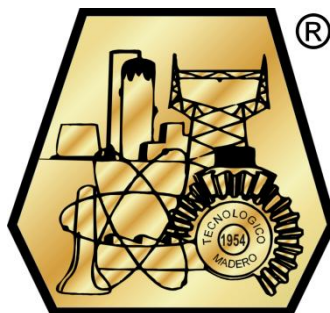


**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



**“IMPLEMENTACIÓN ANALÓGICA DE RELEVADORES DE
PROTECCIÓN PARA GENERADORES SÍNCRONOS”.**

TESIS

QUE PARA OBTENER GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA:
ING. VERÓNICA RIVERA ESPINOSA

DIRECTOR DE TESIS:
M.C. JOSÉ DE JESÚS DURÓN MENDOZA



"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

Cd. Madero, Tamps; a 03 de Febrero de 2015.

OFICIO No.: U2.023/15
AREA: DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS

C. ING. VERÓNICA RIVERA ESPINOSA.
NO. DE CONTROL G06071603
PRESENTE

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su examen de grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica, el cual está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE :	M.C. JOSÉ DE JESÚS DURÓN MENDOZA
SECRETARIO :	DR. GASTÓN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ
VOCAL :	M.C. RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ
SUPLENTE:	M.C. AARÓN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ
DIRECTOR DE TESIS :	M.C. JOSÉ DE JESÚS DURÓN MENDOZA

Se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

**"IMPLEMENTACIÓN ANALÓGICA DE RELEVADORES DE PROTECCIÓN PARA GENERADORES
SÍNCRONOS"**

Es muy satisfactorio para esta División compartir con Usted el logro de esta meta, esperando que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE
"Por mi patria y por mi bien"®

M. P. María Yolanda Chávez Cincó
M. P. MARIA YOLANDA CHÁVEZ CINCO
JEFA DE LA DIVISIÓN



c.c.p.- Minuta
Archivo

MYCHC 'HCV' jar



Implementación analógica de relevadores de protección para generadores síncronos

Verónica Rivera Espinosa

Resumen

Este proyecto de investigación presenta un estudio de tres esquemas de protección para generador síncrono: protección diferencial ANSI 87 G, protección de sobreexcitación ANSI 24, y protección de falla a tierra en el estator ANSI 64 G, con la finalidad de implementarlos con electrónica analógica, para resolver el problema de la falta de herramientas de apoyo para la realización de prácticas en conjunto con generadores síncronos de laboratorio para los alumnos involucrados con las materias de protecciones eléctricas y simulación de relevadores de protección de la Maestría en Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de Ciudad Madero.

Analogical implementation of protection relays for synchronous generator

Verónica Rivera Espinosa

Abstract

This research project presents a study of three protection schemes for synchronous generator: differential protection ANSI 87 G, overexcitation protection ANSI 24, and stator ground fault protection ANSI 64 G, in order to implement with analog electronics, to solve the problem of lack of support tools for practical work in conjunction with synchronous generators laboratory for students involved with subjects like electrical protection, and protection relay simulation of Electrical Engineering Master degree of Instituto Tecnológico de Ciudad Madero.

Dedicatoria

A mis padres:

Verónica María Espinosa Núñez.

Jorge Rivera Santillana.

A mi hermana:

María del Rosario Rivera Espinosa.

Agradecimientos

A Dios.

A mi asesor:

M.C. José de Jesús Durón Mendoza.

A los profesores:

M.C. Aarón González Rodríguez, M.C. Eduardo Nacú Salas Cabrera, Dr. Gastón Hernández Martínez, M.L.L.H. Gladis Miriam Galiana Bravo, M.C. Hermenegildo Cisneros Villegas, M.C. Rafael Castillo Gutiérrez, Ing. Rodolfo Castillo Ibarra, Dr. Rubén Salas Cabrera.

A todo el personal de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del ITCM.

A mis amigos y compañeros estudiantes de Maestría en Ingeniería Eléctrica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT.

Contenido

	<i>Página</i>
Resumen.	ii
Abstract.	iii
Dedicatoria.	iv
Agradecimientos.	v
Contenido.	vi
Lista de tablas.	ix
Lista de figuras.	x
Glosario de términos.	xiv
Capítulo 1. Introducción.	1
1.1. Antecedentes.	2
1.2. Planteamiento del problema.	7
1.3. Justificación.	8
1.4. Objetivos.	9
1.4.1. Objetivo general.	9
1.4.2. Objetivos específicos.	9
1.5. Hipótesis del trabajo.	10
1.6. Alcances y limitaciones.	17
Capítulo 2. Marco teórico.	18
2.1. Transformadores de instrumentos.	19
2.1.1. Transformadores de corriente.	19
2.1.2. Transformadores de potencial.	22
2.2. Relevadores de protección.	25
2.3. Clasificación de relevadores ANSI.	27

2.4. Función de protección diferencial.	32
2.5. Función de protección de sobreexcitación.	34
2.6. Función de protección de falla a tierra en el estator.	37
Capítulo 3. Amplificadores operacionales.	41
3.1. Introducción.	42
3.2. El amplificador operacional.	42
3.3. El amplificador no inversor.	45
3.4. El amplificador inversor.	47
3.5. El amplificador sumador.	49
3.6. La ganancia de lazo.	51
3.7. Filtros activos.	53
3.7.1. Filtros pasa banda.	54
3.8. Convertidor voltaje a corriente.	56
3.9. Comparadores de voltaje.	57
3.10. Rectificadores de precisión.	58
3.10.1. Rectificadores de media onda.	59
3.10.2. Rectificadores de onda completa.	62
3.11. Convertidor ca-cd.	64
3.12. Multivibradores.	66
3.12.1. Multivibrador de barrido amplio CFV.	66
3.13. Convertidores v-f y f-v.	68
3.13.1. Conversión frecuencia a voltaje.	69
Capítulo 4. Generador síncrono.	73
4.1. Introducción.	74
4.2. Conexión de generadores a un sistema de potencia.	75
4.3. Velocidad de rotación de un generador síncrono.	76

4.4. Potencia y par en los generadores síncronos.	77
4.5. Medición de los parámetros del modelo de generador síncrono.	81
4.6. Valores nominales en los generadores síncronos.	86
4.6.1. Voltaje, velocidad y frecuencia nominales.	86
4.6.2. Valores nominales de potencia aparente y factor de potencia.	87
Capítulo 5. Desarrollo del proyecto.	92
5.1. Descripción del proyecto.	93
5.2. Metodología.	94
5.3. Fuente de alimentación simétrica de 12 V.	95
5.4. Diseño de esquema de protección ANSI 87 G.	96
5.5. Diseño de esquema de protección ANSI 24.	106
5.6. Diseño de esquema de protección ANSI 64 G.	108
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones.	110
6.1. Conclusiones.	111
6.2. Recomendaciones.	111
Referencias.	112
Apéndice A. Pruebas de prototipos desarrollados.	113

Lista de Tablas

		<i>Página</i>
Tabla 1.1.	Funciones de protección para un generador.	5
Tabla 2.1.	Equivalencias para clase de protección.	21
Tabla 2.2.	Exactitud y carga nominal.	24
Tabla 5.1.	Lista de componentes de tarjetas pcb del esquema de protección diferencial.	101
Tabla 5.2.	Lista de componentes de tarjetas pcb para caratula frontal del esquema de protección diferencial.	103

Lista de Figuras

	<i>Página</i>
Figura 1.1. Diagrama unifilar típico de las protecciones de un generador.	6
Figura 1.2. Diagrama de bloques de relevador de protección diferencial (ANSI 87 G).	11
Figura 1.3. Característica de operación de relevador diferencial de porcentaje con pendiente del 10%.	12
Figura 1.4. Diagrama de bloques de relevador de protección de sobreexcitación (ANSI 24).	13
Figura 1.5. Característica de operación de relevador de sobreexcitación.	14
Figura 1.6. Tensiones de tercera armónica para diferentes condiciones en un generador típico.	14
Figura 1.7. Diagrama de bloques de relevador de protección de falla a tierra en el estator (ANSI 64 G).	16
Figura 2.1. Circuito equivalente del transformador de corriente.	20
Figura 2.2. Diagrama simplificado de un TP con algunos instrumentos.	23
Figura 2.3. Diagrama simplificado del dispositivo capacitivo de potencial.	23
Figura 2.4. Evolución de los relevadores de protección.	28
Figura 2.5. Relevador electromecánico.	29
Figura 2.6. Relevador digital.	31
Figura 2.7. Conexión típica de protección diferencial de generador.	33
Figura 2.8. Curva característica de operación de relevador diferencial de porcentaje con pendiente del 10%.	34
Figura 2.9. Conexión típica de un esquema de protección V/Hz.	36
Figura 2.10. Característica típica del relé para protección V/Hz, de nivel dual de tiempo definido.	37
Figura 2.11. Conexión típica de un esquema de protección de falla a tierra en	38

	el estator.	
Figura 2.12.	Esquema de protección de falla a tierra de baja tensión de tercera armónica.	39
Figura 2.13.	Tensiones de tercera armónica para diferentes condiciones en un generador típico.	40
Figura 3.1.	Símbolo del amplificador operacional y de las conexiones de suministro de energía.	43
Figura 3.2.	Circuito equivalente de un amplificador operacional energizado.	44
Figura 3.3.	Amplificador no inversor.	45
Figura 3.4.	Modelo equivalente del amplificador no inversor.	46
Figura 3.5.	Amplificador inversor y modelo del circuito para su análisis.	48
Figura 3.6.	Amplificador sumador.	49
Figura 3.7.	Determinación directa de la ganancia de lazo, como $T = -A_{VD}/v_T$.	52
Figura 3.8.	Respuesta ideal de filtro pasa banda.	54
Figura 3.9.	Filtro pasa banda de retroalimentación múltiple.	54
Figura 3.10.	Simbolismo del comparador de voltaje y la CTV ideal (Todos los voltajes de nodo están referidos a tierra).	57
Figura 3.11.	Rectificador de media onda (RMO) y rectificador de onda completa (ROC).	59
Figura 3.12.	Rectificador de media onda básico.	59
Figura 3.13.	Circuitos equivalentes del RMO básico para entradas <i>a)</i> positivas y <i>b)</i> negativas.	60
Figura 3.14.	RMO mejorado y su curva de transferencia de voltaje.	61
Figura 3.15.	ROC de precisión o circuito de valor absoluto.	62
Figura 3.16.	ROC empleando únicamente dos resistores idénticos.	64
Figura 3.17.	<i>a)</i> Relación entre V_{rms} y V_m , y entre V_{prom} y V_m . <i>b)</i> Diagrama de bloques de un convertidor de ca-cd.	65
Figura 3.18.	Oscilador controlado por voltaje (OCV) de emisor acoplado.	67
Figura 3.19.	El convertidor voltaje a frecuencia AD537 (Cortesía Analog	68

	Devices).	
Figura 3.20.	Conexión CVF para la conversión frecuencia a voltaje, y sus correspondientes formas de onda. Convertidor VFC32 (cortesía de Burr-Brown).	70
Figura 3.21.	Transmisión de información analógica en forma aislada.	72
Figura 4.1.	Generador síncrono básico.	74
Figura 4.2.	Tipos de generadores síncronos.	75
Figura 4.3.	Conexión de generadores a un SEP.	76
Figura 4.4.	Diagrama de flujo de potencia en un generador síncrono.	78
Figura 4.5.	Diagrama fasorial simplificado donde se ha ignorado la resistencia del inducido.	79
Figura 4.6.	<i>a)</i> Característica de circuito abierto (CCA) de un generador síncrono. <i>b)</i> Característica de cortocircuito (CCC) de un generador síncrono.	82
Figura 4.7.	<i>a)</i> Circuito equivalente de un generador síncrono durante la prueba de corto circuito. <i>b)</i> Diagrama fasorial resultante. <i>c)</i> Campos magnéticos durante la prueba de cortocicuto.	84
Figura 4.8.	Dibujo de la reactancia sincrónica aproximada de un generador síncrono como función de la corriente de campo de la máquina. El valor constante de reactancia encontrado para bajos valores de corriente de campo es la reactancia sincrónica no saturada de la máquina.	85
Figura 4.9.	Forma como el límite de la corriente del campo rotor fija el factor de potencia nominal de un generador.	89
Figura 4.10.	Curvas típicas de sobreexcitación de generadores.	90
Figura 4.11.	Curva de capacidad del generador.	91
Figura 5.1.	Proceso del desarrollo de proyecto de tesis.	94
Figura 5.2.	Diagrama para fuente de ± 12 V.	95
Figura 5.3.	Transformador de corriente tipo dona	96

Figura 5.4.	Conexión de R a secundario del TC.	96
Figura 5.5.	Prueba de polaridad del TC.	97
Figura 5.6.	Diseño de una fase del esquema de protección diferencial para generador síncrono.	98
Figura 5.7.	Sumador inversor.	99
Figura 5.8.	Rectificador de onda completa.	99
Figura 5.9.	Formas de onda en la salida del ROC.	100
Figura 5.10.	Forma de onda en la salida del sumador.	100
Figura 5.11.	Pcb's (a) de tarjeta de una fase de la protección diferencial de generador, (b) de carátula frontal de la misma.	104
Figura 5.12.	Esquema de protección diferencial para generador síncrono.	96
Figura 5.13.	Diseño de esquema de protección de sobreexcitación.	106
Figura 5.14.	PCB de esquema de protección de sobreexcitación.	106
Figura 5.15.	Esquema de protección de sobreexcitación.	107
Figura 5.16.	Diseño de esquema de protección de falla a tierra en el estator.	108
Figura 5.17.	PCB de esquema de protección de falla a tierra en el estator.	109
Figura 5.18.	Esquema de protección de falla a tierra en el estator.	109

Glosario de Términos

A: Ganancia sin carga.

AMP OP: Amplificador operacional.

ANSI: Instituto Nacional Estadounidense de Estándares.

BJT: Transistor bipolar de unión.

CA: Corriente alterna.

CCA: Característica de circuito abierto.

CCC: Característica de cortocircuito.

CD: Corriente directa.

CFV: Convertidor de frecuencia a voltaje.

CI: Circuito Integrado.

CMOS: Semiconductor complementario de óxido metálico.

CTV: Curva de transferencia de voltaje.

CVF: Convertidor de voltaje a frecuencia.

DP's: Dispositivos de potencial.

f: Frecuencia.

FVCV: Fuente de voltaje controlada por voltaje.

Hz: Hertz.

IEEE: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.

I_f: Corrientes de fase.

LME: Limitador de mínima excitación.

N=Relación de espiras.

OCC: Oscilador controlado por corriente.

p.u.: Sistema por unidad.

R_M=Pérdidas en el núcleo.

RMO: Rectificador de media onda.

ROC: Rectificador de onda completa.

RPM: Revoluciones por minuto.
SEP: Sistema Eléctrico de Potencia.
TC's: Transformadores de Corriente.
TP's: Transformadores de Potencial.
 U_f : Tensiones de fase.
V: Volts.
VA: Volts-Amperes.
 v_D : Voltaje diferencial de entrada.
 ω : Frecuencia angular.
Z: Impedancia.
 Z_C =Impedancia de carga.
 Z_H = Impedancia del devanado primario.
 Z_L = Impedancia del devanado secundario.
 Z_M =Impedancia de magnetización.

Capítulo

1

Introducción

El presente capítulo inicia con los antecedentes y el planteamiento de un problema existente en el laboratorio de Maestría en Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, como lo es la falta de herramientas complementarias para la realización de prácticas de laboratorio para las asignaturas de protecciones eléctricas y simulación de relevadores de protección. Posterior a esto se establecen la justificación, los objetivos y la hipótesis de este proyecto, así como también los alcances y las limitaciones del mismo.

1.1. ANTECEDENTES.

Los generadores síncronos o alternadores son máquinas síncronas utilizadas para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica trifásica. La fuente de potencia mecánica, el motor primario, puede ser un motor diesel, una turbina de vapor, una turbina hidráulica o un equipo similar. Cualquiera que sea la fuente, debe cumplir la propiedad básica de que su velocidad sea constante, independientemente de la demanda de potencia. Si esto no se cumple, la frecuencia resultante del sistema de potencia podría presentar fallas.

El voltaje interno generado en esta máquina depende de la tasa de rotación del eje y de la magnitud del flujo de campo. El voltaje de fase de la máquina difiere del voltaje interno generado por efecto de la reacción del inducido en el generador y por la resistencia y reactancia internas de los devanados del inducido. El voltaje en las terminales del generador será igual al voltaje de fase o está relacionado a este por $\sqrt{3}$ dependiendo de si la conexión de la máquina es delta ó es estrella.

La forma de operación de un generador síncrono en un sistema real de potencia depende de sus limitantes. Cuando un generador opera solo, las potencias real y reactiva que deben ser suministradas están determinadas por la carga impuesta, y los puntos de ajuste del gobernador y la corriente de campo controlan el flujo de potencia real y reactiva del generador. En los sistemas reales que contienen generadores de aproximadamente igual tamaño, los puntos de ajuste del gobernador afectan tanto a la frecuencia como al flujo de potencia, y la corriente de campo afecta tanto al voltaje en los terminales como al flujo de potencia reactiva [1].

El generador síncrono es un elemento esencial en el SEP y se emplea para producir la gran mayoría de potencia eléctrica utilizada en todo el mundo.

Un generador protegido adecuadamente requiere, la protección automática contra las condiciones anormales más dañinas. El inconveniente al proporcionar algunas de las

protecciones no es tanto que puedan operar inadecuadamente o remover el generador de servicio innecesariamente, sino que fallen al operar cuando deben. Este temor de aplicar la protección adecuada puede ser reducido considerablemente entendiendo la necesidad de tales protecciones y cómo aplicarlas a un generador dado. Un disparo innecesario del generador es indeseable, pero las consecuencias de no dispararlo y dañar la máquina son terribles. Para la empresa, el costo de dicho evento no es únicamente el costo de la reparación o reemplazo de la máquina dañada, sino el costo substancial de comprar energía de reemplazo durante el periodo en que la unidad está fuera de servicio.

En sitios atendidos, un operador atento y experimentado, puede algunas veces evitar remover el generador de servicio corrigiendo la condición anormal. Sin embargo, en la gran mayoría de los casos, el evento ocurrirá tan rápidamente para la reacción del operador, que se requiere la detección y aislamiento automático. Se reconoce que los operadores también cometen errores y crean condiciones anormales que requieren el disparo para evitar daños. La energización inadvertida y la sobreexcitación son ejemplos de tales eventos [4].

El desarrollo de los dispositivos de protección basado en relevadores, se puede enmarcar en cuatro grupos relevantes: relevadores electromecánicos, relevadores híbridos, relevadores estáticos y relevadores digitales.

Los generadores tienen características especiales que exigen esquemas de protección distintos a los empleados en otros equipos del sistema eléctrico. Una falla en un generador invariablemente es de carácter permanente, su reparación requiere tiempo y es costosa. En consecuencia, se justifica emplear protecciones lo más sensibles y completas posible.

El margen de sobrecarga, o tolerancia para operar fuera de sus límites nominales, es menor en generadores que en otros equipos eléctricos. Esta propiedad exige una protección adicional, de respaldo, que impida, su operación prolongada bajo condiciones anormales debidas a causas extrañas.

La gran importancia de generadores en el sistema eléctrico exige que la protección de respaldo sea seleccionada y ajustada con mucho cuidado para evitar disparos innecesarios. La protección eléctrica empleada en generadores se encuentra orientada para detectar tres tipos de condiciones anormales:

- Falla debida a cortos circuitos eléctricos en la zona de generador.
- Operación anormal del generador fuera de sus límites operacionales.
- Fallas en el resto del sistema eléctrico debidas a cortocircuitos.

Las máquinas síncronas se clasifican en dos diseños, principales máquinas de rotor cilíndrico y máquinas de polos salientes, los generadores impulsados por turbinas de vapor tienen rotores cilíndricos. La mayoría de los rotores cilíndricos está compuesta de partes de acero sólido. El número de polos es típicamente 2 o 4. Los generadores impulsados por turbinas hidráulicas tienen rotores de polos salientes con núcleos laminados. Existen tres guías ANSI/IEEE que cubren los requisitos y prácticas para protección en generadores síncronos. Estas guías proporcionan información técnica de las protecciones eléctricas de los generadores síncronos. Estas guías son:

Guía:	Titulo:
C37.202	Guía para protección de generadores de C.A.
C37.101	Guía para protección de fallas a tierra de generadores.
C37.106	Guía para la protección para plantas generadoras de energía.

Los números de dispositivos de los relevadores es un método conciso para especificar los requisitos de protección de generadores. Cuando se utilizan relevadores discretos ellos denotan una necesidad específica de protección. Con el advenimiento de relevadores multifunción ellos se utilizan para describir varias funciones dentro de estos relevadores.

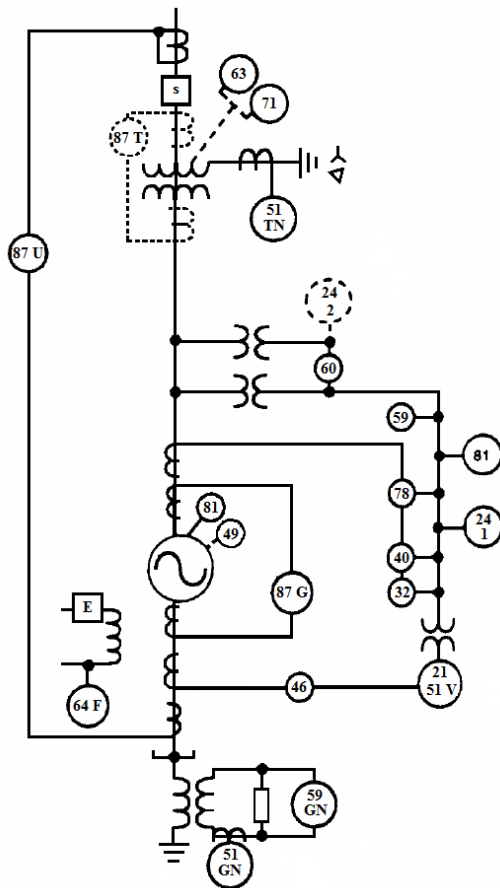
Las definiciones para cada número se dan a continuación referidas a su aplicación para protección de generadores en la tabla 1.1:

Dispositivo	Función
21	Relevador de distancia. Su uso para respaldar fallas en el sistema y fallas entre fases en la zona del generador.
24	Volts/Hertz esta protección se utiliza para protección de sobreexcitación de generador.
27	Relevador de bajo voltaje de generador.
27 TN	Relevador de bajo voltaje para fallas a tierra en el estator.
32	Relevador de potencia inversa, esta es una protección de motorización del generador.
40	Protección contra pérdida de excitación.
46	Protección contra corriente de secuencia negativa para proteger al generador contra corrientes desbalanceadas.
49	Protección alta temperatura de generador.
51 GN	Relevador de falla a tierra de sobrecorriente temporizada o con retardo.
51 TN	Protección de falla a tierra de respaldo.
51 V	Relevador de sobrecorriente temporizado supervisado por voltaje para protección de respaldo para fallas entre fases en el sistema y del generador.
59	Protección de sobrevoltaje del generador.
59 GN	Protección de sobrevoltaje para fallas a tierra en el estator del generador.
60	Relés de balance del voltaje. Se utilizan para detección de fallas en fusibles en los transformadores de potencial.
62 B	Temporizador de fallas de interruptor.
63	Relevador de presión para fallas en el transformador.
64 F	Protección de fallas a tierra de campo.
71	Bajo nivel de aceite en transformador.
78	Protección contra pérdida de sincronismo.
81	Relevador de baja o alta frecuencia.

86	Relevador auxiliar de bloqueo con reposición manual.
87 G	Protección diferencial. Protección primaria para fallas entre fases de generador.
87 N	Protección diferencial para fallas a tierra en el estator.
87 T	Protección diferencial. Protección primaria del transformador.
87 U	Protección diferencial para el grupo generador-transformador.

Tabla 1.1. Funciones de protección para un generador.

A continuación se muestra en la figura 1.1 un diagrama unifilar típico de las protecciones de un generador.



- 21 Relevador de distancia.
- 24-1 Protección contra sobreexcitación.
- 24-2 Protección contra sobreexcitación.
- 32 Protección potencia inversa.
- 40 Protección pérdida de excitación.
- 49 Protección alta temperatura.
- 51 GN Fallas a tierra estator.
- 51 TN Fallas a tierra transformador principal.
- 51 V Fallas entre fases de respaldo.
- 59 Protección de sobrevoltaje.
- 59GN Protección fallas a tierra estator.
- 60 Relé desbalance de voltaje.
- 63 Protección Buchholz.
- 64F Fallas a tierra rotor.
- 71 Bajo nivel aceite transformador.
- 78 Protección pérdida de sincronismo.
- 81 Protección alta/baja frecuencia.
- 87 G Protección diferencial generador.
- 87 T Protección diferencial transformador.
- 87 U Protección dif. grupo gen-transf.

Figura 1.1. Diagrama unifilar típico de las protecciones de un generador.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Un sistema de protección bien diseñado y adecuadamente coordinado es vital para asegurar que el sistema eléctrico de potencia opere dentro de los requerimientos y parámetros previstos. Al brindarle seguridad a las redes eléctricas y a los costosos equipos, también se está protegiendo una inversión de capital muy grande y se protege también a las personas.

La operación automática permite aislar las fallas tan rápido como sea posible para minimizar los daños. Los costos económicos y los beneficios de un sistema de protección deben ser tenidos en cuenta con el fin de obtener un adecuado balance entre los requerimientos del sistema y los recursos financieros disponibles. Ante la ocurrencia de una falla o de una condición anormal, el sistema de protección debe ser capaz de detectar el problema inmediatamente y aislar la sección afectada, permitiendo así la operación normal del resto del Sistema de Potencia.

En general, el sistema de potencia se divide en zonas de protección para generadores, motores, transformadores, barras, circuitos de transmisión y distribución. La filosofía general para el uso de relevadores es dividir el sistema en zonas separadas que pueden ser individualmente protegidas y desconectadas ante la ocurrencia de las fallas, para permitir que el resto del sistema continúe en servicio. En la protección de generadores sincrónicos se deben considerar las condiciones de operación anormales más dañinas que en la protección de cualquier otro elemento del sistema de potencia [4].

En el ámbito de la ingeniería es inherente para el estudiante el desarrollo de las aplicaciones prácticas de los temas adquiridos ya que a su egreso este conocimiento podría reflejarse como una ventaja del aprendizaje obtenido, que le ayudará a incorporarse al ámbito laboral de manera eficaz. Sin embargo la carencia de herramientas para el desarrollo práctico de pruebas es un problema actual que existe.

Por ello y la importancia en el área industrial que presenta el tema de protecciones se pretende solucionar la problemática mediante el desarrollo del presente proyecto denominado “Implementación analógica de relevadores de protección para generadores síncronos”, para auxiliar a los estudiantes de la Maestría en Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, en familiarizarse con las funciones de protección que protegen a los generadores síncronos, tales como: la protección diferencial de generador (ANSI 87 G), la protección de sobreexcitación (ANSI 24) y la protección de falla a tierra en el estator (ANSI 64 G), por medio de la realización de pruebas prácticas con los esquemas analógicos en conjunto con los generadores síncronos de laboratorio.

Características del motor: 175 W – 1800 rpm – 208 V – 0.8 A.

Características del generador: 120 VA – 1800 rpm – 208 V – 0.33 A.

1.3. JUSTIFICACIÓN.

Los generadores síncronos constituyen uno de los equipos más importantes en un sistema de potencia y están sujetos a la vez, a más tipos de fallas que otros elementos. Las fallas en los generadores se consideran de gran importancia, ya que pueden producir fallos severos y costosos, al aislamiento, devanados y núcleo; las fallas también pueden producir pares electromagnéticos bruscos de torsión en los ejes y acoplamiento, ocasionando daños en estos elementos [1].

Para evitar los problemas ocasionados por las fallas que se presentan fuera y dentro del generador y que producen altas corrientes de cortocircuito, se requiere el uso de elementos de protección.

Conocer, comprender y saber implementar las funciones de protección para los generadores síncronos es de vital importancia; por ello, la trascendencia del desarrollo de este proyecto radica en brindar a los estudiantes de la Maestría en Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de Ciudad Madero las facilidades necesarias para instruirse en dichos aspectos.

Los diseños analógicos efectuados proporcionarán las herramientas para ver la funcionalidad de algunas de las funciones de protección utilizadas en los generadores síncronos en un grupo motor-generator de laboratorio, donde se simularán fallas y condiciones anormales a los que son sometidos éstos equipos.

Así, el alumno comprenderá la funcionalidad de las funciones de protección de generadores y los ajustes para una adecuada protección de los mismos.

1.4. OBJETIVOS.

1.4.1. Objetivo general.

Implementar tres esquemas de protección para generador síncrono con electrónica analógica, para usarse como herramientas complementarias en la realización de prácticas en conjunto con los generadores síncronos de laboratorio en las materias de protecciones eléctricas y simulación de relevadores de protección.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Implementar las siguientes funciones de protección: la protección diferencial de generador (ANSI 87 G), la protección de sobreexcitación (ANSI 24) y la protección de falla a tierra en el estator (ANSI 64 G) para protección de los generadores síncronos con esquemas analógicos construidos con amplificadores operacionales y circuitos digitales con tecnología CMOS.

- Verificar la operación correcta de los relevadores simuladores de protección mediante la simulación de fallas y condiciones anormales a los que son sometidos estos equipos en un grupo motor-generator de laboratorio de la marca LabVolt.

1.5. HIPÓTESIS DEL TRABAJO.

Al realizar pruebas prácticas con los esquemas de protección para generadores síncronos de laboratorio, los alumnos obtendrán experiencia de como poder proteger estos importantes equipos.

