



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

PRUEBAS A INTERRUPTORES DE POTENCIA

Carlos Enrique López Silvestre

Asesorado por el Ing. Rodolfo Ernesto Rodríguez

Guatemala, noviembre de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

PRUEBAS A INTERRUPTORES DE POTENCIA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

CARLOS ENRIQUE LÓPEZ SILVESTRE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Fernando Moscoso Lira
EXAMINADOR	Ing. Juan Fernando Morales Mazariegos
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

PRUEBAS A INTERRUPTORES DE POTENCIA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 17 de octubre de 2007.


Carlos Enrique López Silvestre

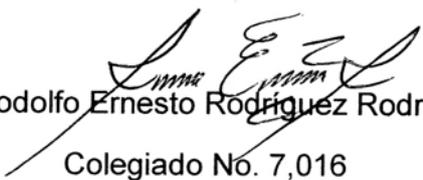
Guatemala, 02 de septiembre de 2008

Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
Coordinador Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería

Señor Coordinador

Por este medio le informo que he asesorado el trabajo de graduación titulado: "**PRUEBAS A INTERRUPTORES DE POTENCIA**", desarrollado por el estudiante **Carlos Enrique López Silvestre**, previo a optar el título de Ingeniero Electricista.

En base a la revisión y corrección de dicho trabajo, considero que ha alcanzado los objetivos propuestos, por lo que el estudiante y el asesor, nos hacemos responsables del contenido de este trabajo.


Ing. Rodolfo Ernesto Rodríguez Rodríguez

Colegiado No. 7,016

Asesor



Guatemala, 21 de OCTUBRE 2008.

FACULTAD DE INGENIERIA

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

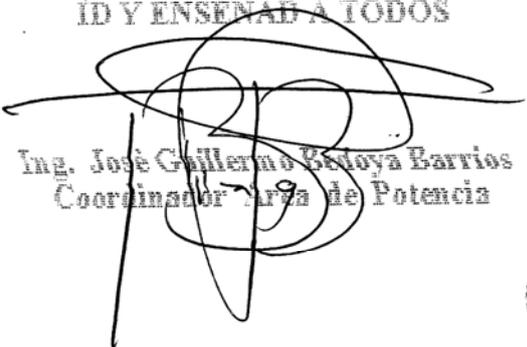
Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
PRUEBAS A INTERRUPTORES DE POTENCIA, del estudiante;
Carlos Enrique López Silvestre, que cumple con los requisitos
establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAR A TODOS


Ing. José Guillermo Belloya Barrios
Coordinador Área de Potencia

JGBB/sro



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Carlos Enrique López Silvestre, titulado: PRUEBAS A INTERRUPTORES DE POTENCIA, procede a la autorización del mismo.

Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
DIRECTOR

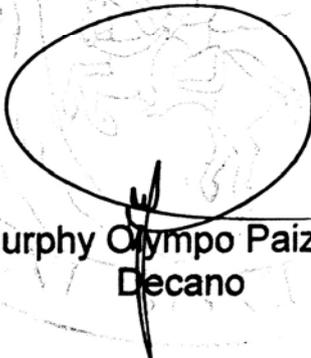


GUATEMALA, 24 DE OCTUBRE 2008.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **PRUEBAS A INTERRUPTORES DE POTENCIA**, presentado por el universitario **Carlos Enrique López Silvestre**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, noviembre de 2008



AGRADECIMIENTOS A:

Dios

Por acompañarme durante todos los días de mi vida, darme las bendiciones y darme fuerzas para alcanzar mis metas.

Mis padres

Carlos Enrique López Camposeco y María Claribel Silvestre Díaz, por su apoyo incondicional, ejemplo, paciencia, cariño y la educación brindada.

Mis Hermanas y sobrinos

Marisol, Karla, Pamela, Karlita y José, por su aprecio y comprensión.

Familia

Mis abuelos, tíos, por su ejemplo de fuerza, dedicación y constancia incansable, sus consejos y cariño, en especial a mi tío Alonzo, por el gran cariño y apoyo sin esperar nunca nada a cambio. Todos mis familiares, por sus palabras de aliento.

Universidad de San Carlos de Guatemala

Por permitirme forjarme como profesional, y a mis demás establecimientos educativos.

Asesor

Ingeniero Rodolfo Ernesto Rodríguez Rodríguez, por su apoyo incondicional en la elaboración de este trabajo de graduación.

Al personal de ETCEE

En especial al personal del laboratorio de pruebas, por permitirme realizar las pruebas de este estudio en sus instalaciones y por la ayuda a la interpretación de los resultados.

Amigos

Mis amigos y compañeros, por toda la ayuda prestada durante mi vida y carrera, que me han ayudado de una u otra forma a lograr mis metas, y de quienes he aprendido que la amistad hay que saberla valorar.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XV
GLOSARIO	XIX
RESUMEN	XXI
OBJETIVOS	XXV
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. INTERRUPTORES DE POTENCIA	1
1.1. Introducción	1
1.1.1. Física del fenómeno del arco	1
1.1.2. Mantenimiento del arco	7
1.1.3. Pérdidas de plasma	8
1.1.4. Propiedades esenciales del arco	8
1.1.5. Teorías de interrupción del arco	11
1.1.5.1. Interrupción de alta resistencia	11
1.1.5.2. Interrupción de baja resistencia	11
1.1.5.2.1. Teoría Slepiana	11
1.1.1.2.2. Teoría del equilibrio de energía	13
1.2. Partes de un interruptor de potencia	14
1.2.1. Descripción	14
1.2.1.1. Sección de potencia eléctrica	15
1.2.1.1.1. Cámara de arco	15
1.2.1.1.2. Resistencias de inserción	15
1.2.1.1.2.1. En la apertura	15

1.2.1.1.2.2. En el cierre	16
1.2.1.1.2.3. Descripción	16
1.2.1.2. Sección de mando	17
1.2.1.2.1. Mando neumático	17
1.2.1.2.2. Mando hidráulico	18
1.2.1.2.3. Mando mecánico	19
1.2.1.3 Control	20
1.3. Parámetros de los interruptores	20
1.3.1. Voltaje nominal	21
1.3.2. Corriente nominal	21
1.3.3. Frecuencia nominal	22
1.3.4. Capacidad nominal de interrupción simétrica y asimétrica	22
1.3.5. Capacidad nominal de restablecimiento	24
1.3.6. Corriente nominal de tiempo corto	25
1.3.7. Servicio nominal de operación	25
1.3.8. Resistencia de contacto	26
1.3.9. Cámaras de extinción del arco	27
1.4. Constantes y condiciones de los circuitos	27
1.4.1. El voltaje después de la corriente cero final	28
1.4.2. Condiciones de severidad	29
1.5. Efecto transitorio del voltaje de restablecimiento	32
1.5.1. Clasificación de los transitorios de restablecimiento	33
1.6. Características del voltaje de restablecimiento	34
1.6.1. Expresiones para el REVR	36
1.6.2. Factores que determinan las características del voltaje de restablecimiento	37
1.7. Interacción entre el interruptor y el circuito	39
1.8. Supresión de la corriente	41
1.9. Funciones del interruptor	42

1.9.1. Interrupción en cortocircuito	43
1.9.2. Interrupción de corrientes inductivas pequeñas	44
1.9.3. Interrupción por capacitores	45
1.9.4. Interrupción asíncrona	47
1.9.5. Interrupción de falla de línea corta	47
2. TIPOS DE INTERRUPTORES DE POTENCIA	49
2.1. De acuerdo a la construcción de su tanque	49
2.1.1. Tanque muerto	49
2.1.2. Tanque vivo	50
2.2. Clasificación de los interruptores, según su forma de extinguir el arco	52
2.2.1. Interruptores de aire	52
2.2.1.1. Métodos para incrementar la resistencia de arco	53
2.2.1.2. Tipos de interruptores en aire	54
2.2.1.2.1 Interrupción simple	54
2.2.1.2.2. Tipo de soplo magnético	55
2.2.1.2.3. Tipo divisor de arco	56
2.2.1.3. Aplicación	57
2.2.1.4. Diseño general	58
2.2.1.4.1. Unidad de polo	58
2.2.1.4.2. Contactos	58
2.2.1.4.2.1. Conjunto móvil de contactos	58
2.2.1.4.2.2. Conjunto fijo de contactos	59
2.2.1.4.3. Chutes de arco	59
2.2.1.4.4. Mecanismos de operación	59
2.2.2. Interruptores de aceite	60

2.2.2.1.	Ruptura del arco en aceite	60
2.2.2.2.	El desarrollo de los interruptores en aceite	61
2.2.2.2.1.	Interruptores de gran volumen de aceite	61
2.2.2.2.2.	Interruptores con control del arco	63
2.2.2.2.3.	Cámaras para el control del arco	64
2.2.2.2.4.	Interruptores de pequeño volumen de aceite	65
2.2.3.	Interruptores neumáticos	68
2.2.3.1.	Métodos de interrupción	68
2.2.3.2.	Principios de operación	70
2.2.3.3.	Factores que influyen en el funcionamiento de los interruptores neumáticos	71
2.2.3.4.	Desarrollo de los interruptores neumáticos	73
2.2.4.	Interruptores en hexafluoruro de azufre	76
2.2.4.1.	Propiedades dieléctricas del SF6	78
2.2.4.2.	Propiedades de enfriamiento del SF6	80
2.2.4.3.	Comportamiento del SF6 en el arco	81
2.2.4.4.	Partes esenciales de un interruptor de SF6	82
2.2.4.4.1.	Tanque	82
2.2.4.4.2.	Unidades interruptoras	82
2.2.4.4.3.	Mecanismos de operación	83
2.2.4.4.4.	Bushings o casquillos	83
2.2.4.4.5.	Sistema de gas	83
2.2.5.	Interruptores en vacío	84
2.2.5.1.	Comportamiento del arco en el vacío	85
2.2.5.2.	Estabilidad del arco en el vacío	87
2.2.5.3.	Interrupción en vacío	88
2.2.4.4.	Corte de corriente	89
2.2.5.5.	Materiales de los contactos	90

2.2.5.6.	Construcción de los interruptores de vacío	91
2.2.5.6.1.	Cámaras de vacío	92
2.2.5.6.2.	Mecanismos de operación	92
2.2.5.7.	Aplicación de los interruptores en vacío	92
2.2.6.	Resumen de los interruptores descritos	93
2.2.6.1.	Interruptores de gran volumen de aceite	93
2.2.6.2.	Interruptores de pequeño volumen de aceite	94
2.2.6.3.	Interruptores neumáticos	95
2.2.6.4.	Interruptores en vacío	96
2.2.6.5.	Interruptores en SF6	97
3.	PRUEBAS A INTERRUPTORES DE POTENCIA	99
3.1.	Pruebas de tiempo a interruptores	100
3.1.1.	Definición	100
3.1.2.	Importancia	100
3.1.3.	Descripción	101
3.1.3.1.	Instalación y conexión	103
3.1.3.1.1.	Reglas generales	103
3.1.3.1.2.	Descripción de la conexión	103
3.1.3.1.2.1.	Conexión a los contactos principales	103
3.1.3.1.2.2.	Conexión a bobinas de mecanismos	105
3.1.3.1.3.	Efecto espejo	106
3.1.3.2.	Adquisición de la información	107
3.1.3.3.	Interpretación de la información	108
3.1.4.	Tiempo de operación de los interruptores	108
3.1.5.	Referencias de tiempo	109

3.1.6. Definiciones de tiempo de acuerdo a la norma internacional IEC 56	110
3.1.6.1. Tiempo de apertura (IEC 55 3.105.32)	110
3.1.6.2. Tiempo de cierre (IEC 56 3.105.35)	111
3.1.6.3. Tiempo de apertura-cierre (IEC 56 3.105.38)	111
3.1.6.4. Tiempo de cierre-apertura (IEC 56 3.105.42)	112
3.1.6.5. Duración mínima de la apertura (IEC 56 3.105.44)	112
3.1.6.6. Duración mínima del cierre (IEC 56 3.105.45)	112
3.1.7. Análisis de la información	114
3.1.7.1. Cuadro de tiempo	114
3.1.7.2. Prioridad	116
3.1.7.2.1. Niveles de prioridad para los tiempos de operación	116
3.1.7.2.1.1. Tiempo de apertura	116
3.1.7.2.1.2. Tiempo de apertura más largo	118
3.1.7.2.1.3. Tiempo de apertura más cortos	118
3.1.7.2.2. Discrepancia en los contactos	119
3.1.7.2.2.1. Discrepancia entre polos	120
3.1.7.2.2.2. Discrepancia entre contactos del mismo polo	121
3.1.7.2.3. Tiempo de cierre	122
3.1.7.2.4. Ciclos de operación	122
3.1.7.2.4.1. Ciclos de cierre-apertura tiempo de corto circuito	123
3.1.7.2.4.2. Recierre-apertura tiempo de aislamiento	123

3.1.8. Resultados de las pruebas de tiempo para interruptores de potencia	124
3.2. Pruebas de desplazamiento de interruptores	137
3.2.1. La curva de desplazamiento	137
3.2.2. La operación de apertura	138
3.2.2.1. Zona A: El comienzo del movimiento	139
3.2.2.2. Zona B: Separación de contactos	140
3.2.2.3. Zona C: Desaceleración	140
3.2.3. Operación de cierre	141
3.2.3.1. Zona A: El comienzo del movimiento	142
3.2.3.2. Zona B: Cierre de los contactos	142
3.2.3.3. Zona C: Desaceleración	143
3.2.4. Curva de velocidad	144
3.2.5. Curva de aceleración	144
3.2.6. Realizando la medición	144
3.2.6.1. El transductor de desplazamiento	145
3.2.6.1.1. Descripción	145
3.2.6.1.2. Operación	147
3.2.6.2. Selección del transductor	147
3.2.6.3. Adquisición y presentación visual de los resultados	149
3.2.6.4. Curva de desplazamiento	151
3.2.6.4.1. Velocidad	152
3.2.6.4.2. Curvas de velocidades instantáneas	152
3.2.6.4.3. Velocidad promedio	153
3.2.6.4.4. Ejemplo de cálculo de la velocidad promedio para una apertura	153
3.2.6.4.5. Ejemplo de cálculo de la velocidad promedio para un cierre	155
3.2.6.5. Precauciones generales	156

3.2.6.5.1. Curvas invertidas	156
3.2.6.5.2. Capacidad del transductor	158
3.2.7. Resultados de la prueba de desplazamiento	158
3.3. Prueba de resistencia de contactos a interruptores	172
3.3.1. Resistencia de contactos	172
3.3.2. Efecto de la resistencia de contactos	173
3.3.3. Elementos que afectan la resistencia de contactos	173
3.3.3.1. Oxidación	173
3.3.3.2. Desgaste de contactos	175
3.3.3.3. Frotamiento	175
3.3.3.4. Fuerza de contacto	176
3.3.3.5. Temperatura	177
3.3.4. Pruebas	177
3.3.4.1. Medición de la resistencia de contactos	177
3.3.4.2. Medición dinámica de la resistencia de contactos	179
3.3.5. Resultados de las pruebas de resistencia de contactos	182
CONCLUSIONES	187
RECOMENDACIONES	189
REFERENCIAS	191
BIBLIOGRAFÍAS	193
ANEXO A	195
ANEXO B	211
ANEXO C	219
ANEXO D	227

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Grados de disociación y de ionización, conductividad térmica y eléctrica en función de la temperatura.	4
2	Conductividad eléctrica vrs. temperatura	5
3	Características estáticas y dinámicas	9
4	Distribución del voltaje a lo largo del arco	10
5	Acumulación de la resistencia dieléctrica y del esfuerzo de voltaje entre los contactos del interruptor	12
6	Partes de un interruptor de potencia	14
7	Cámaras de extinción del arco	17
8	Mando hidráulico de un interruptor de potencia	18
9	Mando mecánico accionado por resortes	19
10	Onda de corriente de cortocircuito	22
11	Componentes del tiempo de operación	28
12	Onda del VTR	29
13	Efecto del fp sobre el voltaje de recuperación	30
14	Voltaje de recuperación de la primera fase	31
15	Efecto de la asimetría de corriente	32
16	Tensión durante el proceso de interrupción	37
17	Formas de la onda de voltaje de restablecimiento	38
18	Efecto de la capacitancia en paralelo	40
19	Efecto del corte de la corriente	42
20	Interrupción de un cortocircuito	44

21	Corrientes inductivas pequeñas	45
22	Interrupción de la corriente capacitiva	46
23	Interrupción asíncrona	47
24	Interruptor de tanque muerto	50
25	Interruptor de tanque vivo	51
26	Interruptor sencillo de aire	54
27	Interruptor de soplo magnético	56
28	Interruptor divisor de arco	57
29	Interruptor de gran volumen de aceite	63
30	Características típicas de la cámara de explosión	65
31	Cámara de arco pequeño volumen	67
32	Interruptor neumático	69
33	Variación con el REVR de la capacidad	72
34	Variación de la capacidad con el entrehierro	72
35	Disposición de los interruptores	74
36	Resistencia dieléctrica contra la presión	79
37	Constantes de tiempo del SF6 y del aire	81
38	Vida media del arco contra la corriente	87
39	Resistencia a la interrupción	88
40	Diagrama del interruptor en vacío	91
41	Equipo analizador de interruptores	102
42	Conexión del circuito de energía	104
43	Conexiones de mando	105
44	Efecto espejo	106
45	Tiempo de apertura de un interruptor	113
46	Tiempo de cierre apertura de un interruptor	113
47	Cuadro de tiempo de usuario	115
48	Cuadro de tiempo de referencia	115
49	Tiempo para una operación de apertura	125

50	Tiempo para una operación de cierre	127
51	Tiempo para una operación cierre-apertura	129
52	Tiempo para una operación de apertura-cierre	131
53	Gráfica de tiempo para una apertura	133
54	Gráfica de tiempo para un cierre	134
55	Gráfica de tiempo para un cierre-apertura	135
56	Gráfica de tiempo para un O-C-O	136
57	Curva de desplazamiento de una apertura	139
58	Curva de desplazamiento para un cierre	143
59	Transductor lineal	146
60	Transductor rotacional	146
61	Operación del transductor lineal	147
62	Ejemplo del transductor lineal	148
63	Ejemplo del transductor rotacional	149
64	Reporte gráfico del TDR900	150
65	Ejemplos de curvas de desplazamiento	151
66	Curva de desplazamiento y velocidad	152
67	Curva de desplazamiento apertura	153
68	Oscilografía de una operación de apertura	155
69	Curva de desplazamiento cierre	155
70	Conexiones que causan curvas invertidas	157
71	Ejemplo de curvas invertidas	157
72	Ejemplo de curva de desplazamiento	158
73	Desplazamiento para una operación de apertura	160
74	Desplazamiento para una operación de cierre	161
75	Desplazamiento operación cierre-apertura	162
76	Desplazamiento para una operación de apertura	163
77	Desplazamiento para una operación de cierre	165
78	Desplazamiento operación cierre-apertura	167

79	Gráfica sobrepuestas de desplazamiento apertura	168
80	Gráfica sobrepuestas de desplazamiento cierre	169
81	Gráfica sobrepuesta cierre-apertura	170
82	Micro contactos	172
83	Resistencia de contactos	172
84	Aumento de la resistencia con el tiempo	174
85	Aumento de la R con el tiempo acelerado	176
86	Medición de la resistencia de contacto	178
87	Equipo de medición de resistencia de contactos	180
88	Medición dinámica de la resistencia de contacto	181
89	Penetración de contacto - cierre	205
90	Sobre viaje – apertura	206
91	Sobre viaje – cierre	206
92	Rebote – apertura	207
93	Rebote – cierre	208
94	Transductor de movimiento rotacional	227
95	Transductor de movimiento lineal	228
96	El movimiento lineal de los contactos	229
97	Mecanismo accionado por resortes	229

TABLAS

I	Componentes del panel frontal	102
II	Resultados de la prueba de tiempo para una operación de apertura	126

III	Resultados de la prueba de tiempo para una operación de cierre	128
IV	Resultados de la prueba de tiempo para una operación de cierre-apertura	130
V	Resultados de la prueba de tiempo para una operación de apertura-cierre	132
VI	Datos del desplazamiento para apertura	160
VII	Datos del desplazamiento para un cierre	162
VIII	Datos del desplazamiento para apertura	164
IX	Datos del desplazamiento para un cierre	166
X	Resultado de las pruebas de resistencia de contactos al interruptor del banco de reactores Guatemala-Norte	182
XI	Resultados de las pruebas de resistencia de contactos al interruptor del banco de capacitores No. I Guatemala-Sur	183
XII	Resultados de las pruebas de resistencia de contactos al interruptor del banco de capacitores No. II Guatemala-Sur	184
XIII	Módulo OCB/Movimiento	219
XIV	Módulo EHV	221
XV	Módulo de eventos	222
XVI	Módulo de disparo/cierre	223
XVII	Activador de entrada	223
XVIII	Características de la señal del módulo del sistema	224
XIX	Especificaciones físicas del TDR9000	224
XX	Especificaciones ambientales del TDR9000	225

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Presión del medio
V	Voltaje
fem	Fuerza electromotriz
m/s	Metros por segundo
^	Elevado
eV	Electrón-volt
°K	Grados Kelvin
σ	Conductividad eléctrica
CC	Cortocircuito
W e	Energía liberada por el arco, durante el tiempo t.
<i>i</i>(t)	Valor instantáneo de la corriente en función de t.
<i>e_b</i>(t)	Caída de tensión a través del arco en función de t.
t	Tiempo de duración del arco.

c.a	Corriente alterna
KA	Kilo amperios
t, t', t''	Intervalos de tiempo
O	Operación de apertura
C	Operación de cierre
CO	Cierre seguido de apertura
0	Es el tiempo muerto del interruptor expresado en ciclos
K	Constante dada por el fabricante
P	Resistividad del metal del contacto
D	Dureza del metal del contacto
F	Fuerza que mantiene cerrado el contacto
Ω	Velocidad angular
Xd	Grados de disociación
Xi	Grados de ionización

R	Resistencia
d / dt	Derivada de una variable respecto al tiempo
ζ	Constante de tiempo
SF6	Hexafluoruro de azufre
MVA	Mega volt-amperios
%	Porcentaje
°C	Grados Celsius
Hz	Hertz
Z	Impedancia efectiva
λ	Función de la velocidad de disipación de calor
μ	Micro
Ω	Ohmios
L	Inductancia
c.d.	Corriente directa

GLOSARIO

IEC	La Comisión Electrotécnica Internacional (CEI o IEC, por sus siglas del idioma inglés International Electrotechnical Commission)
ANSI	American National Standards Institute (Instituto Nacional Americano de Estándares)
ETCEE	Transporte y Control de la Energía Eléctrica
INDE	Instituto Nacional de Electrificación
TRD9000	Equipo analizador de interruptores
TRX Field	Software que se utiliza para desplegar los resultados del TDR900 en la computadora.
VTR	Voltaje transitorio de recuperación
REVR	Régimen de elevación del voltaje transitorio.
PLASMA	Partículas cargadas libres y cuya dinámica presenta efectos colectivos dominados, por las interacciones electromagnéticas de largo alcance entre las mismas.

ION	Ya sea un átomo o una molécula, cargada eléctricamente. Esto se debe a que ha ganado o perdido electrones de su dotación, originalmente neutra, fenómeno que se conoce como ionización. También suele llamársele molécula libre, cuando se trata de una molécula.
GRADIENTE	Se denomina gradiente a la variación de intensidad de un fenómeno por unidad de distancia entre un lugar y un centro (o un eje) dado.
DIELÉCTRICOS	Se denomina dieléctricos a los materiales que no conducen la electricidad, por lo que pueden ser utilizados como aislantes eléctricos.
CATODO	Aquél de los electrodos de un componente que emite o inyecta electrones, siendo normalmente negativo con respecto a los otros electrodos
FRETTING	Frotamiento

RESUMEN

Al abrir dos contactos de un interruptor bajo carga, se produce el fenómeno eléctrico conocido como arco eléctrico, esto debido a la ionización del medio donde se encuentre los contactos, la ionización del aire provoca el calentamiento del gas que se encuentra alrededor de los contactos ocasionando que al abrir estos se produzca el plasma y la corriente se pueda conducir a través del gas conllevando fenómenos como el voltaje transitorio de recuperación.

En el primer capítulo se desarrollan los diversos fenómenos que conlleva el arco eléctrico así como las diferentes teorías de interrupción del arco, y como las características propias de la configuración de la línea afectan en el funcionamiento del interruptor, también se estudian las diferentes partes que componen un interruptor de potencia como su parte activa, que es el lugar donde se produce la interrupción del arco, la sección de mando y la de control que de donde se envían las diferentes señales para la operación del interruptor.

Debido al calentamiento del medio en el que se produce el arco cuando se abren los contactos del interruptor se han desarrollado distintos métodos de enfriamiento del arco, motivo por el cual se ha desarrollado en una sección de este trabajo con la evolución de los diferentes medios utilizados para dicho fin, iniciando con los interruptores sumergidos en aceite, los de gran y pequeño volumen, que fueron los primeros en aparecer en el mercado debido a su sencillez pero presentan el problema que por ser un material inflamable puede ocasionar una explosión.

Continuando por los de interrupción de aire que presentan la ventaja de no ser un material explosivo pero que se necesita una gran cantidad de aire para lograr el enfriamiento del arco, con lo cual se limita su uso a pequeñas corrientes de cortocircuito, la siguiente generación fue la de aire comprimido o neumáticos que son una variación de los anteriores porque inyectan el aire, por medio de bombas aunque para grandes corrientes se sigue necesitando una gran cantidad de aire y por lo tanto un método de bombeo eficaz, lo cual puede ocasionar problemas si el sistema de bombeo falla.

Continuando con la evolución de los interruptores de potencia, aparecieron en el mercado los interruptores en vacío, con grandes ventajas, ya que al estar en vacío no se produce el arco, presentan el inconveniente de que al existir una fuga se pierde el vacío y se produce una falla catastrófica del interruptor, el último desarrollo han sido los interruptores de hexafluoruro de azufre que es un gas que presenta unas excelentes capacidades dieléctricas, lo cual ayuda a la extinción del arco, y permite que los equipos sean de menores dimensiones, tiene la característica de recuperar sus propiedades luego de pasar por el arco.

En el tercer capítulo se desarrolla el tema de las diversas pruebas que se practican a los interruptores de potencia, que son indispensables para garantizar el correcto funcionamiento de estos equipos tan importantes dentro de una subestación eléctrica.

Las pruebas de tiempo, dan los tiempos exactos que se tardan los interruptores ya sea en abrir o cerrar sus contactos, estos tiempos son de vital importancia, ya que de estos tiempos depende la duración del arco y de los fenómenos que este conlleva, y de no encontrarse dentro de los límites de tiempo especificados por los fabricantes puede ocasionar fallas catastróficas en el sistema.

Con las pruebas de desplazamiento obtenemos información, tanto gráfica como de los grados o milímetros según la programación de nuestro equipo, de la forma del movimiento a la hora de separarse o unirse los contactos, esta información la utilizamos para verificar que no existan problemas en los dispositivos de operación de los interruptores, como se pudo comprobar con las pruebas de campo, que había sido mal calibrado un interruptor entonces sus contactos no estaban funcionando apropiadamente lo cual estaba causando problemas a la red donde se encontraba conectado.

Por último, la prueba de resistencia de contactos nos proporciona un dato exacto de la resistencia de los contactos, lo cual nos proporciona idea del desgaste que han sufrido los contactos por las corrientes de interrupción; realizando estas pruebas periódicamente y llevando un registro se tiene un control de cómo evoluciona el rendimiento del interruptor en estudio.

OBJETIVOS

General:

Obtener un diagnóstico confiable del estado del interruptor, y mediante los resultados obtenidos se elaboren planes de mantenimiento a seguir, para corregir los posibles problemas que podamos detectar con el análisis de los resultados y con esto garantizar una buena calidad de servicio.

Específicos:

1. Estudiar los diferentes fenómenos que ocurren durante la interrupción del arco, sus causas y los medios de diseño para reducir sus efectos.
2. Evaluar las distintas formas de construcción de las cámaras de extinción de arco, sus ventajas y desventajas.
3. Conocer los procedimientos de las pruebas más comunes que se realizan en interruptores de potencia.
4. Realizar las pruebas y comparar los resultados obtenidos con los datos del fabricante para poder realizar un diagnóstico del interruptor.

INTRODUCCIÓN

Debido a la creciente demanda de energía eléctrica, cada día se construyen subestaciones eléctricas, con el fin de satisfacer esta demanda, el sistema eléctrico consta de los cables aéreos y subterráneos que conectan las instalaciones de generación eléctrica y los grandes centros urbanos de consumo.

El flujo de corriente es controlado por varios dispositivos eléctricos de diversos tipos, el interruptor es uno de los elementos más importantes, y su confiabilidad es particularmente importante en vista de su función de protección, se puede estar en reposo durante períodos largos y luego estar destinado a interrumpir corrientes de corto circuito de alta intensidad en una fracción de segundo.

Debido a su gran importancia dentro de la red, es preciso asegurar que los interruptores de potencia de cualquier subestación eléctrica se encuentren en buen estado para asegurar su correcto funcionamiento, con base a esto se practican en los interruptores diversos planes de mantenimiento, dentro de los cuales se incluyen diversas pruebas, tales pruebas se realizan con equipos especialmente diseñados para tal motivo como por ejemplo el TDR9000 de la compañía DOBLE, equipo con el cual se cuenta en el laboratorio de pruebas del ETCEE del INDE.

En el presente trabajo de graduación se describen diversas pruebas que se pueden realizar con el equipo TDR9000, como lo son las pruebas de tiempo, las cuales consiste en medir el tiempo que se toman los contactos de un interruptor ya sea para abrir, cerrar o una combinación de ambas; se incluyen

también las pruebas de desplazamiento, con esta prueba se obtienen gráficas del comportamiento del desplazamiento de los contactos del interruptor y nos ayuda a tener una visión de algún problema con los mecanismos de operación del interruptor de potencia.

Otra de las pruebas que se describe en este trabajo es la prueba de resistencia de contactos, esta prueba se utiliza para conocer el desgaste que puedan tener los contactos del interruptor, ya que dicho desgaste influye directamente en el comportamiento del interruptor durante la interrupción del arco, para analizar los resultado de las pruebas realizadas se compararon los resultados con las especificaciones de los fabricantes y también se tomó en consideración la experiencia del personal del laboratorio.

1. INTERRUPTORES DE POTENCIA

1.1. Introducción

La función de un interruptor es conectar e interrumpir, una o varias veces, en condiciones normales y anormales de trabajo, diferentes circuitos eléctricos. Al establecer o deshacer el contacto de los elementos de interrupción, hay una etapa transitoria de arqueo entre los contactos, regida por las descargas eléctricas que ocurren entre ellos; sí la corriente está pasando por un circuito, antes que este sea abierto por un interruptor, en el instante de separación se forma un arco entre los contactos y la corriente puede continuar por el circuito hasta que cese la descarga, y con base al estudio de este fenómeno diseñamos los interruptores de potencia.

1.1.1. Física del fenómeno del arco

La descarga en los interruptores, que generalmente se efectúa en forma de arco ocurre en dos formas; cuando se están separando los contactos, el arqueo es posible aun cuando la fem del circuito se encuentre considerablemente abajo del voltaje mínimo de interrupción con electrodo frío; esto es a causa del gran incremento local debido a la autoinductancia del circuito, esta manera de la formación de un arco es común, tanto para los interruptores de c.d. como para los de c.a.

En el segundo método, que se efectúa solamente en los interruptores de c.a., el arco se extingue cada vez que la corriente pasa por cero y puede restablecerse solamente si el voltaje transitorio de recuperación entre electrodos ya separados, que continúan separándose, alcanza un valor suficientemente alto, conocido como voltaje de interrupción.

Se sabe que el fenómeno del arco depende de:

1. La naturaleza y la presión P del medio.
2. Los agentes externos presentes, ionizantes y desionizantes.
3. El voltaje V entre los electrodos y su variación con el tiempo.
4. La naturaleza, forma y separación de los electrodos.
5. La naturaleza y forma del recipiente y su posición con relación a los electrodos.

Un gas ideal es un dieléctrico puro porque está formado por moléculas que son eléctricamente neutras y puede hacersele conducir energía solo cuando se emplea algún medio para crear iones libres y electrones libres en el seno del gas, y éstos se crean por radiación ultravioleta, rayos cósmicos, radiactividad de la tierra. Para comprender como un gas se vuelve un conductor debemos recordar que un gas está formado por moléculas que se mueven a grandes velocidades y que chocan entre sí, sus velocidades no son todas iguales sino que están agrupadas en torno a un valor medio. Se sabe que las moléculas de aire, a la temperatura ambiente, se mueven en forma aleatoria a aproximadamente 500 m/s y que chocan con frecuencia unas 10^{10} veces por segundo; sin embargo, la energía cinética de estas moléculas es demasiado baja para permitir que aun las partículas más veloces dañen a aquellas con las que chocan.

Sin embargo, a temperaturas más elevadas ocurre que las moléculas se parten ante las colisiones más severas y se disocian en sus átomos. Se necesitan energías de 9.7 eV y 5.1 eV, respectivamente, para disociar una molécula de N₂ ó de O₂. El grado de disociación X_d se expresa en la ecuación

$$P \left(\frac{X_d^2}{1 - X_d^2} \right) = AT^{3/2} \exp \left(-\frac{W_d}{KT} \right)$$

Donde:

A = constante

P = presión del gas

T = temperatura absoluta

W_d = energía de disociación

K = constante de Boltzmann

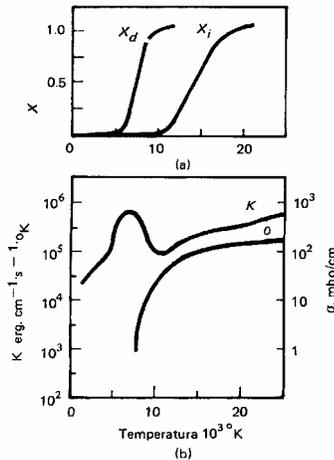
A temperaturas aún mayores algunas moléculas y átomos se privan de un electrón, y el gas caliente llamado plasma se convierte en conductor, el grado de ionización X_i, debido a la colisión térmica, se expresa mediante

$$P \left(\frac{X_i^2}{1 - X_i^2} \right) = AT^{5/2} \exp \left(-\frac{W_i}{KT} \right)$$

Siendo W_i, la energía de ionización.

Esta ionización térmica, que resulta de las colisiones aleatorias en el seno de un gas caliente, debe distinguirse de la ionización de impacto, que es la causada por los electrones acelerados en un campo eléctrico entre dos colisiones; esta última da origen a la descomposición dieléctrica aunque en un gas frío.

Figura 1. a) grados de disociación X_d y de ionización X_i , como funciones de la temperatura; b) conductividad térmica K y conductividad eléctrica σ como funciones de la temperatura.



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

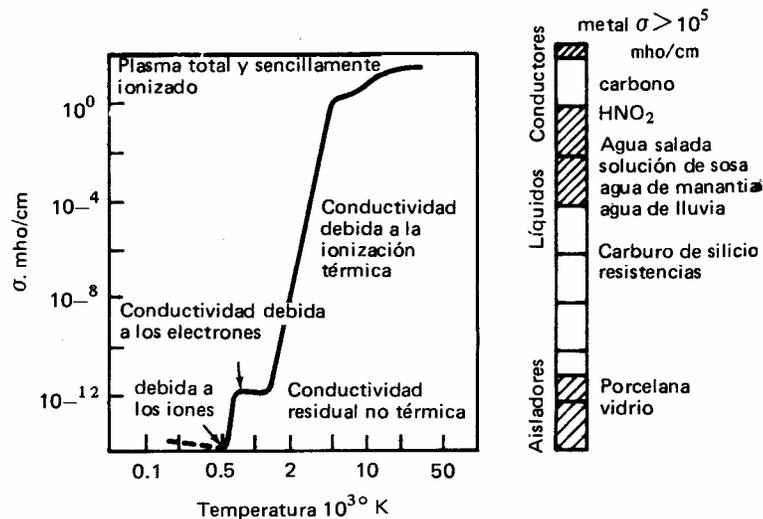
Página 336

La temperatura, en la cual comienza a formarse un número apreciable de electrones y de iones positivos depende, en consecuencia, del grado de ionización del gas. En el plasma del arco normal sólo se ioniza una pequeña fracción de los átomos y las temperaturas del arco se encuentran en el intervalo de 5000°K para el H_2 , 6000°K para el aire. En las columnas de arco concentrado, como las de los interruptores con soplo de gas, esta cifra se convierte en alrededor del 1% y la temperatura es, en correspondencia, de 10 a 12×10^3 °K para el N_2 . Estos electrones libres pueden conducir toscamente una corriente eléctrica en un campo eléctrico.

