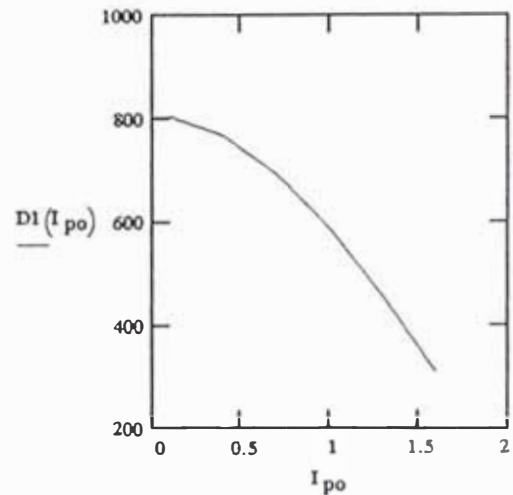
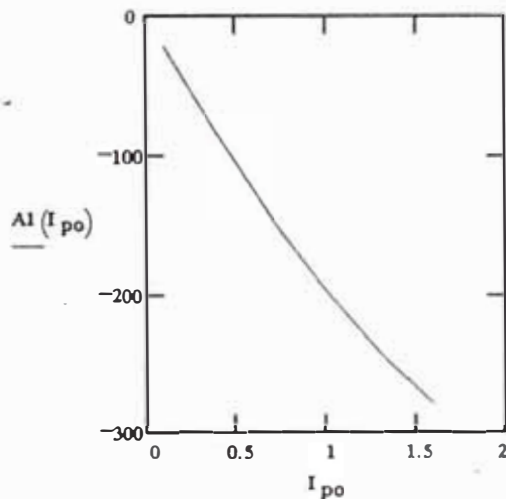
$$C2 := M + D_a \cdot K_3 \cdot T_{do}$$

Variación de los parámetros de la función de transferencia para distintas condiciones de operación :

A2 = 1.33333	B2 = 1.6	C2 = 1.86667	D2(I _{po})	E2(I _{po})	I _{po}
			803.52021	602.26516	0.1
			767.32347	575.1176	0.4
			691.99329	518.61997	0.7
			585.14499	438.48374	1
			454.56804	340.55103	1.3
			306.19926	229.27445	1.6

Para un análisis más detallado en forma matemática de la ecuación de la función de transferencia del ángulo podemos graficar las tendencias que tienen dichos parámetros de la ecuación, con la variación de potencia activa.

Graficos de las tendencias que tienen dichos parámetros de la F.T, $FTT(I_{pO}, S)$.



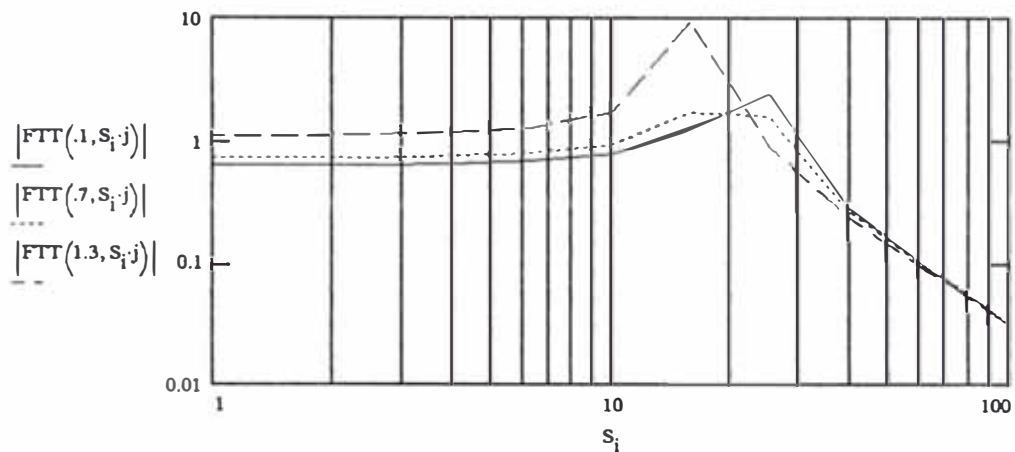
La función de transferencia del ángulo de la rueda polar debido a un torque mecánico:

$$FTT(I_{po}, S) := \frac{377 \cdot (A2 \cdot S + 1)}{B2 \cdot S^3 + C2 \cdot S^2 + D2(I_{po}) \cdot S + E2(I_{po})}$$

La magnitud y ángulo de la función de transferencia para distintas condiciones de operación para $I_{po} = 0.1$, 0.7 , 1.3 p.u y $I_{qo} = 0.2$ p.u. constante.

$$m := 10 \quad i := 0..m \quad \max := 100 \quad \min := 1$$

$$r := \ln\left(\frac{\max}{\min}\right) \quad S_i := \min \cdot \exp\left(i \cdot \frac{r}{m}\right) \quad j := \sqrt{-1}$$



Luego realizamos la transformada inversa de Laplace.

obtenemos:

-PARA $I_{po} = 0.1$

$$A0 := .6259 \quad E0 := .206$$

$$B0 := 0.625 \quad F0 := 1.654 \cdot 10^{-4}$$

$$C0 := 22.401 \quad G0 := .749 \quad t := 0, .02.. 10$$

$$D0 := 9.215 \cdot 10^{-3}$$

$$FTT1(t) := (A0 - B0 \cdot \cos(C0 \cdot t - D0) \cdot \exp(-E0 \cdot t) - F0 \cdot \exp(-G0 \cdot t))$$

- PARA $I_{po} = 0.7$

$$A0 := .726 \quad E0 := .206$$

$$B0 := 0.726 \quad F0 := 1.028 \cdot 10^{-4}$$

$$C0 := 20.786 \quad G0 := .75 \quad t := 0, .02.. 10$$

$$D0 := 9.925 \cdot 10^{-3}$$

$$FTT2(t) := (A0 - B0 \cdot \cos(C0 \cdot t - D0) \cdot \exp(-E0 \cdot t) - F0 \cdot \exp(-G0 \cdot t))$$

- PARA $I_{po} = 1.3$

$$A0 := 1.107$$

$$E0 := 0.206$$

$$B0 := 1.106$$

$$F0 := 2.724 \cdot 10^{-4}$$

$$C0 := 16.844$$

$$G0 := .75$$

$$t := 0, .02.. 8$$

$$D0 := 1.22 \cdot 10^{-2}$$

$$FTT3(t) := (A0 - B0 \cdot \cos(C0 \cdot t - D0) \cdot \exp(-E0 \cdot t) - F0 \cdot \exp(-G0 \cdot t))$$

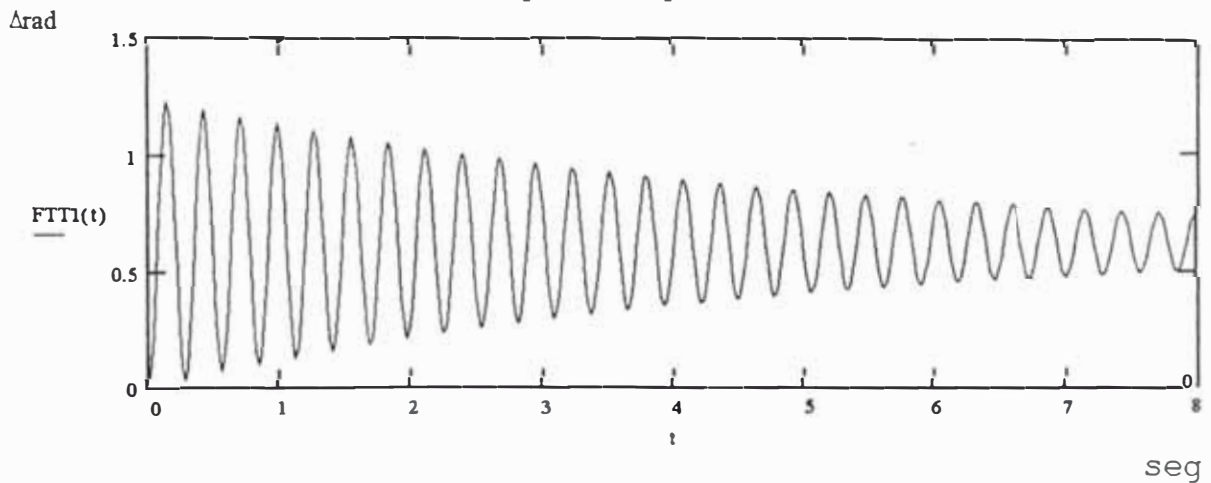
$$F_s := \frac{C0}{2 \cdot \pi}$$

$$F_s = 2.68081$$

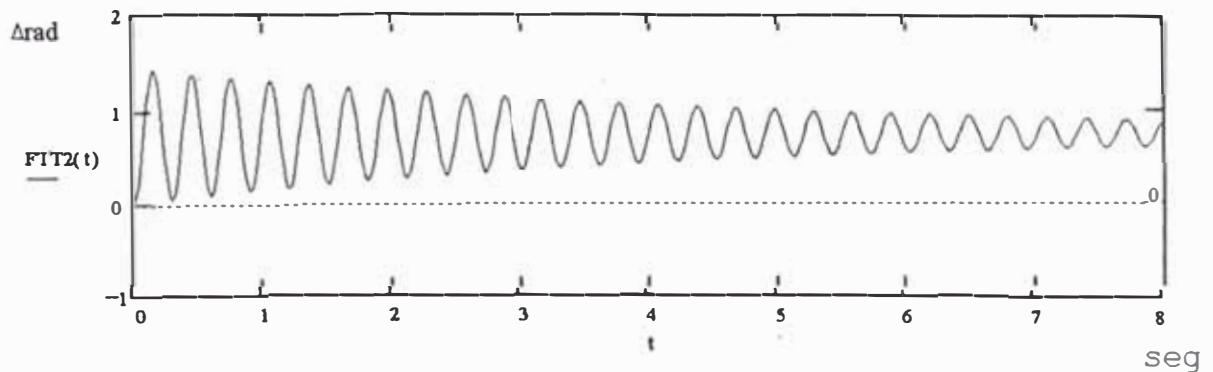
frecuencia de oscilación

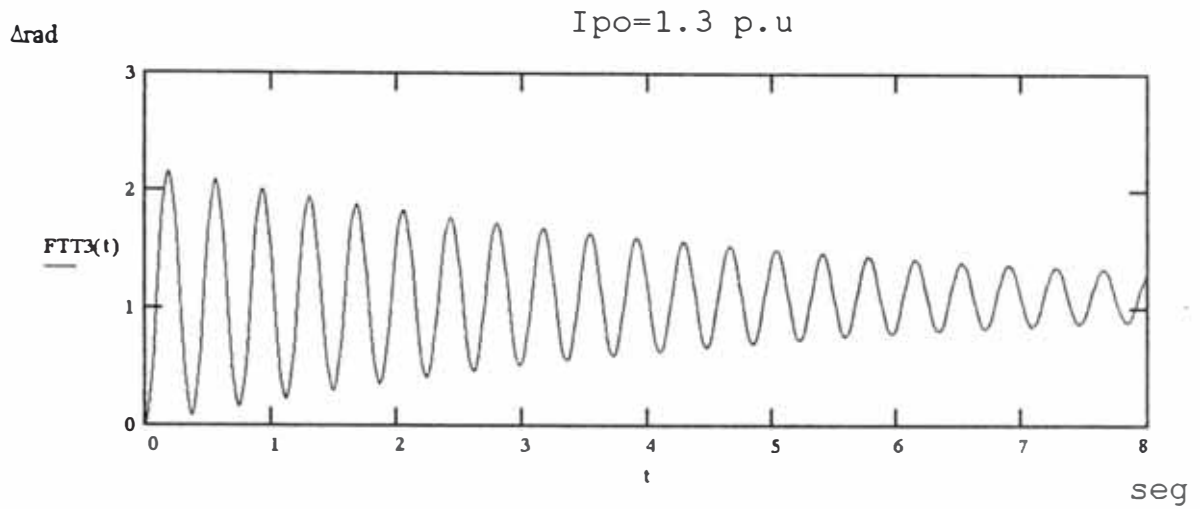
Desplazamiento del ángulo del rotor al aplicar un torque mecánico escalón para una excitación constante y para distintas condiciones de operación del generador.

$I_{po} = 0.1$ p.u

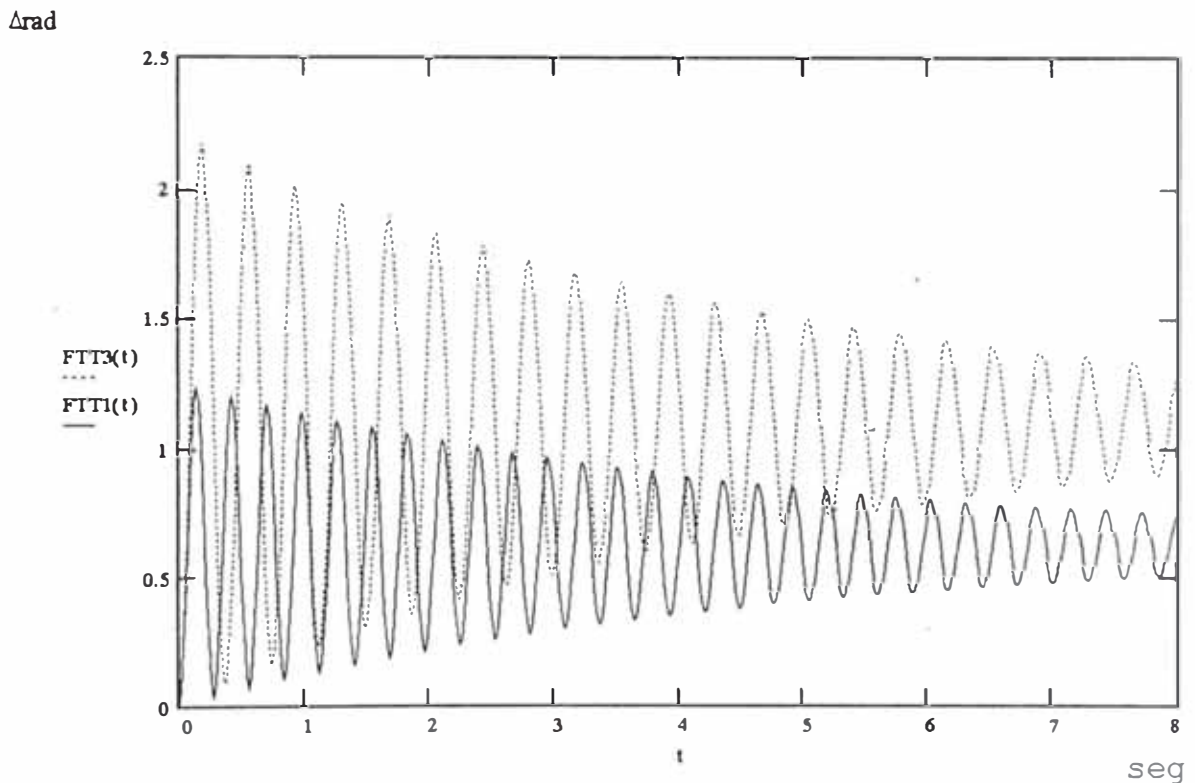


$I_{po} = 0.7$ p.u





Comparación de $I_{p0}=0.1$ con $I_{p0}=1.3 \text{ p.u}$



Ahora tomamos la derivada de FTT para tener la variación de la velocidad respecto al torque escalón aplicado.

para : $\frac{\Delta\omega}{\Delta TM} \Big|_{E, f_d = \text{cte}}$

$$TTM1(t) := \frac{d}{dt}(FTT1(t)) \cdot \left(\frac{1}{377}\right)$$

$$TTM2(t) := \frac{d}{dt}(FTT3(t)) \cdot \left(\frac{1}{377}\right)$$

$$F_s := \frac{C0}{2 \cdot \pi}$$

$$F_s = 2.68081$$

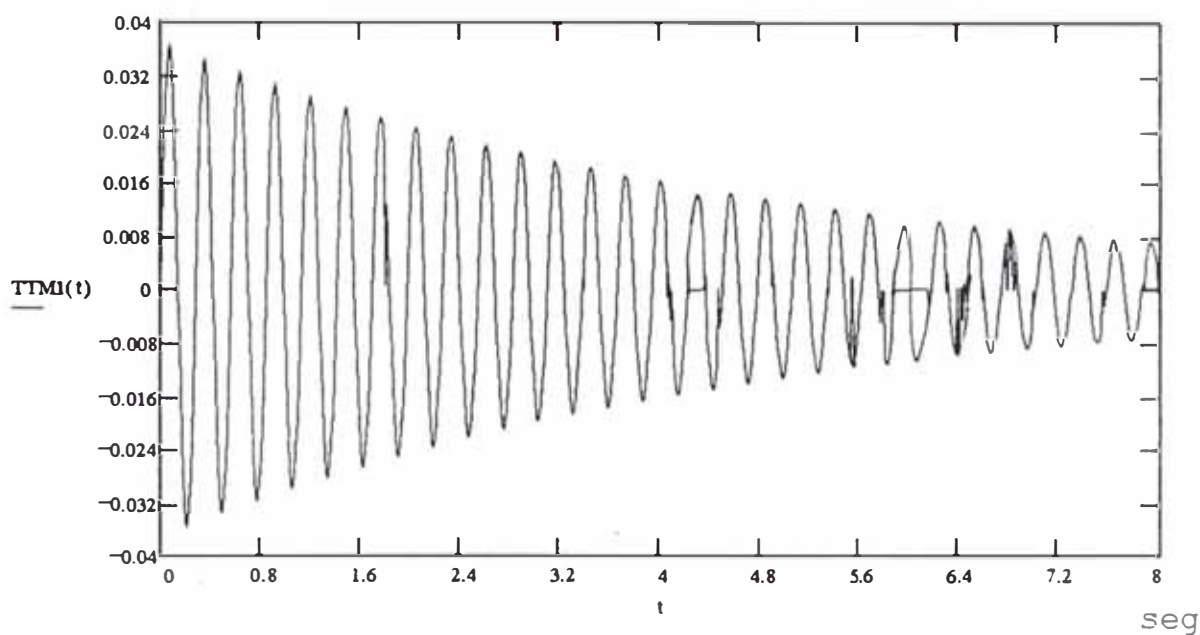
frecuencia de
de oscilación
Hz

$$t := 0, .01.. 8$$

Variación de la velocidad del rotor al aplicar un torque mecánico escalón para una excitación constante y para distintas condiciones de operación del generador.