Los relevadores simuladores de protección permitirán comprobar las características de 3 funciones de protección para generadores síncronos mediante la observación de su comportamiento en un osciloscopio. Al simular fallas y condiciones anormales a los que son sometidos los generadores síncronos, se podrá realizar la detección de averías y verificación de la operación correcta de las funciones de protección.

Función de protección diferencial. La protección diferencial de generador detecta principalmente cortocircuito entre fases dentro del embobinado del generador. Cuando se trata de generadores cuyo neutro está aterrizado a través de un reactor de baja resistencia, la protección diferencial detecta también cortocircuitos interiores de fase a tierra. El principio de operación de la protección diferencial se basa en la comparación de la corriente que sale de un embobinado, con la corriente que entra del otro extremo del mismo embobinado; si las dos corrientes son iguales el embobinado está bien, si fuesen diferentes entonces existe falla [6].

La figura 1.2 muestra el diagrama de bloques de una de las tres fases del relevador de protección diferencial a implementar. Este esquema está formado por: un sumador inversor, tres rectificadores de onda completa y dos comparadores.

El sumador inversor tiene como función presentar en su salida la suma ponderada de las entradas con las ponderaciones que establezcan las razones de resistencia. Si todas las resistencias son iguales, el circuito produce la suma (invertida) de sus entradas, $v_O = -(v_1 + v_2 + v_3)$.

El rectificador de onda completa (ROC) es un circuito que además de pasar la porción positiva de una onda, se invierte, y después pasa también la porción negativa. Su característica de transferencia, es $v_O=v_I$ para $v_I>0$, y $v_O=-v_I$ para $v_I<0$, o en forma más concisa, $|v_O|=|v_I|$.

El comparador consiste en comparar el voltaje v_p en una de sus entradas con el voltaje V_N de la otra entrada, y obtener como salida ya sea un voltaje bajo V_{OL} o un voltaje alto V_{OH} , de acuerdo con: $v_O=V_{OL}$ para $v_p<v_N$ y $v_O=V_{OH}$ para $v_p>v_N$. Se tiene que mientras v_p y v_N son variables analógicas debido a que pueden asumir un conjunto continuo de valores, v_O es una variable binaria debido a que únicamente puede asumir uno de dos valores, V_{OL} o V_{OH} .

A la relación de la corriente de operación entre corriente de restricción se le llama pendiente, función que cumple el comparador.

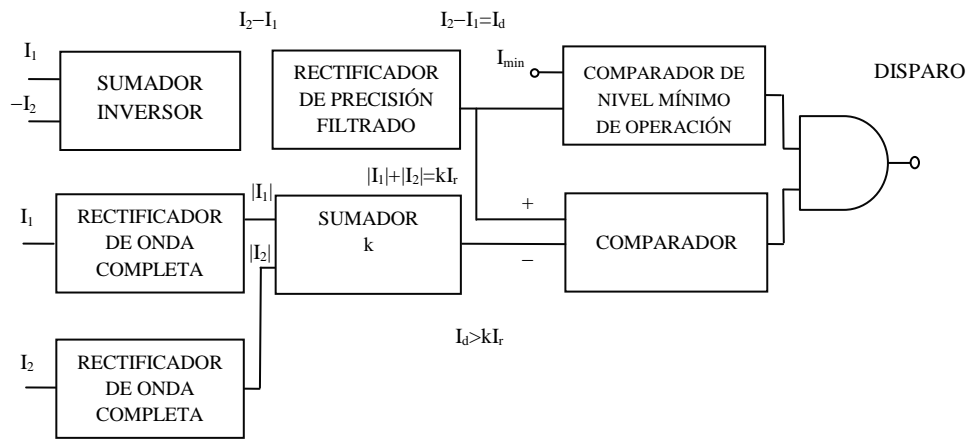


Figura 1.2. Diagrama de bloques de relevador de protección diferencial (ANSI 87 G).

La figura 1.3 muestra la característica de operación de un relevador diferencial de porcentaje con una pendiente de 10%.

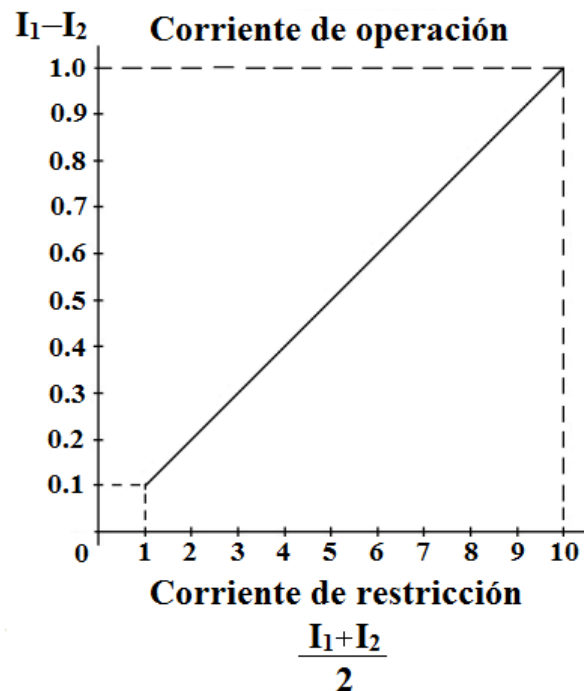


Figura 1.3. Característica de operación de relevador diferencial de porcentaje con pendiente del 10%.

Función de protección de sobreexcitación. La sobreexcitación del generador, se produce cuando su operación demanda un flujo magnético que excede los límites de diseño. La mayor parte de problemas relacionados con sobreexcitación, se dan en el momento del arranque y parado del generador, cuando la frecuencia de la onda generada es menor a la nominal y el voltaje se mantiene constante debido a la actuación del regulador automático de voltaje, o por fallas por parte del operador, cuando el regulador está en manual [6].

El diagrama de bloques del relevador de la protección de sobreexcitación por implementar se presenta en la figura 1.4. Este esquema se compone por dos etapas, cada una consta de un convertidor de voltaje a corriente, un comparador con su ajuste correspondiente y un temporizador.

El convertidor de voltaje a corriente acepta un voltaje de entrada V y produce una corriente de salida del tipo $I=kV$, donde k es la ganancia o sensibilidad del circuito en amperes

por volts; la función del comparador consiste en comparar el voltaje v_p en una de sus entradas con el voltaje V_N de la otra entrada, y obtener como salida ya sea un voltaje bajo V_{OL} o un voltaje alto V_{OH} , de acuerdo con: $v_O = V_{OL}$ para $v_p < v_N$ y $v_O = V_{OH}$ para $v_p > v_N$. Se tiene que mientras v_p y v_N son variables analógicas debido a que pueden asumir un conjunto continuo de valores, v_O es una variable binaria debido a que únicamente puede asumir uno de dos valores, V_{OL} o V_{OH} . Para este caso se considera un ajuste de 0.5 a 3.

El temporizador, en esencia, es un multivibrador astable controlado por voltaje, diseñado teniendo en mente especificaciones de desempeño para un convertidor de voltaje a frecuencia. Por lo general, el multivibrador es una versión estabilizada con temperatura del concepto básico del oscilador controlado por corriente. Los parámetros se eligieron, de acuerdo a: $f_O = v_I / (10 \cdot RC)$. Esta relación es bastante precisa en un rango dinámico de al menos cuatro décadas, hasta una corriente de 1mA y una frecuencia de 100 kHz. Para este diseño, los temporizadores se calculan para dos rangos: de 0.5 a 15 segundos, y de 2 a 60 segundos.

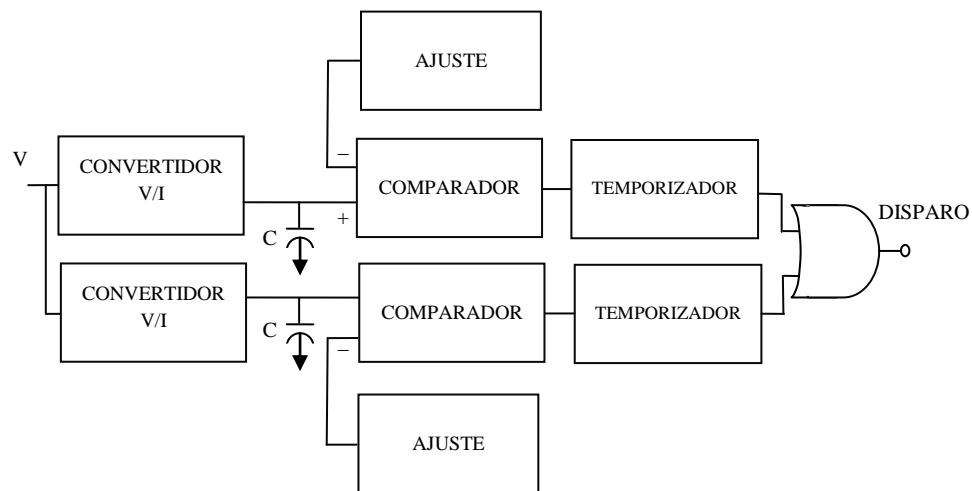


Figura 1.4. Diagrama de bloques de relevador de protección de sobreexcitación (ANSI 24).

En la figura 1.5 se presenta la característica de operación de un relevador de sobreexcitación.

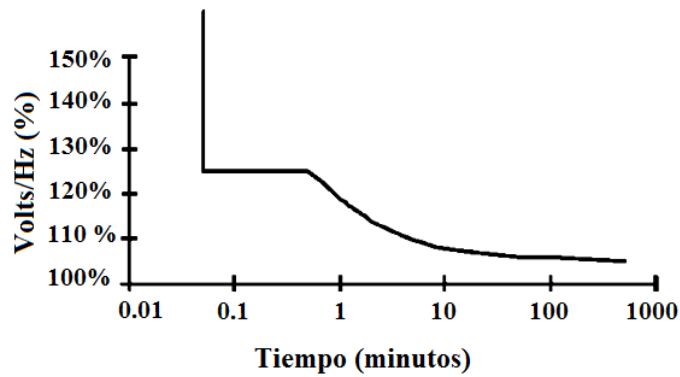


Figura 1.5. Característica de operación de relevador de sobreexcitación.

Función de protección de falla a tierra en el estator. Las técnicas para la detección de fallas a tierra que cubran el 100% del devanado del estator pueden ser divididas en dos categorías: técnicas basadas en tensión de tercera armónica e inyección de tensión residual o de neutro.

Dentro de las técnicas basadas en el uso de la tensión de tercera armónica se encuentra la técnica de baja tensión de tercera armónica en el neutro, en la cual se basa el esquema para esta protección ANSI 64 G (figura 1.6).

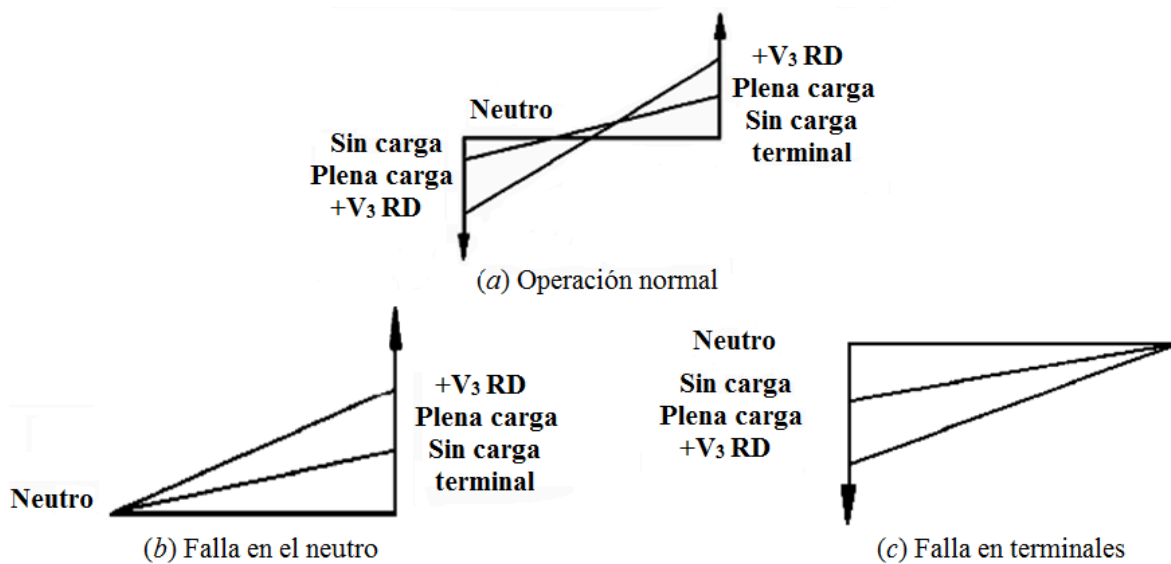


Figura 1.6. Tensiones de tercera armónica para diferentes condiciones en un generador típico.

En la figura 1.7 se expone el diagrama de bloques del relevador de protección de falla a tierra en el estator por realizarse. Este esquema está constituido por: dos filtros pasa banda configurados a 60 Hz y 180 Hz, dos convertidores de ca-cd, dos comparadores con su correspondiente ajuste, supervisión de voltaje de generador y dos temporizadores.

Filtros pasa banda. La respuesta pasa banda se caracteriza por una banda de frecuencia $\omega_L < \omega < \omega_H$, que se llama banda de paso, tal que las señales de entrada dentro de esta banda emergen sin atenuación, mientras que las señales con $\omega < \omega_L$ ó $\omega > \omega_H$ se rechazan.

Convertidores de ca-cd. La conversión de ca-cd, es la generación de un voltaje de cd proporcional a la amplitud de una onda de ca dada. Este voltaje es el promedio de la onda rectificadora:

$$V_{prom} = \frac{1}{T} \int_0^T |v(t)| dt$$

Donde $v(t)$ es la onda de ca y T es el periodo. Sustituyendo $v(t) = V_m \sin 2\pi ft$, donde V_m es la amplitud de pico y $f = 1/T$ es la frecuencia, se obtiene: $V_{prom} = (2/\pi)V_m = 0.637 V_m$.

Un convertidor de ca-cd se calibra para que cuando sea alimentado con una señal de ca proporcione como resultado el valor de la raíz cuadrática media (rms):

$$V_{rms} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt \right)^{1/2}$$

Al sustituir $v(t) = V_m \sin 2\pi ft$ e integrando se obtiene: $V_{rms} = V_m / \sqrt{2} = 0.707 V_m$.

Comparador. La función del comparador consiste en comparar el voltaje v_p en una de sus entradas con el voltaje V_N de la otra entrada, y obtener como salida ya sea un voltaje bajo V_{OL} o un voltaje alto V_{OH} .

Temporizador. En esencia, es un multivibrador astable controlado por voltaje, diseñado teniendo en mente especificaciones de desempeño para un convertidor de voltaje a frecuencia. Por lo general, el multivibrador es una versión estabilizada con temperatura del concepto básico del oscilador controlado por corriente.

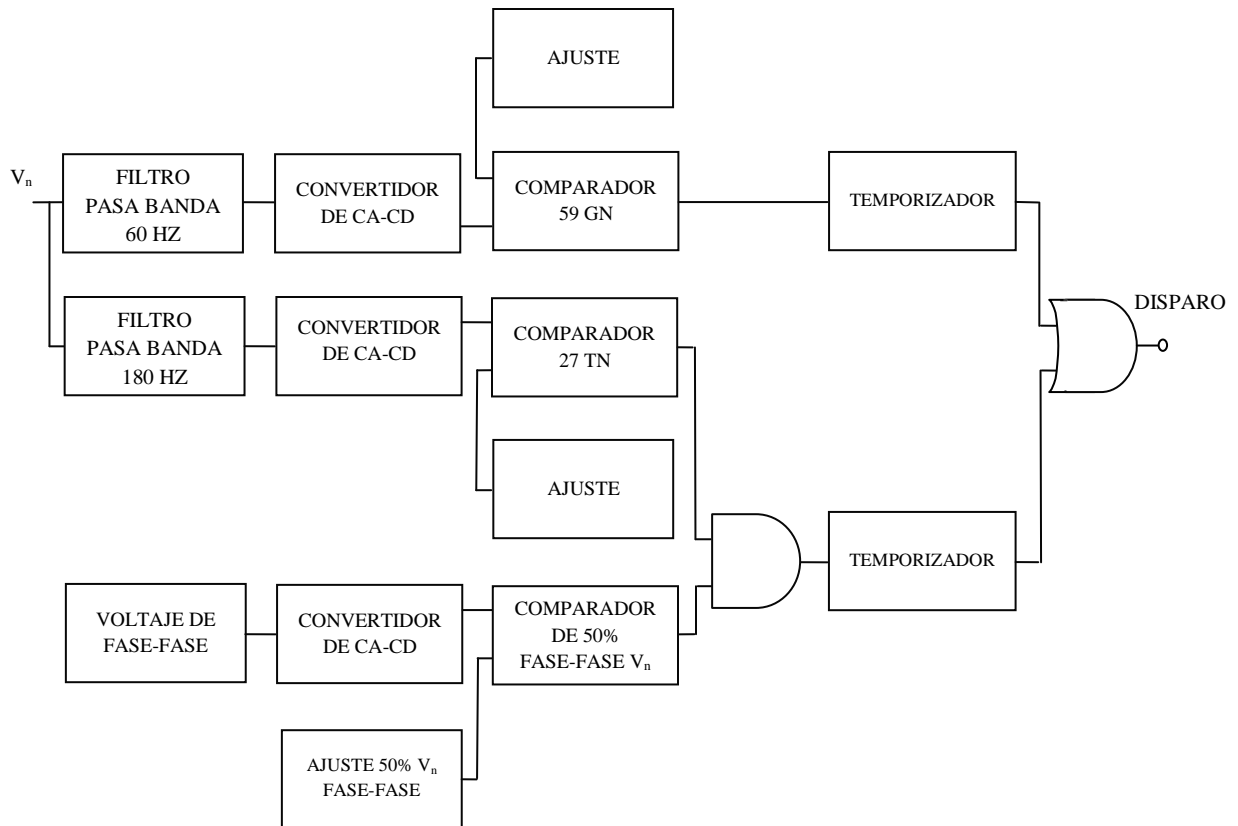


Figura 1.7. Diagrama de bloques de relevador de protección de falla a tierra en el estator (ANSI 64 G).

1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES.

Dentro de los alcances del presente proyecto, se extiende hasta la implementación analógica de tres funciones de protección de los relevadores que protegen a los generadores síncronos: la protección diferencial de generador (ANSI 87 G), la protección de sobreexcitación (ANSI 24) y la protección de falla a tierra en el estator (ANSI 64 G).

Como limitaciones se tiene el periodo de tiempo definido de dos años para el desarrollo del proyecto, así como los recursos económicos requeridos para el proceso de la implementación de los esquemas analógicos.

Capítulo

2

Marco Teórico

En este capítulo se abordarán conceptos y definiciones importantes necesarias para la comprensión y para el desarrollo del presente proyecto. Entre estos temas se encuentran:

- Transformadores de instrumentos.
- Relevadores de protección.
- Clasificación de relevadores ANSI.
- Función de protección diferencial.
- Función de protección de sobreexcitación.
- Función de protección de falla a tierra en el estator.

2.1. TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTOS.

Los transformadores de instrumentos son de los elementos más importantes en la aplicación de los relevadores de protección, llamados así, porque su aplicación es exclusiva para propósitos de protección, medición y/o registro de los sistemas de potencia mediante instrumentos.

Existen dos tipos básicos: Transformadores de Corriente (TC's) y Transformadores de Potencial (TP's).

2.1.1. TRANSFORMADORES DE CORRIENTE.

Un Transformador de Corriente se define como "un instrumento transformador en el que la corriente secundaria es substancialmente proporcional a la corriente primaria (bajo condiciones normales de operación) y difiere en fase de ésta por un ángulo que está en cero aproximadamente para una dirección apropiada de las conexiones".

Esto destaca principalmente dos funciones: proveer aislamiento adecuado, lo cual significa que no importa el voltaje del sistema, el circuito secundario requiere ser aislado solamente a un bajo voltaje que no represente peligro para el personal, ni para los equipos; y reducir en forma proporcional los valores de corriente del sistema de potencia, para que mediante los instrumentos y un multiplicador se conozcan los valores reales primarios.

Existen tres tipos de transformadores de corriente:

- a) Pedestal. Aquellos autosoportados que se instalan sobre una base (de concreto o metálica) por encima del nivel de piso terminado de la subestación y es para uso exterior.

- b) Boquilla o dona (bushing). Aquellos que constan de un núcleo en forma circular con su devanado secundario, principalmente en uso interior, el conductor de la boquilla actúa como devanado primario y se utilizan principalmente en interruptores de tanque muerto, transformadores de potencia, generadores, entre otros.
- c) Ventana. Aquellos que constan de un núcleo en forma rectangular o circular con su devanado secundario, que puede estar sujeto a una base, principalmente en uso interior donde el conductor que actúa como devanado primario no es parte integral del transformador de corriente [9].

El diagrama representativo del circuito equivalente del transformador de corriente se muestra en la figura 2.1, cuyos componentes son: Z_H = Impedancia del devanado primario, Z_L = Impedancia del devanado secundario, Z_M =Impedancia de magnetización, Z_C =Impedancia de carga, R_M =Pérdidas en el núcleo, N =Relación de espiras.

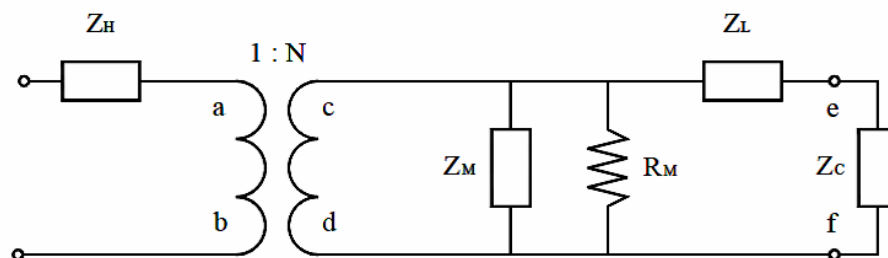


Figura 2.1. Circuito equivalente del transformador de corriente.

La clase y carga de protección de los transformadores de corriente se especifica en concordancia con la norma NMX-J-109-ANCE, misma que refiere los valores a VA y no a Volts como se acostumbra hacer en la práctica.

Las equivalencias para clase de protección se indican en la tabla 2.1 de manera informativa. No deben especificarse las características de los TC's bajo la normatividad IEEE C57.13.

Nota: en la norma IEEE C57.13 el burden se da en Ohms, pero en la norma NMX-J-109-ANCE se da en VA, por lo que en esta última tenemos:

$$S_b = Z_b \times (I_{nom \ sec})^2$$

$$S_b = 4\Omega \times (5A)^2$$

$$S_b = 100 \text{ VA}$$

Para un TC equivalente en la norma NMX-J-109-ANCE se tiene la siguiente nomenclatura: 10P20-100 VA.

En la norma NMX-J-109-ANCE, el 10 significa 10% de error, la P clase de protección y el 20, que la corriente instantánea es igual a 20 veces la corriente nominal [9].

IEEE C57.13		NMX-J-109-ANCE	
Clase	Carga normalizada (Ω)	Designación	Carga normalizada
C100	B-1=1	10P20	25 VA
C200	B-2=2	10P20	50 VA
C400	B-4=4	10P20	100 VA
C800	B-8=8	10P20	200 VA

Tabla 2.1. Equivalencias para clase de protección.

2.1.2. TRANSFORMADORES DE POTENCIAL.

Un Transformador de Potencial se define como "un instrumento transformador en el que el voltaje secundario es substancialmente proporcional al voltaje primario y difiere en fase de él por un ángulo que es cero aproximadamente para una dirección apropiada de las conexiones".

Esto, en esencia, significa que el Transformador de Potencial tiene que estar lo más cercano posible al transformador "ideal". En un transformador "ideal", el vector de voltaje secundario es exactamente igual y opuesto al vector de voltaje primario, cuando es multiplicado por la relación de vueltas.

Esto destaca principalmente dos funciones: proveer aislamiento adecuado, lo cual significa que no importando el voltaje del sistema, el circuito secundario requiere ser aislado solamente a un voltaje bajo que no represente peligro para el personal ni para los equipos; y reducir en forma proporcional los valores de voltaje del sistema de potencia, para que mediante los instrumentos y un multiplicador se conozcan los valores reales primarios.

Existen dos tipos de transformadores de potencial:

- a) Inductivo. Es un transformador convencional, con un arrollamiento primario en el lado de alta tensión y un arrollamiento secundario en el lado de baja tensión, a veces con una derivación para disponer de dos magnitudes en un mismo devanado. El devanado primario se conecta directamente al sistema de potencia mientras que el secundario es conectado a los instrumentos. En la figura 2.2 se muestra el diagrama simplificado de un TP con algunos instrumentos.
- b) Capacitivo. Este transformador difiere del transformador de potencial inductivo en cuanto a su diseño, ya que su devanado primario no se conecta directamente al voltaje del sistema de potencia, pero obtiene una parte proporcional del mismo a

través de un divisor compuesto por un grupo de capacitores apilados conectados en serie, con un capacitor auxiliar que tiene conectado entre sus extremos un transformador de potencial seco del tipo distribución con varios devanados secundarios. La figura 2.3. muestra el diagrama simplificado del dispositivo capacitivo de potencial.

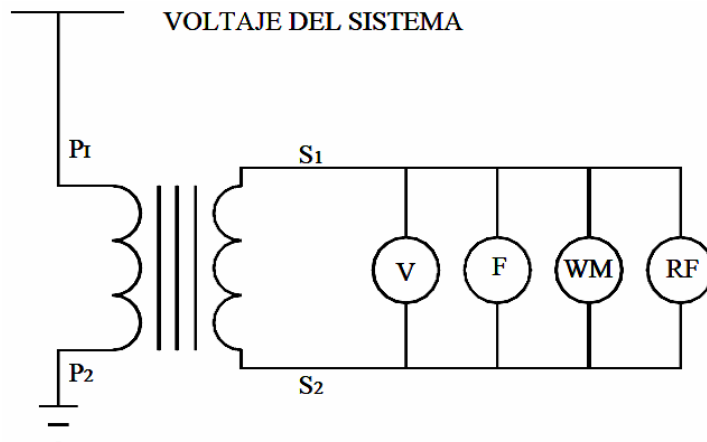


Figura 2.2. Diagrama simplificado de un TP con algunos instrumentos.

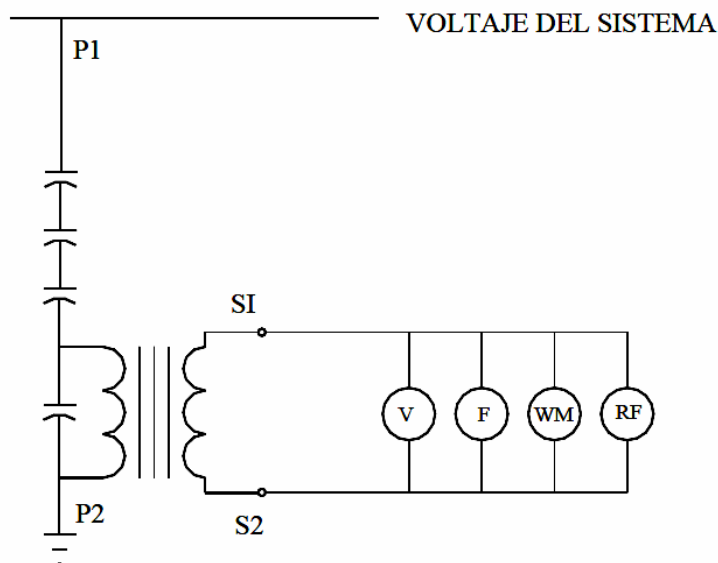


Figura 2.3. Diagrama simplificado del dispositivo capacitivo de potencial.

La precisión dependerá de la aplicación específica, dependiendo de lo que el usuario requiera, aunque es importante mencionar que a mayor precisión, el TP tendrá mayor costo. Las clases de precisión normales para los transformadores de potencial son: 0.1 para calibración; 0.2, 0.3, 0.5 y 0.6 para instrumentos de medición; 1.2, 3 y 5 para relevadores de protección.

Los valores, designaciones y características de las cargas nominales de los transformadores de potencial deben estar de acuerdo a lo indicado en la tabla 2.2. Si se solicitan transformadores con más de un devanado secundario, la exactitud solicitada se debe satisfacer estando todos los devanados con su carga nominal simultánea. Si se solicitan transformadores con más de un devanado secundario se debe indicar en las características particulares. La exactitud solicitada se debe satisfacer estando todos los devanados con su carga simultánea [10].

Tensión nominal del sistema (kV)	Tensión máxima de diseño (kV)	Clase de exactitud	Carga nominal (VA)	Clase de exactitud*	Carga nominal* (VA)
13.8	15.0	0.2	50	0.3	75
23.0	25.8				
34.5	38				
69	72.5		100		200
85	100				
115	123				
138	145				
161	170				
230	245				
400	420				

Nota ()*: se considera esta carga y clase de exactitud, únicamente cuando los dispositivos por alimentar sean del tipo electromecánico, y se debe indicar en las características particulares.

Tabla 2.2. Exactitud y carga nominal.

2.2. RELEVADORES DE PROTECCIÓN.

El Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos IEEE define un relevador como “un dispositivo Eléctrico/Electrónico diseñado para interpretar condiciones de entrada de manera prefijada bajo cierta especificación para encontrar una respuesta que cause un cambio en el circuito de control asociado; dichas condiciones de entrada son usualmente del tipo eléctrico, pero pueden ser mecánicos, térmicos, etcétera [6].