En el arco, el gas no se calienta desde el exterior, sino por la energía eléctrica liberada en su seno; los electrones son acelerados en el campo del arco y la energía que adquieren en esta forma la ceden al gas cuando chocan con sus átomos o moléculas.

Ahora bien mientras sea pequeña la velocidad con la que los electrones transmiten energía del campo al plasma, en comparación con la rapidez de intercambio de energía que se efectúa entre las partículas mismas, todo el plasma estará muy cerca del equilibrio térmico y las moléculas, iones y electrones, tendrán todos la misma temperatura, aunque no siempre sucede esto, cuando se inicia o cuando esta a punto de extinguirse el arco, la velocidad de intercambio de energía entre el arco y sus regiones circundantes se vuelve comparable al régimen interno de intercambio de energía y se rompe el equilibrio térmico.

Figura 2. Relación entre la conductividad eléctrica σ y la temperatura del aire, a la presión atmosférica.



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 336

Hay varios procesos que pueden producir la emisión de electrones libres de un metal y la iniciación de un arco en un CC.

Dos de estos procesos son importantes: 1) el aumento de la temperatura, que provoca la emisión termoiónica de electrones y 2) el gradiente de alto voltaje en el cátodo, que ocasiona la emisión de campo de los electrones. Las condiciones que prevalecen en el instante de la separación de los contactos conduce a uno o a ambos de estos procesos; en el momento de la separación de los contactos disminuyen rápidamente el área y la presión entre los contactos que se están separando, lo cual produce un incremento de la resistencia eléctrica y un intenso calentamiento local, que puede ser suficiente para la emisión termoiónica. Aunque esta resistencia momentánea sólo puede ser una fracción de ohm, la corriente puede ser extremadamente alta, de muchos cientos o miles de amperes, y ocasiona un descenso del voltaje de unos cuantos voltios entre la distancia de separación extremadamente pequeña, provocando así un alto gradiente de voltaje. El gradiente de voltaje puede ser suficiente para ocasionar la emisión de electrones del cátodo; este proceso se conoce como emisión de campo; ambos tipos de emisión varían apreciablemente, conforme a la naturaleza, forma y separación de los contactos.

La emisión termoiónica de electrones se produce por el aumento en la resistencia y en la densidad de corriente en la superficie de los contactos, al momento de producirse la apertura. De igual forma, el alto gradiente de potencial existente entre los contactos durante los primeros instantes del proceso de apertura, origina un proceso de emisión de electrones por efecto de campo eléctrico. Estos electrones altamente energéticos chocan con las moléculas del medio, produciendo una reacción química endotérmica o exotérmica.

La energía calórica desarrollada durante el arco es altamente destructiva y puede calcularse por medio de la ecuación.

$$W_e = \int_0^t i(t) e_b(t) dt$$

Donde:

W_e : Energía liberada por el arco, durante el tiempo t .

$i(t)$: Valor instantáneo de la corriente en función de t .

$e_b(t)$: Caída de tensión a través del arco en función de t .

t : Tiempo de duración del arco.

Esta energía puede ocasionar daños a los contactos del interruptor, vaporización del aceite, aumento de la presión en el interior del tanque, etc., esta energía calórica nos sirve para diseñar el interruptor y disminuir el tiempo de arqueo para evitar daños al interruptor (ver página 27).

1.1.2. Mantenimiento del arco

Con la iniciación del arco entre los electrodos se liberan suficientes electrones del cátodo y que al moverse hacia el ánodo hacen que el medio se ionice, la ionización del medio provoca una rápida creación de electrones que sirven para mantener el arco después de haber cesado, en gran parte, la emisión de campo. En consecuencia, cada electrón emitido se multiplica en número derivando energía del campo, el proceso de difusión y recombinación continúa reponiendo al ánodo los electrones perdidos; finalmente, si la corriente es alta, la descarga toma la forma de un arco, con temperatura lo suficientemente elevada como para convertirse en la fuente principal de conductividad eléctrica.

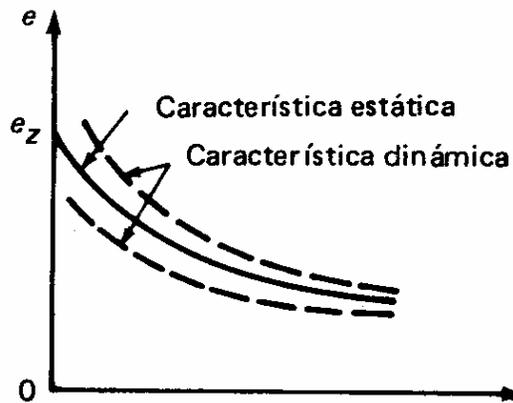
1.1.3. Pérdidas del plasma

Hay tres formas en que pierde calor una columna de arco, 1) por conducción, 2) por convección y 3) por radiación. Las pérdidas que ocurren en un interruptor son solo las primeras dos, ya que la pérdida por radiación es despreciablemente pequeña; en los interruptores de corte simple en aceite, se forman arco en los tubos y en las ranuras angostas, y casi toda la pérdida es por conducción, siempre que se presenta el fenómeno cuya naturaleza es la de un soplo, aun en la interrupción simple, la pérdida es un problema de conducción-convección, el arco ordinario que se forma en el aire es también un problema de conducción-convección.

1.1.4. Propiedades esenciales del arco

Si se trazan los valores instantáneos del voltaje e_s entre los electrodos de un arco en acción, en confrontación con los valores correspondientes de la corriente, se obtienen las características del arco; al aumentar la corriente del arco la temperatura se eleva y el proceso de ionización se vuelve más activo aumentando con ello la conductividad del medio y, como consecuencia, disminuye el voltaje del arco. El incremento de la corriente en el intervalo superior aumenta la conductividad, pero tiene un efecto menos marcado sobre el voltaje; el corte inicial del entrehierro, requiere un alto voltaje de ignición e_z o corriente cero. Se ve también que, cambiando el régimen de variación de la corriente, la característica se desplaza; si la corriente cambia rápidamente en función del tiempo, se dice que las características son dinámicas, y si el régimen de cambio de la corriente es pequeño, las características se conocen como estáticas.

Figura 3. Características estáticas y dinámicas



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 338

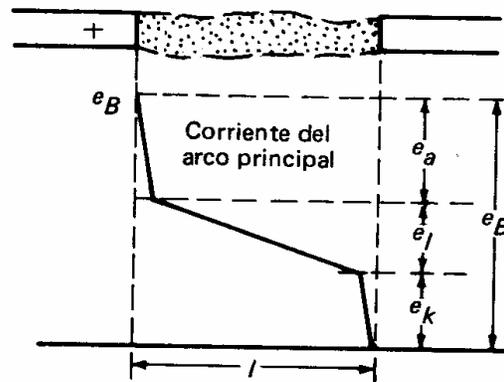
Sí la corriente que pasa por el arco cambia súbitamente, se encuentra que el voltaje entre los extremos del arco no toma el valor correspondiente al nuevo valor de la corriente, siendo las características estáticas, en consecuencia, sí la corriente aumenta súbitamente se encuentra que el valor del voltaje entre los extremos del arco es más que el valor dado por las características estáticas. La razón es que, a cualquier corriente dada, el arco y sus alrededores tienen un contenido de calor, representado por el gas calentado, ionizado y disociado.

Cuando la corriente desciende desde un valor lo suficientemente alto, la transición es enteramente un efecto de la temperatura. Esto significa que, con la temperatura en descenso, la transición puede efectuarse a diversos valores instantáneos de la corriente, dependiendo del régimen de descenso de la corriente.

En consecuencia, cuando la corriente está en descenso rápido, el valor al que ocurre la transición puede ser mucho menor que cuando la corriente está en descenso lento, esta es una razón por la que generalmente no se observan tales transiciones en los interruptores de alterna para corrientes altas; la distribución del voltaje a lo largo del arco no es lineal.

Se sabe que muy próxima al cátodo existe una carga positiva y negativa cerca del ánodo; ambas producen gradientes de alto voltaje en comparación con el de la corriente principal del arco, y los descensos fuertes de voltaje correspondientes son e_k y e_a respectivamente. El descenso de voltaje a lo largo de la corriente principal del arco e_l , es proporcional a la longitud y depende de la propiedad del gas y de las condiciones en las cuales existe el gas, los gases con mayores gradientes de voltaje a lo largo de la corriente principal del arco tienen mejores propiedades para la extinción del arco.

Figura 4. Distribución del voltaje a lo largo del arco



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 339

1.1.5. Teorías de interrupción del arco

En los interruptores puede haber dos formas de extinguir el arco, a) interrupción de alta resistencia, b) interrupción de baja resistencia o de corriente cero.

1.1.5.1. Interrupción de alta resistencia

El arco se controla en tal forma que aumenta su resistencia efectiva con el tiempo y la corriente se reduce a un valor insuficiente para mantenerlo, la resistencia de arco se puede aumentar por alargamiento, por enfriamiento y por la división del arco.

La principal desventaja de este tipo de interrupción es que la energía disipada es alta y, por lo tanto, sólo se usa en interruptores de potencia baja y mediana, y en interruptores de corriente directa.

1.1.5.2. Interrupción de baja resistencia o de corriente cero

Se emplea para la interrupción de arcos en alterna, en cada corriente cero el arco se extingue por un breve momento y se restablece de nuevo al elevarse la corriente. El fenómeno de la extinción del arco es muy complicado y puede explicarse por dos diferentes teorías, las cuales exponemos a continuación.

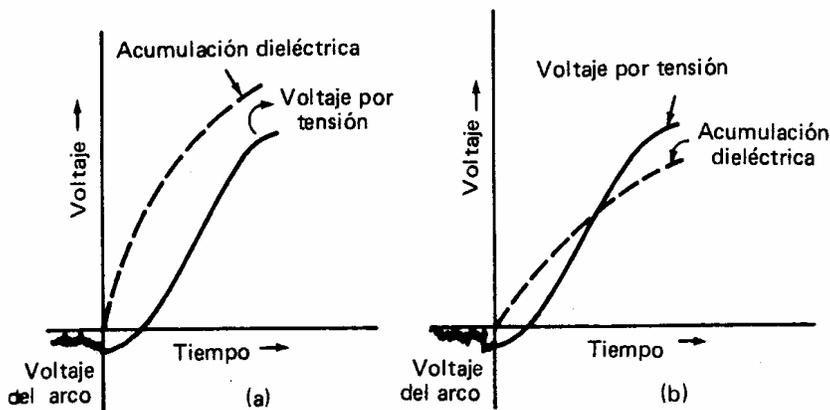
1.1.5.2.1. Teoría Slepiana

El arco que está en la forma de plasma tiene un esfuerzo de voltaje suficiente como para desviar electrones de sus órbitas atómicas, siendo, en conjunto, acompañado por el proceso de la liberación de una gran cantidad de calor.

Para detener este proceso es necesario remover el gas ionizado o producir un estado de inestabilidad, haciendo que los electrones se recombinen a un régimen mayor que aquel al que se están liberando; por cualquiera de los dos métodos, la resistencia de la trayectoria del arco aumenta rápidamente hasta que dicha trayectoria se convierte en aislador.

La posición cero de la corriente ofrece la situación más favorable para esto cuando la ionización residual es pequeña, en otras palabras, el problema básico consiste en acumular la resistencia dieléctrica entre los contactos del disyuntor. Si el régimen al que aumenta la resistencia dieléctrica es más elevado que el régimen al que se eleva el esfuerzo de voltaje, el arco se extinguirá; de lo contrario, el arco puede interrumpirse por un período breve, pero se restablece nuevamente.

Figura 5. Acumulación de la resistencia dieléctrica y del esfuerzo de voltaje entre los contactos de un interruptor.



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 343

La teoría supone que el voltaje de restablecimiento y la acumulación de la resistencia dieléctrica son cantidades independientes; esta suposición no es del todo correcta porque los cálculos de la resistencia dieléctrica no concuerdan con los valores observados. Sin embargo, la teoría explica la extinción del arco de una manera simple y convincente, Slepian fue el primero en señalar que el voltaje de restablecimiento tiene una participación importante en la extinción del arco.

1.1.5.2.2. Teoría del equilibrio de energía

Con el desarrollo de los interruptores de soplo de gas, en los que podían existir cantidades muy grandes de conductividad post-arco, pudiéndose todavía interrumpir el circuito, los altos regímenes de elevación del voltaje de restablecimiento no tenían un efecto tan marcado en el interruptor como era de esperarse. Esto condujo a la consideración de que el período post-cero podía explicarse mejor en función de un equilibrio de energía, se sugirió que, fundamentalmente, el restablecimiento o la interrupción del arco es un proceso de equilibrio de energía; si la alimentación de energía al arco subsecuente a la corriente cero, continúa aumentando, el arco se restablece y si no, se interrumpe el circuito. La interrupción eficaz del arco, seguida de una corriente cero, implica el incremento del voltaje de reiniciación a un valor que rebasa cualquier voltaje que pueda producir el circuito entre los extremos del arco, el equilibrio posterior a la corriente cero no es la única manera en la que pueden operar los interruptores, al tratar el problema de la conductividad post-arco, es necesario adentrarse en el funcionamiento de los interruptores de soplo de gas.

1.2. Partes de un interruptor de potencia

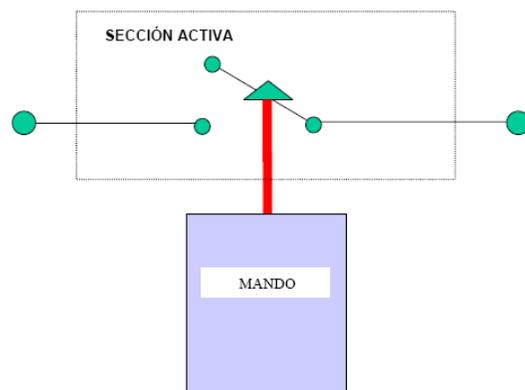
1.2.1. Descripción

Un interruptor de alta tensión consta de tres partes principales:

1. Sección activa (potencia eléctrica)
2. Sección de mando
3. Sección de control

La sección activa debe establecer o interrumpir la corriente de alimentación en el circuito de alta tensión donde está instalado el interruptor, la sección de mando debe desarrollar la energía necesaria para ejecutar estas operaciones, el enlace entre la sección de mando y la sección activa es usualmente una varilla aislada, como la mostrada en rojo en el esquema de la figura 6.

Figura 6. Partes de un Interruptor de Potencia



Fuente: Zensol

1.2.1.1. Sección de potencia eléctrica

1.2.1.1.1. Cámara de arco

La cámara de arco es un volumen cerrado que contiene un contacto fijo, un contacto móvil y un medio de interrupción, se establece una corriente cuando el contacto móvil toca al contacto fijo y se interrumpe cuando éstos se separan.

Se crea un arco cuando los contactos se separan, el medio para la interrupción es responsable de extinguir el arco y de establecer el nivel nominal de aislamiento entre los contactos abiertos. Se pueden conectar varias cámaras en serie para soportar mayores niveles de voltaje; en este caso se instala un condensador de mayor capacidad en paralelo con cada cámara para balancear el voltaje a través de los contactos cuando éstos se separan.

1.2.1.1.2. Resistencias de Inserción

La modificación abrupta de las características del circuito cuando opera el interruptor, produce impulsos de voltajes picos, siendo el nivel determinado por las características del circuito, estos impulsos pueden alcanzar niveles muy altos y deben reducirse.

1.2.1.1.2.1. En la apertura

Los niveles de impulsos de voltaje son aceptables cuando interrumpen corrientes nominales o corrientes de cortocircuito, pero pueden ser muy peligrosos cuando interrumpen corrientes de pequeñas capacitancias o corrientes inductivas.

1.2.1.1.2.2. En el cierre

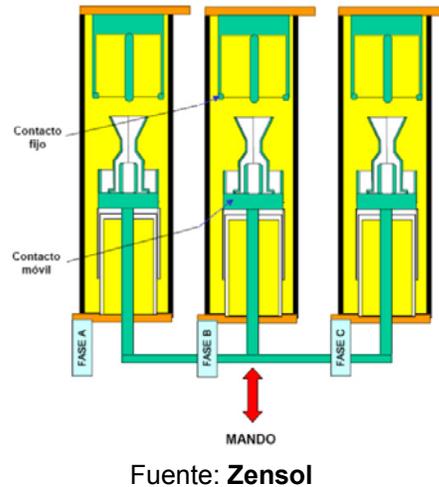
La abrupta energización de un circuito siempre genera impulsos de voltaje con niveles habitualmente moderados, a excepción de los cierres o recierres sobre líneas largas y sin carga donde los impulsos pueden alcanzar niveles extremos en función de la longitud de la línea, del momento de cierre o de recierre, y de la discrepancia de los tres polos.

1.2.1.1.2.3. Descripción

Se coloca una resistencia con un valor predeterminado en serie con un contacto auxiliar, ambos se instalan en paralelo con la cámara principal de arco. El interruptor auxiliar está programado para cerrarse unos milisegundos antes que los contactos principales en el cierre y para abrir unos milisegundos después de la apertura de los contactos principales en el disparo, a este retraso programado se la llama tiempo de inserción.

Esta parte está generalmente constituida de tres fases de igual tamaño, cada fase está compuesta de un montaje para el contacto fijo y uno para el contacto móvil. Cuando los dos montajes entran en contacto, se dice que el interruptor automático está cerrado, así fluye la corriente a través de el circuito de alimentación eléctrica, para interrumpir el flujo de corriente en el circuito de fuerza, el montaje del contacto móvil se mueve mecánicamente fuera del montaje del contacto fijo y se detiene a una distancia adecuada para asegurar el aislamiento eléctrico.

Figura 7. Cámaras de extinción del arco



1.2.1.2. Sección de mando

Esta sección tiene la tarea de crear la energía requerida para ejecutar la operación mecánica del interruptor automático, para las operaciones de apertura y de cierre.

Tres tipos de mandos son los más usados en los interruptores de alta tensión:

- Neumático
- Hidráulico
- Mecánico accionado por resortes

1.2.1.2.1. Mando neumático

Usualmente se encuentra en los interruptores de aire comprimido, este tipo de mando usa aire comprimido como un medio dieléctrico y utiliza contactos móviles del tipo de pistón.

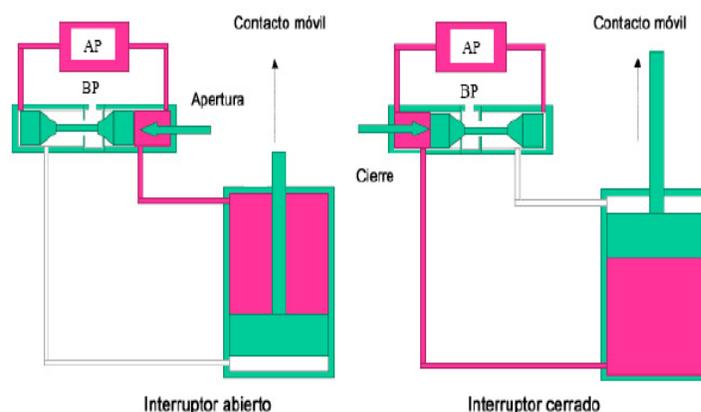
Una serie de válvulas activadas en una secuencia precisa permite la aplicación de presión de aire en un lado del pistón, el cual ocasiona su movimiento posterior a través de la acción de la diferencia de presión entre los lados opuestos del pistón.

1.2.1.2.2. Mando hidráulico

Este tipo de mando tiene un reservorio de energía, o un acumulador de nitrógeno comprimido o de resortes comprimidos por una bomba y por fluido hidráulico, el contacto móvil del interruptor está sujeto al pistón por una varilla aislada.

Un juego de válvulas hidráulicas permite la aplicación de la presión previamente acumulada a un lado o al otro del brazo hidráulico, el cual mueve a éste y al contacto en la dirección deseada.

Figura 8. Mando hidráulico de un Interruptor de Potencia



Fuente: Zensol

1.2.1.2.3. Mando mecánico accionado por resortes

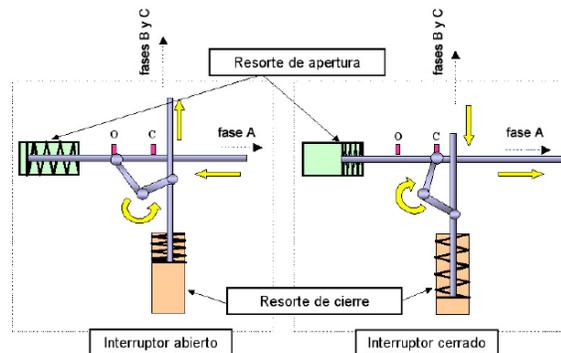
Este tipo de mando es el de mayor demanda por su confiabilidad comprobada y también por su muy baja frecuencia de mantenimientos periódicos.

Consta usualmente de dos resortes comprimidos, uno usado para acumular la energía necesaria para cerrar el interruptor y el otro para almacenar energía para abrir el interruptor automático.

El resorte de cierre (E) se comprime manualmente usando una palanca, o eléctricamente, usando un motor, un mecanismo de bloqueo mantiene y controla la energía acumulada en el resorte de cierre.

Cuando se libera esta energía al liberar al resorte de cierre, el contacto móvil se mueve hacia el contacto fijo a través de varillas conectoras, mientras que simultáneamente se carga el resorte de apertura el cual mantiene la energía acumulada con su propio mecanismo de bloqueo, listo para ser liberado en la próxima orden de apertura.

Figura 9. Mando mecánico accionado por resortes



Fuente: Zensol

1.2.1.3. Control

La orden para operar el interruptor se lanza desde la parte de control del interruptor, en la forma de un impulso eléctrico con una duración de una fracción de segundo, luego la orden es amplificada en el mecanismo de operación para completar la operación del interruptor capaz de interrumpir las corrientes de cortocircuito.

El control incluye:

- Bobinas de cierre y de apertura
- Sistemas de relevadores de control
- Manómetros y interruptores de presión
- Sistemas de vigilancia y de alarmas
- Sistemas de reinflación para restaurar la energía que se consume en la operación.

1.3. Parámetros de los interruptores

Los parámetros de los interruptores nos dan los valores que definen las condiciones de trabajo para las cuales están diseñados y construidos, los interruptores deben permitir el paso de la corriente de plena carga sin una elevación excesiva de la temperatura y deben poder soportar las fuerzas electrodinámicas, además, deben tener la capacidad de interrumpir las corrientes de falla.

De acuerdo a normas IEC 56-1 las normas ANSI un interruptor de corriente alterna debe cumplir con los siguientes conceptos de capacidad nominal:

- Voltaje nominal
- Corriente nominal
- Frecuencia nominal
- Capacidad nominal de interrupción simétrica y asimétrica
- Capacidad nominal de restablecimiento
- Corriente nominal de tiempo corto o máxima duración de corto circuito
- Servicio nominal de operación

1.3.1. Voltaje nominal

En condiciones normales de operación, el voltaje no es constante en ningún punto del sistema de fuerza, debido a esto, el fabricante debe garantizar la operación perfecta del interruptor a un voltaje nominal máximo que, por lo general, es un poco mayor que el voltaje nominal del aparato.

El voltaje nominal máximo de un interruptor es el voltaje rms más alto, superior al voltaje nominal del sistema para el cual está diseñado el interruptor y corresponde al límite superior de operación.

1.3.2. Corriente nominal

La corriente nominal de un interruptor es el límite de diseño para la corriente en amperes rms, este límite es la corriente que puede conducir el interruptor en forma continua sin rebasar el límite de la elevación de la temperatura observable.

1.3.3. Frecuencia nominal

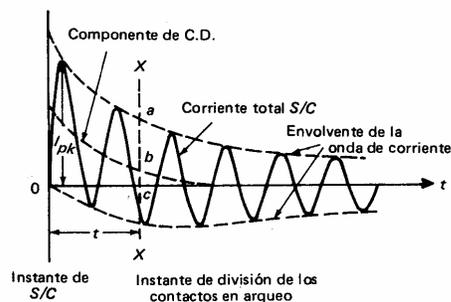
La frecuencia nominal del interruptor es la frecuencia para la que este diseñado y construido, las aplicaciones a otras frecuencias deben recibir consideraciones especiales.

1.3.4. Capacidad nominal de interrupción, simétrica y asimétrica

En la figura puede verse la forma de la corriente de cortocircuito, en la cual el valor rms de la corriente varía con el tiempo por la presencia de una componente c.d. que disminuye de valor con el tiempo.

Después del instante de la falla, la corriente de cortocircuito comienza de descender desde un valor inicial muy alto hasta un valor sostenido, además, debido al tiempo de relevación, el disyuntor comienza a abrir sus contactos en arqueo solo un poco después del inicio del cortocircuito; por lo tanto la corriente real que se interrumpe es menor que el valor inicial de la corriente de cortocircuito.

Figura 10. Onda de una corriente de cortocircuito



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 347

La corriente de interrupción de un polo según la IEC, es la corriente que pasa por ese polo en el instante de la separación de los contactos, esta corriente se expresa con dos valores.

- a) La corriente simétrica de interrupción: Este es el valor rms de la componente de c.a. de la corriente que pasa por el polo en el instante de separación de los contactos.

$$I_{sym} = \frac{ab}{\sqrt{2}} \quad (\text{Figura 10})$$

- b) La corriente asimétrica de interrupción: Esta es el valor rms de la corriente total, que comprende las componentes de c.a. y c.d. de la corriente que pasa por ese polo en el instante de separación de los contactos.

$$I_{asym} = \sqrt{\left(\left(\frac{ab}{\sqrt{2}}\right)^2 + (bc)^2\right)} \quad (\text{Figura 10})$$

Ahora, de acuerdo a estos dos valores de corriente de interrupción, hay dos valores correspondientes a la capacidad de interrupción, las cuales pueden definirse como:

1. La capacidad interruptiva simétrica es el valor de la corriente simétrica de interrupción bajo la cual se puede abrir el interruptor a un voltaje dado de recuperación y a un voltaje dado de restablecimiento, como valor de referencia, bajo condiciones prescritas.

2. La capacidad interruptiva asimétrica es el valor de la corriente de interrupción asimétrica bajo la cual se puede abrir el interruptor a un voltaje dado de recuperación y un voltaje dado de restablecimiento, como valor de referencia, bajo condiciones prescritas.

1.3.5. Capacidad nominal de restablecimiento

Este valor caracteriza la capacidad de los interruptores para cerrar sus contactos contra corrientes de cortocircuito. La corriente de restablecimiento de un interruptor, cuando se cierra sobre un cortocircuito, es el valor rms de la componente total (incluyendo las componentes de c.a. y la de c.d.) que se mide desde la primera envolvente de la onda de corriente en el momento de su primera cresta principal.

La corriente de restablecimiento también puede expresarse en función del valor instantáneo de la corriente, en cuyo caso, se mide en la primera cresta principal de la onda de corriente, a este valor se le conoce como la corriente máxima de restablecimiento para el diseño.

La corriente de restablecimiento de un interruptor es la corriente que puede restablecer a un voltaje dado, bajo condiciones prescritas de utilización y funcionamiento. La capacidad nominal de restablecimiento es la que corresponde a un voltaje nominal, cuando no aparece ninguna indicación, significa que cada capacidad nominal de restablecimiento tiene un valor dado por la expresión.

Capacidad nominal de restablecimiento=2.55*capacidad simétrica de interrupción.

1.3.6. Corriente nominal de tiempo corto

La corriente nominal de tiempo corto de un interruptor es el valor rms de la corriente que puede conducir en su posición totalmente cerrado, sin sufrir daño, para el intervalo especificado de tiempo corto y bajo las condiciones prescritas. Normalmente se expresa en función de KA para un período de 1 segundos o de 4 segundos y se les conoce como la capacidad nominal a 1 segundo y la capacidad nominal a 4 segundos, respectivamente; estas capacidades están basadas en las limitaciones térmicas.

Para los interruptores de baja tensión, no se dan capacidades nominales de tiempo corto similares porque tales interruptores están dotados, normalmente, de dispositivos de disparo por sobrecarga conectados en serie y de acción directa.

1.3.7. Servicio nominal de operación

El servicio de operación de un interruptor es el número prescrito de operaciones unitarias a intervalos establecidos, de acuerdo con las recomendaciones del IEC para el servicio nominal de la operación de interruptores cuya utilización no es para autorrestablecimiento, existen dos alternativas.

1. **O-t-CO-t'-CO**

2. **O-t''-CO**

O = operación de apertura

C = operación de cierre

CO = cierre seguido de apertura

t, t', t'' = intervalos de tiempo

Los interruptores con autorrestablecimiento tienen un servicio de operación como sigue:

O-O-CO

O es el tiempo muerto del interruptor expresado en ciclos.

1.3.8. Resistencia de contacto

Cuando una cámara de arqueo se cierra, se produce un contacto metálico en un área muy pequeña formada por tres puntos, que es lo que en geometría determina un plano.

Este contacto está formado por tres puntos en los que se fija el concepto de resistencia de contacto y que provoca el calentamiento del contacto, al pasar la corriente nominal a través de él.

La resistencia de contacto varía de acuerdo con la fórmula

$$R = K\rho \frac{D}{F}$$

Donde:

R resistencia de contacto en ohm

K constante dada por el fabricante

ρ resistividad del metal del contacto

D dureza del metal del contacto

F fuerza que mantiene cerrado el contacto

1.3.9. Cámaras de extinción del arco

Es la parte primordial de cualquier interruptor, en donde al abrir los contactos se transforma en calor la energía que circula por el circuito que se trate, las cámaras deben soportar los esfuerzos electrodinámicos de las corriente de cortocircuito, así como esfuerzos dieléctricos que aparecen al producirse la desconexión de bancos de reactores, capacitores y transformadores.

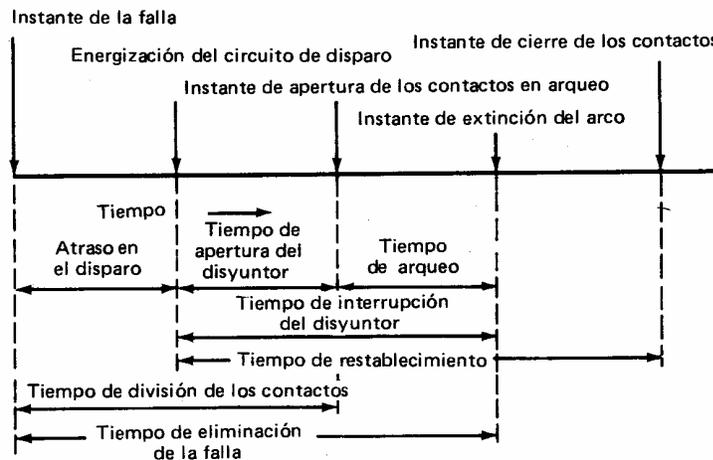
El fenómeno de interrupción aparece al iniciarse la separación de los contactos, surgiendo un arco a través del fluido, que lo transforma en plasma y que provoca esfuerzos en las cámaras, debido a las altas presiones y temperaturas. Al interrumpirse la corriente, durante el paso de la onda por cero, aparece entre los contactos la llamada tensión transitoria de restablecimiento.

1.4. Constantes y condiciones de los circuitos

Mientras se cierra o se abre un interruptor, las constantes del circuito tienen una función muy importante, en la práctica se ha observado que en un interruptor que funciona correctamente en un punto del sistema, puede no hacerlo en otro, lo cual demuestra que las condiciones del sistema tienen cierta incidencia sobre su comportamiento.

Esto debido a que las corrientes en diferentes puntos no son iguales ya que la configuración de la línea afecta los parámetros de la línea, por eso es importante la máxima corriente de interrupción que deberán soportar los contactos de un interruptor en el punto donde sean instalados.

Figura 11. Componentes del tiempo de operación de un interruptor



Fuente: Stevenson, William D.

Análisis de Sistemas de Potencia

Página 379

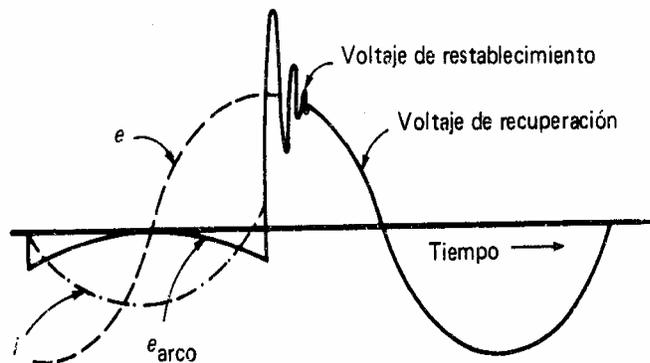
Las magnitudes transitorias que resultan de la interrupción son ocasionadas por la energía residual (ya sea eléctrica, electromagnética o de ambas clases), es decir, la energía almacenada en la capacitancia o en la inductancia o en ambas cuando hay por la interrupción del circuito, un cambio de un estado estable a otro, en la figura se muestran las magnitudes típicas del sobrevoltaje debido a la interrupción y fallas.

1.4.1. El voltaje después de la corriente cero final

Este voltaje aparece entre los polos después de la interrupción de corriente, tiene una parte transitoria inmediatamente después de la interrupción a la que se le conoce como voltaje de restablecimiento y después de que se desvanecen las oscilaciones transitorias alcanza el voltaje de frecuencia normal y entonces se le conoce como voltaje de recuperación, definimos estos dos términos a continuación.

- Voltaje de recuperación: Se define como el voltaje rms de frecuencia normal que aparece entre los polos del interruptor después de la extinción final del arco.
- Voltaje de restablecimiento: Se define como el voltaje transitorio que existe en la pausa de corriente cero o en gran proximidad al alcance de dicha pausa, durante el tiempo de arqueo.

Figura 12. Formas de onda del voltaje de recuperación y de restablecimiento



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

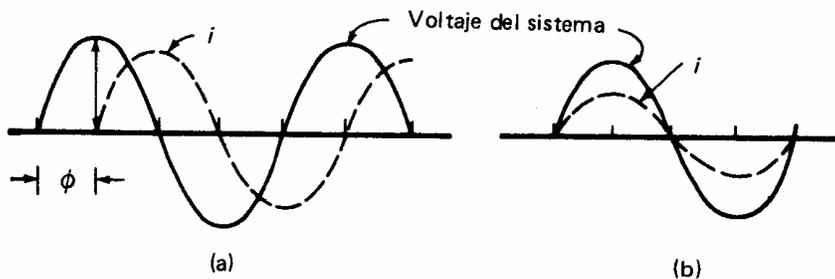
Página 354

1.4.2. Condiciones de severidad

El valor instantáneo del voltaje de recuperación en el momento de la corriente cero final, depende de los siguientes factores:

- a) Efecto del factor de potencia del circuito. El valor instantáneo del voltaje de recuperación depende del factor de potencia, es claro por lo tanto, que un cortocircuito reactivo es mucho más difícil de interrumpir que un cortocircuito resistivo de la misma corriente y el mismo voltaje, en vista que el voltaje instantáneo de recuperación es alto en el primer caso, en comparación con el del último caso.

