



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**INSTALACIÓN, PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE
REGULADORES AUTOMÁTICOS DE VOLTAJE EN LOS
GENERADORES SÍNCRONOS DE LA CENTRAL
HIDROELÉCTRICA CHIXOY**

David Alejandro Lira Sosa

Asesorado por el Ing. Luis Estuardo Molina Medina

Guatemala, febrero de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**INSTALACIÓN, PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE REGULADORES
AUTOMÁTICOS DE VOLTAJE EN LOS GENERADORES SÍNCRONOS DE
LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHIXOY**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

DAVID ALEJANDRO LIRA SOSA

ASESORADO POR EL ING. LUIS ESTUARDO MOLINA MEDINA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier González López
EXAMINADOR	Ing. Carlos Fernando Rodas
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

INSTALACIÓN, PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE REGULADORES AUTOMÁTICOS DE VOLTAJE EN LOS GENERADORES SÍNCRONOS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHIXOY,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 12 de agosto de 2008.



David Alejandro Lira Sosa

Guatemala, Diciembre 2008

Universidad de San Carlos de Guatemala

De conformidad con la designación que se me hiciera, he realizado la asesoría del ejercicio profesional supervisado titulado: **INSTALACIÓN, PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE REGULADORES AUTOMÁTICOS DE VOLTAJE EN LOS GENERADORES SÍNCRONOS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHIXOY**, por parte del estudiante universitario David Alejandro Lira Sosa con carné #200011466 previo a optar al título de Ingeniero Electricista.

Después de revisar el contenido y verificar la consistencia de lo temas expuestos, recomiendo la aprobación del presente trabajo de graduación.

Atentamente,

E. mol

Luis Estuardo Molina
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 2883

Luis Estuardo Molina M.
INGENIERO ELECTRICISTA
Colegiado No. 2883



Guatemala, 23 de enero de 2009.
Ref.EPS.DOC.68.01.09.

Inga. Norma Ileana Sarmiento Zeceña de Serrano
Directora Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimada Ingeniera Sarmiento Zeceña.

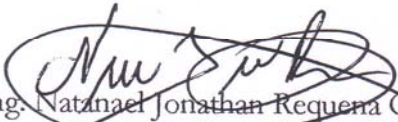
Por este medio atentamente le informo que como Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **DAVID ALEJANDRO LIRA SOSA** de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, con carné No. **200011466**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **“INSTALACIÓN, PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE REGULADORES AUTOMÁTICOS DE VOLTAJE EN LOS GENERADORES SÍNCRONOS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHIXOY”**.

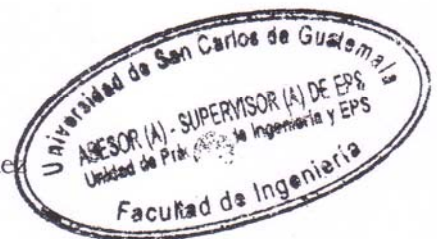
En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Ing. Natanael Jonathan Requena Gómez
Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Eléctrica



c.c. Archivo
NJRG/ra



Guatemala, 23 de enero de 2009.
Ref.EPS.DOC.43.01.09.

Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Director Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Escobedo.

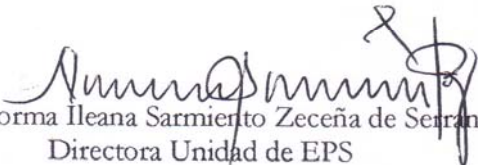
Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"INSTALACIÓN, PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE REGULADORES AUTOMÁTICOS DE VOLTAJE EN LOS GENERADORES SÍNCRONOS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHIXOY"** que fue desarrollado por el estudiante universitario, **DAVID ALEJANDRO LIRA SOSA**, quien fue debidamente asesorado por el Ing. Luis Estuardo Molina y supervisado por el Ing. Natanael Jonathan Requena Gómez.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor y del Supervisor de EPS, en mi calidad de Directora apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Inga. Norma Ileana Sarmiento Zeceña de Serrano
Directora Unidad de EPS

NISZ/ra





REF. EIME 03.2009.
Guatemala, 29 de ENERO 2009.

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

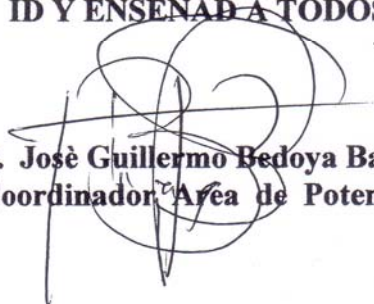
Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: INSTALACIÓN, PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE REGULADORES AUTOMÁTICOS DE VOLTAJE EN LOS GENERADORES SÍNCRONOS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHIXOY, del estudiante; David Alejandro Lira Sosa, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



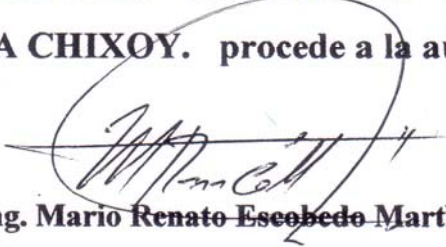
Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
Coordinador Área de Potencia

JGBB/sro



REF. EIME 04.2009.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; David Alejandro Lira Sosa, titulado: INSTALACIÓN, PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE REGULADORES AUTOMÁTICOS DE VOLTAJE EN LOS GENERADORES SÍNCRONOS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHIXOY. procede a la autorización del mismo.


Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
DIRECTOR



GUATEMALA, 03 DE FEBRERO 2,009.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **INSTALACIÓN, PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE REGULADORES AUTOMÁTICOS DE VOLTAJE EN LOS GENERADORES SÍNCRONOS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHIXOY**, presentado por el estudiante universitario **David Alejandro Lira Sosa**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A large, stylized handwritten signature in black ink, consisting of a large loop and a vertical stroke.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, febrero de 2009



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

DIOS	Por estar siempre allí.
MI PADRE	Edgar David Lira Saavedra, por ser mi ejemplo a seguir, y llevarme hasta donde estoy el día de hoy. Muchas gracias papá.
MI MADRE	Iracema Arellis Sosa Carpio, por tu paciencia, preocupación y comprensión a mi vida.
MIS HERMANOS	Luis Alberto, Edgar Renato, José Estuardo, por compartir su vida conmigo. Los quiero mucho.
MI FAMILIA	Por el cariño brindado y los años que me han visto crecer.
MIS COMPAÑEROS	Por las jornadas de estudio y diversión que juntos pasamos.
TODA PERSONA	Que a través de unas palabras, siempre dejan un mensaje de vida para afrontar los retos desconocidos.
MI GUATEMALA	Demostrando ser un país rico en bondad, belleza natural y creadora de pensamientos fuertes de lucha.

AGRADECIMIENTOS A:

DIOS “Yo soy quien te manda que tengas valor y firmeza. No tengas miedo ni te desanimes porque yo, tu Señor y Dios, estaré contigo dondequiera que vayas.” Josué 1:9.

USAC Por permitir preparación profesional de manera generosa y guiar por el camino de la rectitud y responsabilidad.

LA FACULTAD DE INGENIERÍA Por la formación de carácter y perseverancia que día a día exige para lograr los objetivos de estudio con esfuerzo.

**SEPAC, S.A. DE C.V
MAQUELI, S.A.** Por darme la oportunidad de poner a prueba mis capacidades aprendidas como estudiante a través del trabajo y por el traslado de conocimiento brindado por mis amigos e instructores: Leonardo Osorio, Arturo Bermúdez, Francisco Godínez, Esteban Godínez y mis compañeros de aventura en la realización del proyecto. *No cualquiera te perdona.*

MI ASESOR Luis Estuardo Molina, excepcional persona con cualidades y aptitudes más allá de lo que la vida real puede dar.

MIS PRIMOS Ángel Diego y Maggie, por ser mis mejores amigos.

LILIANITA Por tu ternura, dulzura y amor entregado a mi persona. “ ¡Qué lindas son tus mejillas entre los pendientes! Tus labios son rojos como hilos de escarlata, y encantadoras tus palabras. ¡Tú eres hermosa, amor mío; hermosa de pies a cabeza!” Cantares 1:10; 4:3.

QUIEN ME HALLA ROBADO Y REGALADO UNA SONRISA Y COMPARTIR CONMIGO UN MOMENTO GRATO DE AMISTAD

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
GLOSARIO.....	XV
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXV
1. SISTEMAS DE EXCITACIÓN ESTÁTICOS.....	1
1.1. Elementos importantes.....	2
1.2. Requerimientos de los sistemas de control automático.....	3
1.3. Puente de tiristores.....	4
1.3.1. Tiristor.....	4
1.3.2. Configuración en paralelo.....	7
1.3.2.1. Operación como rectificador y como inversor.....	10
1.4. Curva de capacidad.....	14
1.5. Regulador de voltaje.....	16
1.5.1. Respuesta al escalón.....	17
1.6. Tipo MEC-3400-W Mitsubishi Electric Corporation	19
1.6.1. Ventajas y operación.....	20
1.6.1.1. Limitador de excitación mínima.....	23
1.6.1.2. Limitador de excitación máxima.....	23
1.6.2. Interruptor magnético del circuito.....	24
1.6.3. Arreglo de tiristores.....	24

2. REGULADOR AUTOMÁTICO DE VOLTAJE 1111 2P 550K/220....27

2.1. Descripción funcional del sistema.....	29
2.1.1. Canal automático.....	31
2.1.1.1. Potenciómetro de referencia (90D).....	33
2.1.1.2. Amplificador de error de voltaje.....	35
2.1.1.3. Módulos mezcladores (mínimo y máximo).....	36
2.1.1.4. Filtro P.I. para el canal automático.....	36
2.1.1.5. Limitador de corriente de campo instantáneo.....	37
2.1.1.6. Amplificador de error de corriente.....	37
2.1.1.7. Seguidor automático.....	37
2.1.1.8. Detectores de límites.....	39
2.1.1.9. Función escalón.....	39
2.1.1.10. Desexcitación rápida.....	40
2.1.1.11. Compensador de corriente reactiva.....	40
2.1.1.12. Estabilizador del sistema de potencia (PSS).....	41
2.1.1.13. Limitador de Volt/Hertz.....	47
2.1.1.14. Limitador de mínima excitación (MEL).....	49
2.1.1.15. Limitador de máxima excitación (OEL).....	52
2.1.1.16. Limitador de corriente del estator.....	53
2.1.1.17. Limitador de sobre Voltaje de Campo (MXL).....	53
2.1.1.18. Generador de pulsos de disparo.....	54
2.1.1.19. Generador de paro final.....	55
2.1.1.20. Inversor.....	55
2.1.1.21. Corrección contra desbalance de fases.....	56
2.1.2. Canal manual.....	56
2.1.2.1. Potenciómetro de referencia (70D).....	59
2.1.2.2. Retroalimentación de corriente.....	61
2.1.2.3. Amplificador de error de corriente.....	61
2.1.2.4. Filtro P.I.....	62
2.1.2.5. Limitador instantáneo de voltaje de campo.....	62
2.1.2.6. Amplificador de voltaje de excitación.....	62

2.1.2.7.	Seguidor automático.....	63
2.1.3.	Esquemas de pulsos de disparo.....	63
2.1.3.1.	Amplificador de pulsos (Booster).....	64
2.1.3.2.	Ráfaga de pulsos.....	65
2.1.4.	Fuentes de alimentación.....	66
2.1.5.	Circuitos de protección.....	67
2.1.5.1.	Circuito supresor RC en las líneas principales de c.a...67	
2.1.5.2.	Circuito supresor Clipper.....	68
2.1.5.3.	Circuitos supresores de corriente directa.....	68
2.1.5.4.	Circuito de faseo de la electrónica.....	71
2.1.5.5.	Sensitivo de voltaje en los buses de c.a.....	72
2.1.5.6.	Protección sobre corriente de excitación.....	72
2.1.5.7.	Protección por pérdida de retroalimentación.....	73
2.1.5.8.	Protección sobre voltaje de campo (OXP).....	73
2.1.5.9.	Protección contra rotación incorrecta de fases.....	74
2.1.6.	Circuitos de medición y retroalimentación.....	74
2.1.6.1.	Transductor de Volt/Hertz.....	75
2.1.6.2.	Transductor de Watt/VAR.....	76
2.1.6.3.	Transductor de voltaje.....	77
2.1.6.4.	Transductor de corriente.....	77
2.1.6.5.	Transductor de señal de voltaje y corriente de excitación.....	78
2.1.7.	Facilidades de comunicación.....	78
2.1.7.1.	Descripción funcional de navegación en la IHM interfaz de operación del control digital para reguladores de voltaje y sistemas de excitación.....	81
2.2.	Filosofía de la secuencia operativa.....	85
2.2.1.	Operación normal.....	85
2.2.2.	Secuencia de transferencia y alarmas.....	87
2.2.2.1.	Transferencia a manual por pérdida de TP.....	88
2.2.2.2.	Transferencia por falla del PLC del canal automático...88	

2.2.2.3.	Transferencia por pérdida de pulsos en el canal automático.....	88
2.2.2.4.	Alarmas.....	89
2.2.3.	Disparos.....	90
2.2.3.1.	Sobre corriente de excitación.....	90
2.2.3.2.	Sobre voltaje de excitación.....	90
2.2.3.3.	Tiempo largo de excitación.....	91
2.2.3.4.	Problemas en el transformador de excitación.....	91
2.2.3.5.	Problemas en amplificador de pulsos.....	91
2.2.3.6.	Transferencia a canal manual bajo falla.....	92
2.2.3.7.	Disparo externo 86G.....	92
2.2.4.	Relevadores de interposición.....	93
3.	INSTALACIÓN DE RAV 1111 2P 550K/220.....	95
3.1.	Instalación y montaje.....	95
3.2.	Conexiones.....	100
4.	PRUEBAS AL RAV 1111 2P 550K/220.....	105
4.1.	Pruebas pre-operativas.....	105
4.1.1.	Conexiones de campo.....	105
4.1.2.	Revisión fuente de alimentación (energización de la electrónica).....	105
4.1.3.	Verificación de voltaje de alimentación alumbrado.....	106
4.1.4.	Revisión de los mandos del panel local.....	106
4.1.5.	Revisión de los mandos del panel remoto.....	106
4.1.6.	Prueba de verificación de entradas digitales.....	107
4.1.7.	Prueba de verificación de salidas digitales.....	108
4.1.8.	Prueba de simulación de TP y TC.....	110
4.1.8.1.	Verificación del transductor de voltaje.....	110
4.1.8.2.	Verificación del transductor Volt/Hertz.....	110

4.1.8.3.	Verificación del transductor Watt/VAR.....	111
4.1.9.	Prueba de aisladores de señal de corriente de excitación.....	112
4.1.10.	Calibración de los medidores de corriente de puente.....	112
5.	PUESTA EN SERVICIO DE REGULADOR AUTOMÁTICO DE VOLTAJE 1111 2P 550K/220.....	115
5.1.	Prueba de alto voltaje.....	115
5.1.1.	Verificación del aislador de señal para voltaje de excitación.....	116
5.1.2.	Verificación de voltajes del circuito supresor Clipper.....	117
5.1.3.	Relación de transformadores.....	117
5.1.4.	Prueba de amplificador de pulsos.....	118
5.1.5.	Prueba circuito supresor RC de corriente alterna.....	118
5.1.6.	Prueba de ráfaga de pulsos.....	118
5.2.	Pruebas en vacío.....	119
5.2.1.	Excitación.....	120
5.2.2.	Desexcitación.....	122
5.2.3.	Escalón.....	124
5.2.4.	Rango.....	126
5.2.5.	Prueba al limitador Volt/Hertz.....	128
5.2.6.	Transferencias.....	129
5.3.	Pruebas con carga.....	129
	CONCLUSIONES.....	135
	RECOMENDACIONES.....	137
	BIBLIOGRAFÍA.....	139
	ANEXOS Y/O APÉNDICES.....	141

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

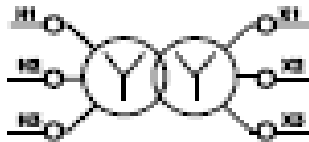
1	Sistema de excitación con tiristores	2
2	Símbolo de tiristor estructura interna	4
3	Curva característica del tiristor	6
4	Ángulo de bloqueo y conducción de un tiristor	7
5	Convertidor trifásico con seis SCR	8
6	Accionamiento de tiristores	11
7	Ángulo de accionamiento 90 grados	12
8	Voltaje promedio negativo	12
9	Curva de capacidad de un turbogenerador	15
10	Respuesta voltaje-tiempo	18
11	Sistema de excitación MEC-3400-W	19
12	Placa característica del sistema de excitación MEC-3400-W	20
13	Diagrama funcional de operación RAV 1111	29
14	Redundancia	31
15	Diagrama a bloques canal automático	33
16	Diagrama a bloques del seguidor automático	38
17	Respuesta PSS a lazo abierto	43
18	Lazo de control del estabilizador de potencia	46
19	Respuesta del PSS	47
20	Diagrama a bloques canal manual	57
21	Salida c.d. del puente de tiristores	70
22	Circuitos supresores de corriente directa	71
23	IHM	81
24	Mediciones UCEP	83
25	Desmontaje de AVR MEC-3400-W	95
26	Transportación para almacenamiento AVR MEC-3400-W	96

27	Espacio disponible para montaje de RAV 1111	96
28	Levantamiento de RAV 1111 2P 550K/220	97
29	Ubicación de RAV 1111 2P 550K/220	98
30	RAV 1111 2P 550K/220 listo para acoplamiento al generador síncrono	99
31	Rack UCEP y rack UCER conexiones de control	103
32	Conexión corriente alterna trifásica transformador de excitación-RAV y conexión de salida de corriente directa RAV-generador síncrono	104
33	Esquema simplificado para prueba de alto voltaje	115
34	Ráfaga de pulsos con valor de 300.1 VCD	119
35	Diagrama de flujo de secuencia de excitación	120
36	Excitación canal automático	121
37	Excitación canal manual	121
38	Diagrama de flujo de secuencia de desexcitación	122
39	Desexcitación canal automático	123
40	Desexcitación canal manual	123
41	Escalón positivo 10%	124
42	Escalón positivo 5%	125
43	Rango 90D	126
44	Rango 70D	127
45	Curva de saturación del generador síncrono	128
46	MEL	130
47	OEL	132
48	Escalón de reactivos sin PSS	133
49	Escalón de reactivos con PSS	134
50	Diagrama a bloques función de transferencia sistema de excitación marca SEPAC para la C.H. Chixoy	141
51	Diagrama general función de transferencia del PSS	143
52	Curva de capacidad de generador síncrono de C.H. Chixoy	144
53	Convertidor puente	145
54	Cinco RAV 1111 2P 550K/220 funcionando en la C.H. Chixoy	146

TABLAS

I	Verificación conexiones de campo	105
II	Verificación FU-AVR-D	105
III	Verificación voltaje de alumbrado	106
IV	Verificación panel local	106
V	Verificación mandos remotos	106
VI	Verificación entradas digitales PLC GE FANUC	107
VII	Verificación salidas digitales PLC GE FANUC	108
VIII	Verificación TV	110
IX	Verificación transductor V/Hz	110
X	Verificación transductor Watt/VAR	111
XI	Verificación aislador de señal de corriente de excitación	112
XII	Verificación señal TDIP- Ampérmetro	113
XIII	Verificación aislador de señal para voltaje de excitación	117
XIV	Voltajes circuito Clipper	117
XV	Verificación de transformadores para uso del RAV	117
XVI	Voltajes de prueba booster	118
XVII	Voltajes de circuito supresor de c.a.	118
XVIII	Rango 90D	126
XIX	Rango 70D	127
XX	Prueba al limitador Volt/Hertz	128
XXI	Prueba de transferencia auto-manual-auto	129
XXII	Transferencia UCEP-UCER-UCEP	129
XXIII	MEL	130
XXIV	OEL	131

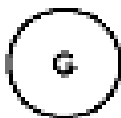
LISTA DE SÍMBOLOS



Transformador trifásico conexión estrella-estrella



Transformador Monofásico



Generador Eléctrico



Fusible



TP (Transformador de Potencial)



Ventilador



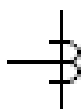
Tiristor



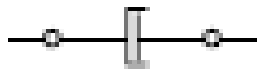
Resistencia No Lineal (Varistor)



Shunt para medición de corriente



TC (Transformador de Corriente)



Capacitor tipo polarizado



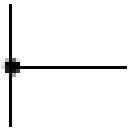
Capacitor



Diodo



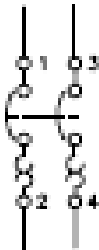
Resistencia



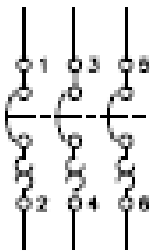
Nodo de conexión



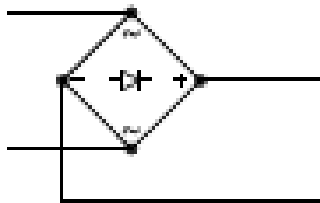
Bobina



Interruptor termomagnético dos polos



Interruptor termomagnético tres polos



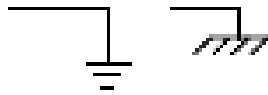
Puente Rectificador



Contacto NA Normalmente abierto



Contacto NC Normalmente cerrado



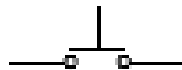
Conexión a tierra



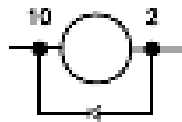
Selector tipo interruptor



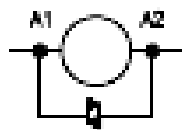
Medidor Analógico



Pulsador



Relevador



Contactador

GLOSARIO

Arranque suave

Rampa gradual de excitación durante el arranque.

Circuito de transferencia

Bumpless

Es un algoritmo automático de seguimiento (*autotracking*) que observa y reajusta continuamente las señales de demanda de ángulo de disparo de los tiristores de todos los controladores y de todos los modos de operación. Consecuentemente, una transferencia *bumpless* se puede alcanzar entre cualquier regulador.

Conmutación forzada por auto-conmutación

Circuitos que desceban al SCR automáticamente tras un tiempo predeterminado desde la aplicación del impulso de disparo.

Controlador VAR

Si el sistema interconectado es considerado como un bus infinito comparado con la capacidad del generador, el sistema de excitación podrá producir una desexcitación o sobreexcitación del generador en caso de incremento o disminución de voltaje en el bus del generador.

Convertidor trifásico de potencia

Convertidor de corriente alterna trifásica a corriente directa.

Crow Bar

En caso de sobre-voltaje en terminales CD del convertidor de potencia con polaridad positiva o negativa, un par de tiristores conectarán el rotor a un resistor no-lineal de descarga, eliminando el efecto de transientes y sobre-voltajes, actuando como un supresor de transitorios. Limita el voltaje inducido por debajo del nivel destructivo del sistema de excitación y del campo del generador.

Error de seguimiento

Diferencia entre el valor deseado de entrada y la salida real.

Estabilizador del sistema de potencia

En sistemas interconectados, es necesario corregir cualquier tendencia del rotor del generador a oscilar en frecuencias subsíncronas e impedir cualquier oscilación de baja frecuencia entre áreas diferentes del sistema interconectado. La IEEE recomienda el uso de un PSS de tipo aceleración de potencia, IEEE (PSS2A).

Filtros para corrientes inducidas en el eje

Como consecuencia de los disparos de los tiristores, corrientes inducidas de alta frecuencia pueden aparecer en el eje de la

turbina, las cuales pueden destruir los cojinetes a causa de las pequeñas descargas eléctricas en el aceite dieléctrico de los cojinetes (*pitting*). Un filtro especial RC drena a tierra estas corrientes inducidas.

Interruptor de C.A.

Utilizado para sistemas de tamaño pequeño o mediano como un seccionalizador entre el secundario del transformador de excitación y el puente rectificador.

Interruptor de campo (41)

Interruptor que habilita o corta el suministro de corriente directa al devanado del campo del generador síncrono. Permite aislar al rotor del generador del rectificador de potencia.

Interruptor de excitación inicial (31)

Interruptor que permite el paso de corriente directa proveniente del banco de baterías al regulador automático de voltaje.

Protección de falla a tierra en el campo (64F)

Un relevador detecta la falla a la tierra en los circuitos de DC del rotor.

Protocolo TCP/IP

La familia de protocolos de *Internet* es un conjunto de protocolos de red en la que se basa *Internet* y que permiten la transmisión de datos entre redes de computadoras. En

ocasiones se le denomina *conjunto de protocolos* TCP/IP, en referencia a los dos protocolos más importantes que la componen: Protocolo de Control de Transmisión (TCP) y Protocolo de *Internet* (IP), que fueron los dos primeros en definirse, y que son los más utilizados de la familia. Se ofrece conectividad plena para monitorear el desempeño dinámico del sistema de excitación.

Puerto serial

Es una interfaz de comunicaciones de datos digitales, frecuentemente utilizado por computadoras y periféricos, en donde la información es transmitida bit a bit enviando un solo bit a la vez, en contraste con el puerto paralelo que envía varios bits simultáneamente.

Retro-alimentación

Es la propiedad de un sistema de lazo cerrado que permite que la salida (o cualquier otra variable controlada del sistema) sea comparada con la entrada al sistema (o con una entrada a cualquier componente interno del mismo con un subsistema) de manera tal que se pueda establecer una acción de control apropiada como función de la diferencia entre la entrada y la salida.

Sistema de control

Sistemas eléctricos o electrónicos que están permanentemente capturando

señales de estado del sistema bajo su control y que al detectar una desviación de los parámetros pre-establecidos del funcionamiento normal del sistema, actúan mediante sensores y actuadores, para llevar al sistema de vuelta a sus condiciones operacionales normales de funcionamiento.

Techos de sobre excitación

La sobre excitación estándar en los sistemas de excitación es aproximadamente 1.5 veces el voltaje de campo a condiciones nominales de las unidades. Para una alta respuesta inicial como define la IEEE 421.2 el transformador de excitación y el stack de potencia se diseñan para:

- Elevar el techo de máximo voltaje de campo de 2.0 a 2.5 p.u. con respecto al voltaje nominal correspondiente a la carga nominal de la unidad.
- Elevar el techo de máximo voltaje de campo entre 5.0 p.u. y 6.0 p.u. con respecto al voltaje nominal correspondiente al funcionamiento en vacío de la unidad.

Tiempo de bloqueo

Tiempo que tarda el tiristor en pasar de conducción a corte.

- **Tiempo de recuperación de puerta (trg):** tiempo en el que, en un número suficiente bajo, las restantes cargas acumuladas se recombinan por difusión, permitiendo que la puerta recupere su capacidad de gobierno.
- **Tiempo de recuperación inversa (tri)**
Tiempo en el que las cargas acumuladas en la conducción del SCR, por polarización inversa de este, se eliminan parcialmente.

Tiempo de cebado

Tiempo que tarda el tiristor en pasar de corte a conducción.

- **Tiempo de crecimiento (tr)** Tiempo necesario para que la corriente de ánodo pase del 10 % al 90 % de su valor máximo, o, el paso de la caída de tensión en el tiristor del 90 % al 10 % de su valor inicial.
- **Tiempo de retardo al crecimiento (td)**
Tiempo que transcurre desde que la corriente de puerta alcanza el 50 % de su valor final hasta que la corriente de ánodo alcanza el 10 % de su valor máximo.

RESUMEN

El Regulador de tensión RAV 1111, tiene como finalidad principal, suministrar la corriente de campo requerida por el alternador dada las condiciones de la referencia, operando en un lazo cerrado de control del voltaje del alternador (canal automático) o bien controlar las condiciones del alternador a través de un control de la corriente del campo del mismo (canal manual y respaldo).

Primero se desinstalaron uno a uno los cinco AVR MEC-3400-W existentes en la central y se realizó el montaje e instalación de los nuevos RAV 1111 2P 550K/220. Ya estando éstos fijados, se realizaron pruebas pre-operativas las cuales consistían en revisar uno a uno los componentes propios del RAV a través de la alimentación de voltajes y corrientes. Teniendo garantizado el funcionamiento del equipo, se pone en servicio realizando los últimos ajustes en planta al *software* de diseño.

Existen muchos modelos que han sido desarrollados para representar varios tipos de RAV utilizados en un sistema de potencia. La opción utilizada en los RAV 1111 2P 550K/220 es un modelo de uso específico, el cual puede ser modificado efectivamente a partir de la información que se posee de éste.

Los tipos más representativos de controladores primarios de primera categoría son controladores y excitadores. Éstos son instalados como una parte integral de cada unidad generadora. Los sistemas estabilizadores de potencia son agregados a los RAV como un control suplementario. La función de estos es de regular la frecuencia y el voltaje terminal local en cada nivel del generador, como respuesta a perturbaciones de los valores

establecidos para estas variables. Los sistemas de control primarios regulan las perturbaciones de la generación de potencia real y potencia reactiva enviada al sistema dentro de sus valores programados.

Se asume que bajo condiciones de operaciones normales, las perturbaciones de los valores programados de las condiciones del sistema son como resultado de cambios pequeños inesperados en la demanda, con componentes muy rápidas y aleatorias en potencial real y reactiva en todos los buses de carga.

Para amortiguar las oscilaciones propias del rotor del generador, así como las oscilaciones de más baja frecuencia producidas en el sistema interconectado se emplea un circuito estabilizador cuya función principal es la de introducir una señal de compensación a la entrada del amplificador de error de voltaje del canal automático digital. El PLC materializa las funciones de transferencia que proporciona el incremento del margen de estabilidad necesario para amortiguar el movimiento del rotor dentro de su campo giratorio.

Con el control de la curva de capacidad de la máquina síncrona se asegura la confianza en que los devanados de campo y estator estarán a un valor de aislamiento estable. Cuando la carga de potencia real y el voltaje se fijan, la carga de potencia reactiva permitida se limita por el calentamiento del devanado de inducido o de campo.

OBJETIVOS

General:

- Nuevos sistemas de excitación estática en las unidades generadoras de la planta hidroeléctrica Chixoy a través de la instalación, pruebas y puesta en servicio de los reguladores automáticos de voltaje.

Específicos:

1. Desmontar los RAV existentes en la central en forma ordenada, desplazarlos y entregarlos con todos sus componentes tal y como se encontraban.
2. Instalar los nuevos reguladores automáticos de voltaje realizando las maniobras de montaje y ajuste de componentes.
3. Realizar las pruebas a los transductores, transformadores, relevadores, controladores lógicos programables y resto de componentes propios del RAV 1111, para que operen dentro de las especificaciones hechas en fábrica.
4. Poner en servicio los RAV 1111 2P 550K/220 en los generadores síncronos de la central hidroeléctrica Chixoy para uso del Instituto Nacional de Electrificación.

INTRODUCCIÓN

La Central Hidroeléctrica Chixoy, considerada la obra más grande de ingeniería en la historia de Guatemala, se ubica en la confluencia de varios ríos. Tiene capacidad de generación de 300 MVA y provee cerca del 35% de la producción nacional de electricidad, que cubre principalmente la denominada Tarifa Social. Cuenta con cinco generadores síncronos cuyos valores nominales son 55,300 KVA, 13,800 V, 2,314 A, trifásico, 0.85 F.P., servicio continuo, 60 Hz, 360 R.P.M., 20 polos, con incrementos de temperatura de 68,200 KVA a 80°C y 55,300 KVA a 60°C, aislamiento clase F, norma IEC No. 34-1, No. de Serie 78D43201, fecha julio 1980, marca Mitsubishi Electric Corp., que fueron construidos junto con sus respectivos sistemas estáticos de excitación con una salida de 194 KW, 200 V, 970 A, reglamentado ANSI, NEMA, IEC, fecha septiembre de 1981, bajo la misma compañía constructora. Estos sistemas de excitación carecían de estabilizador de potencia propio y su longevidad hizo que la existencia de repuestos dejaran de fabricarse y las respuestas del regulador automático de voltaje eran mínimas ante el sistema nacional de electrificación que actualmente se tiene.