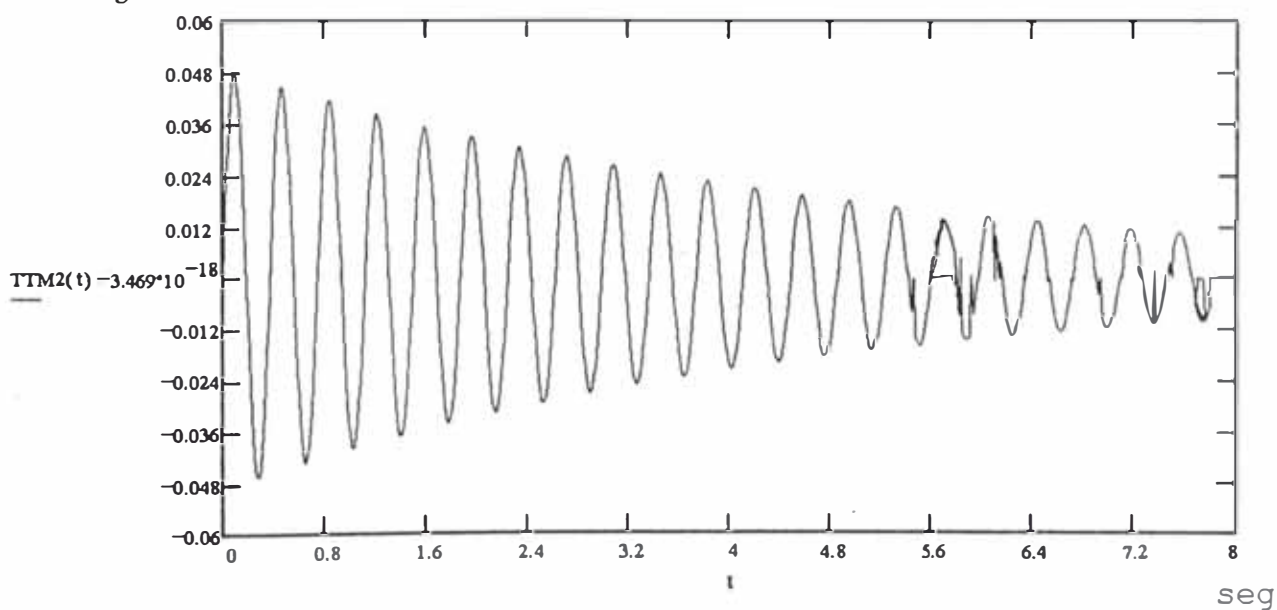
$\frac{\Delta \text{rad}}{\text{seg}}$

PARA : $I_{p0} = 0.1 \text{ p.u.}$



$\frac{\Delta \text{rad}}{\text{seg}}$

$I_{p0} = 1.3 \text{ p.u.}$



CAPITULO II CONFIGURACION DEL SISTEMA DE CONTROL

2.1 Descripción del funcionamiento del sistema de regulación de voltaje actual

El actual regulador de voltaje es electromecánico modelo BJ-30 de la westinghouse. A continuación detallaremos su funcionamiento.

El uso normal del regulador de voltaje con un generador AC, tiene la finalidad de mantener el voltaje AC en un valor fijo, o para variar de acuerdo con la carga u otras condiciones de operación. El campo de excitación del generador es alimentado por una excitatriz principal y excitado por una excitatriz piloto y éste a la vez proporciona alimentación a los circuitos de control.

El motor que opera el reóstato de campo usualmente es de una característica que requiere el generador el cual puede cubrir sin estar por debajo del voltaje residual del excitador, en el caso que se requiera reducir el voltaje del excitador de voltaje a cero, se optará por:

- Un adicional bobinado sobre el campo del excitador.
- Otro tipo de reóstato.

En el primer caso únicamente se requiere como parte del equipo para el regulador, un contactor que aumenta el campo y un contactor que reduce el campo, cada uno equipado con contactores auxiliares. En el segundo caso se puede

requerir contactores adicionales y relés auxiliares, por ejemplo, con un reóstato puente, se necesitan dos contactores que aumentan el campo y dos que lo disminuyen, una combinación de dos contactores que trabajan en cada lado opuesto del puente.

Para respuesta normal.

Refiriéndonos a la fig. 2-1, el elemento del control regulador opera sobre dos juegos de contactos, nombrados R y L "Rise and Lower". Estos son los contactos de respuesta normal. Los relés de control NL y NR, son los que controlan la operación del motor para variar el reóstato del excitador de campo. Los otros dos juegos de contactos AR y AL son llamados contactos para respuesta rápida.

Esos controles fuerzan la corriente de campo por el contactor QR y el contactor de reducción de campo es QL. Normalmente cuando en el campo se abren resistencias es forzado por el contacto de QL y QR cortocircuita un bloque de resistencias en el circuito del campo del excitador.

Cuando en el campo se está reduciendo la corriente normalmente, el contacto QL está abierto y un bloque de resistencias es insertado en el circuito del excitador de campo. Esto es evidente para la operación de respuesta rápida, donde los y contactores y contactos causan cambios extremadamente rápidos en la corriente de campo del excitador y consecuentemente la caída del voltaje aplicado al campo del generador.

Cuando el voltaje AC es normal, el brazo del regulador

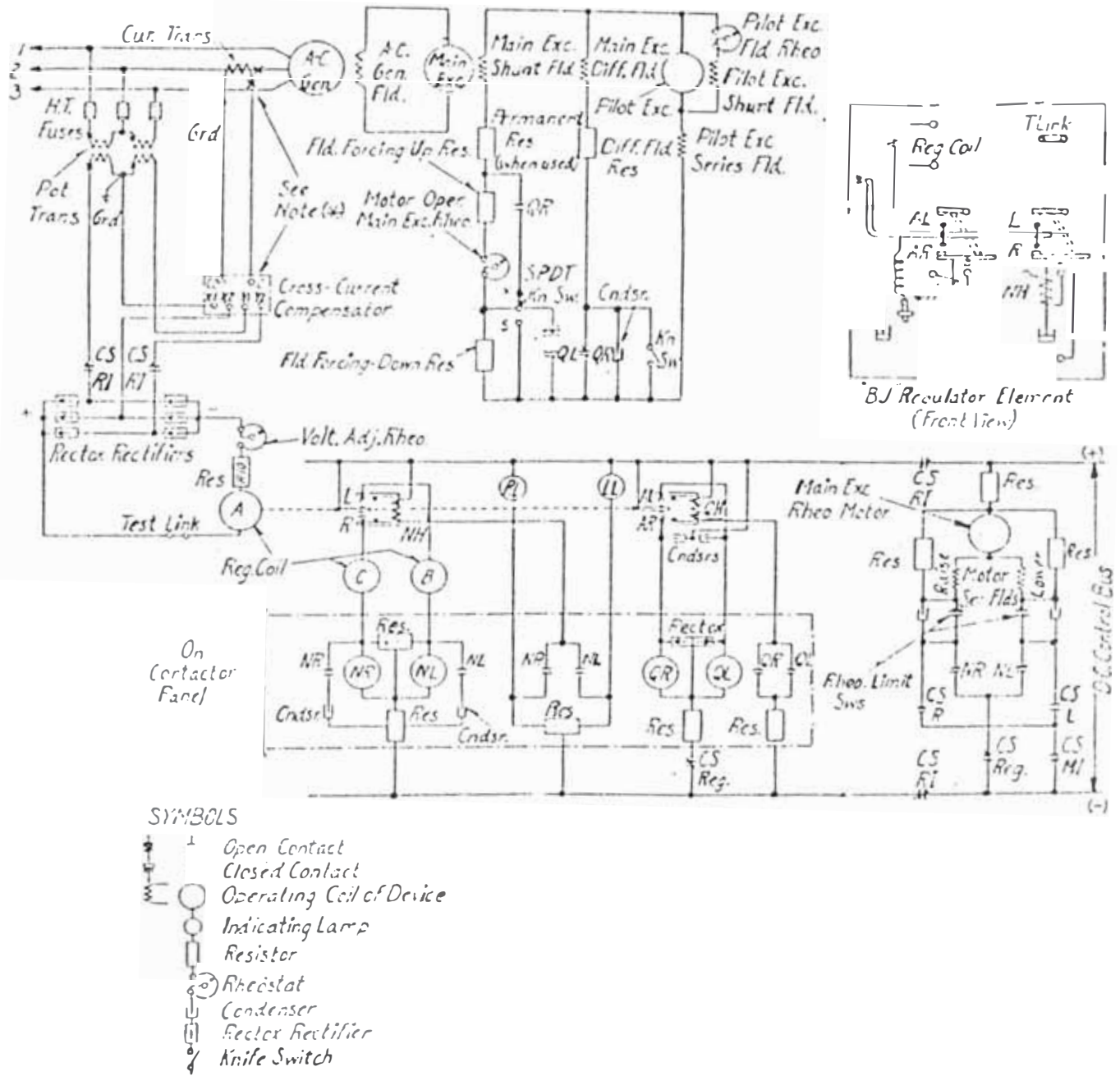


fig. 2-1 Diagrama del regulador de voltaje del generador actualmente en operación.

está flotante entre los contactos, para respuesta normal y rápida estas están calibradas y todas las partes del equipo de regulación están en descanso. Las dos lámparas RL y LL de indicación están encendidas .

Para que la posición del ajustador de voltaje cambie, se cerrarán cualquiera de los dos contactos R o L, energizando el motor del reóstato con el relé auxiliar NR o NL.

Al cambiar el ajustador del voltaje el reóstato a través de un pequeño ángulo, resulta la misma operación del regulador y este produce un cambio en la barra AC o el voltaje del sistema con el generador operando.

Para que el voltaje aumente en nivel normal por ejemplo un 5%, los contactos R de respuesta normal se cierran permitiendo así energizar el motor del reóstato, con el relé NR. Dicho relé NR tiene dos juegos de contactos, uno de los juegos cierra el circuito del motor del reóstato del campo del excitador y la armadura, originando que el motor cambie el reóstato en una dirección para disminuir la resistencia en el circuito de campo del excitador, el otro juego de contactos energiza la bobina NH elemento antiacelerante (Anti-Hunting) y al mismo tiempo conecta el circuito de elevación (RL) indicado en la lámpara. Por lo tanto, esta lámpara está prendida y destellando así indica al operador que el regulador está actuando para elevar el voltaje AC.

El antiacelerante, opera para aumentar la distancia entre los contactos de R y la barra reguladora, de este

modo desenergiza el circuito del relé NR. Cabe mencionar que esta acción del circuito abierto se lleva a cabo sin cambio o intento de cambio de la posición del nivel del brazo móvil. El centro y el brazo están en todo momento libres para responder al elemento de sensado de voltaje.

Sin embargo, el relé de control NR no se abre instantáneamente porque cuenta con un circuito resistivo y capacitivo, el cual causa un corto tiempo de retraso en la abertura. Debido al atraso de esta apertura, el motor del reóstato tiene tiempo para mover el brazo del reóstato de campo a una cantidad definida (discreta), aunque los contactos del regulador han sido abiertos por el elemento antiacelerante.

Cuando los contactos NR se abren, el motor del reóstato y el elemento antiacelerante se desenergizan simultáneamente. Luego de que el brazo del reóstato se detiene, debe haber un tiempo de retraso para permitir que el voltaje del generador alcance su valor final. Este retraso se obtiene por medio del amortiguador en aceite, que está sobre el elemento antiacelerante, que evita que los contactos del regulador retornen inmediatamente a su posición normal. Si al finalizar este tiempo de retraso y el retorno de los contactos a su posición normal, el voltaje AC no ha regresado a su nivel normal, los contactos R se cerrarán nuevamente y se llevará a cabo otro ciclo de operación como el descrito anteriormente. Así, hasta que el voltaje normal sea restaurado en los terminales del generador, el excitador del reóstato se cortará

gradualmente, pero sin ir más allá de la posición requerida.

Si el voltaje aumenta en pequeña cantidad debido, por ejemplo, a una extracción de carga del generador, el contacto L de respuesta normal operará en forma similar a la descrita para el contacto R, para energizar el relé NL del motor, produciendo que el motor del reóstato aumente la resistencia en circuito de excitación de campo hasta que el voltaje normal sea restablecido. La lámpara indicador de disminución "LL" estara parpadeando.

El elemento antiacelerante (Anti-Hunting)

El elemento antiacelerante (Anti-Hunting) o un efecto similar, se requiere para cualquier máquina reguladora de voltaje debido a la inercia eléctrica del excitador y el generador. Por medio de este elemento regulador no se permite mantener la señal de control permanentemente conectada (Anti-Hunting), y su acción a extender la distancia del contacto. En efecto, el regulador está momentáneamente recalibrado pero sin perturbar el brazo móvil. La cantidad por la cual cambia la calibración es conocida como el efecto del elemento que no permite mantener la senal de control permanentemente conectada (Anti-Hunting). Este puede variarse para adecuarse a diferentes tipos de máquinas.

Si la desviación original del voltaje normal es considerable, el regulador del brazo móvil seguirá el cambio en la posición del contacto contrario, controlado por el elemento antiacelerante y por tanto mantendrá los

contactos cerrados hasta que el reóstato restablezca el voltaje a un nivel aproximadamente normal. En otras palabras, si el voltaje ha disminuído, el contacto R y el relé NR se mantendrán cerrados el brazo del reóstato para máxima variación hasta que el voltaje AC cae dentro de la zona de operación del antiacelerante, este afecta el tiempo de hendidura descrita arriba se llevará a cabo para regresar el voltaje a nivel normal.

Por medio de este tipo de acción, a medida que el voltaje se aproxima a lo normal, existe un tiempo retardo que permite a la máquina establecerse entre cada cada corrección de voltaje. Esto evita el sobre disparo y retorna el voltaje a nivel normal en una mínima cantidad discreta de tiempo.

Si el voltaje se elevara por encima del nivel normal, el elemento antiacelerante operara de la misma forma que la descrita para la caída de voltaje, a un nivel por debajo de lo normal.

Para respuesta rápida.

Cuando ocurre una caída en el voltaje fuerte, por ejemplo debido a un gran bloque de carga que es introducido en el sistema o a una falla, los contactos R de respuesta normal del regulador se cerrarán, y a medida que el brazo continúa moviéndose en la misma dirección los contactos AR de respuesta rápida también se cerrarán. Los contactos R operan como se han descrito anteriormente para cambiar el reóstato en la dirección para restablecer el voltaje a un nivel normal. Los contactos AR completan el circuito hacia

las bobinas que operarán en el campo de fuerza del contactor QR. Los contactos principales del contactor cortocircuitan un bloque de resistencias en el circuito de campo de excitación, aplicando de esta forma el voltaje pleno de la excitatriz piloto a este circuito (excepto por la resistencia limitadora de corriente que está en serie con el campo). El generador de voltaje AC retorna a un nivel normal en una forma muy rápida.

Cuando el generador se encuentra dentro de la respuesta de los contactos AR de respuesta es rápida luego los contactos R de respuesta normal toman el control y por los pasos del reóstato retornan el voltaje a nivel normal, desde que el reóstato se mueve a una variación máxima a la nueva posición durante el tiempo que los contactos de respuesta rápida están cerrados, luego se requiere únicamente un movimiento adicional mínimo para que los contactos de respuesta normal tomen el control.

Simultáneamente al cerrado de los contactos AR principales del contactor de campo forzado, se cortocircuitan las resistencias en el circuito de campo del excitador, los contactos auxiliares energizan la bobina QH (Anti-Hunt) para descomprometer a los contactos de AR proporcionado por el cambio de voltaje en los terminales del generador AC que está dentro de la zona para la cual los contactos son controlados por el elemento antiacelerante y luego restablecidos. En este caso el contacto del campo forzado se abrirá inmediatamente, luego funcionarán los contactos para respuesta normal. En caso de

persistir la caída fuerte del voltaje AC funcionarán nuevamente los contactos para respuesta rápida hasta alcanzar el nivel normal de operación.

Cuando una bobina del campo diferencial se usa en el excitador (ver fig. 2-1), un contactor auxiliar del contactor de campo forzador QR abre el circuito de la bobina del campo diferencial cuando el contactor de campo se cierra. De esta forma se obtiene un efecto máximo para aumentar la corriente al excitador.

De modo forma similar cuando se remueve en forma repentina un gran bloque de carga desde el sistema causando un gran aumento en el voltaje, los contactos de respuesta rápida AL se cierran para operar el contactor de reducción de campo QL que se encuentra normalmente cerrado. Este contactor abre sus contactos principales para insertar el bloque reductor de campo o las resistencias en el circuito de excitación de campo de la excitatriz principal. Esto ocasiona que el voltaje AC del generador comience a disminuir muy rápidamente. cuando el voltaje AC se encuentra dentro de la calibración del regulador de los contactos de respuesta rápida, luego los contactos de respuesta normal toman el control y operan en la forma descrita anteriormente.

Accesorios.

- Reóstato de Voltaje de Ajuste.

El reóstato de voltaje de ajuste se utiliza para variar el voltaje a regular. Normalmente, este reóstato tiene suficiente resistencia como para dar un rango de 15-0-15v,

es decir, un ajuste de cerca de 15 voltios de cualquier forma, desde el voltaje normal del potencial transformador. Para casos especiales se puede proporcionar un reóstato de un rango mayor.

- Transformadores Potenciales

Ya que la carga del regulador en Volt-Amper es relativamente baja, los transformadores potenciales normales que tienen una capacidad de 200 Volt-Amper, pueden ser utilizados como la fuente de potencial o poder para el regulador. No deberían haber otras cargas sobre los transformadores potenciales utilizados con el regulador, a menos que sea como se muestra en el diagrama proporcionado con el equipo. Con respecto al voltímetro AC que generalmente se suministra con el tablero para voltaje que indica los propósitos, éste se puede conectar normalmente a cualquiera de las fases del generador. Sin embargo, en casos que exista un desequilibrio apreciable, debe recordarse que el voltímetro normal de una sola fase no indica el promedio AC trifásico al cual el regulador responde.

2.2 Configuración del sistema de control propuesto.

la configuración en el diagrama de bloques, que se propone es la mostrada en la fig. 2-2. En el cual podemos apreciar que está configurado por dos lazos de realimentación donde:

El primero está configurado en una realimentación negativa.

- El segundo en una realimentación positiva. Obedece a que

sobre el control ofrecido por PID se tendrá una acción adicional llamada señal estabilizante para mejorar la estabilidad del generador conectado a un sistema eléctrico.

Generalmente la señal estabilizante esta compuesta por la velocidad o potencia activa, también una combinación de la frecuencia y la potencia activa.

En algunos casos adicionan el ángulo de la rueda polar el cual opera solamente cuando sobrepasa ciertos umbrales prefijados.

En el siguiente diagrama de bloques fig. 2-2 podemos representar la operación de la señal estabilizante. En este caso se uso la señal de la velocidad angular.

Donde

G_{100} - Representa la F.T del Generador.

G_{101} - Representa la F.T de la excitación/velocidad angular.

G_{102} - Representa la F.T del Regulador electrónico.

G_{103} - Representa la F.T del la señal estabilizante.

En el siguiente grafico se detalla:

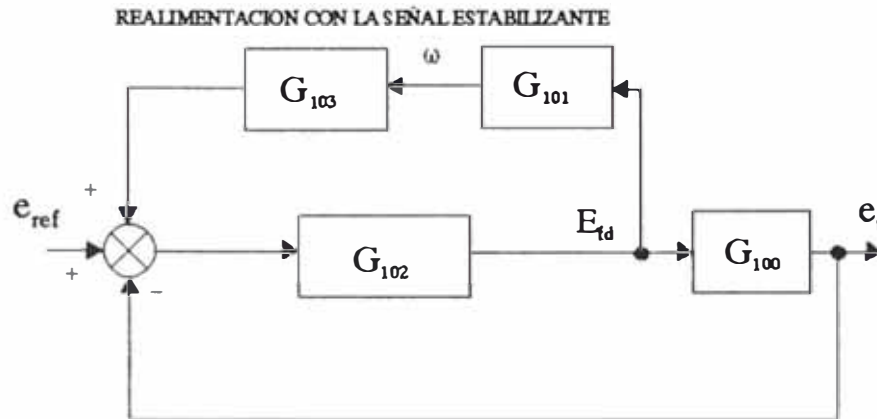


fig. 2-2 Diagrama de bloques del sistema de control, utilizando como estabilizador la velocidad angular.

En el capítulo 4 evaluaremos el lazo de realimentación positiva hasta lograr su simplificación.