Figura 13. Efecto de fp sobre el valor instantáneo del voltaje de recuperación



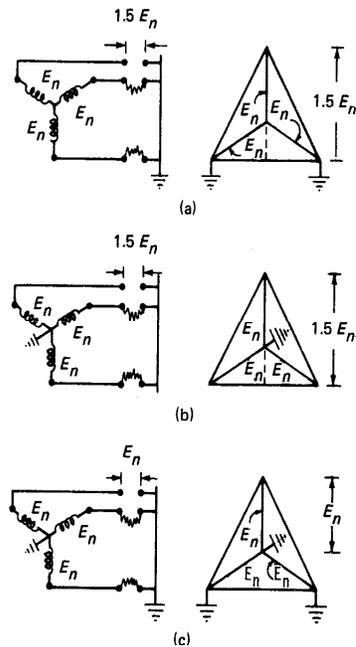
Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 355

- b) Efecto de las condiciones del circuito. El tipo de falla y la condición del punto del neutro, es decir, el hecho de que esté aterrizado o aislado, afecta también el voltaje existente entre los polos del interruptor en el cual se extingue el primer arco. Este hecho se ilustra en las figuras, en las cuales podemos observar que sí el neutro está aislado, o la falla no involucra tierra, aparece un voltaje 1.5 veces el voltaje entre fases, entre los polos del interruptor en el que se extingue el primer arco.

Figura 14. Voltaje de recuperación de la primera fase a despejar, en un interruptor que elimina una falla trifásica: a) neutro aislado y falla aterrizada; b) neutro aterrizado y falla aislada; c) neutro aterrizado y falla aterrizada



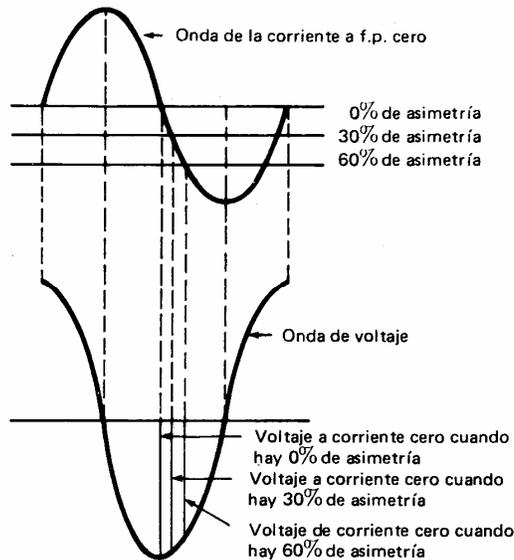
Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 355

c) Asimetría de la corriente. Cuando se introduce asimetría en la onda de corriente por interrumpir, puede variarse el valor instantáneo del voltaje de recuperación a la corriente cero. La existencia de una componente grande de cd, en una corriente de cortocircuito, puede ocasionar que la onda de voltaje de recuperaciones inicie cerca del punto cero, en vez de hacerlo en su valor cresta, así se reduce considerablemente el valor instantáneo del voltaje de recuperación.

Figura 15. Efecto de la asimetría de corriente



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 356

- d) Efecto de la reacción de armadura: El voltaje de recuperación es menor que el voltaje normal del sistema a causa del efecto desmagnetizador de la reacción de armadura. Las corrientes de cortocircuito tienen el factor de potencia en atraso y pasan por los devanados del generador, tienen una reacción de armadura desmagnetizante y, por ello, reducen el voltaje terminal.

1.5. Efecto transitorio del voltaje de restablecimiento

Eléctricamente, un sistema de fuerza es una red oscilatoria, por lo que es de esperar que la interrupción de la corriente de falla dé origen a una magnitud transitoria cuya frecuencia depende de las constantes del circuito.

Este voltaje transitorio se conoce como voltaje de restablecimiento y que ocurre inmediatamente después de la extinción del arco. El voltaje del arco entre los contactos, en este instante, es normalmente bajo, mientras que el voltaje de la frecuencia de fuerza que priva en el circuito, está en su valor máximo o cerca de él.

El voltaje de restablecimiento v_c , que se desarrolla entre los contactos abiertos del interruptor, esta dado por,

$$V_c = \frac{E_{\max}}{L} \left(\frac{1}{P (P^2 + \omega^2)} \right)$$

en donde $\omega = 1/\sqrt{LC}$ y E_{\max} = valor máximo del voltaje de recuperación.

Transformado de nuevo a una función del tiempo,

$$V_c = E_{\max} (1 - \cos \omega t)$$

El valor máximo del voltaje de restablecimiento v_c es $2E_{\max}$ y ocurre en el momento $t = \pi/\omega$, que es igual a $\pi\sqrt{LC}$. El voltaje oscilatorio transitorio tiene una frecuencia de $1/2 \pi\sqrt{LC}$ hertz.

1.5.1. Clasificación de los transitorios de restablecimiento

Los voltajes transitorios de restablecimiento y, por lo tanto, sus circuitos respectivos, generalmente pueden quedar comprendidos en una de las dos siguientes descripciones.

1. Transitorios oscilatorios de una sola frecuencia: Cuando se separan los contactos del interruptor, se forma un arco que se extingue normalmente a una corriente cero y entonces, el voltaje del circuito se encuentra en su valor máximo. Este voltaje tiende a aparecer entre las terminales del interruptor, pero se atrasa debido a la presencia de la capacitancia C, la cual primero se carga y después establece el voltaje entre las terminales, sin embargo, un voltaje transitorio se sobrepone a la frecuencia natural del circuito simple L-C, sobre el voltaje ya existente en el circuito (voltaje de recuperación), las frecuencias naturales son del orden de los 1000 a 10,000 hz.
2. Transitorios de doble frecuencia: Es muy posible que el interruptor S pueda tener los parámetros L y C en sus dos lados, antes del despeje los puntos a y b están al mismo potencial, una vez despejada la falla, ambos circuitos oscilan a sus propias frecuencias naturales y, entre las terminales del interruptor S, aparece una magnitud transitoria de doble frecuencia.

1.6. Características del voltaje de restablecimiento

Las características más importantes del voltaje de restablecimiento las cuales influyen en el funcionamiento del interruptor, son: a) el factor de amplitud, b) el régimen de elevación del voltaje de restablecimiento (REVR).

- a) Factor de amplitud: El factor de amplitud se define como la relación del valor máximo del voltaje transitorio al valor máximo del voltaje de frecuencia del sistema BS 116 especifica la norma para evaluar el factor de amplitud.

$$S = \frac{V_R}{E\sqrt{2}}$$

Donde:

$$V_R = SEv^2$$

S = Factor de amplitud

$E\sqrt{2}$ = Valor eficaz de la onda fundamental

Teóricamente, puede alcanzar el valor de 2; pero por lo regular, en la práctica no suele exceder de 1.5. Se tiene básicamente dos posibilidades para evitar el reencendido del arco.

- Disminuir la razón de crecimiento de la TTR
- Acelerar la regeneración dieléctrica del entrehierro

b) Régimen de elevación del voltaje de restablecimiento (REVR): El REVR se define como la pendiente de la tangente, de pendiente más pronunciada a la curva de voltaje de restablecimiento. Se expresa en voltios por microsegundo. Para un voltaje de restablecimiento que tenga una componente transitoria de una sola frecuencia, el REVR se obtiene dividiendo la amplitud máxima de la oscilación entre la duración de la primera media onda, los valores mayores de las frecuencias naturales pueden relacionarse con regímenes de elevación del voltaje de restablecimiento más altos.

El servicio del interruptor es mucho más intenso cuando se usa en una red de frecuencia natural alta, y no en una red de frecuencia natural baja, porque el REVR promedio es mucho mayor en el primer caso, en el último caso, el voltaje entre los contactos del interruptor se eleva lentamente, dando por ello más tiempo para la acumulación de la resistencia dieléctrica.

1.6.1. Expresión para el REVR

La expresión para el voltaje de restablecimiento,

$$RRRV = \frac{\partial V_c}{\partial t}$$

$$\frac{\partial V_c}{\partial t} = E_m \omega \text{sen} \omega t$$

El valor máximo del REVR ocurre cuando

$$\omega t = \frac{\pi}{2}$$

o sea

$$t = \frac{\pi}{2\omega}$$

Por lo tanto, el valor máximo del REVR es

$$RRRV_{\text{máx}} = E_m \omega$$

1.6.2. Factores que determinan las características del voltaje de restablecimiento

Después de la corriente cero, el régimen inicial de elevación y el valor máximo del voltaje de restablecimiento, dependen de la configuración de la red, de su frecuencia natural y de la posición relativa de las resistencias. La naturaleza real de la atenuación se complica en vista de que la pérdidas dependen de factores tales como la resistencia del conductor, la pérdida en el entrehierro, la pérdida dieléctrica, la corona, etc., estos factores varían conforme la frecuencia y al voltaje en diferentes formas.

En una red formada por generadores, transformadores, reactores y línea de transmisión, cada uno de estos elementos ejerce su propio amortiguamiento, por lo general, la atenuación debida a estos es demasiado pequeña para confiar en ella en lo que corresponde a la mejora del funcionamiento del interruptor. Cuando se esperan valores altos del REVR, se emplean interruptores con resistencias en derivación, el valor de tales resistencias R_p necesaria para lograr el amortiguamiento crítico es de $\frac{1}{2} \sqrt{L/C}$.

Figura 16. Tensión durante el proceso de interrupción

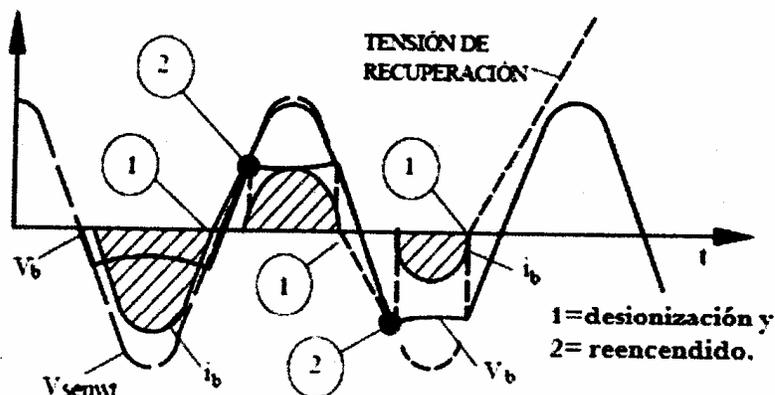
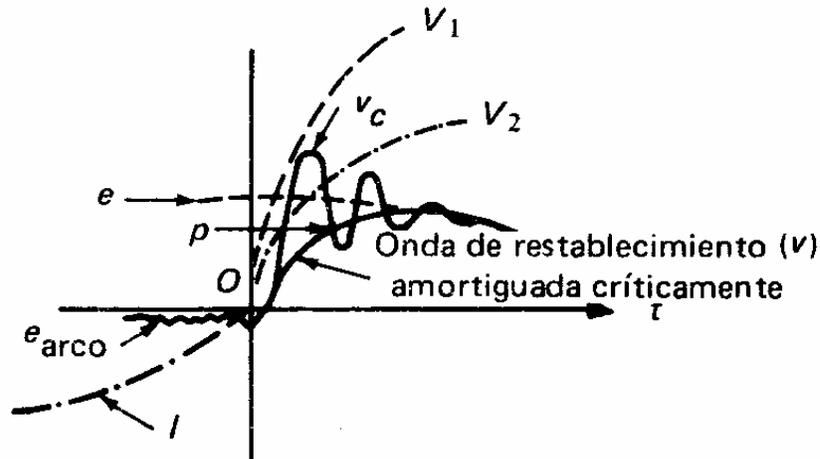


Figura17. Voltaje de restablecimiento críticamente amortiguado. E- voltaje del generador; Vc voltaje de restablecimiento cuando no está conectada ninguna resistencia en paralelo; v- voltaje de restablecimiento críticamente amortiguado cuando se tiene una resistencia en derivación; V1- resistencia dieléctrica creciente del entrehierro de los contactos, después de la interrupción de una corriente de falla pequeña; v2- resistencia dieléctrica creciente del entrehierro entre los contactos, después de la interrupción de una corriente de falla relativamente grande; i – corriente de falla; prearco – voltaje del arco; 0 – instante de extinción del arco; P – punto de intersección de las curvas del voltaje de restablecimiento Vc y la resistencia dieléctrica de recuperación. Cada intersección significa que se puede efectuar el restablecimiento del arco.



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 358

Puede inferirse, en consecuencia, que la resistencia en derivación conectada entre las terminales del interruptor, modifica al voltaje oscilatorio de restablecimiento en una onda no periódica (curva V).

Esto implica que el arco se extinga aunque sólo aumente con relativa lentitud la resistencia dieléctrica del entrehierro (curva V_2) al haber un cortocircuito severo, la inserción de la resistencia en derivación aumenta así la capacidad de ruptura del interruptor.

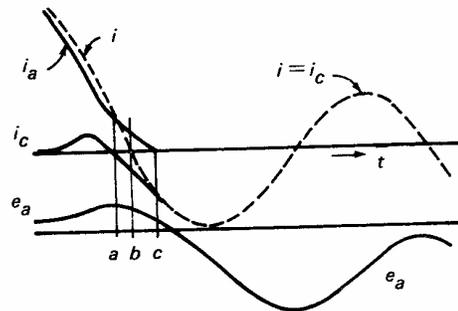
1.7. Interacción entre el interruptor y el circuito

El funcionamiento de un interruptor se puede ver claramente desde la interacción entre el interruptor mismo y el circuito, es conveniente que la corriente de cortocircuito i , en el período que rodea a la corriente cero, se considera compuesta por dos partes: la corriente del arco i_a y la corriente transitoria i_c que pasa por la parte capacitiva del circuito y que determina el voltaje de restablecimiento. El voltaje entre las terminales del interruptor e_a , está relacionado con i_a por las características dinámicas del arco y con i_c por la respuesta transitoria inherente al circuito externo, mientras que, en cualquier instante antes o después de cero, $i = i_c + i_a$.

Si e es el voltaje de alimentación en el circuito, la ecuación del circuito puede escribirse como $e = L di/dt + e_a$, considerando los eventos que ocurren desde el momento en que comienza a elevarse e_a , dicha elevación ocasiona una desviación de la corriente hacia la capacitancia en derivación C , dada por $i_c = C de_a/dt$. Esta corriente es positiva y, como $i_a = i - i_c$, se obtiene a expensas de la corriente del arco, la cual comienza, por lo tanto, a descender con mayor rapidez que i . Ahora, al acercarse al instante a , disminuye el régimen de descenso de i_a , inmediatamente después de esto, comienza a descargarse el capacitor C , dando una i_c negativa, de manera que el arco continúa alimentado tanto desde la fuente como desde el capacitor; es obvio que, durante este período, i_a es mayor que i .

En el instante b, cuando i llega a cero, el arco sólo es alimentado por el capacitor, después de este instante se invierte la corriente i y la diferencia constituye a i_a . En la dirección negativa, i se eleva a un régimen mayor que i_c hasta que en el instante c, $i = i_c$ y el arco se extingue.

Figura 18. Efecto de la capacitancia en paralelo, sobre la corriente del arco



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 363

La interacción entre el arco y el circuito puede calcularse alrededor de la corriente cero, si se conocen la constante de tiempo ζ y el régimen de disipación de la potencia del arco, así como las condiciones iniciales del intervalo de interacción. El voltaje requerido para mantener un arco a una corriente dada puede ser mucho menor que en caso estático cuando la corriente ha estado decreciendo rápidamente.

El balance térmico del arco y, por lo tanto, su temperatura y su conductividad, los determinan $P = e_a i_a$ y P_o . Si se toma R como el valor instantáneo de la resistencia del arco y ζ como la constante térmica del arco, se obtiene

$$\left(\frac{1}{R}\right) \frac{\partial R}{\partial t} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{P}{P_o} - 1\right)$$

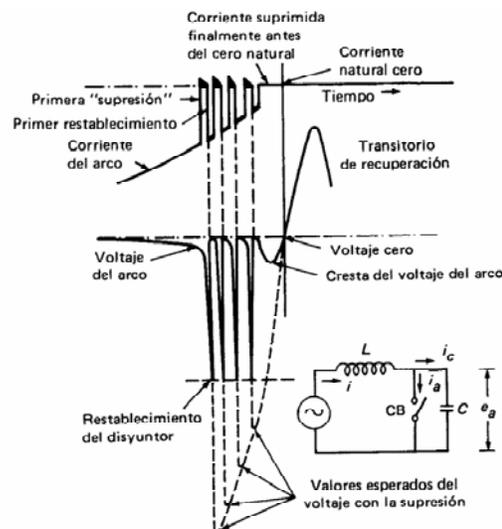
1.8. Supresión de la corriente

Cuando hay pequeñas corrientes inductivas de interrupción, tales como las corrientes de excitación de los transformadores, los interruptores tienden a despejar la falla antes de que se alcance la corriente cero natural. Esto sucede porque la trayectoria de conducción ionizada de baja corriente puede volverse prematuramente inestable, forzando a cero a la baja corriente del arco, a lo largo de un frente de onda de gran inclinación; este fenómeno se conoce como supresión de corriente y es la que explica, a su vez, la inducción de un alto voltaje transitorio entre los extremos del entrehierro del interruptor. Si la supresión ocurre a una corriente i , la energía almacenada en la inductancia es $1/2Li^2$, y se descarga en la capacitancia dispersa; igualando estas energías se obtiene un voltaje en las terminales del interruptor, $e = i^* \sqrt{L/C}$, que puede alcanzar valores peligrosos, de manera que el interruptor se restablece, la corriente se suprime de nuevo y ocurre el restablecimiento, hasta que finalmente se suprime la corriente sin que haya restablecimiento.

Este fenómeno puede analizarse desde el punto de vista del circuito, considerando que el interruptor está representado por una resistencia variable, la cual es infinita cuando el interruptor está abierto y nula cuando está cerrado, la transición de una posición a otra puede también representarse por una resistencia variable.

La disipación térmica de la falla y el incremento de voltaje entre los extremos del entrehierro de los contactos, puede ocurrir más o menos al mismo tiempo.

Figura 19. Efecto del corte de la corriente



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 365

1.9. Funciones del interruptor

Los interruptores pueden estar sujetos a esfuerzos sumamente variables, en primer lugar, la corriente varía desde unos cuantos amperes, debido a la corriente en vacío de un transformador, hasta las corrientes más intensas de cortocircuito; además, la impedancia misma del circuito puede cambiar dentro de la primera fracción, de 10^{-4} a 10^{-3} segundos, a causa de que las líneas abiertas los cables conectados a las barras de distribución en el interruptor se comportan inicialmente como resistencias, pero más adelante como capacitores.

Los interruptores no solo deben interrumpir, también deben cerrar el circuito, esto puede ocasionar ciertos problemas, particularmente si el interruptor cierra sobre un cortocircuito. En este caso, el voltaje de interrupción que puentea al entrehierro de los contactos antes de que se toquen, produce un arco de alta corriente que funde los contactos antes de su cierre; a menudo se requiere el restablecimiento automático, porque por lo general, las fallas son de naturaleza temporal.

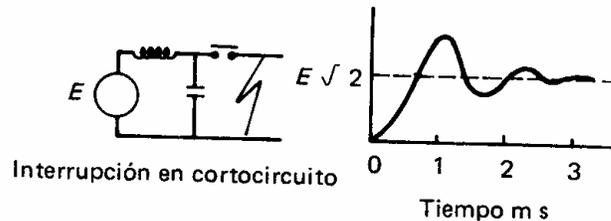
Las principales funciones que debe realizar un interruptor, además de satisfacer las capacidades nominales de interrupción y los tiempos nominales de logro e interrupción del contacto, son:

- a) Interrupción en cortocircuito
- b) Interrupción de corrientes inductivas pequeñas
- c) Interrupción de capacitores
- d) Interrupción asincrónica
- e) Interrupción de fallas de líneas cortas

1.9.1. Interrupción en cortocircuito

La corriente de cortocircuito depende del voltaje E y de la reactancia en serie X , después de que se extingue el arco en el cero natural de la forma de corriente de frecuencia nominal, el circuito se recupera y se imprime un voltaje transitorio de restablecimiento, o voltaje transitorio de recuperación (VTR) entre las terminales del interruptor. La magnitud y la forma de la onda del VTR son muy importantes para el interruptor.

Figura 20. Interrupción de un cortocircuito



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 368

1.9.2. Interrupción de corrientes inductivas pequeñas

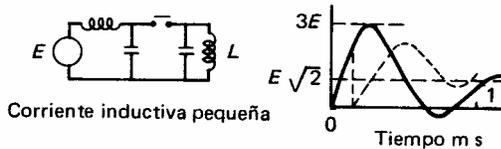
La corriente magnetizante del transformador es bastante pequeña, por lo que su interrupción no constituye problema alguno para el interruptor.

La supresión de estas corrientes antes del cero natural, ocasiona peligrosos sobrevoltajes hasta de 3.0 pu entre los extremos de la inductancia.

Es necesario proveer algunos dispositivos de protección tales como resistencias paralelas al interruptor, a través de las cuales pueda descargarse la energía del transformador sin ocasionar sobrevoltajes excesivos, o bien, apartarrayos.

Cierto tipo de interruptores pueden restablecer la conexión eléctrica cuando el voltaje en terminales del interruptor se deprime a cero, el voltaje en la inductancia reaparece subsecuentemente y a menudo es más pequeño que el voltaje si no se ha efectuado la reconexión (curva punteada).

Figura 21. Corrientes inductivas pequeñas



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

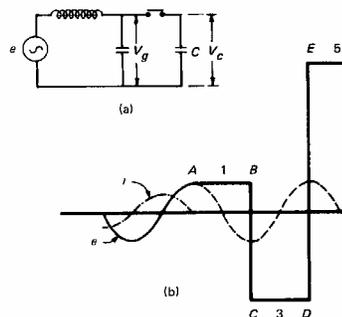
Página 368

1.9.3. Interrupción por capacitores

La interrupción de las líneas de transmisión no cargadas, o la de bancos de capacitores, impone a los interruptores la función de interrumpir corriente capacitiva con factor de potencia en adelanto, esto puede ocasionar voltajes anormalmente altos entre las terminales del entrehierro del interruptor si éste restablece la conexión. En la figura puede verse que en A, cuando se alcanza la corriente capacitiva cero, la línea de transmisión está al voltaje máximo, de manera que, cuando ocurre la interrupción de la línea se deja en una condición de carga completa hasta este valor máximo del voltaje generado; después del instante A, el entrehierro del interruptor queda sujeto a diferencias de voltaje V_c y V_g . Después de un intervalo de medio ciclo a partir de A, es decir, en el instante B, el voltaje entre las terminales del interruptor es igual al doble del valor máximo de V_g , dentro de este corto intervalo de medio ciclo, el interruptor ha estado sujeto a una condición severa y puede restablecer la conexión. Si se presenta esta condición, el voltaje entre las terminales del interruptor desciende casi instantáneamente desde 2 veces el valor máximo de V_g hasta cero, al suceder esto, se establecen oscilaciones de alta frecuencia que van haciendo ascender el voltaje hasta -3 veces el valor máximo de V_g .

La corriente de restablecimiento alcanza el valor cero, el cual proporciona una oportunidad para interrumpir; la línea se carga a un voltaje de -3 veces el valor máximo de V_g a tierra, después de la interrupción de la corriente de restablecimiento, en esta etapa, inmediatamente después de C, el voltaje entre las terminales del interruptor es sólo del doble valor máximo de V_g , debido a que el voltaje generado es máximo negativo. El voltaje entre los extremos del entrehierro continúa creciendo y, en D, alcanza un valor igual a 4 veces el valor máximo de V_g ; si el interruptor restablece nuevamente en este punto, los eventos de B se repetirán en una escala aún más grande, ya que la oscilación del voltaje será ahora de 8 veces el valor máximo de V_g y la línea puede dejarse aislada a un potencial de 5 veces el valor máximo de V_g a tierra. Teóricamente, este fenómeno puede continuarse indefinidamente, aumentando el voltaje por incrementos sucesivos de 2 veces el valor máximo de V_g , y sólo está limitado por las fugas y las pérdidas por corona o por la rotura del aislamiento el sistema, la única causa de este tipo de sobrevoltaje es la incapacidad del interruptor para proveer resistencia dieléctrica adecuada en el entrehierro después de la interrupción.

Figura 22. Interrupción de la corriente capacitiva



Fuente: B. Ravindranath

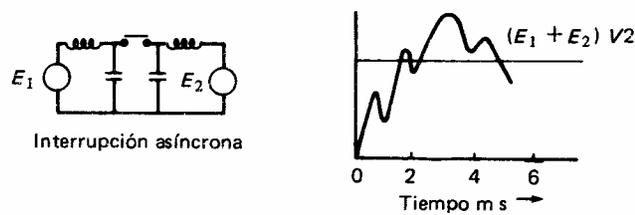
Protección de sistemas de potencia

Página 369

1.9.4. Interrupción asincrónica

Puede haber oposición de fases si el disyuntor hace el restablecimiento después de una pausa relativamente larga, durante la cual los generadores E_1 y E_2 se salgan de sincronismo, cuando el interruptor abre, el valor de pico del voltaje transitorio de recuperación lo determina la suma de E_1 y E_2 , y se aproxima a dos veces el valor de la interrupción de cortocircuito.

Figura 23. Interrupción asincrónica



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 370

1.9.5. Interrupción de falla de línea corta

La interrupción de la corriente de cortocircuito debida a fallas en los primeros kilómetros de líneas aéreas, impone un intenso trabajo al interruptor, y esto sucede porque el voltaje transitorio de recuperación que obra entre las terminales del interruptor, va acompañado de una componente de alta frecuencia, del lado de la línea, mientras que la reducción de la corriente de cortocircuito debida a la inductancia de la línea que se encuentra en cortocircuito, es solo ligeramente menor que la de una falla terminal.

El voltaje transitorio de la línea en cortocircuito es proporcional a la magnitud de la corriente de cortocircuito y la frecuencia es inversamente proporcional a la longitud de la línea que está en cortocircuito. Después de la interrupción de la corriente de cortocircuito, se deja el descenso de voltaje a lo largo de la línea en forma de carga lineal, esta carga se desvanece en la forma de onda viajera oscilando a su frecuencia natural; el régimen de elevación de estas oscilaciones es bastante elevado debido a la impedancia efectiva cambiante de la línea en cortocircuito, el REVR está expresado por la relación siguiente.

$$\text{REVR} = \sqrt{2I\omega Z}$$

En la cual:

I = corriente de cortocircuito

ω = frecuencia angular de servicio

Z = impedancia efectiva fluctuante de la línea

2. TIPOS DE INTERRUPTORES DE POTENCIA

2.1. De acuerdo a la construcción de su tanque

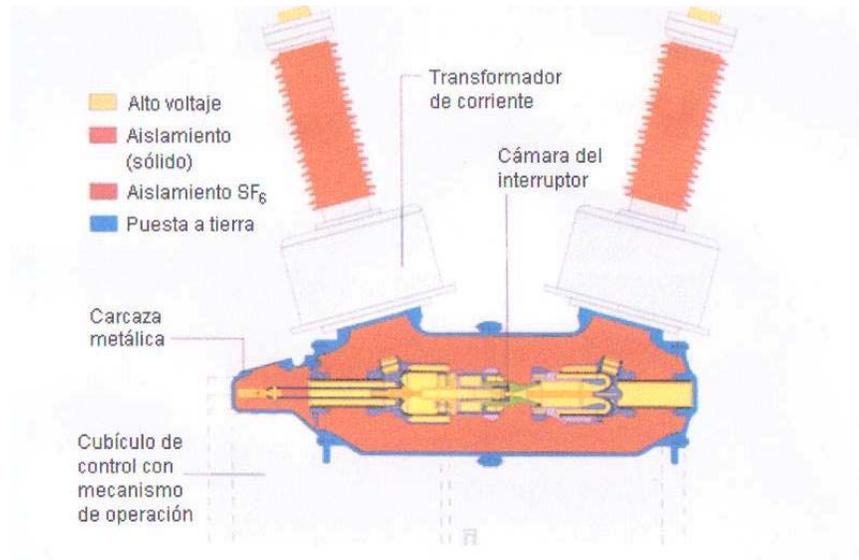
2.1.1. Tanque muerto

La característica que distingue a la tecnología de “tanque muerto” es que la cámara de interrupción es colocada en una envolvente de metal aterrizada, con este arreglo el gas SF₆ aísla las partes vivas de alta tensión del contacto de montaje de la envolvente, la conexión hacia la alta tensión es a través de boquillas en SF₆ tipo intemperie.

Los transformadores de corriente son montados directamente en las boquillas, lo cual elimina los mecanismos de sujeción y cableado requerido como en el caso del montaje externo. Este tipo de interruptores ofrece ventajas particulares si el diseño de protección requiere el uso de varios transformadores de corriente montados por polo, como para un típico sistema americano, la posibilidad de estar disponible para un arreglo de transformadores de corriente enfrente o detrás del interruptor sobre el interruptor actual, permite esquemas de protección para satisfacer de una manera especial ahorro de costos.

Además es relativamente simple para reemplazar los transformadores de corriente en el campo, los interruptores de tanque muerto son particularmente resistentes a los sismos debido a su diseño compacto y bajo centro de gravedad.

Figura 24. Interruptor de tanque muerto



Fuente: Joaquín Rodríguez

Prospectiva y ruta de aplicación de MEMS

Página 58

2.1.2. Tanque vivo

En los interruptores del tipo tanque vivo, la cámara de interrupción es colocada dentro del aislador, el cual puede ser de porcelana o de un material compuesto y está directo al alto potencial, dependiendo el nivel de tensión, se determina la longitud de los aisladores para la cámara del interruptor y la columna del aislador.

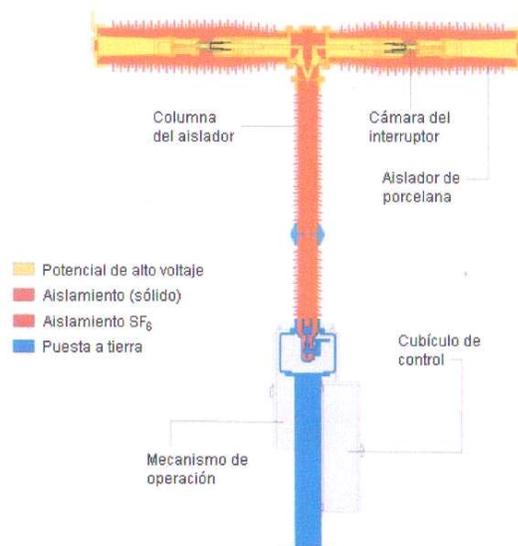
Para niveles de tensión más altos, son conectadas en serie varias cámaras de interrupción sobre el interruptor de tanque vivo e instaladas en la columna del aislador.

Los transformadores de corriente son también colocados separadamente en frente o detrás del interruptor; como en los interruptores de tanque vivo no pueden ocurrir corrientes de falla entre la unidad de interrupción y la envolvente, solo es necesario que se coloque un transformador de corriente por polo.

Una característica más de estos interruptores son sus compartimientos de gas relativamente pequeños, la ventaja del bajo volumen de gas es que hay una reducción de la cantidad de gas cuando se le da mantenimiento.

Para asegurar la correcta operación de los interruptores en regiones sísmicas, los interruptores pueden ser montados sobre estructuras antifricción, una solución que ha sido probada a más de 800 kv y ha probado su funcionamiento varias veces.

Figura 25. Interruptor de tanque vivo



Fuente: Joaquín Rodríguez

Prospectiva y ruta para la aplicación de MEMS

Página 57

2.2. Clasificación de los interruptores según su forma de extinguir el arco

Los interruptores se pueden clasificar de acuerdo a sus características constructivas; las principales características constructivas de los interruptores consisten en la forma en que se extingue el arco y a la habilidad mostrada para establecer la rigidez dieléctrica entre los contactos para soportar en buena forma (sin reencendido del arco) las tensiones de reignición, los interruptores se pueden dividir en los siguientes grupos, ordenados conforme a su aparición histórica:

1. Interrupción en aire
2. Interrupción en aceite.
3. Neumáticos (aire comprimido).
4. Hexafluoruro de azufre.
5. Vacío.

2.2.1. Interruptores de aire

El proceso de interrupción del arco en los interruptores de aire, se basa en la desionización natural de los gases por una acción enfriadora; el arco puede estirarse y tiene una resistencia que puede aumentar tanto por longitud como por confinamiento. Por lo tanto, el incremento de la resistencia de arco es tan alto, que la corriente de cortocircuito desciende y la corriente y el voltaje entran en fase, reduciendo la diferencia de fase entre el voltaje del sistema y la corriente de cortocircuito se asegura que, cuando se interrumpe la corriente del arco a su valor cero, el voltaje de recuperación tenga un valor muy bajo.

El voltaje de reestablecimiento se reduce, en consecuencia, a un valor menor y no se le deja alcanzar el valor igual al doble del voltaje máximo del sistema, un fenómeno que ocurre la mayoría de los casos cuando se interrumpe la corriente de arco a factor de potencia bajo, por medio de otros interruptores convencionales; sin embargo, la energía disipada en el arco es alta y esto limita la aplicación de la interrupción de alta resistencia a los interruptores de c.a. de potencia media y baja; también se emplea para interruptores de c.d. de potencia mediana y baja.

2.2.1.1. Métodos para incrementar la resistencia de arco

Se emplean los siguientes métodos:

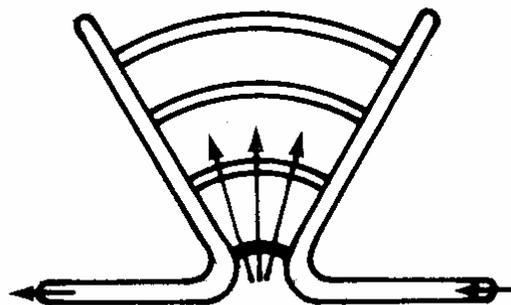
- a. Alargamiento del arco: la resistencia es aproximadamente proporcional a la longitud del arco.
- b. Enfriamiento del arco: el voltaje requerido para mantener la ionización, aumenta cuando la temperatura disminuye, por lo que logrando un enfriamiento efectivo se aumenta la resistencia.
- c. División del arco: Se absorbe un voltaje apreciable en las dos superficies de contacto, por lo que, si el arco puede dividirse en un número de pequeños arcos en serie, se reduce el voltaje disponible para la columna real del arco.
- d. Constricción del arco: Si puede constreñirse el arco en un canal muy angosto, se aumenta el voltaje necesario para mantenerlo.

2.2.1.2. Tipos de interruptores en aire

2.2.1.2.1. Interrupción simple

Los contactos tienen la forma de dos cuernos y el arco se establece inicialmente entre la distancia más corta entre los cuernos, pero luego se va desplazando en forma continua hacia arriba, por las corrientes de convección debidas al calentamiento del aire durante el arqueo y a la interacción de los campos magnético y eléctrico. El arco se extiende desde una punta hasta la otra cuando los cuernos están completamente separados, este arco se alarga y se enfría; la lentitud relativa del proceso y la posibilidad de que el arco se extienda hacia las partes metálicas adyacente limita la aplicación a alrededor de 500 V y a circuitos de baja potencia.

Figura 26. Interruptor sencillo de aire



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 381

2.2.1.2.2. Tipo de soplo magnético

En algunos interruptores de aire que se emplean en circuitos hasta de 11 KV, la extinción del arco se efectúa por medio de un soplo magnético. Para lograr esto, el arco se sujeta a la acción de un campo magnético establecido por las bobinas conectadas en serie con el circuito que se va a interrumpir, a tales bobinas se les llama bobinas de soplo porque ayudan a soplar magnéticamente el arco.

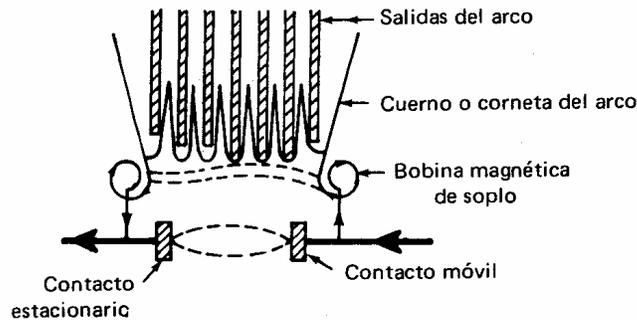
El arco es soplado hacia los chutes del arco en los que se alarga, enfría y extingue, las protecciones o barreras de arco, impide que éste se extienda a las partes metálicas adyacentes.

Conforme se ha vuelto más efectiva la acción de interrupción con corrientes fuertes, este principio ha permitido aumentar las capacidades interruptivas a valores mayores.