Es aquí donde se decidió el cambio de éstos ya descritos por cinco nuevos reguladores automáticos de voltaje marca SEPAC por parte del Instituto Nacional de Electrificación, lo cual consistía en el suministro, instalación, pruebas y puesta en servicio de dichos reguladores. Se suministraron cinco RAV 1111 2P 550K/220AM, cada unidad está constituida por una unidad de control de excitación (UCE) principal con los siguientes módulos: un Controlador Lógico Programable "*Drive Master Plus*" Procesador IC200 CPU E05 marca GE familia FANUC, instalado en el gabinete de la electrónica de regulación, fuente de alimentación para la

UCEP con entrada 125 VCD y alimentación de respaldo C.A., licencia de firmware RAVPAC AM, una unidad de control de excitación de respaldo con las mismas características que la unidad principal, así como Generadores y Amplificadores de Pulsos de disparo de tiristores independientes de la unidad principal y de respaldo. Una unidad de potencia con dos puentes rectificadores en esquema N+1, controlados a base de tiristores, marca SEPAC modelo P 550K/220, interruptor de campo, esquema de excitación inicial, esquema de medición para retroalimentación, protecciones del regulador, así como equipos auxiliares de fuerza y control, esquemas de medición, señalización y mandos, esquemas de comunicación utilizando un puerto Ethernet IEEE 802.3, más otros requerimientos de contrato.

Cada puente rectificador está hecho para soportar la corriente total de excitación de 900 ACD que requiere el campo, siendo estos dimensionados a 1200 ACD.

El *software* utilizado para la programación y ajuste de los parámetros es el Versamax. Con este *software* la computadora se enlaza al PLC y nos permite modificar, visualizar, graficar y grabar en memoria los datos y variables del regulador.

En caso de querer modificar una variable analógica o digital, este cambio puede ser realizado ya sea en memoria RAM (temporal) o en memoria Flash (permanente). Generalmente, las modificaciones se hacen primero en memoria RAM y una vez obtenido el ajuste final se guardan en memoria *Flash*.

Toda la programación contenida en el PLC está programada en lenguaje escalera, este tipo de lenguaje permite al usuario programar secuencias lógicas de forma similar a las lógicas cableadas antiguamente con relevadores. Además de que las operaciones matemáticas y de control también son programadas de esta misma manera.

El bloque de control PID requiere de 40 registros para operar, cada uno de ellos cumple con una función específica, dentro de las funciones más importantes se encuentran los límites máximos y mínimos, valores pre-determinados y ganancias.

Para detectar las fallas o consecuencias de algún evento ocurrido durante algún disturbio en el generador o en el RAV, se tiene una interfaz hombre máquina destinada para la visualización, monitoreo y análisis de datos proporcionados por el Regulador Automático de Voltaje.

El tiempo de trabajo efectivo para desmontaje y montaje es de tres días, pruebas pre-operativas, tres días, pruebas dinámicas, dos días.

Las ventajas de estos nuevos reguladores son:

- Redundancia en el control
- Mejor tiempo de respuesta
- *Software* compatible con Windows
- Desplegado de información (IHM)
- Comunicación redundante
- Información histórica
- Ampliación de tiempo de vida
- Estabilizador de potencia (PSS2A)
- Reducción de costos en un 40%

En este informe se hace referencia a la puesta en servicio de un solo regulador automático de voltaje, pero tomando en consideración los valores de cada uno de ellos, dado que los cinco se asemejan con porcentajes de error mínimos.

1. SISTEMAS DE EXCITACIÓN ESTÁTICOS

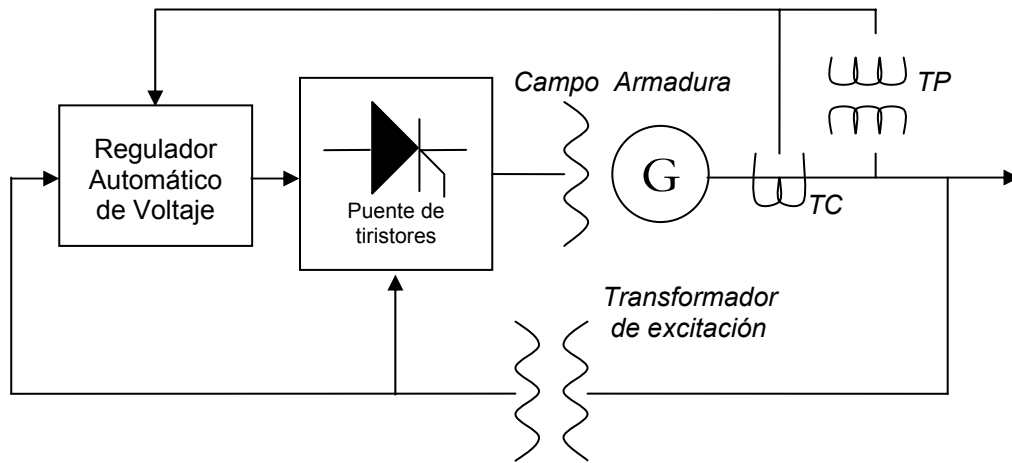
Un sistema de excitación o un sistema de control de excitación es una combinación de aparatos diseñados para suministrar y controlar la corriente de campo del generador por medio de reguladores automáticos.

En la operación del sistema eléctrico en estado estable, el sistema de excitación controla el voltaje del generador, el cual deberá permanecer dentro de un rango de variación muy pequeño para las diferentes condiciones de operación, también es el medio para distribuir la potencia reactiva entre los generadores operando en paralelo. Los sistemas de excitación deberán además influir durante los procesos transitorios, por lo que es importante considerar las características de los sistemas eléctricos y los requerimientos específicos en diferentes problemas.

Los sistemas de excitación estáticos no contienen ningún elemento rotatorio, lo que los hace sumamente rápidos, actualmente se utilizan elementos de estado sólido que pueden ser tiristores de potencia dispuestos en arreglos en paralelo para conseguir la capacidad requerida para excitar al generador.

Los circuitos de los reguladores estáticos de voltaje usan, voltaje, corriente del estator y variables de excitación para generar señales de control por medio de las cuales son controlados los tiristores. Este tipo de control no tiene tiempos de retardo en el disparo del ángulo de tiristores.

Figura 1. Sistema de excitación con tiristores



El sistema de excitación a tiristores, con excitación propia, recibirá energía desde otra fuente de potencia para excitar el generador, durante el arranque o puesta en operación.

Después que el voltaje en las terminales del generador, sea mayor de cierto voltaje establecido; el sistema de excitación a tiristores operará normalmente y será autosuficiente.

1.1. Elementos importantes

El sistema de excitación de generadores síncronos está constituido por lo siguientes elementos:

- El devanado de campo, localizado en la ranuras del rotor o sobre los polos en forma de bobina. Las conexiones del devanado de campo pasan a lo largo de la flecha y son conectados a anillo deslizantes montados en la flecha, que son alimentados con corriente directa a través del contacto con escobillas.

- En los sistemas de excitación estáticos la señal de corriente directa se obtiene por dispositivos electrónicos cuya configuración es diversa, la alimentación al devanado de campo del generador síncrono se realiza a través de anillos deslizantes y escobillas.
- El regulador automático de voltaje (RAV) que trata de controlar la corriente de campo de la máquina síncrona, de acuerdo a criterios específicos.
- Circuitos y sistemas auxiliares para estabilización interna, limitadores de corriente de campo máxima y mínima, cambio a operación manual, etc.

1.2. Requerimientos de los sistemas de control automático

- El sistema de excitación deberá tener alta confiabilidad de operación. La confiabilidad la determina la elección de variables a controlar, el lugar de la conexión de los transformadores de medición usados en el sistema automático de excitación y de los componentes de los circuitos. El sistema de excitación deberá ser capaz de operar en condiciones de sobreexcitación y subexcitación, así como para la distribución proporcional de la potencia reactiva entre generadores.
- El sistema de control automático deberá asegurar la calidad de voltaje para las condiciones de estado permanente, es decir, deberá de mantener con gran precisión el voltaje en los nodos terminales de los generadores.

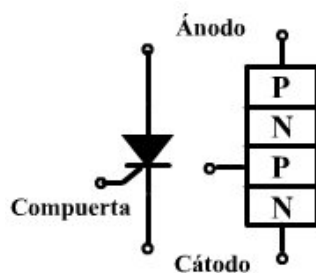
- El control automático de excitación deberá de asegurar la estabilidad estacionaria del sistema eléctrico ante todas las condiciones de operación, incluyendo: la desconexión de un generador síncrono en vacío y con carga; la conexión de un generador a una línea de transmisión sin carga; la operación del generador ante condición de sobrecarga y de subexcitación; condiciones normales de carga y condiciones de postfalla.
- El sistema de excitación deberá de asegurar el amortiguamiento positivo de las oscilaciones naturales y forzadas, de pequeña y gran amplitud. Deberá de mejorar la calidad del proceso transitorio de los sistemas eléctricos. Un buen amortiguamiento incrementa la estabilidad resultante, elimina la posibilidad de violación de la estabilidad durante el segundo ciclo de la oscilación y reduce las fluctuaciones de voltaje en lo nodos ante cambios súbitos de carga.

1.3. Puente de tiristores

1.3.1. Tiristor

El tiristor es un dispositivo electrónico que tiene dos estados de funcionamiento: conducción y bloqueo. Posee tres terminales: Ánodo (A), cátodo (K) y puerta (G).

Figura 2. Símbolo del tiristor estructura interna



La conducción entre ánodo y cátodo es controlada por el terminal de puerta. Se dice que es un dispositivo unidireccional, debido a que el sentido de la corriente es único.

Curva característica: La interpretación directa de la curva característica del tiristor dice que cuando la tensión entre ánodo y cátodo es cero la intensidad de ánodo también lo es.

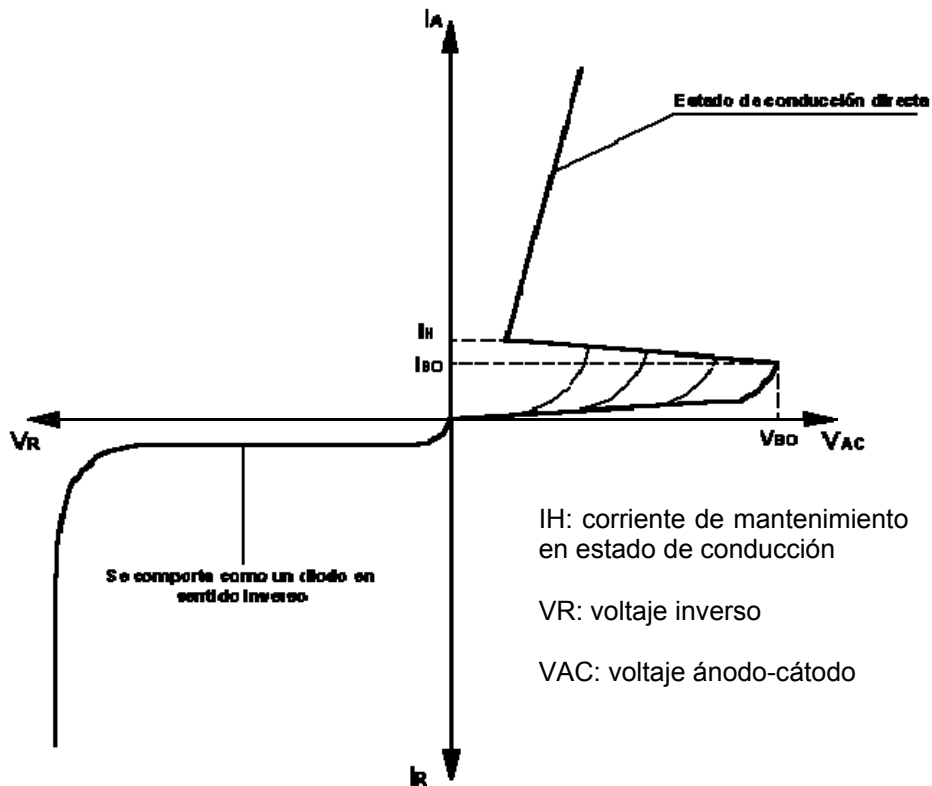
Hasta que no se alcance la tensión de bloqueo (V_{BO}) el tiristor no se dispara. Cuando se alcanza dicha tensión, se percibe un aumento de la intensidad en el ánodo (I_A), disminuye la tensión entre ánodo y cátodo, comportándose así como un diodo polarizado directamente.

Si se quiere disparar el tiristor antes de llegar a la tensión de bloqueo será necesario aumentar la intensidad de puerta (I_{G1} , I_{G2} , I_{G3} , $I_{G4}\dots$), ya que de esta forma se modifica la tensión de cebado de este.

Este sería el funcionamiento del tiristor cuando se polariza directamente, esto solo ocurre en el primer cuadrante de la curva.

Cuando se polariza inversamente se observa una débil corriente inversa (de fuga) hasta que alcanza el punto de tensión inversa máxima que provoca la destrucción del mismo.

Figura 3. Curva característica del tiristor



$V_{AC} < 0$, zona de bloqueo inverso: SCR bloqueado (circuito abierto).

- Solo lo recorre una débil corriente de fuga inversa (IRRM).
- No sobrepasar la tensión inversa máxima.

$V_{AC} > 0$; sin excitar puerta, zona de bloqueo directo: SCR bloqueado (circuito abierto).

- Es recorrido por una débil corriente de fuga directa (IDRM).
- No sobrepasar la tensión directa máxima (VDRM).

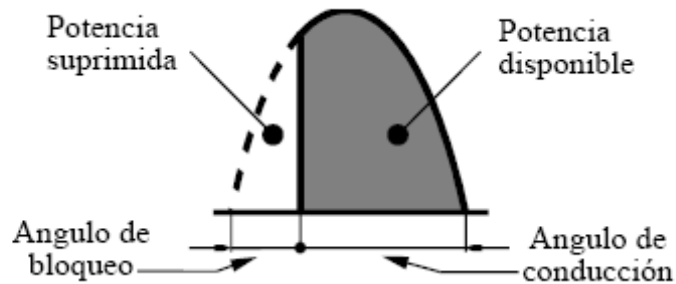
$V_{AC} > 0$; excitada en puerta, zona de conducción: SCR conduce (cortocircuito).

- Entre G y K circula un impulso positivo de corriente.
- SCR se comporta como diodo.

Ángulo de conducción: La corriente y tensión media de un SCR dependen de este ángulo. A mayor ángulo de conducción, se obtiene a la salida mayor potencia. Un mayor ángulo de bloqueo o disparo se corresponde con un menor ángulo de conducción.

$$\text{ángulo de conducción} = 180^\circ - \text{ángulo de disparo}$$

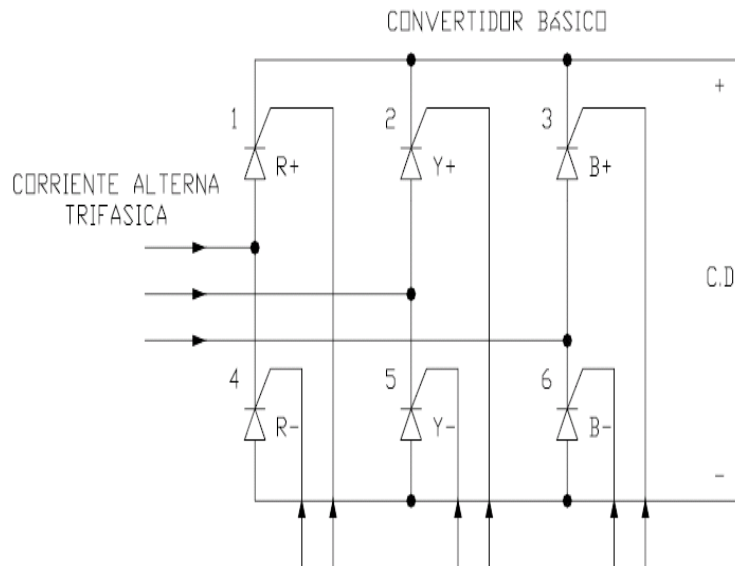
Figura 4. Ángulo de bloqueo y conducción de un tiristor



1.3.2. Configuración en paralelo

Se utiliza cuando la corriente de carga es muy grande. Para controlar los tiristores en paralelo se instala una resistencia en serie en cada tiristor para tener una corriente simétrica.

Figura 5. Convertidor trifásico con seis SCR



La alimentación del voltaje de corriente alterna al convertidor es suministrado por el devanado secundario del transformador de excitación.

a) Cebado

El paso de un tiristor del estado de bloqueo al estado conductor no se hace de forma instantánea.

El tiempo de cebado por la puerta (tgt) es de algunos microsegundos, y se descompone en dos tiempos: tiempo de retardo al crecimiento (td) y tiempo de crecimiento (tr).

El tiempo de retardo depende principalmente de tres parámetros:

- La tensión ánodo-cátodo (td disminuye si esta magnitud aumenta)
- La temperatura (td disminuye si esta magnitud aumenta)
- La corriente de puerta

El tiempo de crecimiento t_r depende esencialmente de la amplitud y el gradiente de la corriente de ánodo; aumenta con estos. El tiempo de cebado es suficientemente corto (1.5 a 6 μs), como para no ofrecer dificultades, en aplicaciones en baja y media frecuencia.

b) Bloqueo

Después de una onda de corriente directa, el tiristor no recupera de forma inmediata sus propiedades de bloqueo de la tensión de directa. El tiempo de bloqueo (t_q) se descompone en dos tiempos:

- Tiempo de recuperación inversa ($t_{r.i}$)
- Tiempo de recuperación de la puerta ($t_{r.g}$)

c) Variación demasiado rápida del ánodo dv/dt

Una variación demasiado rápida del potencial del ánodo puede provocar el cebado no controlado de un tiristor, dv/dt es el valor mínimo de la pendiente de tensión por debajo del cual no se producen picos transitorios de tensión de corta duración, gran amplitud y elevada velocidad de crecimiento. La limitación de la dv/dt se efectúa con la acción combinada de una inductancia de ánodo y de una red RC (serie) conectada entre ánodo y cátodo.

Los tiristores actuales permiten valores del dv/dt del orden de 500 a 1500 $\text{V}/\mu\text{s}$, lo que permite simplificar los circuitos de limitación de la dv/dt .

d) Variación demasiado rápida de la corriente durante el cebado di/dt

Cuando un tiristor se ceba, toda la unión no conduce instantáneamente y la superficie de conducción está limitada a una zona alrededor de la puerta, aunque esta zona se extiende rápidamente (0.1 $\text{mm}/\mu\text{s}$), di/dt es el valor

mínimo de la pendiente de la intensidad por debajo de la cual no se producen puntos calientes. Si la corriente se establece con demasiada rapidez, aparecen, zonas con una fuerte densidad de corriente que mantienen un voltaje ánodo-cátodo importante, lo que da lugar localmente a una disipación de potencia excesiva y a temperaturas capaces de provocar micro fusiones en la unión; esto da lugar a un envejecimiento acelerado y, a mayor o menor di/dt añadiendo una inductancia, o retrasando el inicio de aparición de la corriente con una inductancia saturable.

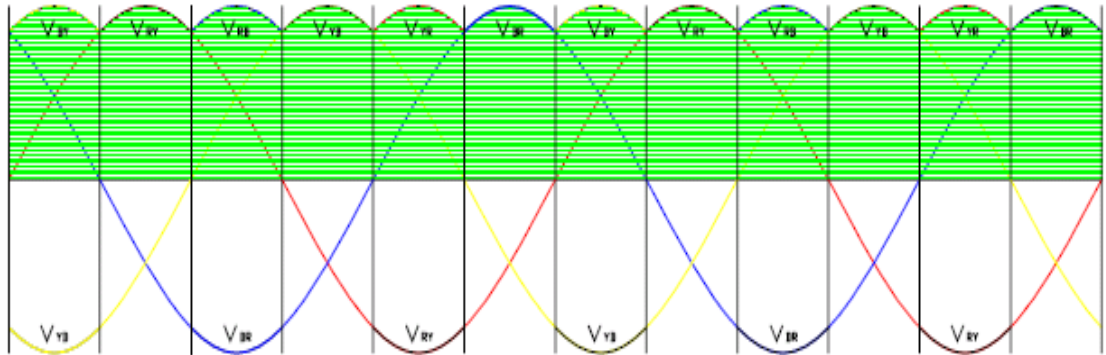
El cebado se puede mejorar sobreexcitando la puerta.

Los tiristores modernos tienen una estructura de puertas mejor adaptada (puerta ayudada, puerta interdígital, etc.) y pueden soportar di/dt de varios centenares de amperes por microsegundo.

1.3.2.4. Operación como rectificador y como inversor

Tomando la base del puente trifásico totalmente controlado, en la siguiente figura se muestra el caso de la operación como rectificador; el área achurada representa el área tiempo voltaje que se aplica al campo del generador. Un puente de diodos puede considerarse como el caso especial de la operación de un puente de tiristores, con un ángulo de accionamiento $\alpha = 0^\circ$ eléctricos. **El ángulo de accionamiento α se mide siempre desde el punto natural de tiempo de accionamiento.**

Figura 6. Accionamiento de tiristores



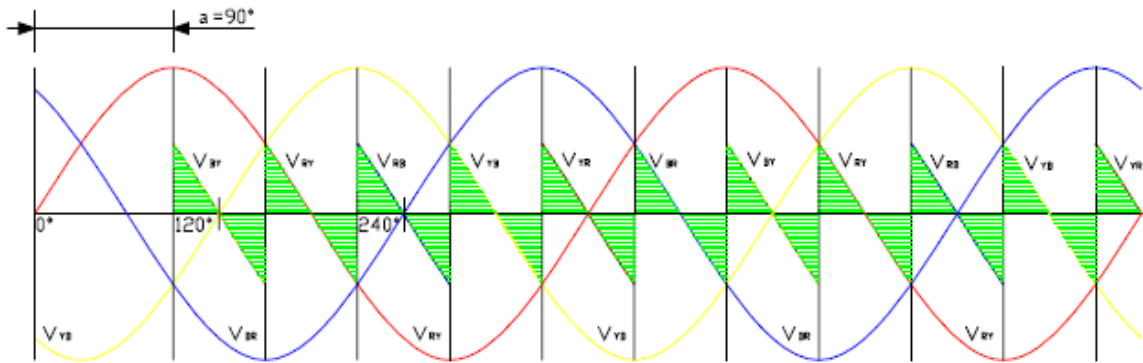
Con la conexión del puente trifásico la corriente es conducida siempre simultáneamente por dos tiristores. Cada tiristor en su condición de operación por un tiempo de $2\pi/3 = 120^\circ$ eléctricos. La inductancia del campo es tan grande que la corriente de campo está libre prácticamente de ondulaciones. Para poner en operación el puente, dos de los tiristores deben accionar simultáneamente, es decir, uno de los tiristores debe ser accionado por un impulso auxiliar 60° eléctricos después de su impulso principal. Debe haber entonces en cada tiristor un doble impulso en cada periodo, con un intervalo de 60° eléctricos.

$V_f(\alpha) = V_{fo} \cos \alpha$; donde V_{fo} representa el valor medio teórico para un ángulo de accionamiento $\alpha = 0$, el así llamado voltaje ideal en vacío.

Este valor para el puente rectificador trifásico es: $V_{fo} = 1.35 V_{sec}$, donde V_{sec} es el voltaje entre fases del secundario del transformador de excitación.

Si se aumenta α , se utilizan otros sectores de las curvas senoidales, y el voltaje V_f asume otras formas. Para $\alpha = 90^\circ$, las áreas achuradas positivas y negativas son iguales, es decir, el voltaje de campo V_f llega a ser cero, ver la siguiente figura.

Figura 7. Ángulo de accionamiento 90°



El rango de trabajo $0^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ se conoce como **operación rectificadora**. Se caracteriza por su valor medio de voltaje de cd V_f positivo. En este rango de trabajo la energía fluye de fuente de alimentación hacia el campo. Si se incrementa α de 90° a 180° , las áreas negativas tiempo-voltaje V_f llegan a predominar cada vez más, correspondiéndole un valor medio de V_f negativo.

Figura 8. Voltaje promedio negativo



El accionamiento de los tiristores tiene lugar tan tarde, que durante la total o mayor parte de los periodos activos, el área de voltaje es negativo. El voltaje negativo V_f resultante causa una disminución de flujo, es decir de excitación.

La inductancia de campo (L_f) sin embargo envía como antes una corriente I_f a través del circuito de excitación, la cual, aunque disminuida, es todavía positiva. Como resultado las corrientes y los voltajes en el transformador tienen direcciones contrarias, lo cual quiere decir que una parte de la energía almacenada en el campo, es regresada a la fuente de alimentación. La otra parte de la energía del campo se convierte en calor en la resistencia R_f , Esta conclusión se conoce como **operación inversora** y se mantiene hasta que la corriente I_f llega a cero. Entonces el voltaje de campo negativo se abate y aparecen voltajes negativos como voltajes de bloqueo de los tiristores.

De esta manera variando el ángulo de accionamiento α , en la unidad de accionamiento, o desde el regulador de voltaje, se puede controlar la corriente de excitación. Por simplicidad los voltajes de alimentación para el puente de diodos y para el puente de tiristores, se ha considerado de igual magnitud. Este hecho no debe alterar sin embargo en principio la forma de la curva del voltaje de campo. En este caso el funcionamiento continuo del puente controlado es posible en la operación inversora ya que, a medida que el valor medio resultante del voltaje de campo V_f es positivo, circula una corriente de campo positiva, la cual a su vez permite que tenga lugar la operación inversora.

1.4. Curva de capacidad

Los generadores síncronos por lo general se evalúan en términos de la carga de potencia máxima aparente (KVA o MVA) a un determinado voltaje y factor de potencia (con frecuencia 80%, 85% o 90% de atraso) que puedan llevar de manera continua sin sobrecalentarse. La salida de potencia real del generador se limita a un valor dentro del índice de potencia aparente por medio de la capacidad del motor principal.

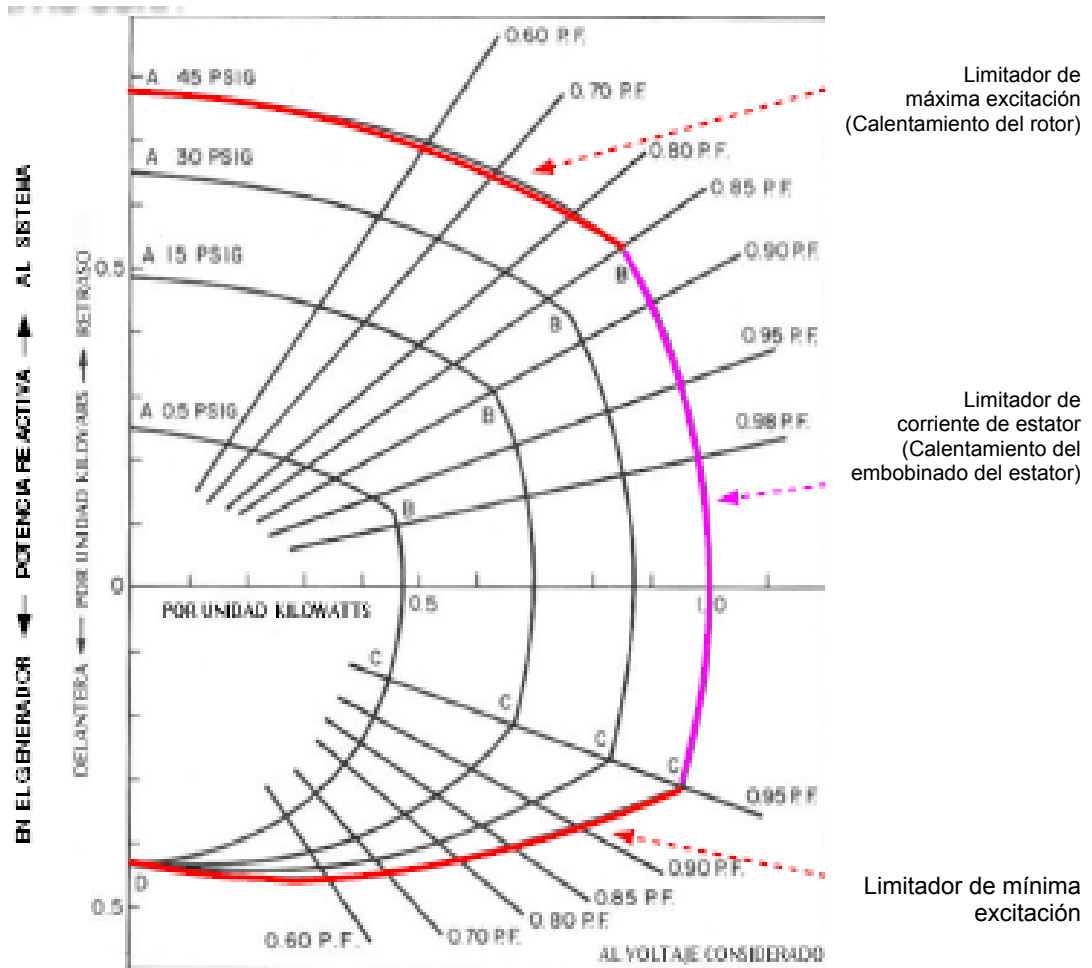
En virtud de que su *sistema de regulación de voltaje* (que controla la corriente de campo en respuesta al valor que se midió del voltaje terminal), la maquina normalmente opera a un voltaje terminal constante cuyo valor se encuentra dentro de $\pm 5\%$ del voltaje proporcional.

Cuando la carga de potencia real y el voltaje se fijan, la carga de potencia reactiva permitida se limita por el calentamiento del devanado de inducido o de campo.

En la figura se presenta un conjunto común de *curvas de capacidad* para un turbogenerador de gran tamaño.

Estas curvas suministran una conducción de potencia reactiva máxima que corresponde a diferentes cargas de potencia real con funcionamiento a un voltaje terminal nominal. Advierta que las curvas que se observan en la figura contribuyen a diferenciar la presión.

Figura 9. Curva de capacidad de un turbogenerador



Para una carga de potencia real dada, el incremento de la potencia reactiva que sobrepasa un punto en la porción limitada de la curva de capacidad resultará en temperaturas del devanado que dañarían su aislamiento y acortarían su duración.

La operación bajo condiciones de voltaje terminal constante y de corriente de inducido (al máximo valor permitido por las limitaciones de calentamiento) corresponde a un valor constante de potencia de salida aparente determinada por el producto del voltaje terminal y de la corriente.

Una potencia aparente constante corresponde a un círculo centrado sobre el origen en una gráfica de potencia reactiva frente a la potencia real. Para un voltaje terminal constante, la potencia aparente constante corresponde a una corriente del devanado constante y como consecuencia a un calentamiento del devanado inducido o armadura.

Es común especificar el índice (potencia aparente y factor de potencia) de la máquina, al igual que como el punto de intersección de las curvas de limitación del devanado de inducido y de campo. Para una carga de potencia real dada, el factor de potencia al que la máquina opera, y como consecuencia su corriente de inducido o armadura, se controlan mediante el ajuste de excitación de campo.

1.5. Regulador de voltaje

El circuito regulador detecta el voltaje de salida del generador y produce la señal de control de acuerdo a los cambios producidos en las salidas. Esta señal es entregada al circuito de disparo que controla el ángulo de los tiristores, de esta forma el voltaje de salida del puente de tiristores variará para mantener la salida del generador en un valor correcto, por medio del control de la cantidad de excitación, así el voltaje y potencia reactiva generada cambiarán de la manera ajustada.

En la actualidad los reguladores de voltaje incluyen un controlador que sensa el voltaje de salida del generador (y algunas veces la corriente) iniciando una acción correctiva en la dirección adecuada. La velocidad de este aparato es de primordial importancia en los estudios de estabilidad.

Además de poseer alta confiabilidad y alta disponibilidad para mantenimiento, es necesario que el regulador de voltaje sea proporcional y

de acción continua. Esto significa que deberá ser proporcional de la desviación de un valor determinado de voltaje en las terminales del generador.