Los requerimientos fundamentales para el diseño de los relevadores, son los mencionados a continuación:

- a) Velocidad.
 - Reducir daño / evitar riesgo en personal y equipo.
 - Reducir esfuerzo y fatiga en equipo.
 - Reducir ionización.
 - Incrementar la transferencia de potencia.

Aspectos que perjudican la rapidez.

- Transitorios de alta frecuencia.
- Saturación de transformadores de corriente TC' S.
- Medición antes de saturación del TC.
- Medición al cruce por cero.
- Transitorios de dispositivos de potencial DP' S.
- Medición del cambio de voltaje.
- Medición en frecuencia fundamental.

- b) Sensibilidad.
 - Detectar fallas de baja aportación de corriente.

Aspectos que afectan la sensibilidad.

- Carga.
- Transitorios de alta frecuencia.
- Errores en estado estable.
- Corrientes magnetizantes.
- Alta resistencia de falla.
- Líneas largas.
- Alimentación débil (*Weak Infeed*).
- Medición de cantidades de secuencia cero.
- Medición de cantidades de fase.
- Medición de $Z = U_f / I_f$.
- Medición de I_f .

c) Selectividad.

- Desconecta solo el equipo fallado.

La selectividad se logra mediante las características siguientes:

- Diferencial: la característica diferencial debe ser inmune a grandes corrientes, lográndolo mediante un circuito de restricción.
- Dirección: los principales factores que afectan a esta característica son:
 - Transitorios de alta frecuencia.
 - Cierre bajo falla. SOFT.
 - Filtros.
 - Polarización de fases sanas y memoria.
 - Voltajes y corrientes reversibles. & ΔU , ΔI .
- Alcance: Los factores que la afectan son:
 - Transitorios de alta frecuencia
 - Líneas largas / Líneas cortas / Líneas paralelas

- Carga
- Características de medición óptima.
- Fase: algunos factores que la afectan son:
 - Carga
 - Corrientes asimétricas
 - Selector de fase independiente de la carga.

d) Confiabilidad → Disponibilidad.

El término confiabilidad tiene dos aspectos: dependibilidad + seguridad.

- Dependibilidad: es el grado de certeza que un relé ó un sistema de relés opere correctamente; dicho en otras palabras, es la habilidad de operar correctamente cuando se requiera.

- Seguridad: se relaciona al grado de certeza que un relé o un sistema de relés no opere incorrectamente, o sea la habilidad para evitar una falsa operación durante condición normal, o en fallas y problemas fuera de su zona de operación designada.

Los principales factores que afectan la confiabilidad son:

- Tipo de sistema de protección + Mantenimiento.
- Principio de medición + Actualización por modificación.
- Calidad del relevador.
- Ajustes [6].

2.3. CLASIFICACIÓN DE RELEVADORES ANSI.

Históricamente, la evolución de los relevadores de protección se ha dado como se muestra en la figura 2.4.

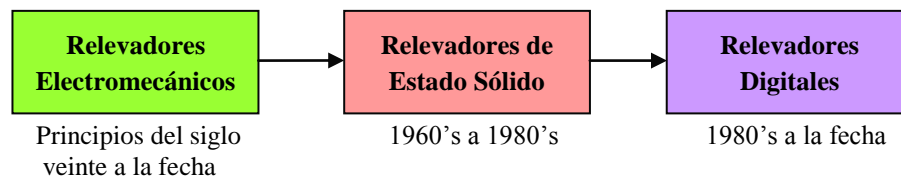


Figura 2.4. Evolución de los relevadores de protección.

Relevadores electromecánicos. Los primeros dispositivos automáticos que se emplearon para aislar fallas eléctricas en los sistemas de potencia fueron los fusibles. Los fusibles se siguen usando, pero, tienen la desventaja de tener que ser reemplazados después de que ha ocurrido una falla.

Para resolver el inconveniente de los fusibles, se diseñó el interruptor de potencia automático, el cual tenía una bobina de disparo, que operaba por sobrecarga o baja tensión. Después, durante el desarrollo de las protecciones eléctricas, la tendencia fue incorporar relevadores de protección independientes del interruptor. Estos relevadores eran electromecánicos y actuaban operando sus contactos sobre la bobina del interruptor de potencia cuando se presentaba una falla.

El principio de funcionamiento de los relevadores electromecánicos está basado en los fenómenos de la atracción e inducción electromagnética. Algunos de estos relevadores electromecánicos consisten de un disco de inducción, un núcleo electromagnético, un muelle en forma de espiral, una bobina secundaria o de sombra y de una unidad de sello indicadora. En la figura 2.5 se observa un relevador electromecánico.

Los relevadores electromecánicos de sobrecorriente con disco de inducción funcionan bajo el mismo principio de operación del motor de inducción. Un relevador de sobrecorriente con disco de inducción opera girando su disco de inducción cuando circula por la bobina del relevador una corriente que supera un valor máximo de corriente o punto de arranque. Al girar el disco de inducción, este cierra un contacto que inicia el disparo de un interruptor de potencia o acciona una alarma.



Figura 2.5. Relevador electromecánico.

El tiempo en que tarda el disco de inducción en cerrar el contacto de disparo, es inversamente proporcional a la corriente que circula por la bobina del relevador; este tiempo está controlado, también, por el ángulo de desplazamiento del disco que se ajusta a través de una palanca de tiempo. El punto de arranque se obtiene mediante derivaciones (taps) de la bobina, para variar el mismo número de Amper-vueltas necesarias para mover el disco.

Relevadores de estado sólido. Los relevadores de estado sólido surgieron como alternativa de los relevadores electromecánicos. Los relevadores de estado sólido están diseñados con circuitos electrónicos analógicos, estos circuitos emulan las características de los relevadores electromecánicos. Los primeros de estos circuitos que usaban como elemento principal al transistor, presentaron problemas para soportar transitorios de tensión y sufrían cambios en sus características de operación debido a la temperatura y a la baja capacidad para soportar sobretensiones o sobrecorrientes en régimen permanente; con el paso del tiempo estos problemas quedaron superados debido a la incorporación de circuitos que compensaban estas anomalías.

Finalmente, con el arribo de la tecnología de integración de circuitos, los relevadores de estado sólido hicieron uso de los amplificadores operacionales.

Las ventajas que presentan los relevadores de estado sólido frente a los relevadores electromecánicos son: tiempos de respuesta más rápidos, mayor tiempo de vida, menor mantenimiento, mayor sensibilidad, reducción de tamaño y una operación silenciosa. Los relevadores de protección de estado sólido han quedado fuera de uso progresivamente desde el surgimiento de los relevadores digitales.

Los relevadores de estado sólido no tienen la misma flexibilidad de los relevadores digitales, y su exactitud y rango dinámico están limitados por sus componentes electrónicos.

Relevadores digitales. Los relevadores digitales fueron planteados por primera vez por el año de 1969 como una aplicación de una computadora digital para realizar funciones de protección de todos los equipos de una subestación. La evolución de los relevadores digitales ha devenido del rápido avance de la tecnología de los microprocesadores y al surgimiento de novedosos algoritmos de protección.

Algunos de los centros prominentes en investigación en relevadores digitales han sido la Universidad de Missouri, el Colegio Imperial de Ciencia y Tecnología en Londres, la Universidad de Calgary, la Universidad de Saskatchewan y la Universidad de Manitoba. El objetivo de los relevadores digitales es igualar o exceder el desempeño de los relevadores de estado sólido y de los relevadores electromecánicos. Un relevador digital convierte señales analógicas de tensión y corriente en cantidades binarias por medio de un convertidor analógico digital, luego, estas cantidades son procesadas numéricamente por los algoritmos o programas de cómputo del relevador. Los algoritmos se encargan de la detección de fallas y del control de las señales de disparo. En la figura 2.6 se muestra un relevador digital.

Una de las ventajas destacables de los relevadores digitales es su capacidad para auto diagnosticarse. La función de autodiagnóstico se encarga de monitorear continuamente el estado del relevador (hardware y software), y cuando hay una falla interna del relevador digital, este queda fuera de servicio automáticamente, bloqueando sus funciones de protección y enviando una señal de alerta.



Figura 2.6. Relevador digital.

Además, los relevadores digitales pueden almacenar y enviar datos de algunos ciclos de prefalla y falla para su posterior análisis. Estas características de los relevadores digitales traen como consecuencia la reducción de las rutinas de mantenimiento y una gran confiabilidad en su operación. También, los relevadores digitales simplifican el cableado necesario para un sistema de protección. Cuando se requiere de modificar los esquemas de protección, un cambio en la programación de la lógica de protección del relevador, ahorra muchas conexiones que serían necesarias con los relevadores electromecánicos y los relevadores estáticos.

Otra ventaja de los relevadores digitales frente a sus antecesores, es su capacidad multifuncional, esto es, la capacidad de alojar en el mismo relevador diferentes funciones de protección como: protección contra sobrecorrientes, protección por bajo voltaje, protección de distancia, y otras, dependiendo de las características del hardware y software del relevador.

Las desventajas que pueden presentar los relevadores digitales se deben a los rápidos ciclos tecnológicos, que obligan a utilizar equipos que sean compatibles en protocolos de comunicación, en hardware, y en software [11].

Los relevadores pueden ser clasificados por diferentes vías, de acuerdo a lo siguiente:

- Por función: protección, regulación, supervisión, control, programación, auxiliares, etcétera.
- Por señal de entrada y/o variable de proceso: corriente, voltaje, frecuencia, presión, temperatura, flujo.
- Por principio de operación: por ciento, restricción múltiple, producto, potencia, admitancia, impedancia, etc.
- Por característica de operación: curva inversa, curva definida, cuadrilateral, Mho, circular, etc.
- Por tipo de construcción: electromecánico, híbrido (electromecánico + estático), estático (estado sólido), digital [6].

2.4. FUNCIÓN DE PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE GENERADOR.

La protección diferencial de generador detecta principalmente cortocircuito entre fases dentro del embobinado del generador. Cuando se trata de generadores cuyo neutro está aterrizado a través de un reactor de baja resistencia, la protección diferencial detecta también cortocircuitos interiores de fase a tierra.

El principio de operación de la protección diferencial en la mayoría de las veces se basa en la comparación de la corriente que sale de un embobinado, con la corriente que entra del otro extremo del mismo embobinado; si las dos corrientes son iguales el embobinado está bien, si fuesen diferentes entonces existe falla. El área de selección de esta protección se encuentra limitada por la ubicación de los transformadores de corriente, de donde se toma la señal para la protección. No se requiere tiempo de coordinación con otros relevadores, características que lo hace ser de alta velocidad.

Debido a la saturación de los transformadores de corriente en realidad estos relevadores utilizan para su operación una corriente diferencial que está formada por la diferencia de las corrientes que entran y salen de un embobinado y una corriente de restricción que es una corriente proporcional a la corriente que atraviesa el embobinado en la misma dirección, esto hace al esquema de protección diferencial insensible para fallas externas. La relación de corriente de operación entre corriente de restricción se llama pendiente. Los relevadores con pendiente fija usualmente tienen valores entre el 10 y 25%. En algunos casos se usan relevadores con pendiente variable que va de 5 hasta 50%.

La figura 2.7 muestra la conexión típica de un esquema de protección diferencial en la que se muestran las bobinas de operación y de restricción del relevador [6].

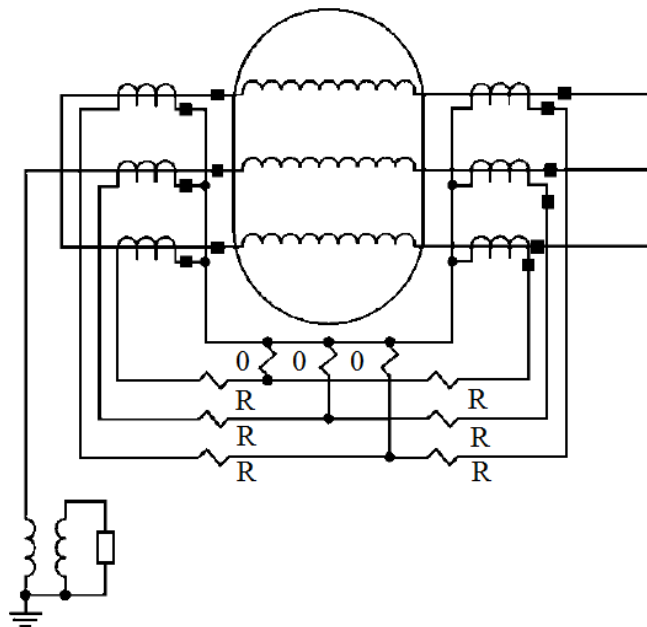


Figura 2.7. Conexión típica de protección diferencial de generador.

A continuación, en la figura 2.8, se presenta la curva característica de operación de un relevador diferencial de porcentaje con una pendiente de 10 %.

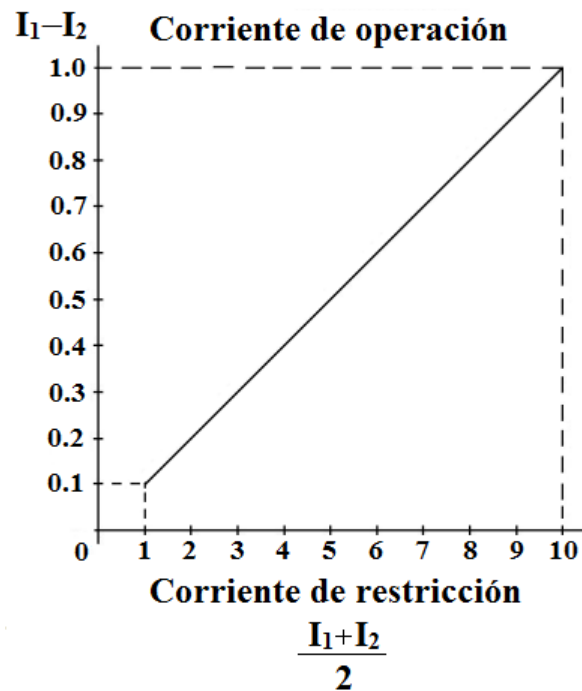


Figura 2.8. Curva característica de operación de relevador diferencial de porcentaje con pendiente del 10%.

2.5. FUNCIÓN DE PROTECCIÓN DE SOBREEXCITACIÓN.

Esta protección es aplicada tanto para generadores como para transformadores, en un mismo dispositivo.

El flujo magnético necesario para producir inducción de voltaje en el devanado de armadura en un generador sincrónico, o en el secundario de un transformador conectado al generador, es provisto por el hierro del estator, en el generador, y por el núcleo, en el caso del transformador. Estos dos elementos (núcleo y estator) están diseñados para entregar el suficiente flujo magnético para que las máquinas trabajen sin complicaciones en condiciones nominales. La sobreexcitación del generador y transformador, se produce cuando su operación demanda un flujo magnético que excede los límites de diseño.

La mayor parte de problemas relacionados con sobreexcitación, se dan en el momento del arranque y parado del generador, cuando la frecuencia de la onda generada es menor a la nominal y el voltaje se mantiene constante debido a la actuación del regulador automático de voltaje, o por fallas por parte del operador, cuando el regulador está en manual. Las principales causas de sobreexcitación son las siguientes:

- Cierre del interruptor de campo en el proceso de arranque cuando el generador no ha alcanzado su velocidad nominal; en este caso la relación V/Hz será mayor a uno, debido a que la frecuencia no ha alcanzado su valor nominal, mientras que el regulador de voltaje incrementará rápidamente el voltaje terminal hasta llegar a 1 p.u. El valor de V/Hz dependerá de la velocidad del rotor el momento de energizar el campo.
- Falla en la apertura del interruptor de campo (con el regulador de voltaje en modo manual) cuando se ha producido el disparo del interruptor de unidad, por alguna falla, o durante la proceso de parado del generador, y éste se encontraba trabajando previo al disparo a potencia nominal; en ese caso, la corriente de campo será lo suficientemente alta para producir un voltaje terminal mayor a 1 (p.u.). Si en el proceso de parado de la máquina, el regulador de voltaje está en automático y falla la apertura del interruptor de campo, las consecuencias pueden ser aún peores, ya que el regulador intentará incrementar el voltaje terminal hasta su valor nominal, mientras la frecuencia disminuye.
- Pérdida de la señal de voltaje de alguno de los Transformadores de Potencial que alimentan al regulador de voltaje. En este caso el regulador verá un voltaje terminal igual a cero, por lo que incrementará la corriente de campo para tratar, erróneamente, de llevar el voltaje terminal a su valor nominal.
- Operación del generador en la zona de subexcitación con el regulador de voltaje en automático. Si la potencia reactiva absorbida por el generador es lo suficientemente grande, actuará una función del regulador de voltaje conocida como LME (limitador de

mínima excitación), incrementando la corriente de campo para evitar que el generador absorba más potencia reactiva. Si el generador está conectado a un sistema grande, el voltaje terminal no varía, permitiendo el control efectivo de la potencia reactiva; pero si alimenta a un sistema aislado, el voltaje terminal aumentará considerablemente.

- Rechazo total de carga, por parte del generador, cuando éste se encuentra absorbiendo grandes cantidades de potencia reactiva. En este caso, la relación V/Hz puede superar 1.25 p.u. Si el regulador de voltaje está en automático, el voltaje puede ser reducido rápidamente, pero si está en manual, la sobreexcitación puede mantenerse, causando daño tanto en el transformador como en el generador.

La figura 2.9 muestra la conexión típica de un esquema de protección V/Hz [6].

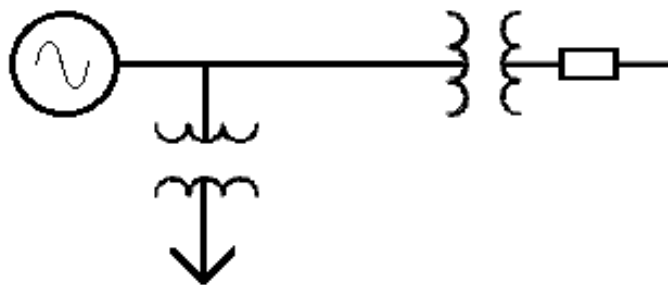


Figura 2.9. Conexión típica de un esquema de protección V/Hz.

Enseguida se presenta la curva característica típica del relé para protección V/Hz (figura 2.10), de nivel dual de tiempo definido (Relé A ajustado en 118% V/Hz con retardo de tiempo de 6 segundos. Relé B ajustado en 110% V/Hz con un retardo de tiempo de 60 segundos).

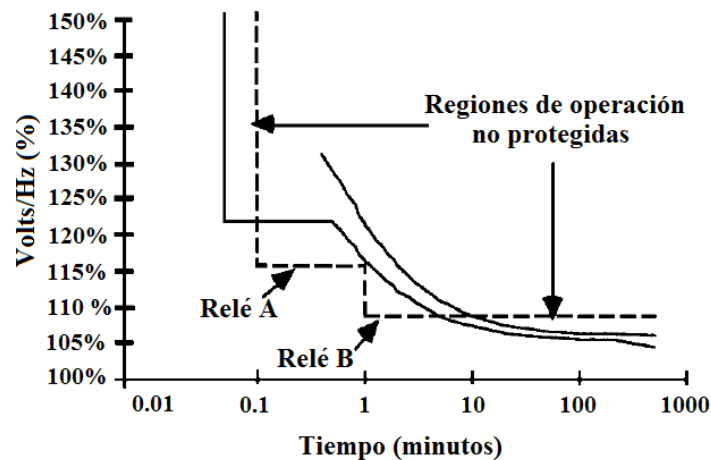


Figura 2.10. Característica típica del relé para protección V/Hz, de nivel dual de tiempo definido.

2.6. FUNCIÓN DE PROTECCIÓN DE FALLA A TIERRA EN EL ESTATOR.

La protección contra fallas a tierra en el estator del generador trabaja sobre la base de detección de voltaje en el neutro de un sistema aterrizado a través de una alta impedancia. El voltaje en este punto en condiciones normales es cero, existe la componente de tercera armónica que puede ser apreciable pero fácilmente eliminable por medio de un filtro contenido dentro del propio relevador. El voltaje en el neutro de un generador será más alto cuanto más alejado del neutro se encuentre la falla. Inversamente, una falla a tierra en el propio neutro no podrá ser detectada por no producir voltaje; pero ese punto es el menos expuesto a falla por no estar sujeto a voltaje en operación normal.

El relevador habitualmente empleado tiene sensibilidad suficiente para cubrir del 90 al 95% el embobinado del generador, así como las fallas a tierra en las conexiones a voltaje de generación: buses ductos, embobinado de transformador de unidad y embobinado del transformador de auxiliares.

Esta protección se aplica básicamente a un generador de sistema unitario que sea conectado directamente a un transformador elevador, en los que el sistema se compone exclusivamente de equipo instalado dentro de la misma planta y no dotado de interruptores para su separación.

El aterrizado de alta resistencia de los generadores utiliza un transformador de distribución con un voltaje primario mayor o igual al voltaje nominal del generador de fase a tierra y un voltaje secundario de 120 o 240 volts.

El transformador de distribución debe tener suficiente capacidad de sobrevoltaje para que no se sature en fallas de línea a tierra con la máquina operando 5% arriba de voltaje nominal. La resistencia secundaria se selecciona de manera que para una falla a tierra en terminales de generador, la potencia disipada en la resistencia sea igual a los Volt-Amperes reactivos de la reactancia capacitiva de secuencia cero de los devanados del generador, sus terminales y todos los transformadores conectados al generador. Usando este método de aterrizado, las fallas a tierra se limitan usualmente entre 3 y 25 Amperes primarios [5].

En la figura 2.11 se muestra la conexión típica de un esquema de protección de falla a tierra en el estator del generador [6].

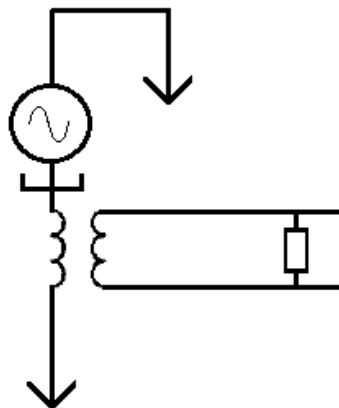
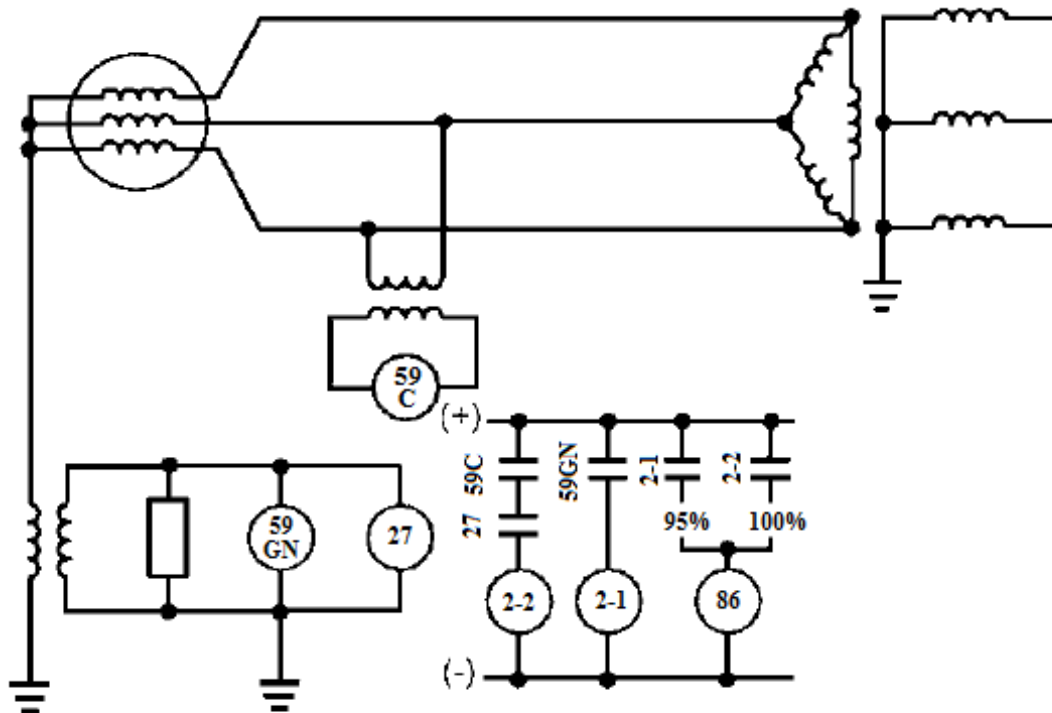


Figura 2.11. Conexión típica de un esquema de protección de falla a tierra en el estator.

A continuación se presenta el esquema de protección de falla a tierra de baja tensión de tercera armónica (figura 2.12).



- 59C** Relé supervisor de sobretensión instantáneo.
- 59GN** Relé de sobretensión sintonizado a la frecuencia fundamental (60 Hz).
- 27** Relé de baja tensión sintonizado a la frecuencia de tercera armónica (180 Hz).
- 2-1, 2-2** Temporizadores

Figura 2.12. Esquema de protección de falla a tierra de baja tensión de tercera armónica.

En la figura 2.13 se pueden observar las tensiones de tercera armónica para diferentes condiciones en un generador típico.

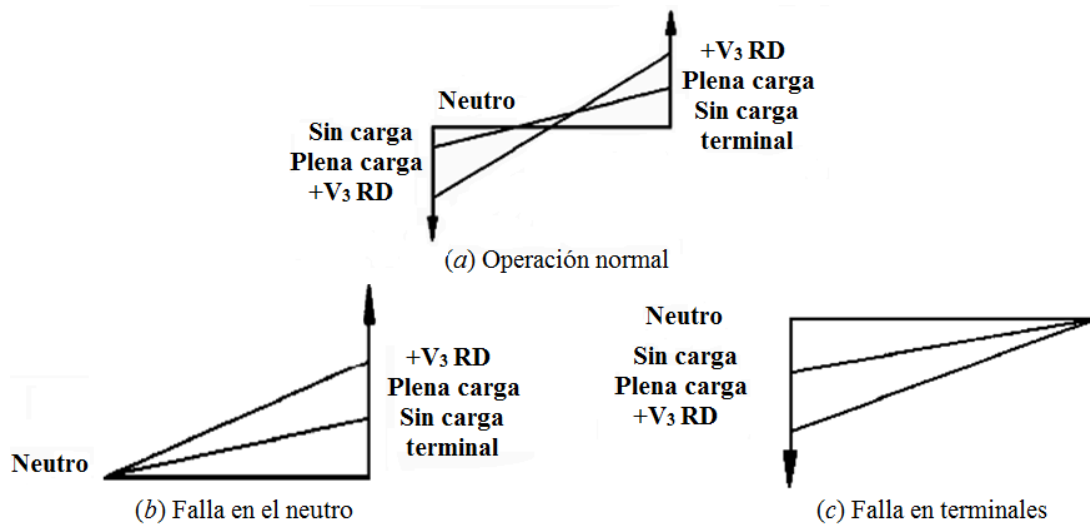


Figura 2.13. Tensiones de tercera armónica para diferentes condiciones en un generador típico.

Capítulo

3

Amplificadores Operacionales

Este capítulo inicia con una introducción a los amplificadores operacionales, continuando con las configuraciones de los mismos utilizadas para la realización del diseño e implementación de los esquemas de protección.

3.1. INTRODUCCIÓN.

El término “amplificador operacional”, o “amp op” en forma abreviada, fue acuñado por John R. Ragazzini en 1947, para denotar un tipo especial de amplificador que, con la selección adecuada de sus componentes externos, podía configurarse para diversas operaciones tales como la amplificación, la adición, la sustracción, la diferenciación y la integración. Las primeras aplicaciones de los amplificadores operacionales tuvieron lugar en computadoras analógicas. Su capacidad para ejecutar operaciones matemáticas fue el resultado de combinar la ganancia elevada con la retroalimentación negativa.

En los primeros amplificadores operacionales se utilizaron tubos de vacío, por lo tanto, eran voluminosos, grandes consumidores de energía y caros. La primera miniaturización notable de los amplificadores operacionales se dio con el advenimiento del transistor bipolar de unión (BJT, por sus siglas en inglés), lo que llevó a una nueva generación de módulos de amplificadores operacionales realizados con BJT discretos. Sin embargo, el cambio real llegó con el desarrollo del amplificador operacional de circuito integrado (CI), cuyos elementos se fabrican en forma monolítica a partir de un chip de silicio del tamaño de una cabeza de alfiler. El primero de tales dispositivos fue desarrollado por Robert J. Widlar, en Fairchild Semiconductor Corporation, a principios de la década de los sesenta. [7].

3.2. EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL.

Un amplificador es un dispositivo de dos puertos que acepta una señal que se aplica en forma externa, llamada entrada, y genera una señal que se llama salida, de modo que $\text{salida} = \text{ganancia} \times \text{entrada}$, donde ganancia es una constante apropiada de proporcionalidad. Un dispositivo que se apegue a esta definición, recibe el nombre de amplificador lineal, para distinguirlo de otros con relaciones no lineales de entrada–salida, tales como amplificadores cuadráticos y log/antilog. A menos que se indique lo contrario, el término amplificador aquí significa amplificador lineal.

Un amplificador recibe su entrada desde una fuente y distribuye su salida a una carga. En función de la naturaleza de las señales de entrada y salida, se tienen diferentes tipos de amplificadores. Los más comunes son el amplificador de voltaje y el amplificador de corriente.