El chute del arco es un dispositivo muy eficiente para enfriar el arco en el aire y realiza tres funciones interrelacionadas:

- a. Confina el arco dentro de un espacio restringido.
- b. Proporciona un control magnético del movimiento del arco de manera que la extinción se efectúa dentro del dispositivo.
- c. Da la provisión para el enfriamiento rápido de los gases del arco, lo que asegura su extinción por desionización.

Figura 27. Interruptor de soplo magnético



Fuente: B. Ravindranath

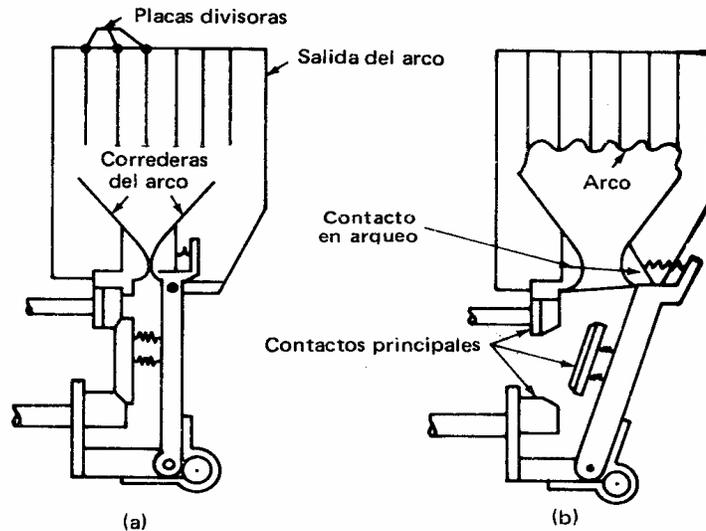
Protección de sistemas de potencia

Página 381

2.2.1.2.3. Tipo divisor de arco

En este tipo, los dispositivos de soplado consisten en insertos de acero alojados en los chutes de arqueo, están dispuestos de manera que el campo magnético, inducido en ellos por la corriente del arco se mueva hacia arriba aún a mayor rapidez; las placas de acero dividen el arco en un cierto número de arcos cortos en serie, la distribución del voltaje a lo largo del arco no es lineal, va acompañada por caídas más bien grandes en el ánodo y el cátodo. Si la suma total de las caídas del ánodo y el cátodo de todos los arcos cortos en serie es mayor que el voltaje del circuito que se va a interrumpir, se establecen automáticamente las condiciones para la extinción rápida del arco, el arco se enfría con rapidez y eficacia cuando se pone en contacto con las superficies relativamente frescas de las placas de acero. El movimiento del arco puede ser natural o ayudado por un soplado magnético, usándose este último para servicios hasta 500 MVA a 16 KV, este tipo de interruptores se vuelve más voluminoso, los chutes de los arcos más complejos y crece el costo inicial al aumentar el voltaje y los MVA.

Figura 28. Interruptor divisor de arco



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 382

2.2.1.3. Aplicación

Los interruptores en aire son adecuados, en general, para el control de los elementos auxiliares de las plantas generadoras de energía y para las plantas industriales. Cuando se eligen para tal servicio, generalmente se toma como criterio que combinan un alto grado de seguridad con un mínimo de mantenimiento, además, no requieren ningún equipo auxiliar, tal como compresores, debido a que no tienen aceite, se les recomienda en aplicaciones en las que hay peligro de incendio o explosión.

2.2.1.4. Diseño general

El interruptor consta generalmente de tres unidades monopolares unidas por una barra transversal aislada, operadas por uno o más mecanismos, de acuerdo con la capacidad de corriente. El conjunto completo, inclusive el mecanismo, va montado en un tablero de material aislante con barreras resistentes a los arcos en ambos lados del polo.

2.2.1.4.1. Unidad de polo

Cada polo está formado por una pieza moldeada aislante independiente, sobre la cual van instalados los contactos principales, los contactos de arqueo, el chute del arco, los liberadores directos instantáneos y los transformadores de corriente para la liberación térmica de la operación.

2.2.1.4.2. Contactos

De hecho, hay muchos tipos de contactos los cuales se usan en los diferentes diseños, de estos podemos mencionar:

- a. contacto principal; el cuál conduce la corriente continua nominal y consta de un contacto móvil y uno fijo.

2.2.1.4.2.1. Conjunto móvil de contactos

Estos son rodillos de cobre sólido cargados por resortes y anillados con plata, los rodillos flotantes giran en torno a sus ejes, unos cuantos grados cada vez que se cierra el interruptor, asegurando con ello una acción limpiadora.

La acción giratoria asegura el desgaste y el raspamiento uniformes en toda la superficie móvil de los contactos.

2.2.1.4.2.2. Conjunto fijo de contactos

Estos comprenden dos barras de contactos niveladas de cobre, con almohadillas de plata en las caras de los contactos. Los dos contactos fijos están instalados en derivación por medio de rodillos.

- b. Contactos de arqueo. Los contactos de arqueo tienen que soportar el efecto del arqueo, se abren antes y se cierran después que los contactos principales; su forma es tal, que aprovecha las fuerzas electrodinámicas de soplado para compensar las fuerzas de repulsión, con lo que se obtiene mayor presión de los contactos para evitar el fenómeno de golpeo, cualquiera que sea el atraso del disparo.

2.2.1.4.3. Chutes de arco

Todos los chutes de arco se fabrican de material aislante resistente a los arcos y rodean a cada unidad de polo, las dimensiones del chute dependen del número de contactos de arqueo; el chute tiene la forma de un embudo con un área restringida en su parte inferior. En la parte superior, el chute del arco aloja una rejilla de placas de acero, cuya función es aumentar la velocidad de elevación del arco hacia el chute, por una acción magnética.

2.2.1.4.4. Mecanismo de operación

Se diseña generalmente para operación manual, pero puede obtenerse un mecanismo de operación eléctrica, cargado por un resorte, para control remoto.

Los servicios que se esperan de un aparato moderno son: operación libre de disparo, apertura independiente, dispositivo de seguridad que impida el cierre y, en caso de un mecanismo que opere con energía almacenada, cierre independiente

2.2.2. Interruptores de aceite

Se utilizan ampliamente en los sistemas de fuerza, estos se emplean las propiedades del arco para la extinción del mismo; en consecuencia, usando energía del arco para romper las moléculas del aceite puede generarse gas hidrógeno para arrastrar, enfriar y comprimir el plasma del arco y así desionizarlo en un proceso de auto extinción.

2.2.2.1. Ruptura del arco en aceite

Debe observarse que, ahogando en aceite los contactos de interrupción no puede impedirse la producción de un arco durante la separación de los contactos. ; sin embargo, el calor del arco evapora inmediatamente el aceite circundante y lo disocia en carbono y un volumen sustancial de hidrógeno gaseoso a alta presión, el hidrógeno gaseoso tiene alta conductividad térmica y por esta se produce el enfriamiento de la columna del arco y de los contactos, efecto que a su vez aumenta el voltaje de ignición y extingue, en consecuencia, el arco. El hidrógeno por su alta conductividad térmica, enfría el arco tan rápidamente que el voltaje requerido para la reignición es de 5 a 10 veces mayor que el requerido para el aire y, en consecuencia, es más adecuado para la interrupción, además se produce en forma espontánea en los arcos en aceite; el arco se forma lo suficientemente profundo bajo el aceite y sin embargo, los gases en ascenso pueden incendiar la superficie del aceite, esta es una importante consideración de diseño.

Las interrupciones de las altas corrientes de cortocircuito generan presiones extremadamente elevadas que deben atenuarse en forma segura o controlarse correctamente, de hecho estas presiones altas pueden usarse para extinguir el arco mismo, al cual se deben las presiones altas adicionalmente a las fuerzas mecánicas producidas por la presión del gas y el movimiento del aceite, hay también fuerzas electrodinámicas substanciales que actúan sobre el arco; estas tienden a aumentar el área de cualquier rizo o lazo formado por la corriente en el interruptor, por lo tanto desplazan al arco al exterior y lejos de la fuente generadora.

2.2.2.2. El desarrollo de los interruptores en aceite

El desarrollo de los interruptores en aceite se realizó en tres direcciones principales:

- a) Interruptores simples en aceite
- b) Interruptores con control del arco
- c) Interruptores con mínimo volumen de aceite.

2.2.2.2.1. Interruptores de gran volumen de aceite o simples en aceite

Los primeros modelos para alta tensión en los que se usó aceite fueron de interrupción simple, sin ningún sistema especial para la extinción del arco, en este tipo el arco sólo está confinado dentro del tanque del aceite, la desionización del arco se debe enteramente a la turbulencia y al aumento de presión.

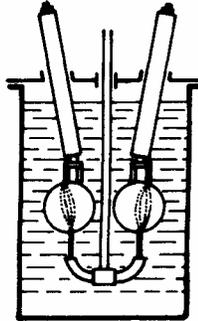
Para que la interrupción sea eficaz, es esencial tener un arco de longitud relativamente grande para que la turbulencia que ocasione en el aceite las presiones generadas por el arco la enfríe, a menudo los tiempos de arqueo y la cantidad de energía liberada antes de la interrupción varía sobre un amplio intervalo; por lo tanto en el diseño del tanque se necesita un factor de seguridad grande. El tanque debe ser hermético a la intemperie para evitar la entrada de humedad, en caso de que haya un colchón de aire arriba del aceite el hidrógeno formado puede pasar a través del aceite para mezclarse con el aire y formar una mezcla explosiva, a menos que se mantenga suficiente presión; la carga hidrostática del aceite sobre los contactos debe ser lo suficientemente grande para impedir que el gas escape a la superficie en forma de columna.

Es claro que, si los contactos se separan a alta velocidad puede aumentarse mucho la longitud del arco, debido a que recorren una mayor distancia los contactos móviles entre los ceros de corriente a los que ocurre la interrupción; si el movimiento de los contactos es lento éstos se pueden soldar al haber una interrupción de cortocircuito.

Las principales características determinantes en el funcionamiento de un interruptor simple, son:

1. la longitud de la interrupción
2. la velocidad del movimiento de los contactos
3. la carga hidrostática del aceite sobre los contactos
4. la holgura de las partes metálicas adyacentes a los contactos.

Figura 29. Interruptor en gran volumen de aceite



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 387

Aumentando el tamaño del tanque, la cabeza hidrostática del aceite, la longitud de interrupción y el aislamiento, pueden obtenerse interruptores para mayores voltajes y capacidades interruptivas.

2.2.2.2. Interruptores con control del arco

En estos, los gases que se producen durante el arqueo son confinados a volúmenes pequeños mediante una cámara aislante de arco rígido, que circunda a los contactos. En consecuencia pueden desarrollarse presiones mayores para forzar el aceite y el gas a través del arco alrededor de él, para extinguirlo, estas pequeñas cámaras para el control del arco o cámaras de explosión, aparte de contribuir con su eficiencia a la interrupción del arco, estas cámaras de explosión han reducido considerablemente los riesgos de incendio; con la mejoras en el diseño de las cámaras del control del arco, se han logrado grandes reducciones tanto en la duración del arco como en el tiempo total de interrupción.

2.2.2.2.3. Cámaras para el control del arco

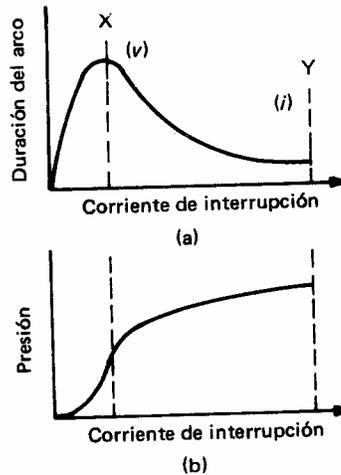
A medida que el arco mismo desarrolla la presión necesaria para producir el soplo de su extinción, es de esperarse que aumente la presión al aumentar la corriente del arco. Debido al aumento de presión se produce un soplo más potente y una mayor resistencia eléctrica por unidad de longitud de la trayectoria del arco; debido a esto el voltaje transitorio de restablecimiento puede ser soportado por entrehierros más cortos entre los contactos móviles y los estacionarios.

En consecuencia, al aumentar la corriente, la extinción del arco se efectúa con arcos cada vez más cortos.

Al examinar la curvas típicas de las cámaras de explosión, se ve que la capacidad limitadora de una cámara puede lograrse ya sea porque el tiempo de arqueo en la cresta X se vuelve infinito, es decir, porque la cámara falla en la eliminación del arqueo, o porque la presión en Y se puede volver tan alta que la cámara explota.

Para una cámara dada, la máxima duración del arco que se logran en X es, principalmente, función de la magnitud y del régimen de elevación del voltaje transitorio de restablecimiento, mientras que la presión máxima que se logra en Y es, principalmente, función de la magnitud de la corriente e independiente del voltaje transitorio de restablecimiento sobre un intervalo muy amplio.

Figura 30. Características típicas de la cámara de explosión



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 389

El diseño de las cámaras para alta tensión se convierte, en esencia, en la búsqueda de una forma para asegurar que haya suficiente presión en X y también para tener la seguridad de que el arco rompa positivamente de forma que la presión en Y no sea lo suficientemente elevada como para hacer explotar la cámara.

2.2.2.2.4. Interruptores de pequeño volumen de aceite

Este tipo, que tiene forma de columna, fue inventado en Suiza por el Dr. J. Landry, por el pequeño consumo de aceite, son muy utilizados en Europa, en tensiones hasta 230 kV y de 2,500 MVA de capacidad interruptiva, en general se usan en tensiones y potencias medianas; este interruptor utiliza aproximadamente un 5% del volumen de aceite del caso anterior.

La potencia de apertura es limitada sólo por la presión de los gases desarrollados por el arco, presión que debe ser soportada por la resistencia mecánica de la cámara de arqueo. Para potencias interruptivas altas, el soplo de los gases sobre el arco se hace perpendicularmente al eje de los contactos, mientras que para potencias bajas, el soplo de los gases se inyecta en forma axial.

Los contactos de estos interruptores pueden soportar, según estadísticas de los fabricantes, el siguiente número de operaciones sin requerir su cambio.

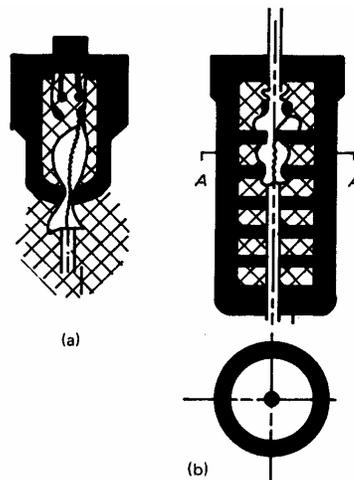
A corriente nominal	4,000 operaciones
A la mitad de la potencia máxima de cortocircuito	8 operaciones
A plena potencia de cortocircuito	3 operaciones

En este tipo de interruptores, se utilizan materiales sólidos para el aislamiento y sólo el aceite suficiente para el enfriamiento del arco, el dispositivo de interrupción está alojado en un tanque de material aislante, la totalidad del cual está al voltaje de la línea en operación normal; pueden ser del tipo autosoplado, soplado externo o de una combinación de lo dos.

En los de autosoplado, la fuerza con la que el arco se enfría se adapta por sí misma a la corriente que ha de interrumpirse; mientras mayor sea la corriente de cortocircuito, mayor será la cantidad de aceite que se descomponga y mayor la cantidad de gas que se forme para el enfriamiento del plasma. Por esta razón, el interruptor de autosoplado del tipo de aceite mínimo, enfría el arco con mayor eficacia cuando aumenta la corriente, sin embargo también aumenta la presión del gas en el interior de la cámara cuando aumenta la corriente de cortocircuito, lo cual impone una limitación de esfuerzo mecánico.

El principio de enfriamiento del arco no es el que determina el límite de la capacidad interruptiva, sino la resistencia mecánica de la cámara de arqueo; mediante el uso de materiales aislantes modernos para la manufactura de las cámaras de arqueo, los interruptores pueden llenar fácilmente los requisitos de mayores niveles de falla que tengan los sistemas.

Figura 31. Cámara de arqueo que se usan en los interruptores de aceite mínimo: a) cámara de arqueo simple, llamada cámara de explosión; b) cámara de arqueo con ventilación axial.



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 394

En la mayoría de los diseños que se usan actualmente, se aplica el principio de autogeneración del soplo; en el diseño de sus cámaras de arqueo, se emplean dos tipos de ventilación, a saber, la ventilación axial y la radial. En la ventilación axial, los gases recorren el arco en su dirección longitudinal, y en la ventilación radial, soplan el arco en la dirección transversal.

La ventilación axila tiene la ventaja de que genera altas presiones y tiene también alta resistencia dieléctrica, se aplica principalmente cuando se trata de interrumpir corrientes bajas a voltajes elevados. La ventilación radial genera presiones bajas y también tiene baja resistencia dieléctrica, es adecuada principalmente para interrumpir corrientes de alto amperaje a voltajes bajos.

2.2.3. Interruptores neumáticos

Su uso se origina ante la necesidad de eliminar el peligro de inflamación y explosión del aceite utilizado en los interruptores en los dos casos anteriores.

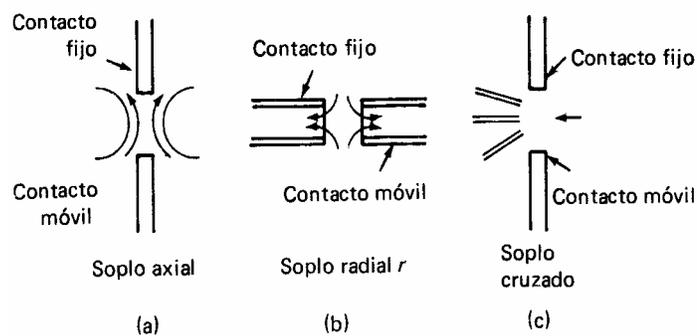
En este tipo de interruptores el apagado del arco se efectúa por la acción violenta del chorro de aire que barre el aire ionizado por efecto del arco. El poder de ruptura aumenta casi proporcionalmente a la presión del aire inyectado; la presión del aire comprimido varía entre 8 y 13 Kg./cm. dependiendo de la capacidad de ruptura del interruptor, la extinción del arco se efectúa en un tiempo muy corto, del orden de tres ciclos, lo cual produce sobretensiones mayores que en los casos anteriores.

2.2.3.1. Métodos de interrupción

Todos los interruptores neumáticos siguen el principio de separar sus contactos en una corriente de aire que se establece al abrir una válvula de soplado; el arco generalmente se sitúa con rapidez en un lugar central a través de una boquilla en la que se mantiene una longitud fija y se sujeta a un arrastre máximo que ejerce la corriente de aire. Los arreglos varían, pero pueden agruparse en tres tipos, a) soplado axial, b) soplado radial y c) soplado cruzado.

Los voltajes más altos parecen favorecer a los soplados axial y radial aunque los de soplado cruzado, particularmente para voltajes alrededor de 15 KV y altas corrientes (hasta 100 KA), han demostrado ser satisfactorios y requieren menos aire.

Figura 32. Interruptor neumático



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 394

Es bien reconocido que la principal ventaja estructural de los interruptores de soplado axial, sobre los de soplado cruzado, es su fácil adaptabilidad al aislamiento para voltajes altos, particularmente para aplicaciones de intemperie, esto sucede porque las cámaras de interrupción pueden encerrarse completamente en tubos de porcelana, en consecuencia, el interruptor de soplado axial es ideal para aplicaciones de voltajes altos y súper altos, así como para exteriores, o sea para ambientes en los que se encuentren polvos y humos corrosivos.

2.2.3.2. Principio de operación

La interrupción neumática depende del enfriamiento turbulento y en ella influyen por lo tanto, la configuración aerodinámica de los chiflones, los pasajes para la corriente del gas y el flujo de masa.

El aire comprimido es un aislante excelente y se le fuerza hacia el arco en el instante de separación de los contactos, el aire comprimido arrastra el arco a través de la boquilla o chiflón y ésta ayuda a expulsar el gas caliente, y los productos del arqueo hacia la atmósfera.

De esta manera, el interruptor neumático efectúa su ciclo de operación con sus características ideales; la extinción se efectúa con la primera corriente cero, cuando la corriente de aire comprimido aumenta rápidamente para establecer la resistencia dieléctrica entre los electrodos y soportar el voltaje de restablecimiento.

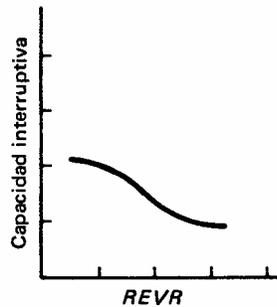
El crecimiento de la resistencia dieléctrica es rápido, y la presión del aire tan alta, que el entrehierro final, ocasionado por la interposición de la capa aislante de aire entre los contactos, puede ser pequeño, lo que reduce el tamaño del dispositivo.

2.2.3.3. Factores que influyen en el funcionamiento de los interruptores neumáticos

Hay un cierto número de parámetros limitados que influyen en el funcionamiento del disyuntor; a continuación se examinan los más importantes de estos factores:

- a) Presión del aire. El aire puede comprimirse con facilidad y se ha demostrado que la capacidad de interrupción dieléctrica aumenta hasta por lo menos 150 atmósferas. Por lo tanto, para la misma estructura de contactos, puede esperarse que el funcionamiento varíe en función de la presión. Los resultados indican que por la presión en el chiflón, hay un incremento lineal de la capacidad interruptiva, alcanzándose el límite inferior cuando el ajuste del entrehierro de los contactos no puede soportar el voltaje. La utilización de gas a alta presión permite tener altas velocidades en el mecanismo y logra un corte rápido del arco.
- b) Severidad del circuito. Los interruptores neumáticos son sensibles a las variaciones del régimen de elevación del voltaje de restablecimiento (REVR), el cual se toma normalmente como una medida de la severidad del circuito. Como el efecto del soplo es constante para todas las corrientes, al aumentar los MVA, disminuye la velocidad con la que el entrehierro recupera su resistencia dieléctrica, la cual varía aproximadamente en razón inversa de la cantidad de ionización, es decir, en razón inversa a la corriente. A valores bajos de MVA, el disyuntor puede aceptar mejores valores del REVR que mayores valores de MVA.

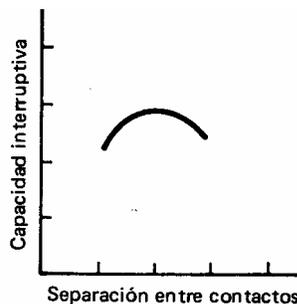
Figura 33. Variación con el REVR de la capacidad interruptiva



Fuente: B. Ravindranath
Protección de sistemas de potencia
Página 403

- c) Distancia entre contactos. La mejor condición para la extinción del arco se obtiene con una distancia específica óptima entre los contactos. Si esta distancia se aumenta o disminuye, la extinción del arco se vuelve menos efectiva; es posible obtener una relación que ligue el funcionamiento con la geometría de la estructura de los contactos.

Figura 34. Variación con el entrehierro de la capacidad interruptiva



Fuente: B. Ravindranath
Protección de sistemas de potencia
Página 403

- d) Material de los contactos. El funcionamiento mejora usando metales con un alto punto de ebullición, tales como los compuestos de tungsteno y cobre, con estos metales puede aumentarse la capacidad interruptiva, reducirse considerablemente el quemado y la erosión, y minimizarse la emisión de flama.
- e) Área de la sección transversal del orificio de salida. La capacidad de interrupción aumenta con el área de la sección transversal del orificio a través del cual escapan los gases calientes y descompuestos. Esto lo explica el hecho de que el arco libera grandes cantidades de calor en tiempos muy breves, y que el aire que se encuentra dentro de la cámara se expande súbitamente.
- f) Interrupción por resistencia. La resistencia conectada en paralelo con el interruptor, amortigua las oscilaciones de voltaje. Cuando el voltaje y los MVA de un circuito son fijos, los efectos transitorios se pueden modificar solamente con el aumento de C o con la reducción de R, aumentar C es antieconómico, pero la reducción de R puede lograrse poniendo el interruptor en derivación, usando una resistencia durante el período de interrupción.

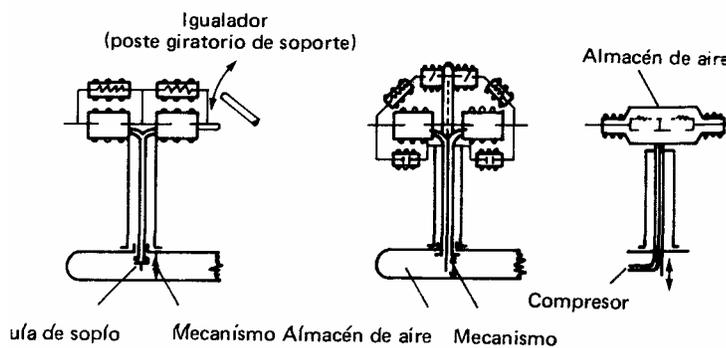
2.2.3.4. Desarrollo de los interruptores neumáticos

El desarrollo de los interruptores neumáticos se realizó en tres etapas, las cuales describimos a continuación:

- a) Interruptores de aire presurizados momentáneamente, con igualador en la atmósfera
- b) Interruptores de soplo de aire presurizados momentáneamente con igualador en cámara separada presurizada.

c) Interruptor de soplo de aire presurizados permanentemente don igualador en cámaras presurizadas separadas.

Figura 35. Disposición eléctrica de los interruptores principal y auxiliar, con capacitores y resistencias de graduación



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 410

En el primer diseño, la válvula de soplo del aire se coloca dentro del tanque de almacenamiento a potencial de tierra y los contactos son separados por la presión del aire que actúa contra un resorte, el soplo se elimina después de alrededor de 100 ms y vuelven a cerrarse los contactos. Un brazo, igualador abre en aire libre, alrededor de 40 ms después de que los contactos principales interrumpen la corriente de unos cuantos amperes que pasa por las resistencias de graduación del voltaje.

En la segunda serie de los interruptores neumáticos, la operación de disparo se logra admitiendo aire comprimido dentro del interruptor cuando se abre la válvula principal.

El aire activa el pistón haciendo que se abran los contactos y luego extingue el arco, los gases de descarga se expanden hacia la atmósfera y son expulsados por los chiflones; unas cuantas centésimas de segundo más tarde las válvulas se cierran y el aire comprimido ya no puede expulsar más a la atmósfera, los contactos se mantienen abiertos en aire comprimido el interruptor puede permanecer indefinidamente en esta posición.

En la tercera serie de estos interruptores, el aire comprimido siempre se almacena al 100% del valor nominal, la operación de disparo se logra por medio de un relevador auxiliar que primero abre las válvulas de descarga, operación que va seguida por la apertura de los contactos. Unos cuantos ms más tarde se vuelven a cerrar las válvulas de descarga o de alivio, mientras que los contactos se mantienen abiertos; al cerrar, los contactos se cierran por la acción despresurizadora mientras que las válvulas permanecen todavía cerradas.

Debido a que estos interruptores producen mayores sobretensiones, es común entre los diversos fabricantes insertar en paralelo con los contactos principales resistencias amortiguadores y capacitancias que producen altas impedancias y reparten las tensiones de las cámaras, los diagramas más utilizados son los siguientes.

Resumiendo las características de estos interruptores se puede decir lo siguiente:

- Los tiempos de maniobra son muy cortos, lo cual limita la duración de los esfuerzos térmicos que originan los cortocircuitos y, por lo tanto, se reduce el desgaste de los contactos.

- Son aparatos de construcción sencilla; se emplean los mismos elementos interruptivos para todas las tensiones, lo cual reduce el almacenaje y el costo de las piezas de repuesto.
- Pueden efectuar cierres con tiempos mínimos y potencias de cortocircuito elevadas.
- El mantenimiento es sencillo y rápido, no tienen peligro de incendio.

2.2.4. Interruptores en hexafluoruro de azufre

Son aparatos que se desarrollaron al final de la década de los sesenta y cuyas cámaras de extinción operan dentro de un gas llamado hexafluoruro de azufre (SF_6), que tiene una capacidad dieléctrica superior a otros fluidos dieléctricos conocidos, esto hace más compactos y más durables los interruptores desde el punto de vista de mantenimiento.

Propiedades del SF_6 . Es un gas químicamente estable e inerte, su peso específico es de 6.14 g/l. Alcanza unas tres veces la rigidez dieléctrica del aire a la misma presión, a temperatura de $2,000^\circ\text{K}$ conserva todavía alta conductividad térmica, que ayuda a enfriar el plasma creado por el arco eléctrico y al pasar por cero la onda de corriente, facilita la extinción del arco. Físicamente el gas tiene características electronegativas, o sea, la propiedad de capturar electrones libres transformando los átomos en iones negativos, lo cual provoca en el gas altas características de ruptura del arco eléctrico y por lo tanto gran velocidad de recuperación dieléctrica entre los contactos, después de la extinción del arco.

En los primeros interruptores se usaron dos presiones; la menor de 3 bars, llenando los tanques y la mayor de unos 18 bars, dentro de las cámaras de extinción.

Esto se hizo con el fin de evitar que al abrir el interruptor sus contactos, el sople de gas produjera enfriamiento y el gas pasara al estado líquido, posteriormente se ha usado una sola presión, con lo cual se disminuye el tamaño de los interruptores en un 40%, y la cámara al abrir los contactos tiene un émbolo unido al contacto móvil, que al operar comprime el gas y lo inyecta sobre el gas ionizado del arco, que es alargado, enfriado y apagado al pasar la corriente por cero.

Los interruptores pueden ser de polos separados, cada fase en su tanque, o trifásicos en donde las tres fases utilizan una misma envolvente. Se fabrican para tensiones de 115kV hasta 800kV y las capacidades de interrupción varían de acuerdo con el fabricante, llegando hasta magnitudes de 80 kA, que es un caso muy especial.

Este tipo de aparatos pueden librar las fallas hasta en dos ciclos y para limitar las sobretensiones altas producidas por esta velocidad, los contactos vienen con resistencias limitadoras.

Las principales averías de este tipo de interruptores son las fugas de gas, que requieren aparatos especiales para detectar el punto de fuga; en un aparato bien instalado, las pérdidas de gas deben ser inferiores al 2% anual del volumen total de gas encerrado dentro del aparato.

En caso de pérdida total de la presión del gas y debido a la alta rigidez dieléctrica del SF₆, la tensión que pueden soportar los contactos cuando estén abiertos es igual al doble de la tensión de fase a tierra. De cualquier forma, no es conveniente operar un interruptor de SF₆ cuando ha bajado su presión por una fuga y debe de ser bloqueado el circuito de control de apertura para evitar un accidente.

En los interruptores trifásicos, la apertura de los contactos es simultánea, aunque conviene que haya dispersión de un milisegundo entre los tres polos; se entiende por dispersión a la diferencia de tiempo que existe entre el instante de cierre del primero y el instante de cierre del último polo del interruptor; el uso de la dispersión es importante, ya que sirve para reducir las sobretensiones debidas a impulsos por maniobra.

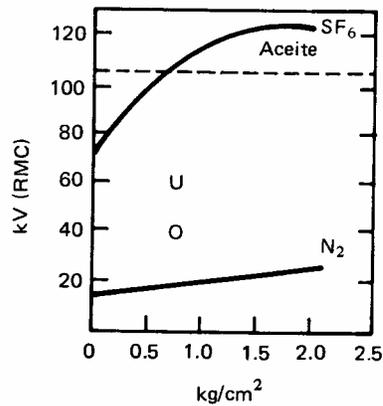
Sí el interruptor es de operación monopolar, puede ser benéfico usar cierre monopolar, aquí la dispersión puede aumentar hasta 4 milisegundos, cuya magnitud empieza a producir efectos adversos en la magnitud de las sobretensiones por maniobra, el mecanismo de mando de estos interruptores es generalmente, de aire comprimido.

2.2.4.1. Propiedades dieléctricas del SF₆

A la presión atmosférica, la resistencia dieléctrica del SF₆ es aproximadamente igual a 2.5 veces la del aire, en realidad este valor depende de la naturaleza del campo existente entre los electrodos, el cual depende a su vez de la forma y configuración de los electrodos y del entrehierro que los separa, en la práctica la resistencia dieléctrica puede aumentar alrededor de 5 veces, dependiendo de la falta de homogeneidad del campo.

Examinando las curvas, puede verse que la resistencia dieléctrica, que es 30% menor que la del aceite a la presión atmosférica, aumenta rápidamente al aumentar la presión, este alcanza un valor igual que en el aceite a una presión a 650 g/cm.², y a una presión de 1.25 Kg./cm.² es aproximadamente 15% mayor.

Figura 36. La resistencia dieléctrica contra la presión



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 410

Este gas es altamente electronegativo, lo cual significa que se remueven con facilidad los electrones libres de una descarga, por la formación de iones negativos, mediando proceso por los cuales un electrón libre se adhiere a una molécula neutral de gas, la adherencia se puede realizar en dos formas:

1. Como adherencia directa
2. Como adherencia disociativa

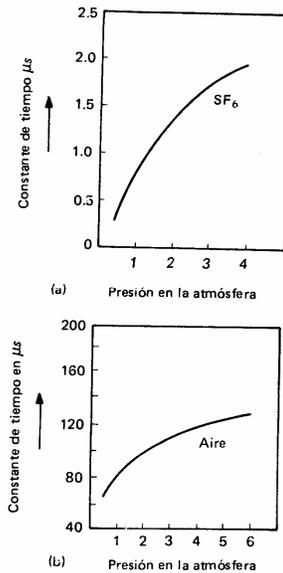
Los iones resultantes, son pesados y relativamente inmóviles, que son en consecuencia, inefectivos como portadores de corriente, por lo que el SF₆ tiene una resistencia eléctrica a igual densidad, tan alta como los gases ionizados.

2.2.4.2. Propiedades de enfriamiento del SF₆

La extinción de un arco de c.a. en el instante del cero de la corriente es influenciado principalmente por la velocidad con la que la resistencia dieléctrica en el entrehierro de los contactos se regenera, inmediatamente antes y después del paso del cero de la corriente. Su eficacia como medio de enfriamiento para un arco puede explicarse por la baja constante dinámica de tiempo de los arcos que se forman en él; en el caso de los arcos cilíndricos, la constante de tiempo (H) es función del cuadrado del radio del arco (r), por lo tanto, debe mantenerse al mínimo el radio de un arco que se aproxima a cero.

El SF₆ tiene una característica térmica favorable que es función de la temperatura, es decir, la conductividad térmica es baja entre 3000° K y 7000° K mientras que es alta debajo de 3000° K. La constante de tiempo baja del SF₆ se debe a su capacidad para que las moléculas de este gas capturan a los electrones libres; estos iones rodean el arco y forman una barrera aislante, este reduce el diámetro de la columna del arco y da origen a una reducción de la constante de tiempo, condición que ayuda al enfriamiento del arco.

Figura 37. Constantes de tiempo del SF₆ y del aire, en función de la presión



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 446

2.2.4.3. Comportamiento del gas SF₆ en el arco

La alta temperatura del arco hace que el SF₆ se descomponga en átomos, electrones y iones, estos componentes atómicos no se recombinan completamente al enfriarse para formar el gas SF₆, sino que forman productos gaseosos moleculares bajos, fluoruros de azufre y compuestos con los metales de los contactos, como por ejemplo fluoruros de cobre. Cuando el gas se bombea de regreso al tanque de alta presión, los productos procedentes de las reacciones secundarias de los gases, se separan del circuito mediante filtros que contienen óxido de aluminio activado, los fluoruros se depositan como una delgada película de polvo fino no conductora e inofensiva.

2.2.4.4. Partes esenciales de un interruptor de SF₆

Las partes esenciales de un interruptor de SF₆ son: a) el tanque, b) las unidades interruptoras, c) el mecanismo de operación, d) los bushings o casquillos y e) el sistema de gas.

2.2.4.4.1. Tanque

Debido a que las propiedades aislantes del SF₆ son mejores, se reduce mucho la distancia entre las partes que están al potencial de la línea y las partes aterrizadas; no se originan presiones debidas a la operación en SF₆, los tanques se diseñan para una presión de casi cuatro veces y se prueban a seis veces la presión. El eje rotatorio que transmite el movimiento mecánico al exterior del tanque, va sellado por anillos de teflón en forma de V, los cuales no son afectados por un cambio en la temperatura ambiente.