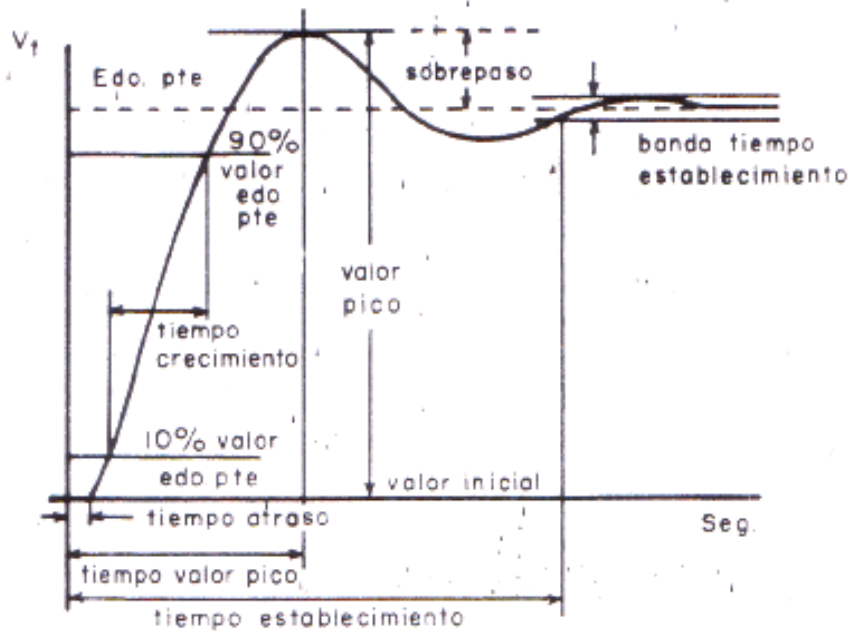
El regulador de voltaje debe ser capaz de mantener al generador dentro de los límites normales de operación controlando la excitación sin salir de los límites de capacidad del generador, compensación y ajustes de acuerdo a los requerimientos que se presenten.

El voltaje de excitación nominal cambia de acuerdo a la potencia del generador síncrono, para generadores de hasta 100 MVA se tienen voltajes de excitación de 250V.

1.5.1. Respuesta al escalón

La respuesta de los sistemas de excitación deberá ser comparada usando un criterio adecuado de operación. El funcionamiento del sistema deberá ser medido ante diferentes condiciones de entrada. Es generalmente aceptado que la prueba de mayor interés es la obtención de la característica voltaje-tiempo del excitador bajo la acción de un cambio en escalón en el voltaje de referencia, la magnitud del cambio es del 5 al 20%.

Figura 10. Respuesta voltaje-tiempo



Se entiende por sobrepaso la cantidad por la cual se excede la respuesta en estado permanente.

El tiempo de crecimiento es el tiempo para que la respuesta se eleve del 10% hasta el 90% de su valor en estado permanente.

El tiempo de establecimiento es el período requerido para que la respuesta a un escalón se encuentre dentro de un rango específico del valor final. Algunas veces se interpreta como el tiempo requerido para alcanzar el valor final después del primer sobrepaso. Esta última definición es la más aceptada.

1.6. Tipo MEC-3400-W AVR Mitsubishi Electric Corporation

Los componentes generales del sistema de excitación estático de tiristores son los siguientes:

El sistema de excitación está compuesto de unidades integradas de bajo voltaje, contenidas en paneles seccionados de metal; lo cuales son los siguientes:

- Panel Regulador Automático de Voltaje
- Panel de Excitación Inicial
- Panel de Tiristores
- Panel del Interruptor de Campo
- Panel de Supresor de Impulsos

Figura 11. Sistema de excitación MEC-3400-W

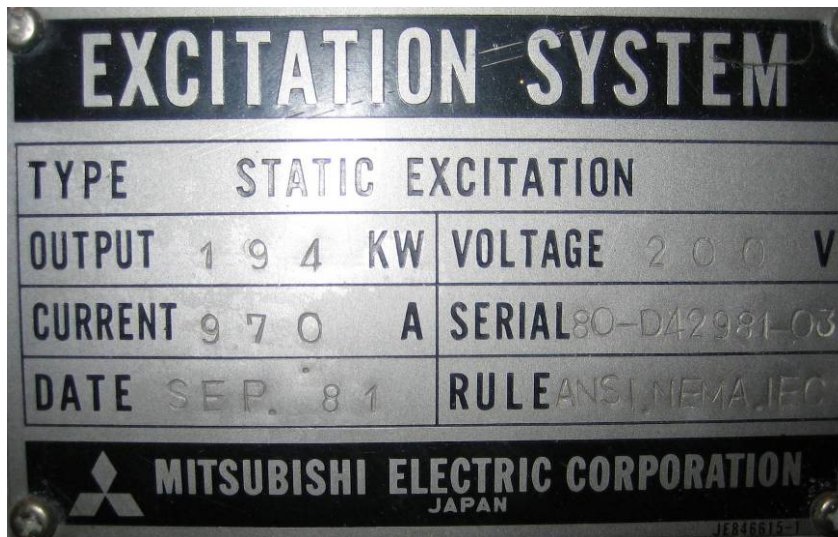


Los componentes del regulador consisten en placas de circuito impreso y está compuesto de un circuito regulador y un circuito de disparo.

Los paneles de tiristores, están compuestos de bandejas equipadas con los puentes de tiristores y los fusibles para la limitación de corriente.

El panel del interruptor de campo, cuenta con el interruptor de campo del excitador, derivaciones, resistencias y algunos otros dispositivos. Lo equipos de detección de falla a tierra del campo del generador están montados en este panel.

**Figura 12. Placa características del sistema de excitación
MEC-3400-W**



1.6.1. Ventajas y operación

El puente de tiristores es de rectificación tipo trifásico de onda completa, y es aplicado como un equipo de control de fase. La salida puede ser

libremente cambiada del voltaje máximo negativo, al voltaje máximo positivo por medio del control del ángulo de disparo de los tiristores.

La elevación o aumento del voltaje en la terminal del generador sucederá solamente en forma instantánea durante la reacción de la armadura. Se ha provisto de un circuito de descarga de la energía de los embobinados del campo, consistente en un varistor que absorbe cualquier impulso anormal del circuito de corriente directa. Obviamente, la corriente fluirá en una sola dirección aún durante el medio ciclo negativo, el varistor ha ido provisto para absorber cualquier energía de flujo inverso que se genere en las bobina del campo como resultado de cualquier falla de los circuitos del generador.

Como otro método de descarga, el interruptor del circuito de campo es colocado entre la bobinas del campo y la salida de lo equipos rectificadores. Cuando los contactos principales son abiertos, los contactos de descarga se cierran. La energía de las bobinas del campo es consumida en las resistencias de descarga. Cuando ocurre una falla, el interruptor del circuito de campo actúa, lo cual es una contramedida altamente confiable.

La excitación de la máquina es directamente proporcional al ajuste, evitando cualquier saturación posible de la máquina. El regulador mantendrá el mismo voltaje en las terminales del generador, por medio de la creación de la señal de disminución del circuito regulador hacia el circuito de disparo. La acción del regulador es aumento-disminución, desde el valor básico de excitación; aumento y disminución cuya cantidad es igual a la necesaria para mantener el voltaje de la máquina de acuerdo al valor fijado en el ajustador del regulador de voltaje.

La señal de salida aumento-disminución del regulador, es suficiente para satisfacer todas las condiciones de excitación con el rango de ajuste del ajustador básico. Si cierto dispositivo diferencia entre las salidas del regulador y el ajuste básico cero, esto es el seguidor de campo.

Debido a que es necesario tener algún grado de error de voltaje, para poder tener una señal de salida del circuito regulador, la desviación del voltaje no es totalmente corregida.

La ganancia del regulador es tal, que en todo el rango, desde la condición sin carga hasta la condición de plena carga; factor de potencia nominal, el voltaje en terminales de la máquina (en condiciones de estado estable) la variación será de $\pm 0.5\%$ del voltaje nominal.

El excitador estático de tiristores, recibirá todo su suministro de energía desde las terminales de la máquina. Como el voltaje en terminales es igual a cero antes del arranque y durante el arranque, se hace necesario que el excitador estático de tiristores reciba suministro de energía desde cualquier otra fuente; baterías estacionarias y suministro auxiliar de AC, hasta que el voltaje de las terminales de la máquina aumente a un valor correcto y suficiente para que opere el excitador estático.

En las tarjetas del circuito regulador, se utilizan semiconductores; amplificadores operacionales y transistores como miembros componentes de las entradas y de retroalimentación.

Por esta razón, todas las señales de entrada son convertidas a los valores de corriente y voltaje necesarios para la entrada del amplificador operacional.

El voltaje máximo de salida del amplificador operacional, trabajando en la condición de saturación es de 10 V. Por lo tanto, el voltaje máximo de salida varía un poco, dependiendo de la carga, polaridad de voltaje de salida (positivo o negativo), clase del amplificador y otras condiciones. Cada tarjeta está diseñada para ser usada en el dominio no-lineal de ± 10 V.

Una fuente de energía, con control de ± 15 V DC es suministrada por varias tarjetas; para suministrar un voltaje más constante a las señales.

1.6.1.1. Limitador de excitación mínima

Previene en forma automática baja excitación del generador. Las señales entregadas a la entrada de esta tarjeta son; una señal de voltaje trifásico proporcional a de las terminales del generador, suministrada por el transformador de potencial (TP) y una señal de corriente de las fase Y (convertida en señal de voltaje por el módulo de conversión de corriente/voltaje en una relación 1V/1A) suministrada por el transformador de corriente (TC).

Este círculo de las características de limitación, son fijadas de acuerdo a la curva de capacidad y a la curva de limitación estática-estable del generador.

1.6.1.2. Limitador de excitación máxima

La tarjeta del limitador de excitación máxima, protege las bobinas del campo de la máquina síncrona de cualquier posible sobre-calentamiento prolongado durante los sobre valores de excitación.

La entrada al limitador de excitación máximo, es una señal proporcional a la excitación de la máquina síncrona. Esta señal es derivada del sensor de la corriente de campo y es comparada con una señal de referencia ajustable en la parte detectora. En cuanto la señal excede la referencia, el circuito temporizador operará. Después de cierto tiempo, una señal de salida es entregada para disminuir la corriente de excitación.

1.6.2. Interruptor magnético del circuito

Es un disyuntor magnético tripolar. El disyuntor tiene bobinas separadas de cierre y disparo, con operación mecánica a través del relevador 41X (mecanismo de disparo libre). El cierre del disyuntor se inicia con la energización del circuito de cierre. Esta energía opera el 41X que cierra sus contactos completamente y energiza las bobinas de cierre del disyuntor.

El disyuntor es disparado por la energización de la bobina de disparo, por el conmutador auxiliar.

1.6.3. Arreglo de tiristores

El puente de tiristores está formado por un convertidor unidireccional trifásico. Controla el voltaje del campo por medio de la variación de los pulsos de disparo.

Posee elementos para el lado positivo y lado negativo en cada fase; cada uno de los cuales está compuesto por 4 tiristores en arreglo paralelo, por lo cual se hacen necesarios 12 para el circuito trifásico.

Cada arreglo también contiene un transformador para el pulso de compuerta, una red RC, para protección de cualquier sobre voltaje y fusibles de alta respuesta.

Cuando un rechazo de carga del 110% ocurre sin AVR y el voltaje del generador aumenta, el limitador de sobrevoltaje del generador manda una señal de fase al circuito de disparo con lo que se limitará el voltaje hasta un 125%.

Lo fusibles de limitación de corriente, son usados como protección de sobre corriente y sobre cargas por corto tiempo. Estos fusibles están colocados en cada brazo del puente. Cuando se presenta cualquier fuerte sobre carga, las características constantes I^2t se presentarán. Esto significa que el resultado de la integración del producto I^2t , desde el tiempo de iniciación de la falla hasta que el fusible libera el circuito será constante y dependerá del valor de I . Siendo que las capacidades de los semiconductores para los impulsos, está igualmente basado en el producto I^2t , una buena protección puede lograrse si el producto I^2t del fusible es menor que el del semiconductor.

2. REGULADOR AUTOMÁTICO DE VOLTAJE 1111 2P 550K/220

El Regulador de Tensión RAV 1111, es un sistema diseñado para operar en generadores eléctricos de potencia desde algunos MW's hasta 500 MW no importando la característica del rotor del generador (excitación tipo *BRUSHLESS* o directa al rotor).

Para el caso de las unidades de la Central Hidroeléctrica Chixoy; el modelo correspondiente para cubrir las características específicas es el RAV 1111.

1111 → serie mil
2P → dos puentes
550K → características eléctricas
220 → voltios

El sistema consta básicamente de un transformador de excitación que se conecta en derivación a la salida del generador, un gabinete que contiene la electrónica de regulación, el convertidor de potencia y los dispositivos auxiliares de medición TP's y TC's, así como la lógica remota de control.

El RAV 1111 esta formado de varios módulos funcionales, que entrelazados llevan a cabo las siguientes tareas en forma coordinadas:

- Excitar el generador a partir del voltaje de baterías de la central ajustando el voltaje del generador al valor nominal en forma controlada en un tiempo mínimo.

- Rectificar en forma controlada el voltaje del transformador de excitación para aplicarlo en el rotor del generador (canal automático) o la corriente de excitación (canal manual y canal de respaldo).
- Mantener al generador dentro de los límites normales de operación controlando la excitación sin salir de los límites de capacidad del generador. Estabilizar las condiciones dinámicas de los sistemas interconectados y participar en la regulación de voltaje de los mismos.
- Supervisar el estado funcional del regulador tomando criterios de alarmas y disparo si las condiciones de operación son anormales.
- Realizar transferencias del canal automático al canal manual si las condiciones de regulación de voltaje no son las adecuadas.
- Preparar la transferencia automática del regulador de voltaje (canal automático) a regulación de corriente (canal manual) en caso de falla posicionando el ángulo de disparo de los SCR'S en un solo punto mediante un circuito seguidor.

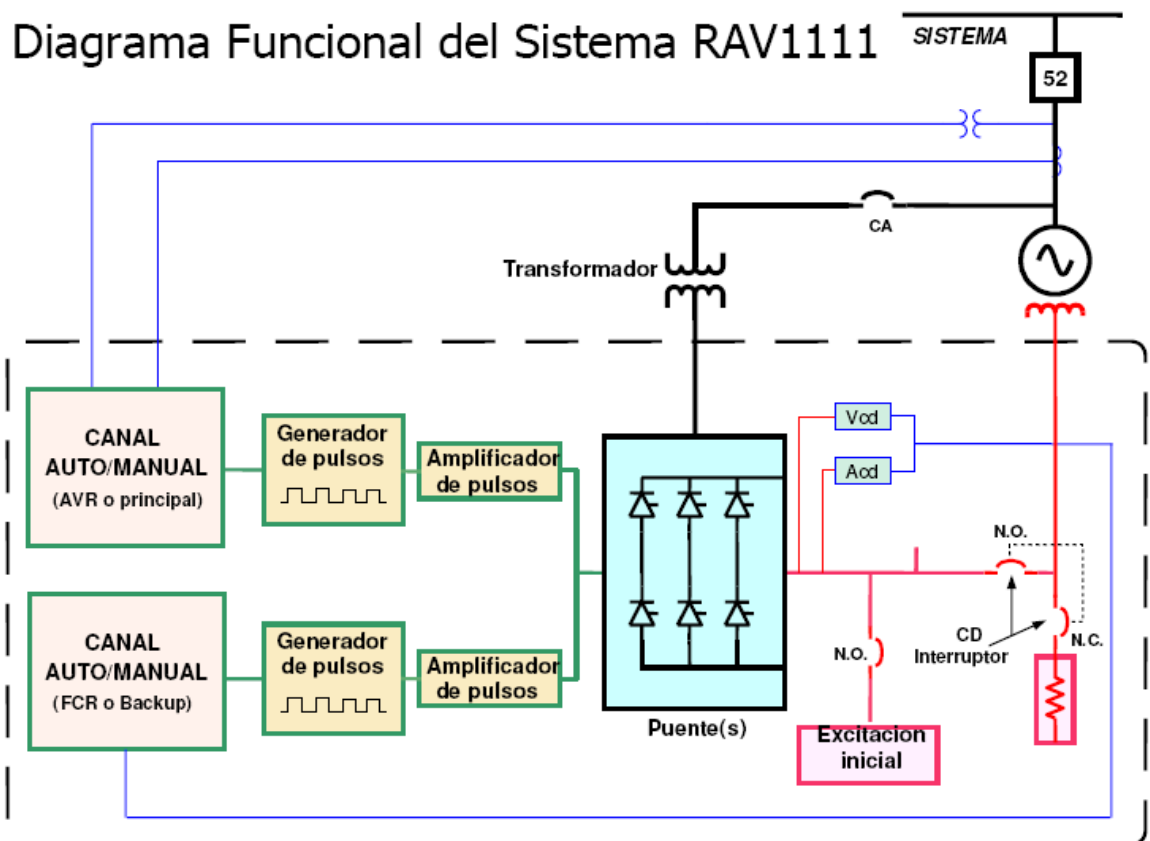
El *Drive Master Plus* utiliza valores llamados "Cuentas" para definir los ajustes necesarios, para valores reales esto son:

- Canal Automático: voltaje de generador, 13800 V – 1 p.u. - 5000 Ctas.
- Canal Manual: corriente de excitación, 1 p.u. - 5000 Ctas.
- Volt/Hz: 1 p.u. - 16000 Ctas.
- Watt, VAR: 1 p.u. -3000 Ctas.

2.1. Descripción funcional del sistema

El Regulador de tensión RAV 1111, tiene como finalidad principal, suministrar la corriente de campo requerida por el alternador dada las condiciones de la referencia, operando en un lazo cerrado de control del voltaje del alternador (canal automático) o bien controlar las condiciones del alternador a través de un control de la corriente del campo del mismo (canal manual y respaldo).

Figura 13. Diagrama funcional de operación RAV 1111



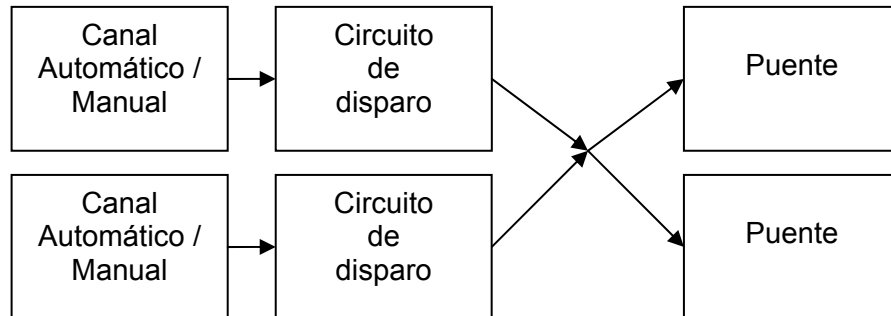
El puente rectificador es de onda completa, 6 SCR, puente rectificador-inversor.

- Puede proporcionar excitación positiva y negativa, para un desempeño óptimo.
- La excitación positiva puede ser útil para una mejor estabilidad durante las fallas.
- La excitación negativa provee una respuesta rápida durante rechazos de carga y transitorios.
- Cada puente rectificador incluye circuitería protectora de tiristores tales como filtros y fusibles.
- Se aplica redundancia N+1.

a) *Redundancia N+1*

- Cuando se emplean dos o más puentes redundantes, todos los puentes comparten la carga.
- Se preserva la vida útil de la electrónica de potencia al no operar cerca de los límites.
- La corriente requerida es transferida al puente no fallado.
- La capacidad máxima requerida es ampliamente asegurada por el puente no fallado.
- El puente dañado causa una alarma para una acción correctiva y se desconecta por eliminación de pulsos de disparo.

Figura 14. Redundancia. Cada puente puede soportar carga completa



2.1.1. Canal automático

El módulo de regulación del canal automático consiste de una unidad microprocesadora "Controlador Lógico Programable" (PLC) que constituye un sistema de control digital que permite llevar a cabo la regulación de voltaje en las terminales de un generador a través de la acción de los compensadores y limitadores.

El canal automático tiene entradas y salidas adecuadas para realizar sus funciones que son ejecutadas por un microprocesador (CPU E05) con las siguientes características: I/O digitales configurables 2048, memoria 64K, registros 1024, lenguaje de programación *Ladder logic*, *Instruction list* y *SFC*, velocidad 0.5 ms/K (típico), 2 puertos seriales RS-232 o RS485 configurables, máximo número de módulos de I/O 64, matemática de punto flotante, batería para respaldo de RAM y reloj, comunicación mediante puertos seriales y/o red LAN *Ethernet* TCP/IP) para el control de los limitadores y para la regulación de voltaje.

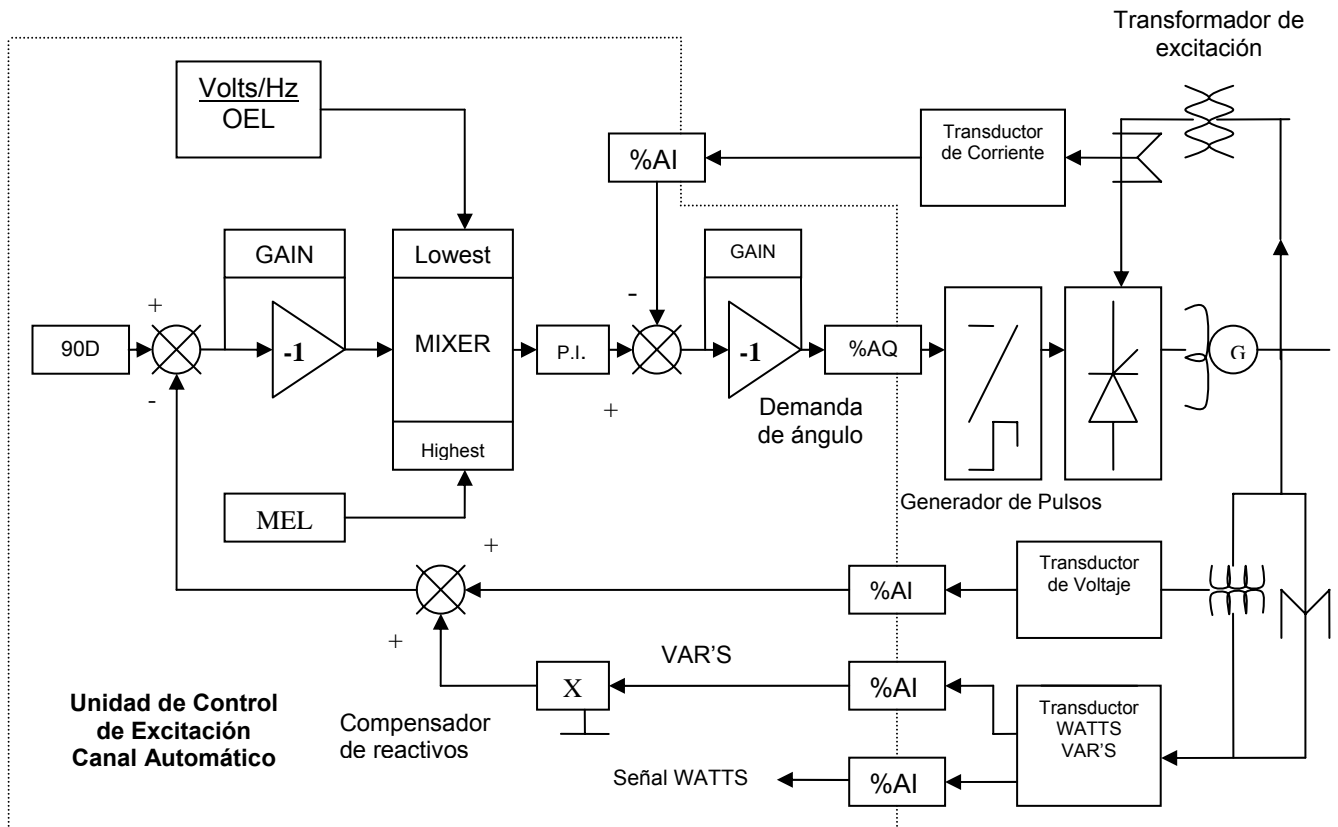
El procesamiento de señales se lleva a cabo por medio de bloques de funciones como son: rampas, integradores, divisores derivadores, amplificadores, etc., los cuales son configurados de acuerdo a las

necesidades de aplicación para llevar a cabo las funciones de control deseadas del RAV.

La utilidad dentro del editor de secuencias, permite implementar diagramas de escaleras reales del sistema usando entradas digitales desde sus módulos asociadas, así como salidas digitales cuya finalidad es la de actuar sobre los elementos primarios y secundarios del regulador automático de voltaje.

El puente rectificador y la lógica asociada están bajo el control del Canal Automático, Canal Manual, con cada canal de regulación totalmente independiente enlazados por un circuito balanceador ó seguidor automático que permite posicionar o igualar la demanda de ángulo de los canales para no permitir ningún tipo de disturbio sobre el voltaje en las terminales del generador cuando se soliciten transferencias de un canal a otro en ambos sentidos, ya sea por operaciones normales o por fallas.

Figura 15. Diagrama a bloques canal automático



2.1.1.1. Potenciómetro de referencia (90D)

Esta función es implementada por un módulo integrador, un sumador y tres selectores de datos. Cuatro señales digitales y una analógica controlan su funcionamiento. El potenciómetro genera una señal de referencia analógica en el rango de - 10 a + 10 Volts de corriente directa dada por la salida del integrador.

Las señales digitales que actúan sobre esta función son de carácter externo y/o interno. Las externas son los comandos de subir y bajar excitación canalizadas por las entradas de secuencia local del PLC del

canal automático, mientras que las internas están formadas por banderas de secuencia local.

Las cuatro señales digitales que gobiernan el integrador aunado a la señal analógica son las siguientes:

- a) Subir referencia (modo normal)
- b) Bajar referencia (modo normal)
- c) Modo preset
- d) Modo seguidor

Los selectores de datos reciben los comandos de subir / bajar, mismos que obligan la selección de señales positivas o negativas, los cuales son sumados por el módulo sumador cuyo resultado se conecta al selector de datos para la selección en modo normal o en modo de seguimiento, en función del canal de regulación seleccionado.

El modo de preset es activado en el integrador, por la secuencia operativa a través de banderas internas, y su valor debe estar fijado a través de una variable, de tal forma que durante una excitación la unidad generadora tenga su voltaje nominal en sus terminales dentro de un tiempo predeterminado por las características de la máquina.

Los límites de excursión a la salida del integrador, así como la velocidad de integración son ajustables dentro de un rango de operación de un 80% a un 110% del voltaje nominal de la máquina con una resolución no mayor de 0.5% y cubrir este intervalo linealmente en un minuto.

El modo seguidor consiste en que la señal de salida del integrador debe igualarse a la señal resultante del circuito comparador de demanda de ángulo de los canales, en el tiempo que le permita su velocidad de cambio.

El potenciómetro 90D cuenta con señalización al panel de mando local y remoto cuando se llega a los límites de operación máxima y mínima.

2.1.1.2. Amplificador de error de voltaje

Esta función elabora la comparación de la referencia de voltaje del generador (90D) proveniente del módulo integrador y la retroalimentación de voltaje escalado en el módulo divisor de entrada. El resultado de esta comparación es amplificado mediante la ganancia de este amplificador la cual es fijada por medio de una variable, dando como salida el error amplificado.

La salida de esta comparación conocida como señal de error de voltaje amplificada, permite un primer ajuste de ganancia del sistema retroalimentado (ganancia del lazo principal de control).

La salida de este primer amplificador puede ser monitoreada en un punto de prueba desplegado en la pantalla del PLC del canal automático.

Como entradas adicionales que actúan sobre el “punto suma” y que son procesadas por este amplificador son:

- Estabilizador del sistema de potencia (PSS)
- Compensador de corriente reactiva (C-R)
- Función escalón

Dichas funciones modifican el régimen de funcionamiento del sistema de excitación.

2.1.1.3. Módulos mezcladores (mínimo y máximo)

Estas funciones en cascada son empleadas para intermodular la salida del amplificador de error de voltaje con las funciones que elaboran los diferentes limitadores que se han incorporado al sistema de control.

Como primer módulo mezclador, se tiene el módulo mínimo, cuya salida es el resultado de la selección de la señal más negativa entre la señal de la salida del amplificador de error de voltaje y la señal de los limitadores Volts/Hertz (V/Hz) o bien del limitador de sobreexcitación (OEL).

Como un segundo paso de mezclado se tiene un módulo máximo, cuya salida dejará pasar la señal más positiva entre la señal proveniente del módulo mínimo y la del limitador de mínima excitación (MEL).

Cada uno de estos módulos mezcladores pueden ser monitoreados en puntos de prueba.

2.1.1.4. Filtro P. I. para el canal automático

La salida del bloque mezclador máximo es conectado a la entrada de un amplificador proporcional-Integral (Filtro P-I) formado por un operacional y un Integrador cuyas salidas son conectadas a un módulo sumador, y permiten llevar a cabo las siguientes funciones:

- Generar la demanda de corriente
- Generar un atraso de fase ajustable para la sintonización del sistema.

- Establecer las condiciones iniciales.

2.1.1.5. Limitador de corriente de campo instantáneo

Esta función actúa al nivel del bloque sumador ajustando su variable para limitar la excursión de este último, bajo condiciones de saturación a valores permitidos y fijar el nivel máximo de salida, el cual se refleja en una demanda máxima de corriente del sistema. (Sujetando a un valor absoluto). Este nivel máximo de salida puede ser ajustado por medio de una variable al valor deseado.

2.1.1.6. Amplificador de error de corriente

La señal anterior (salida del bloque P-I) o demanda de corriente es conectada a la entrada de un amplificador operacional para ser comparada con la retroalimentación de corriente de excitación obtenida del transductor, para generar la señal de error que se convierte en demanda de ángulo. Este amplificador viene a ser parte fundamental del "*Loop*" menor del sistema, encaminado a mejorar la estabilidad y la respuesta del regulador automático de voltaje, haciendo que los efectos de la constante de tiempo del rotor tengan una influencia menor para el sistema.

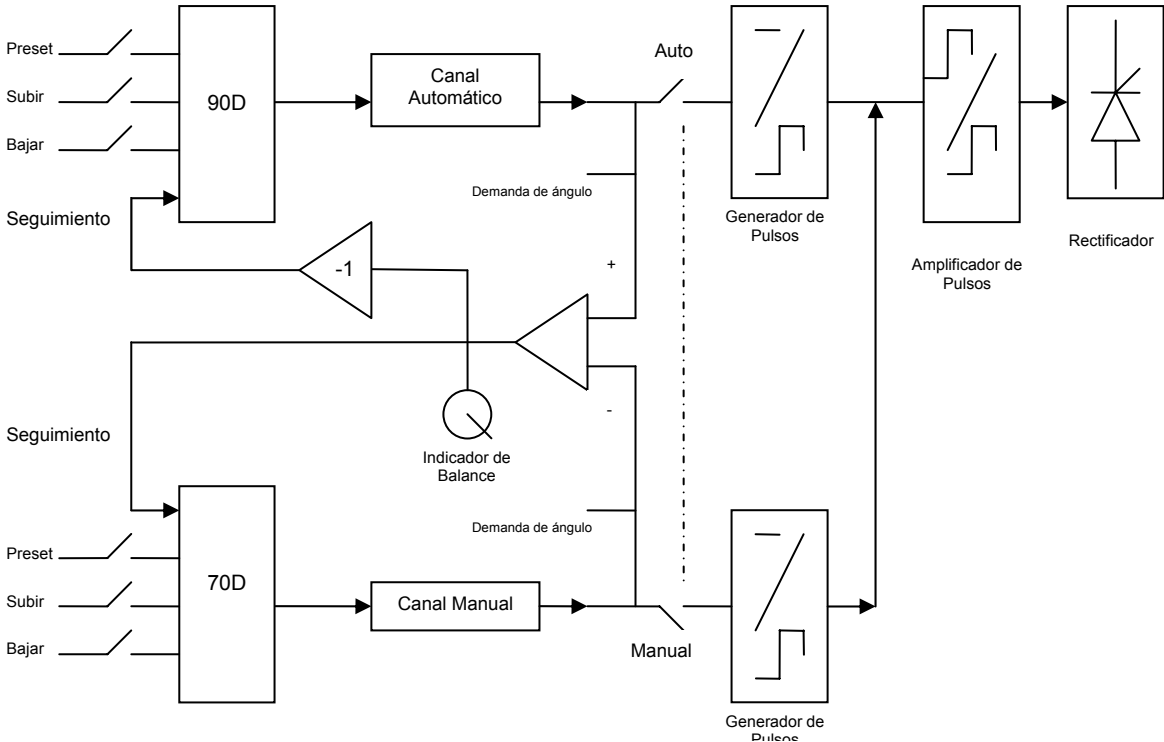
2.1.1.7. Seguidor automático

Un circuito seguidor automático permite comparar continuamente la referencia de ángulo de disparo del canal manual y automático. Las salidas

del seguidor actúan sobre los bloques 90D y 70D (referencia del automático y manual respectivamente) ajustándolos, de tal modo que, el canal que se encuentre en seguimiento, este regulando el nivel de referencia de su ángulo, en la misma posición que el canal que se encuentra seleccionado, evitando de esta manera, perturbaciones en el sistema por una transferencia normal de un canal de regulación al otro o sobre todo durante la transferencia del automático a manual por falla en el canal automático.