2.3 Configuración matemática del regulador PID práctico comercial

Se dará algunas definiciones como:

- "Banda Proporcional" (PB) usada por muchos fabricantes de controladores que no utilizan el término Ganancia para determinar la sensibilidad del controlador. Se define como:

$$PB = \frac{100}{K_c}$$

Se utiliza el término 100 porque la PB se conoce generalmente como "porcentaje de la Banda Proporcional"

El regulador PID la ecuación descriptiva es :

$$m(t) - m = K_c * (e(t) - 0) + \frac{K_c}{\tau_I} \int (e(t) - 0) dt + K_c * \tau_D \frac{d(e(t) - 0)}{dt}$$

La función de transferencia de un controlador PID "ideal" se obtiene a partir de la ecuación anterior.

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I * s} + \tau_D * s \right)$$

Obtenemos la transformada de Laplace y ordenamos.

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I * s} \right) \left(\frac{\tau_D * s + 1}{\alpha \tau_D * s + 1} \right)$$

Esta función de transferencia se conoce como ideal porque en la práctica es imposible implementar el cálculo de la derivada por lo cual se hace una aproximación mediante la utilización de un adelanto/retardo, de lo que resulta la función de transferencia "real". Los valores típicos de α (alfa), están entre 0.05 y 0.1.

Los controladores PID se recomienda para circuitos con constante de tiempo larga en las que no hay ruido. La ventaja del modo derivativo es de proporcionar la capacidad de ver hacia donde se dirige el proceso.

2.4 Conceptos de la señal estabilizante.

Virtualmente toda unidad de generación hidráulica tiene que ser equipado con sistemas de excitación estáticos.

Estas necesitan señales suplementarias estabilizantes para suprimir las oscilaciones de potencias. Además de los requerimientos de precisión, niveles permisibles de ruidos contenidos en dichas señales y los problemas de aplicación en las máquinas hidráulicas y térmicas.

La excitación en los generadores es alimentado por los rectificadores que alimentan al rotor del generador, la principal ventaja de este sistema recae en al constante de tiempo del control de la excitación con la consecuente posibilidad de mejorar la estabilidad de las transiciones debido a la rápida respuesta de los tiristores.

El uso de rápidos sistemas de excitación tiene que ser en función a los resultados del decrecimiento del amortiguamiento en los generadores en un sistema de potencia, para extender el estado de estabilidad, puede ser por lo menos hasta con una operación a full carga del generador. El amortiguamiento no obstante puede ser incrementado por la introducción al control de la excitación una señal estabilizante puede ser ajustado para dar esencialmente el último límite de estabilidad, equivalente a la impedancia interna muy baja del generador.

2.4.1 Conceptos básicos de la señal estabilizante

La función básica de un estabilizador de potencia es extender los límites de estabilidad por modulación de la excitación del generador, para proveer un amortiguamiento a las oscilaciones del rotor de la máquina síncrona respecto a otras.

Estas oscilaciones ocurren típicamente en las

frecuencias de 0.2 a 2.5 Hz. Con insuficiente amortiguamiento de estas oscilaciones puede limitar la capacidad para transmitir potencia. Para proveer amortiguamiento, el estabilizador puede producir una componente de torque eléctrico sobre el rotor el cual está en fase con la variaciones de la velocidad.

Los detalles de su implementación difieren, dependiendo de la señal de entrada utilizada para el estabilizador, sin embargo, para cualquier señal de entrada la función de transferencia del estabilizador se puede compensar con las características de ganancia y fase del sistema de excitación, generador y del sistema de potencia, y se determina la función de transferencia del estabilizador. La salida de estabilizador da la componente del torque eléctrico el cual puede ser modulado vía el control de excitación.

Esta función de transferencia es denotado por $GEP(s)$, el cual es fuertemente influenciado por la ganancia del regulador, el nivel de potencia del generador y por el sistema de potencia AC.

El diagrama de bloque en la fig. 2-3 ilustra en pocos términos de funciones de transferencias, las relaciones entre los torques aplicados sobre la Turbina-Generador y los variaciones de la velocidad del rotor.

El torque eléctrico puede ser considerado para tener dos componentes:

a).- T_{ep} , este es en torque producido por el estabilizador de potencia solamente por modulación del flujo del

campo de excitación.

b).- T_{e0} , resultados de otras fuentes, incluyendo desplazamiento de movimiento.

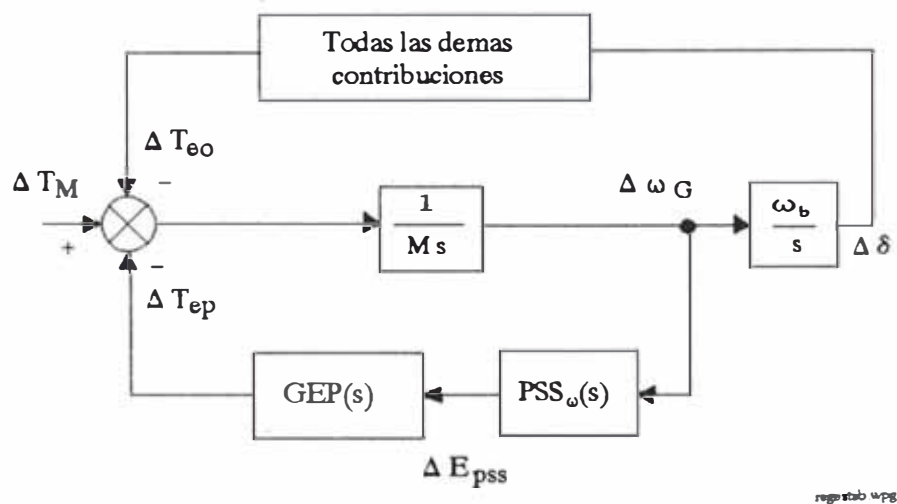


fig. 2-3. Diagrama de bloques con estabilizador de velocidad.

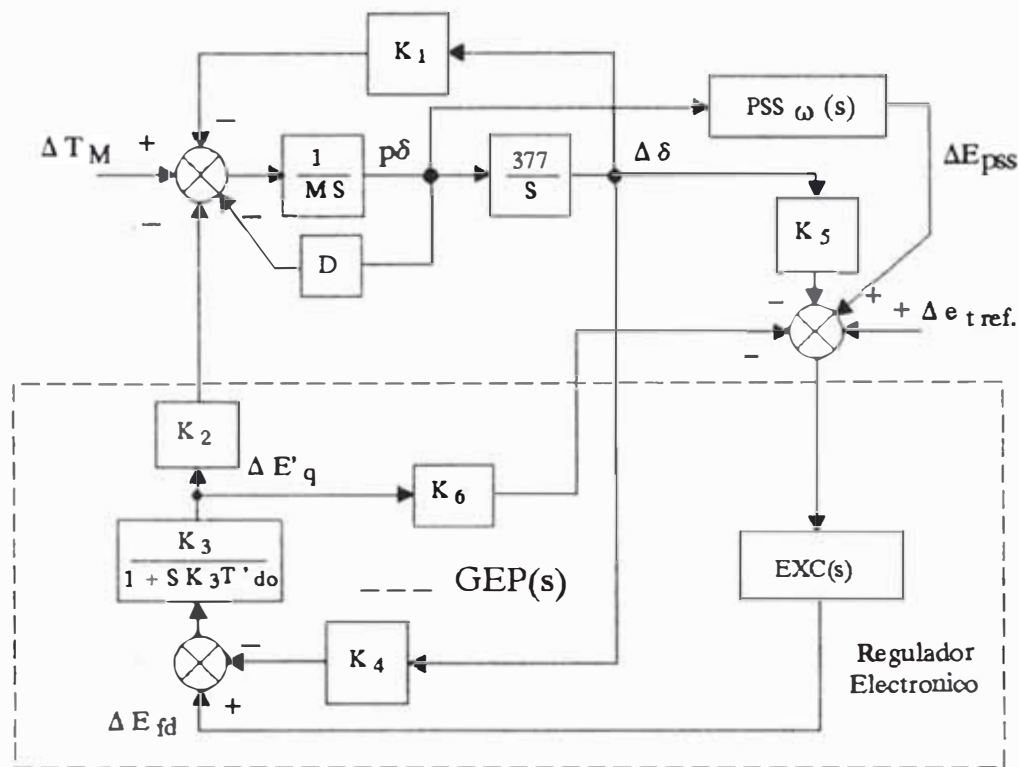


fig. 2-4 Modelo simplificado del generador con señal estabilizante

La relación funcional entre la velocidad y el torque es expuesto para un estabilizador empleando la velocidad del generador como una señal de entrada. La contribución del torque debido al camino del estabilizador esta dado por:

$$\frac{\Delta T_{ep}}{\Delta \omega_C} = PSS_{\omega}(s) GEP(s) \approx P(s) \dots \dots \dots (2-1)$$

En este caso la velocidad de entrada es usado por claridad; la extensión para otras señales como potencia, frecuencia puede ser discutido después. La función de transferencia GEP(s) representa la característica del generador, el sistema de excitación y el sistema de potencia. Esta función de transferencia puede ser aproximadamente a la fig. 2-4, el que representa el modelo

simplificado de una máquina conectado a un gran sistema de potencia a través de una línea de transmisión. El estudio de esta figuras revelan las características dinámicas de $GEP(s)$ es proporcional al regulador de lazo cerrado del regulador de voltaje cuando la velocidad del generador es constante ($\Delta \omega_g = 0$), y se puede aproximar a:

$$GEP(s) \approx \frac{K_2}{K_6} \frac{\partial E_t}{\partial E_{ref}} \dots\dots\dots(2-2)$$

Las relaciones que forman el procedimiento básico de sintonizar un estabilizador el cual envuelve mediciones de las características del regulador de voltaje en lazo cerrado para determinar la compensación de fase requerido por el estabilizador.

La variación de $GEP(s)$ con la ganancia del excitador, con la carga del generador y la influencia del sistema eléctrico de potencia juegan un rol dominante en el estabilizador de potencia en sus requerimientos de sintonía y funcionamiento.

El lazo cerrado del regulador de voltaje responde primeramente en función de las características de excitación y de la potencia del sistema.

Los Generadores-Turbina modernos, típicamente tienen un regulador de voltaje de ganancia transitoria (la ganancia en el rango de frecuencia de intermáquinas es 0.2 2.5 Hz) de aproximadamente 20 p.u $\Leftrightarrow E_{fd} / \epsilon_t$ p.u, el cual resulta en el lazo del regulador de voltaje cruza por 1 rad/seg. Para un sistema de potencia AC, la experiencia nos indica

que está ganancia tiene resultados satisfactorios de operación sobre un amplio rango de condiciones del sistema. No obstante por tener un amplio beneficio desde los excitadores de elevados umbrales, para conseguir la estabilización para un largo disturbio, altas ganancias pueden ser requeridas.

En algunas utilidades de ganancias transitorias del orden de 200 p.u. $\Leftrightarrow E_{fd} / \epsilon_t$ p.u. para asegurar el máximo funcionamiento, con un sistema de excitación que tiene un pequeño ángulo de retardo, ganancias elevadas tienen un resultado satisfactorio en la regulación de voltaje para generadores con carga, pero podría decrecer significativamente el amortiguamiento con las oscilaciones del rotor y puede causar una inestabilidad el cual evita la operación a plena carga en un sistema de potencia.

Las situaciones donde el lazo del regulador de voltaje, la frecuencia de cruce es baja como las frecuencias de las oscilaciones concernientes. La ganancia GEP(s) para las frecuencias de oscilación pueden ser aproximadamente descrito por:

$$|GEP(j\omega_i)| \approx \frac{K_2 |EXC(j\omega_i)|}{\omega_i T'_{do}} \dots\dots\dots(2-3)$$

Para esto asumimos que $1/K_2 T'_{do}$ es menor que el cruce de frecuencia. La suposición de la ecuación anterior es usualmente válida para unidades modernas típicamente. La ganancia es por lo tanto proporcional a la ganancia del excitador e inversamente proporcional a la constante de tiempo en circuito abierto del generador (T'_{do}) y a la

frecuencia de oscilación.

La ganancia es también proporcional al parámetro K_2 el cual representa los efectos del cambio en el flujo (E'_q) del generador sobre el torque eléctrico (T_e), y K_2 :

- 1.- Se incrementa con la carga del generador.
- 2.- Se incrementa con la elevación de la potencia del sistema.

Luego la ganancia en esta porción del lazo es elevada con el generador a plena carga y operando en un gran sistema de potencia. Para situaciones donde el lazo del regulador de voltaje, su cruce de la frecuencia es alta como las frecuencias concernientes al caso. En este caso es muy elevada la ganancia del regulador pero es inversamente proporcional al parámetro k_f esto está indicado en la ecu.(2-2).

K_f representa el efecto de E'_q sobre el voltaje en los terminales del generador, el cual decrece cuando el sistema de potencia se incrementa y luego hace que la ganancia de $GEP(s)$, se incremente cuando el sistema crece.

Entonces la ganancia del regulador de voltaje en circuito abierto es proporcional a K_f , el cruce de la frecuencia decrece cuando el sistema de potencia aumenta, esto influye en el funcionamiento del estabilizador, donde habrá más retraso de fase para superar en el sistema de potencia con el cual se debilita. Este efecto es más pronunciado en reguladores de voltaje de alta ganancia. Luego la frecuencia de cruce está en el mismo rango como las oscilaciones de las intermáquinas.

En resumen el estabilizador de potencia puede operar a través de la "Planta" GEP(s) el cual es dependiente del generador, del sistema de excitación y sistema de potencia. Las características básicas de esta planta tiene una significancia para las aplicaciones del estabilizador, y son las siguientes:

- 1.- La característica en la fase de GEP(s) es cercanamente idéntica a las características de fase del regulador de voltaje en lazo cerrado.
- 2.- La ganancia de GEP(s), se incrementa con la carga del generador.
- 3.- La ganancia de GEP(s) se incrementa cuando el sistema de potencia se hace fuerte. Este efecto es amplificado con las altas ganancias de los reguladores de voltaje.
- 4.- Para reguladores de voltajes típicos las ganancias transitorias del orden de $20 \text{ p.u. } E_{fd} / \epsilon_t \text{ p.u.}$, la ganancia de GEP(s) para la frecuencia de oscilación es proporcional a la ganancia del regulador e inversamente proporcional a la constante de tiempo en circuito abierto del generador (T'_{d0}) y a la frecuencia de oscilación.
- 5.- El atraso de la fase de GEP(s) se incrementa, así como aumenta el sistema de potencia. Esta tiene gran influencia con excitadores de elevadas ganancias luego el lazo del regulador de voltaje donde su frecuencia de cruce para ganancia unitaria se acerca a la oscilación del asunto.

2.4.2 Tipos de señales estabilizantes

La característica general de la respuesta en frecuencia de los estabilizadores utilizando señales alternativas son discutidos en esta parte, junto con los conceptos básicos capacidad de control, aspectos de operación.

Velocidad de entrada

Un estabilizador de potencia usando variaciones de velocidad como entrada se puede compensar el atraso de GEP(s) para producir una componente de torque en fase con los cambios de velocidad así de este modo incrementamos el amortiguamiento a las oscilaciones del rotor. Un estabilizador ideal, cuya característica puede ser inversamente proporcional a GEP(s).

$$IDEAL \quad PSS_{\omega}(s) = \frac{D_{pss}}{GEP(s)} \dots\dots\dots ecu.-(2-4)$$

donde D_{pss} representa el deseado amortiguamiento del estabilizador, como la característica del estabilizador no es práctico, luego la compensación perfecta el cual está asociado con altas ganancias para altas frecuencias.

Un estabilizador práctico puede utilizar estados de adelanto/atraso de fase. Para compensar el atraso de fase de GEP(s) sobre el rango de frecuencia de interés.

La ganancia puede ser atenuada para altas frecuencias, para limitar el impacto de ruido y minimizar la interacción torsional y consecuentemente con un filtro pasabajo, la posibilidad de una banda de rechazo es requerida, así como

un eliminador de offset para estado estable.

$$\text{Practico } PSS_{\omega}(s) = K_s \frac{(T_w s)(1 + T_1 s)(1 + T_3 s)}{(1 + T_w s)(1 + T_2 s)(1 + T_4 s)} FILT(s)$$

.....ecu.-(2-5)

Como discutimos en la sección previa el estabilizador puede operar a través de $GEP(s)$, con las características de variar significativamente con las condiciones de operación. La ganancia del generador se incrementa cuando su carga también aumenta, el cual es deseable para los problemas de estabilidad, para lo cual el estabilizador es aplicado de incrementarse la carga del generador.

No obstante la ganancia es muy alta para sistemas de potencia fuertes donde el problema de estabilidad es mínimo y decrece cuando el sistema se debilita. El efecto luego causa una disminución de velocidad que ingresa al estabilizador para decrecer (T_{ep}) de acuerdo al requerimiento del sistema de potencia.

En adición a una razón para incrementar así como el sistema aumenta, el ángulo de atraso también aumenta como consecuencia del lazo de la fig. 2-4, es menos estables bajo condiciones donde hay sistemas de potencia elevadas y estas condiciones establecen la máxima ganancia del estabilizador con una entrada de velocidad ω .

Sin un control adaptivo de ganancia, esta no puede ser tan alta como lo deseado cuando el sistema de potencia se debilita condición cuando la contribución del estabilizador es requerida.

Potencia de entrada

El uso de la potencia como señal de entrada recientemente ha recibido considerable atención debido a que no le afecta los bajos niveles de las interacciones torsionales, donde las dificultades prácticas de eliminación son mínimas, con los efectos de variaciones de potencia mecánica que aparecen. Es necesario usar un filtro adecuado con el cual se corrige de las variaciones de potencia mecánica.

En los siguientes análisis son aplicados solamente a las características de lazo cerrado con la realimentación de potencia eléctrica, es sin embargo necesario en los estabilizadores prácticos que exista una compensación a las variaciones de potencia mecánica.

El método mas común para analizar la señal de potencia de entrada al estabilizador, es tratar como la derivada de la velocidad y aplicar los mismos conceptos para una señal de velocidad. Este método adelanta las conclusiones para dar las características de funcionamiento del estabilizador de potencia es idéntica a la velocidad. Esta conclusión es válida para varios modos de oscilación en el eje de un cuerpo rígido (a condición por el cambio de potencia mecánica está compensado por la entrada del estabilizador donde está dada por una verdadera medición del promedio de la aceleración de potencia sobre la Turbina - Generador). Para la variación de los modos torsionales de vibración en el eje, no obstante, el aceleramiento de la potencia sobre el rotor del generador solamente es considerado diferente

al promedio de la aceleración de potencia a través del eje y luego tratar la señal de entrada al estabilizador como una derivación de la velocidad no es válida. Una alternativa es utilizar la señal del factor de sensibilidad.

La el cual trata de los cambios de potencia como resultado de los cambios de velocidad vía el sistema de potencia, esta relación produce la comprensión de las diferencias genéricas entre la entrada de potencia y la velocidad como entradas estabilizadoras, particularmente con cuidado de las iteraciones torsionales.

La señal de entrada del factor de sensibilidad para la potencia es:

$$S_p(s) = \frac{\delta P_e}{\delta \omega} = \frac{\delta (T_e \omega)}{\delta \omega} = \frac{\delta T_e}{\delta \omega} + P_{e0} \quad \dots\dots\dots(2-6)$$

$$= \frac{\omega_b K_1 e(s)}{s} + P_{e0} \quad \dots\dots\dots(2-7)$$

$$= \frac{\omega_b K_1 e(s)}{s} \left(1 + \frac{s}{\omega_{po}}\right) \quad \dots\dots\dots(2-8)$$

Donde:

T_e : Torque del generador.

T_{e0} : $T_e - T_{ep}$. debido a otras fuentes.

P_e : Potencia eléctrica.

P_{e0} : Potencia en estado estable.

T_{ep} : Componente de torque eléctrico debido al cambio de flujo causado por E_{pss}

E_{pss} : Salida de la señal del estabilizador.