El amplificador operacional es un amplificador de voltaje con ganancia de voltaje extremadamente alta. La figura 3.1 muestra el símbolo del amplificador operacional y las conexiones al suministro de energía para hacerlo funcionar. Las entradas, que se identifican con los símbolos “-“ y “+”, se denominan “inversora” y “no inversora”. Sus voltajes con respecto a tierra se denotan como v_N y v_P , y el voltaje de salida como v_O . La punta de la flecha indica flujo de la señal de la entrada hacia la salida.

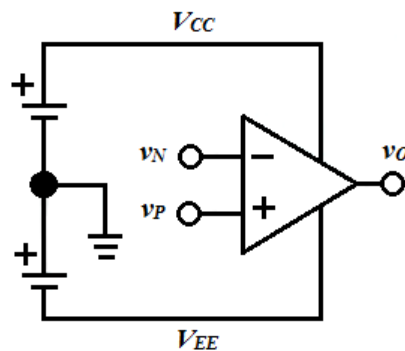


Figura 3.1. Símbolo del amplificador operacional y de las conexiones de suministro de energía.

Los amplificadores operacionales no tienen una terminal a tierra de 0 V. la tierra de referencia se establece en forma externa por medio del suministro común de energía. Los voltajes de suministro se denotan como V_{CC} y V_{EE} , y en general sus valores son ± 15 V, aunque son posibles otros valores. Para minimizar el hacinamiento en los diagramas de circuitos, es costumbre no mostrar las conexiones al suministro de energía. Sin embargo, cuando se construye un amplificador operacional en el laboratorio, se debe recordar que es necesario aplicar energía para que funcione.

La figura 3.2 muestra el circuito equivalente de un amplificador operacional energizado en forma apropiada.

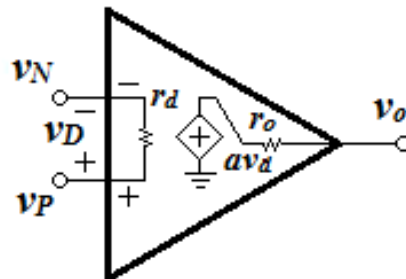


Figura 3.2. Circuito equivalente de un amplificador operacional energizado.

Aunque el amplificador operacional en sí mismo no tiene una conexión a tierra, el símbolo de tierra dentro de su circuito equivalente, modela el suministro común de energía de la figura 3.1. El circuito equivalente incluye la resistencia diferencial de entrada, r_d , la ganancia de voltaje, A , y la resistencia de salida, r_o . A r_d , A y r_o se denominan parámetros de lazo abierto.

La diferencia

$$v_D = v_p - v_N \quad (3.1)$$

se llama voltaje diferencial de entrada, y la ganancia A , también se llama ganancia sin carga, porque en ausencia del proceso de carga de salida se tiene que

$$v_O = Av_D = A(v_p - v_N) \quad (3.3)$$

Como se permite que ambas terminales de entrada tengan potenciales independientes con respecto a tierra, se dice que el puerto de entrada es del tipo doblemente terminado. En contraste con el puerto de salida, que es del tipo de terminado sencillo. La ecuación 3.3 indica que el amplificador operacional sólo responde a la diferencia entre sus voltajes de entrada, no

a sus valores individuales. En consecuencia, los amplificadores operacionales también se llaman amplificadores de diferencia. En la práctica todos los amplificadores operacionales no se comportan como amplificadores diferenciales ideales.

Si se invierte la ecuación 3.3, se obtiene

$$v_D = \frac{v_O}{A} \quad (3.4)$$

que permite encontrar el voltaje v_D que ocasiona un v_O dado. De nuevo se observa que esta ecuación conduce sólo a la diferencia v_D , no a los valores de v_N y v_p en sí mismos. Debido a la ganancia elevada A en el denominador, v_D resulta muy pequeño [7].

3.3. EL AMPLIFICADOR NO INVERSOR.

El circuito que se muestra en la figura 3.3 consiste en un amplificador operacional y dos resistores externos. Para comprender su función, es necesario encontrar una relación entre v_O y v_I .

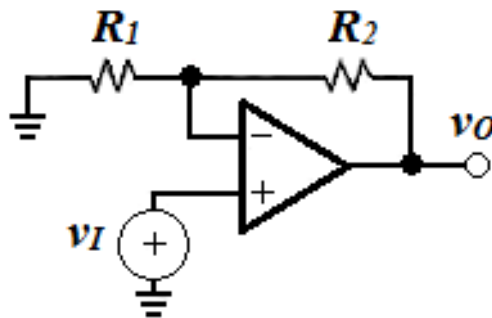


Figura 3.3. Amplificador no inversor.

Para ello, se vuelve a dibujar como aparece en la figura 3.4, donde se reemplazó al amplificador operacional por su modelo equivalente, y la malla resistiva se reacomodó para hacer énfasis en su papel en el circuito.

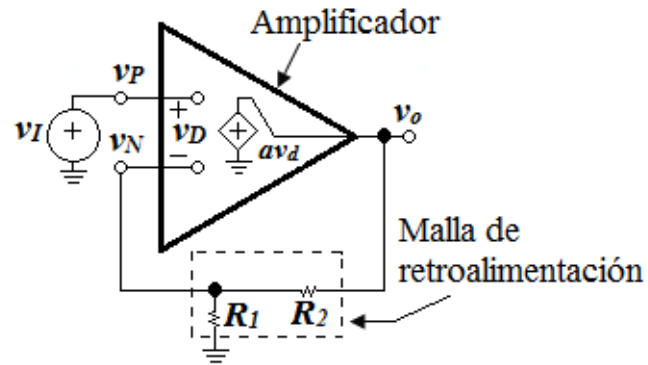


Figura 3.4. Modelo equivalente del amplificador no inversor.

Es posible encontrar v_O por medio de la ecuación 3.3; sin embargo, primero se deben obtener expresiones para v_P y v_N . Por inspección se tiene que

$$v_P = v_I \quad (3.5)$$

Al emplear la fórmula de división del voltaje, se llega a $v_N = [R_1 / (R_1 + R_2)] v_O$, o bien,

$$v_N = \frac{1}{1 + R_2 / R_1} v_O \quad (3.6)$$

El voltaje v_N representa la fracción de v_O que se retroalimenta a la entrada inversora. En consecuencia, la función de la malla resistiva es crear retroalimentación negativa alrededor del amplificador operacional. Si se iguala $v_O = A(v_P - v_N)$, se obtiene

$$v_O = A \left(v_I - \frac{1}{1 + R_2 / R_1} v_O \right) \quad (3.7)$$

Al simplificar términos y despejar la razón v_O / v_I , que se designará como A_f , después de cierto reacomodo, se llega a que

$$A_f = \frac{v_O}{v_I} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{1 + (1 + R_2/R_1)/A} \quad (3.8)$$

cuando la ganancia de lazo abierto tiende a infinito:

$$A_f = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Este resultado revela que el circuito de la figura 3.3, que consiste en un amplificador operacional más un par de resistores, es por sí mismo un amplificador, y que su ganancia es A_f . Como A_f es positiva la polaridad de v_O es la misma que la de v_I – de ahí el nombre de “amplificador no inversor”.

La ganancia A_f del circuito amp op y la ganancia A del amp op básico son muy diferentes, lo cual no es sorprendente, ya que los dos amplificadores, aunque comparten la misma salida v_O , tienen entradas diferentes, que son v_I para el primero y v_D para el segundo. Para recalcar esta diferencia, A se denomina “ganancia de lazo abierto”, y A_f es la “ganancia de lazo cerrado”, designación que se deriva del hecho de que el circuito amp op contiene un lazo. De hecho, a partir de la entrada inversora de la figura 3.4, se puede seguir un lazo en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj a través del amplificador operacional, y luego a través de la malla resistiva, lo que conduce de regreso al punto de inicio [7].

3.4. EL AMPLIFICADOR INVERSOR.

La configuración inversora de la figura 3.5a, junto con el amplificador no inversor, constituyen la piedra angular de las aplicaciones de los amplificadores operacionales. El amplificador inversor se inventó antes que el amplificador no inversor porque en sus primeros días, los amplificadores operacionales solo tenían una entrada, que era la inversora.

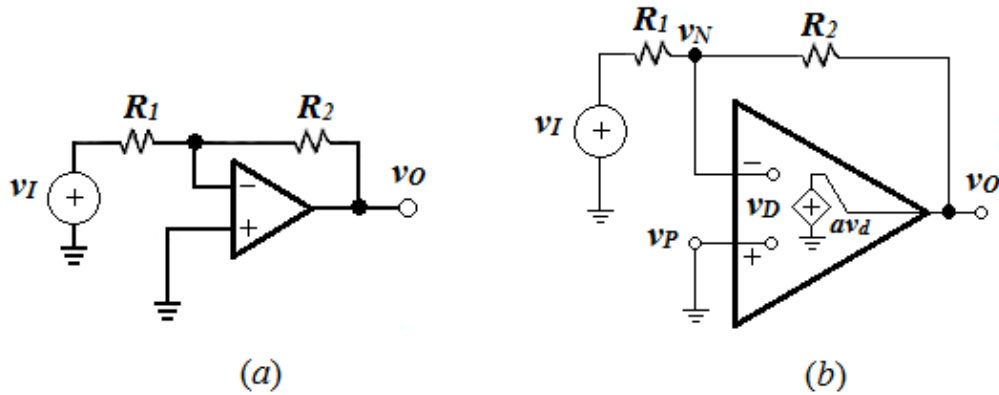


Figura 3.5. Amplificador inversor y modelo del circuito para su análisis.

Al observar el circuito equivalente de la figura 3.5b se tiene

$$V_p=0 \quad (3.9)$$

Al aplicar el principio de superposición se obtiene $v_N=[R_2/(R_1+R_2)]v_I+[R_1/(R_1+R_2)]v_O$, ó bien

$$v_N = \frac{1}{1+R_1/R_2}v_I + \frac{1}{1+R_2/R_1}v_O \quad (3.10)$$

Si se hace $v_O=A(v_P-v_N)$, se obtiene

$$v_O = A \left(-\frac{1}{1+R_1/R_2}v_I - \frac{1}{1+R_2/R_1}v_O \right) \quad (3.11)$$

Al comparar esta ecuación con la 3.7 se observa que la malla resistiva aún alimenta a la porción $1/(1+R_2/R_1)$ o v_O de regreso a la entrada inversora, con lo que proporciona la misma cantidad de retroalimentación negativa. Al resolver para la razón v_O / v_I y reacomodar, se obtiene

$$A_f = \frac{v_O}{v_I} = \left(-\frac{R_2}{R_1} \right) \frac{1}{1 + (1 + R_2/R_1)/A} \quad (3.12)$$

Nuestro circuito de nuevo es un amplificador. Sin embargo, ahora la ganancia A_f es negativa, lo que indica que la polaridad de v_O será opuesta a la de v_I . Esto no es sorprendente, debido que ahora se aplica v_I al lado inversor del amplificador operacional. Entonces, el circuito se llama amplificador inversor. Si la entrada es una onda senoidal, el circuito introducirá una inversión de fase, o, en forma equivalente, un cambio de fase de 180° [7].

3.5. EL AMPLIFICADOR SUMADOR.

El amplificador sumador tiene dos o más entradas y una salida. Aunque el ejemplo de la figura 3.6 tiene tres entradas, v_1, v_2, v_3 , el siguiente análisis puede generalizarse con facilidad a cualquier número arbitrario de ellas.

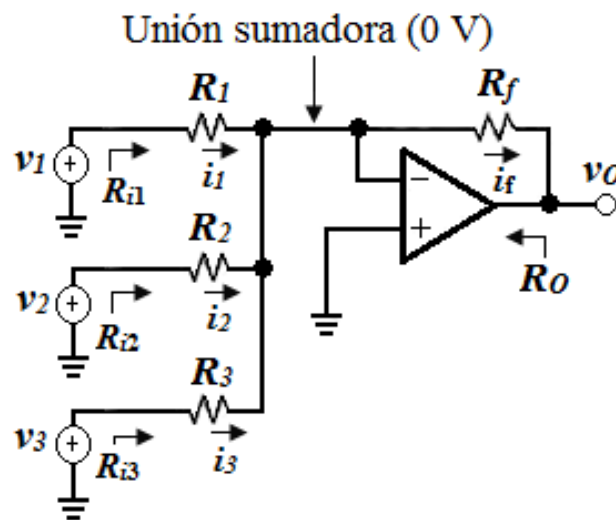


Figura 3.6. Amplificador sumador.

Para obtener una relación entre la salida y las entradas, se obliga a que la corriente total que entra al nodo de la tierra virtual sea igual a la que sale, o bien

$$i_1 + i_2 + i_3 = i_F$$

Por razones obvias, este nodo también se denomina unión sumadora. Con el uso de la ley de Ohm, $(v_1-0)/R_1+(v_2-0)/R_2+(v_3-0)/R_3=(0-v_O)/R_F$, o bien

$$\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \frac{v_3}{R_3} = -\frac{v_O}{R_F}$$

Se observa que gracias a la tierra virtual, las corrientes de entrada son proporcionales en forma lineal a las fuentes de voltajes correspondientes. Es más, se impide que las fuentes interactúen entre sí, una característica muy deseable si cualquiera de dichas fuentes se desconectara del circuito. Al despejar v_O se obtien

$$v_O = -\left(\frac{R_F}{R_1} v_1 + \frac{R_F}{R_2} v_2 + \frac{R_F}{R_3} v_3 \right) \quad (3.13)$$

lo que indica que la salida es una suma ponderada de las entradas (de ahí el nombre de amplificador sumador), con las ponderaciones que establezcan las razones de resistencia. Una de las aplicaciones más populares de los amplificadores sumadores es la mezcla de audio.

Como la salida viene directamente de la fuente dependiente dentro del amplificador operacional, se tiene que $R_o=0$. Es más, debido a la tierra virtual, la resistencia de entrada R_{ik} ($k=1, 2, 3$) vista por la fuente v_k es igual a la resistencia correspondiente R_k . En resumen,

$$R_{ik} = R_k \quad k=1, 2, 3 \quad (3.14)$$

$$R_o = 0$$

Si las fuentes de entrada no son ideales, el circuito las cargará hacia abajo, como en el caso del amplificador inversor. La ecuación 3.13 aún se aplica, si se satisface que se reemplaza

R_k por $R_{sk} + R_k$ en los denominadores, donde R_{sk} es la resistencia de salida de la k -ésima fuente de entrada.

Si $R_3=R_2=R_1$, entonces la ecuación 3.13 lleva a

$$v_o = -\frac{R_F}{R_1}(v_1 + v_2 + v_3) \quad (3.15)$$

es decir, v_o es proporcional a la suma verdadera de las entradas. La constante de proporcionalidad $-R_F / R_1$ puede variar en todo el rango hasta cero si R_F se realiza con una resistencia variable. Si todas las resistencias son iguales, el circuito produce la suma (invertida) de sus entradas, $v_o = -(v_1 + v_2 + v_3)$ [7].

3.6. LA GANANCIA DE LAZO

Ahora, resulta evidente que la ganancia de lazo, T , juega un papel central en la teoría de retroalimentación negativa. Entre más grande es T , más cerca del ideal están los parámetros de lazo cerrado.

Como se sabe, la ganancia de un amplificador operacional por lo general se obtiene como

$$A = A_{ideal} \times \frac{1}{1 + 1/T}$$

donde A_{ideal} se calcula con el uso del modelo de amplificador operacional ideal y, por lo tanto, de la técnica de corto virtual. Más aún, las resistencias de la terminal de lazo cerrado por lo general se calculan como

$$R \cong r \times (1 + T)^{\pm 1} \quad (3.16)$$

donde r es la resistencia de lazo abierto calculada en el límite cuando $A \rightarrow 0$, y se usa $+1$ para una topología en serie, y -1 para otra en paralelo.

Cálculo directo de la ganancia de lazo T . Es posible encontrar T en forma directa si se eliminan todas las fuentes de entrada, cortando el lazo en algún punto conveniente, e introduciendo una señal de prueba v_T . Conforme esta señal se propaga alrededor del lazo, regresa como la señal de retorno $v_R = A \times \beta \times (-1) \times v_T$, por lo que $T = A\beta$ se encuentra como

$$T = -\frac{v_R}{v_T} \Big|_{x_i=0} \quad (3.17)$$

donde el símbolo genérico x_i se usa para denotar la fuente de entrada (o fuentes, en el caso de circuitos de entradas múltiples tales como los amplificadores sumadores y de diferencia. El procedimiento se ilustra en la figura 3.7, donde también se incluyó una carga de salida R_L . Este circuito podría pertenecer tanto a la configuración inversora como a la no inversora, ya que son indistinguibles una vez que se ha suprimido la fuente externa.

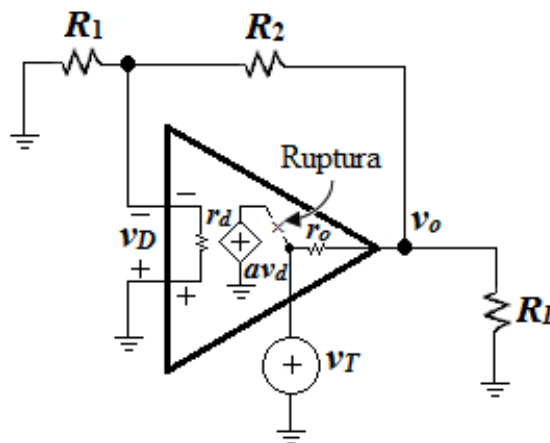


Figura 3.7. Determinación directa de la ganancia de lazo, como $T = -Av_D / v_T$.

En efecto, T depende solo del amplificador y su malla de retroalimentación, sin que importe dónde se aplica la señal de entrada. La ruptura de lazo justo en la salida de la fuente

dependiente, como se muestra, conduce un resultado conveniente, $v_R = Av_D$. Al usar dos veces la fórmula del divisor del voltaje se obtiene que

$$v_R = A \left(-\frac{R_1 \parallel r_d}{R_1 \parallel r_d + R_2} \times \frac{(R_1 \parallel r_d + R_2) \parallel R_L}{(R_1 \parallel r_d + R_2) \parallel R_L + r_o} \right) v_T$$

que se desarrolla para luego utilizar la ecuación 3.17, se llega a

$$T = A \left(\frac{1}{1 + R_2 / R_1 + R_2 / r_d} \times \frac{1}{1 + r_o / (R_1 \parallel r_d + R_2) + r_o / R_L} \right) \quad (3.18)$$

Observe que para una r_o suficientemente pequeña, el último término tiende a la unidad, y para una r_d lo bastante grande, la relación R_2 / r_d puede ignorarse, con lo que se produce el resultado familiar $T = A / (1 + R_2 / R_1)$ [7].

3.7. FILTROS ACTIVOS.

Un filtro es un circuito que procesa señales sobre una base que depende de la frecuencia. La manera en que su comportamiento varía con la frecuencia se llama respuesta a la frecuencia y se expresa en términos de la función de transferencia $H(j\omega)$, donde $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular, en radianes por segundo (rad/s), y j es la unidad imaginaria ($j^2 = -1$). Esta respuesta se conoce mejor como la magnitud de la respuesta $|H(j\omega)|$, y la respuesta de fase $\angle H(j\omega)$, que dan, respectivamente, la ganancia y cambio de fase que experimenta una señal de ca que pasa a través del filtro.

Sobre la base de la magnitud de la respuesta, los filtros se clasifican como pasa bajas, pasa altas, pasa banda y rechaza banda (o *notch*). Una quinta categoría son los filtros pasa todo, que procesan la fase pero dejan constante la magnitud.

3.7.1. Filtros pasa banda.

La respuesta pasa banda se caracteriza por una banda de frecuencia $\omega_L < \omega < \omega_H$, que se llama banda de paso, tal que las señales de entrada dentro de esta banda emergen sin atenuación, mientras que las señales con $\omega < \omega_L$ o $\omega > \omega_H$ se rechazan. En la figura 3.8 se muestra la respuesta ideal para filtros pasa banda.

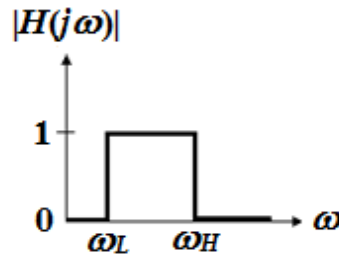


Figura 3.8. Respuesta ideal de filtro pasa banda.

En el circuito de la figura 3.9, también llamado filtro Delyiannis-Friend, el amplificador operacional actúa como un diferenciador con respecto a V_1 , por lo que se escribe $V_o = -sR_2C_2V_1$.

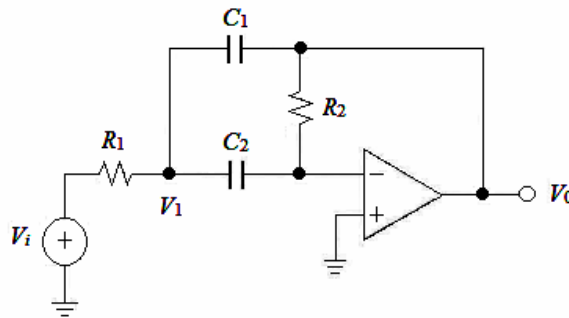


Figura 3.9. Filtro pasa banda de retroalimentación múltiple.

Al sumar las corrientes en el nodo V_1 , $\frac{V_i - V_1}{R_1} + \frac{V_o - V_1}{1/sC_1} + \frac{0 - V_1}{1/sC_2} = 0$

Al eliminar V_1 , se hace $s \rightarrow j\omega$, se reacomoda y queda,

$$H(j\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-j\omega R_2 C_2}{1 - \omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + j\omega R_1 (C_1 + C_2)} \quad (3.19)$$

Para escribir esta función en la forma estándar de $H(j\omega) = H_{\text{OBP}} H_{\text{BP}}(j\omega)$, se hace que $\omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2 = (\omega/\omega_0)^2$ para obtener $\omega_0 = 1/\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}$

$$\text{Y } j\omega R_1 (C_1 + C_2) = (j\omega/\omega_0)/Q, \text{ para obtener } Q = \left(\sqrt{R_2/R_1}\right) / \left(\sqrt{C_1/C_2} + \sqrt{C_2/C_1}\right)$$

Por último, se hace que $-j\omega R_2 C_2 = H_{\text{OBP}} \times (j\omega/\omega_0)/Q$, y resulta

$$H_{\text{OBP}} = (-R_2/R_1)/(1 + C_1/C_2) \quad (3.20)$$

Es claro que este filtro es del tipo inversor. Es costumbre hacer que $C_1 = C_2 = C$, después de lo cual las expresiones anteriores se simplifican y quedan como $\omega_0 = 1/\sqrt{R_1 R_2 C}$, $Q = 0.5\sqrt{R_2/R_1}$, $H_{\text{OBP}} = -2Q^2$.

Las ecuaciones de diseño correspondientes son $R_1 = (1/2)\omega_0 Q C$ y $R_2 = 2Q/\omega_0 C$.

Si, por facilidad, se denota la magnitud de la ganancia en resonancia como $H_0 = |H_{\text{OBP}}|$, se observará que ésta se incrementa en forma cuadrática con Q . Si se desea que $H_0 < 2Q^2$, se debe reemplazar R_1 con un divisor de voltaje. Entonces, las ecuaciones de diseño son $R_{1A} = Q/H_0 \omega_0 C$ y $R_{1B} = R_{1A}/(2Q^2/H_0 - 1)$ [7].

3.8. CONVERTIDOR VOLTAJE A CORRIENTE.

Un convertidor voltaje a corriente (convertidor $V-I$), al que también se denomina amplificador de transconductancia, acepta un voltaje de entrada v_I y produce una corriente de salida del tipo $i_O = Av_I$, donde A es la ganancia o sensibilidad del circuito en amperes por volt. Para un convertidor práctico, la característica adopta la forma más realista de

$$i_O = Av_I - \frac{1}{R_O}v_L \quad (3.21a)$$

donde v_L es el voltaje que desarrolla la carga de salida en respuesta a i_O y R_O es la resistencia de salida del convertidor, vista por la carga. Para una conversión $V-I$ verdadera, i_O debe ser independiente de v_L ; es decir, se debe tener

$$R_O = \infty \quad (3.21b)$$

Como su salida es una corriente, para funcionar, el circuito necesita una carga; dejar abierto el puerto de salida ocasionaría el mal funcionamiento porque i_O no tendría una trayectoria hacia la cual fluir. El cumplimiento de voltaje es el rango de valores permisibles de v_L para los cuales el circuito aún funciona en forma apropiada, antes de que aparezca cualquier efecto de la saturación del amplificador operacional.

Si ninguna de las dos terminales de la carga está conectada a algún nodo, se dice que la carga es del tipo flotante. Sin embargo, es frecuente que una de las terminales ya esté conectada a tierra o a otro potencial. Entonces, se dice que la carga es del tipo aterrizada, y la corriente del convertidor debe alimentarse a la terminal no conectada todavía.

3.9. COMPARADORES DE VOLTAJE.

La función de un comparador consiste en comparar el voltaje v_P en una de sus entradas con el voltaje v_N de la otra entrada, y obtener como salida ya sea un voltaje bajo V_{OL} o un voltaje alto V_{OH} , de acuerdo con

$$v_O = V_{OL} \quad \text{para } v_P < v_N \quad (3.22a)$$

$$v_O = V_{OH} \quad \text{para } v_P > v_N \quad (3.22b)$$

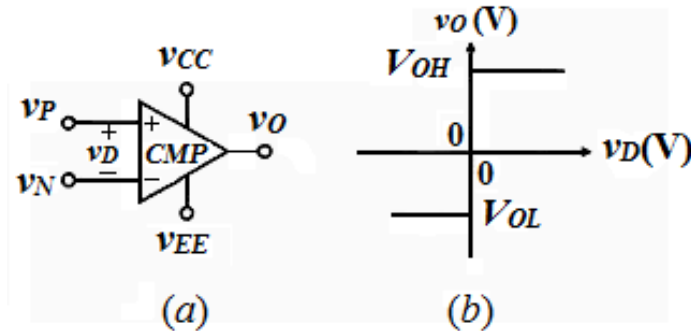


Figura 3.10. Simbolismo del comparador de voltaje y la CTV ideal (Todos los voltajes de nodo están referidos a tierra).

Como se muestra en la figura 3.10a, el simbolismo empleado para los comparadores es el mismo que para los amplificadores operacionales. Se observa que mientras v_P y v_N son variables analógicas debido a que pueden asumir un conjunto continuo de valores, v_O es una variable binaria debido a que únicamente puede asumir uno de dos valores, V_{OL} o V_{OH} . Se considera correcto observar al comparador como un convertidor analógico-digital de 1 bit.

Si se introduce el voltaje diferencial de entrada $v_D = v_P - v_N$, las ecuaciones anteriores también se pueden expresar como $v_O = V_{OL}$ para $v_D < 0$ V, y $v_O = V_{OH}$ para $v_D > 0$ V. La curva de transferencia de voltaje (CTV) que se muestra en la figura 9.1 b, es una curva no lineal. En

el origen, la curva es un segmento vertical, lo cual indica que ahí existe una ganancia infinita, o bien $v_O / v_D = \infty$. En la práctica, un comparador sólo logra aproximar esta CTV idealizada con ganancias reales que están típicamente en el rango que va desde 10^3 hasta 10^6 V / V. Fuera del origen, la CTV consiste en dos líneas horizontales ubicadas en $v_O = V_{OL}$ y $v_O = V_{OH}$. Estos niveles no deben, necesariamente, ser simétricos; no obstante, la simetría es deseable en ciertas aplicaciones. Lo más importante es que los dos niveles estén lo suficientemente separados para hacer posible su distinción. Por ejemplo, las aplicaciones digitales requieren que $V_{OL} \cong 0$ V y que $V_{OH} = 5$ V [7].

3.10. RECTIFICADORES DE PRECISIÓN.

Un rectificador de media onda (RMO) es un circuito que pasa sólo la porción positiva (o sólo la porción negativa) de una onda, mientras que bloquea la otra porción. Las características de transferencia del RMO, mostrada en la figura 3.11a, está dada por

$$v_O = v_I \text{ para } v_I > 0 \quad (3.23a)$$

$$v_O = 0 \text{ para } v_I < 0 \quad (3.23b)$$

Un rectificador de onda completa (ROC), además de pasar la porción positiva, se invierte y después pasa también la porción negativa. Su característica de transferencia, mostrada en la figura 3.11b, es $v_O = v_I$ para $v_I > 0$, y $v_O = -v_I$ para $v_I < 0$, o en forma más concisa,

$$v_O = |v_I| \quad (3.24)$$

Un ROC también se denomina “circuito de valor absoluto”.

Los rectificadores se implementan utilizando dispositivos no lineales tales como los diodos. En la práctica, $V_{D(\text{enc})}$, la caída de voltaje en polarización directa, distinta de cero de un diodo puede ocasionar errores intolerables en la rectificación de señales de bajo nivel.

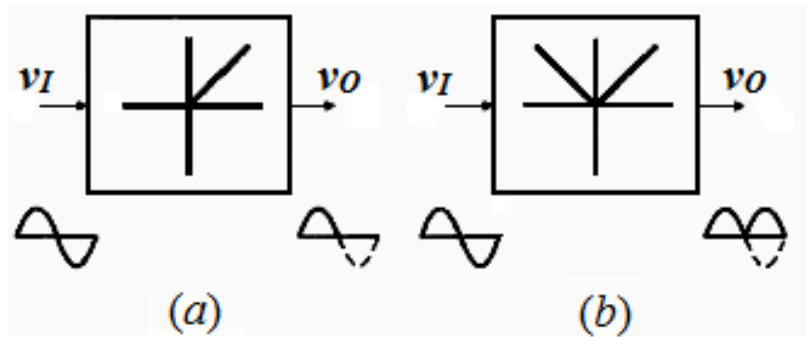


Figura 3.11. Rectificador de media onda (RMO) y rectificador de onda completa (ROC).