La salida del comparador se enlaza directamente hacia un canal de salida para que sea monitoreado por instrumentos externos. El diferencial entre la demanda de ángulo del automático y el manual es conocido como señal de balance.

Figura 16. Diagrama a bloques del seguidor automático



2.1.1.8. Detectores de límites

El detector de límites es un dispositivo útil en procesos en los que se requiere detectar cuando una señal analógica ha rebasado algún límite prefijado.

Este módulo tiene como señal de entrada el voltaje del generador tomado del transductor TDVP.

Esta señal escalada es conectada a los módulos límite-00 y límite-01 para la detección de los niveles del 30% y 90% del voltaje generado.

Ambos límites son ajustables en todo el rango de la señal de entrada en forma independiente por programación, creando un nivel de histéresis para evitar un posible parpadeo en la detección de los niveles (30 y 90%) requeridos para la operación secuencial del sistema.

2.1.1.9. Función escalón

Para efectuar pruebas de comportamiento dinámico, se dispone de un bloque funcional del tipo escalón formado por una referencia interna, ajustada en diferentes niveles por programación, seleccionada por un selector de datos, por un comando externo.

Esta función afecta directamente el punto suma tanto del canal automático como del canal manual, cada vez que sea habilitada.

Mientras este deshabilitada esta función, siempre aportará una señal de cero en el punto suma.

El ajuste del valor del escalón puede ser fijado por una variable interna, teniendo posibilidad de efectuar escalones con diferentes niveles, así como polaridad positiva o negativa.

2.1.1.10. Desexcitación rápida

Esta función actúa durante el proceso de apertura del interruptor de campo (41) ya sea por operación normal o por alguna falla inherente al sistema.

Para lograr lo anterior en el PLC es necesario inyectar una señal completamente negativa - 10V al circuito que procesa la demanda de ángulo (Generador de Pulsos) por medio de una localidad de salida de datos obligando que la señal de demanda se posicione en su mínimo valor, haciendo operar el puente de tiristores como un sistema inversor con un ángulo de conducción máximo de 150 grados eléctricos, obteniendo de esta manera una desexcitación rápida de la unidad generadora.

Cabe recalcar que la desexcitación o la operación del puente como “inversor” puede ser llevada a cabo durante el proceso de regulación como una respuesta a transitorios en el sistema.

2.1.1.11. Compensador de corriente reactiva

Para lograr el funcionamiento estable de varios generadores funcionando en paralelo, se requiere dotar al regulador automático de voltaje de un estatismo de potencia reactiva.

El circuito correspondiente o compensador de reactivos formado por el módulo multiplicador el cual toma la señal de potencia reactiva VAR's e introduce un incremento en la retroalimentación cuando la unidad absorbe reactivos, proporcionalmente en porcentaje a la calibración de una variable.

Similarmente decrementa dicho voltaje de referencia cuando la unidad produce reactivos.

El Compensador de Reactivos es ajustable en forma accesible para cualquier valor entre 0% y 12% de reactancia (en base a los datos nominales del generador) para poder variar la característica de compensación de reactivos de acuerdo a la necesidad de cada instalación.

2.1.1.12. Estabilizador del sistema de potencia (*Power system stabilizer –PSS-*)

Descripción general

Para amortiguar las oscilaciones propias del rotor del generador, así como las oscilaciones de más baja frecuencia producidas en el sistema interconectado se emplea un circuito de estabilizador cuya función principal es la de introducir una señal de compensación a la entrada del amplificador de error de voltaje del canal automático digital. El PLC materializa las funciones de transferencia que proporciona el incremento del margen de estabilidad necesario para amortiguar el movimiento del rotor dentro de su campo giratorio.

Diferentes variables pueden ser utilizadas como entradas del estabilizador de potencia: velocidad de la flecha, frecuencia, corriente activa

del alternador, potencia eléctrica, aceleración. Todas estas variables hacen referencia a la posición física del rotor dentro del campo giratorio.

Esta posición física esta representada por el ángulo interno de la unidad, el cual se define en una forma simple con la ecuación siguiente:

$$E_a = V + Ri + JLI = V + Ri + JXI$$

Al incrementar el ángulo interno, el par de sincronización:

$PS = \frac{V \cdot E}{X_d} \text{Sen} \theta$ disminuye con el siguiente riesgo de pérdida de excitación cuando se alcance un ángulo de 90°.

Para una potencia eléctrica establecida el ángulo interno θ depende del nivel de excitación de la máquina síncrona.

Para niveles de excitación bajos (fuerza electromotriz E_a pequeña) el ángulo interno crece y para niveles de excitación elevados (fuerza electromotriz importante) el ángulo interno disminuye. En otras palabras, entre mayor sea la excitación de la unidad, mayor será el par de sincronización, menor será el ángulo interno y mayor estabilidad presentará esta unidad para el sistema interconectado.

Lo anterior es particularmente válido durante los transitorios provocados por las oscilaciones naturales del rotor de la unidad o por las oscilaciones dinámicas originadas en el sistema interconectado. Cada una de esas oscilaciones tiene su propia dinámica, en lo general la oscilación pendular del rotor tiene una frecuencia mayor (1 a 2 Hz) mientras que las oscilaciones provocadas por el sistema son del orden de fracción de Hertz.

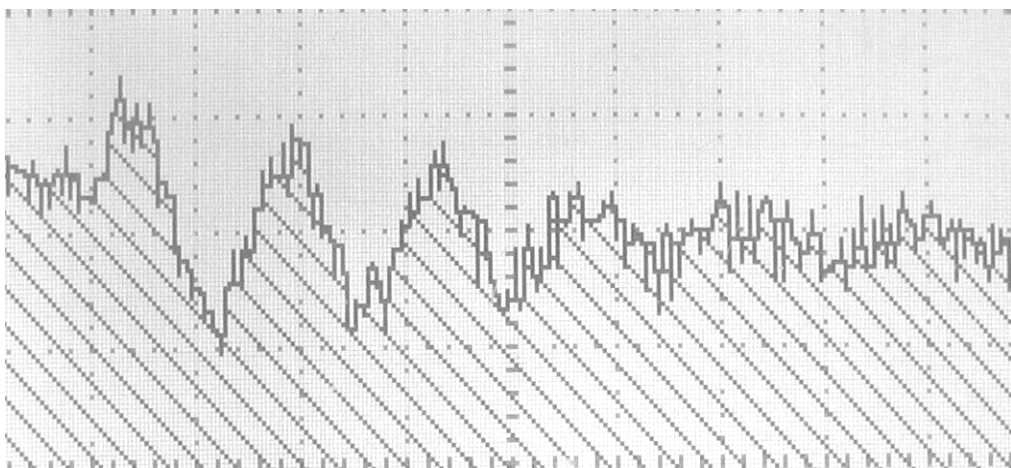
Dentro de este rango de frecuencias, el estabilizador de potencia tiene como objeto añadir un amortiguamiento adicional con el fin de estabilizar el rotor cuya característica intrínseca es la de un sistema subamortiguado.

Al intentar controlar la posición del rotor en el campo giratorio del estator mediante un loop adicional de regulación de posición, se introduce una función de transferencia del segundo orden cuyos parámetros se deducen de la respuesta a escalones del rotor (periodo de oscilación ω_0 y amortiguamiento reducido δ).

$$H(s) = \frac{K}{\omega_0^2 + 2 * Z * \omega_0 * s + s^2}$$

Dicha función de transferencia introduce un retardo de fase importante que imposibilita la estabilización de loop cerrado de posición del rotor.

Figura 17. Respuesta PSS en lazo abierto



Para contrarrestar este retraso de fase, el PSS debe producir un avance de fase de por lo menos 120 a 140 grados en la zona de frecuencias

críticas para la estabilidad de la unidad o zona de frecuencias propias de oscilación del rotor.

Lo anterior se obtiene mediante el uso de un circuito de avance y retardo de fase (lead-lag) cuya función de transferencia es la siguiente:

$$H(s) = \frac{T_0 s(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)(K_1)}{1 + T_0 s(1 + T_3 s)(1 + T_4 s)}$$

Una vez centrado el filtro para producir el avance de fase requerido en la zona de las frecuencias mencionadas anteriormente, se procura maximizar el ajuste de la ganancia K_1 hasta alcanzar un valor que satisfaga el compromiso estabilidad / eficiencia de la respuesta.

El ajuste adecuado de las constantes de tiempo T_1, T_2, T_3, T_4 dan al círculo de avance-retardo de fase la característica en un filtro pasa-banda convencional.

La utilización de la constante T_0 (wash-out) tiene los siguientes propósitos:

Las oscilaciones de baja frecuencia generadas por diversos motivos: variaciones de frecuencia del sistema interconectado, variaciones de frecuencia de un sistema aislado, variaciones de carga originada por la turbina y cuyo periodo es relativamente bajo (0.01 a 0.2 Hz) no deben afectar el sistema de excitación y consecuentemente deben ser filtradas por un filtro "pasa alto" el cual reacciona solo a oscilaciones de mayor frecuencia (>0.2 Hz).

La señal generada por el estabilizador del sistema de potencia es introducida en el punto suma del primer amplificador de error de voltaje y su amplitud es limitada a una excursión máxima de ± 0.1 p.u.

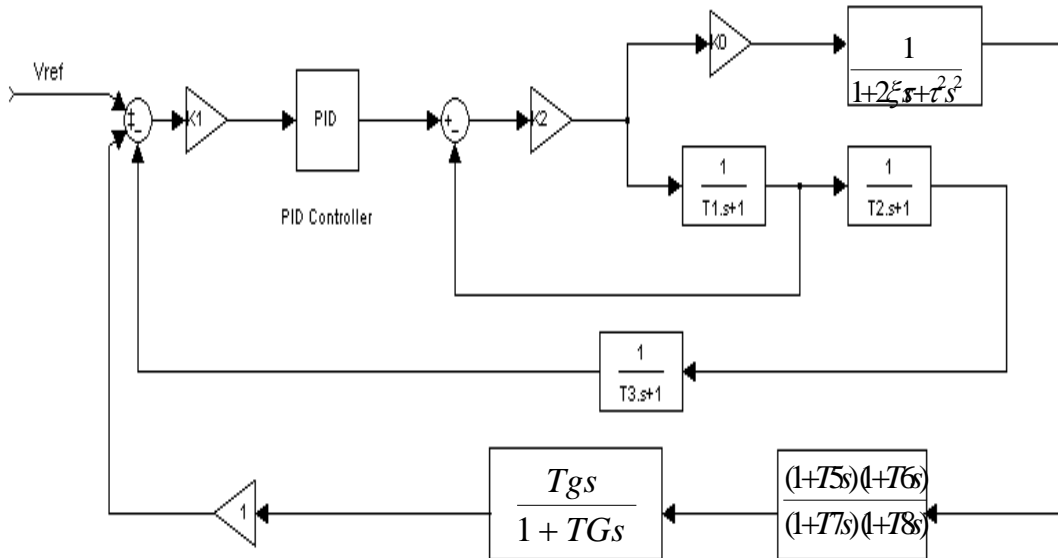
Debido a las dos etapas de derivación, cualquier señal de alta frecuencia o ruido en la señal primaria (velocidad, aceleración, potencia) se verá seriamente amplificada.

Este fenómeno se reduce substancialmente por la introducción de una banda muerta que elimina el ruido de fondo y deja pasar solo las señales de corrección de la posición del rotor.

La implementación de lo anterior se hace a través del PLC GE FANUC el cual permite con sus amplios programas de utilerías configurar cualquier función de transferencia. Utilizando el siguiente diagrama de control.

En la estructura del programa se hace uso de todas las técnicas de computación analógica y de simulación de sistemas dinámicos. Las curvas características que resultan de estas simulaciones.

Figura 18. Lazo de control del estabilizador de potencia



En lo particular se hace énfasis sobre la materialización de circuitos derivadores mediante el uso de una constante de tiempo en el loop de retroalimentación de amplificadores de alta ganancia. Con el uso de esta técnica se realizaron las funciones de transferencia $(1 + T1S)$ y $(1 + T2S)$.

Los rangos de ajuste de las diferentes constantes de tiempo son los siguientes:

- $T0$: 0.25 seg. a 50 seg. (*wash out time constant*)
- $T1, T2$ 0.1 seg. a 2 seg. (*Lead time constant*)
- $T3, T4$ 0.002 seg. a 0.2 seg. (*Lag time constant*)

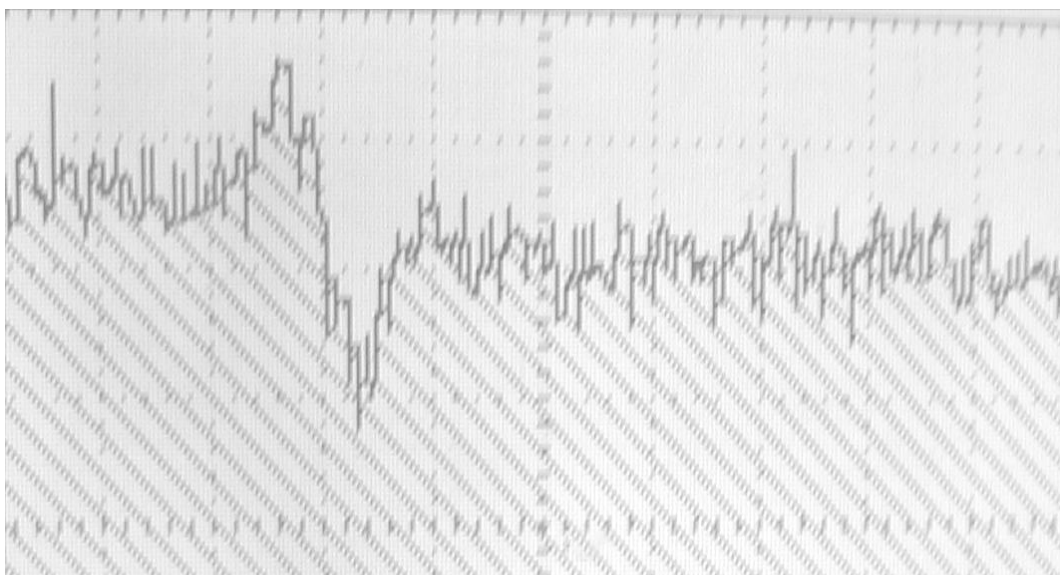
Las frecuencias correspondientes son las siguientes:

- $F0$: 0.003 a 0.6 Hz
- $F1, F2$: 0.08 a 1.6 Hz
- $F3, F4$ 0.8 a 80 Hz

La activación de la señal del PSS se lleva a cabo cuando el operador de la unidad a través de un selector coloca el PSS en posición "ON".

Esta señal a través de la señal de entrada actúa sobre la lógica del PLC operando una bandera interna que hace funcionar un selector de datos para colocar la señal del PSS en un registro de salida y generar la señal que se conectará en el punto de suma del amplificador de error de voltaje del canal automático.

Figura 19. Respuesta del PSS



2.1.1.13. Limitador de Volt/Hertz

Este limitador tiene como objeto mantener constante la relación Volts/Hertz una vez que esta haya alcanzado un valor máximo preestablecido (1.1 p.u. o el seleccionado por el usuario). La señal de referencia es tomada de un transductor de Volt/Hertz cuya salida es canalizada hacia el PLC del canal automático para su procesamiento.

En lo particular, este circuito permite limitar la sobre excitación de la unidad en vacío, sin embargo, su función principal es la de limitar la corriente de excitación en caso de disminuir la velocidad de la turbina (disparo de turbina con quebradora de campo conectada), para no sobrecalentar el rotor de la máquina o los circuitos involucrados.

La salida de este limitador se enlaza hacia el bloque mínimo en el PLC el cual selecciona la señal de ésta última o la señal del limitador de sobreexcitación (OEL), según los requerimientos del sistema.

Al llegar a tener un valor inferior a la señal del loop principal de regulación de voltaje del alternador el mínimo realiza la transferencia de un loop de regulación al otro, convirtiendo el sistema de excitación en un regulador de flujo magnético. Al mantener la relación Volt/Hertz constante, se mantiene el flujo constante puesto que la relación Volt/Hertz es directamente proporcional al flujo interno de la unidad.

El principio de operación del limitador de volt/hertz es utilizado para evitar la saturación del generador y los dispositivos eléctricamente conectados a este como son los transformadores.

La relación de volt/hertz se incrementa en forma proporcional al voltaje del generador por tanto si se incrementa el voltaje por sobre excitación o durante un rechazo de carga, se producirá un flujo magnético excesivo que puede dañar a los transformadores o al generador.

De la misma forma si se disminuye la velocidad del generador en condiciones de vacío el regulador automático tenderá a mantener el voltaje en terminales en el valor nominal a expensas de una corriente mayor de excitación.

El limitador de volt/hertz compara la relación de V/Hz proveniente del transductor de volt/hertz (TDVH) con una referencia y envía una señal analógica proporcional de limitación al mezclador del canal automático para limitar la entrada del segundo amplificador PID al valor seleccionado como ajuste máximo de relación V/Hz fijado en el Drive Master Plus.

$$\phi = \frac{Vt}{w} \Rightarrow \frac{Vt}{2*\pi*f} \Rightarrow \frac{\text{Volt}}{\text{Hertz}}$$

donde,

ϕ = flujo eléctrico

Vt= voltaje en terminales

w= velocidad angular

2.1.1.14. Limitador de mínima excitación (*Minimum excitation limiter –MEL-*)

Este limitador tiene como objeto evitar la operación del generador fuera de su curva de capacidad y eliminar la posibilidad de aparición de oscilaciones por rebasar los límites de estabilidad, por pérdida de excitación. La curva de capacidad de la máquina, es implementada por programación con los datos de potencia activa y reactiva leídos por localidades de entrada de datos para los MW y para los MVARs en el PLC, fijando las calibraciones de las diferentes variables contenidas en el algoritmo programado para este fin.

La señal de limitador MEL es introducida al módulo mezclador máximo la cual es comparada con la señal de la salida del amplificador de error de voltaje (vía mínimo). El módulo máximo selecciona en su salida la señal

mayor de ambos, evitando así que el sistema opere más allá de un valor mínimo de excitación.

El limitador mantiene la excitación del regulador arriba de la curva del límite de estabilidad síncrona del generador cuando este se encuentra en la región de desexcitación absorbiendo reactivos del sistema interconectado. La operación debajo de estos límites produce daños mecánicos y eléctricos al generador.

Cuando el sistema interconectado incrementa el voltaje o el operador disminuye el ajuste del 90R de forma tal que el RAV disminuye la corriente de excitación del campo para disminuir el voltaje en terminales a fin de igualarlo con el ajuste deseado. La potencia reactiva se absorbe en el generador de acuerdo a la impedancia de interconexión (X_e) y a la síncrona de la unidad (X_d) y al voltaje en terminales E_t .

Puesto que para el regulador de voltaje la potencia reactiva no es una variable dependiente de su lazo de regulación el tenderá a disminuir la corriente de excitación y por consiguiente a disminuir el voltaje de terminales a partir de un incremento en la absorción de la potencia reactiva que de ser sustancialmente grande puede llevar a una operación fuera de la curva de estabilidad síncrona al generador con la consiguiente pérdida de sincronía.

El MEL verifica la posición de operación del generador megawatts y megavars y el voltaje en terminales obtenida de transductores y la compara con una referencia preestablecida enviando una señal analógica positiva al circuito mezclador del canal automático de forma que siendo superior a la señal del amplificador de error de voltaje que se torna negativo toma el control del amplificador PID de esta forma la corriente de excitación del generador es controlada por el MEL de acuerdo al ajuste preestablecido y que depende del voltaje en terminales.

Considerando que una máquina síncrona está conectada a un sistema con bus infinito a través de una reactancia externa X_e , para que permanezca en sincronismo, ciertas relaciones entre el voltaje terminal, la potencia activa y la potencia reactiva deben existir.

Si existe un cambio de requerimientos de potencia reactiva de la máquina ocasionada por el sistema, esta podrá caer por debajo de la curva y perderá el sincronismo, así como también si el operador subexcita la máquina por debajo de dicha curva, de ahí la necesidad de contar con un limitador de baja excitación.

La detección de las señales de voltaje terminal, potencia activa y potencia reactiva de la máquina tienen las siguientes polaridades:

- Voltaje en terminales: Negativa
- Potencia activa (W): Negativa como generador
 Positiva como motor
- Potencia reactiva (Q): Negativa con reactivos saliendo
 Positiva con reactivos entrando

Centro:

El centro de operación viene dado por:

$$C = \frac{W^2 + Q_2^2 - Q_1^2}{2(Q_1 - Q_2)}$$

Radio:

El radio limitante viene dado por:

$$R = C + Q1$$

Ventajas:

- Variación de la curva del MEL en función del voltaje.
- La curva puede ser desplazada hacia arriba o hacia abajo.
- El punto de alarma es ajustable en un punto independiente de acuerdo a necesidades del sistema.
- La limitación se elimina cuando esta fuera de sincronización.
- El esquema puede ser modificado.
- Sintonización de señales de retroalimentación.

2.1.1.15. Limitador de máxima excitación (*Over excitation limiter –OEL-*)

El limitador de sobre excitación tiene la función de evitar el calentamiento del rotor y estator del generador cuando este se encuentra en régimen de sobreexcitación, limitando la excitación del campo de forma tal que opere dentro de la curva de capacidad del generador en modo de sobreexcitación.

De forma similar al limitador de mínima excitación, el limitador de sobre excitación compara un radio que limita la curva de capacidad del generador a un valor seguro de operación. El radio se compara con el valor real de

operación del generador que se obtiene a partir de la medición de watts y var's del generador y se suman vectorialmente al centro para obtener un vector de radio real que se compara con un radio de referencia.

La diferencia es amplificada y aplicada como una señal analógica de corrección al mezclador analógico que limita la excursión del amplificador PID limitando la demanda de corriente de excitación del regulador.

La salida del amplificador se aplica a la entrada del módulo *LOWEST*, de tal forma que si es inferior a la señal del limitador de volt/hertz a la salida del módulo se obtendrá el valor de la variable de salida correspondiente al valor del limitador de sobre excitación.

2.1.1.16. Limitador de corriente del estator

- Limita la salida del generador dentro de su curva de capacidad cuando se aproxima a la corriente máxima de salida del estator.
- Opera en la región del factor de potencia considerado.
- Protege contra un sobrecalentamiento del embobinado del estator.

2.1.1.17. Limitador de sobre voltaje de campo (MXL)

Este limitador tiene como objeto supervisar el voltaje de excitación con características de tiempo inverso para impedir que la corriente de excitación rebase la capacidad térmica del rotor o de los circuitos involucrados, tales

como: convertidor de potencia, anillos colectores etc. con máquina sincronizada o impedir que la unidad se sobreexcite en vacío.

La señal de voltaje de excitación se recibe de un aislador de señal conectado a la salida del convertidor de potencia mediante un puente divisor, misma que es leída por una entrada analógica del PLC.

En caso de operación de dicho limitador la señal anterior se convierte en señal de demanda de ángulo para el esquema de potencia.

2.1.1.18. Generador de pulsos de disparo

Este módulo es idéntico para los dos canales de regulación automático y manual. El módulo generador de pulsos es una unidad que genera los pulsos de disparo para un esquema rectificador controlado, trifásico del tipo puente de graetz, a partir de una referencia de ángulo elaborada en el PLC del canal automático, del PLC del canal manual o del canal de respaldo.

La referencia de ángulo es comparada con las señales de rampa, las cuales se derivan de la alimentación de entrada de c.a. a través de un transformador de acoplamiento. La salida de ésta etapa comparadora activa las unidades de disparo (esquema oscilador) para el encendido de los tiristores del convertidor de potencia.

El ajuste del punto de disparo o ángulo de conducción relativo a la alimentación de c.a. a través de la señal de referencia de entrada genera un incremento o decremento en la conducción de los tiristores y de ahí el voltaje de cd para el campo del alternador.

Un circuito detector de rotación de fases incorrecta bloquea la referencia de ángulo inhibiendo los pulsos de disparo para los tiristores.

2.1.1.19. Generador de paro final

El circuito de paro final (*END STOP*) genera pulsos de disparo, los cuales son utilizados cuando el convertidor funciona como inversor y asegura la conmutación de los tiristores.

La señal de salida de este circuito, es la suma de las entradas al amplificador y es una señal básicamente negativa.

2.1.1.20. Inversor

El amplificador inversor tiene como finalidad invertir las señales de “demanda de ángulo” o de “paro final” a fin de obtener las relaciones de polaridad correcta para los comparadores asociados que controlan a los tiristores positivos, es decir R+, Y+, B+.

La señal no invertida en el cátodo de un diodo es pasada a las entradas de los comparadores, que controlan el ángulo de disparo de los tiristores negativos, es decir R-, Y-, B-.

2.1.1.21. Corrección contra desbalance de fases

Con el neutro de la alimentación flotando cualquier desviación del potencial de tierra es visto por el sistema de control electrónico en las 3 fases de la alimentación (referido como componente de secuencia cero de desbalance).

Este circuito es diseñado para detectar y generar una señal igual y opuesta al desbalance de la alimentación, a fin que los circuitos electrónicos operen directamente de la alimentación y cancelando realmente el desbalance.

La componente de secuencia cero es determinada desde el punto de suma de la red de resistencias divisoras de potencial conectados a las líneas de alimentación. La señal resultante es luego invertida y escalada por un amplificador de banda ancha e inyectada a todos los circuitos de control derivando sus señales de C.A. directamente de las líneas de alimentación.

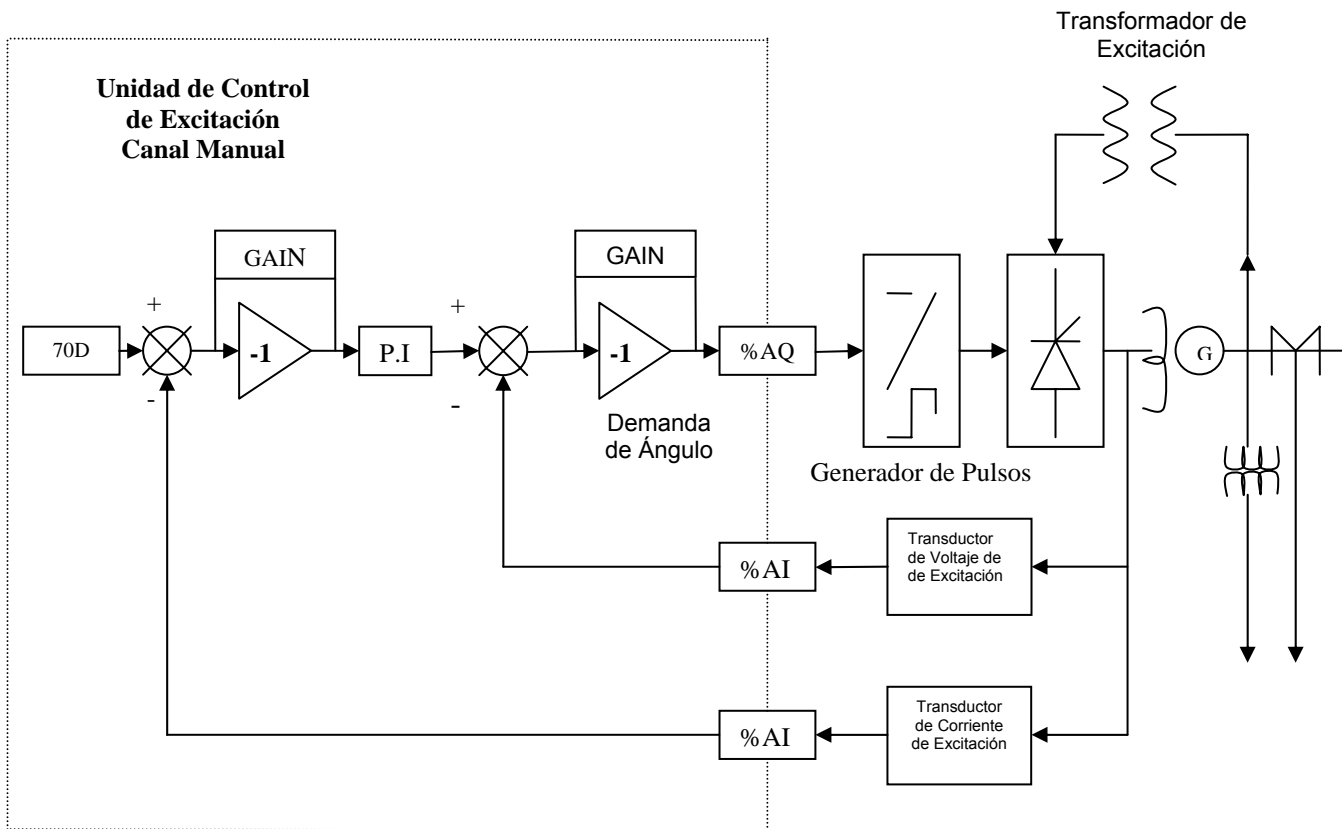
2.1.2. Canal manual

La única diferencia respecto al canal automático es que este regula el voltaje en terminales, mientras que el manual regula la corriente de excitación; de aquí que los conceptos descritos con anterioridad para el canal automático así como el hardware son válidos para el manual intercambiando solamente:

- Potenciómetro de referencia 90D por potenciómetro de referencia 70D.

- Amplificador de error de voltaje por amplificador de error de corriente.
- Limitador de corriente de campo instantáneo por limitador de voltaje de campo instantáneo.
- Amplificador de error de corriente por amplificador de error de voltaje de excitación.

Figura 20. Diagrama a bloques canal manual



El canal manual del sistema, se considera hasta cierto punto como un canal de respaldo del canal automático, en caso de falla en este último.

La función principal de este canal de regulación, es la de fijar una corriente en el campo del alternador, a partir de una referencia dada.

Las funciones de regulación del canal manual se encuentran contenidas en las tarjetas generadoras de pulsos, cuyas funciones desde el punto de vista electrónico son similares a las del canal automático a excepción de que en este canal se ha suprimido el circuito mezclador "MIXER" y en lugar de tener el circuito detector de voltaje contiene un circuito detector de corriente. Sin embargo, el concepto funcional de cada uno de los circuitos son propiamente particulares de este canal.

La referencia de corriente de excitación base es inyectada al punto suma principal de la misma manera se inyecta la señal del potenciómetro estático 70D, actuando éste como un ajuste fino de la corriente de excitación, además de que por medio de este potenciómetro estático se fija el rango para los límites de corriente de excitación establecidos.

Las referencias antes mencionada de polaridad negativa, son comparadas con una retroalimentación de corriente de excitación, de polaridad positiva, la cual proviene del transductor "*DET-COR*"

El resultado de esta comparación alimenta la entrada del primer amplificador llamado amplificador de error de corriente, cuya salida alimenta la entrada inversora del segundo amplificador, el cual está configurado como un amplificador PID.

El control de la corriente de excitación del alternador a través de los tiristores se efectúa comparando la referencia del potenciómetro 70D con

una señal de retroalimentación obtenida desde un detector de corriente de excitación.