- K_{1e} : Coeficiente de sincronización conocido como K_1
 ω_b : Frecuencia base 377 rad/seg. para 60 Hz.

Estas entradas del factor de sensibilidad es dominado por el primer término de la ecu.(2-6) para las bajas frecuencias, luego para los más bajos valores de K_{1e} es aproximadamente 0.5 p.u /rad. (para sistemas de transmisión débiles) y con P_{e0} máximo para 1 p.u. La apertura desde el termino integral al ser término proporcional (ω_{p0}) ocurre aproximadamente a la mitad de la frecuencia sincrona en este caso de 30 Hz esto da entender que la potencia eléctrica y el torque son equivalentes con respecto al funcionamiento del estabilizador para la mayoría de los modos de oscilación. Luego la señal de entrada del factor de sensibilidad como potencia fue primeramente una característica integral, con aproximadamente 90° de atraso en el rango de frecuencia de interés, podría aparecer con un adelanto adicional 90° de el que seria requerido por el estabilizador, no obstante ningún mínimo desfasaje podría ser requerido por el estabilizador de potencia, con una característica de atraso de 270° el puede se usado mejor dicho con una característica de atraso de 90° de desplazamiento de fase. La desventaja de este método esta en las características de producir en lazo cerrado iteraciones con oscilaciones desplazadas el cual muestran un decrecimiento de la ganancia con la frecuencia, así como se opone al incremento de la ganancia con la frecuencia asociado con el mínimo desfasaje que utiliza una

característica en adelanto, así como las iteraciones torsionales con un mínimo ideal desfasaje el estabilizador se aleja a una razón de 40 db/década cuando la frecuencia torsional se incrementa, con igual iteración para un modo local de oscilación (asumiendo ganancias iguales puestas para operación en modo local).

El atraso de fase de 270° se puede obtener invirtiendo la señal de potencia eléctrica y diseñando un estabilizador de modo que la contribución a la red del estabilizador y $GEP(s)$ produce 90° de retraso de fase por la característica integral. Con este criterio, un estabilizador ideal para potencia es definido por la ecu.(2-9).

$$Ideal \ PSS_p(s) = \frac{D_{pss}}{S \ GEP(s)} \dots\dots\dots(2-9)$$

Note que este resultado es el mismo que el obtenido por tratando la potencia como la derivada de la velocidad, luego invirtiendo P_e e integrando produce la velocidad, y multiplicando por el ideal $PSS_w(s)$ desde la ecu.(2-4) puede dar la ecu.(2-9).

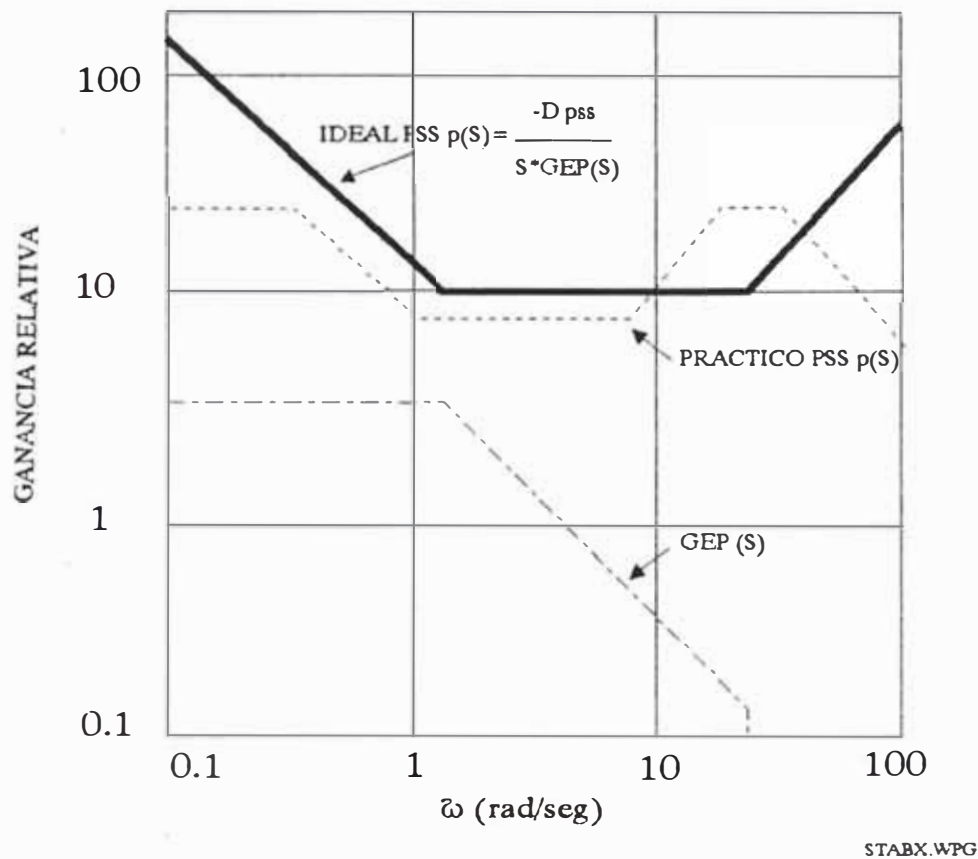


fig. 2-5. Estabilizador usa potencia como entrada, observamos el compensador Ideal - Práctico.

La respuesta en frecuencia para un estabilizador semejante es presentado en la fig. 2-5. Para bajas frecuencias, atrasos de fase pueden ser introducidos para compensar para el pequeño retraso de fase desfasaje, mientras que para altas frecuencias el estabilizador puede adicionarle adelantos de fase para compensar los retrasos secundarios del GEP (s) y el estabilizador. La extensión de los atrasos para bajas frecuencias y los adelantos de fase para altas frecuencias que no son prácticos a causa

de los ruidos de alta frecuencia y por el excesivo efecto de corrimientos del voltaje para bajas frecuencias sobre el sistema de potencia, incluyendo los cambios de potencia mecánica, si esto no es perfectamente compensado para proveer señal de aceleración de potencia. Para bajas frecuencias, la ganancia para frecuencia baja se reduce por uso de una constante de tiempo relacionado por una integral, equivalente a un filtro pasa bajo para la velocidad. La combinación de una etapa de pequeños estados de adelantos/atrasos y de retraso para alta frecuencia provee un deseable decaimiento de la ganancia con la frecuencia mientras mantiene un adecuada fase cerca de la frecuencia en el modo local más alto. Un práctico estabilizador de potencia podría de esta forma tener una respuesta en frecuencia presentado por la fig. 2-5.

Donde se podría notar las imperfecciones de compensación en estado estable para los cambios de potencia es necesario agregar filtros pasa bajo, el cual es equivalente a un adicional filtro al estabilizador de velocidad. El adelanto de fase resultante seria perjudicial para el funcionamiento del estabilizador, porque este introduce una componente de desincronización, el modo interarea tiene un torque de sincronización pequeño debido al debilitamiento relativo, enlaces cargados fuertemente y añadiendo un efecto de desincronización vía un estabilizador de potencia puede causar la perdida del sincronismo siguiendo un disturbio del sistema relativamente menor bajo tales condiciones.

Señales de ángulos

Los primeros excitadores estáticos estaban equipados con señales estabilizantes derivados de la medición del ángulo de fase entre el voltaje interno del generador (E_q) y el voltaje en los terminales del generador (e_t). Ambos voltajes son obtenidos por redes de simulación desde los terminales del generador. Un transductor de ángulo fue desarrollado para proveer una señal aproximadamente proporcional al ángulo de fase y esta señal fue diferenciado para proveer los requerimientos de la señal de amortiguamiento ($p\delta$). Las dos principales desventajas de este sistema son:

Primeramente, sin usar tiempos de retardos en las mediciones resultando menos óptimo el funcionamiento. La segunda fue la variación de la impedancia del sistema sensible desde los terminales del generador el cual podría en la practica variar sobre un amplio rango, dependiendo de las condiciones de operación resultando en una inestabilidad del dispositivo cuando la impedancia del sistema es mucho menor que el valor colocado utilizando el la simulación de la red, este método fue por consiguiente abandonado para utilizar una medición directa del desplazamiento de la velocidad.

2.4.3 Configuración del compensador de la señal estabilizante.

Un estabilizador práctico puede utilizar estados de adelanto/atraso, de fase. Para compensar el atraso de fase de GEP(s) sobre el rango de frecuencia de interés.

La ganancia puede ser atenuada para altas frecuencias, para limitar el impacto de ruido y minimizar la interacción torsional y consecuentemente un filtro pasabajo, la posibilidad de una banda de rechazo es requerido, así como un eliminador de offset para estado estable.

$$\text{Practico } Pss_{\omega}(s) = K_s \frac{(T_w s)(1 + T_1 s)(1 + T_3 s)}{(1 + T_w s)(1 + T_2 s)(1 + T_4 s)} FILT(s)$$

Como discutimos en la sección previa el estabilizador puede operar a través de $GEP(s)$, con las características que varían significativamente con las condiciones de operación. La ganancia del generador se incrementa cuando su carga también aumenta, el cual es deseable para los problemas de estabilidad, para lo cual el estabilizador es aplicado de incrementarse la carga del generador.

No obstante la ganancia es muy alta para sistemas de potencia fuertes, donde el problema de estabilidad es mínimo y decrece cuando el sistema se debilita. Después el efecto causa una disminución de velocidad que ingresa al estabilizador para decrecer de acuerdo al requerimiento del sistema de potencia.

En adición a una razón para incrementar así como el sistema aumenta, el ángulo de atraso también aumenta como consecuencia del lazo de la fig. 2-4, es menos estables bajo condiciones donde hay sistemas de potencia elevadas y estas condiciones establecen la máxima ganancia del estabilizador con una entrada de velocidad ω .

Sin un control adaptivo de ganancia, esta no puede ser tan alta como lo deseado cuando el sistema de potencia se debilita condición cuando la contribución del estabilizador es requerida.

CAPITULO III ESPECIFICACIONES DE FUNCIONAMIENTO

3.1 Especificaciones técnicas de funcionamiento del sistema.

Para dar las especificaciones es necesario hacer un repaso sobre algunas consideraciones que se deberán de tener en cuenta para comprender el porqué de los valores que toman los parámetros para un buen funcionamiento, son:

Barra infinita.— La red de distribución comercial es alimentada por muchos generadores funcionando en paralelo. A medida que fluctúan las demandas de carga y con el fin de permitir reparaciones y mantenimiento, se adicionan o retiran unidades de la línea aunque la especificación de un generador individual puede ser desde decenas a centenas de MVA. esa pesar de todo muy pequeña con respecto a la red del sistema alimentada probablemente por decenas o cientos de generadores. Bajo estas circunstancias, un cambio de las condiciones de operación de un alternador tendrá un efecto despreciable sobre las características del sistema y el análisis del generador se basa en la suposición de que se conecta a una barra infinita, esto es, una conexión terminal para la cual el voltaje y la frecuencia son absolutamente constantes.

Factor de Potencia.— Los generadores normalizados se especifican a factores de potencia de 0.8 retraso; el rango

de potencia establece limitaciones en la excitación del rotor. Para evitar el aumento excesivo de temperatura, no solamente la corriente de la armadura sino la corriente de campo debe limitarse a valores nominales.

Voltaje del terminal.- Este se puede mantener a valor nominal para factor de potencia superiores a 0.8 por medio del regulador, pero a factores de potencia inferiores, no es posible mantenerlo sin exceder la corriente de campo nominal.

Según la norma NEMA, un generador sincrónico operará satisfactoriamente a KVA, frecuencia y factor de potencia nominales con voltajes en los terminales no inferiores o superiores al 5 % del voltaje nominal. Con el campo ajustado para condiciones nominales, puede suministrar valores e $150 \% I_N$ durante 1 minuto y puede resistir un corto circuito durante 30 segundos.

En emergencias, puede mantener una sobrevelocidad al rededor de 25 % sin daño mecánico.

los valores de los parámetros de los reguladores electrónicos están en el rango:

K_p ganancia proporcional 0.1 a 30

$1/t_1$ rango de 0.003 a 0.3 Hz.

$1/t_0$ rango de 1 a 10 Hz.

Entonces de acuerdo al tipo de generador se tiene que dar las especificaciones de funcionamiento son la siguientes:

Máximo sobre impulso (SP) que debe registrar 5 % del voltaje nominal.

Tiempo de asentamiento (T_s) considerando la 1.5 partes T'_{do} constante de tiempo transitorio longitudinal a circuito abierto $T'_{do} = 4$ seg.

RESUMEN DE ESPECIFICACIONES DE FUNCIONAMIENTO

Máximo sobreimpulso	$SP = 5 \%$
Tiempo de asentamiento	$T_s = 1.5 T'_{do}$
Constante de tiempo transitorio longitudinal a circuito abierto T'_{do} donde $T'_{do} = 4$ seg.	

3.2 Sintonización del regulador PID para el control de voltaje del generador

Deducido el modelo matemático de la planta, entonces es posible aplicar varias técnicas para determinar los parámetros del controlador que cumpla con las especificaciones transitorias y estado estacionario del sistema en lazo cerrado. Aplicando las reglas de sintonía y afinación del controlador PID sugeridas por Ziegler - Nichols para determinar los parámetros de ganancia proporcional K_p , del tiempo integral T_I , y del tiempo derivativo T_D , basados en características de respuesta transitoria de una planta dada. La determinación de los parámetros de los controladores PID se puede realizar por 2 métodos en ambos métodos se intenta lograr un sobreimpulso máximo del 25% en respuesta al escalón, posteriormente mediante la afinación lograremos las especificaciones requeridas según (2.2).

- **Primer método**, se obtiene experimentalmente la respuesta del generador a una entrada escalón unitario, si la planta no incluye integrador(es) o polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta al escalón unitario puede tener el aspecto de una curva en forma de S, si no tiene la forma de S no se puede aplicar el método, no aplicable en nuestro caso, (para más detalle

cap.7 Ogata).

- **Segundo metodo**, primero se hace $T_I = \text{infinito}$ y $T_D = 0$, usando solamente la acción de control proporcional, incremente K_p desde cero hasta un valor crítico K_{CR} en la cual la salida exhiba por primera vez oscilaciones sostenidas. (si la salida no presenta oscilaciones sostenidas para cualquier valor que pueda tomar K_p , entonces no se puede aplicar este método). Así se determina experimentalmente la ganancia crítica K_{CR} y el periodo correspondiente P_{CR} y Ziegler-Nichols sugirieron fijar los valores de K_p , T_I , T_D de acuerdo a la formula de la tabla(A)

Tipo de controlador	K_p	T_I	T_D
P	$0.5 \cdot K_{CR}$	infinito	0
PI	$0.45 \cdot K_{CR}$	$\frac{1}{1.2} \cdot P_{CR}$	0
PID	$0.6 \cdot K_{CR}$	$0.5 \cdot P_{CR}$	$0.125 \cdot P_{CR}$

Tabla (A)

$$G_{PID} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I \cdot S} + T_D \cdot S \right) \quad \text{F.T del regulador PID}$$

Ahora aplicaremos a nuestro modelo desarrollado del generador con un control proporcional K_p el lazo cerrado el cual es mostrado en la siguiente ecuación :

$$G_3 = \frac{0.2 \cdot S^2 + 0.085 \cdot S + 155.6}{1.6 \cdot S^3 + 1.86 \cdot S^2 + 454.5 \cdot S + 340.5} \quad \begin{array}{l} \text{función de transferencia} \\ e_t/E_{fd} \text{ del generador} \end{array}$$

K_P ganancia proporcional

$$G_{k_{CR}} = \frac{K_P \cdot G_3}{1 + K_P \cdot G_3} \quad \text{F.T en lazo cerrado}$$

Reemplazado:

$$G_{k_{CR}} = K_P \frac{(2 \cdot S^2 + 0.0085 \cdot S + 155.6)}{(1.6 \cdot S^3 + 1.86 \cdot S^2 + 454.5 \cdot S + 340.5 + 2 \cdot K_P \cdot S^2 + 0.0085 \cdot K_P \cdot S + 155.6 \cdot K_P)}$$

Factorizando:

$$G_{k_{CR}} = K_P \frac{(2 \cdot S^2 + 0.0085 \cdot S + 155.6)}{[1.6 \cdot S^3 + (2 \cdot K_P + 1.86) \cdot S^2 + (0.0085 \cdot K_P + 454.5) \cdot S + (155.6 \cdot K_P + 340.5)]}$$

De la ecuación características podemos observar el valor que tomara K_P para dar un valor crítico en el eje imaginario para lo cual aplicamos el arreglo de Routh.

$$S^3 \quad 1.6 \quad (0.0085 \cdot K_P + 454.5)$$

$$S^2 \quad (2 \cdot K_P + 1.86) \quad (155.6 \cdot K_P + 340.5)$$

$$S^1 \quad b$$

$$S^0 \quad (155.6 \cdot K_P + 340.5)$$

Donde:

$$b = \frac{(2 \cdot K_P + 1.86) \cdot (0.0085 \cdot K_P + 454.5) - 1.6 \cdot (155.6 \cdot K_P + 340.5)}{(2 \cdot K_P + 1.86)}$$

$$b = \frac{(0.017 \cdot K_P^2 + 90.91581 \cdot K_P + 845.37 - 248.96 \cdot K_P - 544.8)}{(2 \cdot K_P + 1.86)}$$

para todo K_P el denominador es mayor que cero y positivo.

$$(0.017 \cdot K_P^2 + 90.91581 \cdot K_P + 845.37 - 248.96 \cdot K_P - 544.8) = 0$$

La ganancia crítica K_{CR}

$$K_{CR} = \left(\begin{array}{l} 9294.8148597477993703 \\ 1.9021990757300415 \end{array} \right) \quad K_{CR1} = 9294.81 \quad K_{CR2} = 1.902$$

Los dos valores críticos que cumplen las condiciones, se toma el de la menor ganancia por ser aplicable en forma práctica. Reemplazando en la ecuación característica para calcular el P_{CR} .