2.2.4.4.2. Unidades interruptoras

Generalmente se emplea teflón, material que es resistente al arqueo y cuya contaminación en el gas es despreciable. Las disposiciones de los interruptores varían desde los contactos de interrupción simple hasta los diseños con sopleo de gas, por su gran capacidad para la interrupción del arco, la corriente de gas que pasa por el orificio es pequeña y también las presiones que producen dicha corriente y que se requieren para la extinción del arco.

2.2.4.4.3. Mecanismos de operación

En la operación el resorte de disparo acciona los contactos móviles y abre simultáneamente la válvula del recipiente de presión; el gas a presión fluye hacia las cámaras de interrupción y extingue el arco, al término de la operación el mecanismo libera la válvula del recipiente de presión, la cual se cierra debido a la acción de un grupo de resortes.

2.2.4.4.4. Bushings o casquillos

Estos contienen SF₆ a una presión de 2 kg./cm.² y son más sencillos que los bushings o casquillos del condensador; contienen un conductor hueco, una brida de fijación, los aisladores de porcelana superior e inferior y los resortes que mantienen unido al conjunto. El gas que hay en los casquillos se comunica con el tanque a través de pequeños agujeros que hay en la parte superior del conductor hueco, el gas de los casquillos no es afectado por ninguna perturbación que ocurra en el instante en que se interrumpa la corriente, en el fondo del conductor hueco se coloca un filtro que contiene aluminio activado, el cual elimina la probabilidad de contaminación des SF₆ dentro del casquillo.

2.2.4.4.5. Sistema de gas

Un compresor envía de regreso el gas después de cada interrupción al recipiente de alta presión, siendo un circuito cerrado, no escapa gas a la atmósfera; debajo de cada tanque hay un recipiente auxiliar de gas, que contiene suficiente gas para cuatro interrupciones consecutivas sin necesidad de poner en marcha el compresor.

2.2.5. Interruptores en vacío

El alto vacío tiene dos propiedades extraordinarias: 1) tiene la máxima resistencia aislante que se conoce y 2) cuando se abre un circuito c.a. por la separación de los contactos en vacío, la interrupción se efectúa en el primer valor cero de la corriente, acumulándose la resistencia dieléctrica entre los contactos a una velocidad miles de veces mayor que la obtenida con los interruptores convencionales, estas propiedades hacen más eficientes a los interruptores de vacío, a la vez que menos voluminosos y más baratos, la vida de servicio es también mucho mayor que la del equipo convencional y difícilmente requieren mantenimiento.

Esta tecnología aparece en el año de 1,960. Son aparatos que, en teoría, abren en un ciclo debido a la poca inercia de sus contactos y a su corta distancia, los contactos están dentro de botellas especiales en las que se ha hecho el vacío casi absoluto; el contacto fijo está sellado con la cámara de vacío y por el otro lado entra el contacto móvil, que también está sellado al otro extremo de la cámara y que, en lugar de deslizarse, se mueve junto con la contracción de un fuelle de un material que parece ser una aleación del tipo de latón.

Al abrir los contactos dentro de la cámara de vacío, ni se produce ionización, y por tanto, no es necesario el soplado del arco, ya que éste se extingue prácticamente al paso por cero después del primer ciclo.

En estos interruptores, el arco se produce a través del vapor metálico, el vapor se obtiene al abrirse las cavidades que se introducen en el metal de los electrodos a la hora de su fundición y se desprende con la fusión del material producida por el arco.

El vapor metálico controla el arco y su dosificación en la aleación regula la intensidad del mismo, evitando que si hay un valor excesivo se provoque un reencendido y si el valor es mínimo se produce una sobretensión elevada, el control del vapor metálico generado es el meollo del diseño de este interruptor.

La vida del interruptor según diferentes fabricantes es de unas 200,000 operaciones en vacío y de 10,000 con corriente de hasta 600A, lo cual provoca una duración de las cámaras en un promedio de 20 años.

Los dos inconvenientes principales son:

- Que por algún defecto o accidente se pierda el vacío de la cámara, y al entrar el aire y producirse el arco reviente la cámara.
- Debido a su rapidez produce grandes sobretensiones entre sus contactos y éstos emiten ligeras radiaciones de rayos X.

2.2.5.1. Comportamiento del arco en el vacío

Cuando la separación se realiza en el aire, las moléculas ionizadas son, probablemente, las principales portadoras de las cargas eléctricas y a ellas se debe el bajo valor de interrupción. Con el arco al vacío, los átomos neutrales, los iones y los electrones, deben provenir finalmente, de los electrodos mismos y no del medio en el que se forma el arco; a medida que se separan los contactos portadores de corriente, la corriente se concentra en unos cuantos sitios altos de las superficies de los contactos.

La conducción normal a través del metal cesa cuando se evapora el último puente entre los dos contactos; los fenómenos que ocurren en los sitios activos de los electrodos de un disyuntor al vacío son semejantes a los fenómenos convencionales de los arcos de alta presión, en los que la densidad de corriente está en el intervalo de 10^5 a 10^6 amperes/cm.² En el arco que se forma al vacío, la emisión ocurre solamente en las manchas o regiones del cátodo y no proviene de la superficie entera. Por esta razón, al arco en vacío se le conoce también como arco de cátodo frío, de hecho, la emisión de los electrones y de los iones procedentes de los sitios del cátodo, pueden deberse a los siguientes mecanismos.

1. Emisión termoiónica
2. Emisión del campo
3. Emisión termoiónica y de campo
4. Emisión secundaria resultante del bombardeo de iones positivos
5. Emisión secundaria de fotones
6. Emisión de restricción

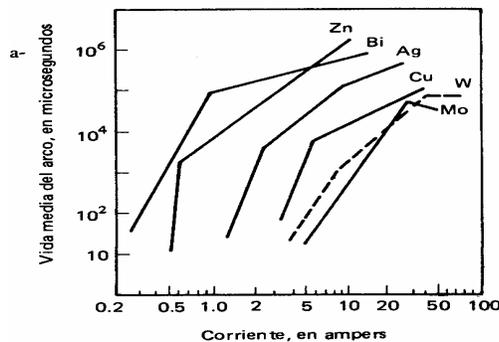
A corrientes altas, el vapor de metal ionizado se extiende en un volumen bastante grande en torno a los electrodos; a corrientes bajas, la cantidad de vapor que se produce se reduce considerablemente, como el vapor que se desprende de las manchas o regiones del cátodo se expande rápidamente en el vacío, se vuelve crecientemente pequeña la probabilidad de mantener una densidad portadora de carga suficiente para retener la conductividad adecuada en la columna y sostener el proceso de emisión.

2.2.5.2. Estabilidad del arco en el vacío

Se ha demostrado que la estabilidad del arco depende de 1), el material de los contactos y su presión de vapor, y 2), parámetros del circuito tales como voltaje, la corriente, la capacitancia y la inductancia. En circuitos de corriente baja, la mayor parte de la evaporación se realiza en puntos discretos conocidos como manchas o regiones del cátodo; a corrientes más altas, el gas se evapora en las manchas o regiones del cátodo al ánodo; adicionalmente a estas fuentes, alojamiento de los contactos se le agrega gas cuando éste se obtiene de otras partes de alojamiento debido a la alta temperatura y al choque del vapor del metal.

Mientras mayor es la presión del vapor a temperaturas bajas, mayor será la duración del arco; poniendo en derivación los contactos, con diferentes valores de capacitancia, se demuestra que a mayor capacitancia menor es la vida media del arco. Agregando una inductancia grande en serie se logra un incremento de la duración del arco, el nivel de corte depende de la presión del vapor y de la conductividad térmica del cátodo.

Figura 38. Vida media del arco contra la corriente, para diversos metales



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

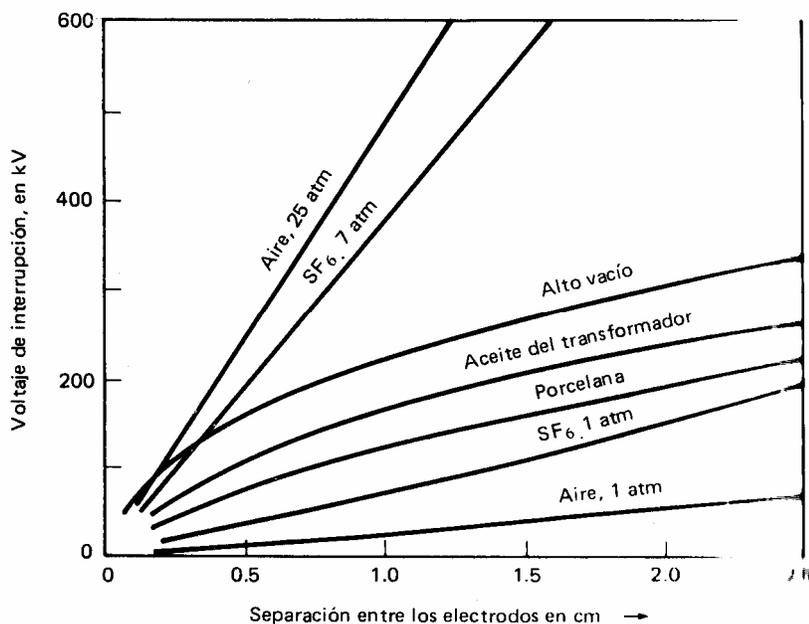
Página 435

2.2.5.3. Interrupción en vacío

Típicamente, el voltaje que puede soportar un entrehierro disminuye cuando la presión se reduce a un mínimo luego comienza a elevarse rápidamente cuando hay una reducción ulterior de la densidad de gas ambiente.

Cuando la presión se reduce abajo del punto en que la trayectoria libre medida de las moléculas del gas residual es del orden de las dimensiones del tubo, el voltaje de interrupción deja de depender del gas contenido entro del recipiente y es influenciado, con más intensidad, por la composición, la condición y la disposición de las superficies de los electrodos y de las paredes el tubo.

Figura 39. Resistencia a la interrupción de varios materiales aislantes



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 436

La iniciación de la interrupción al vacío, como la del arco formado al vacío, debe depender de los productos que se forman bajo la acción de campos altos, desde los electrodos y las paredes, que son bombardeados por los electrones emitidos por el campo; más que del medio en el que están sumergidos los electrodos. El valor real del voltaje de interrupción para un entrehierro dado, depende en alto grado del estado en que se encuentren las superficies de los electrodos; en general la resistencia a la interrupción después del arqueo, puede mejorarse aplicando impulsos en sucesión de alto voltaje.

2.2.5.4. Corte de corriente

Al disminuir la intensidad de la corriente, el arco tiende a extinguirse a un nivel finito de la corriente, cuyo valor depende de la presión de vapor y de las características de la emisión de electrones del material de los contactos, a diferencia de lo que sucede en los interruptores de aceite y los neumáticos en los que el consenso general es que el corte de la corriente se origina por una inestabilidad en la columna del arco.

El corte conduce a sobrevoltajes excesivos que ponen en peligro el aislamiento del sistema y que ocasionan el reencendido del arco; es conveniente disipar energía en el arco mismo y después del corte.

Sin embargo, básicamente debe evitarse el corte, el nivel de la corriente al que ocurre el corte se puede reducir escogiendo un material para los contactos que dé el suficiente vapor de metal para permitir que la corriente llegue a un valor muy bajo o a cero.

Por las propiedades mencionadas de los interruptores al vacío, estos pueden usarse sin reservas, para el despeje de fallas en cualquier lugar del sistema.

Se pueden controlar sin dificultad graves fenómenos transitorios de recuperación relacionados con las fallas de línea corta o con fallas próximas a un transformador; también todas las formas de interrupción con carga pueden efectuarse con la misma facilidad.

2.2.5.5. Materiales de los contactos

El requisito más importante del material de los contactos es que ceda la baja presión de vapor en el momento del arqueo; aunque los metales de baja presión de vapor son mejores desde los puntos de vista de la extinción del arco, los metales de alta presión de vapor y de baja conductividad parecen ser más convenientes para limitar las consecuencias desfavorables debidas al corte de la corriente.

Los metales con buenas conductividades térmica y eléctrica tienen, invariablemente, bajos puntos de fusión y de ebullición, alta presión de vapor, alta temperatura, bajas fusiones de electrodos y son considerablemente blandos, los materiales que tienen altos puntos de fusión y de ebullición, tienen bajas presiones de vapor a altas temperaturas pero son malos conductores.

Las consideraciones anteriores indican que la parte más importante de un desconectador en vacío es la selección del material de los contactos. Las propiedades de este material son:

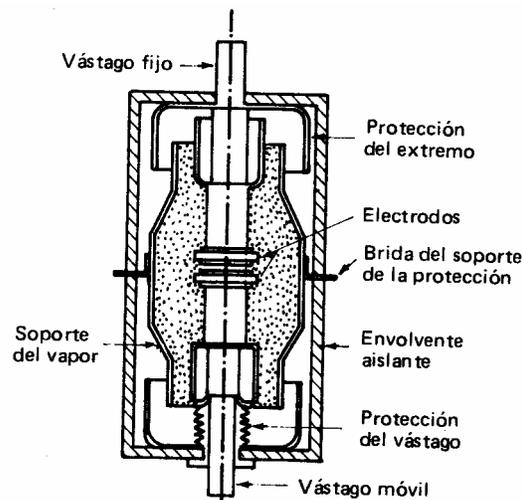
- Buena conductividad eléctrica.
- Buena conductividad térmica.
- Alta dureza al frío y al calor para evitar desgaste al operar.
- Alta densidad.
- Resistencia de los contactos a quedar soldados.

- No debe tener película aislante en la superficie, y si existe, debe ser conductora.
- Bajo contenido de gas.

2.2.5.6. Construcción de los interruptores de vacío

En este tipo de interruptor van instalados dos contactos dentro de un alojamiento aislado y sellado al vacío, uno está fijo y el otro puede moverse una distancia corta; una protección metálica rodea los contactos y protege el alojamiento de aislamiento, por lo general constan de dos sub ensambles.

Figura 40. Diagrama esquemático del interruptor en vacío



Fuente: B. Ravindranath

Protección de sistemas de potencia

Página 442

2.2.5.6.1. Cámara de vacío

Esta se fabrica de un material sintético, la cual sea aloja en un tubo exterior de plástico reforzado con fibra de vidrio o, simplemente, de vidrio o de porcelana; dentro de la cámara están los contactos, una protección metálica y un fuelle metálico, estando la cámara sellada.

El fuelle metálico, que generalmente se hace de acero inoxidable, se emplea para mover el contacto inferior y proporciona un entrehierro del orden de 5 a 10 mm que depende de la aplicación del interruptor. El diseño del fuelle tiene una significación particular porque la vida del interruptor depende de la capacidad de esta parte para efectuar satisfactoriamente las operaciones repetidas.

2.2.5.6.2. Mecanismo de operación

El extremo inferior esta fijo a un mecanismo accionado por resorte o por solenoide, de manera que el fuelle metálico que está dentro de la cámara se mueva hacia arriba y hacia abajo durante las operaciones de cierre y apertura, respectivamente. El movimiento de los contactos debe ser tal que evite el rebote, sin embargo, debe haber suficiente presión para permitir una limpieza razonable y lograr una buena conexión entre los dos contactos.

2.2.5.7. Aplicación de los interruptores en vacío

Tiene una aplicación en el campo de la interrupción de alta tensión, en donde se requiera bajo costo y baja capacidad interruptiva de falla, capacidad para un cierto número de operaciones de interrupción con carga sin mantenimiento y en algunas aplicaciones donde se requiera equipo que pueda interrumpir cargas de línea o corriente de capacitores sin restablecimiento.

Si el costo es bajo, tales interruptores serían ideales para controlar los bancos de capacitores de alta tensión en derivación, que se usan tanto en las subestaciones pequeñas como en las grandes, en las que la interrupción de fallas pueda manejarse mediante otro interruptor; estos son interruptores para conexión a alta velocidad y pueden tener muchas aplicaciones industriales.

2.2.6. Resumen de los interruptores descritos

Las ventajas y desventajas de los principales tipos de interruptores se indican a continuación:

2.2.6.1. Interruptores de gran volumen de aceite

Ventajas

- Construcción sencilla.
- Alta capacidad de ruptura.
- Pueden usarse en operación manual y automática.
- Pueden conectarse transformadores de corriente en los bushings de entrada.

Desventajas

- Posibilidad de incendio o explosión.
- Necesidad de inspección periódica de la calidad y cantidad de aceite en el estanque.
- Ocupan una gran cantidad de aceite mineral de alto costo.
- No pueden usarse en interiores.
- No pueden emplearse en conexión automática.

- Los contactos son grandes y pesados y requieren de frecuentes cambios.
- Son grandes y pesados.
- Inadecuado para ciclos repetidos de operación

2.2.6.2. Interruptores de pequeño volumen de aceite

Ventajas

- Comparativamente usan una menor cantidad de aceite.
- Menor tamaño y peso en comparación a los de gran volumen.
- Menor costo.
- Pueden emplearse tanto en forma manual como automática.
- Fácil acceso a los contactos.

Desventajas

- Peligro de incendio y explosión aunque en menor grado comparados a los de gran volumen.
- No pueden usarse con reconexión automática.
- Requieren un mantenimiento frecuente y reemplazos periódicos de aceite.
- Sufren de mayor daño los contactos principales,
- Baja capacidad de ruptura
- Dificultades para la instalación de transformadores de corriente

2.2.6.3. Interruptores neumáticos

Ventajas

- No hay riesgos de incendio o explosión.
- Bajo costo y disponibilidad de aire.
- Operación muy rápida.
- Pueden emplearse en sistemas con reconexión automática.
- Alta capacidad de ruptura en proporción a la presión de aire.
- La interrupción de corrientes altamente capacitivas no presenta mayores dificultades.
- Menor daño a los contactos.
- Fácil acceso a los contactos.
- Comparativamente menor peso.
- No es asfixiante ni tóxico.

Desventajas

- Poseen una compleja instalación debido a la red de aire comprimido, que incluye motor, compresor, cañerías, etc.
- Construcción más compleja.
- Mayor costo.
- Menor rigidez dieléctrica que el SF₆.
- Mayor presión.
- La constante térmica es de unas 100 veces la del SF₆ a la misma presión.
- Aún a presiones cinco veces superior que el SF₆, el aire tiene únicamente 10% de la capacidad de extinción de arco.

- En fallas próximas al interruptor aparecen sobretensiones muy altas. Para disminuirlas se intercalan resistencias de apertura.
- Después de la apertura el gas ionizado debe ser ventilado.
- Los niveles de ruido al operar son muy altos.
- El sistema de compresión de aire tiene un precio muy alto y la confiabilidad de sus componentes es difícil de lograr.

2.2.6.4. Interruptores en vacío

Ventajas

- Tiempos de operación muy rápidos, en general la corriente se anula a la primera pasada por cero.
- Rigidez dieléctrica entre los contactos se restablece rápidamente impidiendo la reignición del arco.
- Son menos pesados y más baratos.
- Prácticamente no requieren mantenimiento y tienen una vida útil mucho mayor a los interruptores convencionales.
- Interruptor muy compacto.
- Especial para uso en sistemas de baja y media tensión.

Desventajas

- Dificultad para mantener la condición de vacío.
- Generan sobretensiones producto del elevado di/dt .
- Tienen capacidad de interrupción limitada.
- Se producen ligeras emisiones de rayos X.

2.2.6.5. Interruptores en hexafluoruro de azufre

Ventajas

- Después de la apertura de los contactos, los gases ionizados no escapan al aire, por lo que la apertura del interruptor no produce casi ruido.
- Alta rigidez dieléctrica, del orden de tres veces la del aire.
- El SF₆ es estable. Expuesto a al arco se disocia un SF₄ y u SF₂, y en fluoruros metálicos, pero al enfriarse se recombina de nuevo en SF₆.
- La alta rigidez dieléctrica del SF₆ lo hace un medio ideal para enfriar el arco, aunque a presiones bajas.
- La presión utilizada para interrupción del arco es una fracción de la requerida en interruptores neumáticos.
- Buena conductividad térmica, es del orden de tres veces la del aire.

Desventajas

- A presiones superiores a 3.5 bars y temperaturas menores de -40°C, el gas se licua. Por eso, en el caso de interruptores de dos presiones es necesario calentar el gas de la cámara de extinción para mantener el equilibrio a temperaturas ambiente menores de 15°C.
- El gas es inodoro, incoloro e insípido. En lugares cerrados hay que tener cuidado de que no existan escapes, ya que por tener mayor densidad que el aire, lo desplaza provocando asfixia en las personas por falta de oxígeno. En otros lugares es conveniente disponer de extractores que deben ponerse en funcionamiento antes de que se introduzca el personal.

- Los productos del arco son tóxicos y combinados con la humedad producen ácido fluorhídrico, que ataca la porcelana y el cemento de sellado de la s boquillas.

3. PRUEBAS A INTERRUPTORES DE POTENCIA

Cada interruptor es probado en fábrica, a estas pruebas se les llama pruebas de rutina las cuales se realizan antes de su entrega, luego se prueba nuevamente en el sitio después de haberlos instalado (pruebas de puesta en servicio), y luego periódicamente hasta el final de su vida útil.

Estas pruebas son necesarias para determinar la condición real de los interruptores antes de que entren en servicio, para poder establecer un punto de referencia y poder seguir su evolución.

Una de las pruebas más importantes es la prueba de tiempo, y ésta incluye:

- Medir el instante exacto en que los contactos cambian de estado
- Verificar la discrepancia de los contactos
- Verificar la velocidad y carrera de los contactos

Los valores medidos son comparados con los límites de tolerancias establecidos, usualmente los valores de las pruebas de puesta en servicio se usan como valores referenciales.

Con el análisis correcto, cualquier desviación de estos valores puede indicar el curso de acción que se deberá tomar.

3.1. Pruebas de tiempo a interruptores

3.1.1. Definición

La prueba de tiempo de un interruptor es la medición del tiempo que le lleva a la operación mecánica verificar su integridad y que está funcionando bien.

Una operación mecánica es toda operación o ciclo de operación del interruptor que se realiza sin estar conectado al circuito de alta tensión.

3.1.2. Importancia

Es necesaria la verificación de los tiempos de operación mecánicos a todos los interruptores, para tener su firma funcional. Su operación incorrecta puede traer consecuencias desastrosas tanto para el equipo como para el personal de las subestaciones, sin mencionar la pérdida por la falta de servicio y los costos de reparación.

Las pruebas de tiempo se hacen inicialmente en la fábrica como parte de las pruebas de rutina y luego de la instalación, durante las pruebas de entrega, éstas tienen que realizarse periódicamente para poder validar la confiabilidad del interruptor y que se encuentra trabajando perfectamente.

Las pruebas de tiempo también son una herramienta poderosa para identificar los interruptores defectuosos.

3.1.3. Descripción

Para realizar mediciones de los tiempos de las operaciones del interruptor, necesitamos un dispositivo capaz de detectar el instante en que los contactos cambian de estado, desde el momento de que se impartió la orden para comenzar la prueba.

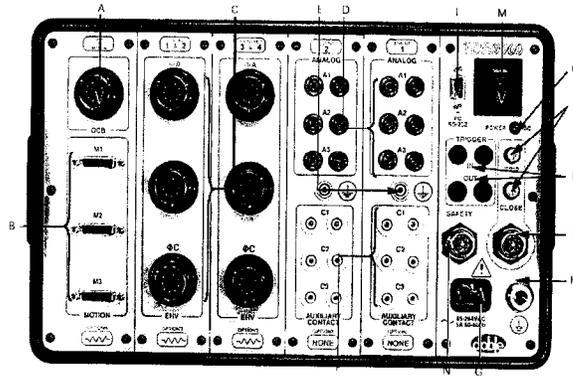
Este dispositivo envía señales eléctricas por medio de cables conectados a cada contacto; cuando varios contactos están conectados en serie, cada señal tiene su propia fuente de energía para eliminar las interferencias.

Esta señal tiene dos posibles estados; el primero es cuando el contacto está cerrado, el segundo cuando está abierto. Todo se registra para la consultoría y el análisis, a estos dispositivos especiales se les llama máquinas de sincronización o analizadores de interruptores, los cuales están diseñados para generar todas las señales necesarias e incorporar un sistema de adquisición de información.

Cuatro etapas constituyen las principales actividades para llevar a cabo la prueba de tiempos:

1. Instalación y conexión del cable
2. Adquisición de la Información
3. Interpretación de la Información
4. Análisis de la Información

Figura 41. Equipo analizador de interruptores TDR9000



Fuente: Doble

Guía del usuario del TDR9000

Página 10

Tabla I. Componentes del panel frontal del TDR9000

Referencia	Descripción
A	Conector circular de 12 pines para el cable de monitor de contactos OCB
B	Conector hembra de 15 pines para los cables del transductor de movimiento
C	Conectores circulares de 12 pines para los cables del monitor de contactos EHV
D	Conectores tipo banana para entradas de propósito general análogas, voltaje, transductor de corriente y ganchos de corriente
E	Conector tipo banana para conexión de la terminal con pantalla del cable de prueba análogo a la tierra del chasis
F	Conectores tipo banana para establecer las conexiones hacia los contactos auxiliares
G	Tres conectores machos expuestos para utilizarse para un cable de alimentación estándar
H	Conector con seguro con giro utilizado para establecer la tierra de seguridad del sistema a través del cable de tierra
I	Conector de 5 pines para establecer las conexiones de disparo/cierre
J	Fusibles de disparo y cierre
K	Conexiones tipo banana para las funciones de Activador de entrada y Activador de salida (para desarrollo futuro)
L	Conector hembra de 9 pines para el cable de comunicaciones serial RS232 suministrado por Doble
M	Interruptor de encendido/apagado del instrumento
N	Conector de 4 pines para el cable del interruptor de seguridad suministrado por Doble
O	LED de validez de operación de las fuentes de alimentación de corriente directa

Fuente: Doble

Guía del usuario del TDR9000

Página 11

3.1.3.1. Instalación y conexión

Se debe realizar correctamente la conexión (principalmente entre el analizador de interruptores y el interruptor) tomando en cuenta ciertos factores externos, como por ejemplo, la inducción magnética de las líneas cercanas de transmisión de alta tensión la cual puede ocasionar la obtención de mediciones incorrectas de nuestro analizador de interruptores, se debe de limpiar la superficie de toda humedad y polvo para obtener mejores resultados.

Otra conexión se debe realizar entre el analizador de interruptores y las bobinas del mecanismo responsable del lanzamiento de la orden de operación, también pueden requerirse otras conexiones para un transductor de desplazamiento, un transductor de presión, los contactos auxiliares, etc.

3.1.3.1.1. Reglas generales

No hay reglas generales mientras se obtiene la información necesaria, pero para evitar cualquier sorpresa inoportuna, deben observarse algunas precauciones.

3.1.3.1.2. Descripción de la conexión

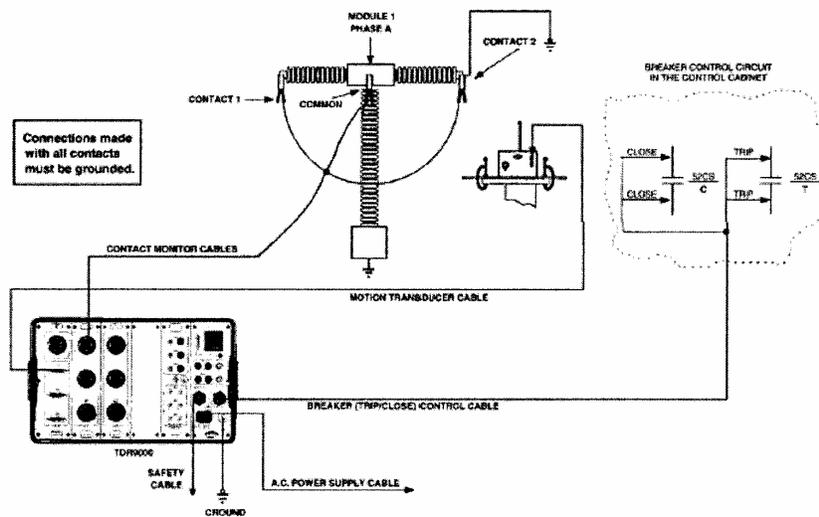
3.1.3.1.2.1. Conexión a los contactos principales

Cada contacto del interruptor tiene que ser verificado separadamente, para múltiples contactos por fase, cada contacto debe tener su propio circuito de verificación.

Cada circuito de verificación incluye una fuente de voltaje que inyecta corriente para cerrar los contactos, un circuito de detección para detectar la corriente y determinar si el contacto está cerrado, y dos cables apantallados para llevar la señal.

El analizador de interruptores suministra los circuitos de verificación, a cada circuito de verificación se le llama canal, el siguiente cuadro muestra un ejemplo de cómo los contactos principales se conectados a los canales:

Figura 42. Conexiones del circuito de energía



Fuente: Doble

Guía del usuario del TDR9000

Página 19

Si se tienen múltiples contactos por fase, se debe tener especial cuidado para evitar el efecto espejo, dado que los datos de algunos contactos se verá corrompido por los datos de otros contactos.

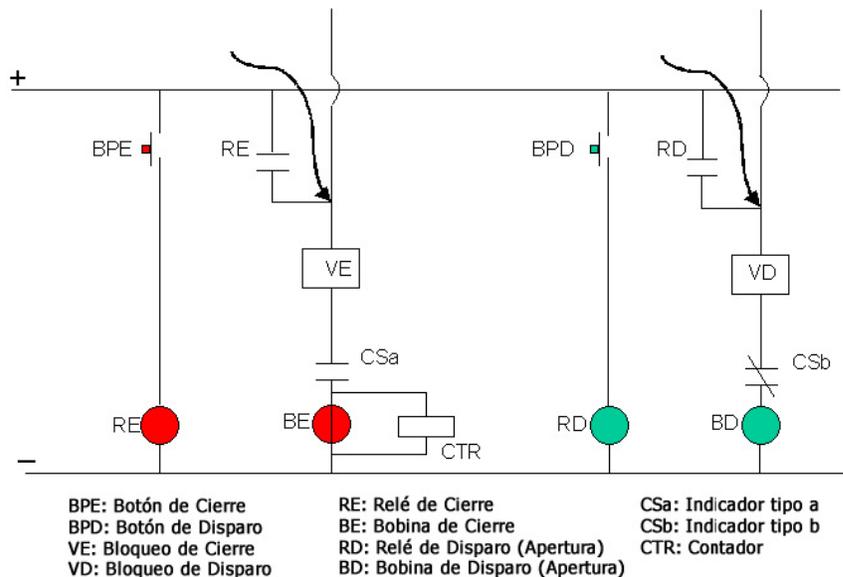
3.1.3.1.2.2. Conexiones a bobinas de mecanismos (mandos)

Los controles de los interruptores tienen varias protecciones contra defectos de funcionamiento, por ejemplo contra discrepancias de fase (ver pagina 119), o contra el bombeo.

La figura 43 ilustra a un circuito de mando con algunos circuitos de protección, es importante que no se haga un *by-pass* en cualquiera de estos circuitos de protección

Una conexión con un *by-pass* a los contactos auxiliares pueden causar la destrucción de las bobinas.

Figura 43. Conexiones de mando



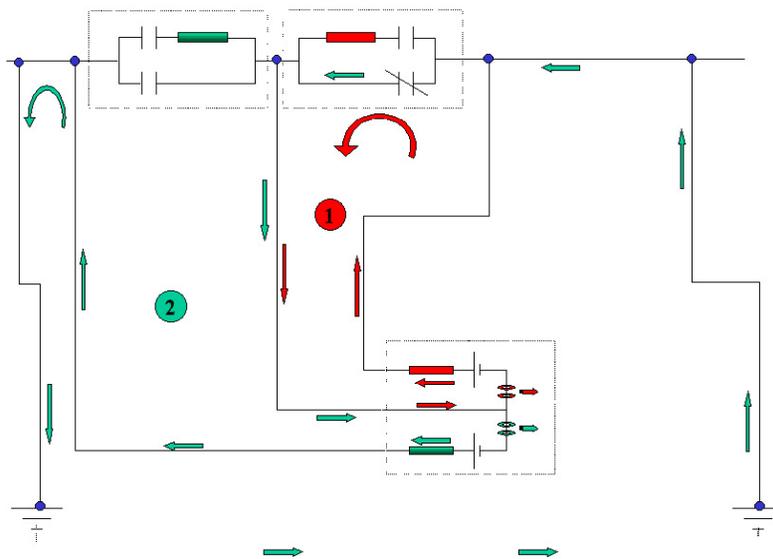
Fuente: Zensol

3.1.3.1.3. Efecto espejo

No deberá realizarse ninguna intervención en el equipo de alta tensión sin la protección apropiada del personal y de los equipos, una de las más importantes medidas de protección es la instalación de cables a tierra, los cables a tierra conectan la línea a la tierra. En el caso de una alimentación accidental de energía a la línea, la corriente pasará por medio del cable de tierra y evitará que el personal sea alcanzado, los cables a tierra deberán instalarse a cada lado del interruptor.

En el caso de hacer la prueba de tiempo a un contacto múltiples fases, la presencia de los cables a tierra a ambos lados de los contactos puede enmascarar la señal de un contacto con falla como una señal de un buen contacto, haciendo a éste indetectable.

Figura 44. Efecto espejo



Fuente: Zensol

En la figura 44, si el contacto 2 (celeste) se mantiene abierto y se cierra el contacto 1 (rojo), el circuito del canal 2 detectará el paso de la corriente a través de los cables a tierra y mostrará al contacto 2 como cerrado.

La solución será romper el circuito de retorno de tierra desconectando el interruptor de la línea, entre la extremidad del interruptor y el cable de tierra próximo a él, en ningún momento deberá retirarse el cable de tierra, bajo riesgo de daños.

3.1.3.2. Adquisición de la información

Adicionalmente a la generación de la señal, los analizadores de interruptores están a cargo de la detección y registro de la transición de los contactos.

Los primeros analizadores de interruptores (máquinas de sincronización) utilizaban la luz reflejada de espejos en movimiento que se movían por la señal de corriente que venía de los contactos, la luz se proyectaba en una película de papel, creando así un trazo visible en el papel.

Hoy en día, en la era de las computadoras, los analizadores de interruptores han atravesado una tremenda evolución.

Ahora utilizan la electrónica y la tecnología de la computación para la adquisición de la información, se utilizan programas de computación muy potentes para analizar y conservar la información para estudios futuros, las decisiones pueden también realizarse rápidamente y de forma precisa.

3.1.3.3. Interpretación de la información

Muchos agentes externos pueden influenciar adversamente la recolección de la información por lo tanto es importante distinguir la información útil recolectada de los ruidos externos.

Una buena interpretación se basa en tres principios principales:

1. **Conocer al interruptor y al entorno que lo rodea:** La inducción debido a la proximidad de líneas de transmisión de energía, o una conexión defectuosa puede alterar la señal recolectada.
2. **Conocer al analizador de interruptores:** Una programación incorrecta o también un circuito con falla puede ser la causa de una señal alterada difícil de percibir.
3. **Conocer el significado de los valores que estamos buscando:** Cuando hacemos la prueba de tiempo a un interruptor, buscamos ciertos valores, tales como el tiempo que toma la conmutación de los contactos, los tiempos de energización de la bobina, etc. que pueden permitir una rápida identificación de un problema, y si los valores parecen excesivos, podemos revisarlo a tiempo y repetir la prueba antes de bajar todos los cables.

3.1.4. Tiempo de operación de los interruptores

Se define a un interruptor como un dispositivo que conduce o interrumpe el circuito, esto se realiza mecánicamente uniendo o separando dos juegos de contactos. Estas son las operaciones básicas del interruptor, y se le llama "CIERRE" cuando se unen los contactos, y "APERTURA" cuando se separan.

Como mencionamos antes, éstas no son las únicas operaciones que el interruptor debe realizar, en la mayoría de los casos, tiene que ejecutar una combinación de las operaciones básicas, llamadas ciclos.