La salida de esta comparación conocida como señal de error de corriente es enviada al circuito de amplificación, cuya salida se estabiliza en un filtro del tipo P.I.

La salida del amplificador de demanda de ángulo o regulador de voltaje de excitación es comparada con una señal rampa, la cual es derivada de la alimentación de entrada de c.a. (voltaje de sincronismo de pulsos). La salida de esta etapa comparadora es utilizada por las unidades de disparo para encender los tiristores del convertidor. El ajuste de punto de disparo o ángulo de conducción relativo a la alimentación de c.a. por medio de la señal de referencia de entrada da un incremento o decremento en la salida de los tiristores y de ahí la corriente de excitación del alternador. La transferencia del canal automático al canal manual ya sea por peticiones normales de operación o por fallas, no provoca ninguna perturbación, ya que ambos módulos se encuentran bajo el control del circuito balanceador/ seguidor automático.

Todos los módulos que conforman el canal manual son completamente independientes del canal automático, tal que este canal de regulación puede ser operado con los módulos del automático apagados o desconectados.

2.1.2.1. Potenciómetro de referencia (70D)

La señal de referencia de corriente para el canal manual esta dada por el módulo Integrador el cual comparte la señal seleccionada de los selectores

de datos y los comandos de subir / bajar, referencias obtenidos de las interfases de entrada.

Tres modos de funcionamiento caracterizan a este bloque, los cuales son:

- Modo seguidor.
- Modo preset.
- Modo normal.

En modo seguidor el bloque 70D recibe la señal generada por el circuito seguidor por medio del selector de datos. En modo seguidor, esta función incrementa o decrementa su salida de tal manera que la señal de la referencia de ángulo del canal manual esté al mismo valor que la señal de referencia de ángulo del canal automático.

En modo preset, la salida de este bloque toma un valor preestablecido el cual es ajustado por programación. Se activa este modo de funcionamiento cuando el interruptor de campo es operado de manera que al excitar la unidad esta última quede con el voltaje nominal en sus terminales. Este valor de preset permanece mientras el módulo Integrador no reciba ningún otro comando que lo haga cambiar de valor.

En modo normal, el bloque 70D recibe mandos de subir o bajar para incrementar o decrementar la salida del mismo, mientras este presente el mando, la salida se decrementa o incrementa según sea el caso. En el momento de liberar el mando, la salida 70D permanece estática, con el valor que se tenía al momento de liberar el mando.

La velocidad de cambio puede ser ajustada por programación al valor deseado, asimismo los límites superior e inferior del potenciómetro hasta

crear un nivel de excursión que garantice una operación dentro de un rango aceptable para las condiciones del sistema.

2.1.2.2. Retroalimentación de corriente

Mediante 3 transformadores de corriente colocados en las 3 fases de alimentación del puente rectificador se retroalimenta la corriente de excitación del campo del generador. Los 3 TC se conectan en delta y la señal en miliamperes de c.a. es tratada por el transductor TDI proporcionando una salida de voltaje en corriente directa (0-10V). Un circuito de calibración montado en el PLC del canal manual recibe esta señal del transductor y permite fijar los niveles de la señal de retroalimentación a través de un escalador ajustando su variable.

2.1.2.3. Amplificador de error de corriente

Este bloque funcional efectúa la comparación entre la referencia de corriente (dada por el bloque Integrador) y la retroalimentación de corriente obtenida a través de una entrada analógica para crear una señal de error, misma que es amplificada para su procesamiento y tratamiento en el siguiente módulo de regulación.

Como entrada adicional a este punto se tiene la señal de escalón, función utilizada para optimizar los ajustes de ganancia y estabilidad del sistema.

2.1.2.4. Filtro P.I.

Este módulo es similar al filtro P-I para el canal automático, constituye una función opcional ya que las características de regulación del canal manual (corriente de excitación) no requieren una compensación tan rigurosa como en el caso del canal automático.

Los bloques amplificadores y el módulo Integrador están previstos para realizar esta función cuya salida representa la señal de referencia de voltaje de excitación ó demanda de voltaje de excitación.

2.1.2.5. Limitador instantáneo del voltaje de campo

Mediante un ajuste se puede limitar el nivel máximo de salida del bloque P-I., por medio del módulo limitador para crear un nivel de voltaje de campo menor ó igual al nominal. Dicha señal se convierte en señal de demanda de voltaje de campo para el siguiente lazo de control.

2.1.2.6. Amplificador de voltaje de excitación

El error generado por la comparación de la señal de demanda de voltaje de campo y la retroalimentación de voltaje de campo obtenido, es tomado por el amplificador de voltaje de campo el cual da como resultado la referencia de ángulo del canal manual.

La ganancia de este lazo de control puede ser ajustada a través de una variable.

Para condiciones de saturación de este amplificador se ha previsto un ajuste que sujetará la salida a un valor máximo permisible, para asegurar un ángulo mínimo de disparo al puente rectificador, este ángulo correspondería al voltaje de techo cuando el puente rectificador este a plena conducción. (Se asegura un ángulo de disparo de 5° como mínimo).

2.1.2.7. Seguidor automático

Este módulo amplificador recibe las señales de demanda de ángulo de disparo tanto del canal automático como del canal manual.

Esta comparación continua sirve como referencia para los dos potenciómetros en el modo de seguimiento, además de que la diferencia entre los pulsos de disparo conocido como error, refleja el desbalance de fases de ambos canales. La desexcitación rápida y la detección de límites, así como los módulos de generación y amplificación de pulsos son idénticos a los del canal automático por lo que todos los conceptos referidos serán aplicables para este canal.

2.1.3. Esquemas de pulsos de disparo

La señal de referencia de ángulo elaborada por las funciones programadas en el canal automático y manual es utilizada para activar al módulo disparador generador de pulsos el cual tiene como funciones primordiales:

- Elaborar los pulsos de disparo
- Proteger el esquema contra una secuencia incorrecta de fases

El voltaje de sincronización utilizado en este módulo está aislado y en fase con respecto a las líneas principales que alimentan el puente rectificador. A partir de este voltaje de sincronización se generan las rampas correspondientes, (para los seis canales de disparo) las cuales se comparan con la referencia de ángulo.

En forma análoga los pulsos de disparo generados por el canal manual, son llevados a cabo en el módulo generador de pulsos.

Dentro del esquema general existe una lógica de selección para el canal automático o manual y las salidas de disparos provienen de uno u otro canal y dependiendo de las condiciones operativas del sistema de excitación, alimentan a los esquemas amplificadores “*BOOSTERS*” para manejo de los semiconductores de potencia.

Los módulos generadores de pulsos no liberan pulsos en forma simultánea solo serán liberados por el canal seleccionado, no obstante la referencia de ángulo en ambos está activada simultáneamente.

Para inhibir los pulsos de disparo es necesario “cortar” la alimentación a los circuitos osciladores. Esta acción es llevada a cabo por la secuencia operativa.

2.1.3.1. Amplificador de pulsos (*BOOSTER*)

Los módulos generadores de pulsos del esquema no tienen potencia suficiente para activar varios tiristores a la vez (caso de dos o más tiristores en paralelo).

Para que los pulsos tengan suficiente potencia, se utilizan amplificadores o “*BOOSTERS*”. Estos equipos almacenan energía durante los periodos de no aparición de los pulsos mediante capacitores, los cuales se descargan en los transformadores de pulsos al momento del disparo.

Dichos amplificadores reciben su alimentación de transformadores de 220/120 VCA 100VA conectados a la salida del transformador de excitación y protegidos por fusibles de 10 amperios 600 V en el lado primario. En lo particular se genera una alarma de pérdida de pulsos en caso de que hubiera desaparecido alguno de los mismos, en cualquiera de los seis canales que integran el *BOOSTER*.

2.1.3.2. Ráfaga de pulsos

La ráfaga de pulsos tiene como objeto disparar los tiristores con pulsos de alta frecuencia capaces de llevar los puentes de rectificación a plena conducción mientras dure la aplicación de los mismos.

Con la excitación inicial y mediante el potencial tomado del banco de baterías, la unidad se excita con un voltaje igual al 20% o 30% del voltaje nominal. La ráfaga de pulsos funciona como regulador de “todo nada” mandando a los tiristores a plena conducción dependiendo de la polaridad del amplificador de corriente desde el 30% hasta el 90% del voltaje nominal.

Un circuito de retroalimentación permite regular la corriente de campo alrededor de su valor nominal.

En esta forma se puede utilizar la ráfaga de pulsos como tercer canal lo que permite excitar la unidad, sincronizarla y tener en forma similar el funcionamiento obtenido con el canal automático o el canal manual.

Cabe recalcar que la unidad puede ser excitada, con el esquema de control automático o con el esquema de control manual. En cualquiera de los casos antes mencionados la ráfaga de pulsos siempre será activada mientras dure la excitación inicial del sistema.

2.1.4. Fuentes de alimentación

La alimentación de corriente directa de la electrónica y la lógica tiene la siguiente forma de operación:

La fuente FU-AVR-D puede ser alimentada ya sea con 125 VCD provenientes del banco de baterías o bien con 90 VCA del transformador de respaldo (TRRE), este voltaje se rectifica y filtra para formar una OR con el voltaje de baterías. La salida de este arreglo OR alimenta al PLC, en los mandos del interruptor de excitación inicial (31), y el interruptor de campo (41), y los relevadores de interposición, formando en conjunto el circuito de la lógica.

De esta forma se logra un respaldo para la alimentación de 125 VCD haciendo al RAV autónomo ante una posible salida del banco de baterías mientras la unidad se mantenga generando.

2.1.5. Circuitos de protección

Diferentes circuitos de protección se han intercalado en los puntos más críticos del sistema de excitación, para prever cualquier tipo de daño que pudiera ocasionarse por sobretensiones por maniobra del sistema de potencia.

También se tienen circuitos que constantemente vigilan la correcta operación del regulador automático de voltaje, actuando para disparar el interruptor principal de campo y el interruptor de máquina (52G) por cualquier problema de sobre corriente o sobrevoltaje de excitación en el lado del rotor por falla de un dispositivo de regulación.

Asimismo se tienen sensores de fases y niveles normales de operación que actúan para realizar transferencias de un canal de regulación a otro, correlacionado con la filosofía de la secuencia operativa.

2.1.5.1. Circuito supresor RC en las líneas principales de c.a.

Este circuito se localiza en la parte superior frontal del interruptor de campo, el cual se alimenta a través de los fusibles tripolares.

Dicho supresor se utiliza para la protección contra sobre tensiones externas provenientes del transformador de excitación.

La función de este circuito es eliminar los sobre voltajes de alta frecuencia provenientes del primario del transformador de excitación que son transmitidos por las capacitancias distribuidas entre el devanado primario y

secundario de dicho transformador. Estos picos de voltaje se originan por cierre o apertura del interruptor principal en el primario del transformador.

El circuito esta formado por un arreglo RC en estrella, y conectado directamente a las fases provenientes del secundario del transformador de excitación.

2.1.5.2. Circuito supresor Clipper

La función de este supresor es la de proteger a los tiristores del puente rectificador de las sobretensiones entre fases provenientes del transformador de excitación, además de disminuir la distorsión de las tensiones entre línea que ocurren por el efecto de la conmutación. Dichas distorsiones pudieran producir flancos elevados de voltaje en los tiristores con el consiguiente mal funcionamiento del puente.

2.1.5.3. Circuitos supresores de corriente directa

Los circuitos supresores colocados en el lado de la salida de DC del convertidor de potencia tienen como función proteger a los circuitos rectificadores y al campo del generador de sobretensiones transitorias de picos elevados.

Estas sobretensiones pueden ocurrir cuando el generador pierde sincronismo, en transitorios producidos en el primario del transformador de excitación como consecuencia de la conmutación de los tiristores o por la

interrupción de la corriente de excitación a la carga inductiva del campo del generador por la apertura del interruptor de campo.

Se dispone de una resistencia de elevada capacidad de potencia comúnmente llamada resistencia Holding que permite el drenaje de una corriente mínima para la excitación en vacío de los tiristores, la cual proporciona adicionalmente un retorno para la descarga de los capacitores empleados en los supresores.

Los circuitos empleados son de dos tipos y se conectan en paralelo a la salida de DC del RAV.

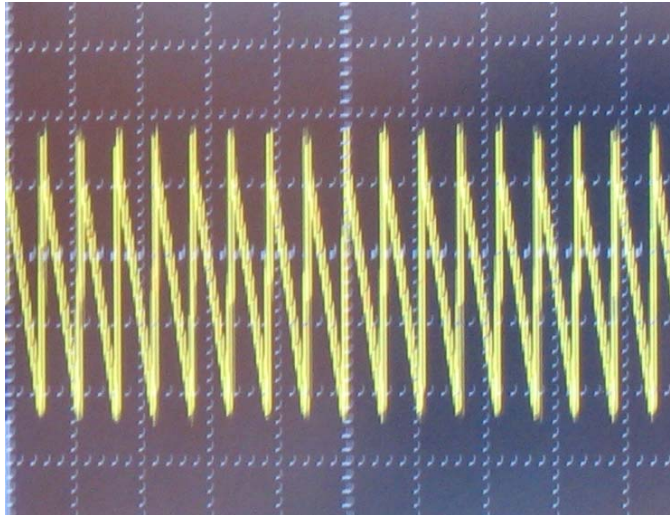
- a) Supresor de voltaje de flecha
- b) Resistencia no lineal (*Crow Bar*)

a) Supresor de voltaje de flecha

El circuito está formado por una resistencia y un capacitor no polarizado en aceite conectados entre los buses de DC. El circuito es un filtro que deja pasar las frecuencias altas disminuyendo la amplitud de los transitorios. Este circuito se implementó para eliminar los efectos causados por las corrientes de Foucault que aparecen sobre la flecha del generador.

La salida de DC del RAV es una señal en forma de diente de sierra formada por seis pulsos por ciclo ($16.6\text{ms} = 1/60\text{Hz}$).

Figura 21. Salida c.d. del puente de tiristores



Los elementos del circuito son calculados considerando las pérdidas provocadas por el voltaje pulsante.

b) Resistencia no lineal (Varistor)

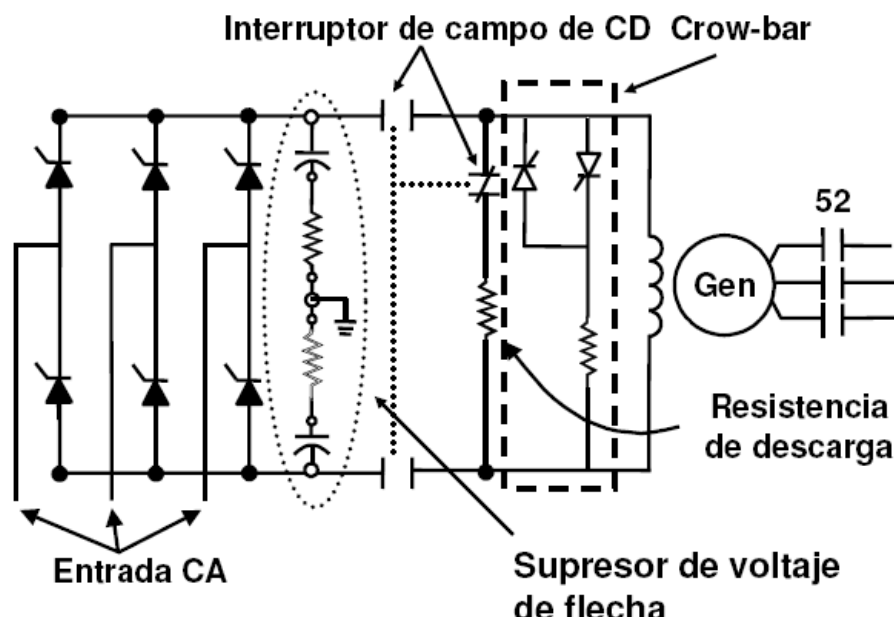
El varistor protege al RAV y al campo del generador de transitorios de voltaje, limitando los picos de voltaje a niveles aceptables cuando el interruptor de campo es abierto con una corriente máxima en el rotor.

Los varistores son resistencias no lineales en los cuales la corriente varía de acuerdo al voltaje aplicado.

Su construcción se basa en discos conectados en serie o en paralelo. Los discos son montados en forma horizontal en una barra con resortes de seguridad en los extremos.

Esta resistencia no lineal tiene un rango de voltaje cd continuo de 550V, pérdidas continuas de operación de 240W con una capacidad de descarga de 450Kw/seg.

Figura 22. Circuitos supresores de corriente directa



2.1.5.4. Circuito de faseo de la electrónica

Este circuito consiste en un transformador conectado en su lado primario directamente al bus de c.a. el cual viene del transformador de excitación, el devanado secundario está conectado al generador y amplificador de pulsos a un voltaje de sincronismo.

Con este arreglo podemos conservar en fase el voltaje de alimentación de c.a. que va de los puentes de rectificación con el voltaje de sincronismo de la electrónica.

2.1.5.5. Sensitivo de voltaje en los buses de c.a.

El sensitivo de voltaje modelo SVT-120 es un módulo electrónico que se alimenta con voltaje de 24 VCD.

Tres parámetros de calibración controlan el funcionamiento de este módulo para sensar un umbral de voltaje, pérdida de una fase o pérdida total de fases en un sistema trifásico de AC.

La salida que proporciona este módulo es un contacto seco (1 polo dos tiros) proporcionado por un relevador interno que se activa cuando el umbral de voltaje fijado por el ajuste normal es alcanzado.

La función que realiza este módulo dentro del regulador es activar el relevador externo cuando el voltaje del generador es mayor o igual al 90%.

Su electrónica de detección trae integrado un retardador para evadir cualquier tipo de perturbación en la red trifásica que supervisa, el cual es ajustable de 0 a 10 segundos aproximadamente.

2.1.5.6. Protección sobre corriente de excitación

La protección de sobre corriente con característico de tiempo inverso dispara el interruptor de campo, operando en automático o manual cuando la corriente de campo ha rebasado el umbral y tiempo calibrado en dicha protección.

Este módulo recibe señal de un transductor de corriente independiente de los que se utilizan para fines de regulación (TDIP).

2.1.5.7. Protección por pérdida de retroalimentación

En caso de falla en el circuito de retroalimentación (desequilibrio de fase o pérdida de una fase) un circuito de detección de falla en el voltaje de la retroalimentación hace la transferencia de automático a manual.

El módulo censa directamente las fases de TP'S proporcionando una entrada al PLC misma que se canaliza hacia el módulo PLC AUTO para la lógica de transferencia de automático a manual por falla en la retroalimentación.

Este mismo módulo proporciona una señal a la entrada de los secuenciadores lógicos, la cual es activada cuando el voltaje del generador es mayor al 90%. Esta función es empleada para deshabilitar el proceso de excitación inicial.

2.1.5.8. Protección de sobre voltaje de campo (OXP)

La protección de sobrevoltaje de excitación se encuentra programada en el PLC cuya operación debe estar coordinada con el limitador MXL.

En el supuesto caso de un sobrevoltaje de excitación constante en el canal automático detectado por los módulos MXL (umbral primer paso), el control MXL tiene la función de limitar este nivel de sobrevoltaje a un valor preestablecido dentro de los parámetros de operación normal de la unidad generadora, activándose el umbral del módulo OXP. Una vez que el limitador MXL entre en operación, una alarma es levantada y el operador de la unidad tiene que reconocer la causa que motivó tal sobreexcitación. El operador debe, transferir a manual digital. Al transferir a manual digital se

resetea el limitador MXL y el balanceador digital vuelve a operar para poder retransferir de nueva cuenta a automático digital, de lo contrario esto no es permisible.

Si la función de limitación no se llevara a cabo con el MXL, al activarse el umbral del OXP, se deshabilita el control sobre el circuito de seguimiento automático, preparando la transferencia a manual digital una vez que su función de tiempo inverso sea activada.

El fenómeno de sobreexcitación puede suceder por muchas variantes como por ejemplo; pérdida de retroalimentación de voltaje (TP'S) falla del módulo de regulación, etc.

2.1.5.9. Protección contra rotación incorrecta de fases

Existe en la tarjeta de control un circuito de protección contra rotación de fases incorrecta. La rotación incorrecta de fases es fácilmente corregida intercambiando 2 fases de la alimentación.

2.1.6. Circuitos de medición y retroalimentación

Para una correcta coordinación de los diferentes lazos de control que conforman el regulador automático de voltaje se requiere dotar el sistema de diferentes transductores para la medición de las variables a controlar en un determinado tiempo.

Estos lazos de control requieren de señales de retroalimentación para operar mismas que son tomadas de los transductores escalados en el rango de +/- 10 VCD, o de 4 a 20 mA.

Los lazos de control adicionales a los principales lazos de regulación de voltaje (automático) y regulación de corriente (manual) son los siguientes:

- a.) regulación de flujo (limitador volts/Hz)
- b.) regulación de VAR en subexcitación (MEL)
- c.) regulación de VAR en sobreexcitación (OEL)
- d.) estabilizador de potencia (P.S.S.)
- e.) lazos internos de voltaje y corriente de excitación.

2.1.6.1. Transductor de Volt/Hertz

La medición de la relación de volt/hertz de la máquina síncrona se hace a través de un transductor de estado sólido.

Utilizando el voltaje secundario de los transformadores de potencial del generador, el transductor se compone de un juego de 3 transformadores monofásicos conectados en delta/estrella con relación de 120/240 V, el voltaje de salida de estos transformadores alimenta a un puente de capacitores y el voltaje en este puente de capacitores a la entrada de un puente de diodos, este voltaje es directamente proporcional a la relación de voltaje en terminales y frecuencia. El voltaje en el puente de capacitores tiene la siguiente relación:

$$V_c = K \frac{V_{AC}}{f}$$

Es decir, un cambio en la relación V/Hz provee un cambio en el voltaje a través del puente rectificador, El transductor proporciona un voltaje de salida de 0 - 5 VCD. Esta salida se envía al PLC AUTO para realizar las funciones de limitación, para de esta forma, prevenir una saturación en el núcleo del generador y en los transformadores que se encuentren conectados en el bus de la unidad.

2.1.6.2. Transductor Watt/VAR

La medición de potencia activa y de volt ampere reactivo de la maquina se hace a través de un transductor de watts/var's.

Este transductor convierte la señal de watts y var's del generador síncrono a un valor proporcional de corriente directa en sus terminales 2-1 y 12-9 respectivamente. La señal de voltaje se conecta en las terminales 4-3 del transductor y la señal de corriente se conecta a las terminales 6-5.

Especificaciones

Monofásico

Calibración a plena escala	500 watts secundarios
Rango de voltaje nominal	85-150 volts
Sobre-voltaje continuo	175 V
Burden del elemento potencial	<0.02 VA
Burden del elemento de corriente	<0.15 VA
Corriente nominal	0-5 amperios
Corriente de sobrecarga	15-50 amperios por 10 seg. 400 amperios a 0.5 seg.
Frecuencia	60 Hz

2.1.6.3. Transductor de voltaje

La medición de voltaje de generador se hace en un transductor, el cual se usa para convertir la señal de transformadores de potencial del generador a un voltaje de corriente directa. La salida del transductor es enviada a una entrada analógica del PLC para realizar las funciones de limitación.

Especificaciones

Rango de voltaje	0-150 volts
Sobrecarga de voltaje	180 volts
Burden de voltaje	<15 VA
Calibración a plena escala	150 volts
Salida	1 amperio
Frecuencia	55-65 Hz
Tiempo de respuesta	< 400 mseg.

2.1.6.4. Transductor de corriente

El propósito de estos módulos, es el de convertir la señal proveniente de un juego de transformadores de corriente (3000/5 A) a una señal analógica de un rango de 0 a + 10 V.

2.1.6.5. Transductor de señal de voltaje y corriente de excitación

El propósito de este transductor es el desacoplar la etapa de potencia con la electrónica de regulación y protección dentro del sistema de regulación de voltaje.

El transductor de voltaje de excitación toma señales a través de circuitos divisores conectados directamente en el bus de corriente directa a través de fusibles de protección y resistencias divisoras, para retroalimentar a la electrónica de control y protección.

En el caso de la corriente de excitación la señal proveniente de un shunt (1500A/50mV) es tomada para sensar la corriente directa a la salida de los puentes de rectificación. Este nivel de mV se traduce a un nivel de 0 a 10 Vcd con la ayuda del elemento aislador de señal, para alimentar el módulo de protección de sobre corriente.

2.1.7. Facilidades de comunicación

La Interfase Hombre Máquina (IHM) de la serie 500 es una terminal de interfaz al operador gráfica, diseñada para conectarse a PLC dentro de un medio ambiente industrial. El display de 5.7 pulgadas esta cubierto por un touch screen analógico.

El touch screen utiliza la tecnología mas reciente, permitiendo a la programación de la Terminal de Interfaz al Operador (OIT) crear switches con una resolución muy fina, limitada únicamente por la cantidad de memoria disponible para el proyecto.

La OIT tiene dos puertos seriales, los cuales permiten una conexión a un PLC utilizando comunicación RS-232 o RS-485 y una conexión RS-232 a una computadora para programación. Los puertos seriales tienen la capacidad de conexión para múltiples OIT en serie a uno solo de los puertos seriales.

La OIT utiliza una alimentación de 24 VCD y esta provista de un switch de ajuste para el nivel de contraste en el display. Un switch de reset se provee en la parte posterior de la OIT para reinicializarla en caso de que ocurra un fallo en su operación.

La IHM esta diseñada para trabajar en un medio ambiente industrial, lleva un montaje NEMA 4, así como certificación para inmunidad al ruido y emisiones.

Esta provista también de un procesador tipo RISC de 32 bits y una velocidad de procesamiento de datos de 133 MHz.

Características técnicas:

- Display
Tipo Monocromático, 4 colores, 5.7 pulgadas, 4.5x3.5 pulgadas, resolución de 320x240, brillo 60 cd/m², contraste 15:1.
- Pantalla (*Touch-screen*)
Exactitud al tacto de 0.08 pulgadas, dureza superficial 4H.
- *Hardware*
Microprocesador 133Mhz 32 bit con tecnología RISC, Memoria *Flash* de 1Mb, DRAM 4Mb, RAM 1Mb, Chip de tiempo estándar.

- Dimensiones
Altura 5.9 pulgadas, Ancho 8.0 pulgadas, y profundidad total de 2 pulgadas.
- Mecánicos
Hecho de material plástico ABS, montaje en panel, cableado con terminales externas para la alimentación y conectores de comunicación tipo D, peso 2.2 libras (1Kg).
- Medio ambiente de operación
Norma IP65, NEMA 4, temperatura de operación de 0 a 45 grados centígrados, temperatura de almacenaje –20 a 60 grados centígrados, humedad relativa del 10% al 90% no condensada, resistencia al voltaje de 500VAC en un minuto, resistencia de aislamiento excede de 50 Mohms a 500 VCD, resistencia a la vibración de 20 a 25 Hertz en dirección x, y, z durante 20 minutos.
- Certificación
Cumple con EN50081-2 (1993) y EN50082-2 (1995)
- Alimentación
El equipo requiere de 24 VCD, para su alimentación, con un consumo de 500mA instantáneos (220 mA en estado constante).
- Comunicación
Puerto serial 1 RS232 o RS485
Puerto serial 2 RS232

2.1.7.1. Descripción funcional de navegación en la IHM interfaz de operación del control digital para reguladores de voltaje y sistemas de excitación

Maple system

La OIT IHM 520M es una interfaz que tiene como objeto facilitar la rápida explotación de la información proveniente del regulador de tensión utilizando un eficiente touch-screen para navegación y manejo del propio 520M.

Figura 23. IHM



Pantalla general

Mediante la barra de ventanas se visualiza un menú de selección touch-screen con el cual tendremos acceso a las siguientes opciones:

- *Alarmas*
- *Indicaciones*
- *Mediciones*
- *Disparos*
- *Eventos*

En la pantalla aparecen en la parte inferior izquierda dos botones de selección denominados como *VIEW* y *EASY*, al presionar el botón *VIEW* aparece la ventana de MENU, en esta pantalla se presenta la información relativa a las principales variables y señales del regulador de tensión, con estas indicaciones y variables rápidamente se puede verificar el estado y comportamiento del propio regulador de tensión.

Cabe mencionar que dicha barra de navegación puede accesarse desde cualquier pantalla y está presente en todo momento.

Alarmas

Al tocar el botón de alarmas visualizaremos el estado actual de las señales digitales del equipo, para poder navegar entre ellas se requiere tocar los botones que se encuentran en la parte superior derecha de la pantalla que tienen indicación con flechas para avanzar o regresar, en caso de querer ver alguna otra pantalla. Con el botón *VIEW* seleccionaremos una pantalla de control nueva.

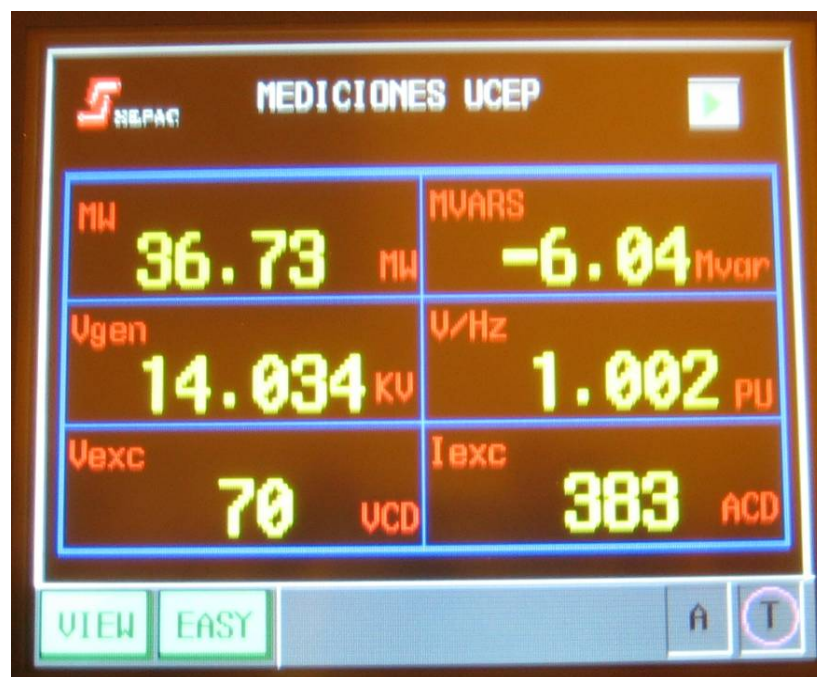
Indicaciones

Aquí se visualizan los acontecimientos que ocurren en el instante de operación del RAV, tales como la operación de los limitadores, la posición del 52 y del 41, así como otras.

Mediciones

Esta pantalla nos muestra de forma directa los valores reales adquiridos por la IHM en los cuales se encuentran los valores de los registros en el AVR, como son voltaje generado, voltaje de excitación, etc.

Figura 24. Mediciones UCEP



Disparos

Esta pantalla visualiza la señal de activación de una o varias protecciones que dejan fuera de servicio al RAV, ya sea un disparo provocado por algún inconveniente propio del regulador o por disparo externo como es la protección 86G.

Eventos

Se observa el número de eventos que han sucedido, con un contador de hasta 200.

Menú de Mandos

En esta pantalla observamos las opciones suficientes para poder realizar operaciones en el equipo sin tener que utilizar el panel de mando local, y estaremos facultados para que con solo tocar la opción en pantalla se realice la operación, también tiene dos medidores del tipo analógico, los cuales brindan seguridad y más información referente a la situación del equipo para poder realizar los mandos deseados. Los mandos que se pueden realizar son los siguientes:

- Apertura y cierre de la quebradora de campo (41)
- Operación de la transferencia automático a manual y de manual a automático.
- Posición de referencia subir y bajar en los potenciómetros estáticos, 90D y 70D.
- PSS dentro y fuera.
- Ejecución de un escalón para análisis dinámico.
- Reset, para reconocimiento de las alarmas.