3.10.1. Rectificadores de media onda.

El análisis del circuito de la figura 3.12 se facilita si se consideran por separado los casos $v_I > 0$ y $v_I < 0$.

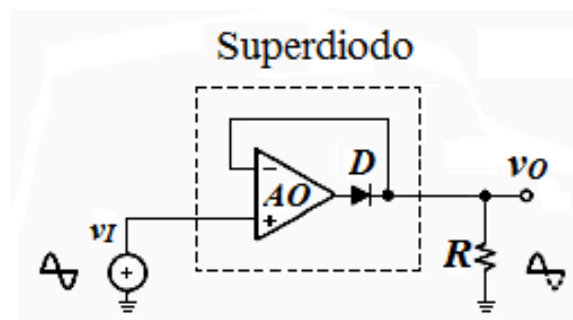


Figura 3.12. Rectificador de media onda básico.

1. $v_I > 0$: En respuesta a una entrada positiva, la salida del amplificador operacional v_{AO} también se volverá positiva, encendiendo el diodo y creando por lo tanto la ruta de retroalimentación negativa mostrada en la figura 3.13a. Esto permite aplicar el principio del corto virtual y escribir $v_O = v_I$. Se observa que para hacer que v_O siga a v_I , el amplificador operacional aplica a su salida una caída de diodo por encima de v_O , esto es, $v_{AO} = v_O + V_{D(\text{enc.})} \cong v_O + 0.7 \text{ V}$. Al colocar el diodo dentro del ciclo de retroalimentación

se elimina cualquier error debido a su caída de voltaje. Para enfatizar este efecto dramático de la retroalimentación negativa, la combinación diodo–amplificador operacional se conoce como un “superdiodo”.

2. $v_I < 0$: Ahora la salida del amplificador operacional se vuelve negativa, apagando el diodo y por ende causando que la corriente a través de R se convierta en cero. Por lo tanto, $v_O = 0$. Como se ilustra en la figura 3.13b, el amplificador operacional ahora está operando en el modo de lazo abierto, y como $v_p < v_N$, la salida se satura en $v_{AO} = V_{OL}$. Con $V_{EE} = -15$ V, $v_{AO} \cong -13$ V.

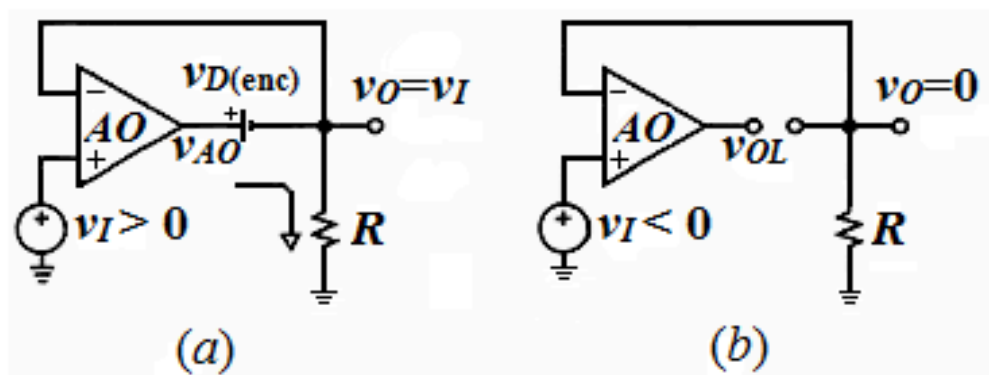


Figura 3.13. Circuitos equivalentes del RMO básico para entradas a) positivas y b) negativas.

Una desventaja de este circuito es que cuando v_I cambia de negativo a positivo, el amplificador operacional debe salir de la saturación y después cambiar por completo desde $v_{AO} = V_{OL} \cong -13$ V hasta $v_{AO} \cong v_I + 0.7$ V para así cerrar el ciclo de retroalimentación. Todo lo anterior toma tiempo, y si v_I ha cambiado en forma apreciable durante el proceso, v_O puede exhibir una distorsión intolerable.

El RMO mejorado de la figura 3.14 mitiga esta inconveniencia utilizando un segundo diodo para asegurar el nivel de saturación negativa justo a una caída de diodo debajo de la tierra.

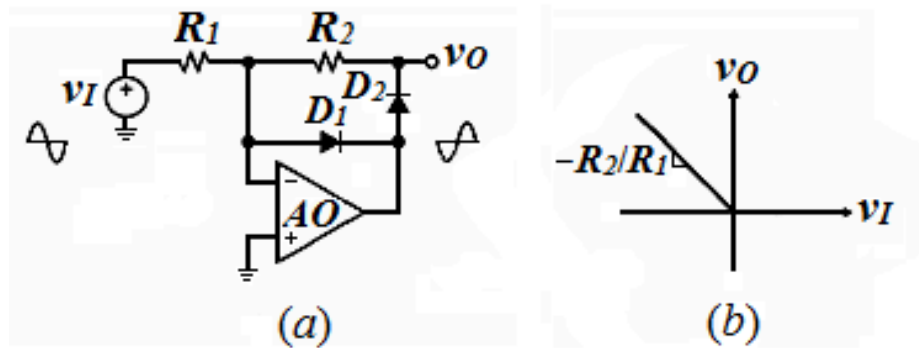


Figura 3.14. RMO mejorado y su curva de transferencia de voltaje.

Procediendo como es usual, se identifican dos casos:

1. $v_I > 0$: Una entrada positiva ocasiona que D_1 conduzca, lo que crea una ruta de retroalimentación negativa alrededor del amplificador operacional. Por el principio de tierra virtual se tiene que $v_N = 0$, lo que indica que D_1 ahora sujeta la salida del amplificador operacional en $v_{AO} = -V_{D1(enc)}$. Además, D_2 está apagada, por lo tanto no fluye corriente a través de R_2 y, por ende, $v_O = 0$.

2. $v_I < 0$: Una entrada negativa ocasiona que el amplificador operacional se vuelva positivo, por lo que D_2 se enciende. Lo anterior crea una ruta de retroalimentación negativa alternativa por medio de D_2 y R_2 , la cual todavía asegura que $v_N = 0$. En forma clara, D_1 ahora está apagado, por lo tanto la corriente suministrada por el amplificador operacional a R_2 debe ser igual a la corriente absorbida por v_I desde R_1 , o bien $(v_O - 0)/R_2 = (0 - v_I)/R_1$. De lo anterior se obtiene $v_O = (-R_2/R_1)v_I$. Además, $v_{AO} = v_O + V_{D2(enc)}$.

El comportamiento del circuito se resume de la siguiente manera:

$$v_O = 0 \quad \text{para} \quad v_I > 0 \quad (3.25a)$$

$$v_O = -(R_2/R_1)v_I \quad \text{para} \quad v_I < 0 \quad (3.25b)$$

y en la figura 3.14b se muestra la CTV. Explicando con palabras, el circuito actúa como un RMO inversor con ganancia. La salida del amplificador operacional V_{AO} es sujetado en alrededor de -0.7 V, esto es, dentro de la región lineal. En consecuencia, la ausencia de retrasos relacionados con la saturación y la excursión reducida del voltaje de salida resulta en una dinámica muy mejorada.

3.10.2. Rectificadores de onda completa.

Una forma de sintetizar el valor absoluto de una señal es mediante la combinación de la misma señal con su versión rectificada de media onda invertida en relación 1 a 2, como se muestra en la figura 3.15.

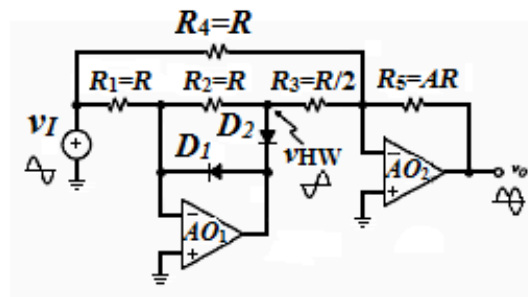


Figura 3.15. ROC de precisión o circuito de valor absoluto.

Aquí AO_1 proporciona rectificación de media onda inversora, y AO_2 suma a v_I y a la salida RMO v_{HW} en una relación 1 a 2 para obtener $v_O = -(R_5/R_4)v_I - (R_5/R_3)v_{HW}$. Considerando que $v_{HW} = -(R_2/R_1)v_I$ para $v_I > 0$, y $v_{HW} = 0$ para $v_I < 0$, se puede escribir

$$v_O = A_p v_I \quad \text{para} \quad v_I > 0 \text{ V} \tag{3.26a}$$

$$v_O = -A_n v_I \quad \text{para} \quad v_I < 0 \text{ V} \tag{3.26b}$$

donde

$$A_n = \frac{R_5}{R_4} \quad , \quad A_p = \frac{R_2 R_5}{R_1 R_3} - A_n \tag{3.27}$$

Se desea que ambas mitades de la onda de entrada sean amplificadas por la misma ganancia $A_p=A_n=A$, para ello se puede escribir $v_O = A v_I$ para $v_I > 0$ y $v_O < 0$, o en forma concisa

$$v_O = A |v_I| \quad (3.28)$$

Una forma de alcanzar esta meta es mediante el establecimiento de $R_1=R_2=R_4=R$, $R_3=R/2$ y $R_5=AR$, como se muestra en la figura; entonces, $A=R_5/R$.

Debido a las tolerancias de las resistencias, A_p y A_n generalmente diferirán entre sí. Su diferencia

$$A_p - A_n = \frac{R_2 R_5}{R_1 R_3} - 2 \frac{R_5}{R_4}$$

se maximiza cuando R_2 y R_4 son maximizadas y R_1 y R_3 son minimizadas (R_5 se puede ignorar puesto que aparece en ambos términos). Al denotar el porcentaje de tolerancia como p y sustituyendo $R_2=R_4=R(1+p)$ y $R_1=2R_3=R(1-p)$ se obtiene

$$|A_p - A_n|_{m\acute{a}x} = 2A \left(\frac{1+p}{(1-p)^2} - \frac{1}{1+p} \right)$$

donde $A=R_5/R$. Para $p \ll 1$ se pueden ignorar las potencias de p de orden más alto y utilizar las aproximaciones $(1 \pm p)^{-1} \cong (1 \mp p)$. Esto permite estimar el porcentaje de diferencia máximo entre A_p y A_n como

$$100 \left| \frac{A_p - A_n}{A} \right|_{m\acute{a}x} \cong 800 p$$

La configuración ROC alternativa de la figura 3.16 requiere sólo dos resistores idénticos. Para $v_I > 0$, D_1 está encendido, lo que permite que AO_1 conserve su entrada inversora en la tierra virtual.

Con la salida de AO_1 fija en $-V_{D1(enc)}$, D_2 está apagado, lo que permite que R_4 transmita V_1 a AO_2 . De este último, que actúa como un amplificador no inversor, se obtiene $v_o=A_p v_I$,

$$A_p = 1 + \frac{R_3}{R_2} \quad (3.29)$$

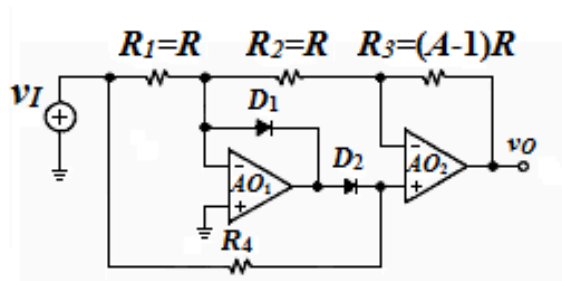


Figura 3.16. ROC empleando únicamente dos resistores idénticos.

Para $v_I < 0$, D_1 está apagado y D_2 está polarizado directamente por R_4 . AO_1 aún conserva su entrada inversora en tierra virtual, pero a través de la ruta de retroalimentación D_2 - AO_2 - R_3 - R_2 . Por KCL, $(0-v_I)/R_1=(v_o-0)/(R_2+R_3)$, o bien $v_o=-A_n v_I$

$$A_n = \frac{R_2 + R_3}{R_1} \quad (3.30)$$

Si se establece $A_p=A_n=A$ es posible escribir en forma concisa $v_o=A|v_I|$. Esta condición se cumple estableciendo $R_1=R_2=R$ y $R_3=(A-1)R$, como se muestra en la figura. Es claro que sólo se necesitan dos resistencias idénticas [7].

3.11. CONVERTIDORES DE CA-CD.

La aplicación más común de los circuitos de precisión de valor absoluto es la conversión de ca-cd, esto es, la generación de un voltaje de cd proporcional a la amplitud de una onda de ca dada. Para realizar esta tarea, primero se rectifica con onda completa la señal

de ca, y después ésta se pasa por un filtro pasa bajas para sintetizar un voltaje de cd. Este voltaje es el promedio de la onda rectificada.

$$V_{prom} = \frac{1}{T} \int_0^T |v(t)| dt \quad (3.31)$$

Donde $v(t)$ es la onda de ca y T es el periodo. Sustituyendo $v(t)=V_m \text{sen}2\pi ft$, donde V_m es la amplitud de pico y $f=1/T$ es la frecuencia, se obtiene $V_{prom} = (2/\pi)V_m = 0.637V_m$

Un convertidor de ca-cd se calibra para que cuando sea alimentado con una señal de ca proporcione como resultado el valor de la raíz cuadrática media (rms).

$$V_{rms} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt \right)^{1/2} \quad (3.32)$$

Al sustituir $v(t)=V_m \text{sen}2\pi ft$ e integrando se obtiene $V_{rms} = V_m / \sqrt{2} = 0.707V_m$

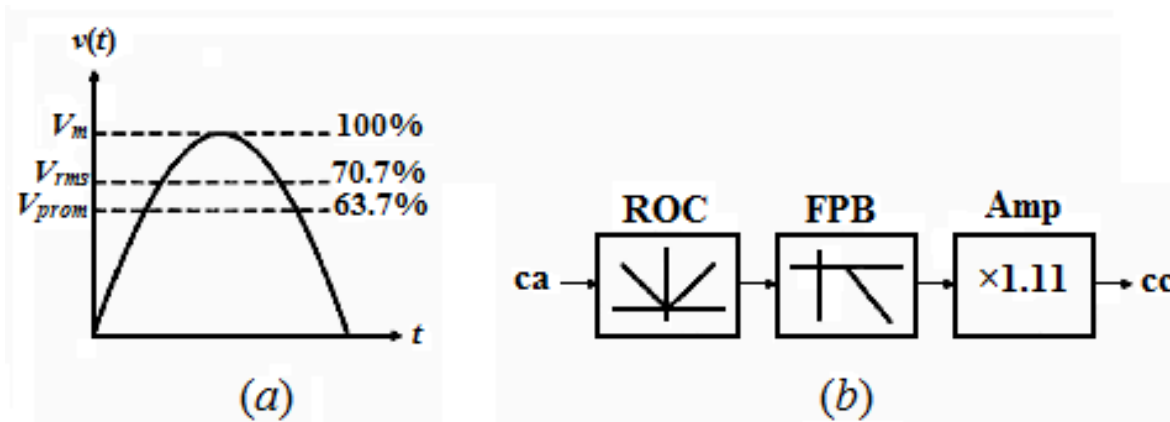


Figura 3.17. a) Relación entre V_{rms} y V_m , y entre V_{prom} y V_m . b) Diagrama de bloques de un convertidor de ca-cd.

En la figura 3.17a se muestran las relaciones entre los valores promedio y rms, y el valor pico. Estas relaciones, que se aplican para las ondas senoidales pero no necesariamente para otras formas de onda, indican que con la intención de obtener V_{rms} a partir de V_{prom} , se necesita multiplicar este último por $(1/\sqrt{2})/(2/\pi) = 1.11$. Por lo tanto, el diagrama de bloques completo de un convertidor de ca-cd es como se muestra en la figura 3.17b [7].

3.12. MULTIVIBRADORES.

Los multivibradores son circuitos regenerativos diseñados especialmente para aplicaciones de temporización. Se clasifican como biestables, astables y monoestables.

En un multivibrador biestable ambos estados son estables, por lo que se necesitan comandos externos para llevar al circuito a un estado determinado. Tal es el caso del *flip-flop* común, el cual toma diferentes nombres, dependiendo de la forma en que se efectúan los comandos externos.

Un multivibrador astable conmuta espontáneamente entre un estado y el otro sin ningún externo. También llamado multivibrador de carrera libre, sus tiempos son establecidos mediante un circuito adecuado, que usualmente comprende un capacitor o un cristal de cuarzo.

Un multivibrador monoestable, también llamado *one-shot*, es estable en uno de sus dos estados. Si es llevado al otro estado a través de un comando externo llamado “disparador”, éste regresa espontáneamente a su estado estable, después de un retraso establecido mediante un circuito temporizador adecuado.

3.12.1. Multivibrador de barrido amplio CFV.

Estos circuitos son, en esencia, multivibradores astables controlados por voltaje, que son diseñados teniendo en mente especificaciones de desempeño para CFV. Por lo general, el

multivibrador es una versión estabilizada con temperatura del concepto básico del oscilador controlado por corriente (OCC) mostrado en la figura 3.18.

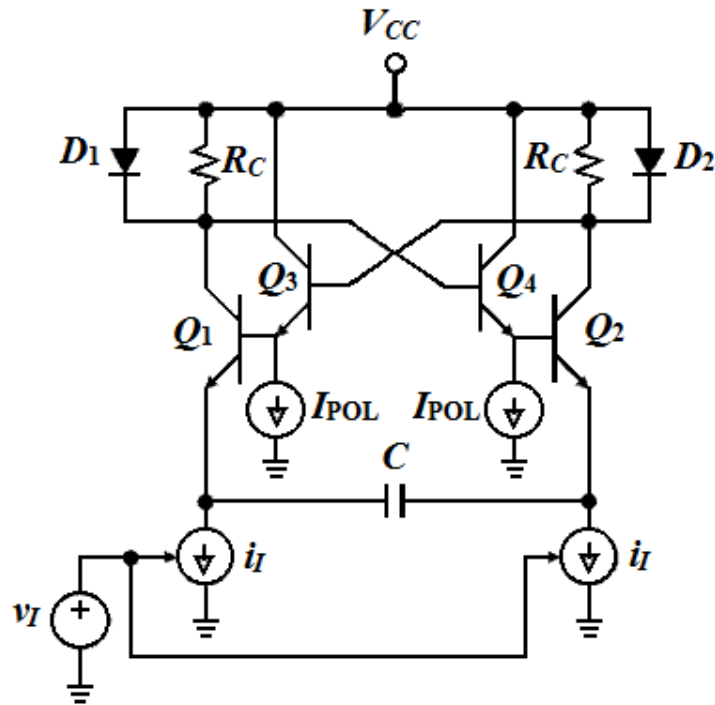


Figura 3.18. Oscilador controlado por voltaje (OCV) de emisor acoplado.

Un producto popular incluido en esta categoría es el AD537 que se muestra en la figura 3.19. El amp op y Q1 forman un buffer convertidor $V-I$, el cual convierte a v_I en la corriente i_I para el OCC, de acuerdo a la ecuación $i_I = v_I/R$. Los parámetros del OCC se eligieron de forma que $f_o = i_I/10C$, o bien

$$f_o = \frac{v_I}{10RC} \quad (3.33)$$

Esta relación es bastante precisa en un rango dinámico de al menos cuatro décadas, hasta una corriente de 1 mA y una frecuencia de 100 kHz. Por ejemplo, con $C = 1$ nF, $R = 10$ k Ω y $V_{CC} = 15$ V, si v_I se varía desde 1 mV hasta 10 V, i_I se modifica desde 0.1 μ A hasta 1 mA y f_o desde 10 Hz hasta 100 kHz. Para minimizar el error de conversión $V-I$ en el

extremo inferior del rango, el error de desvío de entrada del amp op se anula internamente a través de R_{OS} . Con un capacitor de calidad adecuada, los niveles de error de linealidad son 0.1% típico para $f_o \leq 10$ kHz y 0.15% típico para $f_o \leq 100$ kHz.

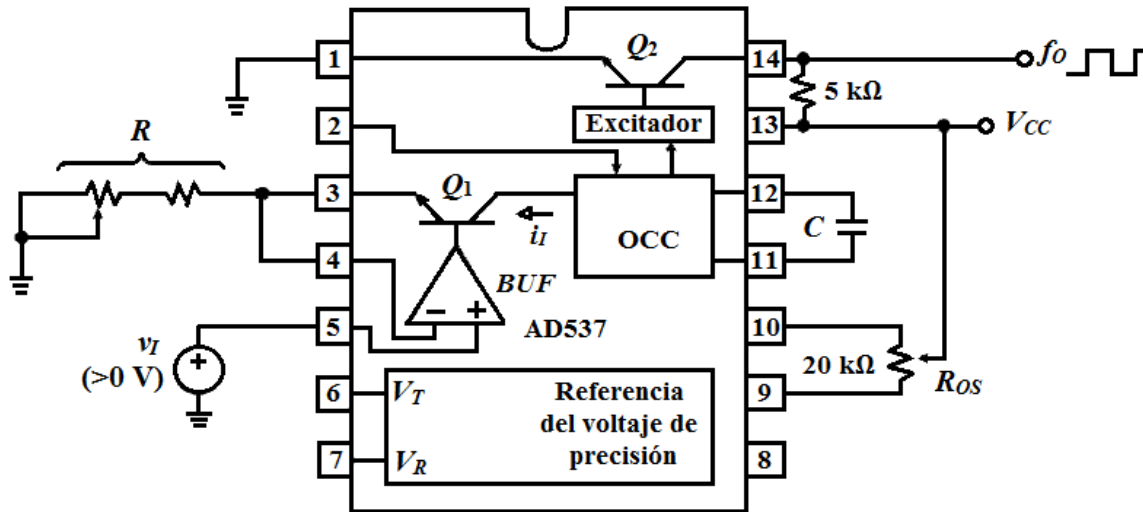


Figura 3.19. El convertidor voltaje a frecuencia AD537 (Cortesía de Analog Devices).

A pesar de que en la figura 3.19 se muestra la conexión para $v_I > 0$, el dispositivo se puede configurar fácilmente para $v_I < 0$ mediante el aterrizado de la entrada no inversora del amp op, separando de tierra la terminal izquierda de R , y aplicando ahí v_I . El dispositivo también funciona como un convertidor de corriente a frecuencia (CCF) si se hace que la corriente de control fluya desde el nodo de la entrada inversora. Por ejemplo, si la terminal 5 del circuito se aterriza y R se reemplaza por un diodo fotodetector que funciona como sumidero de corriente, la intensidad de luz se convertirá en frecuencia.

3.13. CONVERTIDORES V-F Y F-V.

La función de un convertidor de voltaje a frecuencia (CVF) es aceptar una entrada analógica y generar una serie de pulsos con frecuencias

$$f_o = kv_I \quad (3.34)$$

donde k es la sensibilidad del CVF, en Hertz por volt. De esta forma, el CVF proporciona una forma simple de conversión analógica a digital. La razón primordial para este tipo de conversión es que una serie de pulsos se puede transmitir y decodificar con mucha mayor precisión que una señal analógica, en especial si la ruta de transmisión es larga y con ruido. Si también se desea el aislamiento eléctrico, éste se puede completar sin pérdida de precisión utilizando optoacopladores o transformadores de pulso baratos.

Los CVF usualmente tienen especificaciones de desempeño más estrictas que los VCO. Los requerimientos típicos son *a*) un rango dinámico amplio (cuatro décadas o más), *b*) la capacidad de operar en frecuencias relativamente altas (cientos de kiloHertz o más altas), *c*) un error de linealidad bajo (desviación de la línea recta que va desde cero hasta la escala completa, menor a 0.1%), *d*) una alta precisión del factor de escala y alta estabilidad con la temperatura y el voltaje de alimentación. Por otro lado, la forma de onda de salida tiene un interés secundario mientras sus niveles sean compatibles con las señales lógicas estándar.

3.13.1. Conversión frecuencia a voltaje.

El convertidor de frecuencia a voltaje (CFV) realiza la operación inversa, es decir, acepta una forma de onda periódica de frecuencia f_I y produce un voltaje analógico de salida

$$v_o = kf_I \quad (3.35)$$

donde k es la sensibilidad del CFV, en volts por Hertz. Los CFV tienen aplicación como tacómetros en el control de velocidad y en las mediciones rotacionales de algunos motores. Además se usan junto con los CVF para volver a convertir la serie transmitida de pulsos en un voltaje analógico.

Un CVF por balanceo de cargas se configura fácilmente como un CFV mediante la aplicación de la entrada periódica al comparador y tomando la salida desde el amplificador operacional, el cual ahora tiene la resistencia R en la trayectoria de retroalimentación (véase la figura 3.20). Por lo general, la señal de entrada requiere un acondicionamiento apropiado para producir un voltaje de cruce por cero confiable para CMP .

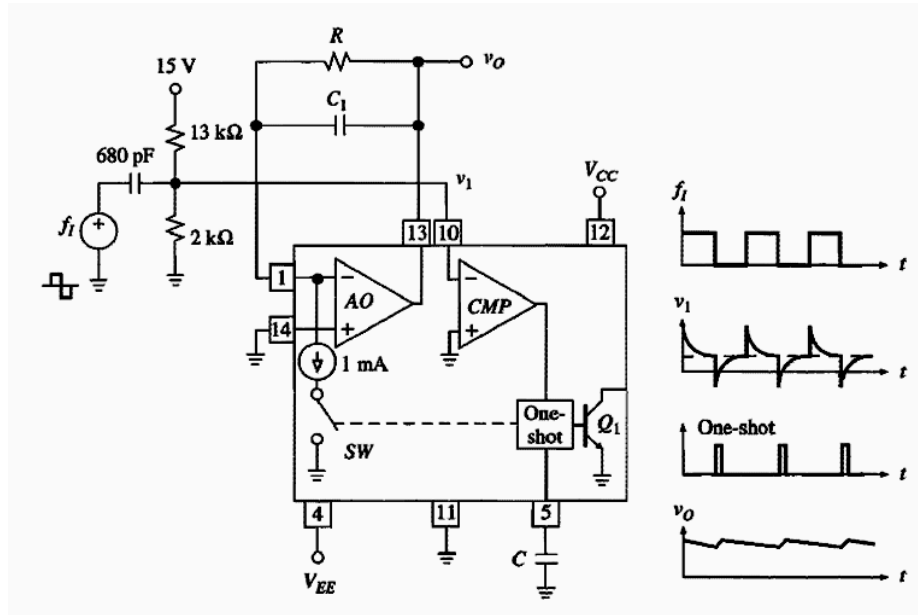


Figura 3.20. Conexión CVF para la conversión frecuencia a voltaje, y sus correspondientes formas de onda. Convertidor VFC32 (cortesía de Burr-Brown).

En la figura 3.20 se muestra un circuito pasa altas para adaptar las entradas del tipo TTL y CMOS. En cada pico negativo de v_I , CMP dispara el *one-shot*, cerrando SW y jalando 1 mA de C_1 para una duración T_H como la proporcionada en la ecuación 3.36.

$$T_H = \frac{7.5V}{1mA} C \quad (3.36)$$

En respuesta a esta serie de pulsos de corriente, v_O crece hasta que la corriente que sale de la unión sumadora de AO en paquetes de 1 mA es exactamente contrabalanceada por la

corriente inyectada continuamente por v_O a través de R , o bien $f_I \times 10^{-3} \times T_H = v_O / R$. Resolviendo para v_O y utilizando la ecuación 3.35 se obtiene

$$v_O = 7.5RCf_I \quad (3.37)$$

Como se expuso anteriormente, el valor de C se determina con base en un ciclo de trabajo máximo de 25%, mientras que R ahora establece el valor de escala completa de v_O . Como en el caso del CVF, el voltaje de desvío de entrada de AO se debe anular para evitar la degradación de la exactitud de la conversión en el extremo inferior del rango.

Entre cerraduras consecutivas de SW , R ocasionará que C_1 se descargue algo, lo que resulta en un rizo de salida. Lo anterior puede estar sujeto a objeciones, especialmente en el extremo inferior del rango de conversión donde la relación rizo a señal tiene sus peores valores. La ondulación máxima es $V_{r(máx)} = (1 \text{ mA})T_H / C_1$. Utilizando la ecuación 3.36, se obtiene

$$V_{r(máx)} = \frac{C}{C_1} 7.5 \text{ V} \quad (3.38)$$

lo cual indica que el rizo se reduce haciendo a C_1 adecuadamente grande. Sin embargo, una capacitancia muy grande hace más lenta la respuesta a un cambio rápido en f_I , puesto que esta respuesta está gobernada por la constante de tiempo $\tau = RC_1$. Por lo tanto, el valor óptimo de C_1 representa un poco de equilibrio entre los dos requerimientos opuestos.

En la figura 3.21 se muestra, en forma de diagrama de bloques, un arreglo CVF-CFV típico para la transmisión de información analógica en forma aislada. Aquí, v_I usualmente es una señal de un transductor que ha sido amplificada por medio de un amplificador de instrumentación. El CVF convierte v_I en una serie de pulsos de corriente para el LED, el fototransistor reconstruye la serie de pulsos en el extremo receptor, y el CFV convierte de nuevo la frecuencia en una señal analógica v_O . En el ejemplo mostrado se utiliza un

optoaislador; sin embargo, también son posibles otras formas de acoplamiento aislado, como la fibra óptica, los transformadores de pulsos y por RF [7].