Las más populares son las siguientes:

1. **“TRIP FREE”, (C-O)**: simula una apertura debido a un cortocircuito luego de una operación de cierre. El interruptor deberá abrirse instantáneamente.
2. **“RECIERRE”, (O-C)**: Simula un cierre rápido debido a un cortocircuito para restablecer la corriente.
3. **“RECIERRE-ABIERTO”, (O-0.3s-C-O)**: Simula un "RECIERRE" debido a un cortocircuito. El interruptor debería despejar la falla sin complicaciones.
4. **(C-O)-15 seg-(C-O)-15-seg-(C-O)**: Simula un cierre múltiple después de una apertura por corto circuito, con el propósito de reestablecer la energía, esperando que el cortocircuito desaparezca. Este ciclo se usa frecuentemente en aplicaciones de media tensión.

Al tiempo medido para los diferentes ciclos comenzando desde la energización de la bobina hasta la conmutación de los contactos principales se le llama Tiempos mecánicos de las operaciones de los Interruptores.

3.1.5. Referencia de tiempo

La base de las pruebas de tiempo es la recolección de la información para poder compararla con los valores de referencia, deberá hacerse la comparación con parámetros similares.

Por lo tanto, los valores recolectados deben seguir las mismas reglas que los valores de referencias, y deben ser independientes de interpretaciones individuales.

Para poder obtener los resultados deseados, debemos determinar los mismos puntos de referencia al leer la información; en un principio, los diseñadores determinaron valores referenciales, los usuarios también tenían sus propios valores referenciales. Para poder resolver este problema, los profesionales suelen utilizar las definiciones contenidas en las normas internacionales, la más utilizada es la norma internacional IEC 56.

3.1.6. Definiciones de tiempo de acuerdo a la norma internacional IEC 56

La norma internacional IEC 56 define estos tiempos de la siguiente manera:

3.1.6.1. Tiempo de apertura (IEC 56 3.105.32)

Para un interruptor disparado por cualquier forma de energía auxiliar, el tiempo de apertura es el intervalo de tiempo entre el instante de energización de la barra de apertura, estando el interruptor en posición cerrada, y el instante en que los contactos del arco se han separado en todos los polos.

Notas:

1. El tiempo de apertura puede variar significativamente con la interrupción de la corriente.

2. Para los interruptores con más de una unidad de interrupción por polo, el instante cuando los contactos del arco se han separado en todos los polos es determinado por el instante de la separación de los contactos en la primera unidad del último polo.
3. El tiempo de apertura incluye el tiempo de operación de cualquier equipo auxiliar necesario para la apertura de los interruptores y que forma una parte integral de los interruptores.

3.1.6.2. Tiempo de cierre (IEC 56 3.105.35)

El intervalo de tiempo entre la energización del circuito de cierre, estando el interruptor en posición abierta, y el instante en que los contactos se tocan en todos los polos.

Nota: El tiempo de cierre incluye el tiempo de operación de cualquier equipo auxiliar necesario para cerrar el interruptor y que forme una parte integral del interruptor.

3.1.6.3. Tiempo de apertura-cierre, O-C o tiempo de aislamiento (IEC 56 3.105.38)

El intervalo de tiempo entre el instante cuando los contactos del arco se han separado en todos los polos y cuando los contactos se tocan en el primer polo durante una operación de recierre.

3.1.6.4. Tiempo de cierre-apertura, C-O o tiempo de corto circuito (IEC 56 3.105.42)

El intervalo de tiempo entre el instante cuando los contactos tocan el primer polo durante una operación de cierre y el instante cuando los contactos de arco se han separado en todos los polos durante la subsecuente operación de apertura.

Nota: A menos que se indique lo contrario, se asume que la barra de apertura incorporada en el interruptor se energiza en el instante en que los contactos tocan el primer polo durante el cierre. Esto representa el mínimo tiempo de cierre-apertura.

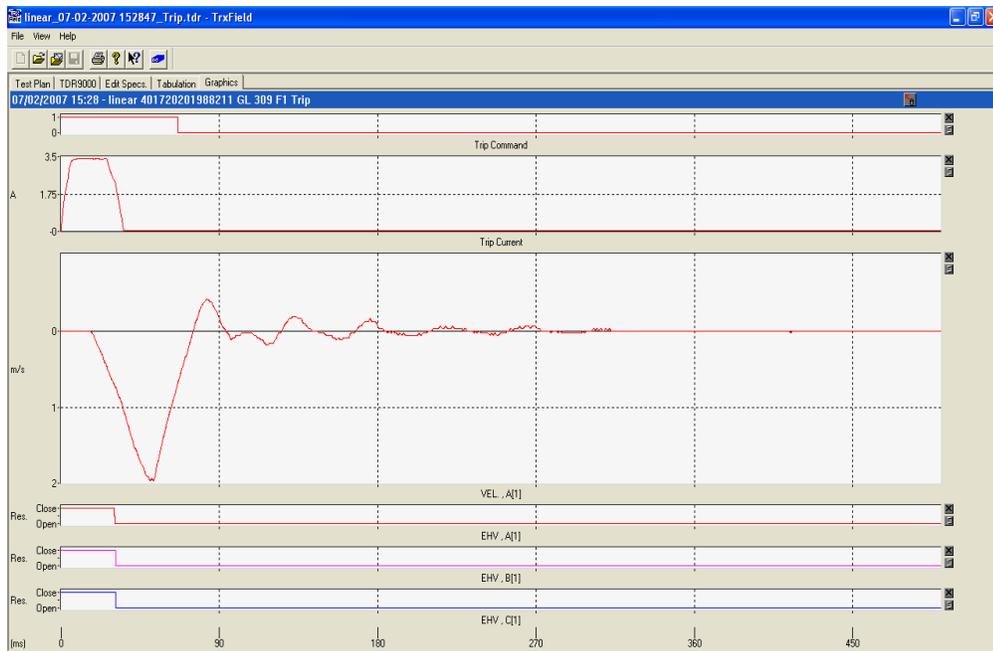
3.1.6.5. Duración mínima de la apertura (IEC 56 3.105.44)

El mínimo tiempo que se debe aplicar la energía auxiliar a la barra de apertura para asegurar una apertura completa del interruptor.

3.1.6.6. Duración mínima del cierre (IEC 56 3.105.45)

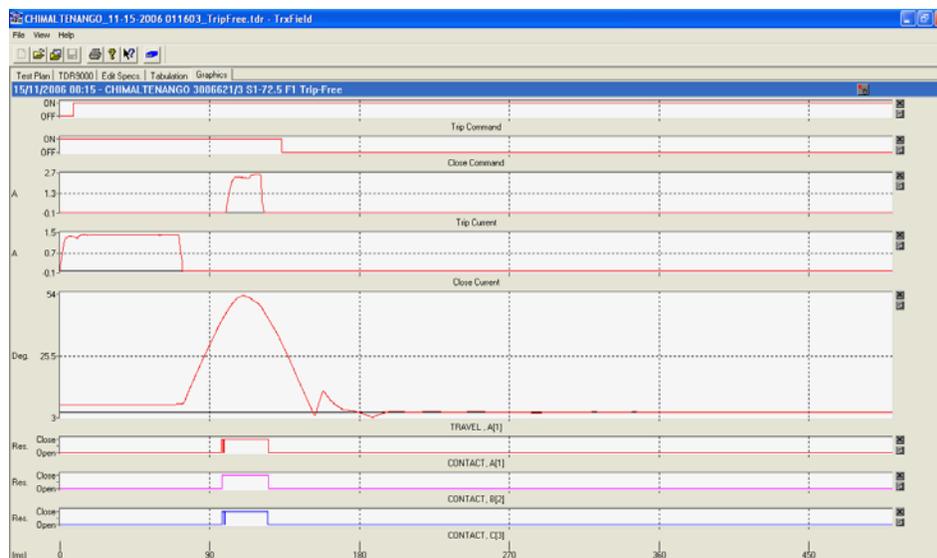
El mínimo tiempo que la energía auxiliar debe aplicarse al dispositivo de cierre para asegurar un cierre completo del interruptor.

Figura 45. Gráfica del tiempo de apertura de un interruptor



Fuente: Pruebas realizadas con TDR900

Figura 46. Gráfica del tiempo de una prueba cierre-apertura de un interruptor



Fuente: Pruebas realizadas con el TDR900

3.1.7. Análisis de la información

El análisis de la información es la etapa final de las pruebas de tiempo, los profesionales encargados deben contar con experiencia en los interruptores que serán sincronizados así como el conocimiento de los requerimientos de la red.

Debido a que actualmente los analizadores de interruptores incorporan herramientas muy poderosas de análisis, un buen conocimiento de estas herramientas es muy útil y ahorra mucho tiempo.

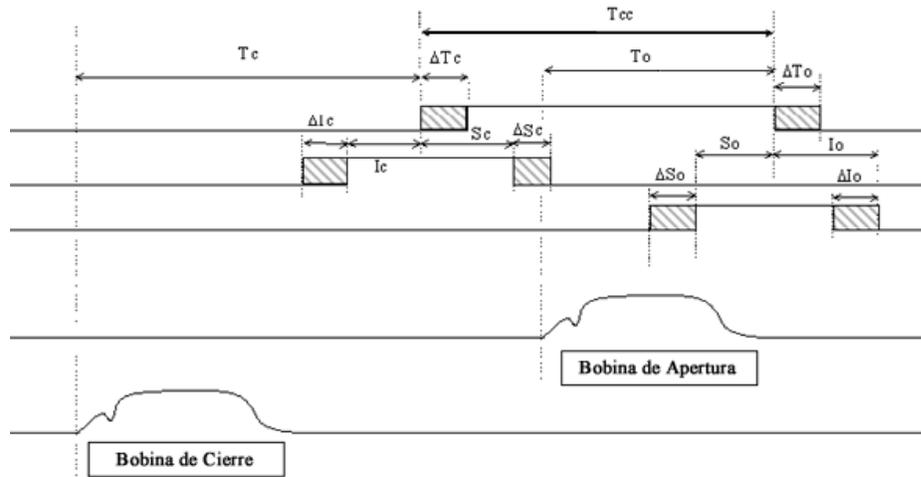
El operador debe tener un buen sentido analítico y tener la capacidad para distinguir entre la importancia de los resultados solicitados y las consecuencias de la disconformidad entre los datos.

3.1.7.1. Cuadro de tiempo

Los interruptores tienen que cumplir con los requerimientos del usuario, adicionalmente a las especificaciones de los estándares internacionales.

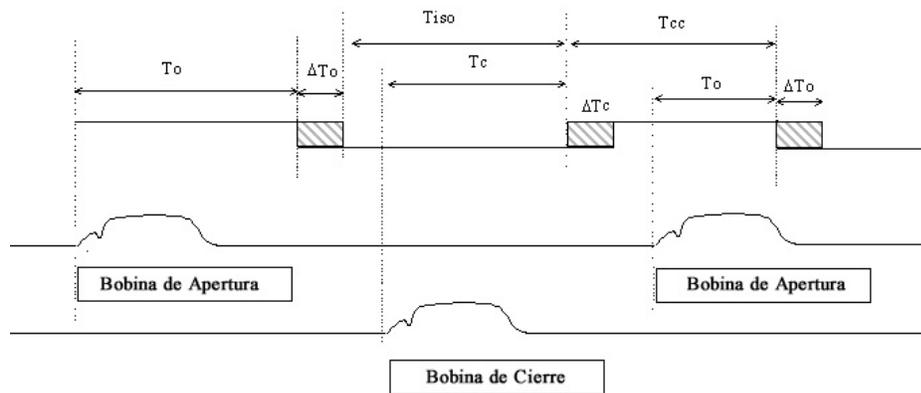
Los diseñadores toman en consideración estos requerimientos cuando diseñan un interruptor en particular; se establecen las referencias de tiempo y las tolerancias basadas en las pruebas y en las tablas de referencia, y se crean las llamadas tablas de tiempo.

Figura 47. Cuadro de tiempo usuario



Fuente: Zensol

Figura 48. Cuadro de tiempo de referencia



Fuente: Zensol

Las tablas de tiempo contienen referencias de tiempo para todos los ciclos de operación que debe cumplir el interruptor. Adicionalmente a estas referencias de tiempo, los diseñadores pueden considerar útil agregar otros tiempos para asegurar el apropiado funcionamiento del interruptor o cualquiera de sus partes de ensamblaje.

3.1.7.2. Prioridad

Luego del análisis de la información se deben tomar importantes decisiones:

1. Poner el interruptor en servicio
2. Suspender la recepción del equipo y tomar acciones adicionales para hacer las correcciones de cualquier condición de falla.

En el primer caso, poner un interruptor inadecuado en servicio puede tener consecuencias desastrosas, sea para el equipo o para el personal de mantenimiento.

En el segundo caso, el costo podría ser enorme si resulta que era innecesario, como resultado de un análisis incorrecto, es crucial un buen análisis y la distinción de las prioridades.

3.1.7.2.1. Niveles de prioridad para los tiempos de operación

Permanece la pregunta de determinar las prioridades para poder desarrollar un análisis correcto, el nivel de prioridad se describe de alto a bajo como sigue:

3.1.7.2.1.1. Tiempo de apertura

Un objetivo permanente es la reducción de la duración de las corrientes de cortocircuito en las líneas de transmisión.

La ventaja principal es tener una elevada energía transmitida, debido a que la estabilidad de la energía de transmisión es más alta cuando la duración del cortocircuito es más corto.

El usuario determina la duración de la interrupción de corriente, por ejemplo 2 ciclos.

La duración de la interrupción de la corriente se cuenta comenzando desde el instante en que la bobina del mecanismo principal se energiza hasta el final de la interrupción de la corriente en el contacto principal, incluyendo la duración del arco.

Entonces, el tiempo de interrupción es igual al tiempo mecánico (tiempo de operación) más la duración del arco, el tiempo que proporciona el analizador de interruptores es el tiempo mecánico, el equipo analizador de interruptores nos proporciona únicamente el tiempo mecánico.

Para las redes de 60 Hz, 2 ciclos equivalen a $2/60 = 0.03334 \text{ s} = 33.34 \text{ ms}$ (ms = milisegundos). Debido a que las pruebas de tiempo se realizan cuando el interruptor está fuera de servicio (sin carga), no se puede medir la duración del arco.

La duración del arco depende de varios factores: el nivel del voltaje, el medio de interrupción, las técnicas de interrupción, etc. Ésta se determina durante las pruebas de prototipo, luego se ajusta el tiempo de la apertura (*trip*) para obtener el tiempo de interrupción.

Por lo tanto, el tiempo de apertura es, en primer lugar y sobre todo, un requerimiento del usuario que el diseñador ha aceptado y que debe respetar. Sin embargo, una apertura inapropiada puede causar grandes riesgos de diferente naturaleza para tiempos más largos o más cortos.

3.1.7.2.1.2. Tiempo de apertura más largo

Existen muchos riesgos causados por tiempos muy largos de la apertura, podría ser cualquier cosa, desde una simple anomalía en circuito de control de baja tensión hasta una falla mayor en la interrupción de la corriente principal; el análisis deberá examinar todos los detalles para alcanzar una conclusión precisa.

En general, e independientemente del tipo de interruptor, una apertura con un tiempo más largo, puede ser ocasionada por una velocidad más lenta de transición, la duración del arco puede tener una mayor duración y puede ocurrir un desgaste prematuro de los contactos.

Para pequeñas corrientes capacitivas, los picos de voltaje son más fuertes y pueden causar una falla consecutiva, las fallas consecutivas son cortocircuitos de línea a tierra, que siguen a una interrupción de pequeñas corrientes capacitivas o inductivas.

El interruptor que interrumpe una corriente pequeña, ve crecer la corriente instantáneamente hasta una corriente de cortocircuito; algunos tipos de interruptores tienen dificultades en corregir esta situación, un método conocido para superar una falla consecutiva es interrumpirlo con interruptores de alta velocidad, una menor velocidad puede ser crucial en este caso.

3.1.7.2.1.3. Tiempos de apertura más cortos

Luego de un cortocircuito, la corriente alterna de la corriente que fluye en el circuito crece instantáneamente a un valor inmenso, de la misma naturaleza y frecuencia llamada corriente de cortocircuito simétrica.

Debido a la naturaleza inductiva de la red, se agrega un componente c.d. (CC) temporal al valor del cortocircuito simétrico, al resultado se le llama cortocircuito simétrico.

El valor inicial es igual al valor instantáneo del cortocircuito simétrico en el punto del cortocircuito con el signo negativo; este valor se reduce luego, siguiendo una curva de exponencial con una velocidad determinada por la constante de tiempo del circuito.

La capacidad de ruptura de un interruptor en particular, es el valor más alto de corriente que el interruptor es capaz de interrumpir. El interruptor debería interrumpir adecuadamente cualquier corriente igual o menor a su capacidad de interrupción, sea la corriente simétrica o asimétrica, si es más alto, el tiempo de interrupción es corto; como resultado, si el interruptor es demasiado rápido, el valor asimétrico puede exceder su capacidad de interrupción, y no se puede garantizar una interrupción.

3.1.7.2.2. Discrepancia en los contactos

Los interruptores de alta tensión son aparatos trifásicos, tienen por lo menos un contacto por fase, y en algunos casos, contactos múltiples en serie por fase, hasta 12 por fase para algunos interruptores de hasta 765 kV.

Es crucial para la operación apropiada del interruptor y para la red limitar las discrepancias de tiempo entre los contactos, las discrepancias pueden dividirse en dos grupos:

1. Discrepancias de contactos entre polos,
2. Discrepancias de contactos en el mismo polo.

3.1.7.2.2.1. Discrepancia entre polos

En la apertura: De acuerdo a la norma IEC 56 (párrafo 3.3.1) una fase se considera abierta cuando el primer contacto del polo está abierto, la mayor discrepancia medida no deberá exceder el valor máximo establecido por el diseñador, el usuario o según el acuerdo entre ellos.

Si existe una discrepancia: La separación de los contactos de los polos tiene que ser simultánea para evitar los transitorios de la alta tensión, de otra manera se obtendrá el doble del valor nominal de la primera separación del polo, la máxima discrepancia permitida es de $1/6$ de un ciclo.

En el cierre: De acuerdo a la norma IEC 56 (párrafo 3.3.2), una fase es considerada cerrada cuando el último contacto del polo está cerrada, la mayor discrepancia medida no deberá exceder el valor máximo fijado por el diseñador, el usuario o por el acuerdo entre ellos.

Si existe una discrepancia: La energización abrupta de los circuitos siempre es seguida por un incremento moderado de voltaje, con la excepción de líneas de transmisión largas, sin carga, donde un aumento del voltaje puede ser críticamente peligroso.

Cuando una línea se conecta a una red energizada, una onda de voltaje entra dentro de la línea, esta onda se refleja al final de una línea abierta, y retorna con el doble de su amplitud, este fenómeno es conocido como la onda reflejada que se sobrepone a la onda incidente, la magnitud de la onda reflejada dependerá del parámetro final de la línea.

Se pueden encontrar voltajes más altos cuando la línea tiene una carga antes de ser reenergizada y si el interruptor se cierra en el momento que la polaridad de la red es opuesta a aquella que esté presente en la línea, en este caso, el voltaje puede ser tres veces el voltaje de la red, después de la reflexión de la onda; esta situación puede producirse con una rápido recierre de la línea. Se pueden encontrar altos voltajes en las líneas trifásicas, cuando los tres polos del interruptor no se cierran simultáneamente.

Una onda en una fase producirá ondas inducidas en las otras fases, y bajo condiciones poco favorables, el voltaje se incrementará en otra fase. Puede encontrarse mayores aumentos en el voltaje de transición si la discrepancia en el momento del cierre es demasiada alta. Notar que en las redes con voltajes nominales de 500 kV o mayores, el aislamiento de las líneas se determina por los picos de voltaje de la operación.

3.1.7.2.2.2. Discrepancia entre contactos del mismo polo

Si los interruptores tienen múltiples contactos por polo, se instalan capacitores en paralelo con cada contacto para igualar el voltaje cuando se separan los contactos, en general los contactos más rápidos tienen arcos de mayor duración y un mayor desgaste por contacto.

En el caso de discrepancias excesivas, los contactos más rápidos en el cierre y los más lentos en la apertura, podrían ocasionar choques de mayores voltajes a los capacitores, y por lo tanto reducen su expectativa de vida y también la de los contactos.

3.1.7.2.3. Tiempo de cierre

Durante el cierre, especialmente en los cortocircuitos, las fuerzas opuestas son considerables, en el caso de los contactos de movimiento lento, los pre-arcos tienen una mayor duración lo que ocasiona un mayor deterioro de los contactos.

Si no se respeta el tiempo de cierre, esto comprometerá la garantía relativa de su capacidad de cierre; este tiempo es suministrado usualmente por el diseñador de los interruptores.

3.1.7.2.4. Ciclos de operación

Un ciclo de operación es una secuencia básica de operaciones de "CIERRE" y "APERTURA" en intervalos específicos de tiempo.

Las secuencias más comunes siguen la siguiente fórmula:

$$O \rightarrow T \rightarrow CO \rightarrow T' \rightarrow CO$$

O: Apertura

CO: Ciclo de cierre-apertura

T: Retraso de 0.3 segundos ó de 3 minutos

T': Retraso de 3 minutos

3.1.7.2.4.1. Ciclo de cierre-apertura (C-O) tiempo de corto circuito

Un ciclo CO (Cierre - Apertura) simula el cierre en un cortocircuito. En una situación real, el interruptor se cierra primero, luego el relé de protección del sistema detecta el cortocircuito y abre al interruptor.

En el caso de una prueba, se puede programar el analizador de interruptores para que envíe una orden de disparo tan pronto se cierran los contactos, esto permite tener el tiempo de cortocircuito más rápido del interruptor, este valor se compara con las referencias del diseñador.

3.1.7.2.4.2. Recierre-apertura (O-C-O), tiempo de aislamiento

La experiencia muestra que un gran número de cortocircuitos son temporales, esto quiere decir que son ocasionados por un evento que desaparece a pocos instantes que se abre el interruptor, algunos ejemplos son los cortocircuitos que se originan por relámpagos, un pájaro, árboles o ramas caídas, etc.

El propósito de un recierre rápido es reducir la duración de la interrupción de energía. Es muy importante reducir esta interrupción a un mínimo, para los circuitos que se encuentran fuera de servicio, es importante darle un tiempo suficiente para despejar la falla.

En efecto, las fallas temporales forman arcos, una vez que se corta la energía que genera este arco, se necesita suficiente tiempo para pasar por el arco de plasma para que se desionice antes de reconectar la energía, o puede ocurrir otra falla, las estadísticas muestran que una duración de 0.3 segundos entre la apertura y el cierre de los contactos es suficiente para lograr este objetivo.

Si ocurre otra falla en el cierre, el interruptor tendrá que interrumpir el cortocircuito por segunda vez, se requerirá un retraso suficiente entre las interrupciones para que el medio de interrupción se regenere y para que funcione correctamente la segunda interrupción; si el interruptor falla una segunda vez, éste debería permanecer abierto.

3.1.8. Resultado de las pruebas de tiempo para interruptores de potencia

En este apartado se incluyen reportes y gráficas de un interruptor que fue sometido a pruebas de campo con el equipo TDR9000, dentro de las pruebas que se realizaron se incluyen pruebas de apertura, cierre, cierre-apertura y recierre, se realizan diversas pruebas para poder estar asegurarse de que el interruptor no representa un riesgo para el equipo que se está protegiendo ni para el personal, y que su funcionamiento es el deseado.

Características del interruptor

Fabricante: AREVA

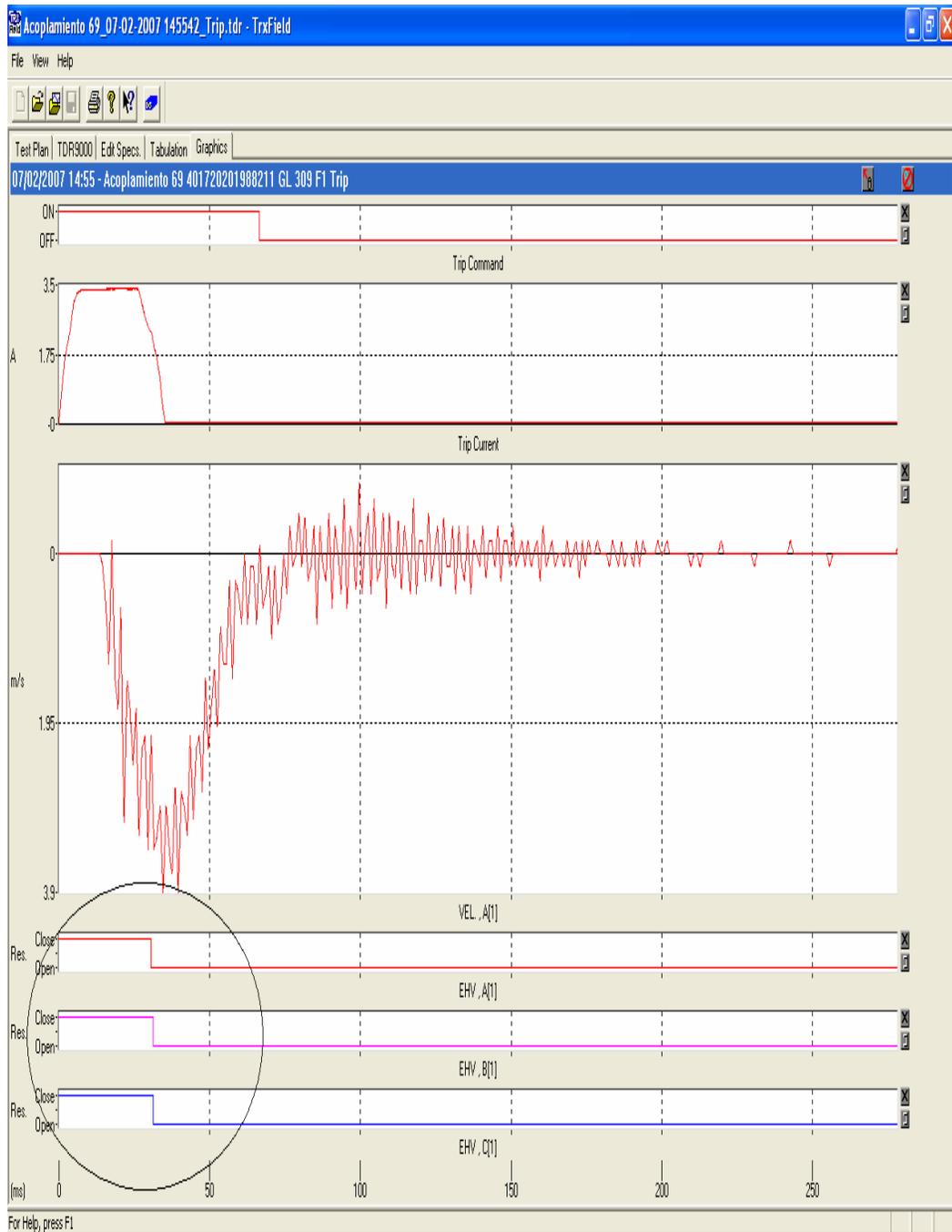
Número de modelo: GL309F1

Ubicación: Guatemala Sur

Identificación especial: Acoplamiento de 69

Número de serie: 401720201988211

Figura 49. Gráfica de tiempo para una operación de apertura



Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

Tabla II. Resultados de la prueba de tiempo para una operación de apertura

EHV CONTACT TIMING
TRIP OPERATION

Main Contact Opening Time Measured From Test Initiation									Specs:	
									Maximum	35.0
									Minimum	25.0
Phase A			Phase B			Phase C				
Contact	Time (ms)	Compare	Contact	Time (ms)	Compare	Contact	Time (ms)	Compare		
A-EHV 1	30.7	Pass	B-EHV 1	31.4	Pass	C-EHV 1	31.4	Pass		
A-EHV 2			B-EHV 2			C-EHV 2				

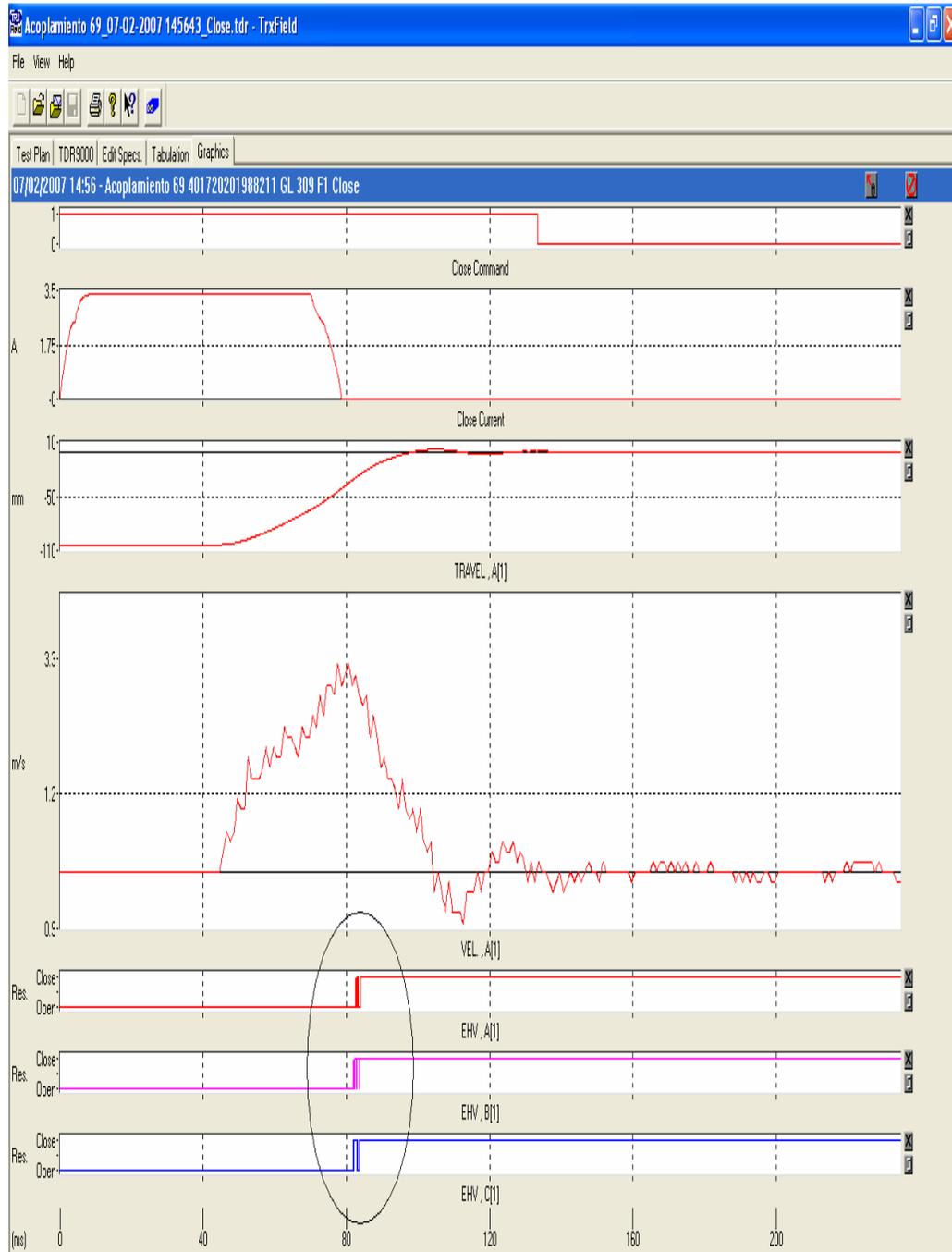
Main Contact Opening Time Vs Mechanical Motion								
Phase A			Phase B			Phase C		
Contact	Travel (mm)	Vel. (m/s)	Contact	Travel (mm)	Vel. (m/s)	Contact	Travel (mm)	Vel. (m/s)
A-EHV 1	29.322	21.060	B-EHV 1	31.104	32.400	C-EHV 1	31.104	32.400
A-EHV 2			B-EHV 2			C-EHV 2		

Fuente: Pruebas realizadas con el TDR900

En la tabla II, los círculos azules encierran los valores de tiempo predeterminados para una operación de apertura, tanto el tiempo mínimo como el tiempo máximo, expresado en milisegundos; los círculos rojos, muestran los valores obtenidos de la prueba mediante el analizador de interruptores; los círculos negros, nos dan los resultados del desplazamiento de los contactos expresados en milímetros; y por último, los círculos verdes, nos dan los resultados de la velocidad promedio expresado en metros sobre segundo.

Se puede observar en el reporte, que los tiempos obtenidos de la prueba se encuentran dentro de los límites especificados por el fabricante, por lo tanto para esta prueba en específico podemos concluir que el interruptor se encuentra en buen estado.

Figura 50. Gráfica de tiempo para una operación de cierre



Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

Observando la gráfica vemos una oscilación en la gráfica del tiempo de cierre (círculo negro), con lo cual se podría pensar que el interruptor está funcionando en forma defectuosa, pero según la experiencia del personal del laboratorio de pruebas del ETCEE del INDE esta oscilación es debida al sobreviaje y al rebote originado por los resortes de accionamiento del interruptor.

Paso siguiente, para verificar ésta información procedemos a analizar los resultados obtenidos de la tabla (círculos rojos), con esto comprobamos que los tiempos de cierre están dentro de los límites establecidos por el fabricante para una operación de cierre.

Tabla III. Resultados de la prueba de tiempo para una operación de cierre

EHV CONTACT TIMING
CLOSE OPERATION

Main Contact Closing Time Measured From Test Initiation									Specs:	
									Maximum	85.0
									Minimum	75.0
Phase A			Phase B			Phase C				
Contact	Time (ms)	Compare	Contact	Time (ms)	Compare	Contact	Time (ms)	Compare		
A-EHV 1	82.6	Pass	B-EHV 1	82.0	Pass	C-EHV 1	81.8	Pass		
A-EHV 2			B-EHV 2			C-EHV 2				

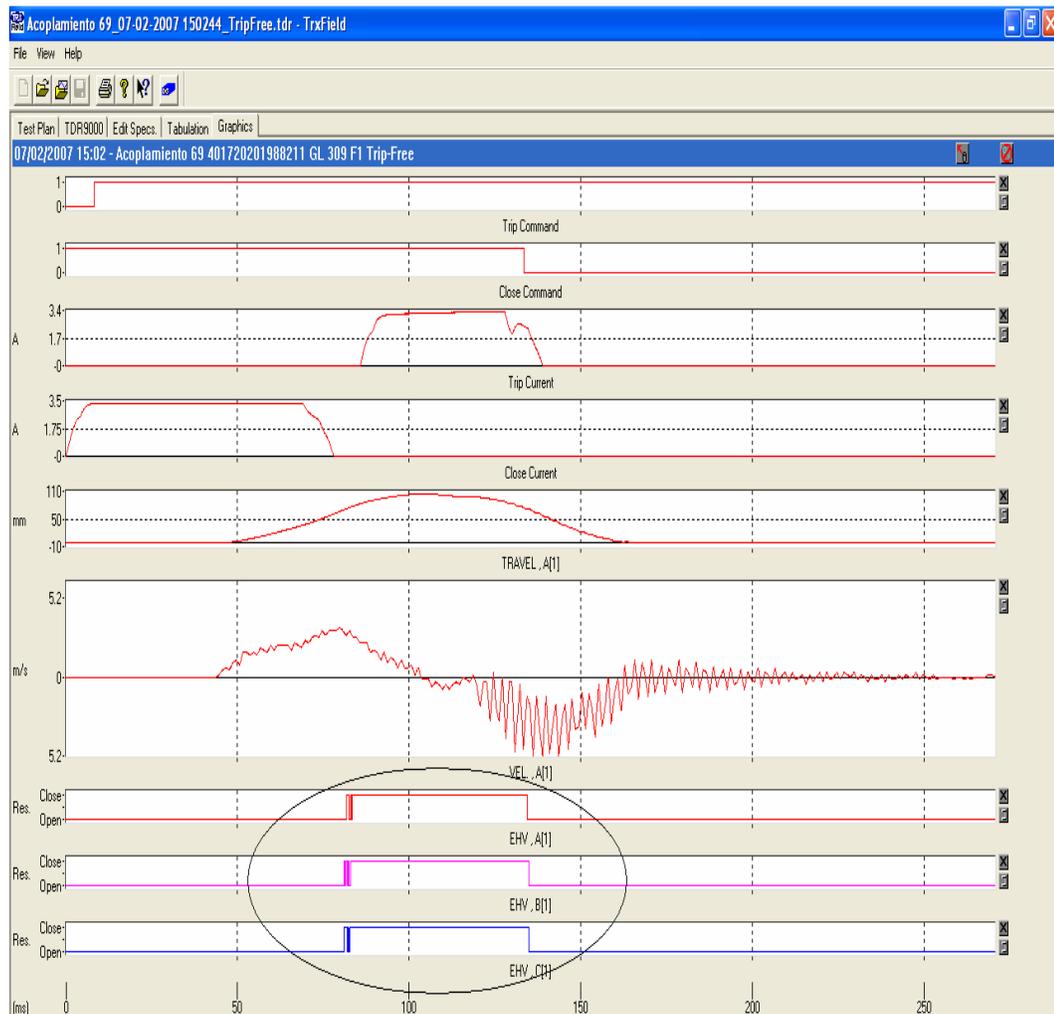
Main Contact Closing Time Vs Mechanical Motion

Phase A		Phase B		Phase C	
Contact	Travel (mm)	Vel. (m/s)	Contact	Travel (mm)	Vel. (m/s)
A-EHV 1	74.682	29.160	B-EHV 1	72.900	29.160
A-EHV 2			B-EHV 2		
			C-EHV 1	72.252	27.540
			C-EHV 2		

Fuente: Pruebas realizadas con el TDR900

En la tabla III, los círculos azules encierran los valores de tiempo predeterminados para una operación de cierre, tanto el tiempo mínimo como el tiempo máximo, expresado en milisegundos; los círculos rojos, muestran los valores obtenidos de la prueba mediante el analizador de interruptores; los círculos negros, nos dan los resultados del desplazamiento de los contactos expresados en milímetros; y por último, los círculos verdes, nos dan los resultados de la velocidad promedio expresado en metros sobre segundo.