2.2. Filosofía de la secuencia operativa

2.2.1. Operación normal

El PLC de canal automático y canal manual es el que procesa los comandos de cierre y apertura en forma local o remota y maneja dos formas diferentes de apertura, una en forma normal comandada por la lógica normal de operación, y otra comandada por medios externos (86G).

En estado normal de operación sin importar el canal de regulación seleccionado, cuando una apertura de interruptor de campo es solicitada, la lógica secuencial del RAV 1111 hace operar en primer lugar el comando de desexcitación rápida haciendo que el puente de rectificación funcione como inversor en un determinado tiempo.

Posteriormente el interruptor de campo es abierto en el instante que se detecte en las terminales del generador un voltaje menor / igual a 30%.

Un caso contrario a lo ya expuesto, se presenta cuando se requiere disparar el regulador como caso de emergencia por problemas externos (86G).

Una vez que esta señal es comandada, actúa directamente sobre el circuito de disparo (41TX2) del interruptor de campo, haciendo que este último se desconecte sin importar la corriente de excitación que se tiene en ese instante.

La secuencia de cierre sin importar la selección del canal de regulación inicia cuando el comando proveniente del panel de mando local, o por otros medios externos (Interfaz hombre-máquina) llega al PLC mismo que al

recibirlo conecta en primera instancia el relevador de cierre (41C) para cerrar el interruptor principal de campo siempre y cuando no se tenga un comando de disparo conectado. (86E, 86G o el propio botón de apertura).

Si el PLC recibe la retroalimentación de que el interruptor 41 efectivamente fue cerrado (posición del 41), inmediatamente después conectan el relevador 31C para conectar el interruptor de excitación inicial (31), y al mismo tiempo conectan o habilitan el módulo de Generación de Pulsos de alta frecuencia para iniciar la secuencia de excitación en proceso.

Para interrumpir esta etapa basta con oprimir el comando de interruptor APERTURA.

Si por alguna circunstancia el retroaviso de la posición del interruptor 41 no se tuviera en el PLC ocho segundos después de la orden de cierre, la secuencia será abortada y el relevador 86E será accionado para desarmar este intento de excitación.

Si la etapa de excitación en proceso es superada, con el levantamiento de voltaje en terminales de la máquina, la excitación inicial con banco de baterías es desconectado cuando se tenga un nivel de voltaje mayor / igual a un 30%, mientras tanto el proceso de excitación continua con la influencia del Generador de Pulsos de alta Frecuencia que posteriormente es desconectado cuando un nivel de un 90% de voltaje sea alcanzado dando paso a la regulación fina ya sea con el canal automático o con el canal manual.

Una vez excitada la unidad, el indicador de BALANCE permite visualizar al posicionarse en cero cuando la diferencia entre el ángulo de disparo del canal operativo y el canal de respaldo sea despreciable, dejando a criterio del operador la transferencia normal de canal a otro.

Si la diferencia es mucho mayor a cero, no se recomienda la transferencia de canal en forma manual porque se tiene el indicio de que algo esta fallando en el canal de reserva.

Teniendo la unidad sincronizada con la red, el comando de apertura del interruptor 41 en forma automática es suprimida por cuestiones de seguridad de la propia máquina, de aquí que para un proceso de desexcitación normal primero se saca la unidad de línea y posteriormente se da la orden de apertura.

Si el caso de la petición de apertura del interruptor 41 es por falla, esto se realiza en forma automática sin importar la condición en la que encuentre ya sea por 86E o por el 86G.

2.2.2. Secuencia de transferencia y alarmas

La selección del modo de operación se puede realizar cuando el interruptor de campo esté abierto o cerrado siempre y cuando no se encuentren bloqueados los secuenciadores, es decir, se puede seleccionar el canal de regulación con el que el operador quiera entrar en servicio ya sea en forma local o remota.

Una vez excitada la unidad, el regulador mantendrá la selección anterior y transferirá solamente de automático a manual por operación manual o por fallas.

La transferencia normal del canal automático al canal manual es realizada por el operador de la unidad mientras que la transferencia por falla puede ocurrir por los conceptos siguientes:

2.2.2.1. Transferencia a manual por pérdida de TP

Esta función se realiza cuando el sensor de fases (SVRA) detecta la ausencia de una fase o pérdida de fases de los transformadores de potencial (TP'S), proporcionando información al PLC vía tarjetas de entradas digitales, para el caso del canal automático señalizándose este evento en una salida digital cuyos contactos se rematan en la tablilla terminal de campo para su señalización remota.

Este evento también es desplegado vía enlace de comunicación en el panel de alarma de la maestra, y mientras ésta no sea reestablecida y el indicador de balance automático no esté oscilando alrededor de cero, la retransferencia del canal manual al canal automático no se recomienda.

2.2.2.2. Transferencia por falla del PLC del canal automático

Similarmente a lo anterior, el módulo que contiene todo el algoritmo de control para la regulación de voltaje en terminales de la máquina es el PLC AUTO. Por lo que al detectar un problema en su sistema operativo, la secuencia de operación transfiere la regulación de voltaje a regulación de corriente de excitación.

2.2.2.3. Transferencia por pérdida de pulsos en el canal automático

Teniendo el control de la unidad generadora en canal automático, si por alguna circunstancia el módulo generador de pulsos de disparo llegase a

fallar, esto es detectado por los módulos amplificadores (boosters) y la logística del sistema transfiere el control del automático hacia el manual; levantándose la alarma correspondiente a este evento.

Si el problema es común, es decir que después de transferir hacia el canal manual persiste la ausencia de pulsos, el sistema entra en su etapa de disparo vía 86E por pérdida total de pulsos.

2.2.2.4. Alarmas

El regulador automático de voltaje cuenta con panel de alarmas, información la cual recibe por medio del enlace de comunicación, además cuenta también con tablillas de interconexión (TMC) en la cual se encuentran rematadas la mayoría de las alarmas enviadas a nivel superior para que se desplieguen en otros medios a fin de monitorear las condiciones de operación del RAV.

Las señales tomadas meramente como alarmas, no interfieren en la rutina de disparo del sistema, tal es el caso para:

- Falla del ventilador del puente.
- Falla a tierra rotor.
- Falla fusible rectificador.
- Limitadores operando.
- Falla fuente del *booster* del automático.
- Transferencia a canal manual por cualquiera de las fallas.

2.2.3. Disparos

Varios parámetros dentro del sistema de excitación son tomados en cuenta en cuanto a su magnitud y tiempo de duración para establecer los criterios de disparo del RAV.

La operación cualquiera de las señales, a excepción del 86G que es externo, obliga al rectificador a actuar como inversor y activa el circuito correspondiente al 86E (disparo propio de RAV) cuyo contacto es rematado en tablillas para el enlace con el circuito de disparo de la unidad generadora.

El disparo se ejecuta inmediatamente después de recibir el comando sin importar el orden en que se presenten, basta con que se tenga uno solo.

2.2.3.1. Sobre corriente de excitación

El comando de disparo por sobre corriente de excitación la recibe del software de protección de sobre corriente, mismo que procesa la señal tomada de la retroalimentación de corriente de excitación.

2.2.3.2. Sobre voltaje de excitación

Este comando proviene del PLC AUTO como última función de protección en un supuesto caso de que el limitador de sobre excitación no funcionara y de que el canal manual no hubiera podido detener la sobreexcitación existente después de la transferencia realizada.

La activación del disparo se canaliza en la secuencia de disparos en los procesadores del automático y del manual por medio del enlace de comunicación entre cada PLC.

2.2.3.3. Tiempo largo de excitación

Durante el proceso de excitación, la unidad generadora dispone de 10 segundos para alcanzar un nivel de voltajes en terminales para considerar la excitación como exitosa; de lo contrario un temporizador programado en cada PLC por canal realiza el disparo del interruptor principal de campo seguido del relevador 86E para abortar todo el proceso de excitación.

2.2.3.4. Problemas en el transformador de excitación

Las terminales de TMC están previstas para conectar un contacto libre de potencial proveniente de algún dispositivo de protección instalado sobre el transformador de excitación, como puede ser: Sobre corriente de excitación (50/51) y/o sobre temperatura en los devanados.

2.2.3.5. Problemas en amplificador de pulsos

Bajo el estado normal de operación del regulador de voltaje y siendo este con el canal manual, si se detecta una ausencia parcial o total de los pulsos de disparo de los tiristores; un contacto de un relevador montado para este fin en el booster del propio canal manual envía una señal hacia el PLC para disparar el sistema, en primera instancia el interruptor de campo

(41) por el accionamiento del relevador de protección 86E.

Si ambos boosters presentan problemas en su fuente de alimentación, la secuencia entra también en su rutina de disparo.

2.2.3.6. Transferencia a canal manual bajo Falla

Para el buen funcionamiento del circuito seguidor automático programado en cada PLC de cada canal, es necesario que se estén intercambiando datos a través de sus puertos seriales de comunicación o vía red LAN, de aquí que si llegase a presentarse una transferencia a manual con este último con problemas de comunicación con el automático la rutina de disparo del regulador es activado.

2.2.3.7. Disparo externo 86G

El RAV recibe como comando único de disparo de emergencia la señal del 86G vía tablillas; este contacto debe ser libre de potencial.

Este comando actúa directamente sobre el relevador auxiliar 41TX2 para abrir el interruptor de campo por problemas externos, que no involucran la rutina de disparo propio del RAV. Por tal motivo, la bandera señalizadora de 86E no debe de operar.

La bandera señalizadora 86E operada en el panel de mando local o en forma remota significa que el disparo fue por cuestiones internas en el RAV o problemas en el transformador de excitación.

Además de esta señalización, existe una alarma, que se activa ya sea en conjunto con el 86E o por cuestiones de advertencia. (Alarma general RAV).

Mientras se tenga el 86E operado, la maniobra de cierre del interruptor de campo no es ejecutable. Para volver al estado normal de operación es necesario reconocer y resetear en el panel de mando local con el push botton de reset, o remotamente vía terminal remota las condiciones de falla existentes hasta que la indicación del 86E desaparezca. De no ser posible será necesario resetear el 86G externo al RAV (sistema de protección).

2.2.4. Relevadores de interposición

La mayoría de los relevadores empleados en el regulador automático de voltaje no realizan ninguna función de lógica para la operación del mismo.

El objetivo primordial de estos relevadores es aislar las señales de campo de los microprocesadores que realizan la función secuencial del RAV así como, realizar la señalización de algunas variables.

La función de cada uno de los relevadores es específico, y solo se concretan en proporcionar información de los diferentes acontecimientos ocurridos alrededor del regulador automático de voltaje para hacerlo totalmente autónomo en las tomas de decisiones.

3. INSTALACIÓN DE RAV 1111 2P 550K/220

3.1. Instalación y montaje

Antes de realizar la instalación del RAV 1111 se efectúa la desinstalación y desmontaje del regulador existente, desacoplando la unidad compuesta de dos secciones, utilizando la grúa viajera de la central para el levantamiento, la cual soporta un peso máximo de 80 toneladas.

Se debe quitar toda la tornillería de fijación de la base al suelo que impidan el izaje así como los cables que traen las tres fases del generador síncrono provenientes del transformador de excitación (13800/220 V) y las conexiones que llevan la corriente directa al campo del generador que posteriormente se utilizarán para el regulador nuevo, dado que éste se instalará en la misma ubicación pero utilizando menor espacio ya que sus dimensiones son menores.

Figura 25. Desmontaje de AVR MEC-3400-W



Figura 26 Transportación para almacenamiento de AVR MEC-3400-W



El regulador se lleva a un lugar de almacenamiento y dejarlo a responsabilidad de personal de la central.

Figura 27. Espacio disponible para montaje de RAV 1111



Ya con el espacio disponible para la instalación, se continúa con el levantamiento del RAV 1111 colocándole eslingas de abajo hacia arriba y realizando amarres en su parte superior que se enganchan a la grúa, así como otras dos eslingas laterales que eviten el corrimiento del regulador hacia las orillas de las eslingas principales.

Figura 28. Levantamiento de RAV 1111 2P 550K/220



El tablero se instala en una zona amplia, que permita, por una parte facilidad de acceso a cada lado del tablero para efectuar trabajos de inspección, mantenimiento y reparación, y por otra, la correcta eliminación de las pérdidas de calor que se desarrollan en el interior del tablero y cuya disipación está asegurada mediante los sistemas de ventilación forzada de los que están dotados estos equipos.

Será muy importante verificar que los sistemas de ventilación forzada del aire funcionen correctamente, que no haya fenómenos de reciclo, que no se formen bolsas de aire caliente que puedan conducir a incrementos de la temperatura ambiente y que, las tomas de aire de ventilación se encuentren en zonas carentes de polvo, humedad, humos corrosivos, etc.

Para la colocación del tablero éste posee una base adecuada, bien nivelada y adecuadamente resistente, de manera que se impiden deformaciones de la estructura debidas al mismo peso del tablero, bajo las condiciones producidas por las maniobras de apertura y cierre, o por las maniobras de introducción y extracción de las partes del tablero.

Para el anclaje en el suelo del tablero, la base del mismo tiene agujeros para fijación en una cantidad suficiente de puntos con una medida de $\frac{3}{4}$ de pulgada.

Figura 29. Ubicación de RAV 1111 2P 550K/220



Para dejar cada regulador en forma simétrica dentro de la casa de máquinas, los tableros son desplazados por medio de rodillos adecuadamente distanciados, colocados debajo de la base en sentido ortogonal hacia la parte frontal. Dicho sistema de transporte se usa solamente en caso de que la superficie de apoyo de los rodillos esté completamente plana tal que no provoque deformaciones en la estructura del tablero durante la maniobra.

Para el acoplamiento del tablero al suelo se debe disponer el tablero en la correcta posición, controlando que los agujeros predispuestos en la base de la estructura coincidan con las anclas de fijado.

Programar adecuadamente la instalación de manera que se efectúe la instalación de los cables según principios adecuados para conseguir una suficiente reducción de las interferencias de los circuitos electrónicos de control y regulación.

Figura 30. RAV 1111 2P 550K/220 listo para acoplamiento al generador síncrono



Una vez colocado, fijado y nivelado el tablero, se limpiará con aspiradoras todo el equipo. El sistema del excitador esta cableado, montado y probado en un NEMA 1 / IP20 aislado, gabinete de metal de tipo interior para una instalación de montaje en piso, funcionando como una jaula de Faraday. El equipo esta diseñado para trabajar en un rango de temperatura ambiente de 0°C a 65°C.

3.2. Conexiones

Es importante que los cables de la instalación tengan características iguales a las que se indican a continuación:

- Para instalación en circuitos a bajo voltaje que manejen señales analógicas o señales que requieren un cuidado especial:
 - a) Cable unipolar enmallado constituido por un conductor flexible de cobre con sección mínima (1.3 mm²) calibre 16 AWG aislamiento a 600 V.
 - b) Cable con un par de conductores entorchados y enmallados, constituido por dos conductores flexibles de cobre con una sección min. (1.3 mm²), calibre 16 AWG aislados entre ellos por lo menos 600 V.
 - c) Cable multipolar blindado constituido por más de dos conductores flexibles de cobre con una sección mínima (1.3 mm²), calibre 16 AWG aislados entre ellos por lo menos 600 V.

- Para instalación en circuitos de control:
 - a) Cable unipolar constituido por un conductor flexible de cobre con una sección mínima (3.31 mm²) calibre 12 AWG con un aislamiento a 600V.

- Para instalación en circuitos de alta tensión (buses AC y DC) hasta 1500 amperios:
 - a) Conductores constituidos por un conductor flexible de cobre con una sección mínima de (253.35 mm²), calibre 500 MCM, aislamiento 600 V.

Para evitar el mal funcionamiento de los circuitos electrónicos con bajo nivel de potencia debido a las perturbaciones electromagnéticas es absolutamente indispensable recurrir toda una serie de precauciones tendientes a corregir prácticamente estos efectos. Estas precauciones serán empleadas junto con las que han sido tomadas directamente durante el diseño del tablero, las interconexiones destinadas para llevar las señales a bajo nivel en el interior del tablero tienen que estar protegidas de las interferencias (utilización de cables blindados).

Clasificación de cables por señales que maneja

Para obtener una buena separación de los conductores conectados a los circuitos sensibles a los efectos eléctricos, se ha hecho una clasificación de los conductores siguiendo el siguiente criterio:

Bajo nivel:

Señales analógicas 0-24 VCD

Señales lógicas 0-24 VCD

Medio nivel:

Señales analógicas de control de C.A. 120 VCA

Lámpara de señalización de circuitos de conmutación hasta 24 VCD.

Alto nivel:

Señales provenientes del circuito de campo y de los circuitos de C.A. de los puentes convertidores o del transformador de excitación

Señales de derivadores (shunt) para equipos de regulación.

Circuitos de potencia:

Circuitos de potencia de C.A. y C.C. entre 0 y 800 V con corrientes de 20 a 2000 A.

Conexión a tierra del tablero

En los bornes de TMC se prevén puntos de salida (bornes) para conexión de los “comunes” (o retornos de las fuentes de alimentación) a la tierra general de la instalación.

Como norma general los “comunes” así denominados:

- Común de los circuitos analógicos
- Común de los circuitos lógicos
- Común de las pantallas de los cables blindados

Estos cables tienen que estar siempre conectados con la tierra física general de la instalación.

Con el fin de evitar perturbaciones debidas a acoplamientos de impedancia y a circulación de señales heterogéneas, dichas conexiones están realizadas en forma de estrella con respecto a un punto común único

(barra de 0 Volts), la cuál es una barra de cobre aislada de 2" de ancho con una longitud de 20cm, alojada en la parte posterior del gabinete de electrónica. Dicha barra se conecta a través de un cable a la barra de tierra del tablero, además existe una interconexión entre las barras de tierra de todas las secciones del tablero.

Figura 31. Rack UCEP y rack UCER con conexiones de control



Figura 32. Conexión corriente alterna trifásica transformador de excitación-RAV y conexión de salida de corriente directa RAV-generador síncrono



4. PRUEBAS AL RAV 1111 2P 550K/220

4.1. Pruebas pre-operativas

Para empezar a realizar estas pruebas, en las cuales se verificará cada componente del regulador antes de ponerlo en servicio, se alimenta desde el banco de baterías con 125 voltios de corriente directa.

4.1.1. Conexiones de campo

Tabla I. Verificación conexiones de campo

Descripción	Medición	Resultado
Tablilla TMC Y TMC2		Satisfactorio
125 VCD magnitud y polaridad	119.7 VCD	Satisfactorio
Contacto posición 52G (NC)		Satisfactorio

4.1.2. Revisión fuente de alimentación (energización de la electrónica)

Tabla II. Verificación FU-AVR-D

Descripción	FU-AVR-D PRINCIPAL (VCD)	FU-AVR-D RESPALDO (VCD)
Interruptor térmico (bornes 1 y 3)	119.5	119.5
Conector A (bornes 1 y 2)	119.5	119.5
J3 – J4	24.94	24.98
J3 – J5	25.00	24.98
J3 – J6	-24.98	-24.92
J7 – J8	125.2	126.0

4.1.3. Verificación de voltaje de alimentación del alumbrado

Tabla III. Verificación voltaje de alumbrado

Descripción	Medición
Interruptor térmico TMI (bornes 1 y 3)	117.8 VCA

4.1.4. Revisión de los mandos del panel local

Tabla IV. Verificación panel local

Descripción	Resultado
Principal	Satisfactorio
Respaldo	Satisfactorio
Automático	Satisfactorio
Manual	Satisfactorio
Subir / Bajar 90D	Satisfactorio
Subir / Bajar 70D	Satisfactorio
Reset	Satisfactorio
Cierre 41	Satisfactorio
Apertura 41	Satisfactorio
Disparo 86E	Satisfactorio
Prueba de luces	Satisfactorio

4.1.5. Revisión de los mandos del panel remoto (control de planta)

Tabla V. Verificación mandos remotos

Descripción	Resultado
Subir / Bajar 90D	Satisfactorio
Subir / Bajar 70D	Satisfactorio
Cierre 41	Satisfactorio
Apertura 41	Satisfactorio

4.1.6. Prueba de verificación de entradas digitales

Se verificó punto a punto el cableado realizado en las entradas digitales, es correcto simulando cada punto de origen hasta el software del PLC en PC.

Tabla VI. Verificación entradas digitales PLC GE FANUC

Registro	Descripción		
Auto/ Manual	UCEP / UCER	UCEP	UCER
%I0001	Selección UCEP / UCER	√	√
%I0002	UCER operando / UCEP operando	√	√
%I0003	Cierre 41	√	√
%I0004	Apertura 41	√	√
%I0005	Subir	√	√
%I0006	Bajar	√	√
%I0007	Pulso cardiaco UCER/UCEP	√	√
%I0008	Selección canal manual	√	√
%I0009	Disparo 86G	√	√
%I0010	Selección canal automático	√	√
%I0011	Posición 52G	√	√
%I0012	Operación local	√	√
%I0013	Operación exclusiva local 2	√	√
%I0014	Perdida de pulsos <i>booster</i> 1	√	√
%I0015	Falla fusible puente 2	√	√
%I0016	Disponibile	√	√
%I0017	Reset	√	√
%I0018	Posición 41	√	√
%I0019	Perdida de Tp's	√	√
%I0020	Vgen >90%	√	√
%I0021	Falla ventilador 1 del puente 2	√	√
%I0022	Falla a tierra del rotor (64F)	√	√
%I0023	Perdida de pulsos <i>booster</i> 2	√	√
%I0024	Disponibile	√	√
%I0025	PSS dentro	√	√
%I0026	PSS fuera	√	√
%I0027	Falla fuentes <i>booster</i> 1	√	√
%I0028	Falla fuentes <i>booster</i> 2	√	√
%I0029	Escalón	√	√
%I0030	Falla ventilador 2 del puente 2	√	√

%I0031	Sobre temperatura transf. de exc.	√	√
%I0032	Falla fusible puente 1	√	√
%I0033	Salida fuentes UCE principal bien	√	√
%I0034	Salida fuentes UCE respaldo bien	√	√
%I0035	Automático operando	√	√
%I0036	Manual operando	√	√
%I0037	Falla flujo de aire P1	√	√
%I0038	Falla flujo de aire P2	√	√
%I0039	Excitación inicial C.A.	√	√
%I0040	Excitación inicial C.D.	√	√
%I0041	Disponible	√	√
%I0042	W.D. PLC UCE respaldo	√	√
%I0043	Disponible	√	√
%I0044	Disponible	√	√
%I0045	Sobre corriente transf. de exc.	√	√
%I0046	Sobre temperatura en puente 1	√	√
%I0047	Sobre temperatura en puente 2	√	√
%I0048	Falla ventilador 2 puente 1	√	√
%I0049	Falla ventilador 1 puente 1	√	√
%I0050	Transferencia a UCER/UCEP	√	√
%I0051	Velocidad turbina 95%	√	√

Las entradas %I0052 a %I0064 están disponibles para uso de la central.

4.1.7. Prueba de verificación de salidas digitales

Se verificó punto a punto que el cableado realizado en las salidas digitales fueran correctas simulando cada punto desde el origen hasta la PC.

Tabla VII. Verificación salidas digitales PLC GE FANUC

Registro	Descripción		
Auto/ Manual	UCEP/UCER	UCEP	UCER
%Q0001	UCEP / UCER operando	√	√
%Q0002	Cierre 31	√	√
%Q0003	Cierre 41	√	√
%Q0004	Apertura 41	√	√
%Q0005	Conecta ráfaga de pulsos	√	√
%Q0006	Disparo 86E	√	√
%Q0007	Automático operando	√	√

%Q0008	Transferencia a manual por MXL	√	√
%Q0009	Alarma general AVR	√	√
%Q00010	Manual seleccionado	√	√
%Q00011	Transferencia a manual por pérdida de TP	√	√
%Q00012	Limite máximo 90D	√	√
%Q00013	Limite mínimo 90D	√	√
%Q00014	UCER / UCEP operando	√	√
%Q00015	Limite máximo 70D	√	√
%Q00016	Limite mínimo 70D	√	√
%Q00017	PSS dentro	√	√
%Q00018	MEL operando	√	√
%Q00019	Transferencia a manual	√	√
%Q00020	Lámpara automático en panel	√	√
%Q00021	Falla fuente UCE principal	√	√
%Q00022	Lámpara manual	√	√
%Q00023	Falla W.D. UCE principal	√	√
%Q00024	OEL operando	√	√
%Q00025	Alta temperatura en puente 1 ó 2	√	√
%Q00026	Falla fusible puente 1 y 2	√	√
%Q00027	Falla extractor puente 1 ó 2	√	√
%Q00028	Falla fusibles puente 1 ó 2	√	√
%Q00029	MEL operando	√	√
%Q00030	V/Hz operando	√	√
%Q00031	MXL operando	√	√
%Q00032	OEL operando	√	√
%Q00033	Lámpara limitadores operando	√	√
%Q00034	Falla fuente UCE respaldo	√	√
%Q00035	Permisivo para protección 64F	√	√
%Q00036	Disparo sobre corriente de excitación	√	√
%Q00037	Disparo Sobrevoltaje de excitación	√	√
%Q00038	Sobre corriente transformador de excitación	√	√
%Q00039	Vgen >90%	√	√
%Q00040	Disparo falla extractores	√	√
%Q00041	Bloqueo puente 1	√	√
%Q00042	Disparo tiempo largo de excitación	√	√
%Q00043	Lámpara UCE principal	√	√
%Q00044	Transferencia UCER / UCEP	√	√
%Q00045	Bloqueo puente 2	√	√
%Q00046	Pérdida de pulsos	√	√
%Q00047	Repetidor pulso cardiaco UCEP / UCER	√	√
%Q00048	Pulso cardiaco UCEP / UCER	√	√

4.1.8. Prueba de simulación de TP y TC

Alimentando con una maleta de pruebas (generador trifásico), se simulan los transformadores de potencial, transformadores de corriente y la frecuencia en los puntos correspondientes.

4.1.8.1. Verificación del transductor de voltaje

El voltaje es variable, la corriente y la frecuencia permanecen constantes.

Tabla VIII. Verificación TV

Voltaje en TP's (VCA)	Salida TV (VCD)
70.2	4.429
80.2	5.064
90.1	5.700
100.0	6.333
110.0	6.960
120.0	7.600

4.1.8.2. Verificación del transductor de Volt/Hertz

El voltaje es variable, la corriente y la frecuencia permanecen constantes.

Tabla IX. Verificación transductor V/Hz

Voltaje en TP's (VCA)	Frecuencia (HZ)	Salida V/Hz (VCD)
70.2	60.0	2.615
80.2	60.0	3.016

90.1	60.0	3.415
100.0	60.0	3.813
110.0	60.0	4.206
120.0	60.0	4.596

4.1.8.3. Verificación del transductor de WATT/ VAR

El voltaje es constante, la corriente en la fase B es variable y el ángulo de la corriente adelanta y atrasa con respecto al voltaje.

Tabla X. Verificación transductor Watt/VAR

Valor de TP's (VCA)	Valor de TC's (ACA)	Ángulo (°)	Salida Watts (VCD)	Salida VAR's (VCD)
110.0	1.0	0°	1.200	0.074
110.0	2.0	0°	2.405	0.120
110.0	3.0	0°	3.608	0.166
110.0	3.85	0°	4.630	0.205
110.0	4.0	0°	4.810	0.212
110.0	5.0	0°	6.012	0.258
110.0	1.0	-90°	-0.035	1.316
110.0	2.0	-90°	-0.071	2.603
110.0	3.0	-90°	-0.109	3.889
110.0	3.85	-90°	-0.139	4.981
110.0	4.0	-90°	-0.144	5.173
110.0	5.0	-90°	-0.181	6.459
110.0	1.0	90°	0.036	-1.256
110.0	2.0	90°	0.072	-2.543
110.0	3.0	90°	0.108	-3.829
110.0	3.85	90°	0.140 v	-4.921
110.0	4.0	90°	0.145	-5.114
110.0	5.0	90°	0.181	-6.400

4.1.9. Prueba de aisladores de señal de corriente de excitación

Utilizando un calibrador de procesos, se inyecta una señal en milivoltios desde el cableado rematado en el shunt (1500A / 50mV) y verificar las salidas del aislador de señal 2, siendo salida 1 la señal de retroalimentación de corriente de excitación hacia el PLC y la salida 2 la señal de retroalimentación para la ráfaga de pulsos.

Tabla XI. Verificación aislador de señal de corriente de excitación

mV	Corriente (ACD)	Salida 1 (VCD)	Salida 2 (VCD)
0	0	0.148	0.144
5	150	0.992	0.986
10	300	1.944	1.936
15	450	2.915	2.897
20	600	3.882	3.873
25	750	4.876	4.856
30	900	5.855	5.838
35	1050	6.840	6.820
40	1200	7.840	7.810
45	1350	8.840	8.800
50	1500	10.450	10.420

4.1.10. Calibración de los medidores de corriente de puente

Utilizando un calibrador de procesos, se inyecta una señal en voltios desde el cableado rematado en el *DET – COR* (TDIP) y se verifica que correspondan con el ampérmetro de cada puente.

Tabla XII. Verificación señal TDIP-Ampérmetro

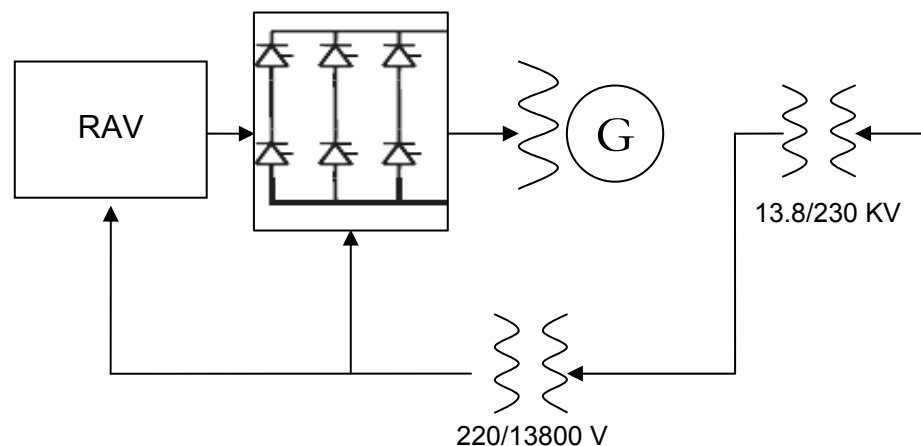
Voltaje (VCD)	Corriente en el ampérmetro P1 (A)	Voltaje (VCD)	Corriente en el ampérmetro P2 (A)
2.5	300	2.5	300
5.0	600	5.0	600
7.5	900	7.5	900
10	1200	10	1200

5. PUESTA EN SERVICIO DE REGULADOR AUTOMÁTICO DE VOLTAJE 1111 2P 550K/220

5.1. Prueba de alto voltaje

Para esta prueba es necesario desconectar el generador síncrono de la red de generación eléctrica. El RAV será alimentado desde la línea de 230 KV proveniente del sistema eléctrico de potencia, pasando por el transformador de máquina que servirá como reductor 230/13.8 KV, y por el transformador de excitación 13800/220 V. La salida de corriente directa del RAV llegará a las escobillas del generador.

Figura 33. Esquema simplificado para prueba de alto voltaje



Se realizan las siguientes simulaciones para el cierre de 41 con la máquina estacionada:

- Se desconecta el disparo 86G.

- Se desconectan los cables referentes a la señal de falla en transformador de excitación por sobre temperatura o sobre corriente.
- Al cerrar el interruptor de campo (41), forzar V_{gen} mayor al 90% por primera vez durante los primeros 8 segundos para evitar un disparo por tiempo largo de excitación, esto se hace realizando un corto contacto entre los puntos A y B del SVRA.
- Al tener 220 VAC provenientes del transformador de excitación en las barras R, Y, B, realizar las mediciones:

$$R - Y = 222.3 \text{ VCA}$$

$$Y - B = 222.5 \text{ VCA}$$

$$B - R = 222.4 \text{ VCA}$$

- Verificar que el voltaje aplicado tenga correcta secuencia de fases. El led RFI del módulo generador de pulsos debe apagarse cuando están en fase las líneas.
- Posteriormente se debe forzar la demanda de ángulo en la UCE principal y en la UCE respaldo, eliminando posteriormente el registro TP-63 de ambos canales.