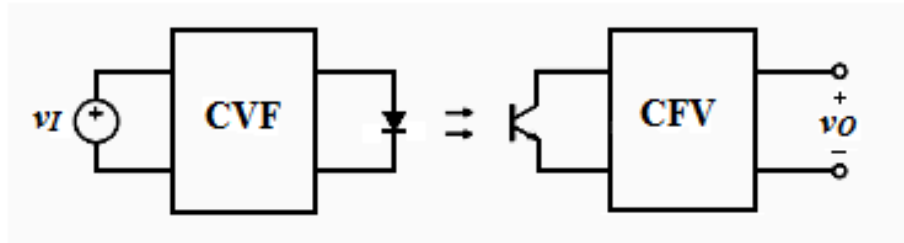


Figura 3.21. Transmisión de información analógica en forma aislada.

Capítulo

4

Generador síncrono

El presente capítulo hace referencia al generador síncrono. Los temas que se describen son: conexión de generadores a un sistema de potencia, velocidad de rotación de un generador síncrono, potencia y par en los generadores síncronos, medición de los parámetros del modelo del generador síncrono, valores nominales en los generadores síncronos, voltaje, velocidad y frecuencia nominales, valores nominales de potencia aparente y factor de potencia.

4.1. INTRODUCCIÓN.

Un generador síncrono convierte energía mecánica en energía eléctrica. La potencia mecánica del impulsor mueve el eje del generador en el cual el campo de corriente continua está instalado. La figura 4.1 muestra una máquina simple.

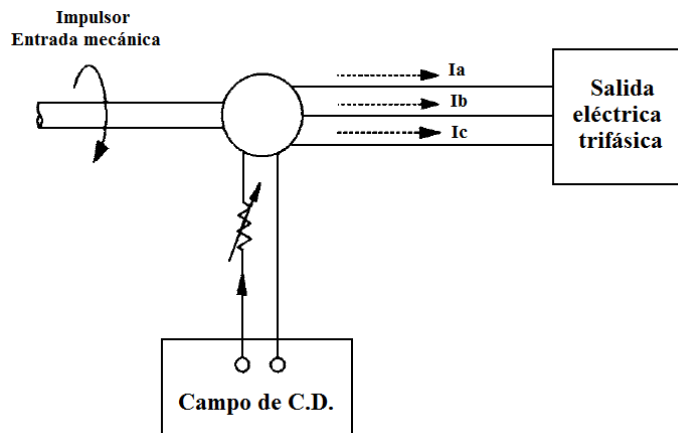


Figura 4.1. Generador síncrono básico.

La energía del impulsor puede obtenerse de quemar combustibles tales como carbón, petróleo o gas natural. El vapor producido gira el eje del generador (rotor) a velocidades típicas de 1800 ó 3600 RPM. La conversión de la energía del vapor a rotación mecánica es hecha en la turbina. En plantas nucleares, el uranio, a través del proceso de fusión, es convertido en calor, el cual produce vapor. El vapor es forzado a través de la turbina de vapor para rotar el eje del generador. La energía del impulsor puede también ser obtenida por caída o movimiento del agua. Los generadores hidroeléctricos giran más lento (alrededor de 100-300 RPM) que las turbinas de vapor.

Las máquinas síncronas son clasificadas en dos diseños principales – máquinas de rotor cilíndrico y máquinas de polos salientes. La figura 4.2 proporciona una vista de la sección transversal de ambos tipos de construcción. Los generadores impulsados por turbinas de vapor tienen rotores cilíndricos con ranuras en las cuales son colocados los devanados de campo

distribuidos. La mayoría de los rotores cilíndricos están hechos de acero forjado sólido. El número de polos es típicamente dos o cuatro.

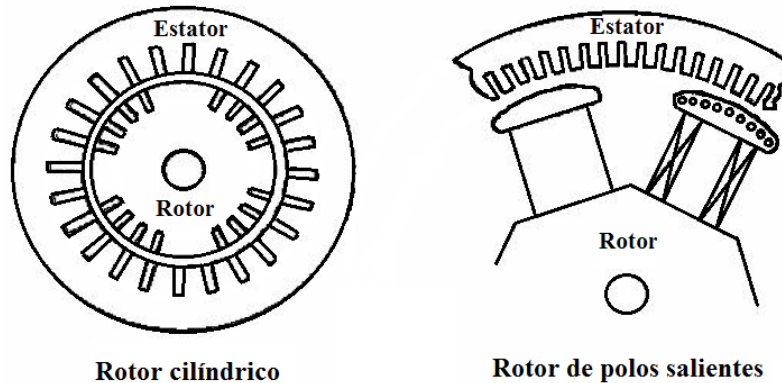


Figura 4.2. Tipos de generadores síncronos.

Los generadores impulsados por turbinas hidráulicas tienen rotores de polos salientes laminados con devanados de campo concentrados y un gran número de polos. Cualquiera que sea el tipo del impulsor o diseño de la máquina, la fuente de energía usada para girar el eje es mantenida en un nivel constante a través de un regulador de velocidad conocido como gobernador. La rotación del flujo de cd en el campo del generador reacciona con los devanados del estator y, debido al principio de inducción, se genera una tensión trifásica [4].

4.2 CONEXIÓN DE GENERADORES A UN SISTEMA DE POTENCIA.

Existen dos métodos básicos principales usados en la industria para conectar generadores al sistema de potencia. Estos son conexiones directa y unitaria.

Conexión directa: La figura 4.3a muestra el diagrama unifilar para una conexión directa de un generador a un sistema de potencia. Los generadores son conectados directamente al bus de carga sin transformación de tensión de por medio. Este tipo de conexión es un método recientemente usado en la industria para la conexión de generadores de tamaño pequeño.

Conexión unitaria: La figura 4.3b muestra el diagrama unifilar para un generador en conexión unitaria. El generador es conectado al sistema de potencia a través de un transformador elevador dedicado. La carga auxiliar del generador es suministrada desde un transformador reductor conectado a las terminales del generador. La mayoría de los generadores grandes son conectados al sistema de potencia de esta manera, usando un transformador elevador principal con conexión estrella-delta. Al tener la generación conectada a un sistema delta, las corrientes de falla a tierra pueden ser dramáticamente reducidas usando puesta a tierra de alta impedancia [1].

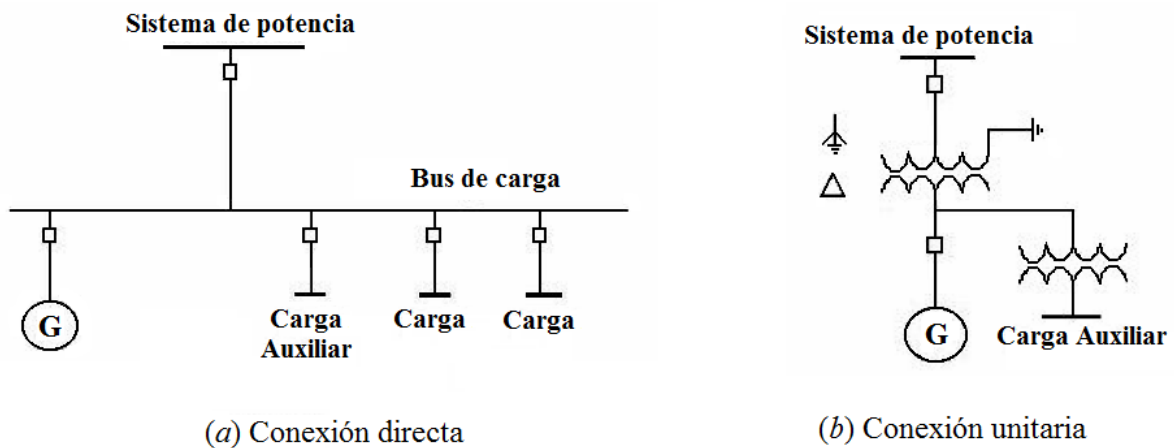


Figura 4.3. Conexión de generadores a un SEP.

4.3. VELOCIDAD DE ROTACIÓN DE UN GENERADOR SÍNCRONO.

Los generadores síncronos son por definición *síncronicos*, lo cual significa que la frecuencia eléctrica producida está entrelazada o sincronizada con la tasa mecánica de rotación del generador. Un rotor de generador síncrono consta de un electroimán al cual se suministra corriente directa. El campo magnético del rotor apunta en cualquier dirección según gire el rotor. La relación entre la tasa de giro de los campos magnéticos de la máquina y la frecuencia eléctrica del estator se expresa mediante la ecuación (4.1)

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (4.1)$$

donde

f_e = frecuencia eléctrica, en Hz,

n_m = velocidad mecánica del campo magnético en r/min (igual a la velocidad del rotor para las máquinas síncronas),

P = número de polos.

Puesto que el rotor gira con la misma velocidad que el campo magnético, esta ecuación relaciona la velocidad de rotación del rotor con la frecuencia eléctrica resultante. Dado que la potencia eléctrica es generada a 50 ó 60 Hz, el generador debe girar a una velocidad fija que depende del número de polos de la máquina. Por ejemplo, para generar potencia a 50 Hz en una máquina de dos polos, el rotor debe girar a 3600 r/min. Para generar potencia a 50 Hz en una máquina de cuatro polos, el rotor debe girar a 1500 r/min. La tasa de rotación necesaria para una frecuencia dada puede calcularse siempre mediante la ecuación (4.1) [1].

4.4. POTENCIA Y PAR EN LOS GENERADORES SÍNCRONOS.

Un generador síncrono es una máquina sincrónica utilizada como generador para convertir la potencia mecánica en potencia eléctrica trifásica. La fuente de potencia mecánica, el motor primario, puede ser un motor diesel, una turbina de vapor, una turbina hidráulica o un equipo similar. Cualquiera que sea la fuente, debe cumplir la propiedad básica de que su velocidad sea constante, independientemente de la demanda de potencia. Si esto no se cumple, la frecuencia resultante del sistema de potencia podría presentar fallas.

No toda la potencia mecánica que entra al generador síncrono se convierte en potencia eléctrica a la salida de la máquina. La diferencia entre la potencia de salida y la de entrada representa las pérdidas de la máquina. La figura 4.4 muestra un diagrama de flujo de potencia para un generador síncrono.

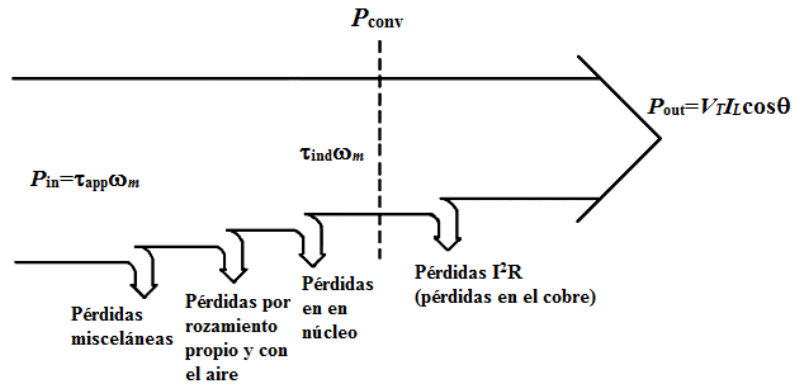


Figura 4.4. Diagrama de flujo de potencia en un generador síncrono.

La potencia mecánica de entrada es la potencia al eje en el generador $P_{in} = \tau_{app} \omega_m$, mientras que la potencia mecánica convertida internamente en eléctrica está dada por

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m \tag{4.2}$$

$$= 3E_A I_A \cos \gamma \tag{4.3}$$

donde γ es el ángulo entre \mathbf{E}_A e \mathbf{I}_A . La diferencia entre la potencia de entrada al generador y la potencia convertida en el generador representa las pérdidas mecánicas, en el núcleo, y las pérdidas misceláneas de la máquina.

La potencia eléctrica real de salida del generador síncrono se puede expresar en cantidades de línea a línea como

$$P_{out} = \sqrt{3} V_T I_L \cos \theta \tag{4.4}$$

y en cantidades de fase como

$$P_{out} = 3V_\phi I_A \cos \theta \tag{4.5}$$

La potencia reactiva de salida puede ser expresada en cantidades de línea a línea como

$$Q_{out} = \sqrt{3}V_T I_L \text{ sen } \theta \quad (4.6)$$

o en cantidades de fase como

$$Q_{out} = 3V_\phi I_A \text{ sen } \theta \quad (4.7)$$

Si se ignora la resistencia del inducido R_A (puesto que $X_S \gg R_A$), se puede deducir una ecuación muy útil para aproximar la potencia de salida del generador. Para obtener esta ecuación, es preciso examinar el diagrama fasorial de la figura 4.5, que muestra un diagrama fasorial simplificado de un generador en el cual se ha ignorado la resistencia estática.

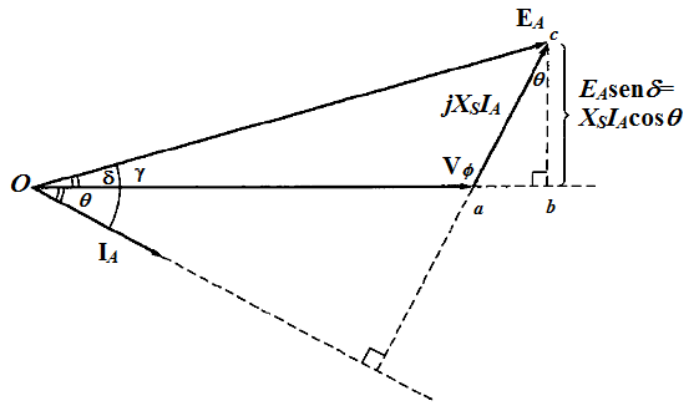


Figura 4.5. Diagrama fasorial simplificado donde se ha ignorado la resistencia del inducido.

Nótese que el segmento vertical bc se puede expresar como $E_A \text{ sen } \delta$ o como $X_S I_A \text{ cos } \theta$. Por tanto,

$$I_A \text{ cos } \theta = \frac{E_A \text{ sen } \delta}{X_S}$$

al sustituir esta expresión en la ecuación (4.5) se obtiene

$$P = \frac{3V_{\phi}E_A \text{ sen } \delta}{X_S} \quad (4.8)$$

Puesto que en la ecuación (4.8) se supuso que el valor de las resistencias era cero, no hay pérdidas eléctricas en este generador, y esta ecuación es igual para P_{conv} y P_{out} .

La ecuación (4.8) muestra que la potencia producida por un generador síncrono depende del ángulo δ entre \mathbf{V}_{ϕ} y \mathbf{E}_A . El ángulo δ se conoce como ángulo de par de la máquina. Nótese también que la máxima potencia que puede suministrar el generador ocurre cuando $\delta=90^\circ$. En $\delta=90^\circ$, $\text{sen } \delta=1$ y

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{3V_{\phi}E_A}{X_S} \quad (4.9)$$

La máxima potencia indicada por esta ecuación se llama límite de estabilidad estática del generador. Normalmente, los generadores reales nunca llegan a estar demasiado cerca de este límite. Ángulos de par a plena carga entre 15° a 20° son los más típicos en las máquinas reales.

Examinando las ecuaciones (4.5), (4.7) y (4.8). Si V_{ϕ} es constante, la potencia real de salida es directamente proporcional a las cantidades $I_A \cos \theta$ y $E_A \text{ sen } \delta$, y la potencia reactiva de salida es directamente proporcional a la cantidad $I_A \text{ sen } \theta$. Estos datos son útiles para dibujar los diagramas fasoriales de los generadores síncronos cuando la carga varía. Entonces el par inducido en este generador se puede expresar como

$$\tau_{ind} = kB_R \times B_S \quad (4.10)$$

o como

$$\tau_{ind} = kB_R \times B_{net} \quad (4.11)$$

La magnitud de la ecuación (4.11) puede ser expresada como

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_{net} \text{ sen } \delta \quad (4.12)$$

donde δ es el ángulo entre los campos magnéticos del rotor y el neto (también llamado ángulo de par). Puesto que B_R y B_{net} .

Una expresión alternativa para el par inducido en un generador síncrono se puede deducir de la ecuación (4.8). Debido a que $P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m$, el par inducido se puede expresar como

$$\tau_{ind} = \frac{3V_\phi E_A \text{ sen } \delta}{\omega_m X_S} \quad (4.13)$$

Esta expresión describe el par inducido en términos de cantidades eléctricas, mientras que la ecuación (4.11) da la misma información en términos de cantidades magnéticas.

4.5. MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DE GENERADOR SÍNCRONO.

El circuito equivalente de un generador síncrono contiene tres cantidades que deben determinarse para describir completamente el comportamiento de un generador síncrono real: la relación entre flujo y corriente de campo (y por tanto entre la corriente de campo y E_A), la reactancia sincrónica y la resistencia del inducido

Enseguida se describe una técnica sencilla para determinar estas cantidades en un generador síncrono.

El primer paso del proceso consiste en realizar la prueba de circuito abierto del generador. Para llevarla a cabo, se hace girar el generador a su velocidad nominal desconectando todos los terminales de cualquier carga y se coloca la corriente de campo en cero. Entonces se incrementa gradualmente la corriente de campo en pasos y se mide el voltaje en los terminales en cada paso durante la prueba. Con los terminales abiertos $I_A=0$ por lo que E_A es igual a V_ϕ . Con esta información es posible elaborar una gráfica de E_A o V_T contra I_F . Este dibujo es llamado característica de circuito abierto (CCA) del generador, que permite encontrar en el generador el voltaje interno generado para una corriente de campo dada. La figura 4.6a muestra una característica típica de éstas.

Nótese que en principio la curva es casi perfectamente lineal hasta observar una saturación a altas corrientes de campo. Dado que el hierro no saturado en el marco de la maquina síncrona tiene una reluctancia varios miles de veces menor que la reluctancia del entrehierro, al principio casi toda la fuerza magnetomotriz se ejerce a través del entrehierro y el incremento en el flujo resultante es lineal. Cuando finalmente se satura el hierro, su reluctancia se incrementa en forma dramática; el flujo se incrementa mucho más despacio cuando se incrementa la fuerza magnetomotriz. La porción lineal de una CCA se llama línea de entrehierro de la característica.

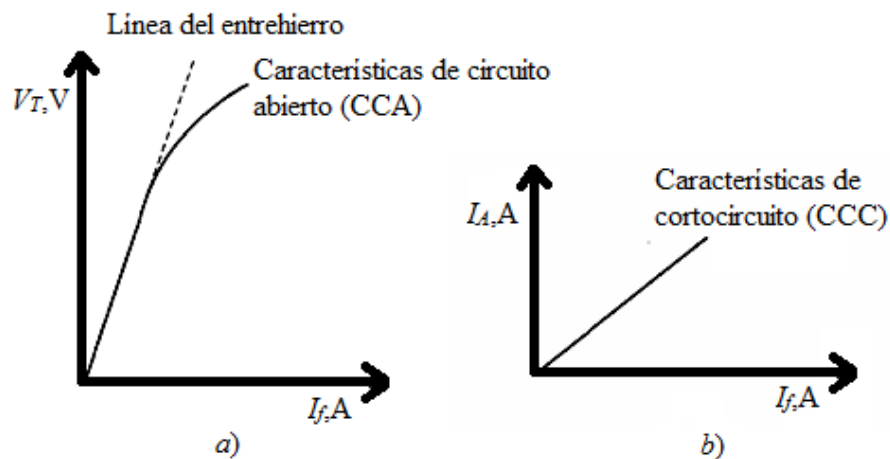


Figura 4.6. a) Característica de circuito abierto (CCA) de un generador síncrono.
 b) Característica de cortocircuito (CCC) de un generador síncrono.

El segundo paso del proceso es llevar a cabo la prueba de corto circuito. Para esta prueba, se ajusta la corriente de campo nuevamente en cero y se cortocircuitan los terminales del generador por medio de un grupo de amperímetros. Luego, cuando se incrementa la corriente de campo, se mide la corriente del inducido I_A o la corriente de línea I_L . La característica de corriente del inducido contra la corriente de campo se llama característica de cortocircuito (CCC) y se muestra en la figura 4.6b en esencia esta característica es una línea recta. Tal circuito se muestra en la figura 4.7a. Nótese que cuando los terminales están cortocircuitados, la corriente del inducido I_A está dada por

$$I_A = \frac{E_A}{R_A + jX_S} \quad (4.14)$$

y su magnitud está dada por

$$I_A = \frac{E_A}{\sqrt{R_A^2 + X_S^2}} \quad (4.15)$$

El diagrama fasorial resultante se muestra en la figura 4.7b y los campos magnéticos correspondientes se muestran en la figura 4.7c. Puesto que \mathbf{B}_S casi anula a \mathbf{B}_R , el campo magnético neto \mathbf{B}_{net} es muy pequeño (correspondiente únicamente a las caídas internas resistiva e inductiva). Dado que el campo magnético neto de las máquinas es tan pequeño, la máquina no se satura y la CCC es lineal.

Para entender la información proporcionada por estas dos características nótese que, cuando \mathbf{V}_ϕ igual a cero en la figura 4.7, la impedancia interna de la máquina está dada por

$$Z_S = \sqrt{R_A^2 + X_S^2} = \frac{E_A}{I_A} \quad (4.16)$$

Puesto que $X_S \gg R_A$, esta ecuación se reduce a

$$X_S \approx \frac{E_A}{I_A} = \frac{V_{\phi,OC}}{I_A} \quad (4.17)$$

Si E_A e I_A son conocidos para una situación dada, se puede hallar la reactancia síncrona X_S . Un método aproximado para determinar la reactancia síncrona X_S para una corriente de campo dada es:

1. Obtenga el voltaje interno generado E_A de la característica CCA para esa corriente de campo.
2. Obtenga la corriente de cortocircuito $I_{A,SC}$ para esa corriente de campo de la característica CCC.
3. Encuentre X_S aplicando la ecuación (4.17).

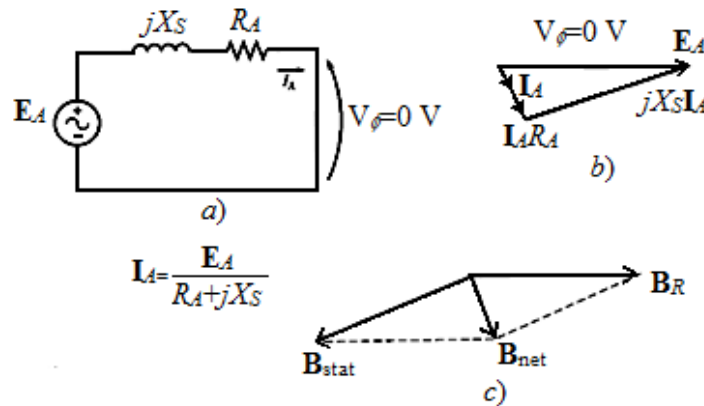


Figura 4.7. a) Circuito equivalente de un generador síncrono durante la prueba de cortocircuito. b) Diagrama fasorial resultante. c) Campos magnéticos durante la prueba de cortocircuito.

Sin embargo, este método presenta una dificultad. El voltaje interno generado E_A proviene de la CCA, cuando la máquina está parcialmente saturada por grandes corrientes de campo, mientras que I_A se toma de la CCC, cuando la máquina no se encuentra saturada para todas las corrientes de campo. Entonces, para corrientes de campo más altas, la E_A tomada de

la CCA a una corriente de campo dada no es igual a la E_A en la misma corriente de campo bajo condiciones de cortocircuito; debido a esta diferencia, el valor resultante de X_S es aproximado.

No obstante, la respuesta hallada por este método es correcta hasta el punto de saturación, de modo que, la reactancia sincrónica no saturada $X_{S,H}$ de la máquina se puede encontrar aplicando simplemente la ecuación (4.17) para toda corriente de campo en la porción lineal (o línea de entrehierro) de la curva CCA.

Puesto que el valor aproximado de la reactancia sincrónica varía con el grado de saturación de la CCA, el valor de la reactancia sincrónica utilizada en un ejercicio dado debe ser el calculado para el valor aproximado de la carga sobre la máquina. Una gráfica de la reactancia sincrónica aproximada como función de la corriente de campo se muestra en la figura 4.8.

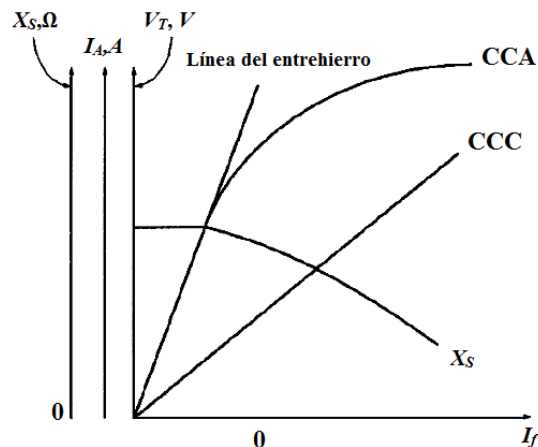


Figura 4.8. Dibujo de la reactancia sincrónica aproximada de un generador síncrono como función de la corriente de campo de la máquina. El valor constante de reactancia encontrado para bajos valores de corriente de campo es la reactancia sincrónica no saturada de la máquina.

Si es importante conocer tanto la resistencia de un devanado como su reactancia sincrónica, la resistencia puede aproximarse aplicando una tensión cd a los devanados, mientras la máquina está estacionaria, y midiendo el flujo de corriente resultante. Debido a

que se utiliza de un voltaje cd, la reactancia de los devanados es cero durante el proceso de medida.

Esta técnica no es del todo exacta ya que la resistencia ca será un poco mayor que la resistencia cd (como resultado del efecto peculiar a altas frecuencias). El valor medido de la resistencia puede introducirse en la ecuación (4.17) para mejorar el valor estimado de X_S , si se desea (tal mejoramiento no es de mucha ayuda en el cálculo aproximado pues la saturación causa un error mucho mayor en el cálculo de X_S que el cometido al ignorar R_A).

4.6. VALORES NOMINALES EN LOS GENERADORES SÍNCRONOS.

Existen ciertos límites básicos de la velocidad y la potencia que pueden obtenerse de un generador síncrono. Estos límites se expresan como valores nominales de la máquina. El propósito de los valores nominales es proteger el generador del daño que pudiera ocasionarle una operación inadecuada. Para este fin, cada máquina tiene un número de valores nominales indicados en la placa de características fijada en ella.

Los valores nominales típicos de una máquina síncrona son el voltaje, la frecuencia, la velocidad, la potencia aparente (kilovoltamperes), el factor de potencia, la corriente de campo y el factor de servicio.

4.6.1. Voltaje, velocidad y frecuencia nominales.

La frecuencia nominal de un generador síncrono depende del sistema de potencia al cual está conectado. Las frecuencias comúnmente utilizadas hoy día en los sistemas de potencia son 50 Hz (en Europa, Asia, etcétera), 60 Hz (en América) y 400 Hz (en aplicaciones especiales y de control). Una vez se conozca la frecuencia, hay únicamente una velocidad de rotación posible para un número de polos dados. La relación fija entre la frecuencia y la velocidad está dada por la ecuación (4.1):

$$f_e = \frac{n_m P}{120}$$

como se describió anteriormente.

Quizá el valor nominal más obvio es el voltaje de operación al cual se diseña el generador. El voltaje de generación depende del flujo, la velocidad de rotación y la construcción mecánica de la máquina. Para un tamaño de estructura mecánica y velocidad dadas, cuanto mayor sea el voltaje deseado, mayor será el flujo requerido en la máquina. Sin embargo, el flujo no puede ser incrementado indefinidamente ya que hay siempre un máximo permisible de corriente de campo.

Otras consideraciones para fijar el máximo voltaje admisible es el punto de ruptura del aislamiento de los devanados (los voltajes normales de operación no deben estar muy cercanos al valor del punto de ruptura de su aislamiento).

4.6.2. Valores nominales de potencia aparente y factor de potencia.

Existen dos factores que determinan los límites de potencia de las máquinas eléctricas. Uno es el par mecánico aplicado al eje de la máquina y el otro es el calentamiento de los devanados de la máquina. En todos los motores y generadores síncronos prácticos, el eje tiene suficiente capacidad mecánica para manejar mucha mayor potencia de estado estacionario que la de dimensionamiento nominal de la máquina; en consecuencia los límites prácticos de estado estacionario están dados por el calentamiento de los devanados.

Hay dos devanados en un generador síncrono y cada uno de ellos debe ser protegido de sobrecalentamiento. Estos dos devanados son el del inducido (armadura) y el de campo. La máxima corriente aceptable del inducido fija la potencia nominal aparente del generador puesto que la potencia aparente S está dada por

$$S = 3V_{\phi}I_A \quad (4.18)$$

Si se conoce el voltaje nominal, la máxima corriente aceptable del inducido, determina los kilovoltamperes del generador:

$$S_{\text{nominal}} = 3V_{\phi, \text{nominal}}I_{A, \text{máx}} \quad (4.19)$$

$$S_{\text{nominal}} = \sqrt{3}V_{L, \text{nominal}}I_{L, \text{máx}} \quad (4.20)$$

Es importante tener en cuenta que para el calentamiento de los devanados del inducido, no es importante el factor de potencia de la corriente del inducido. El efecto de calentamiento por pérdidas en el cobre del estator está dado por

$$P_{SCL} = 3I_A^2R_A \quad (4.21)$$

y es independiente del ángulo de la corriente con respecto al voltaje V_{ϕ} . Debido a que el ángulo de la corriente es irrelevante para el calentamiento del inducido, estas máquinas están dimensionadas en kilovoltamperes en vez de kilowatts.

El otro devanado que nos concierne es el de campo. Las pérdidas en el cobre del devanado de campo están dadas por

$$P_{RCL} = I_F^2R_F \quad (4.22)$$

tal que el máximo calentamiento permisible fija una máxima corriente de campo en la máquina. Puesto que $E_A = K\phi\omega$ ésta fija el máximo tamaño aceptable de E_A .