Ecuación Característica:

$$\left[1.6 \cdot S^3 + (2 \cdot K_{CR} + 1.86) \cdot S^2 + (0.0085 \cdot K_{CR} + 454.5) \cdot S + (155.6 \cdot K_{CR} + 340.5) \right]$$

$$1.6 \cdot S^3 + 2.240 \cdot S^2 + 454.516 \cdot S + 636.451 = 0$$

$$\frac{636.451}{2.24} = 284.13$$

$$1.6 \cdot (jw)^3 + 2.24 \cdot (jw)^2 + 454.516 \cdot jw + 636.451 = 0$$

$$-1.6 \cdot jw^3 - 2.24 \cdot w^2 + 454.516 \cdot jw + 636.451 = 0$$

$$\frac{454.516}{1.6} = 284.072$$

$$1.6 \cdot jw \cdot (284.1 - w^2) + 2.24(284.1 - w^2) = 0$$

Obtemos :

$$w_{CR} = \sqrt{284.1}$$

$$f_{CR} = \frac{16.855}{2 \cdot \pi}$$

$$P_{CR} = \frac{1}{f_{CR}} = 0.373$$

$$P_{CR} = 0.373$$

Reemplazando en la referencia de la tabla de Ziegler Nichols obtenemos los parámetros del regulador PID.

$$K_P = 0.6 \cdot K_{CR} = 1.141$$

$$0.6 \cdot 1.902 = 1.141$$

$$T_I = 0.5 \cdot P_{K_{CR}} = 0.187$$

$$0.5 \cdot 0.373 = 0.187$$

$$T_D = 0.125 \cdot P_{K_{CR}} = 0.047$$

$$0.125 \cdot 0.373 = 0.047$$

Ahora reemplazamos en la función de transferencia

del regulador PID y simplificamos.

$$G_{PID} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I \cdot S} + T_D \cdot S \right)$$

$$G_{PID} = 1.141 \cdot \left(1 + \frac{1}{0.187 \cdot S} + 0.047 \cdot S \right)$$

$$G_{PID} = \frac{6.102 \cdot (0.187 \cdot S + 1 + 0.009 \cdot S^2)}{S}$$

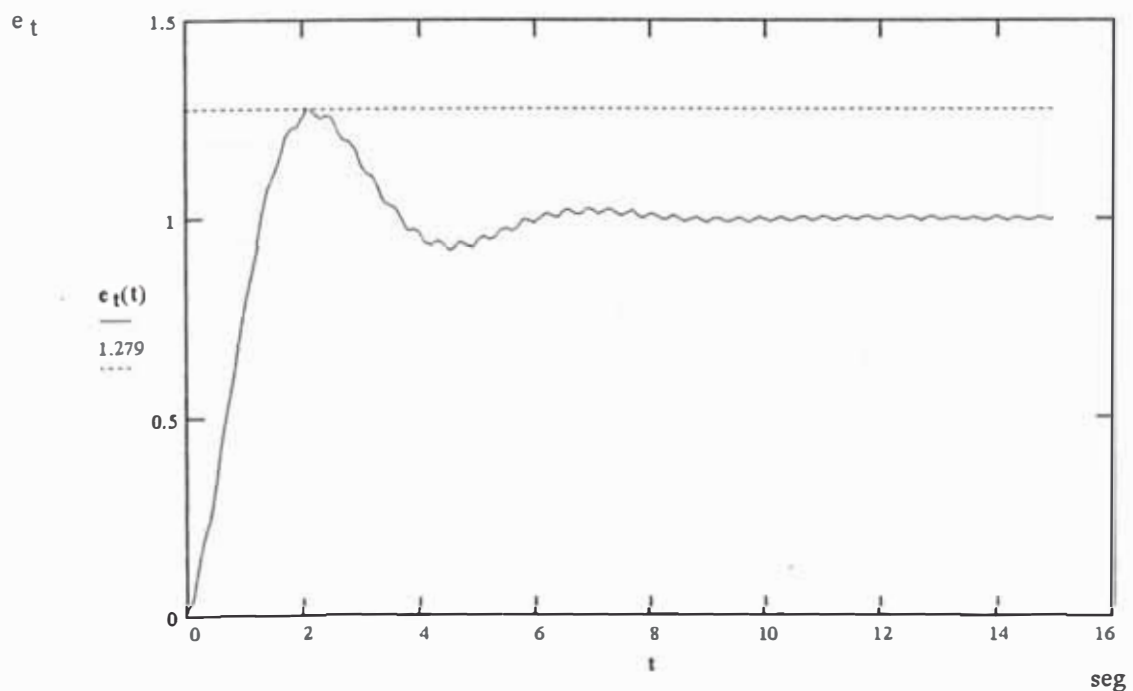
Nota: los gráficos están indicados por sus respectivas ecuaciones.

Graficamos la respuesta en el tiempo del regulador y el generador en condiciones de $I_{po}=1.3, I_{qo}=0.2$ p.u respectivamente, para el peor caso (e_t).

$$e_t(t) := 1 - 1.587 \cdot 10^{-2} \cdot \sin(16.911 \cdot t + 0.528) \cdot \exp(-8.911 \cdot 10^{-2} \cdot t) - 0.994 \cdot \cos(1.320 \cdot t - 0.140) \cdot \exp(-0.562 \cdot t)$$

$$t := 0, 1..15$$

Graficamos la respuesta en el tiempo del regulador y el generador sintonizado $e_t(t)$



Se puede observar que el máximo sobreimpulso es de 27.9%, para corregirlo, para nuestras especificaciones del 5% de sobreimpulso un afinamiento del regulador PID en la parte integral para obtener el valor deseado.

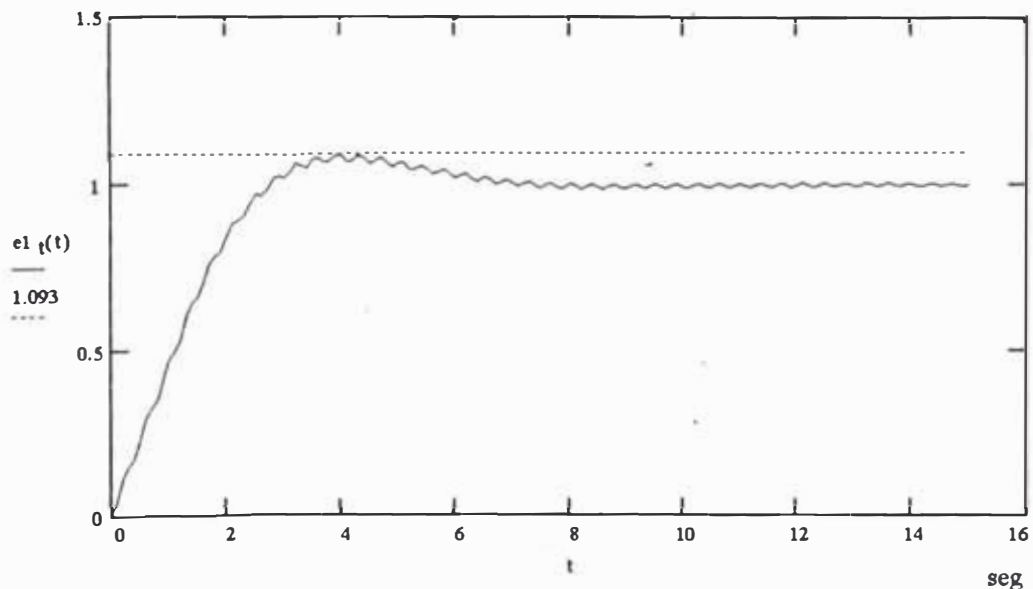
Para: $T_I=0.5$

$$G_{PID} = \frac{2.282 \cdot (0.0235 \cdot S^2 + 0.5 \cdot S + 1)}{S}$$

$$e1_t(t) := 1 - 1.702 \cdot 10^{-2} \cdot \sin(16.932 \cdot t + 0.661) \cdot \exp(-9.04 \cdot 10^{-2} \cdot t) - 1.020 \cdot \cos(0.67 \cdot t - 0.273) \cdot \exp(-0.56 \cdot t)$$

para este valor de $T_I=0.5$, el porcentaje de sobreimpulso es de 9.8%.

Graficamos la respuesta en el tiempo del regulador y el generador sintonizado $e1_t(t)$



Para: $T_I=0.62$

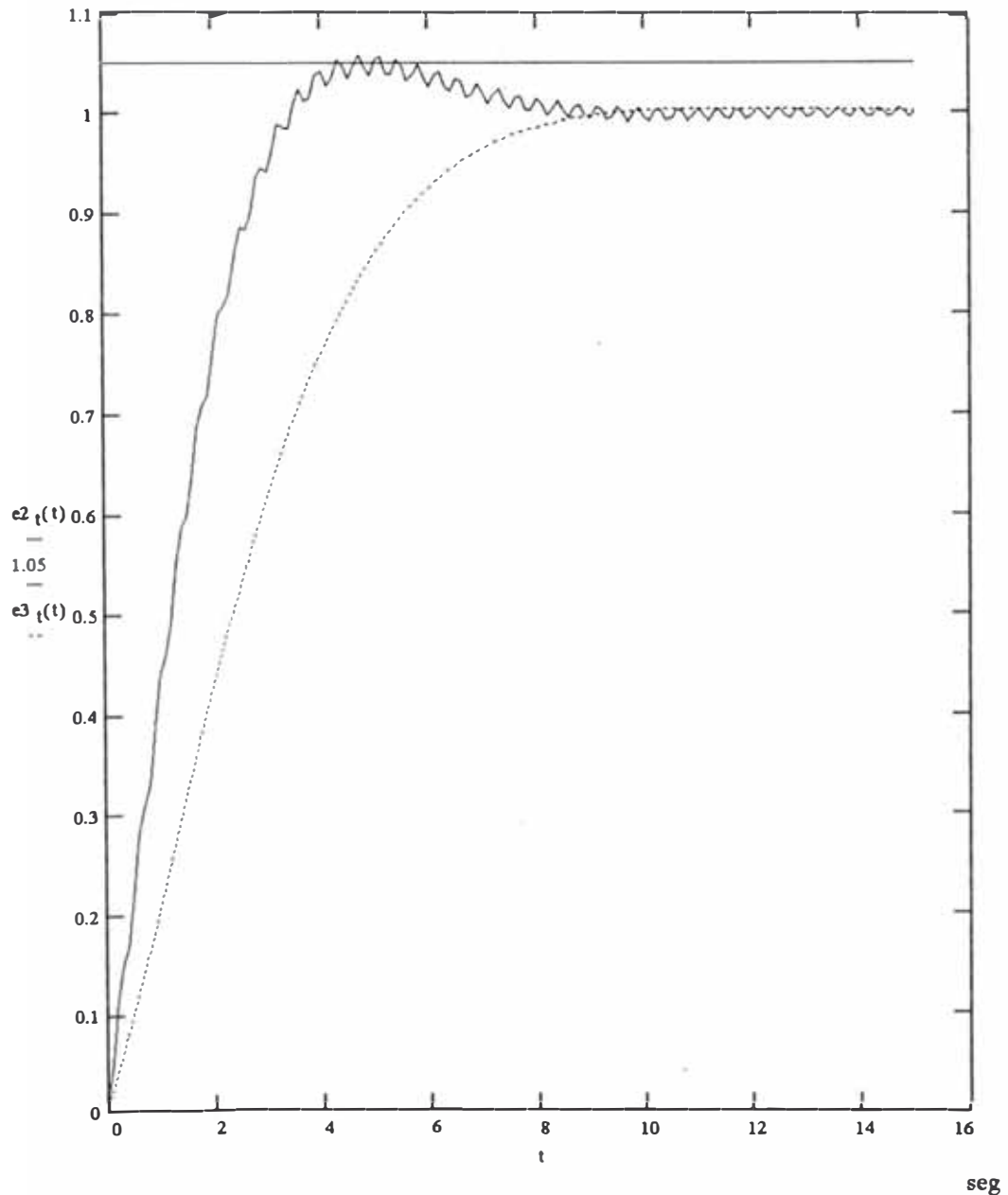
$$G_{PID} = \frac{1.84 \cdot (0.0291 \cdot S^2 + 0.62 \cdot S + 1)}{S}$$

$$e2_t(t) := 1 - 1.717 \cdot 10^{-2} \cdot \sin(16.935 \cdot t + 0.676) \cdot \exp(-9.06 \cdot 10^{-2} \cdot t) - 1.030 \cdot \cos(0.552 \cdot t - 0.329) \cdot \exp(-0.56 \cdot t)$$

Para este valor de $T_I = 0.62$, el porcentaje de sobreimpulso es de 5% (e_{2t}). Luego comparamos con la respuesta que dara el generador con $I_{po} = 0.1$ p.u (e_{3t})

$$e_{3t}(t) := 1 - 9.780 \cdot 10^{-5} \cdot \cos(22.402 \cdot t - 0.752) \cdot \exp(-0.205 \cdot 10^{-2} \cdot t) - 1.503 \cdot \sin(0.257 \cdot t + 0.720) \cdot \exp(-0.457 \cdot t)$$

Graficamos la respuesta en el tiempo del regulador y el generador sintonizado $e_{2t}(t)$



Cumple de esta manera $e_2(t)$ las especificaciones del máximo sobreimpulso y tiempo de asentamiento.

Luego analizaremos la estabilidad utilizando Bode, el criterio de Routh.

Para lo cual debemos tener la F.T del generador y el regulador.

$$G_2(S) := \frac{0.22 \cdot S^2 + 0.09 \cdot S + 143.05}{1.6 \cdot S^3 + 1.86 \cdot S^2 + 691.9 \cdot S + 518.61}$$

$$G_{PID}(S) := \frac{1.84 \cdot (0.0291 \cdot S^2 + 0.62 \cdot S + 1)}{S}$$

$$G_1(S) := \frac{0.239 \cdot S^2 + 0.099 \cdot S + 121.07}{1.6 \cdot S^3 + 1.86 \cdot S^2 + 803.52 \cdot S + 602.26}$$

$$G_3(S) := \frac{0.2 \cdot S^2 + 0.085 \cdot S + 155.6}{1.6 \cdot S^3 + 1.86 \cdot S^2 + 454.5 \cdot S + 340.5}$$

$$G1_{reg}(S) := \frac{G_1(S) \cdot G_{PID}(S)}{(1 + G_1(S) \cdot G_{PID}(S))}$$

$$G2_{reg}(S) := \frac{G_2(S) \cdot G_{PID}(S)}{(1 + G_2(S) \cdot G_{PID}(S))}$$

$$G3_{reg}(S) := \frac{G_3(S) \cdot G_{PID}(S)}{(1 + G_3(S) \cdot G_{PID}(S))}$$

Aplicaremos las siguientes variables para graficar el diagrama de Bode.

$$m := 40$$

$$i := 0..m$$

$$\max := 1000$$

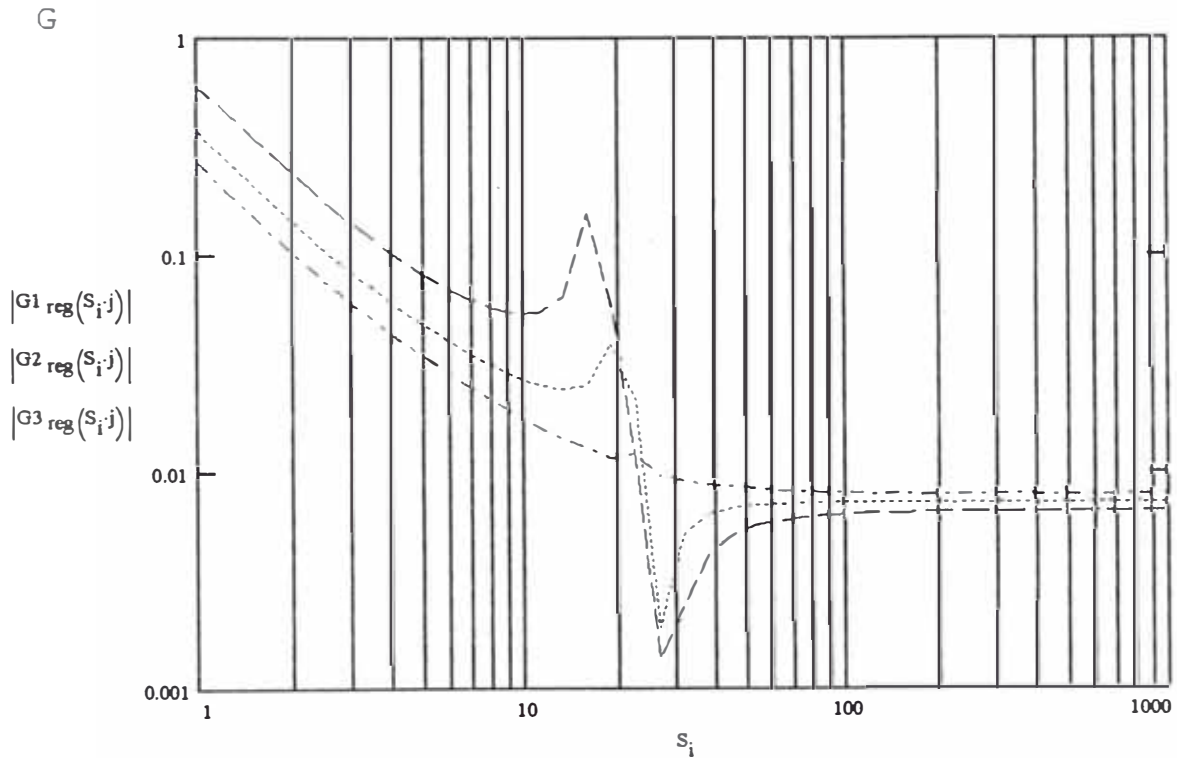
$$\min := 1$$

$$r := \ln\left(\frac{\max}{\min}\right)$$

$$S_i := \min \cdot \exp\left(i \cdot \frac{r}{m}\right)$$

$$j := \sqrt{-1}$$

Aplicación de Bode a la F.T de modelos del Generador-Regulador con una realimentación unitaria

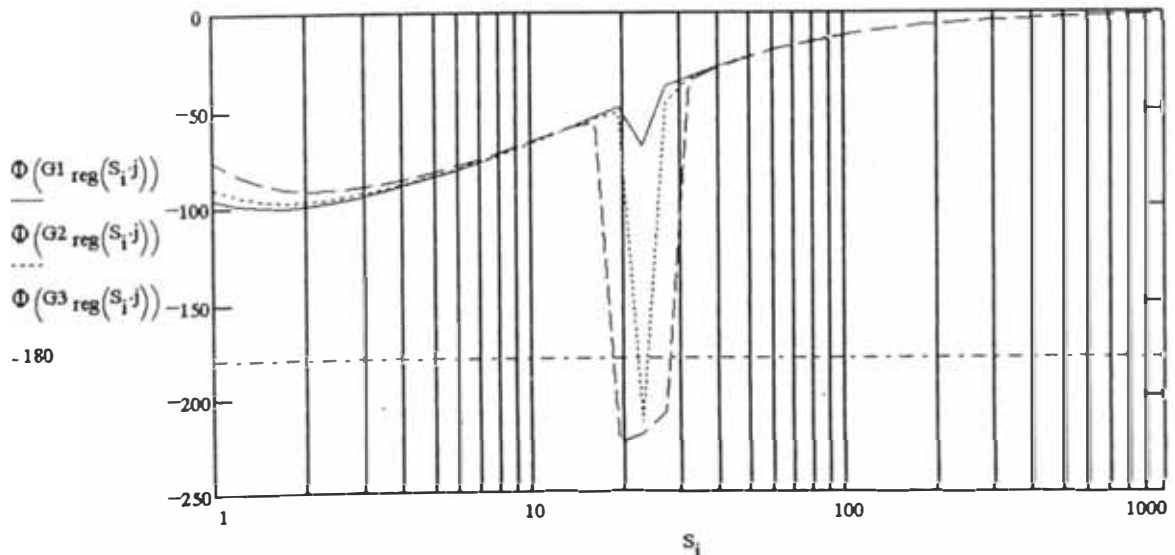


W

Se describe en el software de Mathcad el ángulo de F.T de la siguiente forma:

$$\Phi(\theta) \equiv \text{angle}(\text{Re}(\theta), \text{Im}(\theta)) \cdot \frac{360}{2 \cdot \pi} - 360$$

Angulo de la F.T del Generador-Regulador



Tiene un margen de fase para mantenerse estable.