5.1.1. Verificación del aislador de señal para voltaje de excitación

El aislador de señal para voltaje de excitación (AS1), toma señales a través de circuitos divisores conectados directamente en el bus de corriente

directa y envía la señal de retroalimentación de voltaje de excitación al PLC para UCEP (salida 1) y para UCER (salida 2).

Tabla XIII. Verificación aislador de señal de voltaje de excitación

Voltaje en Barras CD	Voltaje RD1 (VCD)	Voltaje RD2 (VCD)	Voltaje de entrada (VCD)	Salida 1 (VCD)	Salida 2 (VCD)
60.23	45.30	14.90	14.90	1.528	1.530
122.0	91.60	30.20	30.20	3.046	3.050
180.4	135.6	44.60	44.60	4.486	4.492
244.0	180.7	60.02	60.02	6.048	6.099
295.4	222.3	73.00	73.00	7.360	7.360

5.1.2. Verificación de voltajes del circuito supresor Clipper

El circuito clipper es un filtro de corriente alterna que la rectifica a corriente directa y después la disipa en sus resistencias.

Tabla XIV. Voltajes circuito Clipper

(VCD)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Puente 1	80.9	81.7	80.2	82.1	80.2	82.1	80.8	81.6
Puente 2	80.1	82.1	80.4	81.3	81.2	82.4	81.6	82.8

5.1.3. Relación de transformadores

Valores de voltaje de corriente alterna.

Tabla XV. Verificación de transformadores para uso del RAV

Transf.	H1-H2	H1-H3	H2-H3	X1-X2	X1-X3	X2-X3
TRFP	221.2	222.3	221.1	122.4	124.4	123.2
TRFR	221.3	222.4	221.2	122.4	124.1	123.5

TRTD	112.1	112.7	112.6	112.6	111.6	111.9
TRRE	222.0	N/A	N/A	92.90	N/A	92.90

5.1.4. Prueba de amplificador de pulsos

Tabla XVI. Voltajes de prueba booster

Canal Booster	60 VCD	15 VCD	-15 VCD
Principal	56.85	14.92	-15.03
Respaldo	56.95	15.32	-15.13

5.1.5. Prueba circuito supresor RC de corriente alterna

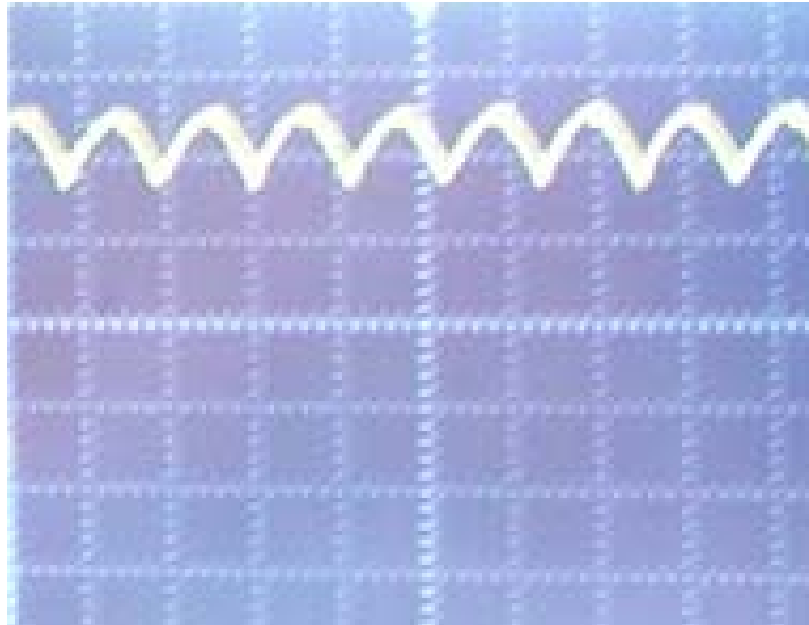
Tabla XVII. Voltajes de circuito supresor de c.a.

CAS 1	CAS 2	CAS 3	RES 1	RES 2	RES 3
126.5	125.7	126.4	24.57	24.66	24.72

5.1.6. Prueba de ráfaga de pulsos

En el módulo de la ráfaga de pulsos se cortocircuitan en la bornera A los puntos 1 y 2. Cuando la máquina está sincronizada existe un permiso para evitar la ráfaga de pulsos y por consiguiente una sobreexcitación.

Figura 34. Ráfaga de pulsos con valor de 300.1 VCD

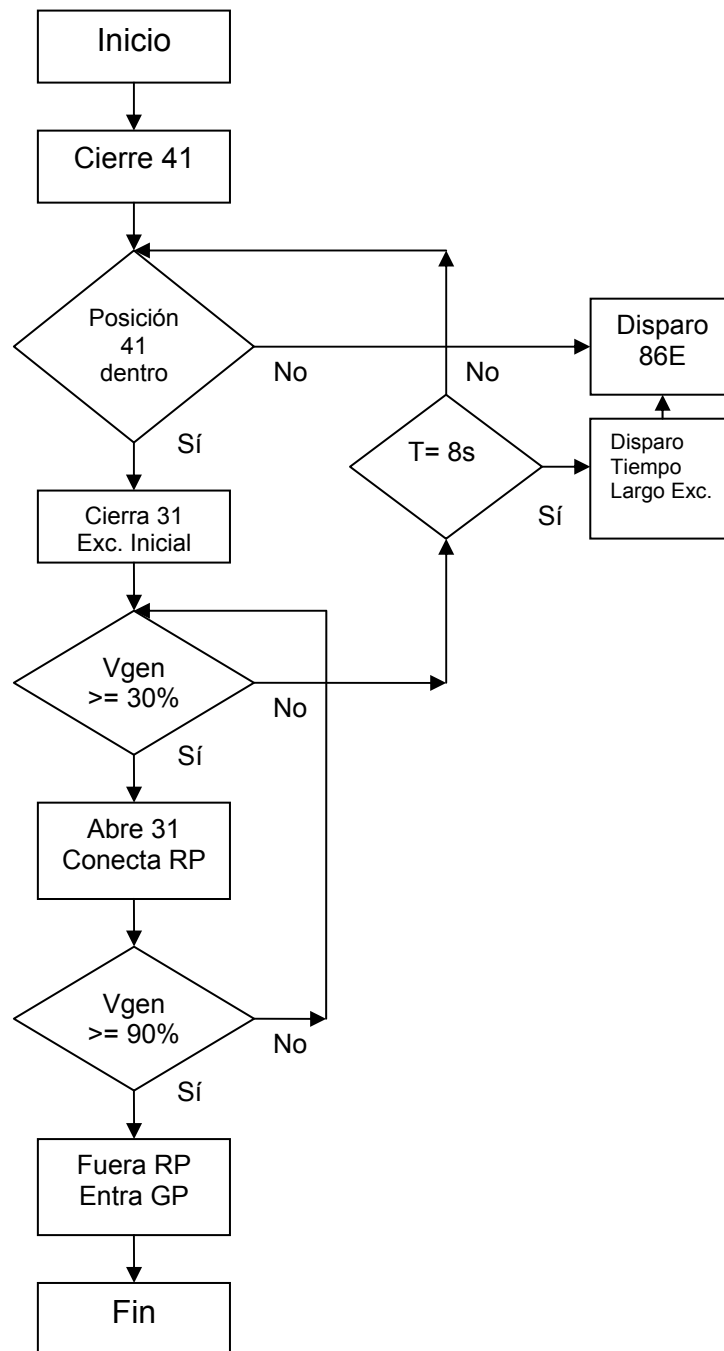


5.2. Pruebas en vacío

Teniendo una frecuencia de 60 Hz en el generador síncrono, acoplado a la subestación de transmisión, pero con el 52G abierto, se realizan pruebas estáticas y dinámicas.

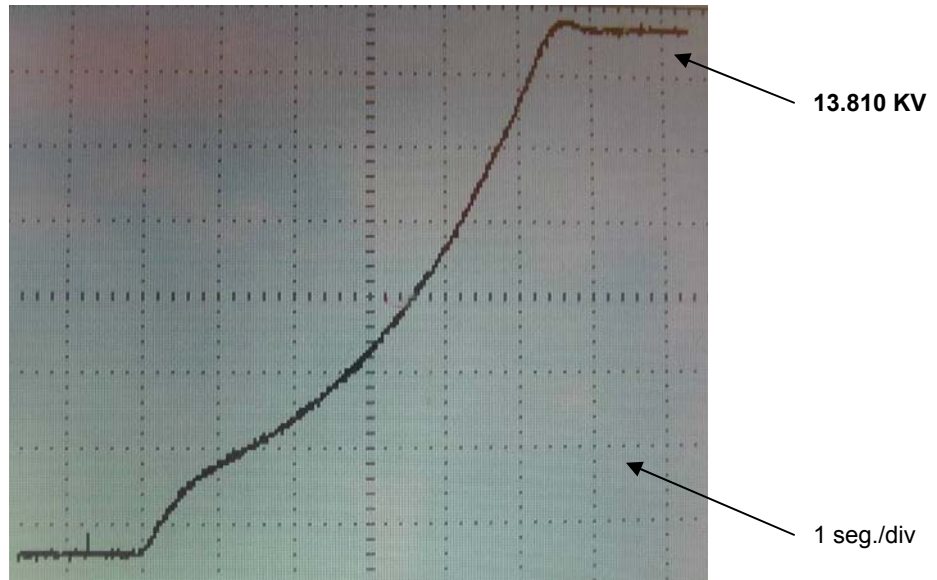
5.2.1. Excitación

Figura35. Diagrama de flujo de secuencia de excitación



- **Excitación canal automático**

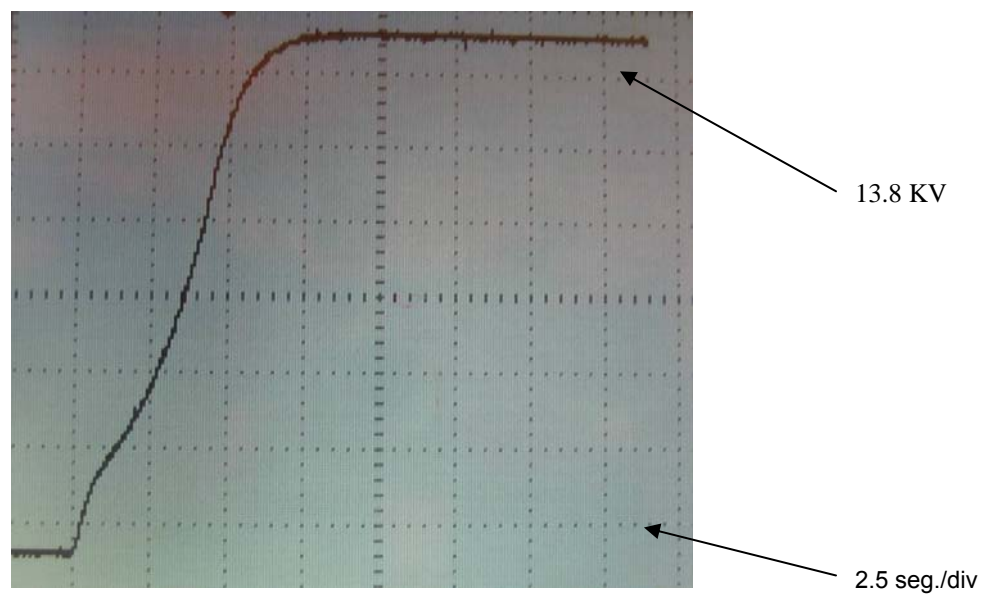
Figura 36. Excitación canal automático



Tiempo de excitación: 7 segundos

- **Excitación canal manual**

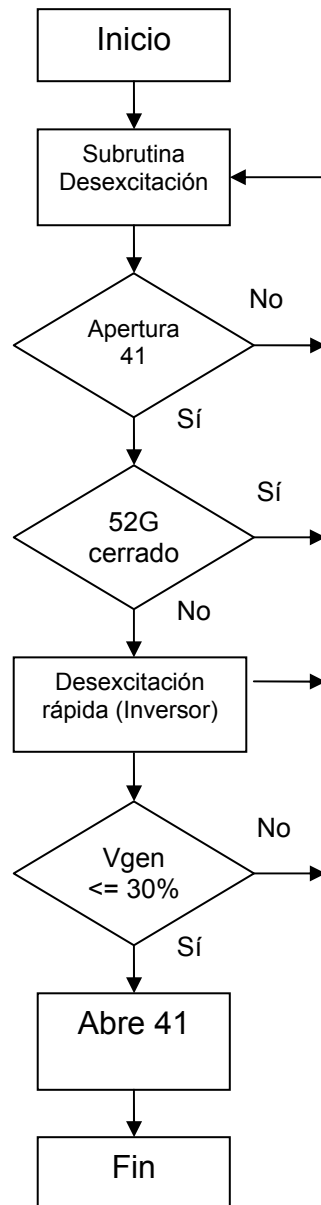
Figura 37. Excitación Canal Manual



Tiempo de excitación: 9.5 segundos

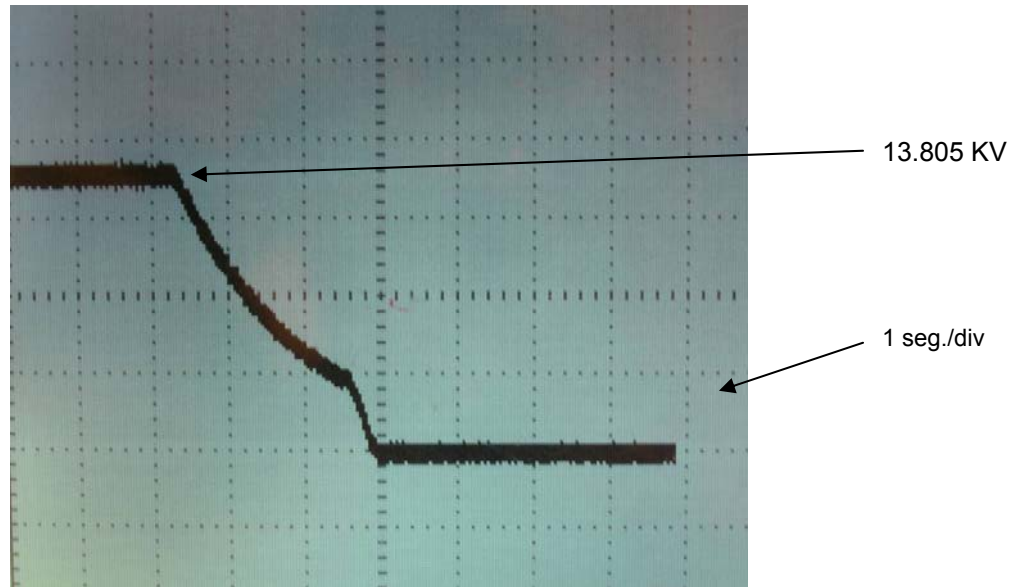
5.2.2. Desexcitación

Figura 38. Diagrama de flujo de secuencia de desexcitación



- **Desexcitación canal automático**

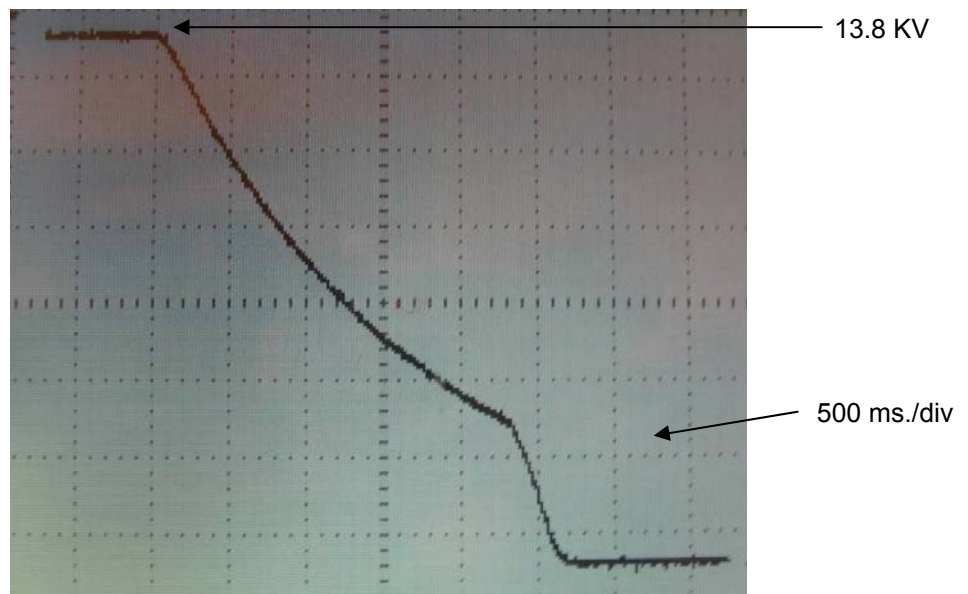
Figura 39. Desexcitación canal automático



Tiempo de desexcitación: 3.1 segundos

- **Desexcitación canal manual**

Figura 40. Desexcitación Canal Manual



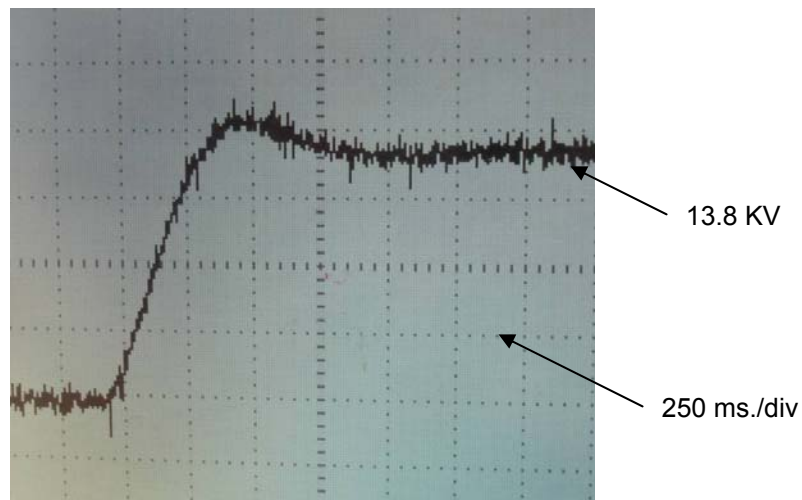
Tiempo de desexcitación: 3.2 segundos

5.2.3. Escalón

- **Escalón positivo 10%**

El voltaje nominal del generador se reduce en un 10% (1380 V) presionando el botón “bajar” en el panel de mandos local, es decir, el generador se ajusta a 12,420 V y al mantener presionado el mando escalón en el panel, este sube el valor a 13,800 V, dando paso al análisis de parámetros.

Figura 41. Escalón positivo 10%



Parámetros finales

Tiempo de crecimiento: 270 ms.

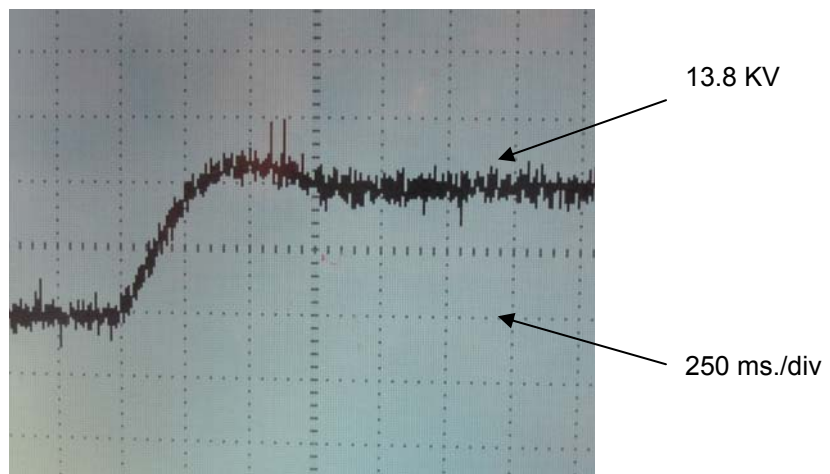
Tiempo de establecimiento: 1 s.

Sobrepaso: 12.5%

- **Escalón positivo 5%**

Las mismas características que el escalón 10%.

Figura 42. Escalón positivo 5%



Parámetros finales

Tiempo de crecimiento: 240 ms.

Tiempo de establecimiento: 940 ms.

Sobrepaso: 14.28%

Los parámetros finales parten de la ecuación $\{ [(A1-B1)/(A2-B2)] - 1 \} * 100$, siendo A1, B1, A2, B2, valores obtenidos de la tabulación de puntos de la gráfica del escalón.

Después de la prueba se regresa al valor de voltaje nominal del generador.

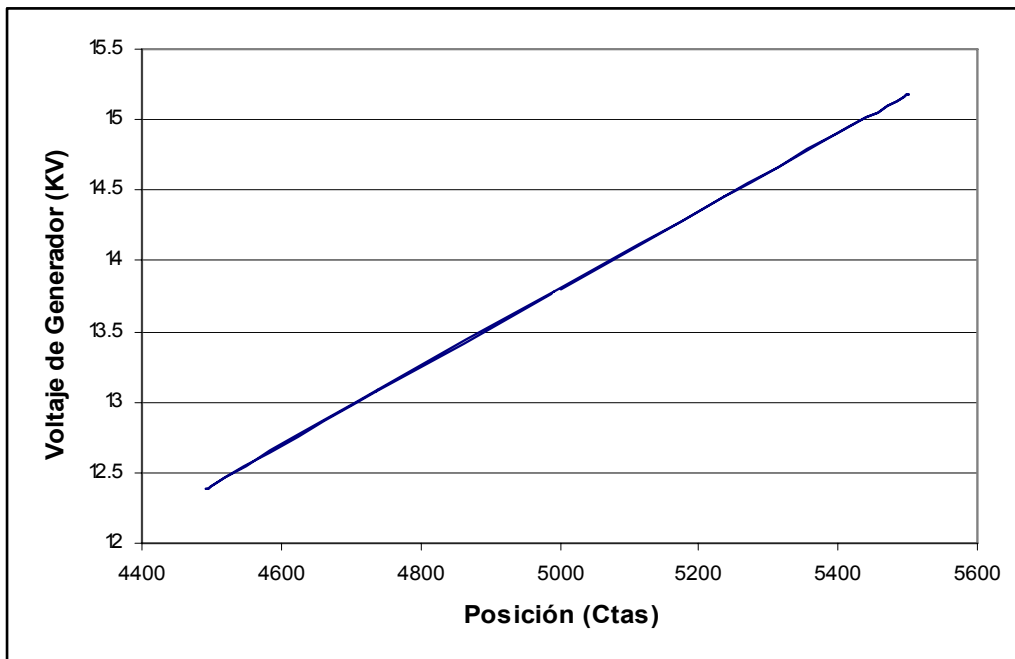
5.2.4. Rango

- **90D:** Se varía entre el 90% y 110% de voltaje nominal del generador.

Tabla XVIII. Rango 90D

Porcentaje (%)	Posición (Cuentas)	Voltaje Generador (KV)	Corriente Excitación (ACD)	Voltaje Excitación (VCD)
100	5001	13.802	374	65
105	5237	14.451	407	70
110	5500	15.177	449	76
105	5236	14.456	401	69
100	4990	13.775	365	64
95	4741	13.085	333	59
90	4491	12.392	306	53
95	4736	13.076	337	60
100	4989	13.769	370	64

Figura 43. Rango 90D



- **70D:** Se varía entre el 70% y 110% de voltaje nominal del generador.

Tabla XIX. Rango 70D

Porcentaje (%)	Posición (Cuentas)	Voltaje Generador (KV)	Corriente Excitación (ACD)	Voltaje Excitación (VCD)
100	5058	13.781	373	64
105	5497	14.459	406	69
110	6012	15.138	446	75
105	5389	14.440	399	68
100	4925	13.769	363	63
90	4164	12.392	305	54
80	3571	11.017	259	47
70	3045	9.593	219	41
80	3669	11.017	266	48
90	4300	12.406	315	56
100	5043	13.764	372	64

Figura 44. Rango 70D

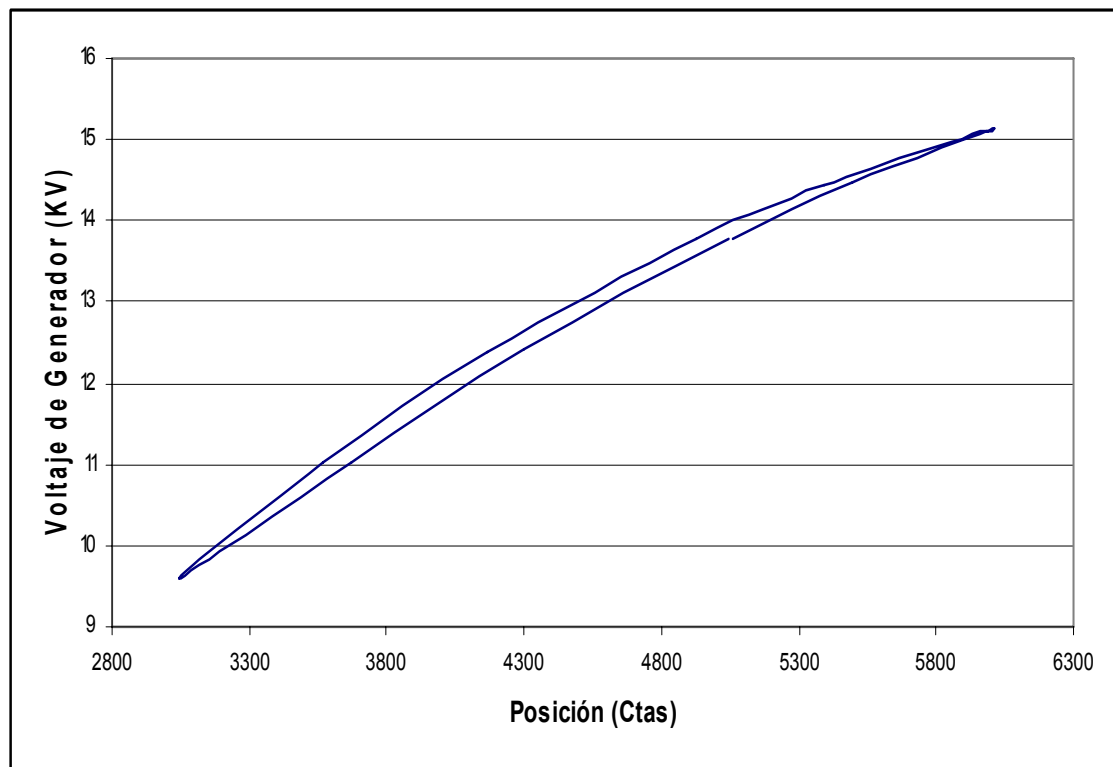
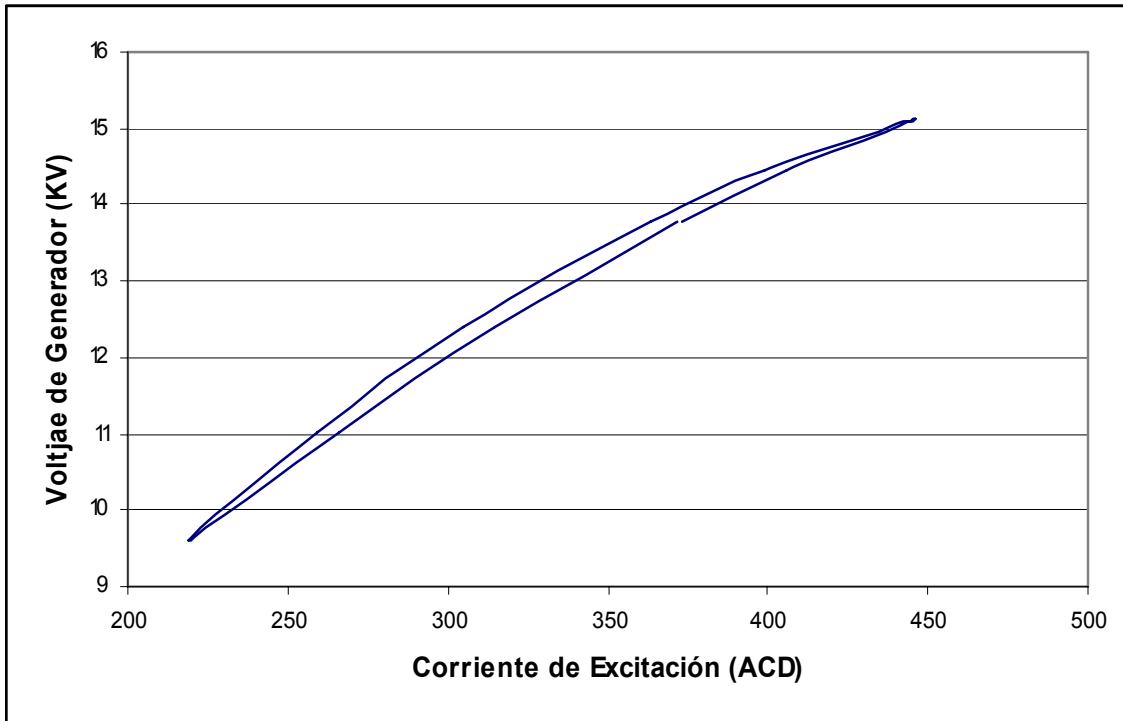


Figura 45. Curva de saturación del generador síncrono



5.2.5. Prueba al limitador de Volt/Hertz

Se varía la frecuencia del generador así como el voltaje en terminales para verificar la operación del limitador, ya sea por un sobrevoltaje o por baja frecuencia, cuando se encuentre fuera de sincronización.

Tabla XX. Prueba al limitador Volt/Hertz

Voltaje Tp's (VCA)	Frecuencia (Hz)	Relación	Observaciones
110.0	60.14	0.99	Nominal
118.9	60.14	1.078	Limitador Operado
114.2	57.52	1.082	Limitador Operado

5.2.6. Transferencias

- **Auto-manual:** Se transfiere de un canal a otro para ver que no ocurran variaciones de consideración.