El efecto de tener una máxima I_F y un E_A máximo, se traduce directamente en una restricción sobre el mínimo factor de potencia aceptable del generador cuando se encuentra

operando a los kilovoltamperes nominales. La figura 4.9 muestra el diagrama fasorial de un generador síncrono en que el voltaje y la corriente del inducido son nominales. La corriente puede asumir diferentes ángulos, como se muestra.

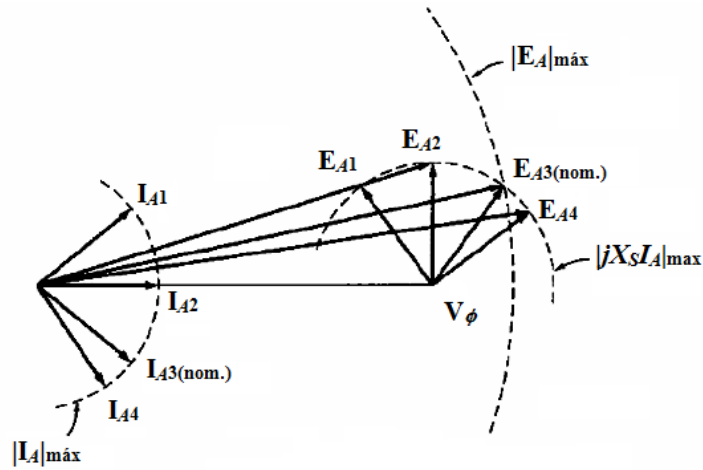
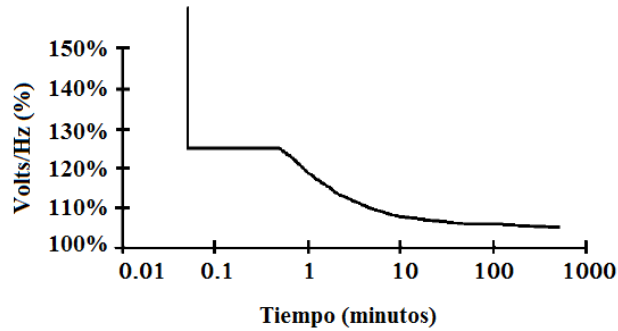


Figura 4.9. Forma como el límite de la corriente del campo rotor fija el factor de potencia nominal de un generador.

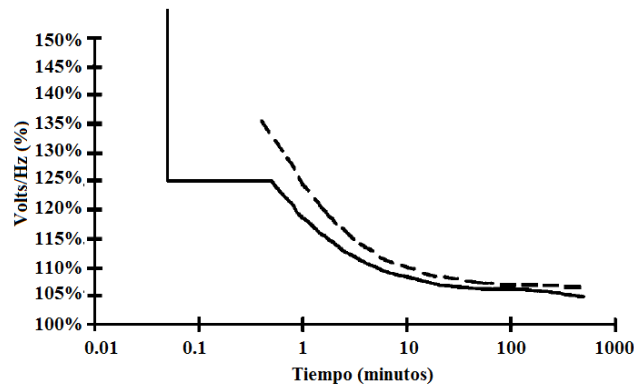
El voltaje interno generado E_A es la suma de V_ϕ más $jX_s I_A$. Nótese que para algunos de los posibles ángulos de la corriente, el voltaje requerido E_A excede $E_{A,máx}$. Si el generador fuera operado a la corriente nominal del inducido y estos factores de potencia, el devanado de campo se quemaría.

El ángulo de I_A , que requiere el máximo posible E_A mientras V_ϕ permanece en el valor nominal, da el factor de potencia nominal del generador. Es posible operar el generador a un factor de potencia más bajo (más en atraso) que el nominal, sólo si se restringen los kilovoltamperes suministrados por el generador [1].

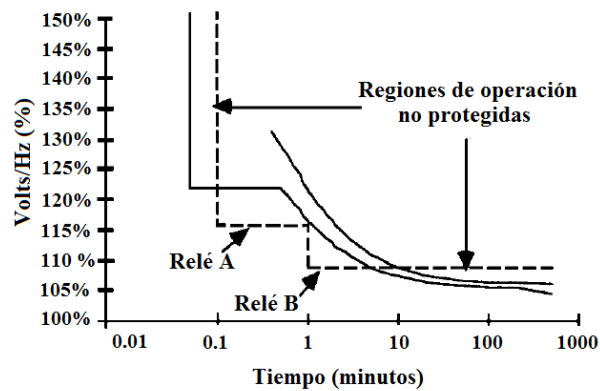
A continuación se presentan las curvas típicas de sobreexcitación de generadores en la figura 4.10.



(a) Curva típica de límite para la operación V/Hz para un generador



(b) Curvas combinadas para la operación V/Hz para generador y transformador elevador (con la curva del transformador elevador puesta en base de la tensión del generador).



(c) Característica típica de relé para protección V/Hz, de nivel dual de tiempo definido (Relé A ajustado en 118% V/Hz con retardo de tiempo de 6 segundos. Relé B ajustado en 110% V/Hz con un retardo de tiempo de 60 segundos)

Figura 4.10.Curvas típicas de sobreexcitación de generadores.

La curva de capacidad del generador (figura 4.11) proporciona un panorama de las operaciones de la máquina síncrona. Normalmente, el campo del generador es ajustado de tal forma que se entregan potencia real y potencia reactiva al sistema de potencia. Si el sistema de excitación se pierde o es reducido, el generador absorbe potencia reactiva del sistema de potencia en lugar de suministrarla y opera en la región de subexcitación de la curva de capacidad. Los generadores tienen en esta área una estabilidad baja o reducida. Si ocurre una pérdida total del campo y el sistema puede suministrar suficiente potencia reactiva sin una gran caída de tensión terminal, el generador puede operar como un generador de inducción; si no es así, se perderá el sincronismo. El cambio desde operación normal sobreexcitado a operación subexcitado ante la pérdida de campo no es instantáneo sino que ocurre en un cierto periodo de tiempo (generalmente algunos segundos), dependiendo del nivel de salida del generador y de la capacidad del sistema conectado.

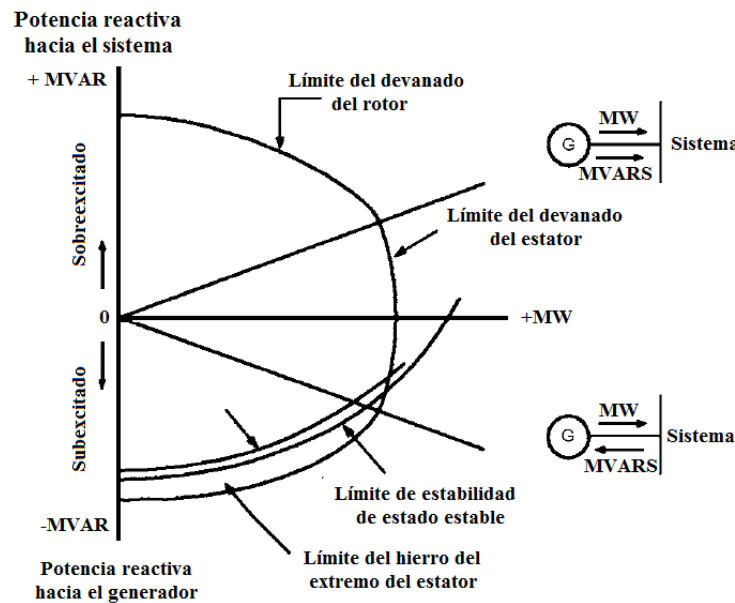


Figura 4.11. Curva de capacidad del generador.

Capítulo

5

Desarrollo del proyecto

En este capítulo se describen las características del proyecto y la metodología empleada para la realización del mismo. Además de presentarse una breve explicación de la realización de cada uno de los de los esquemas de protección implementados y fotografías.

5.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.

Para resolver la problemática de la falta de herramientas complementarias para la elaboración de prácticas de laboratorio para las materias de protecciones eléctricas y simulación de relevadores de protección de Maestría en Ingeniería Eléctrica del ITCM se realizó el presente proyecto consistente en:

- Construcción de fuente de alimentación simétrica de 12 V para suministro de voltaje para cada esquema de protección.
- Diseño y construcción de esquema de protección ANSI 87 G.
- Diseño y construcción de esquema de protección ANSI 64 G.
- Diseño y construcción de esquema de protección ANSI 24.

5.2. METODOLOGÍA.

Para la realización de la presente propuesta, se segmentó el proyecto en dos etapas:

- Documentación y diseño: en esta etapa se inició con la indagación acerca de la importancia de la protección diferencial, la protección contra sobreexcitación y la protección de falla a tierra en el estator para generadores síncronos, así como también del amplificador operacional y sus configuraciones. Después se procedió con la realización de los diagrama de bloques para cada esquema de protección, y se definieron los diagramas convenientes con circuitería analógica.
- Implementación: En esta etapa se definió el material necesario para la implementación de los esquemas de protección y se realizaron los circuitos diseñados en tablillas de experimentación para proceder con mediciones con el

osciloscopio y la realización de pruebas. Posteriormente se realizaron los circuitos impresos (PCB's) correspondiente para cada esquema utilizando el software CadSoft EAGLE PCB y el método de tinta. Finalmente se realizó el montaje de los componentes electrónicos en las tarjetas elaboradas, cumpliendo por ultimo con la ejecución de pruebas con equipo de prueba para verificar la funcionalidad. Se optó por elaborar una fuente de alimentación simétrica de 12 V para el suministro de voltaje para cada esquema de protección.

La figura 5.1. Muestra parte del proceso del desarrollo del presente proyecto de tesis.

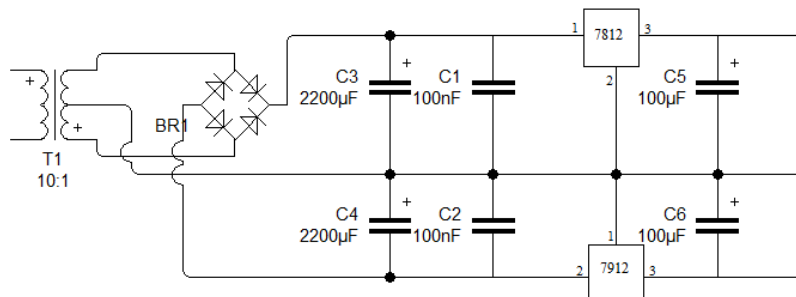


Figura 5.1. Proceso del desarrollo de proyecto de tesis.

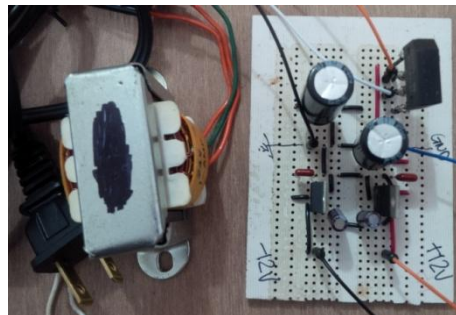
5.3. FUENTE DE ALIMENTACIÓN SIMÉTRICA DE 12 V.

Se construyó una fuente de alimentación de ± 12 V para el suministro de voltaje para cada esquema de protección.

En la figura 5.2 se muestra el diagrama empleado para la fuente de ± 12 V, y una imagen de la misma.



(a) Diagrama de fuente de ± 12 V.



(b) Imagen de fuente de ± 12 V.

Figura 5.2. Fuente de ± 12 V.

5.4. DISEÑO DE ESQUEMA DE PROTECCIÓN ANSI 87 G.

Como punto de partida, se estableció un diagrama de bloques (que se muestra en la figura 1.1 del capítulo 1) para definir las etapas adecuadas para el esquema de protección diferencial para generador síncrono, con sustentos en la electrónica analógica.

La señal de corriente de entrada para esta protección se toma mediante transformadores de corriente tipo dona (figura 5.3).

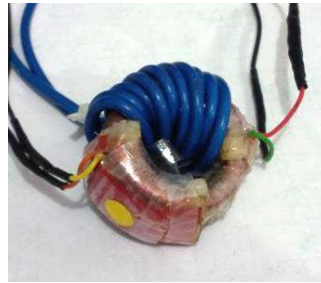


Figura 5.3. Transformador de corriente tipo dona.

La relación de transformación de un TC es la relación entre la corriente primaria y la corriente secundaria. En este caso se comprueba la relación de cada transformador de corriente mediante el siguiente procedimiento: se aplica una corriente de 5 A con un Variac en el primario del TC, mientras que en uno de los secundarios del mismo se conecta un resistor de $10\ \Omega$ (figura 5.4), en el cual se mide la caída de tensión (en este caso fue de 88 mV), y mediante la ley de Ohm se obtiene la corriente en el secundario del TC.

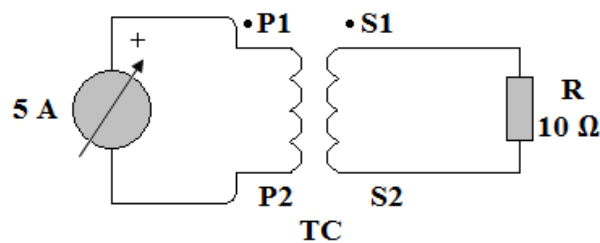


Figura 5.4. Conexión de R a secundario del TC.

Calculando la corriente en el secundario del TC:

$$I_{\text{sec}} = \frac{V_R}{R} = \frac{88\text{mV}}{10\Omega} = 8.8\text{mA}$$

Calculando relación de transformación del TC:

$$\text{Relación de transformación} = \frac{I_{\text{prim}}}{I_{\text{sec}}} = \frac{5\text{A}}{8.8\text{mA}} = 568.1818$$

Por consiguiente, para este caso se tiene una relación de transformación de 568.1818:1, la cual podemos expresar como 500:1.

Es conveniente determinar la polaridad del TC para que nos permita la buena operación de los equipos de protección. Una opción para realizar la prueba de polaridad de los TC's es (figura 5.5): conectando un resistor en serie con el primario y conectando un resistor en paralelo con el secundario del TC, posteriormente se aplica una corriente en el primario del TC, y con ayuda del osciloscopio se observan las señales de voltaje en cada resistor para finalmente asignar a cada TC su nomenclatura correspondiente, ya sea fase o neutro.

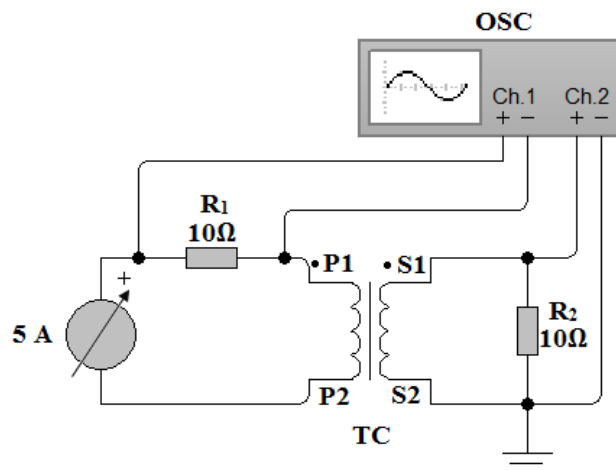


Figura 5.5. Prueba de polaridad del TC.

Las etapas que constituyen este esquema trifásico son: seis amplificadores sumadores, seis rectificadores de onda completa, tres rectificadores de precisión filtrado, tres comparadores de nivel mínimo de operación y tres comparadores. En la figura 5.6 se muestra el circuito diseñado correspondiente para una fase del esquema de protección diferencial para generador síncrono con circuitos integrados analógicos (amplificadores operacionales) y digitales con tecnología CMOS.

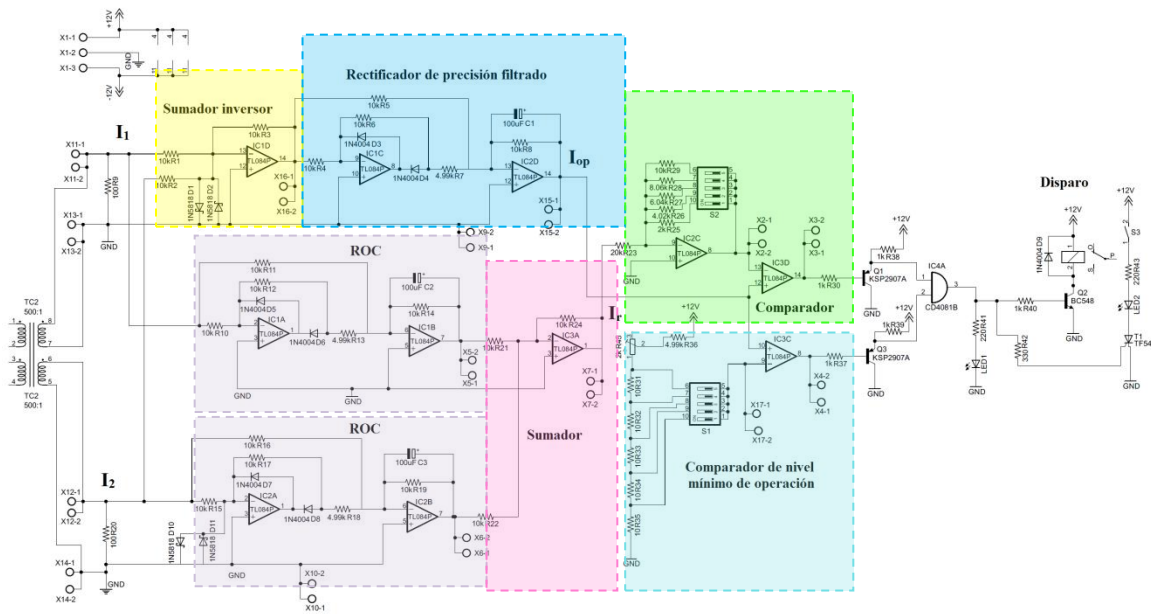


Figura 5.6. Diseño de una fase del esquema de protección diferencial para generador síncrono.

A continuación se detalla cada una de las etapas.

Sumador inversor (figura 5.7). Para este caso se tiene un amplificador sumador de dos entradas, con ganancia igual a 1 (por ser constituido por resistores de igual valor), cuyo propósito es realizar la adición de las corrientes de entrada I_1 e I_2 proporcionadas por los TC's, entregando en su salida una señal I_3 desfasada 180° por utilizarse la configuración inversora.

Realizando el cálculo de la ganancia del circuito de la figura 5.7:

$$A = \frac{R_3}{R_1} = \frac{10K\Omega}{10K\Omega} = 1 \quad ; \quad A = \frac{R_3}{R_2} = \frac{10K\Omega}{10K\Omega} = 1 \quad (5.1)$$

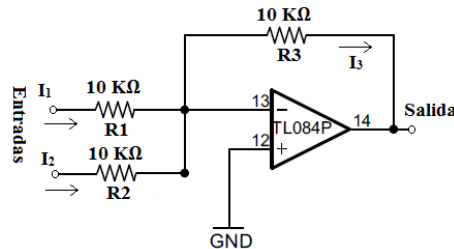


Figura.5.7. Sumador inversor.

Rectificador de precisión filtrado y rectificador de onda completa (figura 5.8). Después de haber sumado las señales de entrada, el resultado de esta adición I_3 pasa a ser rectificadas en un rectificador de precisión filtrado. A su vez las señales I_1 e I_2 se rectifican por separado en un ROC cada una. En la figura 5.9 se muestran las formas de onda obtenidas para esta etapa; se realizó una prueba aplicando con un generador de funciones una señal senoidal de $2 V_{p-p}$ a la entrada del circuito (figura 5.8), teniendo dos casos: sin conectar el C_1 (a) y conectando el C_1 (b) al circuito. Los valores obtenidos en la salida para el caso en que no se emplea el C_1 son: $V_{CD} = 658 \text{ mV}$, $V_{rms} = 730 \text{ mV}$, $V_{p-p} = 1.2 \text{ V}$; y los valores obtenidos en la salida para el caso en que si se utiliza el C_1 son: $V_{CD} = 628 \text{ mV}$, $V_{rms} = 636 \text{ mV}$.

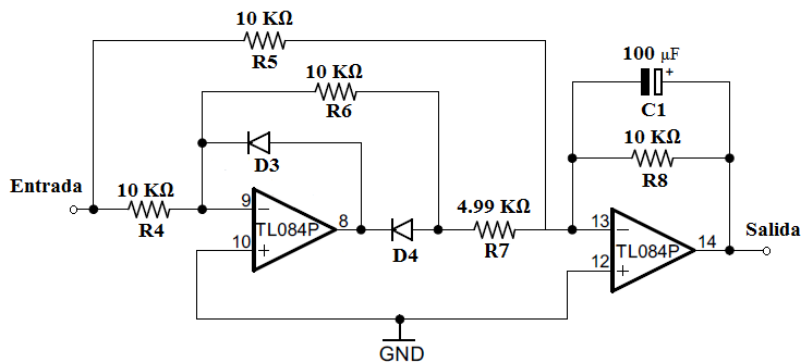
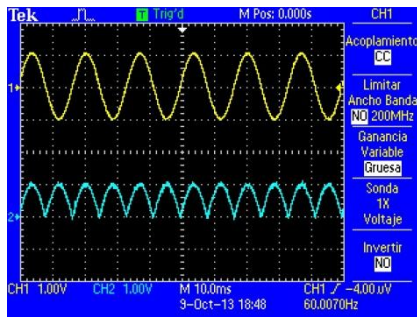
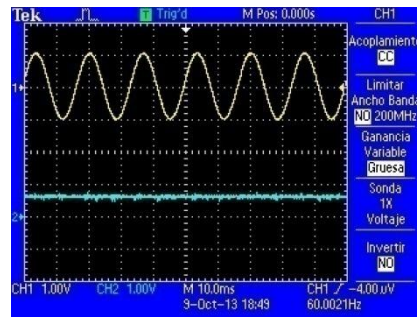


Figura 5.8. Rectificador de onda completa.



(a) Señal de entrada (amarillo) y señal de salida (verde).



(b) Señal de entrada (amarillo) y señal de salida (verde).

Figura 5.9. Formas de onda en la salida del ROC.

Al contar con las señales ya rectificadas se procede a sumar estas señales mediante un sumador inversor con la misma configuración que el de la figura 5.7. A continuación se muestran en la figura 5.10 los resultados obtenidos al realizarse una prueba, al sumar las señales provenientes de los rectificadores de onda completa sin conectar el capacitor, esto con la finalidad de apreciar las formas de onda. En color amarillo se muestra la señal de entrada con $V_{p-p} = 2\text{ V}$, $V_{rms} = 700\text{ mV}$ y $V_{medio} = 40.4\text{ mV}$; en colores azul y rosa se presentan las dos señales de entrada al sumador cada una con $V_{p-p} = 1.28\text{ V}$, $V_{rms} = 712\text{ mV}$ y $V_{medio} = 628\text{ mV}$; finalmente en color verde se presenta la forma de onda a la salida del sumador.

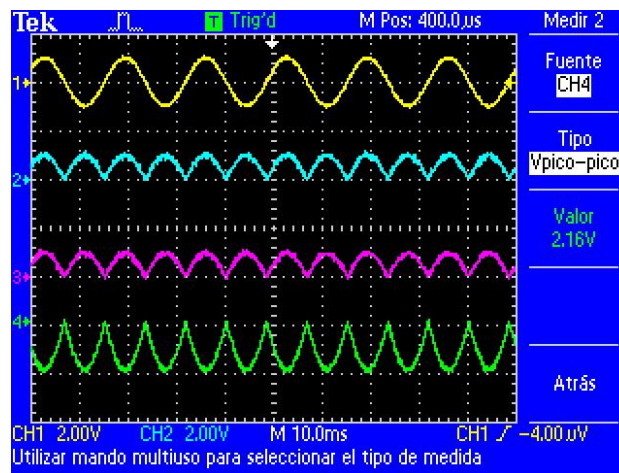










Figura 5.10. Forma de onda en la salida del sumador.

Enseguida se muestra la lista de componentes empleado para la construcción de las tres tarjetas pcb que conforman el esquema de protección diferencial trifásico implementado.

Cantidad	Componente	Descripción	Figura
6	Transformador de Corriente.	TC tipo dona relación 500:1.	
9	Terminal para circuito impreso.	Terminal chica con dos tornillos para circuito impreso.	
9	Terminal para circuito impreso.	Terminal grande con dos tornillos para circuito impreso.	
3	Circuito integrado CD4081.	Compuerta lógica AND CMOS (cuádruple).	
9	Circuito integrado TL084.	Amplificador operacional (cuádruple).	
3	Potenciómetro (trimpot).	Resistor variable de 2 K Ω / ½ Watt.	
15	Resistor.	Resistor de película metálica - a través de orificio, de 10 Ω / 1% de exactitud / ½ Watt.	
6		Resistor de película metálica - a través de orificio, de 100 Ω / 1% de exactitud / ½ Watt.	
6		Resistor de película metálica - a través de orificio, de 220 Ω / 1% de exactitud / ½ Watt.	
3		Resistor de película metálica - a	

		través de orificio, de 330Ω / 1% de exactitud / $\frac{1}{2}$ Watt.	
15		Resistor de película metálica - a través de orificio, de $1 \text{ K}\Omega$ / 1% de exactitud / $\frac{1}{2}$ Watt.	
3		Resistor de película metálica - a través de orificio, de $2 \text{ K}\Omega$ / 1% de exactitud / $\frac{1}{2}$ Watt.	
3		Resistor de película metálica - a través de orificio, de $4.02 \text{ K}\Omega$ / 1% de exactitud / $\frac{1}{2}$ Watt.	
12		Resistor de película metálica - a través de orificio, de $4.99 \text{ K}\Omega$ / 1% de exactitud / $\frac{1}{2}$ Watt.	
3		Resistor de película metálica - a través de orificio, de $6.04 \text{ K}\Omega$ / 1% de exactitud / $\frac{1}{2}$ Watt.	
3		Resistor de película metálica - a través de orificio, de $8.06 \text{ K}\Omega$ / 1% de exactitud / $\frac{1}{2}$ Watt.	
57		Resistor de película metálica - a través de orificio, de $10 \text{ K}\Omega$ / 1% de exactitud / $\frac{1}{2}$ Watt.	
3		Resistor de película metálica - a través de orificio, de $20 \text{ K}\Omega$ / 1% de exactitud / $\frac{1}{2}$ Watt.	
9	Capacitor.	Capacitor electrolítico de $100 \mu\text{f}$ / 25 Volts.	









6	Transistor.	Transistor BJT PNP KSP2907A.	
3	Transistor.	Transistor BJT NPN BC548.	
3	SCR.	Rectificador controlado de silicio TF541.	
2	Diodo.	Diodo Schottky 1N5818.	
22	Diodo.	Diodo rectificador 1N4004.	
3	Relevador.	Relevador compacto de 1 polo, 2 tiros (SPDT) y bobina de 12 VCC.	
9	Header.	Tira doble de 5 pines por lado, para circuito impreso.	
3		Tira doble de 10 pines por lado, para circuito impreso.	

Tabla 5.1. Lista de componentes de tarjetas pcb del esquema de protección diferencial.

A continuación se presenta el listado de componentes empleado para la construcción de la tarjeta de circuito impreso para la carátula frontal, complementaria al esquema de protección diferencial.

Cantidad	Componente	Descripción	Figura
6	Dip switch	Interruptor de paquete en línea dual de 5 posiciones.	






3	LED.	Diodo emisor de luz de 5 mm, color rojo.	
3	LED.	Diodo emisor de luz transparente de 5 mm, emite luz azul.	
3	Interruptor.	Interruptor de pulsador miniatura, normalmente cerrado.	
32	Terminal.	Terminal.	
9	Header.	Tira doble de 5 pines por lado, para circuito impreso, ángulo recto.	
3		Tira doble de 10 pines por lado, para circuito impreso, ángulo recto.	

Tabla 5.2. Lista de componentes de tarjeta pcb para carátula frontal del esquema de protección diferencial.

A continuación en la figura 5.11 se presentan las pcb's diseñadas para una de las fases de este esquema de protección diferencial del generador y para la carátula frontal del mismo.

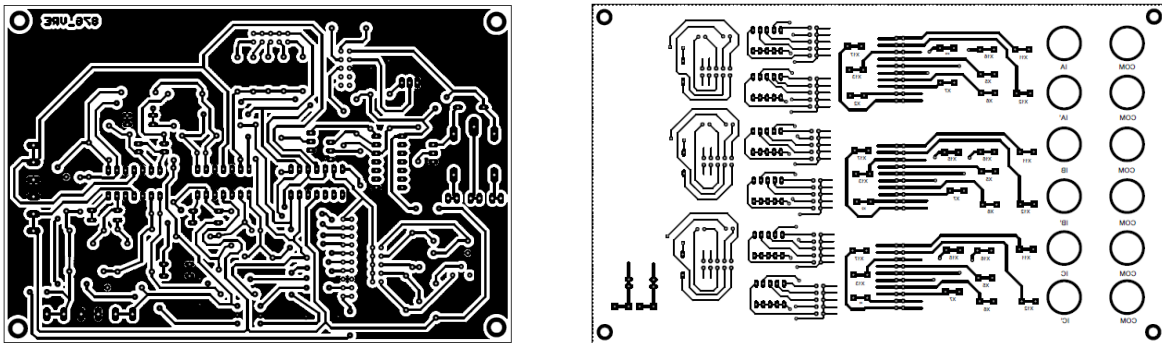
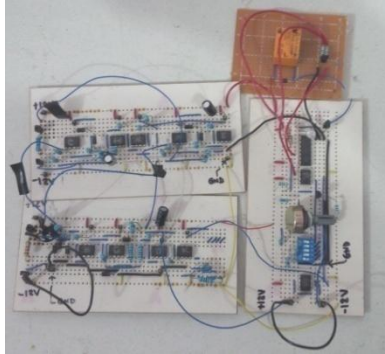


Figura 5.11. Pcb's (a) de tarjeta de una fase de la protección diferencial de generador, (b) de carátula frontal de la misma.