Aplicación del criterio de estabilidad de Routh

Se aplicara para una condición de operación del generador, por ejemplo para $I_{po}=0.1$ p.u.

$$G_{l\text{ reg}}(S) := \frac{G_I(S) \cdot G_{PID}(S)}{(1 + G_I(S) \cdot G_{PID}(S))}$$

$$G_{l\text{ reg}}(S) = \frac{(0.239 \cdot S^2 + 0.099 \cdot S + 121.07) \cdot [1.84 \cdot (0.0291 \cdot S^2 + 0.62 \cdot S + 1)]}{(1.612797016 \cdot S^4 + 2.137952056 \cdot S^3 + 810.55527128 \cdot S^2 + 740.558816 \cdot S + 222.7688)}$$

$$G_{l\text{ reg}}(S) = \frac{[12797016 \cdot 10^{(-9)} \cdot S^4 + 277952056 \cdot S^3 + 703527128 \cdot S^2 + 138.298816 \cdot S + 222.7688]}{(1.612797016 \cdot S^4 + 2.137952056 \cdot S^3 + 810.55527128 \cdot S^2 + 740.558816 \cdot S + 222.7688)}$$

S^4	1.61	810.55	22.76	$a := \frac{2.13 \cdot 810.55 - 1.61 \cdot 740.55}{2.13}$
S^3	2.13	740.55	0	$a = 250.792$
S^2	250.79	22.76		$b := \frac{2.13 \cdot 22.76 - 0 \cdot 1.61}{2.13}$
S^1	740.35			$b = 22.76$
S^0	2.76			$c := \frac{250.79 \cdot 740.55 - 22.76 \cdot 2.13}{250.79}$
				$c = 740.357$

Entonces, como el criterio de estabilidad de Routh establece que la cantidad de raíces de la ecuación anterior (función de transferencia en lazo cerrado del

Generador-Regulador $G_{reg}(S)$, el denominador) con partes positivas reales es igual al cambio de signo de los coeficientes de la primera columna del conjunto.

Por lo tanto el sistema es de control con estabilidad absoluta.

3.3 Sintonización de la señal estabilizante.

3.3.1 Límites de estabilidad en estado "estable" o "dinámico"

Aplicando estabilizadores al sistema de potencia se puede ampliar los límites de estabilidad de potencia el cual está caracterizado por el amortiguamiento de las oscilaciones en el rango de frecuencia de 0.2 a 2.5 Hz. Esta es acoplado vía el control de excitación para contribuir al amortiguamientos a los distintos modos de oscilación del sistema eléctrico. Consecuentemente para lo cual se utiliza el estabilizador para dar un mayor amortiguamiento en las últimas condiciones estable de operación, por ejemplo, por las condiciones de funcionamiento para el cual es importante. Adicionalmente el amortiguamiento es principalmente requerido bajo la condición de líneas de transmisión débiles y cuando se coloca repentinamente cargas fuertes, por ejemplo, cuando se atiende una transmisión de potencia sobre una línea larga desde una planta remota de generación o sobre enlaces relativamente débiles entre sistemas. Contingencias, semejante a una salida de la línea o fuertes cortocircuitos, en estos casos se precipita condiciones semejantes. Entonces el sistema en el cual se tiene un adecuado amortiguamiento puede de esta forma beneficiarse por los estabilizadores durante condiciones anormales.

Es importante que los estabilizadores realicen un amortiguamiento para pequeñas excursiones alrededor del punto de operación en estado estable, y esto no mejora la

estabilidad transitoria, por ejemplo, la capacidad para recuperarse desde un severo disturbio. De hecho, el estabilizador pocas veces tendrá un efecto cancelatorio sobre la estabilidad transitoria por atender plenamente la elevación de voltaje en el campo del generador en respuesta a la falla. La salida del estabilizador es generalmente limitado para prevenir serios impactos sobre la estabilidad transitoria, pero el estabilizador también se sintoniza a distintos modos de frecuencias de oscilación teniendo un significativo impacto sobre el funcionamiento del sistema siguiendo un largo disturbio.

3.3.2 Modos de oscilación en sistemas eléctricos

Las oscilaciones en los sistemas de potencia que concierne a la estabilidad ocurre en el siguiente rango de 0.2 a 2.5 Hz., estos resultados en los rotores de los generadores, actuando como cuerpos rígidos, oscilan uno con respecto a otras, usa las líneas de transmisión eléctrica como camino para los intercambios de energía. Estos son de diferentes modos de oscilación que pueden ocurrir pocas veces simultáneamente.

La frecuencia natural de oscilación de "modo entre enlaces" es típicamente en el rango de 0.2 a 0.5 Hz.

El uso de estabilizadores de potencia es extendido para proveer amortiguamiento a las oscilaciones cuando ocurre en las unidades remotas de generación que son conectados a un relativo sistema de potencia a través de líneas débiles, esencialmente en las líneas de transmisión radial, se conoce como "modo local de oscilación" y esta frecuencia

natural es típicamente en el rango de 0.8 a 1.8 Hz.

Entre las frecuencias extremas de los interenlaces y modos locales existen otros modos comúnmente encontrados en conexiones de sistemas débiles. Estos "modos de intersistemas" resultado de oscilaciones entre las unidades individuales en un sistema y tienden a actuar similarmente a modos locales en esta porción de oscilación de potencia es típicamente experimentado en pocas unidades. Estos modos son tratados como modos locales.

Finalmente podemos mencionar que las oscilaciones que ocurren en las unidades de una misma planta es a consecuencia de sus controles que interactúan relacionados con los límites de estabilidad de la transferencia de potencia. Esto generalmente es indeseable para un estabilizador que responde a las oscilaciones de "modo interplanta", típicamente en un rango de frecuencia de 1.5 a 2.5 Hz, como estos disminuyen por la habilidad para mejorar los límites de transferencia de potencia de la planta. En algunos casos utilizan la velocidad promedio derivados de las múltiples unidades de una sola planta como una entrada para todos los estabilizadores de cada unidad, de esta forma se previenen a los estabilizadores de las oscilaciones para interplantas, una sumatoria de la potencia tiene que ser sugerida, la frecuencia en barras de la planta es menos sensitiva a los modos de oscilación interplanta no así la velocidad o potencia de entrada a los estabilizadores.

La experiencia sugiere que no es usualmente en una unidad generadora la participación de modos de oscilación local e interenlaces. Los estabilizadores en sistemas de potencia pueden ser usados para acomodarse a ambos modos de oscilación. Después una sola unidad de una planta de potencia está dominado en el "modo local", estos estabilizadores pueden tener un gran impacto sobre el amortiguamiento de las oscilaciones. Por contrario, una sola unidad experimenta solamente una porción de la magnitud total de la oscilación de potencia en el "modo interenlaces", de esta forma un estabilizador en un sistema de potencia aplicado a una sola unidad puede solamente contribuir al amortiguamiento de un "modo interenlace" en proporción a la capacidad de potencia de generación de la unidad, relativo a la total capacidad del área del cual es parte. Como una consecuencia un estabilizador puede ser designado proveer un adecuado amortiguamiento en el "modo local" bajo todas las condiciones de operación el cual particularmente atiende a las condiciones de carga fuerte y líneas de transmisión débiles y simultáneamente para proveer una elevada contribución de amortiguamiento para "modos interenlaces". Estos criterios que aseguran un buen funcionamiento para un amplio rango de contingencias en el sistema de potencia.

3.3.3 Concepto de Sintonía de las señales estabilizantes

Los estabilizadores pueden ser sintonizados para proveer el deseado funcionamiento del sistema bajo condiciones en el cual requieren estabilización, típicamente en los

sistemas débiles con fuertes potencias de transferencias, mientras a la vez están siendo robustos estas indeseables interacciones estas son evitadas para todas las condiciones del sistema. La planta a través del cual el estabilizador puede operar consiste del generador, excitador y sistema de potencia. Revisar capítulo 2.4.1.

$$GEP(s) = \frac{\Delta T_{ep}}{\Delta E_{pss}}$$

Donde:

$GEP(s)$ = La planta a través del cual el estabilizador puede operar.

ΔT_{ep} Componente de torque eléctrico debido solamente por el estabilizador.

E_{pss} Señal de salida del estabilizador.

Esta planta $GEP(s)$ tiene una alta ganancia y un elevado atraso de fase bajo condiciones de plena carga, sobre la unidad y el sistema de transmisión. Estas condiciones representan los casos de limitación para determinar la ganancia, con el uso de la velocidad o potencia de entrada al estabilizador. Cuando usamos la frecuencia como entrada, la elevada ganancia del lazo ocurre con un moderado debilitamiento del sistema "AC", el cual afortunadamente también tiene una fase de atraso. Luego "la condición de sintonía" para que la velocidad y potencia como entradas al estabilizador a plena carga y en un sistema de transmisión fuerte, pero moderado para la

entrada de señal de frecuencia en un sistema débil. El funcionamiento es diferente para la condición de sintonía para la velocidad y potencia como entradas al estabilizador. Luego la ganancia de la planta decrese como el sistema se debilita, cuando usamos velocidad o potencia la contribución del amortiguamiento para un sistema fuerte podría ser maximizado así de este modo se asegura el mejor funcionamiento con un sistema debilitado.

Un ejemplo será ilustrado para combinar el uso de la compensación de fase y técnicas de localización de raíces para reunir alrededor del objetivo de la velocidad como entrada al estabilizador.

El ejemplo es de una Turbina-Generador operando en un sistema fuerte, teniendo un total del 20% de reactancia externa, incluyendo un transformador con taps, esto representa la peor situación. Por causa del sistema fuerte y relativo a una alta inercia asociado con las unidades anticuadas. Entonces una alta respuesta inicial del sistema de excitación es asumido, con una ganancia transitoria de 20 p.u. E_{fd}/ε_t p.u (ε_t error total), la velocidad de entrada al estabilizador consiste de una etapa (washout) que evita desplazamientos del voltaje en estado estable según los cambios de frecuencia del sistema, con una etapa de doble estado de adelanto/atraso, y un filtro para atenuar las altas componentes de frecuencia:

$$PSS_{\omega}(s) = K_s \frac{(T_w s)(1 + T_1 s)(1 + T_3 s)}{(1 + T_v s)(1 + T_2 s)(1 + T_4 s)} FILT(s)$$

El filtro FILT(s) está representado con una ecuación característica en atraso con raíces complejas de $-17.5 \pm j 16$ rad/seg. esta representación provee un ángulo de atraso equivalente a una banda de filtro de rechazo para frecuencias torsionales sobre o alrededor de 3.5 Hz. Para amplificar la ilustración de los conceptos básicos, la constante de tiempo de la etapa que evita desplazamientos del voltaje en estado estable según los cambios de frecuencia del sistema (washout) es puesto para 10 seg., así este no tiene ningún impacto sobre el modo local, y el estado de adelanto/atraso son puestos idénticamente, cada uno tiene de 10:1 entendiéndose la constante de tiempo entre el adelanto/atraso. Un parámetro definido como la compensación de la frecuencia central por ejemplo:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{T_1T_2}} \quad \frac{\sqrt{10}}{2\pi T_1}$$

Es variado para presentar los impactos para diferentes ajustes a los estabilizadores.

3.3.4 Procedimiento de implementación del estabilizador

la implementación de un estabilizador en un sistema de potencia implica para ajustar las características de frecuencia y ganancia para producir el deseado amortiguamiento de las oscilaciones en el rango de 0.2 a 2.5 Hz. la función de transferencia de un estabilizador para un genérico sistema de potencia puede ser expresado

por la siguiente ecuación

$$Pss_{\omega}(s) = K_s \frac{(T_w s)(1 + T_1 s)(1 + T_3 s)}{(1 + T_w s)(1 + T_2 s)(1 + T_4 s)} FILT(s)$$

Donde:

K_s - Ganancia del estabilizador

$FILT(s)$ - Función de transferencia combinada de filtro para la frecuencia torsionales y señal de entrada desde el transductor.

Las características de frecuencia del estabilizador es ajustado variando la constante de tiempo T_w , T_1 , T_2 , T_3 y T_4 , para la cual se aprecia que la función de transferencia del estabilizador abarca los efectos de la señal de entrada del transductor y de un filtro requerido para atenuar la ganancia del estabilizador para las variaciones de las frecuencias torsionales de la Turbina-Generador, estos efectos dictado por otras consideraciones, puede ser considerado en adición a la "planta" para lo cual el estabilizador puede compensar.

Un estabilizador en un sistema de potencia puede no ser efectivamente aplicado si este no es sintonizado con un conocimiento previo de las características asociadas al sistema de potencia y a la función a ejecutar por el estabilizador. Un conocimiento de los modos de oscilación en el sistema de potencia para lo cual el estabilizador va proveer amortiguamiento en el rango de frecuencias sobre el cual el estabilizador puede operar, un simple modelo analítico, semejante a un solo generador conectado a una

barra infinita, puede ser usado para determinar la frecuencia local de oscilación, durante la planificación de estado de la nueva planta. Por esto, es también deseable establecer las condiciones de debilitamiento del sistema de potencia y asociado con la carga para condiciones de operación en estado estable como es esperado la adecuada aplicación del estabilizador en un sistema de potencia puede ser determinado bajo estas condiciones de operación.

Luego la limitación de ganancia en algunos estabilizadores, que tiene como señales de entrada, velocidad o potencia, ocurre para fuertes sistemas de transmisión, para lo cual es necesario establecer la credibilidad del sistema con una "condición de sintonía" para los estabilizadores. La experiencia sugiere designar para una satisfactoria operación una reactancia externa al sistema (X_e) en el rango del 20% al 80% sobre la unidad, relación que asegura un robusto funcionamiento.

Muchos estabilizadores en sistema de potencias tienen que ser sintonizados con la ayuda de un extenso estudio analítico que envuelve en detalle modelos del sistema de potencias incluyendo el generador, excitador, estabilizadores y de igual manera la Turbina-Generador-Dinámica torsional. Mientras semejantes estudios pueden ser evaluados para dar el mejor funcionamiento del estabilizador, un satisfactorio funcionamiento puede ser usualmente obtenido con menor esfuerzo siguiendo adecuadamente el apropiado procedimientos, dichos procedimientos son sugeridos después de un laborioso

estudio y por la experiencia en la implementación de estos conceptos en el campo.

Las mejores consideraciones prácticas asociadas con la aplicación de estabilizadores en sistema de frecuencia tienen que ser discutidos. Los procedimientos básicos para sintonizar un equipo estabilizador en el campo tienen que ser escritos basados en la experiencia en el campo y en el conocimiento de las ganancias desde el análisis de funcionamiento del estabilizador sobre un amplio rango de condiciones impuestas por el sistema. Los procedimientos consisten en:

- a) Poner la constante de tiempo para un rendimiento de tal forma que las características de compensación de fase especificado es para el mejor funcionamiento.
 - a.1) Máximizarse la frecuencia para el cual la compensación de fase en el atraso a través de 90° (de 3 a 3.5 Hz. para velocidad o potencia de entrada, 2 Hz para entrada de frecuencia)
 - a.2) Compensar la fase en atraso para la frecuencia en modo local entre 0° y 45° preferiblemente cerca de 20° .
- b) Poner la ganancia basado sobre una medición de la ganancia para el cual causa una inestabilidad en el lazo del estabilizador.

Varias técnicas tienen que ser discutidas, a través de un estabilizador en particular puede ser requerido solamente pocas aplicaciones de todas ellas. La utilización de las computadoras digitales basados en instrumentación

son introducidos manteniendo su potencial para realizar las tareas de los estabilizadores, con mínimas necesidades para estudios de sistemas para cada aplicación, la mejor consideración práctica asociado al diseño de un equipo estabilizador tiene que tener en cuenta por ejemplo minimización de interacciones torsionales, los efectos de ruido en un sistema de potencia, si se usa potencia como entrada al estabilizador, se debe de considerar las variaciones de potencia mecánica. Los esquemas de filtros torsional tienen que ser desarrollados por el instalador bajo las pruebas correspondiente asegurando un suficiente margen de protección para interacciones torsionales mientras a la vez tienen un mínimo desplazamiento de fase para bajas frecuencias así un buen estabilizador puede dar un acabado a través de una entrada de potencia a un estabilizador, es requerido menos filtro torsionales utilizando velocidad o frecuencia como entrada al estabilizador, semejante estabilizadores que requieren adicional circuitos para señales de entrada y compensar los efectos por variaciones de potencia mecánica. Esta es una dificultad para compensar perfectamente en las variaciones mecánicas e imperfectas compensaciones se introducen por el potencial de otros sistemas que interactúan. Esto debe de ser resuelto para asegurar las sucesivas aplicaciones de una entrada de potencia a un estabilizador.

El ruido sobre el sistema de potencia puede ser un efecto adverso sobre el funcionamiento del estabilizador. Algunos tipos de estabilizadores son más susceptibles al

problema de ruido que otros. Históricamente la entrada de frecuencia a un estabilizador usando la detección de cruce por cero para medir por frecuencia ha tenido un funcionamiento crítico con la presencia del ruido causado por largas intermitencias de cargas, semejantes a los arcos eléctricos.

No obstante un nuevo traductor de frecuencia desarrollado actualmente, el cual promete a reducir significativamente el problema del ruido sobre la medición de señal de frecuencia. Más, el filtro requerido para minimizar las interacciones torsionales también reducen significativamente los efectos de ruido en el sistema de potencia.

3.3.5 Interacción torsional

El potencial de la interacción entre el estabilizador del sistema de potencia y las variaciones de los modos vibracional que fue observado en una hidroeléctrica revela que puede ocurrir en los nuevos sistemas de excitación, porque estas tienen elevadas ganancias para altas frecuencias. Un estabilizador torsional se desestabiliza con elevadas relaciones de respuesta donde el sistema de excitación puede resultar dañada, particularmente para un generador con elevada carga donde el inherente amortiguamiento mecánico es pequeño aún si el daño no ocurre una inestabilidad puede causar la saturación de la salida del estabilizador causando la ineffectividad, y posiblemente causa la saturación del regulador de voltaje resultando en la pérdida de

sincronismo y la apertura de la unidad. Es urgente que los estabilizadores no deben inducir inestabilidades torsionales.

Para asegurar el resultado del estabilizador en no inducir oscilaciones torsionales, es necesario filtrar mediante un filtro de dos polos para una señal de velocidad de entrada, y de cuatro polos para una entrada de frecuencia. Los siguientes criterios básicos tienen que ser establecidos para diseñar los filtros.

- 1.- Asegurar que el cambio máximo posible sobre el amortiguamiento de cualquier modo torsional es menos que alguna fracción del propio amortiguamiento torsional.
- 2.- Minimizar la fase de atraso del filtro en el rango de 1 a 3 Hz para asegurar el logro de funcionamiento del sistema.

3.3.6 Efectos de las variaciones de la potencia mecánica

Las imperfectas compensaciones a las variaciones de potencia mecánica, como una entrada al estabilizador de potencia incluyendo las variaciones transitorias debido al filtro de la simulada señal de potencia mecánica, el cual resulta algunos transitorios de desplazamientos de voltaje durante los cambios rápidos de potencia mecánica, tres situaciones se toman en cuenta.

- 1.- Rápida respuesta del gobernador sobre la unidad para un repentino decaimiento de la frecuencia del sistema el cual causa un rápido incremento de la potencia de la unidad.

Este puede ocurrir, como el resultado de la pérdida de una unidad sobre el sistema o pérdida de enlaces en áreas cercanas. El estabilizador reacciona disminuyendo el voltaje el cual puede agravar la estabilidad del sistema.

2.- El cerrado violentamente de la válvula, por motivos de protección causado por una falla o por sobrevelocidad sobre la unidad probablemente causa la saturación del estabilizador. La rápida reducción de la potencia mecánica por el cerrado de válvula el cual hace elevar el voltaje de salida y puede causar excesivo voltaje sobre la oscilación. Cuando las válvulas se abren después y la carga empieza a elevarse, una reducción de voltaje puede ser impuesto sobre el sistema y con la elevación de la carga se puede agravar la estabilidad del sistema.

3.- Un potencial de interacciones existe entre el estabilizador de potencia y los controles del gobernador, con rápidas acciones del sistema gobernador.

En adición a estos efectos transitorios, imperfectas compensaciones en estado estable para potencias mecánicas puede causar desplazamientos en estado estable en la señal de entrada al estabilizador, el cual puede ser corregido utilizando una etapa que evita desplazamientos del voltaje en estado estable según los cambios de frecuencia del sistema (whasout stage) que se debe tener cuidado sobre las

interareas. Para este caso puede ser resuelto aplicando potencia como entrada al estabilizador.