Tabla XXI. Prueba de transferencia auto-manual-auto

% Voltaje de Generador	Transferencia	Voltaje Generador (KV)	Voltaje Excitación (VCD)	Corriente Excitación (ACD)	% Error
100	Auto	13.802	63	370	0.03
	Manual	13.797	63	370	
105	Manual	14.484	69	403	0.07
	Auto	14.495	69	404	
95	Auto	13.098	58	332	0.08
	Manual	13.087	57	331	
100	Manual	13.783	63	366	0.03
	Auto	13.788	63	366	

- **UCEP-UCER**

Tabla XXII. Transferencia UCEP-UCER-UCEP

%	Transferencia	Voltaje Generador (KV)	Voltaje Excitación (VCD)	Corriente Excitación (ACD)	% Error
95	UCEP-UCER	13.107	59	332	0.15
		13.087	58	331	
105	UCER-UCEP	14.467	69	402	0.13
		14.487	69	403	

5.3. Pruebas con carga

Con las pruebas en vacío satisfactorias, se procede a definir las curvas de capacidad de la máquina síncrona por medio de los ajustes de los

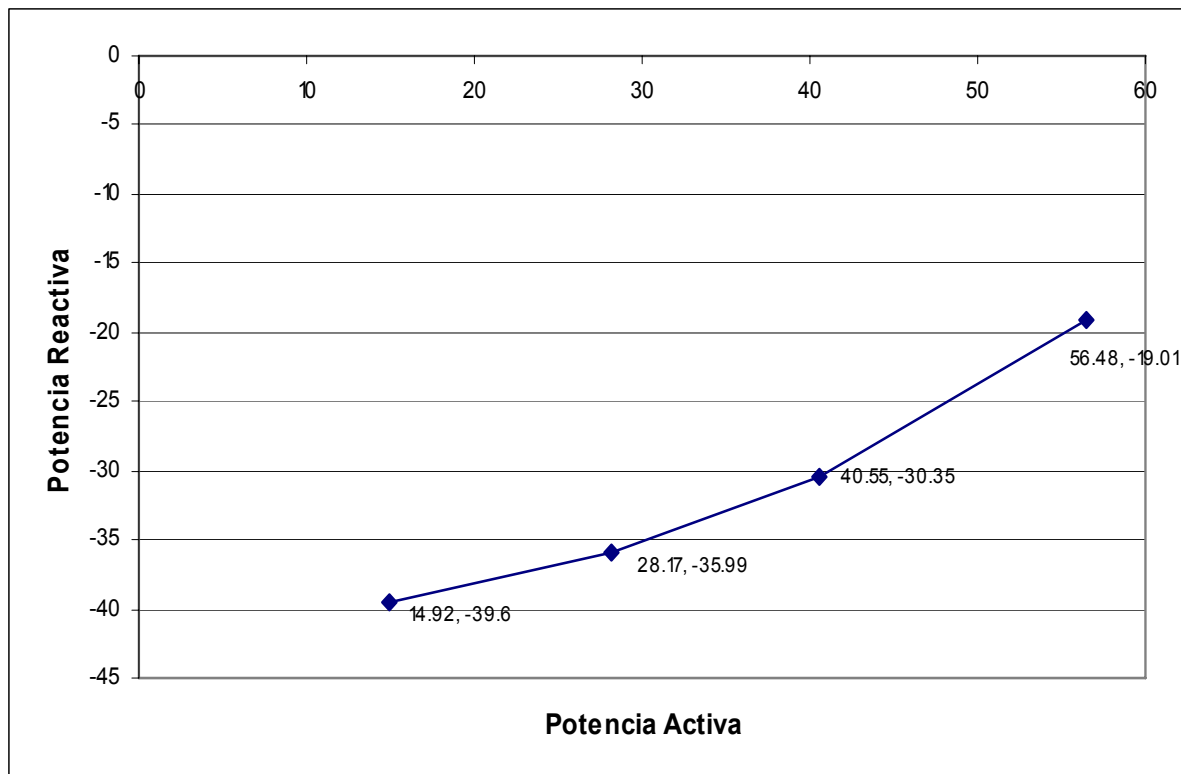
limitadores de máxima y mínima excitación en el regulador automático de voltaje haciendo variar la potencia aparente tomada del sistema eléctrico nacional.

- Limitador de mínima excitación

Tabla XXIII. MEL

Voltaje Generador (KV)	Voltaje Excitación (VCD)	Corriente Excitación (ACD)	% de variación de Potencia	Potencia Activa (MW)	Potencia Reactiva (MVAR)
14.750	17	70	25	14.92	-39.60
12.770	31	162	50	28.17	-35.99
13.071	48	266	75	40.55	-30.35
13.427	71	416	100	56.48	-19.01

Figura 46. MEL



- **Limitador de máxima excitación**

Los valores entre el 25% y el 75% de potencia reactiva fueron valores de prueba tomados a radio reducido debido a que en dicho momento el sistema no brindaba los MVAR necesarios para realizar la prueba a radio real.

Tabla XXIV. OEL

Voltaje Generador (KV)	Voltaje Excitación (VCD)	Corriente Excitación (ACD)	% de variación de Potencia	Potencia Activa (MW)	Potencia Reactiva (MVAR)
14.810	103	614	25	13.20	24.88
14.677	100	594	50	26.20	20.70
14.393	94	554	75	40.62	12.06
14.525	111	652	100	55	17.67

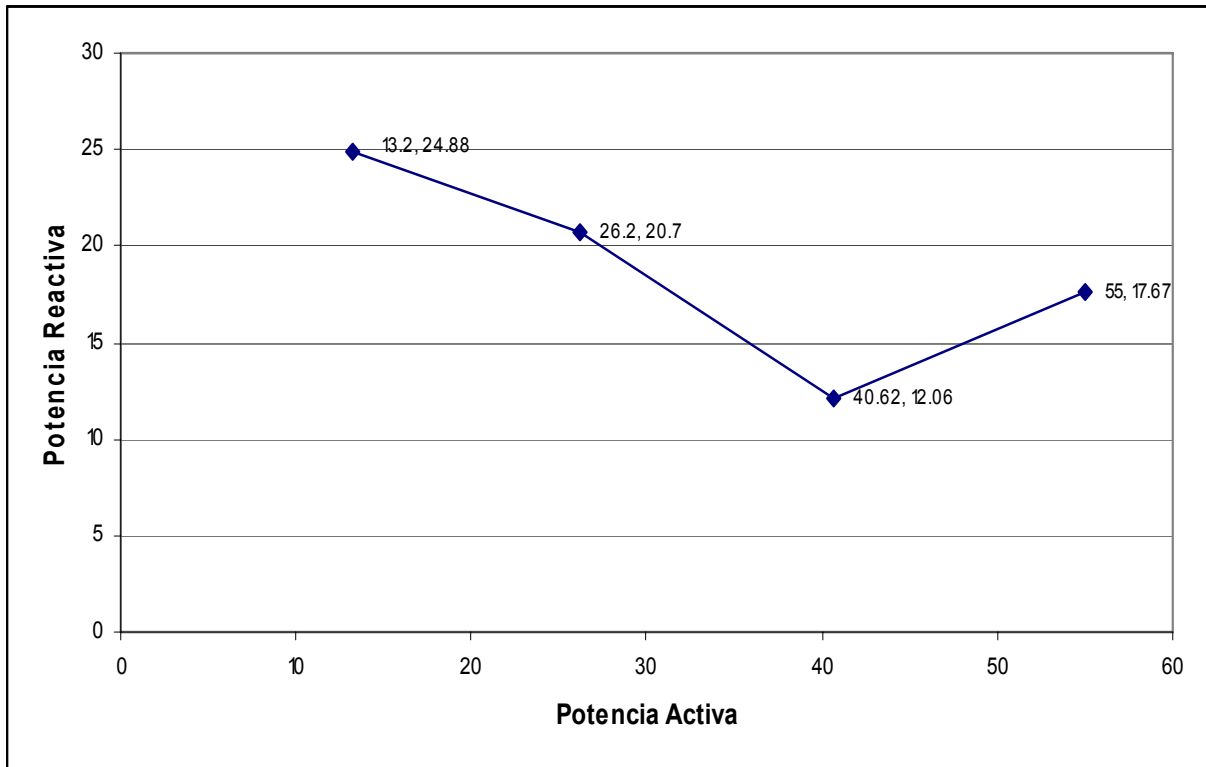
Los valores estimados para radio real son:

25% =31MVAR

50% =28MVAR

75% =24MVAR

Figura 47. OEL



Según la curva de capacidad del generador síncrono no debería dar tal entrega de reactivos en el límite activo, pero a petición del Administrador del Mercado Mayorista se cumple con el requerimiento de la figura 47.

- **Prueba al estabilizador de sistema de potencia**

Con el generador sincronizado a la red, se realiza la prueba dinámica del escalón de reactivos para ver que el estabilizador responda lo más acertado posible.

Figura 48. Escalón de reactivos sin PSS

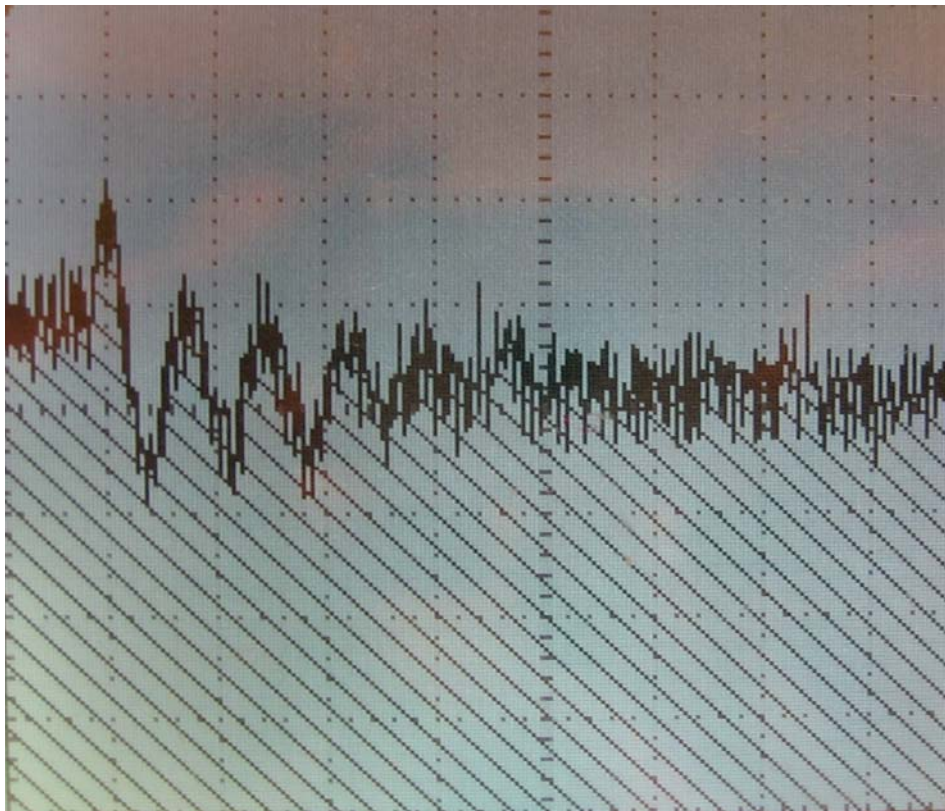
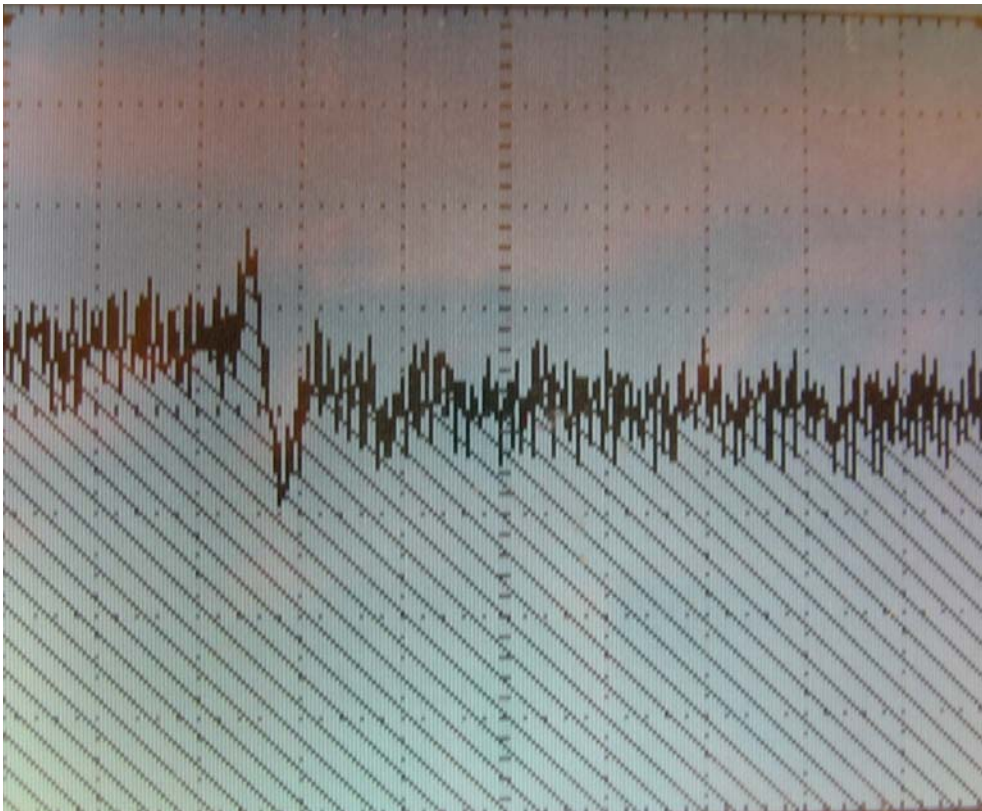


Figura 49. Escalón de reactivos con PSS



CONCLUSIONES

1. Un sistema de excitación es una combinación de aparatos diseñados para suministrar y controlar la corriente de campo del generador por medio de reguladores automáticos. Los circuitos de los reguladores estáticos de voltaje usan, voltaje, corriente del estator y variables de excitación para generar señales de control por medio de los cuales son controlados los tiristores.
2. La conducción entre ánodo y cátodo es controlada por el terminal de puerta. Hasta que no se alcance la tensión de bloqueo (V_{BO}) el tiristor no se dispara. Cuando se alcanza dicha tensión, se percibe un aumento de la intensidad en el ánodo (I_A), disminuye la tensión entre ánodo y cátodo, comportándose así como un diodo polarizado directamente. Si se quiere disparar el tiristor antes de llegar a la tensión de bloqueo será necesario aumentar la intensidad de puerta (I_{G1} , I_{G2} , I_{G3} , I_{G4} ...), ya que de esta forma se modifica la tensión de cebado de éste.
3. En virtud de que su sistema de regulación de voltaje (que controla la corriente de campo en respuesta al valor que se midió del voltaje terminal), la máquina normalmente opera a un voltaje terminal constante cuyo valor se encuentra dentro de $\pm 5\%$ del voltaje proporcional.
4. El RAV 1111 excita al generador a partir del voltaje de baterías de la central ajustando el voltaje del generador al valor nominal en forma controlada en un tiempo mínimo. Rectifica en forma controlada

el voltaje del transformador de excitación para aplicarlo en el rotor del generador como corriente directa de excitación.

5. El limitador de mínima excitación tiene como objeto evitar la operación del generador fuera de su curva de capacidad y eliminar la posibilidad de aparición de oscilaciones por rebasar los límites de estabilidad, por pérdida de excitación.

6. El limitador de sobre-excitación tiene la función de evitar el calentamiento del rotor y estator del generador cuando este se encuentra en régimen de sobre-excitación, limitando la excitación del campo de forma tal que opere dentro de la curva de capacidad del generador en modo de sobreexcitación.

RECOMENDACIONES

Actitud “*EVER GREEN*” (Siempre Verde)

Se trata de mantener al regulador automático de voltaje bajo un mantenimiento periódico que impida la destrucción de los semiconductores del área de electrónica, ya que la vida media de éstos puede llegar a ser de 10 años. Con la actitud *ever green* se puede prolongar la vida del regulador 10 años más; dándole así vida útil y libre de equipación constante de repuestos que signifiquen costos de manutención.

Esto se aplica más al área electrónica; pues se tiene plena confianza en que el área de potencia, interruptor de campo y fase de excitación, no presenta mayor desgaste de funcionamiento y ésta no falla.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABOYTES, Florencio. **Estabilidad Dinámica en Sistemas Eléctricos de Potencia**. Monterrey, N.L., México. Centro Nacional de Control de Energía. 1991. 431 pág.
2. MITSUBISHI Electric Corporation. **Instrucciones de servicio y mantenimiento, Tomo I-A Generador (Excitación)**. Instituto Nacional de Electrificación. Guatemala, C.A., 1980.
3. SERVICIOS Profesionales de Automatización y Comunicaciones S.A. de C.V. **Manual de Operación RAV 1111 2P 550K/220**. México, 2007.
4. FITZGERALD, A. E., Charles Kingsley y Stephen Umans. **Máquinas Eléctricas**. 6ª. Ed. México D.F.: Editorial McGraw-Hill Latinoamericana, 2004. 682 pág.
5. CHAPMAN, S.J. **Máquinas Eléctricas**. 3ª. Ed. McGraw Hill Latinoamericana, S.A., 2001. 768 pág.
6. OGATA, Katsuhiko. **Ingeniería de Control Moderna**. 2ª. Ed. México Editorial Prentice Hall. 1988. 902 pág.
7. KLOCKNER-MOELLER. **Wiring Manual, Automation and Power Distribution**. Federal Republic of Germany, 1999.
8. Conferencia SEPAC, **“Guatemala en Plena Modernización”**, Noviembre 2008.

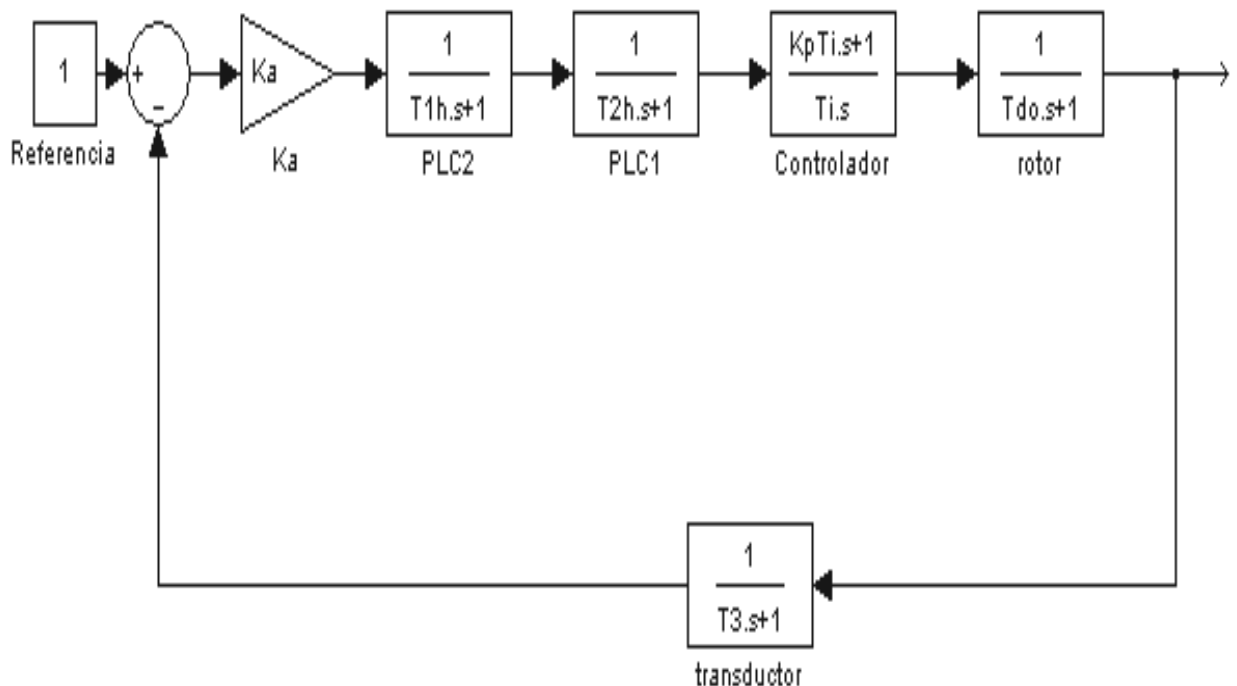
9. MONOGRAFÍA. **Reguladores automáticos de voltaje en conjunto con estabilizadores de sistemas de potencia (AVR + PSS).** Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Automática, 2005.
10. www.sepaccorp.com (febrero 2008)
11. www.sapiensman.com/control_automtico/#el_lazo_realimentado (noviembre 2008)
12. www.redeya.com/electronica/tutoriales/PDF/tiristor.pdf (diciembre 2008)
13. www.electronicafacil.net/tutoriales/EI-tiristor.php (diciembre 2008)
14. www.es.wikipedia.org (diciembre 2008)

ANEXOS

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA DE EXCITACIÓN MARCA SEPAC PARA LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHIXOY

El diagrama a bloques de la función de transferencia del sistema de excitación SEPAC se muestra a continuación. Los dos polos (PLC1 y PLC2) representan el *hardware* del controlador GE-Fanuc. Una constante de tiempo de 20 mseg ha sido considerada para el transductor de voltaje. La ganancia general K_a y los parámetros del controlador PI son parte de los algoritmos de control. El sistema es representado en valores por unidad.

Figura 50. Diagrama a bloques función de transferencia sistema de excitación marca SEPAC para la C.H. Chixoy



Los parámetros de cada bloque son los siguientes:

$$K_a=0.57$$

$$K_P=54.68$$

$$T_i=0.333$$

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL ESTABILIZADOR DEL SISTEMA DE POTENCIA

Función de transferencia del PSS

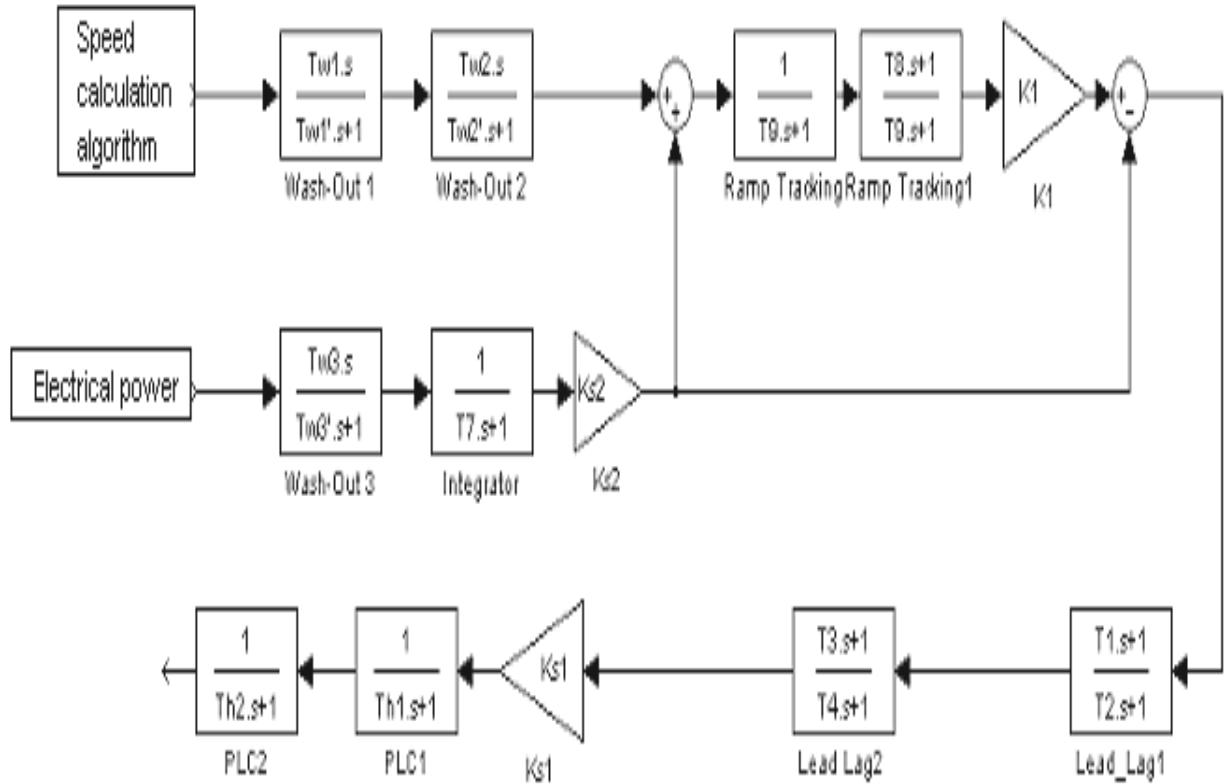
La función de transferencia del estabilizador del sistema de potencia involucra componentes de *software* y de *hardware*. El estabilizador de potencia resultante corresponde al tipo PSS2A.

El diagrama a bloques muestra la función de transferencia de los diferentes algoritmos del PSS2A, adicionalmente a la función de transferencia del *hardware* del controlador GE-Fanuc representado por los dos últimos bloques del diagrama (PLC1 y PLC2).

Las mediciones que se toman en cuenta para el cálculo de la velocidad del rotor son sólo los parámetros eléctricos: Watts, VAR's, KV, Los algoritmos específicos para el cálculo del ángulo interno del rotor forman parte de los algoritmos de programación.

El diagrama general a bloques de la función de transferencia del estabilizador del sistema de potencia se muestra a continuación:

Figura 51. Diagrama general función de transferencia del PSS



Los parámetros de cada bloque son los siguientes:

$$\begin{array}{ll}
 T_{w1} = 1s & T_8 = 0.7246s \\
 T_{w1}' = 1s & T_9 = 0.1136s \\
 T_{w2} = 1s & T_1 = 3s \\
 T_{w2}' = 1s & T_2 = 0.27s \\
 T_{w3} = 1s & T_3 = 3s \\
 T_{w3}' = 1s & T_4 = 0.27s \\
 T_7 = 0.1s & K_{s1} = -0.070 \\
 K_{s2} = 1 & T_{h1} = 0.1s \\
 K1 = 0.55 & T_{h2} = 0.0354s
 \end{array}$$

Figura 52. Curva de capacidad de generador síncrono de C.H. Chixoy

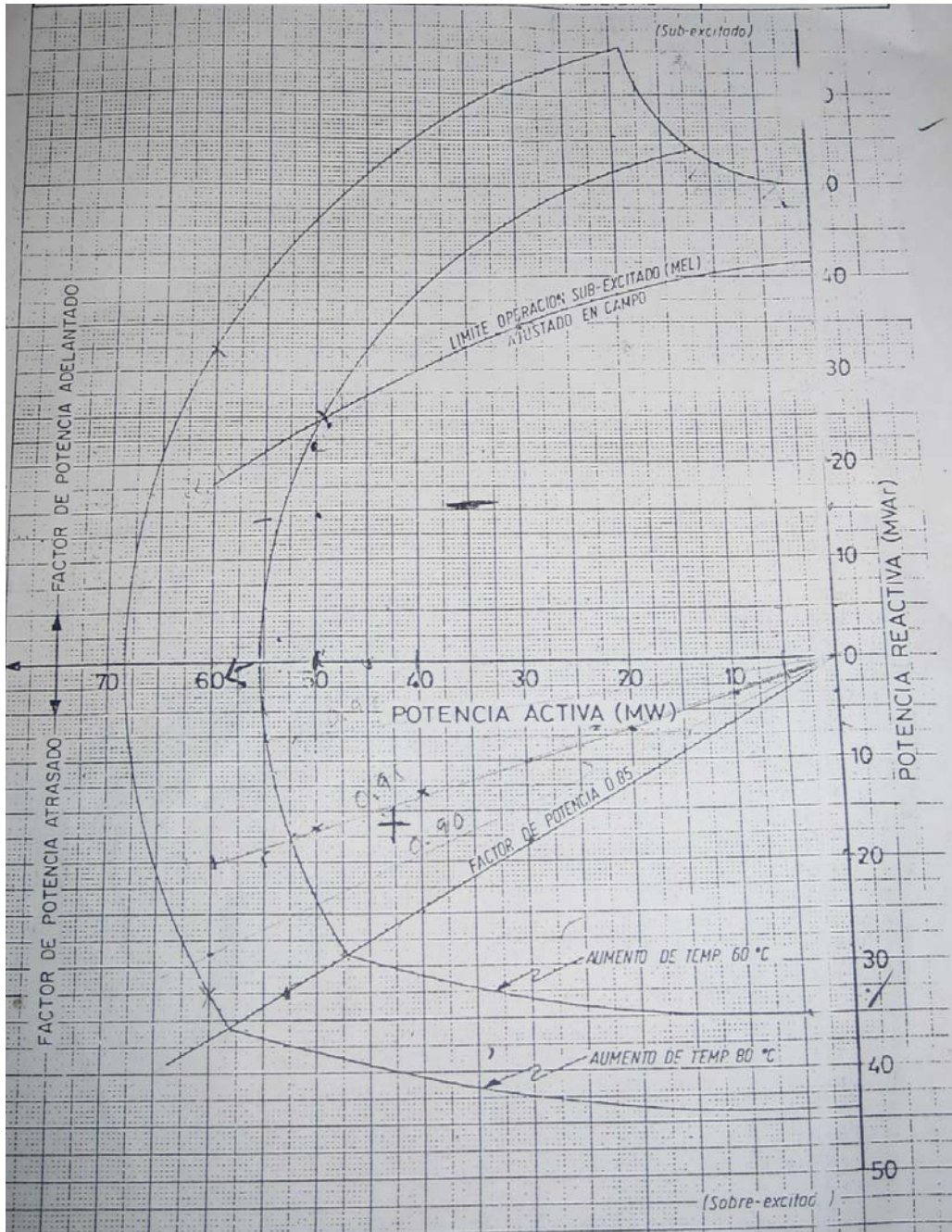
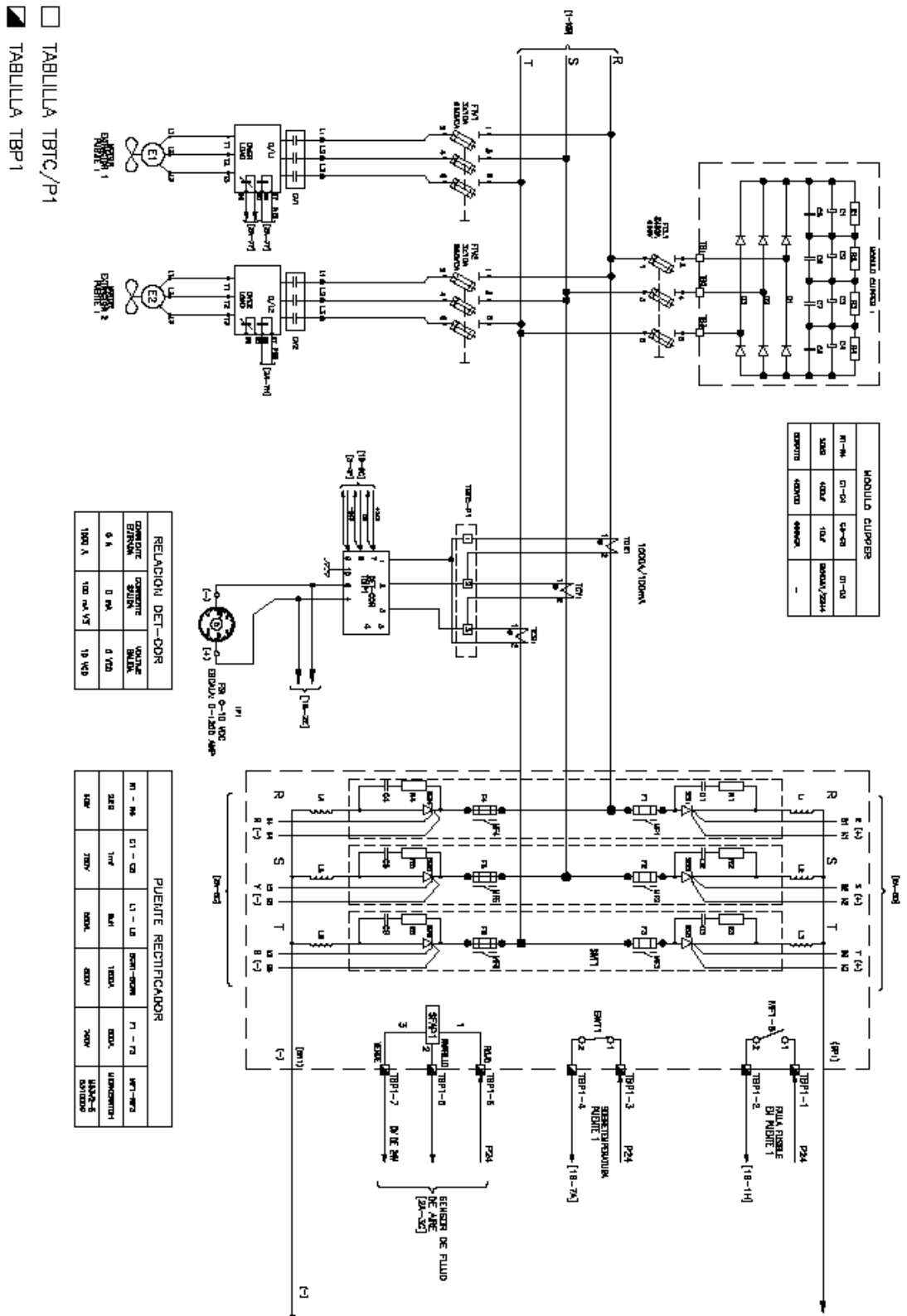


Figura 53. Convertidor puente



□ TABLILLA TBTIC/P1

▣ TABLILLA TBP1

Figura 54. Cinco RAV 1111 2P 550K/220 funcionando en la C.H. Chixoy