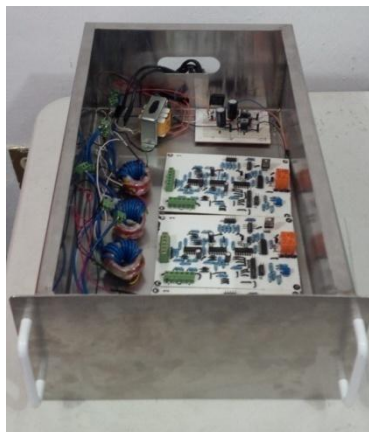
La figura 5.12 presenta el proceso de la elaboración del esquema de protección diferencial para el desarrollo de las prácticas de laboratorio.



a) Circuito construido con tablillas perforadas.



b) Circuito elaborado en PCB en caja de madera



c) Circuito elaborado en PCB's en cajón de acero inoxidable

Figura 5.12. Esquema de protección diferencial para generador síncrono.

5.5. DISEÑO DE ESQUEMA DE PROTECCIÓN ANSI 24.

Para la elaboración del presente esquema de protección, se estableció un diagrama de bloques (expuesto en la figura 1.2 del capítulo 1) en donde se consideraron las etapas adecuadas para diseñar el esquema de protección de sobreexcitación, basados en electrónica analógica.

Las etapas que constituyen este esquema son: un convertidor de voltaje a corriente, un comparador con su ajuste correspondiente, un temporizador.

En la figura 5.12 se muestra el diseño del circuito correspondiente para el esquema de protección de sobreexcitación para generador síncrono con circuitos integrados analógicos (amplificadores operacionales) y digitales con tecnología CMOS.

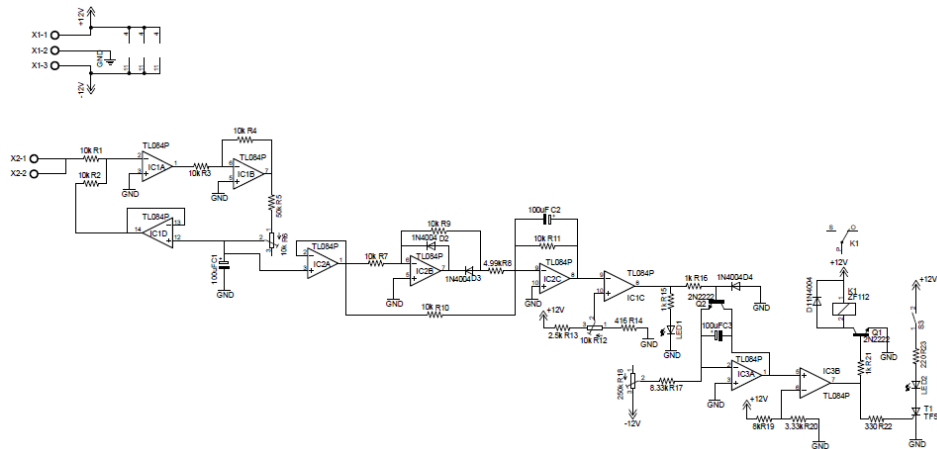


Figura 5.13. Diseño de esquema de protección de sobreexcitación.

En la figura 5.14 se presenta la PCB construida para este esquema.

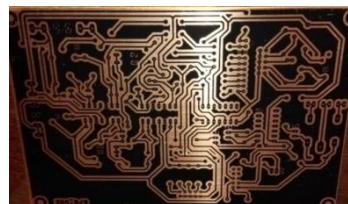


Figura 5.14. PCB de esquema de protección de sobreexcitación.

La figura 5.15 presenta el esquema de protección de sobreexcitación para el desarrollo de las prácticas de laboratorio.

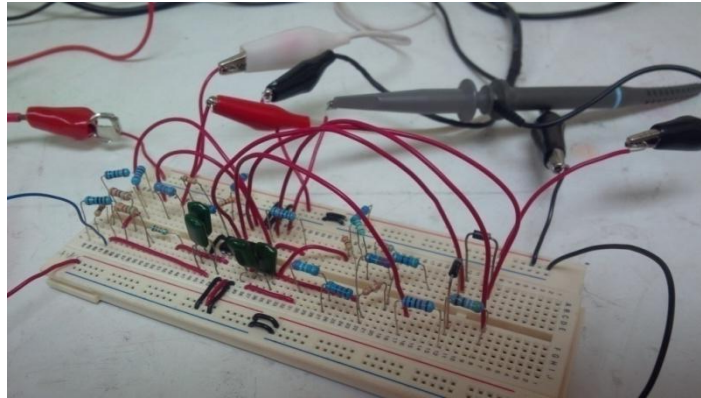


Figura 5.15. Esquema de protección de sobreexcitación.

5.6. DISEÑO DE ESQUEMA DE PROTECCIÓN ANSI 64 G.

Para este esquema, se estableció un diagrama de bloques (que se muestra en la figura 1.3 del capítulo 1) para definir las etapas adecuadas para diseñar el esquema de protección de falla a tierra en el estator para generador síncrono, con sustentos en la electrónica analógica.

Las etapas que constituyen este esquema son: dos filtros pasa banda configurados a 60 Hz y 180 Hz, dos convertidores de ca/cd, dos comparadores con su correspondiente ajuste, supervisión de voltaje de generador y dos temporizadores.

En la figura 5.16 se muestra el diseño del circuito correspondiente para el esquema de protección de falla a tierra en el estator para generador síncro con circuitos integrados analógicos (amplificadores operacionales) y digitales con tecnología CMOS.

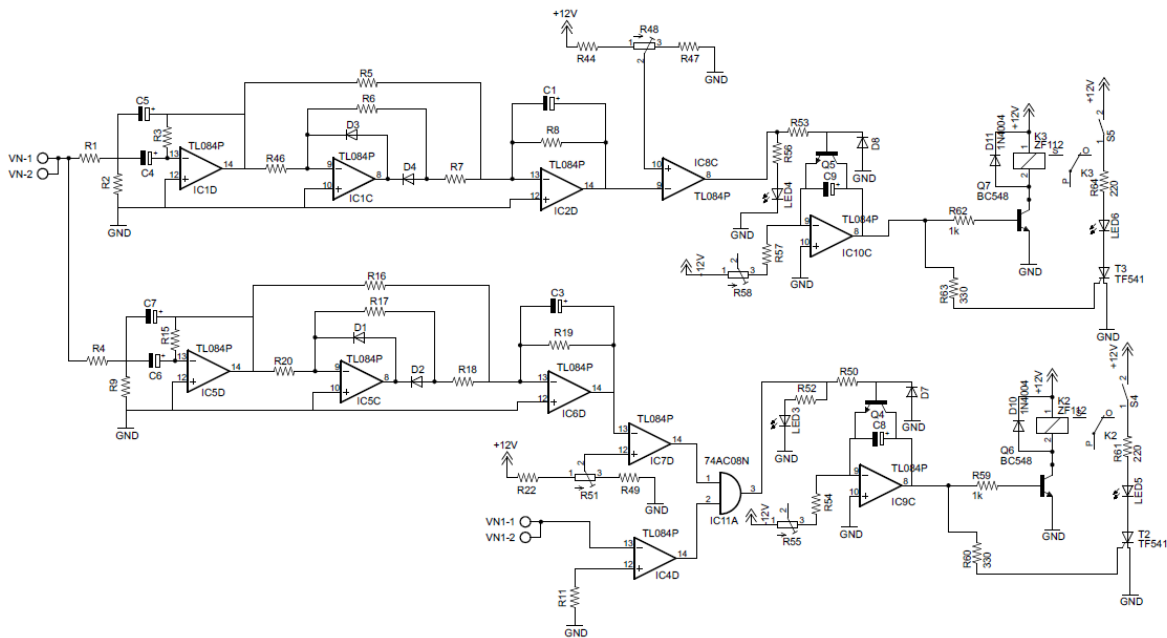


Figura 5.16. Diseño de esquema de protección de falla a tierra en el estator.

En la figura 5.17 se presenta la PCB construida para este esquema.

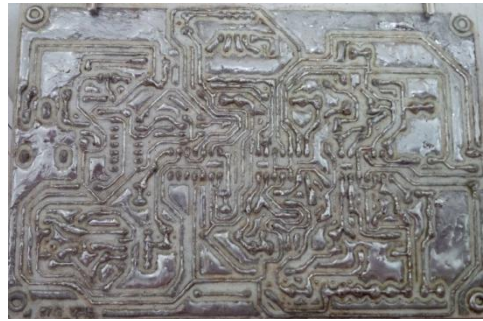


Figura 5.17. PCB de esquema de protección de falla a tierra en el estator.

La figura 5.18 presenta el esquema de protección de falla a tierra en el estator para el desarrollo de las prácticas de laboratorio.

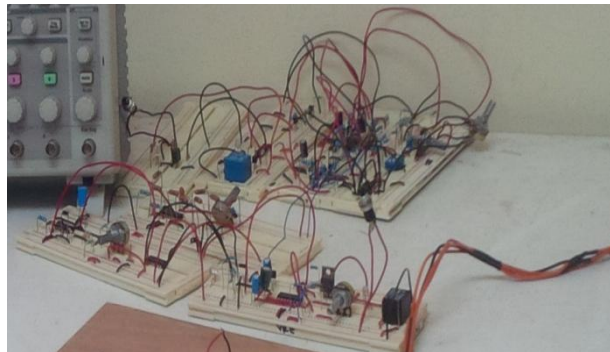


Figura 5.18. Esquema de protección de falla a tierra en el estator.

Capítulo

6

Conclusiones y recomendaciones

En este último capítulo se plasman las conclusiones obtenidas de la realización del presente proyecto de tesis y muestran recomendaciones para trabajos futuros.

6.1. CONCLUSIONES

Una vez culminado el proyecto de tesis “Implementación analógica de relevadores de protección para generador síncrono” es posible concluir que:

Los esquemas de protección diferencial, de sobreexcitación y de falla a tierra en el estator para generadores síncronos construidos, representan para los alumnos de maestría en ingeniería eléctrica del ITCM nuevas herramientas para complementar los conocimientos teóricos adquiridos de una manera práctica.

Se han elaborado prácticas con los tres relevadores de protección utilizando el equipo de LabVolt motor–generador y se han simulado los diferentes tipos de fallas y condiciones anormales para verificar la funcionalidad de los prototipos desarrollados y que se comprenda en forma práctica el funcionamiento de los mismos.

Además se verificaron las especificaciones de los relevadores diseñados con equipo de prueba certificado para verificar la calibración de los mismos, así como la tolerancia de diseño.

6.2. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.

Un tópico de interés es la simulación digital de los relevadores de protección para generadores síncronos.

Como extensión del presente proyecto de investigación se tiene la elaboración del diseño de un relevador de protección digital.

Referencias

- [1] Chapman, Stephen J. “Máquinas Eléctricas”, Ed. McGraw-Hill, Tercera Edición, 2000.
- [2] Durón M. J.J. “Curso de protecciones de generadores”, Centro de capacitación de Occidente.
- [3] Lewis Blackburn J., J. Domin Thomas. “Protective relaying principles and applications”, Third Edition, 2006.
- [4] Mozina Charles J. and Gardell Jonathan D. “IEEE tutorial on the protection of synchronous generators”, *Fundamentals*, Special Publication of the IEEE Power System Relaying Committee, Second Edition, 2011.
- [5] Ramírez Castaño Samuel. “*Protección de Sistemas Eléctricos*”, 1ª Edición, 2003.
- [6] “Ajustes de protecciones eléctricas de las unidades generadoras, transformadores de unidad e interruptores de potencia”, Procedimiento CFE G0100-07, 2011.
- [7] Franco Sergio. “Diseño con amplificadores operacionales y circuitos integrados analógicos”, Ed. McGraw-Hill, Tercera Edición, 2005.
- [8] Russell Mason C. “The art and science of protective relaying”, <http://www.gedigitalenergy.com/Multilin/notes/artsci/index.htm>, consultado el 10 de Septiembre de 2014.
- [9] NRF-027-CFE-2010, “Transformadores de corriente para sistemas con tensiones nominales de 0.6 kV a 400 kV”, México, DOF, 2011.
- [10] NRF-026-CFE-2004, “Transformadores de potencial inductivos para sistemas con tensiones nominales de 13,8 kV a 400 kV”, México, DOF, 2005.
- [11] Cortés Jesús, “Introducción a los relevadores digitales”, 2011.
Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/51572240/Introduccion-a-los-relevadores-digitales>
[Consulta: Lunes, 01 de Diciembre de 2014].

Apéndice

A

Pruebas de prototipos desarrollados

En la presente sección se muestran los resultados de las pruebas realizadas con el equipo OMICRON CMC 256-6.

1. Resultados de las pruebas con equipo OMICRON de la protección diferencial del generador.



Módulo de prueba

Nombre: OMICRON QuickCMC Versión: 2.40 SR 1

Dispositivo: Relé de protección diferencial de generador.

Valores nominales:

f nom:	60.00 Hz	Número de fases:	3
V nom (secundario):	120.0 V	V primario:	110.0 kV
I nom (secundario):	5.000 A	I primario:	1.000 kA

ARRANQUE LADO I1

Resultados de la prueba

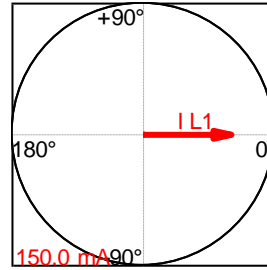
Título: AJUSTE A 0.1 A LADO I1

Cálculo de falta:

Modo de entrada en tabla	Parámetros (Todos los valores son secundarios)			
Directo	I L1	101.0 mA	0.00 °	60.000 Hz
	I L2	0.000 A	-120.00 °	60.000 Hz
	I L3	0.000 A	120.00 °	60.000 Hz

Ajustes del generador

I L1	0.101A	0.00°
I L2	0.000A	-120.00°
I L3	0.000A	120.00°
I(2)-1	0.000A	0.00°
I(2)-2	0.000A	-120.00°
I(2)-3	0.000A	120.00°



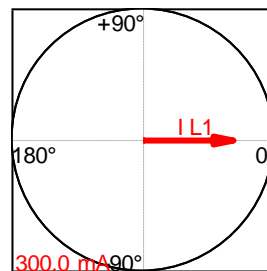
Título: AJUSTE A 0.2 A LADO I1

Cálculo de falta:

Modo de entrada en tabla	Parámetros (Todos los valores son secundarios)			
Directo	I L1	205.0 mA	0.00 °	60.000 Hz
	I L2	0.000 A	-120.00 °	60.000 Hz
	I L3	0.000 A	120.00 °	60.000 Hz

Ajustes del generador

I L1	0.205A	0.00°
I L2	0.000A	-120.00°
I L3	0.000A	120.00°
I(2)-1	0.000A	0.00°
I(2)-2	0.000A	-120.00°
I(2)-3	0.000A	120.00°



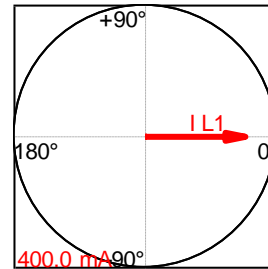
Título: AJUSTE A 0.3 A LADO I1

Cálculo de falta:

Modo de entrada en tabla	Parámetros (Todos los valores son secundarios)			
Directo	I L1	307.0 mA	0.00 °	60.000 Hz
	I L2	0.000 A	-120.00 °	60.000 Hz
	I L3	0.000 A	120.00 °	60.000 Hz

Ajustes del generador

I L1	0.307A	0.00°
I L2	0.000A	-120.00°
I L3	0.000A	120.00°
I(2)-1	0.000A	0.00°
I(2)-2	0.000A	-120.00°
I(2)-3	0.000A	120.00°



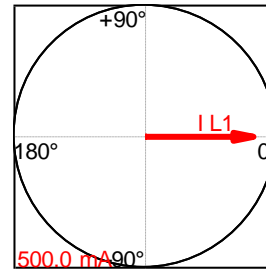
Título: AJUSTE A 0.4 A LADO I1

Cálculo de falta:

Modo de entrada en tabla	Parámetros (Todos los valores son secundarios)			
Directo	I L1	411.0 mA	0.00 °	60.000 Hz
	I L2	0.000 A	-120.00 °	60.000 Hz
	I L3	0.000 A	120.00 °	60.000 Hz

Ajustes del generador

I L1	0.411A	0.00°
I L2	0.000A	-120.00°
I L3	0.000A	120.00°
I(2)-1	0.000A	0.00°
I(2)-2	0.000A	-120.00°
I(2)-3	0.000A	120.00°



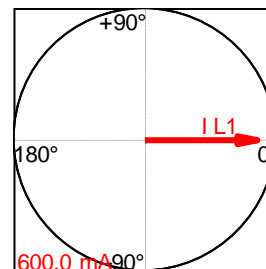
Título: AJUSTE A 0.5 A LADO I1

Cálculo de falta:

Modo de entrada en tabla	Parámetros (Todos los valores son secundarios)			
Directo	I L1	514.0 mA	0.00 °	60.000 Hz
	I L2	0.000 A	-120.00 °	60.000 Hz
	I L3	0.000 A	120.00 °	60.000 Hz

Ajustes del generador

I L1	0.514A	0.00°
I L2	0.000A	-120.00°
I L3	0.000A	120.00°
I(2)-1	0.000A	0.00°
I(2)-2	0.000A	-120.00°
I(2)-3	0.000A	120.00°



Resumen

5 pruebas correctas, 0 pruebas incorrectas, 0 pruebas no 100.00% correcto evaluadas

Prueba correcta

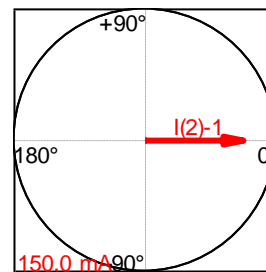
Título: AJUSTE A 0.1 A LADO I2

Cálculo de falta:

Modo de entrada en tabla	Parámetros (Todos los valores son secundarios)			
Directo	I L1	0.000 A	0.00 °	60.000 Hz
	I L2	0.000 A	-120.00 °	60.000 Hz
	I L3	0.000 A	120.00 °	60.000 Hz

Ajustes del generador

I L1	0.000A	0.00°
I L2	0.000A	-120.00°
I L3	0.000A	120.00°
I(2)-1	0.112A	0.00°
I(2)-2	0.000A	-120.00°
I(2)-3	0.000A	120.00°



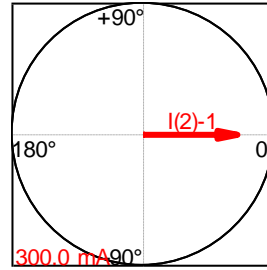
Título: AJUSTE A 0.2 A LADO I2

Cálculo de falta:

Modo de entrada en tabla	Parámetros (Todos los valores son secundarios)			
Directo	I L1	0.000 A	0.00 °	60.000 Hz
	I L2	0.000 A	-120.00 °	60.000 Hz
	I L3	0.000 A	120.00 °	60.000 Hz

Ajustes del generador

I L1	0.000A	0.00°
I L2	0.000A	-120.00°
I L3	0.000A	120.00°
I(2)-1	0.216A	0.00°
I(2)-2	0.000A	-120.00°
I(2)-3	0.000A	120.00°



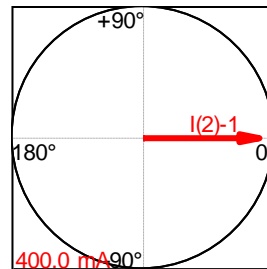
Título: AJUSTE A 0.3 A LADO I2

Cálculo de falta:

Modo de entrada en tabla	Parámetros (Todos los valores son secundarios)			
Directo	I L1	0.000 A	0.00 °	60.000 Hz
	I L2	0.000 A	-120.00 °	60.000 Hz
	I L3	0.000 A	120.00 °	60.000 Hz

Ajustes del generador

I L1	0.000A	0.00°
I L2	0.000A	-120.00°
I L3	0.000A	120.00°
I(2)-1	0.355A	0.00°
I(2)-2	0.000A	-120.00°
I(2)-3	0.000A	120.00°



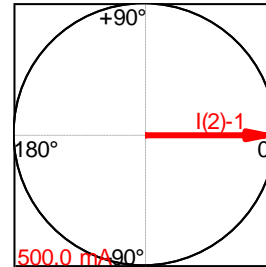
Título: AJUSTE A 0.4 A LADO I2

Cálculo de falta:

Modo de entrada en tabla	Parámetros (Todos los valores son secundarios)			
Directo	I L1	0.000 A	0.00 °	60.000 Hz
	I L2	0.000 A	-120.00 °	60.000 Hz
	I L3	0.000 A	120.00 °	60.000 Hz

Ajustes del generador

I L1	0.000A	0.00°
I L2	0.000A	-120.00°
I L3	0.000A	120.00°
I(2)-1	0.460A	0.00°
I(2)-2	0.000A	-120.00°
I(2)-3	0.000A	120.00°



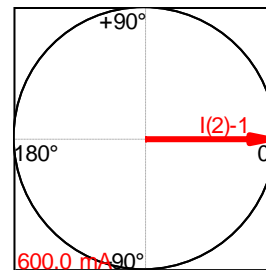
Título: AJUSTE A 0.5 A LADO I2

Cálculo de falta:

Modo de entrada en tabla	Parámetros (Todos los valores son secundarios)			
Directo	I L1	0.000 A	0.00 °	60.000 Hz
	I L2	0.000 A	-120.00 °	60.000 Hz
	I L3	0.000 A	120.00 °	60.000 Hz

Ajustes del generador

I L1	0.000A	0.00°
I L2	0.000A	-120.00°
I L3	0.000A	120.00°



I(2)-1	0.567A	0.00°
I(2)-2	0.000A	-120.00°
I(2)-3	0.000A	120.00°

Resumen

5 pruebas correctas, 0 pruebas incorrectas, 0 pruebas no evaluadas

Prueba correcta

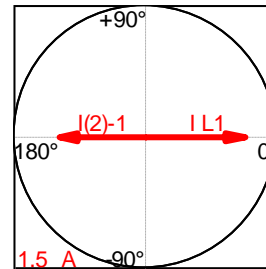
Título: pendiente AJUSTE 0.1 LADO I1 vs LADO I2

Cálculo de falta:

Modo de entrada en tabla	Parámetros (Todos los valores son secundarios)			
Directo	I L1	1.150 A	0.00 °	60.000 Hz
	I L2	0.000 A	-120.00 °	60.000 Hz
	I L3	0.000 A	120.00 °	60.000 Hz

Ajustes del generador

I L1	1.150A	0.00°
I L2	0.000A	-120.00°
I L3	0.000A	120.00°
I(2)-1	1.000A	180.00°
I(2)-2	0.000A	-120.00°
I(2)-3	0.000A	120.00°



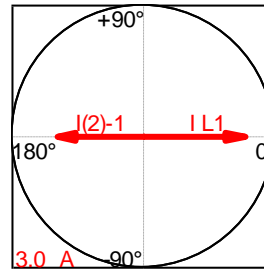
Título: pendiente AJUSTE 0.1 LADO I1 vs LADO I2 2.0 amper

Cálculo de falta:

Modo de entrada en tabla	Parámetros (Todos los valores son secundarios)			
Directo	I L1	2.351 A	0.00 °	60.000 Hz
	I L2	0.000 A	-120.00 °	60.000 Hz
	I L3	0.000 A	120.00 °	60.000 Hz

Ajustes del generador

I L1	2.351A	0.00°
I L2	0.000A	-120.00°
I L3	0.000A	120.00°
I(2)-1	2.000A	180.00°
I(2)-2	0.000A	-120.00°
I(2)-3	0.000A	120.00°



Resumen

2 pruebas correctas, 0 pruebas incorrectas, 0 pruebas no evaluadas

Prueba correcta

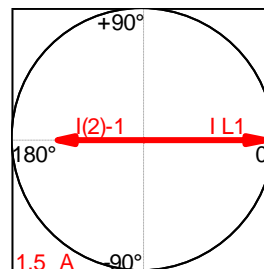
Título: pendiente AJUSTE 0.2 LADO I1 vs LADO I2 1.0 amper

Cálculo de falta:

Modo de entrada en tabla	Parámetros (Todos los valores son secundarios)			
Directo	I L1	1.409 A	0.00 °	60.000 Hz
	I L2	0.000 A	-120.00 °	60.000 Hz
	I L3	0.000 A	120.00 °	60.000 Hz

Ajustes del generador

I L1	1.409A	0.00°
I L2	0.000A	-120.00°
I L3	0.000A	120.00°
I(2)-1	1.000A	180.00°
I(2)-2	0.000A	-120.00°
I(2)-3	0.000A	120.00°



Resumen

1 pruebas correctas, 0 pruebas incorrectas, 0 pruebas no evaluadas

Prueba correcta

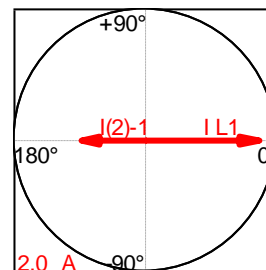
Título: pendiente AJUSTE 0.3 LADO I1 vs LADO I2 1.0 amper

Cálculo de falta:

Modo de entrada en tabla	Parámetros (Todos los valores son secundarios)			
Directo	I L1	1.741 A	0.00 °	60.000 Hz
	I L2	0.000 A	-120.00 °	60.000 Hz
	I L3	0.000 A	120.00 °	60.000 Hz

Ajustes del generador

I L1	1.741A	0.00°
I L2	0.000A	-120.00°
I L3	0.000A	120.00°
I(2)-1	1.000A	180.00°
I(2)-2	0.000A	-120.00°
I(2)-3	0.000A	120.00°



Resumen

1 pruebas correctas, 0 pruebas incorrectas, 0 pruebas no evaluadas

Prueba correcta

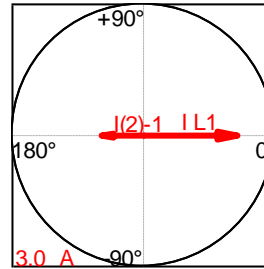
Título: pendiente AJUSTE 0.4 LADO I1 vs LADO I2 1.0 amper

Cálculo de falta:

Modo de entrada en tabla	Parámetros (Todos los valores son secundarios)			
Directo	I L1	2.180 A	0.00 °	60.000 Hz
	I L2	0.000 A	-120.00 °	60.000 Hz
	I L3	0.000 A	120.00 °	60.000 Hz

Ajustes del generador

I L1	2.180A	0.00°
I L2	0.000A	-120.00°
I L3	0.000A	120.00°
I(2)-1	1.000A	180.00°
I(2)-2	0.000A	-120.00°
I(2)-3	0.000A	120.00°



Resumen

1 pruebas correctas, 0 pruebas incorrectas, 0 pruebas no evaluadas

Prueba correcta

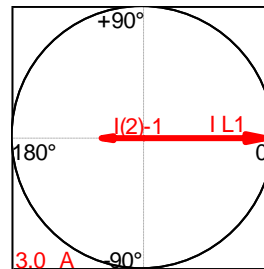
Título: pendiente AJUSTE 0.5 LADO I1 vs LADO I2 1.0 amper

Cálculo de falta:

Modo de entrada en tabla	Parámetros (Todos los valores son secundarios)			
Directo	I L1	2.783 A	0.00 °	60.000 Hz
	I L2	0.000 A	-120.00 °	60.000 Hz
	I L3	0.000 A	120.00 °	60.000 Hz

Ajustes del generador

I L1	2.783A	0.00°
I L2	0.000A	-120.00°
I L3	0.000A	120.00°
I(2)-1	1.000A	180.00°
I(2)-2	0.000A	-120.00°
I(2)-3	0.000A	120.00°



Resumen

1 pruebas correctas, 0 pruebas incorrectas, 0 pruebas no evaluadas

Prueba correcta

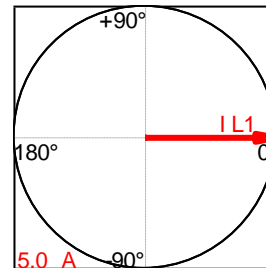
Título: PRUEBA DE TIEMPO

Cálculo de falta:

Modo de entrada en tabla	Parámetros (Todos los valores son secundarios)			
Directo	I L1	5.000 A	0.00 °	60.000 Hz
	I L2	0.000 A	-120.00 °	60.000 Hz
	I L3	0.000 A	120.00 °	60.000 Hz

Ajustes del generador

I L1	5.000A	0.00°
I L2	0.000A	-120.00°
I L3	0.000A	120.00°
I(2)-1	0.000A	180.00°
I(2)-2	0.000A	-120.00°
I(2)-3	0.000A	120.00°



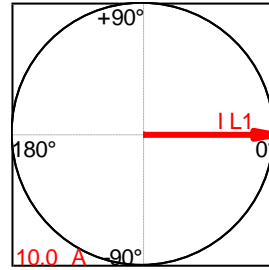
Título: PRUEBA N° 2 DE TIEMPO

Cálculo de falta:

Modo de entrada en tabla	Parámetros (Todos los valores son secundarios)			
Directo	I L1	10.00 A	0.00 °	60.000 Hz
	I L2	0.000 A	-120.00 °	60.000 Hz
	I L3	0.000 A	120.00 °	60.000 Hz

Ajustes del generador

I L1	10.000A	0.00°
I L2	0.000A	-120.00°
I L3	0.000A	120.00°
I(2)-1	0.000A	180.00°
I(2)-2	0.000A	-120.00°
I(2)-3	0.000A	120.00°



Resumen

2 pruebas correctas, 0 pruebas incorrectas, 0 pruebas no evaluadas

Prueba correcta