3.3.7 Consideraciones de ruido

El contenido de ruido de las señales que ingresan al estabilizador pueden causar significativos problemas particularmente cuando las cargas están cercanas. Para estabilizadores con fase mínima que tiene una ganancia el cual se incrementa con la frecuencia, el ruido es amplificado considerablemente y puede causar la saturación del estabilizador. Sobre verdadero ruido este es causado principalmente por las cargas intermitentes sobre el sistema de potencia, el falso ruido es también causado por el muestreo de las señales por los transductores.

CAPITULO IV SIMULACION DEL SISTEMA

4.1 Verificación de las especificaciones de funcionamiento

De acuerdo a las especificaciones dadas en el capítulo 2, para lo cual analizaremos la respuesta en el tiempo del control regulador PID - generador, resueltas por el software CC.

Los resultados son los siguientes, para los distintos casos de operación, para $I_{po} = .1, .7, 1.3$ p.u respectivamente.

$$e1_t(t) := 1 - 1.717 \cdot 10^{-2} \cdot \sin(16.935 \cdot t + 0.676) \cdot \exp(-9.06 \cdot 10^{-2} \cdot t) - 1.030 \cdot \cos(0.552 \cdot t - 0.329) \cdot \exp(-0.56 \cdot t)$$

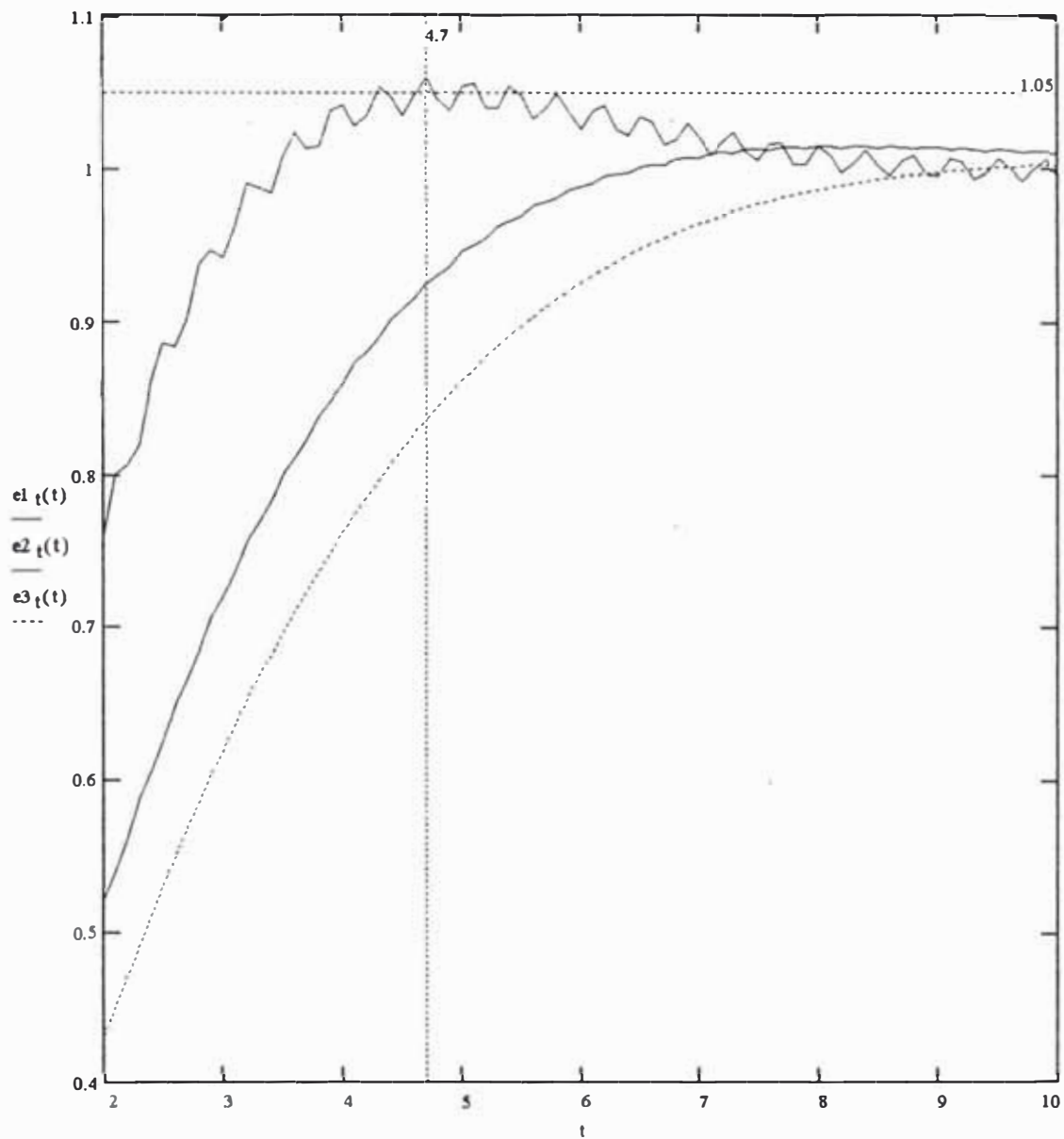
$$e2_t(t) := 1 - 3.89910 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(20.815 \cdot t + 0.775) \cdot \exp(-0.176 \cdot t) - 1.258 \cdot \cos(0.345 \cdot t - 0.665) \cdot \exp(-0.479 \cdot t)$$

$$e3_t(t) := 1 - 9.780 \cdot 10^{-5} \cdot \cos(22.402 \cdot t - 0.752) \cdot \exp(-0.205 \cdot 10^{-2} \cdot t) - 1.503 \cdot \sin(0.257 \cdot t + 0.720) \cdot \exp(-0.457 \cdot t)$$

$t := 2, 2.1 \dots 10$ período de evaluación

Nota: los gráficos están indicados por sus respectivas ecuaciones

Graficamos para evaluar el máximo sobreimpulso (SP)



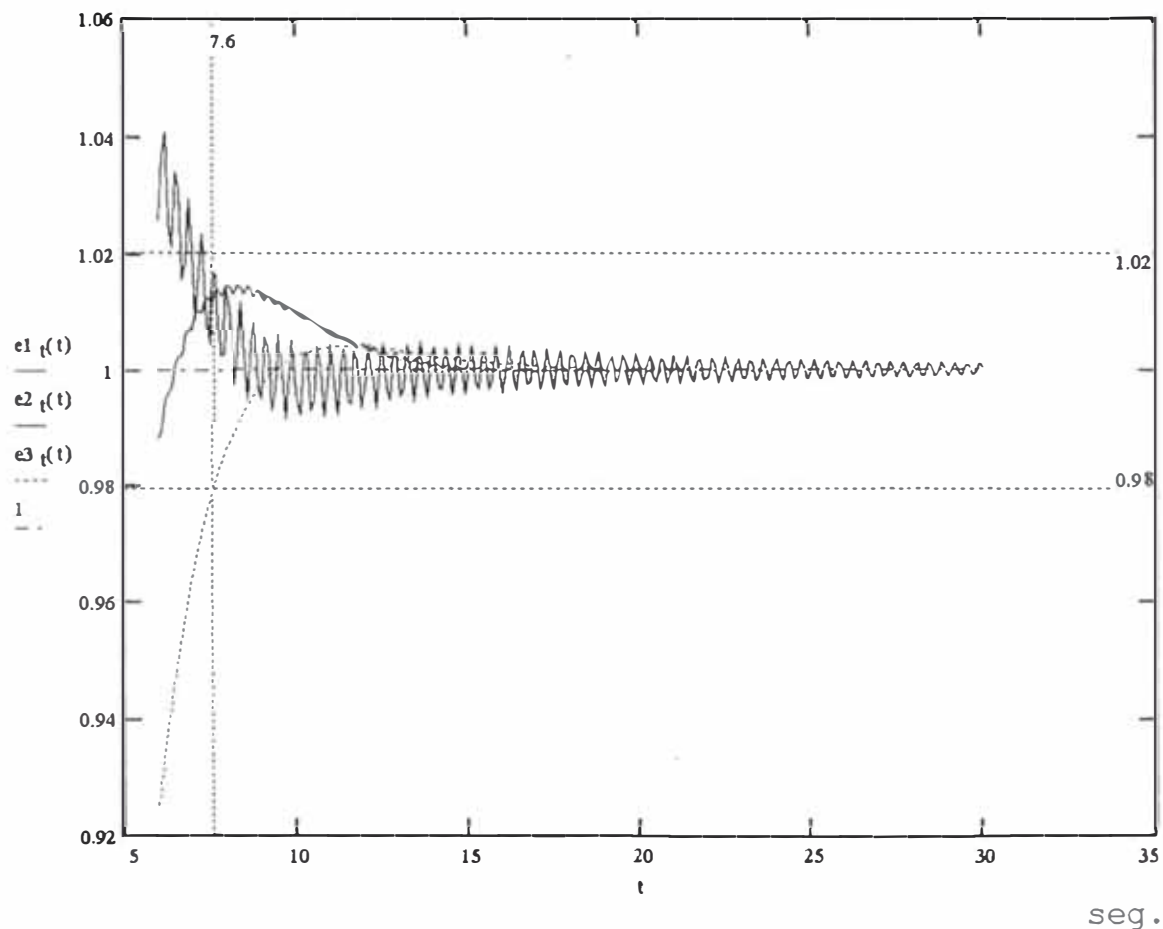
seg.

De la respuesta en el tiempo podemos extraer los datos como el sobreimpulso $SP = 0.05\%$, y también el tiempo de sobreimpulso $T_p = 4.7$ seg.

Luego la evaluación de tiempo de asentamiento T_s , el error debe de mantenerse dentro de los límites permisibles de las especificaciones dadas (2%).

$t = 6,61..30$ Periodo de evaluación

Gráfico para evaluar el tiempo de asentamiento T_S



Del gráfico podemos evaluar $T_S = 7.6$ seg.

Así podemos verificar ampliamente las especificaciones de funcionamiento y la respuesta correcta que ofrece la función de transferencia del regulador PID.

4.2 Cuadro de evaluación de las diferentes formas de control para distintos puntos de operación del generador, aplicando una señal escalón de e_{ref}

4.2.1 En lazo cerrado solamente el regulador PID

Para lo cual presentaremos la respuesta en el

dominio del tiempo del desarrollo del ajuste para la sintonización del regulador PID (opcionalmente puede variarse la ganancia proporcional), para lo cual fue suficiente variar la ganancia integral, el cual se adapta al tiempo de respuesta del generador en lazo abierto, suficiente para cumplir las especificaciones de funcionamiento (realizado para el peor caso).

La evaluación se realiza en la siguiente secuencia:

$$K_P=1.141 \quad T_D=0.047$$

$$G1_{PID} = \frac{6.102 \cdot (0.009 \cdot S^2 + 0.187 \cdot S + 1)}{S} \quad \text{Para:} \quad T_I=0.187$$

$$G2_{PID} = \frac{2.282 \cdot (0.0235 \cdot S^2 + 0.5 \cdot S + 1)}{S} \quad T_I=0.5$$

$$G3_{PID} = \frac{1.84 \cdot (0.0291 \cdot S^2 + 0.62 \cdot S + 1)}{S} \quad T_I=0.62$$

La transformación en el tiempo a una respuesta de una excitación tipo escalón.

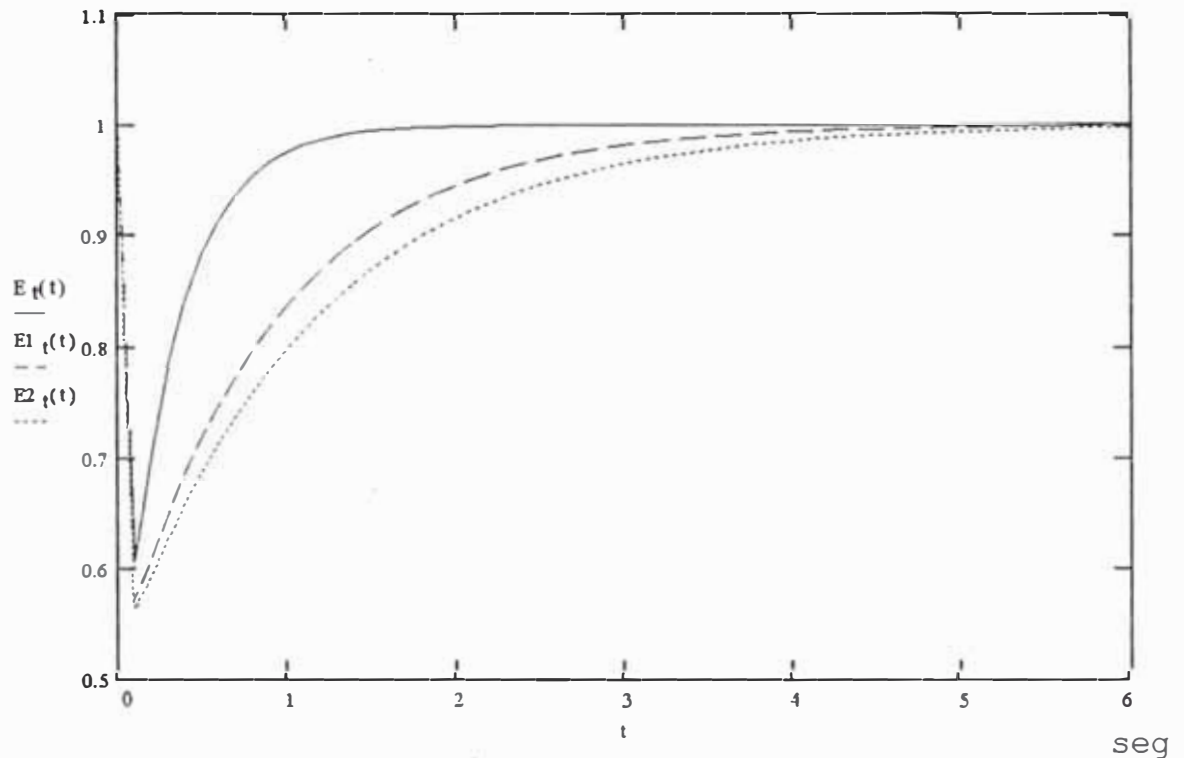
$$E_t(t) = 1 + 0.555 \cdot \exp(-35.89 \cdot t) - 0.555 \cdot \exp(-3.095 \cdot t)$$

$$E1_t(t) = 1 + 0.494 \cdot \exp(-38.82 \cdot t) - 0.49 \cdot \exp(-1.095 \cdot t)$$

$$E2_t(t) = 1 + 0.488 \cdot \exp(-39.102 \cdot t) - 0.488 \cdot \exp(-0.878 \cdot t)$$

Respuesta en el tiempo del regulador PID para distintos puntos de sintonización.

$t := 0, 1 \dots 6$



4.2.2 En lazo cerrado el Regulador PID - Generador

La respuesta en el tiempo para distintas condiciones de operación, con el mismo regulador sintonizado para la peor situación de operación del generador, se puede observar la influencia de la sensibilidad y la distorsión debido al desplazamiento del ángulo de la rueda polar.

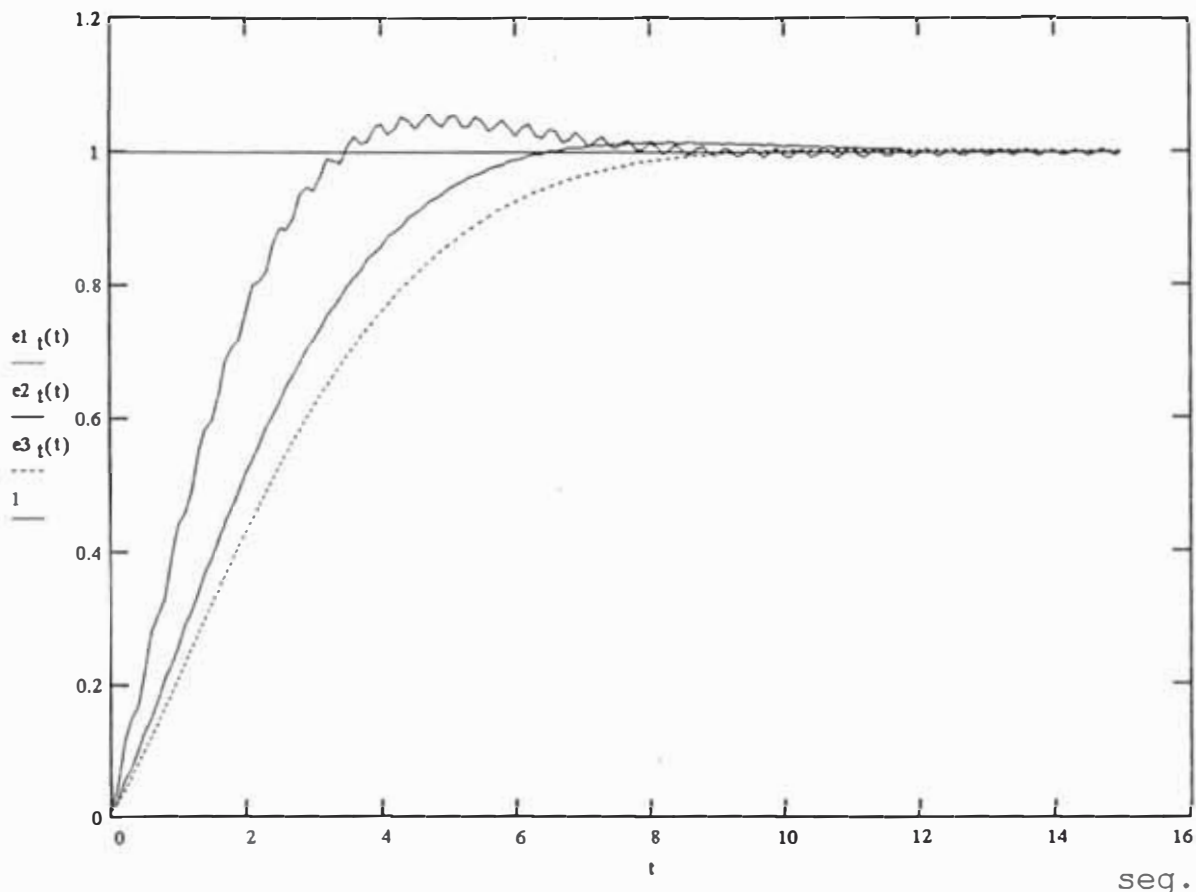
$$e2_t(t) := 1 - 3.89910 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(20.815 \cdot t + 0.775) \cdot \exp(-0.176 \cdot t) - 1.258 \cdot \cos(0.345 \cdot t - 0.665) \cdot \exp(-0.479 \cdot t)$$

$$e1_t(t) := 1 - 1.717 \cdot 10^{-2} \cdot \sin(16.935 \cdot t + 0.676) \cdot \exp(-9.06 \cdot 10^{-2} \cdot t) - 1.030 \cdot \cos(0.552 \cdot t - 0.329) \cdot \exp(-0.56 \cdot t)$$

$$e3_t(t) := 1 - 9.780 \cdot 10^{-5} \cdot \cos(22.402 \cdot t - 0.752) \cdot \exp(-0.205 \cdot 10^{-2} \cdot t) - 1.503 \cdot \sin(0.257 \cdot t + 0.720) \cdot \exp(-0.457 \cdot t)$$

Graficamos la respuesta en el tiempo del regulador PID y el generador en condiciones de $I_{p0} = .1, .7, 1.3$ p.u
 $I_{q0} = 0.2$ p.u

$t := 0..15$



4.2.3 Aplicación de la señal estabilizante al bloque Regulador

PID - Generador

Variables para la evaluación de Bode.