Figura 51. Gráfica de tiempo para una operación cierre-apertura



Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

Tabla IV. Resultados de la prueba de tiempo para una operación cierre-apertura

EHV CONTACT TIMING
TRIP-FREE OPERATION

Main Contact Closing Time Measured From Test Initiation									Specs:
									Maximum 85.0
									Minimum 75.0
Phase A			Phase B			Phase C			
Contact	Time (ms)	Compare	Contact	Time (ms)	Compare	Contact	Time (ms)	Compare	
A-EHV 1	81.71	Pass	B-EHV 1	81.11	Pass	C-EHV 1	81.01	Pass	
A-EHV 2			B-EHV 2			C-EHV 2			

Main Contact Closing Time Vs Mechanical Motion								
Phase A			Phase B			Phase C		
Contact	Travel (mm)	Vel. (m/s)	Contact	Travel (mm)	Vel. (m/s)	Contact	Travel (mm)	Vel. (m/s)
A-EHV 1	74.358	29.160	B-EHV 1	72.738	27.540	C-EHV 1	72.414	27.540
A-EHV 2			B-EHV 2			C-EHV 2		

Main Contact Opening Time Measured From Test Initiation									Specs:
									Maximum 35.0
									Minimum 25.0
Phase A			Phase B			Phase C			
Contact	Time (ms)	Compare	Contact	Time (ms)	Compare	Contact	Time (ms)	Compare	
A-EHV 1	134.41	Invest	B-EHV 1	134.91	Invest	C-EHV 1	134.91	Invest	
A-EHV 2			B-EHV 2			C-EHV 2			

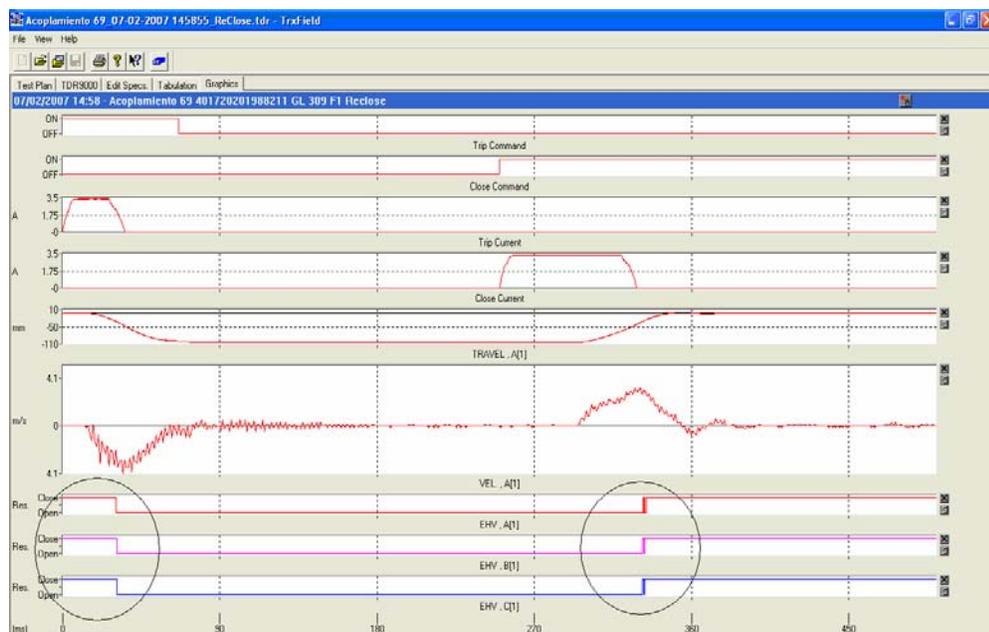
Main Contact Opening Time Vs Mechanical Motion								
Phase A			Phase B			Phase C		
Contact	Travel (mm)	Vel. (m/s)	Contact	Travel (mm)	Vel. (m/s)	Contact	Travel (mm)	Vel. (m/s)
A-EHV 1	73.224	6.480	B-EHV 1	72.900	14.580	C-EHV 1	72.900	14.580
A-EHV 2			B-EHV 2			C-EHV 2		

Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

De acuerdo con las especificaciones del fabricante de este interruptor, los tiempos obtenidos de la prueba de cierre-apertura (círculos rojos) se encuentran dentro de los rangos especificados que aseguran el correcto funcionamiento de dicho equipo, y que el comportamiento de la gráfica (círculo negro) se puede considerar como una gráfica típica para este tipo de prueba.

En la tabla IV, los círculos azules encierran los valores de tiempo predeterminados para las operaciones de cierre y apertura correspondientemente, tanto el tiempo mínimo como el tiempo máximo, expresado en milisegundos; los círculos rojos, muestran los valores obtenidos de los tiempos de cierre y de apertura mediante el analizador de interruptores; los círculos negros, nos dan los resultados del desplazamiento de los contactos expresados en milímetros; y por último, los círculos verdes, nos dan los resultados de la velocidad promedio expresado en metros sobre segundo.

Figura 52. Gráfica de tiempo para una operación de apertura-cierre



Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

Tabla V. Resultados de prueba de tiempo para una operación de apertura-cierre

EHV CONTACT TIMING
RECLOSE OPERATION

Main Contact Opening Time Measured From Test Initiation									Specs:	
									Maximum	35.0
									Minimum	25.0
Phase A			Phase B			Phase C				
Contact	Time (ms)	Compare	Contact	Time (ms)	Compare	Contact	Time (ms)	Compare		
A-EHV 1	30.6	Pass	B-EHV 1	31.1	Pass	C-EHV 1	31.3	Pass		
A-EHV 2			B-EHV 2			C-EHV 2				

Main Contact Opening Time Vs Mechanical Motion								
Phase A			Phase B			Phase C		
Contact	Travel (mm)	Vel. (m/s)	Contact	Travel (mm)	Vel. (m/s)	Contact	Travel (mm)	Vel. (m/s)
A-EHV 1	29.160	22.680	B-EHV 1	30.294	27.540	C-EHV 1	30.942	32.400
A-EHV 2			B-EHV 2			C-EHV 2		

Main Contact Closing Time Measured From Test Initiation									Specs:	
									Maximum*****	
									Minimum*****	
Phase A			Phase B			Phase C				
Contact	Time (ms)	Compare	Contact	Time (ms)	Compare	Contact	Time (ms)	Compare		
A-EHV 1	332.3		B-EHV 1	331.8		C-EHV 1	331.6			
A-EHV 2			B-EHV 2			C-EHV 2				

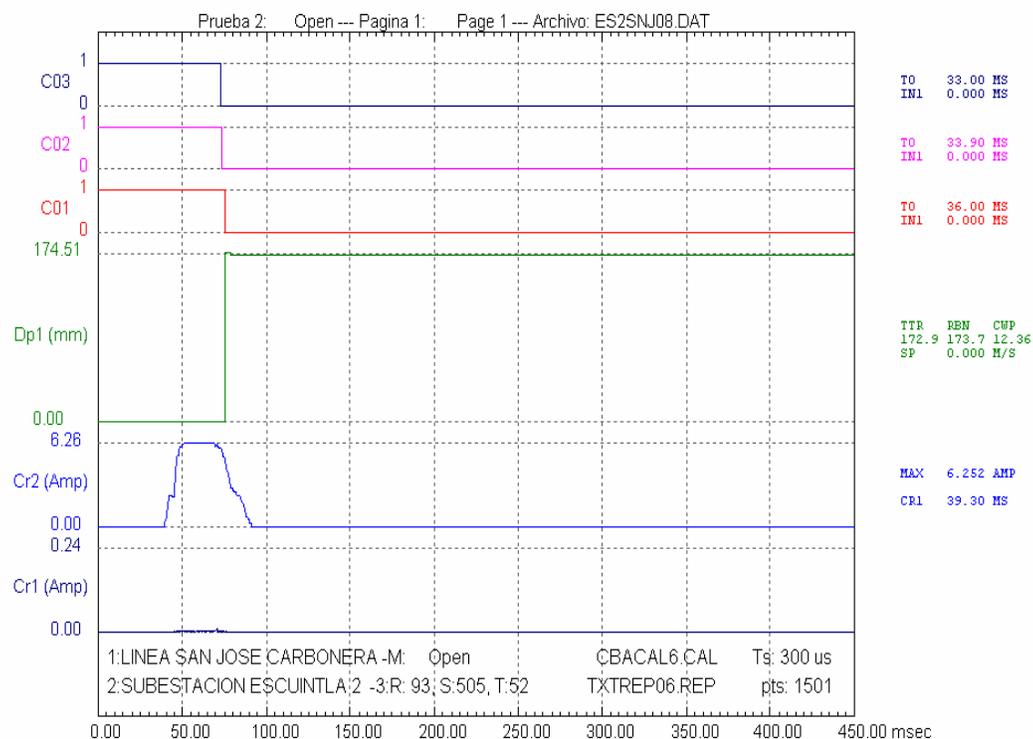
Main Contact Closing Time Vs Mechanical Motion								
Phase A			Phase B			Phase C		
Contact	Travel (mm)	Vel. (m/s)	Contact	Travel (mm)	Vel. (m/s)	Contact	Travel (mm)	Vel. (m/s)
A-EHV 1	28.350	29.160	B-EHV 1	29.808	29.160	C-EHV 1	30.294	27.540
A-EHV 2			B-EHV 2			C-EHV 2		

Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

Los resultados de esta prueba, también se encuentran dentro de los rangos especificados en el manual del usuario proporcionado por el fabricante, después de haber realizado todas las pruebas concernientes con los diferentes tiempos de apertura, cierres y sus combinaciones, se puede concluir que para este interruptor en específico, según la guía del usuario y la experiencia del personal del laboratorio de pruebas.

A continuación analizaremos el interruptor de 230kV que se encuentra ubicado en la subestación Escuintla 2, y que protege la línea San José Carbonera; para este interruptor se utilizó el analizador de interruptores del grupo Zensol llamado CBA, y utiliza el *software* Win28.

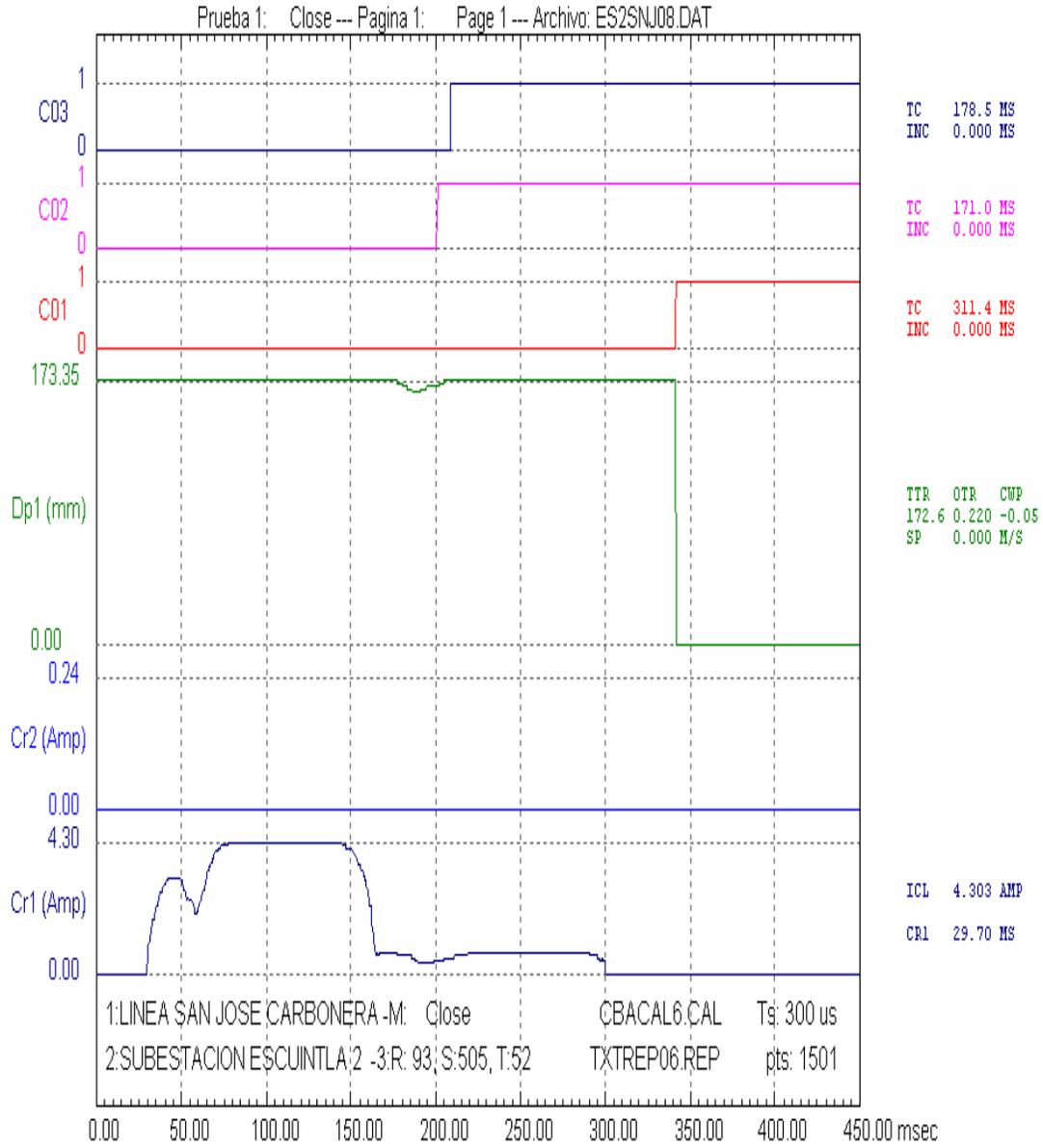
Figura 53. Gráfica de tiempo para una operación de apertura



INTERRUPTOR 230 KV Mon Nov 11 13:32:20 2002

Fuente: Pruebas realizadas con el CBA

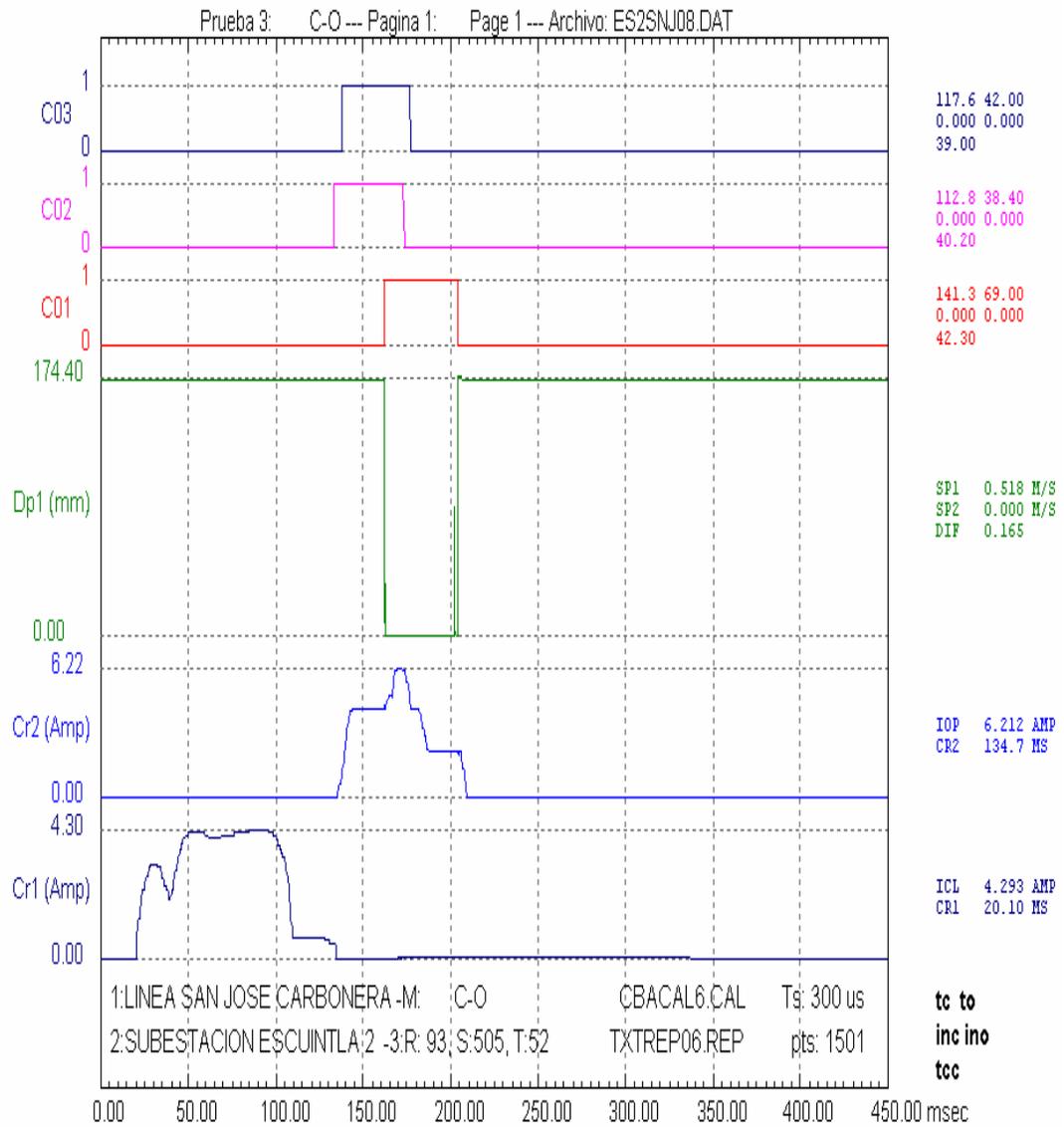
Figura 54. Gráfica de tiempo para una operación de cierre



INTERRUPTOR 230 KV Mon Nov 11 13:32:20 2002

Fuente: Pruebas realizadas con el CBA

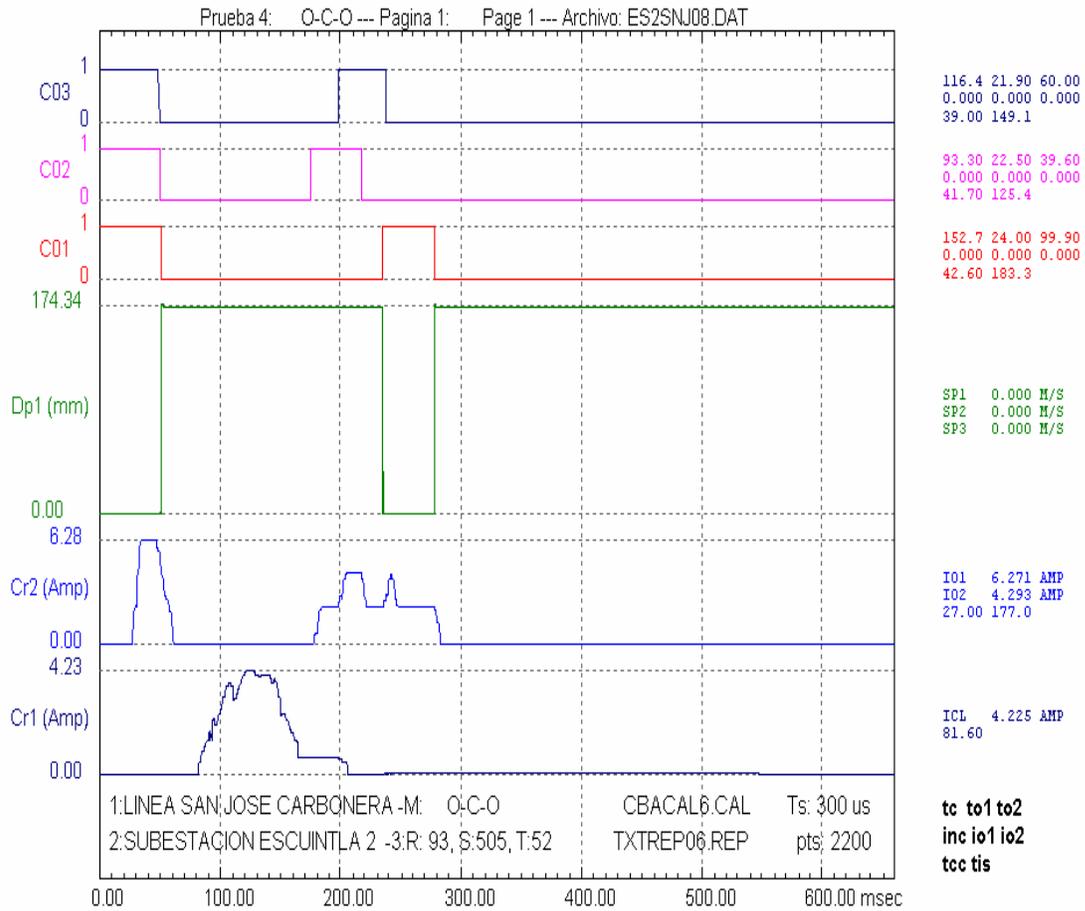
Figura 55. Gráfica de tiempo para una operación de cierre-apertura



INTERRUPTOR 230 KV Mon Nov 11 13:32:20 2002

Fuente: Pruebas realizadas con el CBA

Figura 56. Gráfica de tiempo para una operación de apertura-cierre-apertura



INTERRUPTOR 230 KV Mon Nov 11 13:32:20 2002

Fuente: Pruebas realizadas con el CBA

Para este interruptor, los tiempos para la operación de apertura de los tres contactos (figura 53 parte superior derecha) son bastante similares y se encuentran dentro de los rangos tolerables para considerarlos como correctos.

Para la operación de cierre (figura 54 parte superior derecha), encontramos una diferencia bastante significativa entre el contacto 1 (311.4 ms), el contacto 2 (171.0 ms), y el contacto 3 (178.5 ms), esta diferencia se continuó observando en las pruebas de cierre-apertura (figura 55), apertura-cierre-apertura (figura 56).

Debido a esta gran diferencia de tiempos entre los contactos al momento del cierre para las diferentes combinaciones de operaciones, se procedió a realizar una inspección de campo del interruptor; se pudo encontrar que este problema fue causado por el deterioro de la lubricación del mecanismo de accionamiento de los contactos de la cámara de extinción, debido a esta falta de lubricación, se formó una capa de sedimentos impidiendo el libre movimiento del mecanismo ocasionando que el contacto uno se retrasase en su movimiento de cierre.

Observando los resultados obtenidos de las pruebas de tiempo y con base a la experiencia del personal del laboratorio de pruebas, podemos decir que la mayoría de anomalías encontradas con estas pruebas corresponden a fallas en los mecanismos de accionamiento, y en algunas ocasiones fallas en las bobinas de mando.

3.2. Pruebas de desplazamiento de interruptores

3.2.1. La curva de desplazamiento

Durante las pruebas de tiempo de interruptores, la medición de los tiempos de operación desde la primera aparición de la orden de disparo en la bobina de mando hasta la conmutación del contacto principal, se graba con un instrumento de medición de tiempos, tal como el TRD9000.

Esta medición ofrece una valiosa información del estado de los interruptores y permite, en la mayoría de los casos, la verificación precisa de la presencia o ausencia de problemas en el interruptor.

Pero esta información no revela todos los secretos de los interruptores, por eso es de suma importancia repetir la prueba varias veces para tener la certeza de las mismas, de ser posible realizar también las pruebas de tiempos y resistencia de contactos.

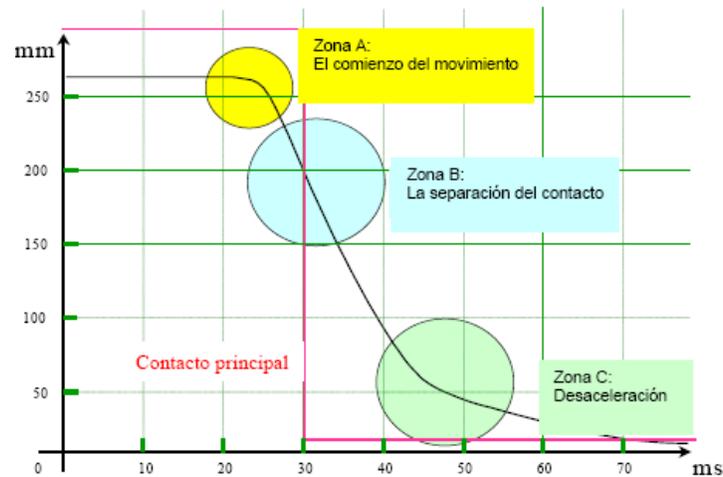
Siempre que sea posible, se debe realizar una medición punto por punto del movimiento de los componentes internos del interruptor, desde el comienzo del movimiento hasta que éste llega al completo reposo, se traza una curva llamada curva de desplazamiento.

Aunque la curva de tiempo del contacto principal da el momento cuando empieza el movimiento y cuando se conmuta el contacto, la información contenida en la curva de desplazamiento es interesante por que nos permite seguir todo el movimiento de comienzo a fin con el cual tenemos una mejor referencia a cerca del estado del interruptor.

3.2.2. La operación de apertura

Se muestra un ejemplo de una curva de desplazamiento para una operación de Apertura en la figura 57, superpuesta con una curva de tiempo de apertura para el contacto principal (en rojo).

Figura 57. Curva de desplazamiento para una operación de apertura



Fuente: Zensol

La primera característica a verificar es observar la forma general de la curva; en ésta se ven tres zonas (encerradas en un círculo en la fig. 57) que merecen una atención particular.

- 1 La zona A: El comienzo del movimiento.
- 2 La zona B: La separación del contacto.
- 3 La zona C: Del comienzo de la desaceleración hasta el final de la posición de reposo.

3.2.2.1. Zona A: El comienzo del movimiento

Esta es donde empieza el movimiento, es de suma importancia saber si el movimiento ha comenzado en el momento correcto, por ejemplo, un retraso con respecto a la especificación de referencia significa que existe un problema.

El problema puede ser de origen eléctrico si la bobina no es excitada a tiempo, o mecánico, entre el mecanismo de mando que envía la orden del movimiento y el contacto móvil del propio interruptor.

3.2.2.2. Zona B: Separación de contactos

Aquí es donde se separan los contactos principales uno del otro, en este preciso instante, el arco empieza a formarse y el interruptor implementa sus medidas para extinguirlo.

La velocidad de separación se convierte en un factor importante y primordial a fin de lograr la ruptura del circuito, el método para calcular la velocidad promedio en esta zona depende del diseñador del interruptor.

3.2.2.3. Zona C: Desaceleración

Aquí es donde el movimiento se desacelera hasta que el contacto móvil del interruptor se detiene completamente.

La cantidad de energía requerida en el proceso de ruptura es proporcional a la intensidad de la corriente a interrumpir, una vez que la corriente ha sido interrumpida y el arco ha sido extinguido, la energía desarrollada es bastante grande. Se ponen en acción medios eficaces de amortiguamiento para absorber este exceso de energía y así reducir el riesgo de dañar los componentes internos del interruptor, el análisis de esta zona hace posible determinar si el amortiguamiento es óptimo, lo que significa que el movimiento se detiene gradualmente.

Un insuficiente amortiguamiento, o *underdamping*, hace que las partes móviles experimenten choques al final del viaje, lo cual ocasiona un daño severo.

Un amortiguamiento repentino, donde la energía cinética desarrollada por las partes móviles del interruptor se absorbe en un tiempo muy pequeño, ocasiona un daño semejante a un *underdamping*, este fenómeno es llamado *overdamping*.

Debido a la naturaleza de los medios mecánicos con los que se realiza la separación de los contactos, se produce un sobreviaje de los contactos que se pueden visualizar en las gráficas de desplazamiento como un movimiento más allá de lo esperado de los contactos.

También se da el fenómeno del rebote que es el movimiento tendiente a juntar los contactos, en conjunto el sobreviaje y el rebote hacen que la forma de la gráfica de desplazamiento aparezca en el final del movimiento como una onda con un movimiento oscilatorio hasta llegar a un estado estable.

3.2.3. Operación de cierre

En la figura 58 se muestra un ejemplo de una curva de desplazamiento para una operación de Cierre, superpuesta con una curva de tiempo para el contacto principal (en rojo).

La primera característica a verificar es observar la forma general de la curva; en ésta se ven tres zonas (encerradas en un círculo en la fig. 58) que merecen una atención particular.

Zona A: El comienzo del movimiento.

Zona B: El cierre de los contactos

Zona C: Del comienzo de la desaceleración hasta el final de la posición de reposo.

3.2.3.1. Zona A: El comienzo del movimiento

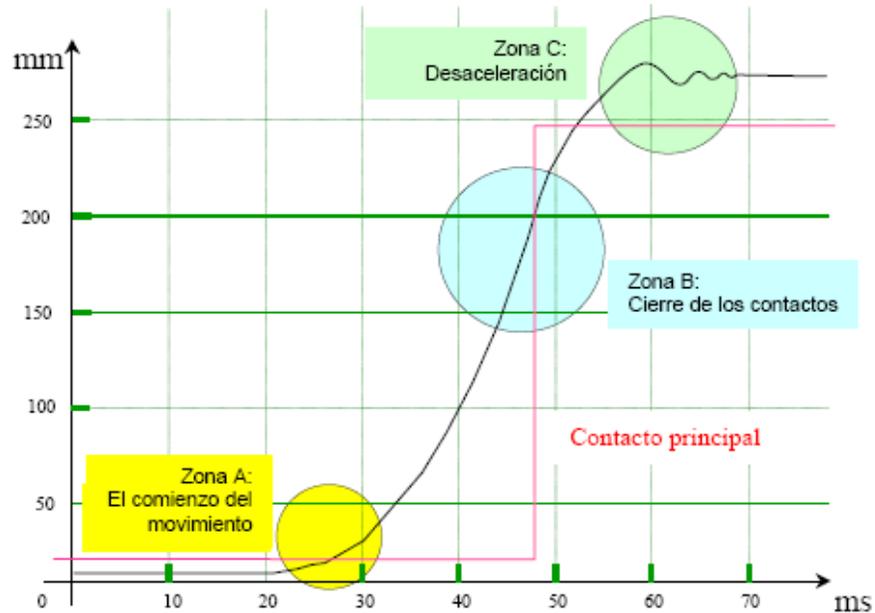
Como en el caso de la curva del desplazamiento de apertura, aquí es donde el movimiento empieza, y es muy importante conocer si el movimiento se ha iniciado en el lugar correcto.

3.2.3.2. Zona B: Cierre de los contactos

Aquí es donde los contactos principales entran en contacto. En esta zona, también llamada la zona de pre-arco, como los contactos están más cerca uno de otro, el dieléctrico, que es una función de la distancia de separación, se hace insuficiente y se forma una corriente de pre-arco dentro de un arco, cuya duración está en función de la velocidad de los contactos.

Por lo tanto, la velocidad de los contactos es un factor importante al limitar el desgaste prematuro de los contactos, como en el caso para la operación de apertura, el método para el cálculo de la velocidad promedio en esta zona es también determinado por el diseñador del interruptor. Solamente el diseñador puede determinar este método de cálculo y establecer la especificación de referencia.

Figura 58. Curva de desplazamiento para una operación de cierre



Fuente: Zensol

3.2.3.3. Zona C: Desaceleración

Aquí es donde el movimiento se reduce lentamente hasta llegar a una parada completa de los contactos móviles del interruptor.

La energía necesaria para el proceso de cierre es menor que la desarrollada en el proceso de ruptura, pero sin embargo ésta es considerable.

El exceso de energía se traduce en una sobre-carrera del recorrido, lo cual, si excede las tolerancias, podría causar un severo daño al dispositivo.

3.2.4. Curva de velocidad

Se calcula una curva de velocidad por la derivada de la curva del desplazamiento, usando un software de análisis como el *TRX Field*. La curva de velocidad da la velocidad como una función del tiempo, lo cual nos permite adquirir nueva información sobre el comportamiento dinámico del interruptor.

$$V_0 \text{ (m/s)} = \frac{(Y_0 - Y_1) \text{ (mm)}}{(X_0 - X_1) \text{ (ms)}}$$

Donde:

X₀, Y₀ = son las posiciones iniciales

X₁, Y₁ = son las posiciones finales

3.2.5. Curva de aceleración

De la misma manera, se puede trazar una curva de aceleración, como la derivada de la curva de velocidad, otra vez usando el software de análisis *TRX Field*, el cual nos brinda más datos útiles.

$$a = \frac{\partial V_0}{\partial t} = \left(\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{(Y_0 - Y_1)}{(X_0 - X_1)} \right) \right) \text{ (m/s}^2\text{)}$$

3.2.6. Realizando la medición

Para grabar la curva de desplazamiento, se necesita algún tipo de montaje entre el equipo TDR9000 de DOBLE y el interruptor. Se usa un transductor de desplazamiento para percibir el movimiento del contacto móvil.

El *software TRX Field* procesa los datos, traza la curva de desplazamiento y ejecuta los diversos cálculos de velocidad. Para comprender el proceso se muestra una breve descripción del transductor, del interruptor y del TDR9000.

3.2.6.1. El transductor de desplazamiento

3.2.6.1.1. Descripción

El transductor de desplazamiento en su forma más elemental consta de una parte fija y de una parte móvil. La parte móvil está sujeta al contacto móvil del interruptor bajo prueba, y se mueve con los contactos, mientras que la parte fija sirve de referencia.