$m := 20$ $i := 0..m$ $max := 100$ $min := 1$

$$r := \ln\left(\frac{max}{min}\right) \quad S_i := min \cdot \exp\left(i \cdot \frac{r}{m}\right) \quad j := \sqrt{-1} \quad \Phi(\theta) = \text{angle}(\text{Re}(\theta), \text{Im}(\theta)) \cdot \frac{360}{2 \cdot \pi} - 360$$

Función de transferencia del generador para distintos puntos de operación.

$$G_1(S) := \frac{0.239 \cdot S^2 + 0.099 \cdot S + 121.07}{1.6 \cdot S^3 + 1.86 \cdot S^2 + 803.52 \cdot S + 602.26}$$

$$G_2(S) := \frac{0.22 \cdot S^2 + 0.09 \cdot S + 143.05}{1.6 \cdot S^3 + 1.86 \cdot S^2 + 691.9 \cdot S + 518.61}$$

$$G_3(S) := \frac{0.2 \cdot S^2 + 0.085 \cdot S + 155.6}{1.6 \cdot S^3 + 1.86 \cdot S^2 + 454.5 \cdot S + 340.5}$$

Función de transferencia del regulador PID.

$$G_{PID}(S) := \frac{1.84 \cdot (0.62 \cdot S + 1 + 0.0291 \cdot S^2)}{S}$$

Función de transferencia del compensador estabilizante.

$$P_{SSR}(S) := \frac{0.24 \cdot (1.4 \cdot S + 1) \cdot (0.6 \cdot S + 1)}{(0.1 \cdot S + 1) \cdot (0.12 \cdot S + 1) \cdot (0.1 \cdot S + 1)}$$

Función de transferencia de las características del generador, regulador PID, sistema de potencia.

$$K_2 := 1.93 \quad K_6 := 0.51$$

$$G_{EP}(S) := \frac{K_2 \cdot G_{PID}(S) \cdot G_3(S)}{K_6 \cdot 1 + G_{PID}(S) \cdot G_3(S)}$$

Función de transferencia del ángulo de la rueda polar en función del torque mecánico T_M , para condiciones con y sin señal estabilizante.

Para visualizar las mejoras por la aplicación de la señal estabilizante es necesario comprender los siguientes detalles:

- La señal estabilizante de velocidad es aplicada a un compensador, adecuado para realizar el atraso de fase dictado por el regulador, generador y el sistema eléctrico de tal forma que la variación de velocidad esté en fase con el torque eléctrico T_e .

- Para tal efecto la función de transferencia $D_{SS}(S)$.

$$D_{SS}(S) = P_{SS}(S) \cdot G_{EP}(S)$$

- Estará en paralelo con el coeficiente de amortiguamiento.
- Es necesario que $D_{ss}(S)$ cumpla con la compensación de fase y amortiguamiento adecuado para evitar oscilaciones y colocar un filtro adecuado el cual evita se ingresen ruidos de alta frecuencia mayor 10 Hz) que conseguirían desfasajes indeseables.
 - Se puede apreciar que el amortiguamiento total será siempre mayor que el amortiguamiento natural, logrando así la amortiguación deseada en los sistemas eléctricos de potencia.
 - Para la evaluación aplicaremos un torque mecánico T_M , para obtener la variación del ángulo de la rueda polar, siendo éste un índice de la aplicación de la señal estabilizante. (la derivada de ésta es la velocidad angular).
 - Para la simulación es necesario dar ajustes necesarios en la ganancia de amortiguamiento para lograr los valores deseados.

Amortiguamiento es causado por la realimentación de la velocidad.

Donde:

$$D_{ss}(S) := \frac{0.24 \cdot (1.4 \cdot S + 1) \cdot (0.6 \cdot S + 1)}{(0.1 \cdot S + 1) \cdot (0.12 \cdot S + 1) \cdot (0.1 \cdot S + 1)} \cdot \left(\frac{K_2 \cdot G_{PID}(S) \cdot G_3(S)}{K_6 \cdot 1 + G_{PID}(S) \cdot G_3(S)} \right)$$

Amortiguamiento del generador

$$D_a := 0.5 \text{ p.u}$$

Amortiguamiento total

$$D_t(S) := D_a + D_{ss}(S)$$

Nombraremos para cada condición de operación a D_{t1} , D_{t2} , D_{t3} , la única variable será la función de transferencia del generador.

$$D_{t3}(S) := 0.5 + \frac{0.24 \cdot (1.4 \cdot S + 1) \cdot (0.6 \cdot S + 1)}{(0.1 \cdot S + 1) \cdot (0.12 \cdot S + 1) \cdot (0.1 \cdot S + 1)} \left(\frac{K_2 \cdot G_{PID}(S) \cdot G_3(S)}{K_6 \cdot 1 + G_{PID}(S) \cdot G_3(S)} \right)$$

Este amortiguamiento compensado se reemplazara en la función de transferencia:

$$FT_{\text{ángulo}} = \frac{\Delta \delta}{\Delta T_M}$$

Las ecuaciones de la función de transferencia para el ángulo de la rueda polar sin señal estabilizante son:

$$G_{A1}(S) := \frac{377 \cdot (1.33 \cdot S + 1)}{1.6 \cdot S^3 + 1.86 \cdot S^2 + 803.52 \cdot S + 602.26} \quad \text{para } I_{po} = 0.1 \text{ p.u}$$

$$G_{A2}(S) := \frac{377 \cdot (1.33 \cdot S + 1)}{1.6 \cdot S^3 + 1.86 \cdot S^2 + 691.9 \cdot S + 518.61} \quad \text{para } I_{po} = 0.7 \text{ p.u}$$

$$G_{A3}(S) := \frac{377 \cdot (1.33 \cdot S + 1)}{1.6 \cdot S^3 + 1.86 \cdot S^2 + 454.5 \cdot S + 340.5} \quad \text{para } I_{po} = 1.3 \text{ p.u}$$

Las ecuaciones de la función de transferencia para el ángulo de la rueda polar con señal estabilizante son:

$$M := 0.5$$

$$G_{B1}(S) = \frac{377 \cdot (1.33 \cdot S + 1)}{1.6 \cdot S^3 + (M + D_t \cdot K_3 \cdot T_{do}) \cdot S^2 + [D_t + 377 \cdot (K_1 - K_2 \cdot K_3 \cdot K_4) \cdot K_3 \cdot T_{do}] \cdot S + 602.26}$$

Para mayor detalle ver capítulo 1.7.4, los valores de K_1, K_2, K_3, K_4 , para $I_{po} = 0.1$ p.u

$$G_{B1}(S) = \frac{377 \cdot (1.33 \cdot S + 1)}{1.6 \cdot S^3 + (1.2 + D_{t1} \cdot 0.33 \cdot 4) \cdot S^2 + (D_{t1} + 803) \cdot S + 602.26} \quad \text{para } I_{po} = 0.1 \text{ p.u}$$

$$G_{B2}(S) = \frac{377 \cdot (1.33 \cdot S + 1)}{1.6 \cdot S^3 + (1.2 + D_{t2} \cdot 0.33 \cdot 4) \cdot S^2 + (D_{t2} + 691.4) \cdot S + 518.61} \quad \text{para } I_{po} = 0.7 \text{ p.u}$$

$$G_{B3}(S) = \frac{377 \cdot (1.33 \cdot S + 1)}{1.6 \cdot S^3 + (1.2 + D_{t3} \cdot 0.33 \cdot 4) \cdot S^2 + (D_{t3} + 454) \cdot S + 340.5} \quad \text{para } I_{po} = 1.3 \text{ p.u}$$

La influencia determinante de la variable K_5 , tiene una importancia para la aplicación de la señal estabilizante por la siguientes razones:

- Si K_5 es positivo, es el caso donde el generador tiene desde baja a carga media carga, y una impedancia externa, el margen de estabilidad decrecera, asi como el torque de sincronización y el torque de amortiguamiento es en este caso es positivo.
- Si K_5 es negativo, para un caso de moderada a alta carga y una impedancia externa, la inestabilidad puede ocurrir debido al negativo amortiguamiento.

En nuestro caso, de acuerdo a los datos sugeridos en el capítulo 1, observamos que la K_5 es positivo en el caso $I_{po} = 0.1$. en el cual aplicaremos la señal

estabilizante para observar su amortiguamiento del ángulo de la rueda polar (para mayor comprensión evaluar $K_1 = \Delta T_s / \Delta \delta$).

$t := 0, 01 \dots 6$ periodo de evaluación

Sin señal estabilizante : G_{A1} a $\delta(t)$ en el tiempo

$$\delta(t) := 0.625 - 0.624 \cdot \cos(22.401 \cdot t - 9.29 \cdot 10^{-3}) \cdot \exp(-0.206 \cdot t) - 1.573 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-0.749 \cdot t)$$

Sin señal estabilizante : G_{B1} a $\delta_{SS}(t)$ en el tiempo

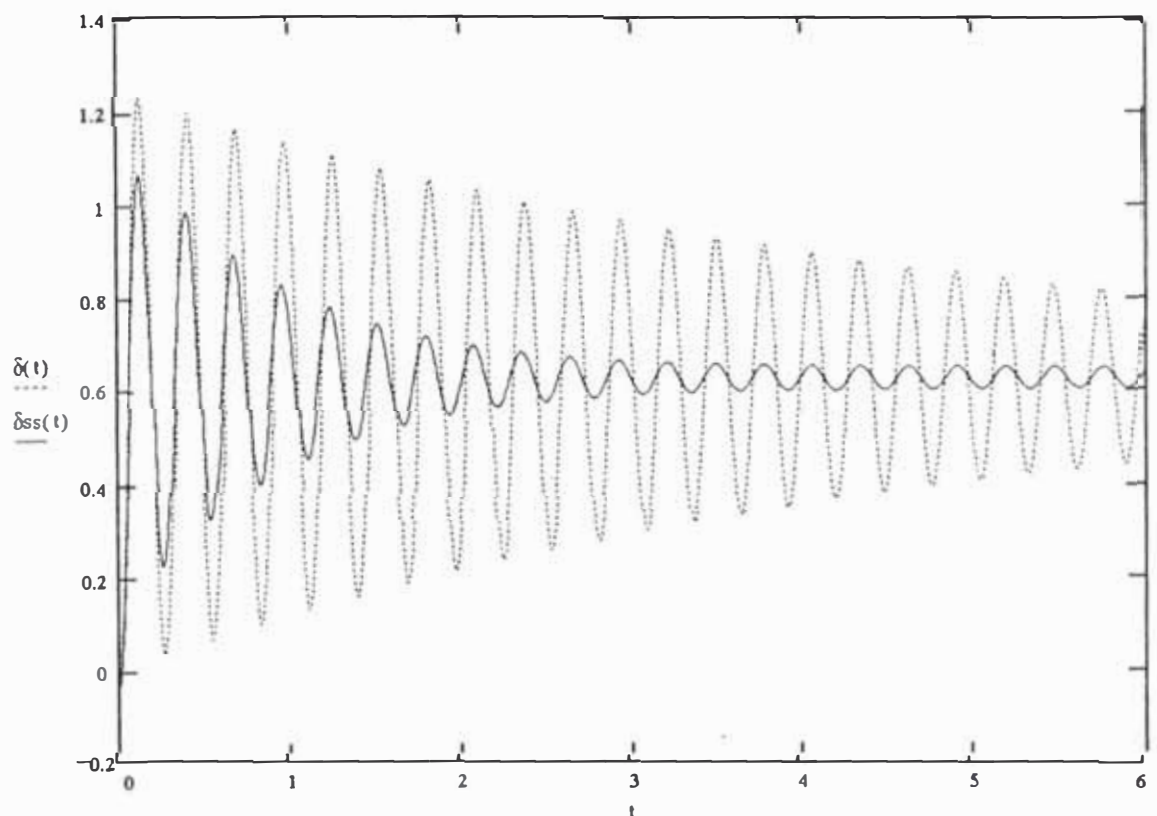
$$d1(t) := -5.510 \cdot 10^{-2} \cdot \sin(17.37 \cdot t - 0.526) \cdot \exp(-19.32 \cdot t) - 0.495 \cdot \cos(22.86 \cdot t - 1.47 \cdot 10^{-2}) \cdot \exp(-1.15 \cdot t)$$

$$d2(t) := 4.01 \cdot 10^{-2} \cdot \exp(-15.89) + 0.226 \cdot \sin(3.23 \cdot t - 0.743) \cdot \exp(-6.779 \cdot t)$$

$$d3(t) := 4.205 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(0.258 \cdot t - 0.225) \cdot \exp(-0.456 \cdot t) + 2.88 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-0.755 \cdot t)$$

$$\delta_{SS}(t) := 0.625 - 4.68 \cdot 10^{-2} \cdot \cos(22.35 \cdot t + 9.07 \cdot 10^{-3}) \cdot \exp(-0.12 \cdot t) + d1(t) + d2(t) + d3(t)$$

Graficamos el desplazamiento del ángulo de la rueda polar $\delta(t)$ vs. $\delta_{SS}(t)$ para $I_{po} = 0.1$ p.u.



seg.

Se observa la atenuación que realiza la señal estabilizante por medio de los bloques, la ganancia puede ser variada obteniendo excelentes resultados, se aclara que la señal es limitada a valores específicos para evitar transiciones indebidas de la excitación dictadas en el capítulo 3.

CONCLUSIONES

- 1.- El análisis llevado a cabo mediante el modelamiento matemático del generador síncrono, nos acerca al conocimiento anticipado de su comportamiento, se puede apreciar, de este modo, la ventaja de la utilización de las simulaciones, en la cual debemos ser lo más práctico posible ante las complejas ecuaciones matemáticas que gobiernan el comportamiento de la planta en general, debemos tener los criterios necesarios, para tomar decisiones correctas y así evitar complicaciones en su desarrollo.

- 2.- La utilización del modelo matemático de generador es para someter pequeñas perturbaciones, sin embargo, se aplicó perturbaciones grandes con la finalidad de observar el comportamiento del modelo.
Particularmente para la aplicación del modelo se debe primero fijar la condición de operación y luego aplicar la pequeña perturbación.

- 3.- Actualmente los controladores de procesos tienen herramientas para desarrollar reguladores PID, el cual es necesario calibrar adecuadamente para optimizar la operación del proceso o la planta, el cual es

desarrollado por el proceso de sintonización de los parámetros del regulador este requiere del desarrollo matemático de la planta o por realizar los procedimientos de evaluación de la planta mediante señales perturbadoras (en algunos casos puede ser un procedimiento crítico), por esta razón la aplicación de modelos matemáticos simplificados puede ser una alternativa favorable.

- 4.- La aplicación de las señales estabilizantes en un sistema de potencia, aplicada a los reguladores de voltaje de los generadores tiene una importante contribución en la estabilidad del sistema eléctrico, el conocimiento de estas señales y su aplicación correcta y los criterios adecuados serán de gran ayuda para mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico.
- 5.- La utilización de la ecuación simplificada de la función de transferencia e_t/E_{fd} del generador, por autores que estudiaron los temas de simulación de Reguladores de Voltaje Señal estabilizante, en sistemas de potencia, se comprobó, por medio de una evaluación en el diagrama de Bode en magnitud y fase realizado en el capítulo I.
- 6.- La utilización de la señal estabilizante es aplicable dentro de los límites de estabilidad de la máquina por cuanto esta señal debe pasar por un bloque limitador.

Su operación en el control del generador se aplica de acuerdo al consumo de potencia por ejemplo 20% más de la potencia nominal.

- 7.- La bobina de amortiguamiento de la máquina generalmente realiza una importante contribución al amortiguamiento para altas frecuencias, sin embargo, para bajas frecuencias su contribución es pequeña.

- 8.- Los gobernadores de velocidad no son generalmente efectivos para altas frecuencias de oscilación, sin embargo, para bajas frecuencias pueden tener influencia, el cual pocas veces es negativo en el caso de hidroturbinas, no obstante si con apropiados requerimientos en gobernadores de turbinas térmicas, se puede esperar algunos efectos positivos de parte de éstos. La repercusión negativa de los gobernadores puede tener efectos distintos el cual dependen de la fase en atraso de las partes lineales del gobernador para la frecuencia de oscilación. Estos efectos normalmente no aparecen fuertemente para altas frecuencias.

- 9.- Los efectos de la bobina de campo sobre el amortiguamiento puede ser fuertemente reducido por efectos del regulador de voltaje, para altas frecuencias el lazo de control de voltaje pocas veces es considerado abierto, y se puede esperar algunos

efectos positivos de amortiguamiento originado por la bobina de de campo.

10.- El siguiente trabajo nos permite hacer una serie de simulaciones de las distintas señales internas del generador el cual nos provee información para tener un criterio de las magnitudes y variaciones de estas con la cual se trabajarán en las calibraciones del regulador de voltaje.

11.- Se puede apreciar que la variación de E_{fd} causa una pequeña variación de la velocidad angular ω del generador, el cual es utilizada para controlar ω , ayudando así al gobernador de velocidad. Esta particularidad se tiene consideración en la limitación de la señal estabilizante para la realimentación.

BIBLIOGRAFIA

- 1- IEEE Trans. Power App Syst. April/1969
Conceptos de estabilidad de máquinas Sincrónicas por efectos del control de excitación. / Francisco P. Demello - Charles Concordia
- 2- IEEE Trans. Power App Syst. Set./Oct./1973
Estabilidad dinámica de un Sistema - Parte I - Investigación de los efectos para diferentes cargas sistemas de excitación. / Mohamed K. El-Sherbiny - Dinesh M. Mehta
- 3- IEEE Trans. Power App Syst. June/1968
Control de la excitación para mejorar la estabilidad de Sistemas de Potencias / Ferber R. Schleif - Harvey D. Hunkis - Glenn E. Martin - Ellis E. Hattan.
- 4- IEEE Trans. Power App Syst. Set./Oct./1971
Estabilizadores de Sistemas de Potencia: Evaluación en el campo y simulación digital / A.D. Gerhart - T. Hillesland - J. F. Luini - M. L. Rockfield.
- 5- IEEE Trans. Power App Syst. June/Feb./1973
Experiencia con señales de amortiguamiento suplementarias para generadores con sistemas de excitación estática. / Wilfred Watson - Gerald Monchur.
- 6- IEEE Trans. Power App Syst. June/Feb./1973
Señales estabilizantes para excitadores estáticos sobre grandes generadores - Problemas mecánicos / Wilfred Watson - Murray E. Coultres.
- 7- IEEE Trans. Power App Syst. 1982

Autosintonía de los controladores de excitación para generadores / Daozhi Xia - G.T. Heyelt

- 8- IEEE Trans. Power App Syst. june/1981
Aplicación de señales estabilizantes I,II,III
E.V. Larsen / D.A. Swann
- 9- Análisis de Factores que afectan el Amortiguamiento de las Oscilaciones para bajas Frecuencias en un Sistema Multimáquinas.(E.N.E.L) Italy.
V.Arcidiacono,E.Ferrari,Marconato,F.Saccomanno.
- 10- IEEE Guía: Procedimientos para evaluar una máquina sincrónica.
Sponsor Rotaring Machinery Committe of the IEEE Power 1983 Engineering Society.
- 11- Sistemas automáticos de control / Richard C. Dorf
- 12- Ingeniería de control moderna / Katsuhiko Ogata
- 13- Control automático de procesos / Carlos A. Smith, Armando B. Corripio.
- 14- Cálculo numérico y gráfico / Manuel Sadosky
- 15- Máquinas Eléctricas / George Thaler
- 16- Normas CEI