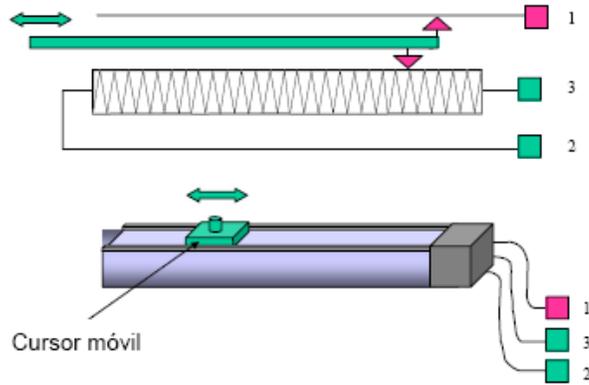
Hay varios tipos de transductores disponibles en el mercado. Se diferencian por el método usado para identificar al valor relativo con respecto al valor de referencia. Algunos ejemplos de transductores son:

- Transductor magnético
- Transductor óptico
- Transductor resistivo

El más popular de ellos es el transductor resistivo, el que será descrito en detalle, este tipo de transductor está compuesto de una resistencia y de un cursor que se mueve a lo largo de ella. Hay dos tipos de transductores resistivos:

- El transductor de desplazamiento Lineal, o transductor lineal (fig. 59)
- El transductor de desplazamiento Rotativo, o transductor rotativo (fig. 60)

Figura 59. Transductor lineal

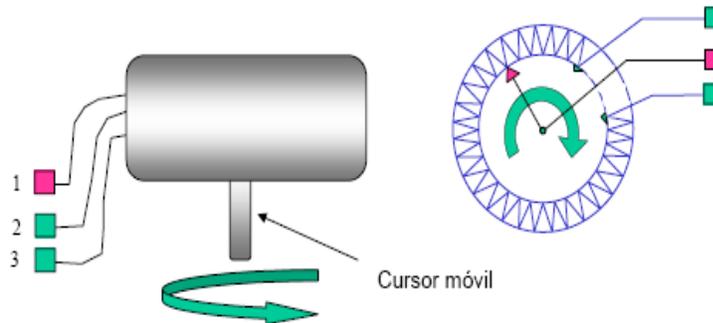


Fuente: Zensol

La diferencia radica en la forma física del resistor de referencia y en el modo como se mueve el cursor.

Para el transductor lineal, el desplazamiento del cursor es lineal, en una línea recta, mientras que para el transductor rotativo, el desplazamiento es una rotación alrededor de un eje.

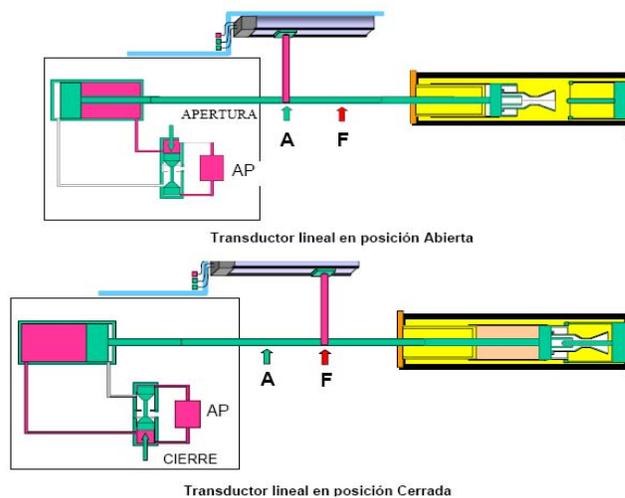
Figura 60. Transductor rotacional



Fuente: Zensol

El movimiento generado por el mecanismo de mando podría ser rotativo, el cual se traduce a un movimiento lineal por medio de un juego de palancas y varillas conectoras. Cuando el movimiento lineal del contacto es accesible indirectamente, por ejemplo a través de una varilla de conexión, un transductor lineal puede reproducir de manera precisa este movimiento sujetándolo a la varilla en cuestión. En la figura 62, se muestra un ejemplo de un movimiento lineal censado por un transductor lineal (en el caso de un movimiento accesible).

Figura 62. Ejemplo del transductor lineal



Fuente: Zensol

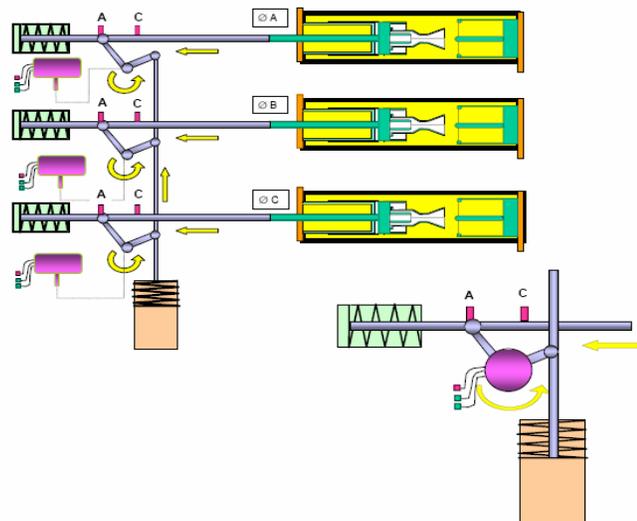
En la figura 62, A es la posición del transductor de movimiento cuando el interruptor se encuentre abierto, y B es la posición del transductor cuando el interruptor este cerrado.

En el caso donde solo es accesible el movimiento de mando, y si este movimiento es rotativo, el movimiento final del contacto móvil se mide transformando este movimiento rotativo usando varias palancas y conectando varillas de diferentes tamaños.

Los tamaños de las palancas añaden factores multiplicadores que influyen la curva deseada, en vista que el movimiento angular de estas palancas es siempre el mismo, en este caso, el uso de transductores rotativos dará mejores resultados.

Sin embargo, debe tener en cuenta una condición, se debe dibujar una curva de la traducción del movimiento punto por punto, para convertir el movimiento angular en uno lineal, un ejemplo del uso de un transductor rotativo es mostrado en la figura 63.

Figura 63. Ejemplo del transductor rotacional



Fuente: Zensol

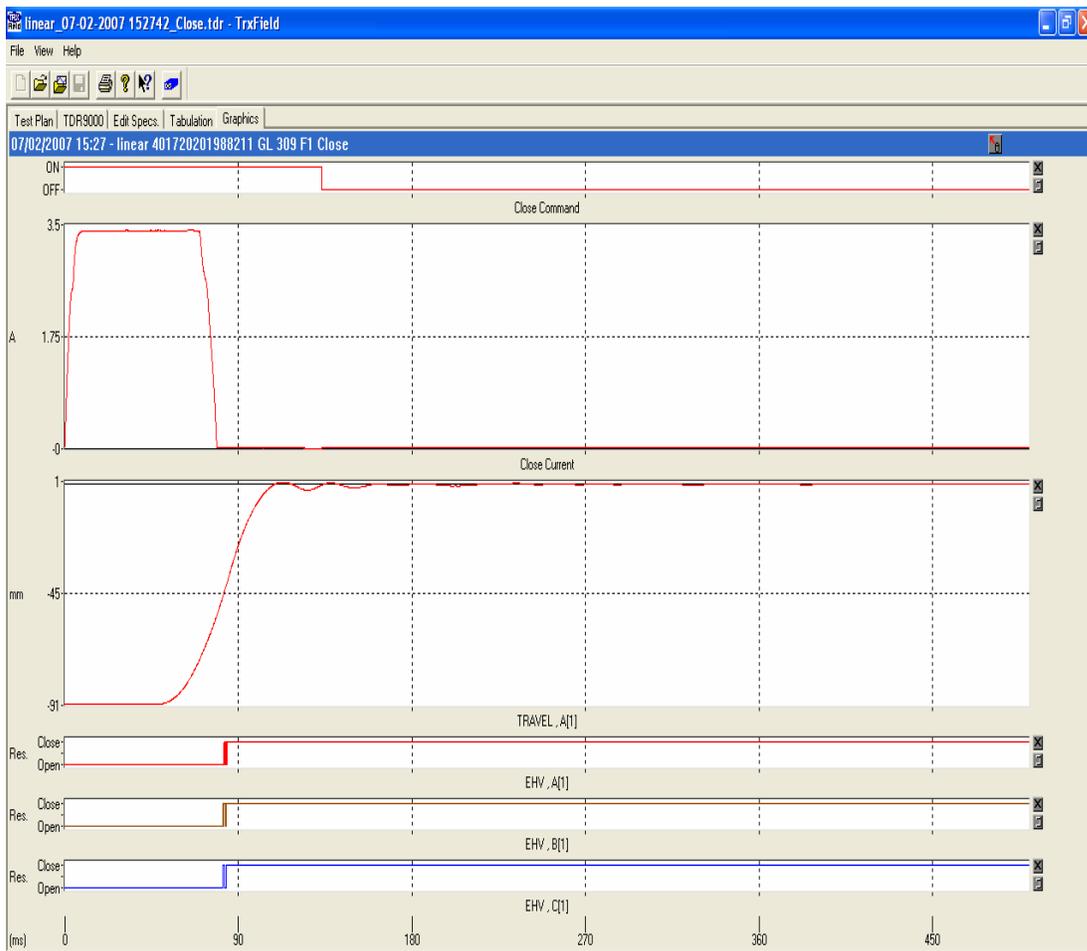
3.2.6.3. Adquisición y presentación visual de los resultados

La adquisición y la representación visual de los resultados se realizan a través de los canales de entradas del TDR9000.

Se mide la señal recogida del transductor de desplazamiento por medio de los módulos ya sea el *OCB* o el *EHV*, y se transmite al software de análisis *TRX Field*, el cual dibuja la curva en la pantalla de la computadora.

La figura 64 muestra un ejemplo del reporte gráfico de TDR9000, tal y como se muestra en la pantalla de computadora.

Figura 64. Reporte gráfico



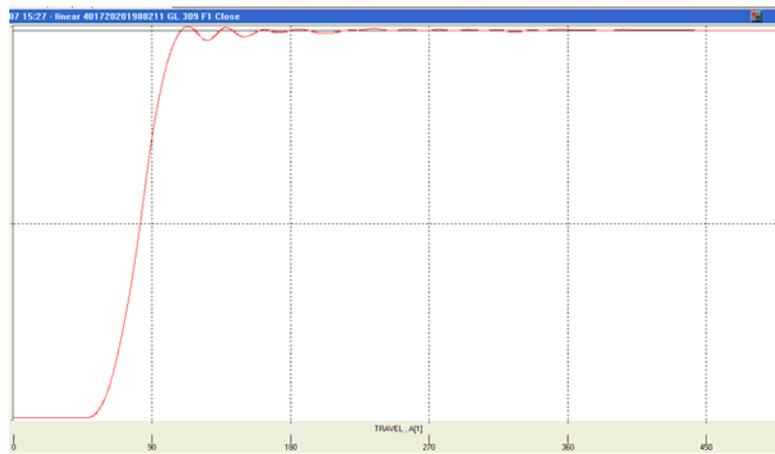
Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

3.2.6.4. Curva de desplazamiento

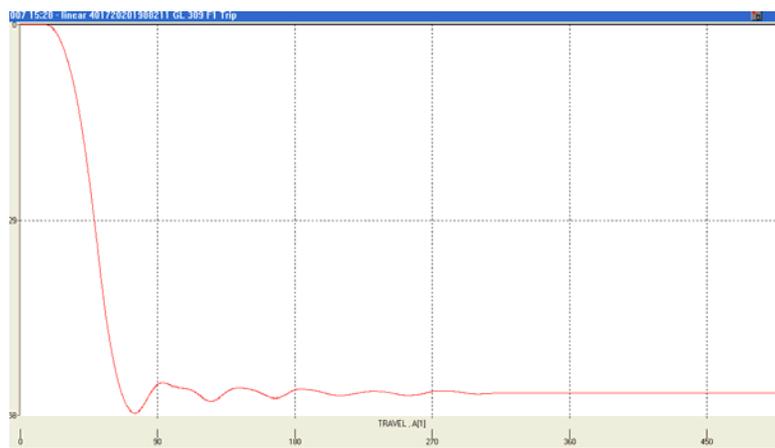
La curva de desplazamiento se dibuja generalmente con la unidad de medida (milímetros, mm.) en el eje vertical y el tiempo en milisegundos en el eje horizontal. La figura 65 muestra ejemplos de curvas de desplazamiento para operaciones de cierre y de apertura.

Figura 65. Ejemplos de curvas de desplazamiento

a) cierre



b) apertura



Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

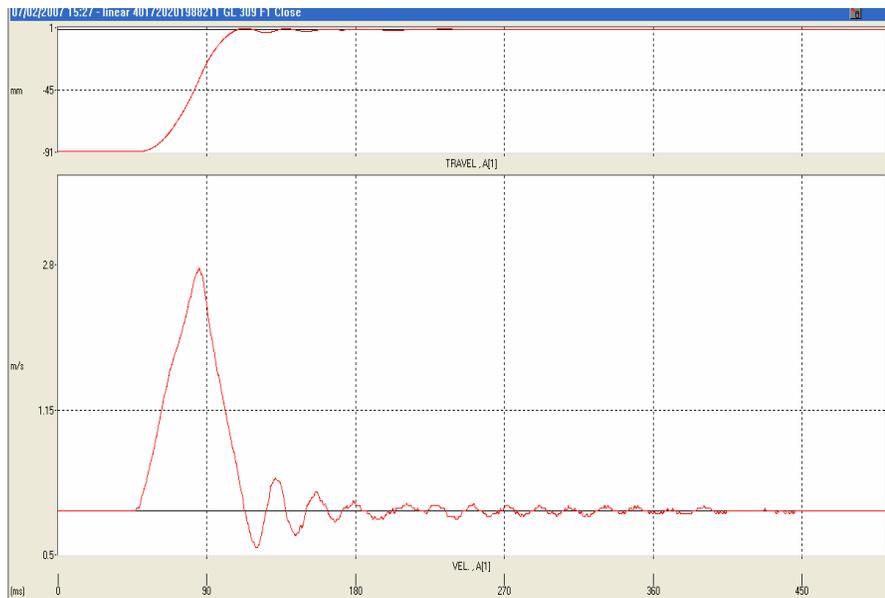
3.2.6.4.1. Velocidad

Un parámetro importante en la operación de los interruptores de alta tensión es la velocidad de los contactos en la apertura, como en el cierre. La curva de desplazamiento también sirve para el cálculo de la velocidad de los contactos en un momento específico, o la velocidad instantánea, o puede servir para calcular la velocidad promedio para un intervalo de tiempo predeterminado, o velocidad promedio.

3.2.6.4.2. Curvas de velocidad instantáneas

En la figura 66 se muestra un ejemplo de la derivación de una señal de desplazamiento (arriba) que produjo una curva mostrando la evolución de la velocidad de desplazamiento (abajo).

Figura 66. Curva de desplazamiento y velocidad



Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

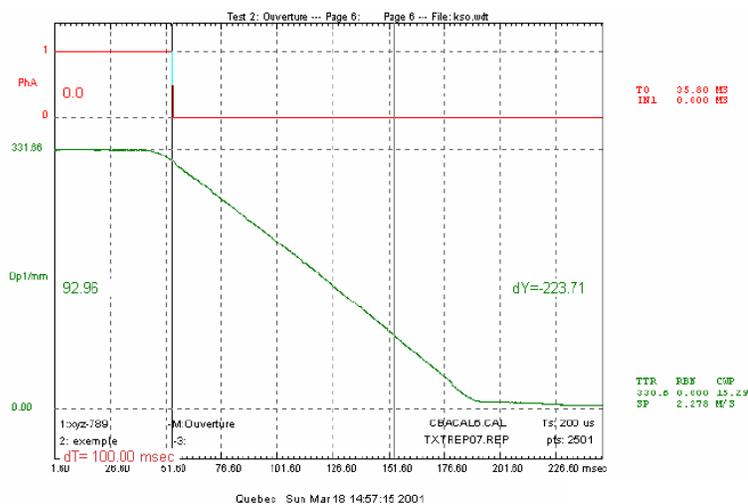
3.2.6.4.3. Velocidad promedio

La velocidad buscada usualmente es el instante en que el interruptor hace contacto (en el Cierre) o se abre (en la Apertura). Sin embargo, como es difícil obtener una velocidad consistente para cada operación, es mejor calcular una velocidad promedio sobre un intervalo de tiempo antes y después de este punto.

3.2.6.4.4. Ejemplo de cálculo de la velocidad promedio para una operación de apertura

Para calcular la velocidad promedio en la Apertura (figura 67), se debe determinar el punto A en la curva de desplazamiento, el cual es el momento exacto en que los contactos principales se separan, debe ser determinado. Se determina el punto B añadiendo dT milisegundos (ms) al tiempo del Punto A.

Figura 67. Curva de desplazamiento apertura



Fuente: Zensol

Valor del eje de desplazamiento del punto A = YA mm

Valor del eje de Tiempo del punto A = XA ms

Valor del eje de Desplazamiento del punto B = YB mm

Valor del eje de Tiempo del punto B = XB ms

La velocidad promedio en la apertura, en metros por segundo (m), se calcula usando la fórmula siguiente:

$$V_o \text{ (m/s)} = \frac{(Y_A - Y_B) \text{ (mm)}}{(X_B - X_A) \text{ (ms)}}$$

En este caso $X_B - X_A = dT = 100 \text{ ms}$

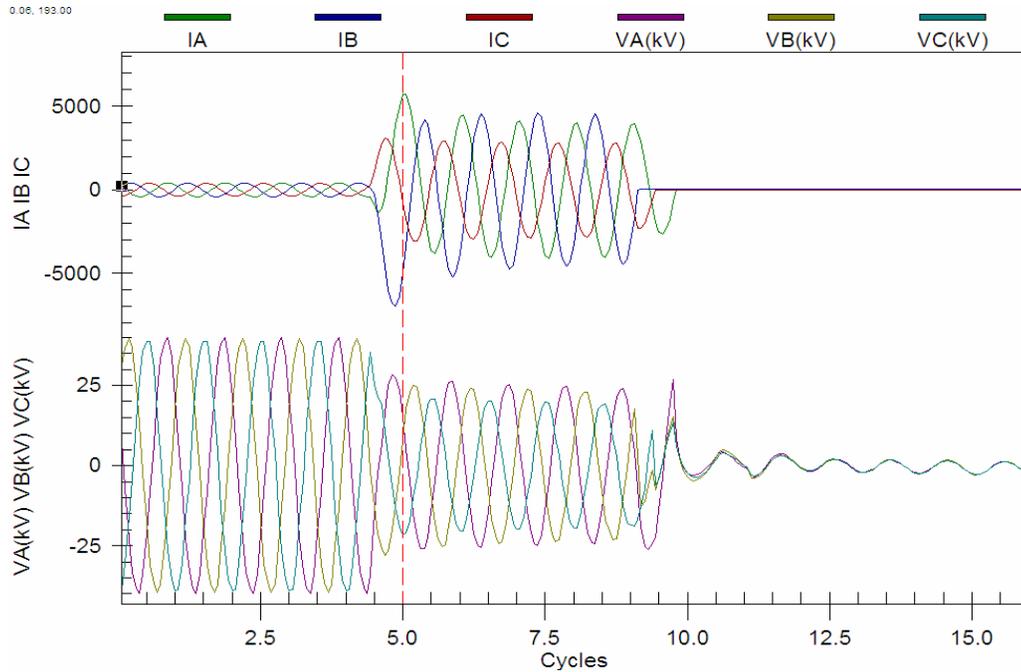
$Y_A - Y_B = dY = 223.71 \text{ mm}$, así:

$$V_o = 223.71 / 100 = 2.24 \text{ m/s}$$

Para evitar condiciones críticas en la red, es necesario que los interruptores liberen las fallas en el menor tiempo posible, es decir deben tener una buena velocidad de respuesta ante un disturbio ocurrido en la red; para comprender la relación entre la velocidad de respuesta del interruptor y el comportamiento de las corrientes y voltajes durante una falla agregamos una oscilografía de apertura (figura 68) de un interruptor obtenida de un SEL5601.

Podemos observar que antes que ocurra la falla las corrientes y voltajes de la línea se encuentran estables (los primeros cuatro ciclos), al momento de ocurrir la falla las corrientes se elevan hasta el orden de los kilo amperios, y los voltajes disminuyen drásticamente durante unos cuantos ciclos (del cuarto ciclo al décimo ciclo en la figura 68), los mandos del interruptor detectan la falla y abren el interruptor haciendo que las corrientes y voltajes sean cero.

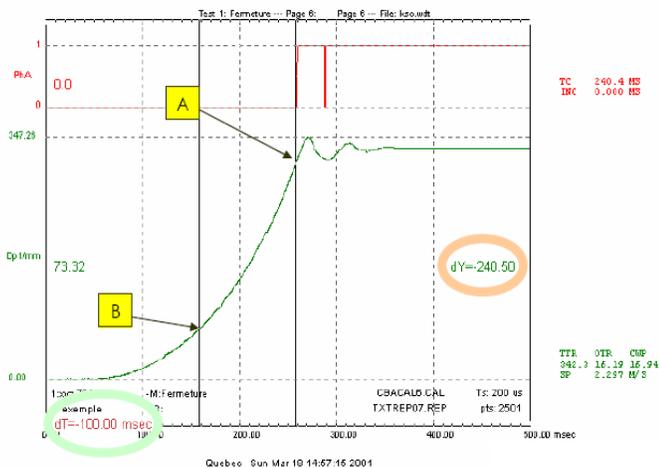
Figura 68. Oscilografía de una operación de apertura



Fuente: Laboratorio de protecciones ETCEE

3.2.6.4.5. Ejemplo de cálculo de la velocidad promedio para operación de cierre

Figura 69. Curva de desplazamiento cierre



Fuente: Zensol

Para calcular la velocidad operación de cierre (figura 69), se debe determinar el punto A en la curva de desplazamiento, el cual es el momento exacto donde los contactos principales hacen contacto. Se halla el punto B sustrayendo dT milisegundos (ms) del tiempo del punto A.

Valor del eje de desplazamiento del punto A = YA mm

Valor del eje de Tiempo del punto A = XA ms

Valor del eje de Desplazamiento del punto B = YB mm

Valor del eje de Tiempo del punto B = XB ms

La velocidad promedio en el Cierre, en metros por segundo (m/s), se calcula usando la fórmula siguiente:

$$V_o \text{ (m/s)} = \frac{(Y_A - Y_B) \text{ (mm)}}{(X_A - X_B) \text{ (ms)}}$$

En este caso $X_A - X_B = dT = 100 \text{ ms}$

$Y_A - Y_B = dY = 240.5 \text{ mm}$, así:

$$V_o = 240.5 / 10 = 2.4 \text{ m/s}$$

3.2.6.5. Precauciones generales

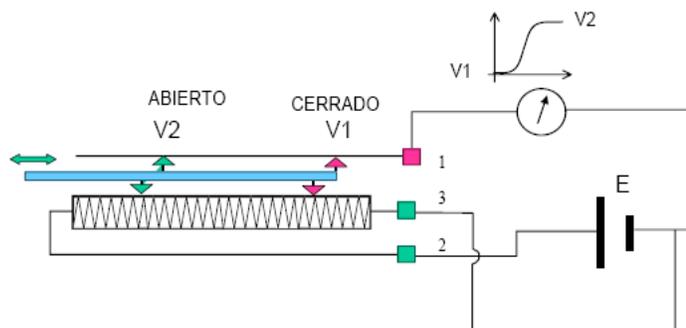
Se deben observar ciertas precauciones cuando el transductor está instalado y los cables conectados:

3.2.6.5.1. Curvas invertidas

En general, las curvas de desplazamiento muestran la posición CERRADA por encima de la posición ABIERTA.

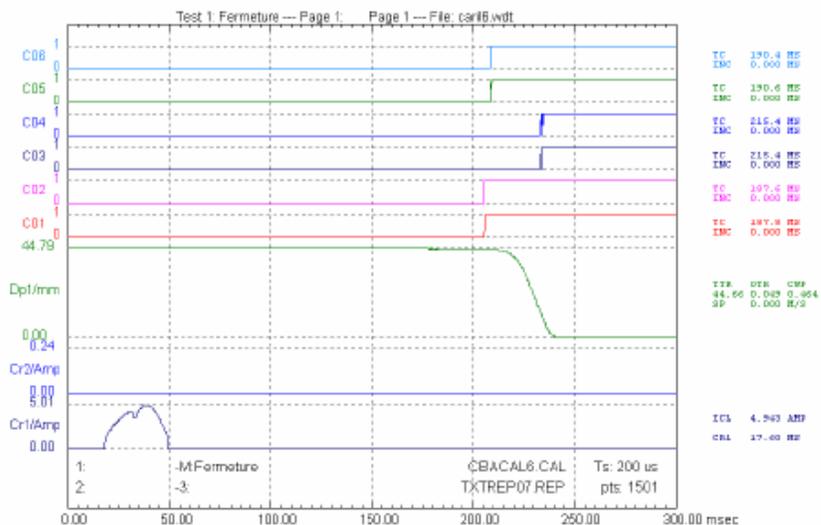
Para observar esta regla, los cables no deben intercambiarse entre los terminales 2 y 3 del transductor. De lo contrario la curva será dibujada al revés (ver las figuras 70 y 71)

Figura 70. Conexiones que causan curvas invertidas



Fuente: Zensol

Figura 71. Ejemplo de curvas invertidas

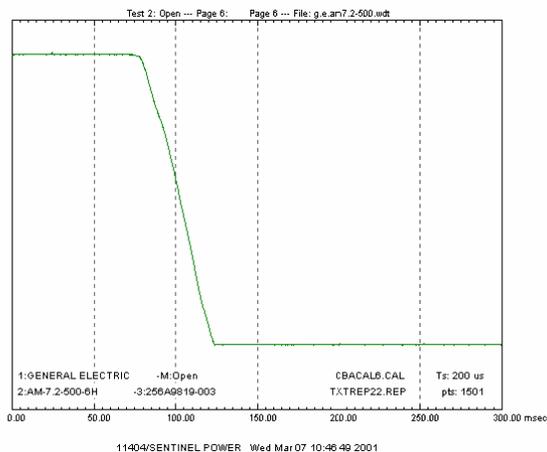


Fuente: Zensol

3.2.6.5.2. Capacidad de transductor

Cuando se instala el transductor, debemos asegurarnos que el movimiento medido no exceda la capacidad del transductor o éste se dañará, y la curva mostrada no representará el verdadero movimiento del interruptor. En el gráfico 72 hay un ejemplo de lo que pasaría si el transductor "tocara fondo" antes que el interruptor alcance el fin de su movimiento, lo que se ve como un ángulo agudo al fondo del gráfico.

Figura 72. Ejemplo de curva de desplazamiento excediendo el rango del transductor



Fuente: Zensol

3.2.7. Resultados de la prueba de desplazamiento

Como ya se ha mencionado en páginas anteriores, la prueba de desplazamiento que se practican en interruptores de potencia, es una herramienta necesaria para asegurar el correcto funcionamiento de estos equipos tan importantes dentro de las subestaciones eléctricas.

Para comprender mejor el uso de esta herramienta en esta sección de la investigación se presentan los resultados de las pruebas realizadas en la subestación Guatemala Sur a dos interruptores del mismo fabricante y con números de serie muy similares, para identificar el interruptor defectuoso.

Primero se analizará uno por uno cada interruptor, observaremos las gráficas de una operación de apertura, luego una operación de cierre y por último una operación de cierre-apertura, luego se procederá a sobreponer las gráficas de los dos interruptores para poder determinar cuál de los dos presenta un problema con su desplazamiento.

Primer interruptor

Características del interruptor

Fabricante: ALSTOM

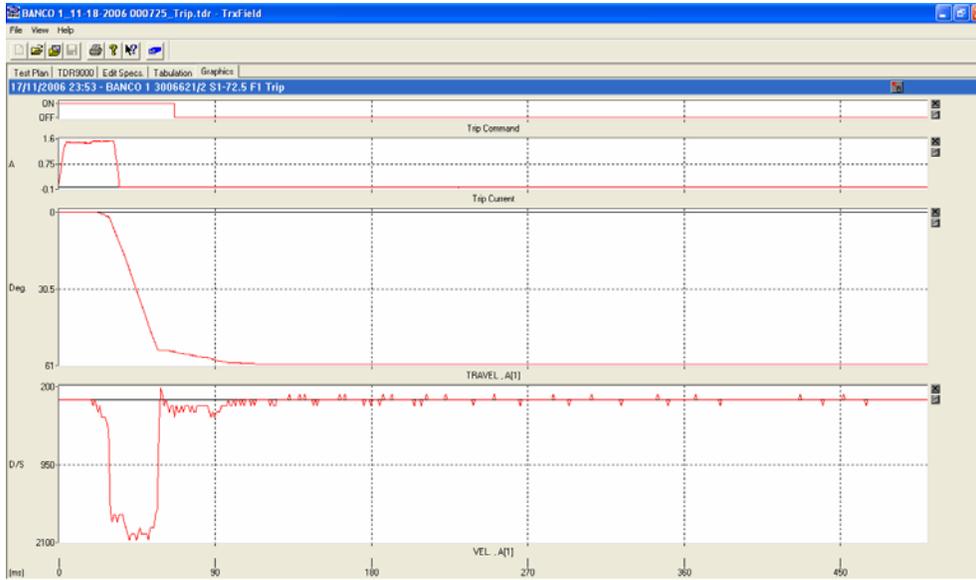
Número de modelo: S1-72.5F1

Ubicación: Guatemala Sur

Identificación especial: Banco 1

Número de serie: 3006621/2

Figura 73. Gráfica de desplazamiento para una operación de apertura



Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

Tabla VI. Datos obtenidos de la prueba

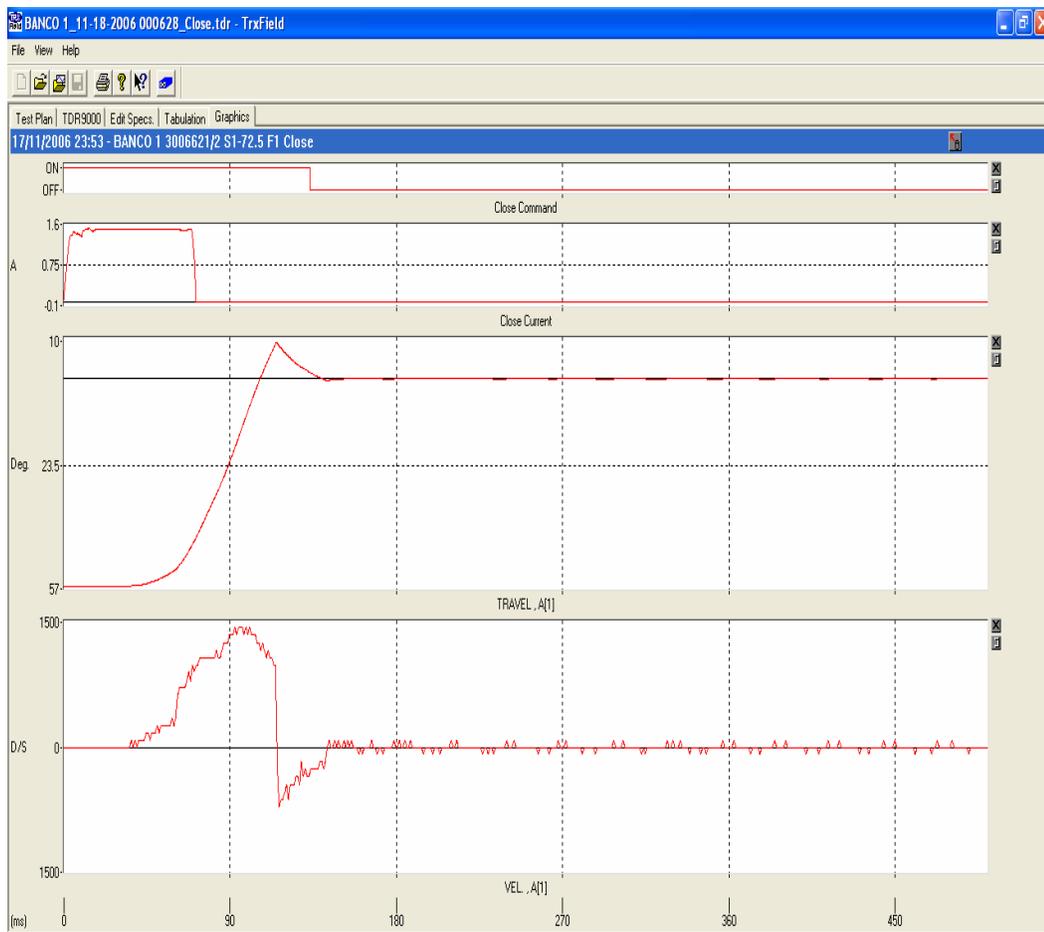
MECHANICAL MOTION CHANNELS 1-3
TRIP OPERATION

Specifications	Test results	Compare
Total Travel		
Expected 52.0 degrees	TRAVEL 1 60.3 degrees	Investig
Tolerance + 2.0	TRAVEL 2	
- 2.0	TRAVEL 3	
Overtravel		
Expected ***** degrees	TRAVEL 1 0.1 degrees	
Tolerance + *****	TRAVEL 2	
- *****	TRAVEL 3	
Rebound		
Expected ***** degrees	TRAVEL 1 0.2 degrees	
Tolerance + *****	TRAVEL 2	
- *****	TRAVEL 3	

Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

Para la tabla VI, el resultado obtenido encerrado en el círculo negro corresponde al desplazamiento total del contacto para una operación de apertura expresado en grados, en el círculo azul se encuentra el resultado del sobreviaje (*overtravel*, ver anexo A), en el círculo verde se encuentra el resultado del rebote (*rebound*, ver anexo A), que son características propia de los interruptores debido a la naturaleza de los mecanismos de accionamiento de los contactos.

Figura 74. Gráfica de desplazamiento para una operación de apertura



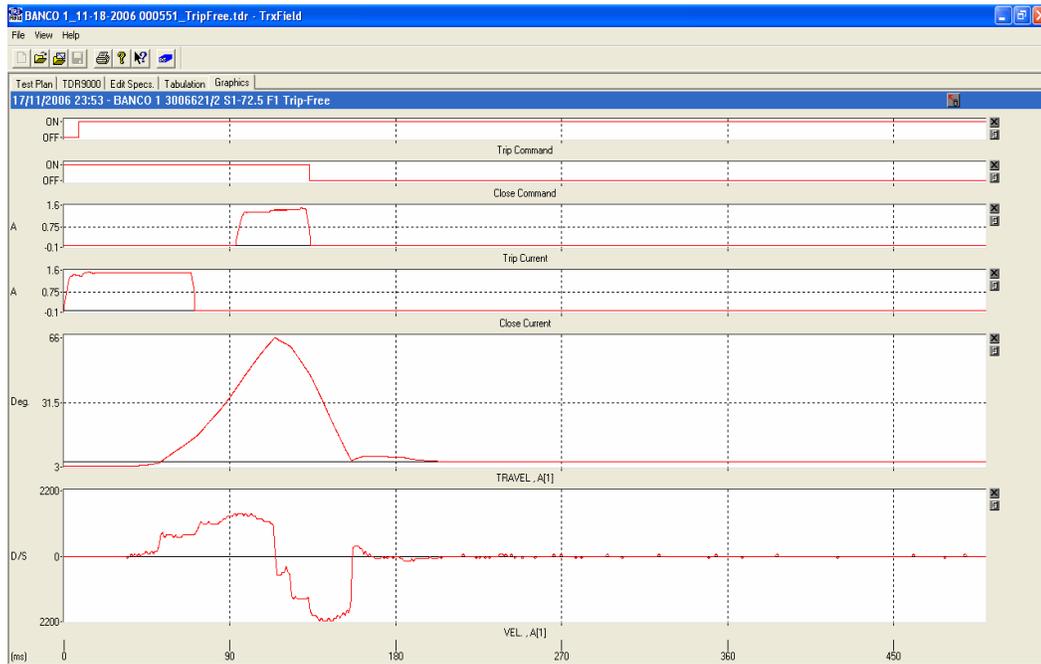
Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

Tabla VII. Resultados obtenidos de la prueba

MECHANICAL MOTION CHANNELS 1-3				
CLOSE OPERATION				
Specifications		Test results		Compare
Total Travel				
Expected	52.0 degrees	TRAVEL 1	56.1 degrees	Investig
Tolerance +	2.0	TRAVEL 2		
-	2.0	TRAVEL 3		
Overtravel				
Expected	***** degrees	TRAVEL 1	9.9 degrees	
Tolerance +	*****	TRAVEL 2		
-	*****	TRAVEL 3		
Rebound				
Expected	***** degrees	TRAVEL 1	0.4 degrees	
Tolerance +	*****	TRAVEL 2		
-	*****	TRAVEL 3		

Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

Figura 75. Gráfica de desplazamiento para una operación de cierre-apertura.



Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

Segundo interruptor

Características del interruptor

Fabricante: ALSTOM

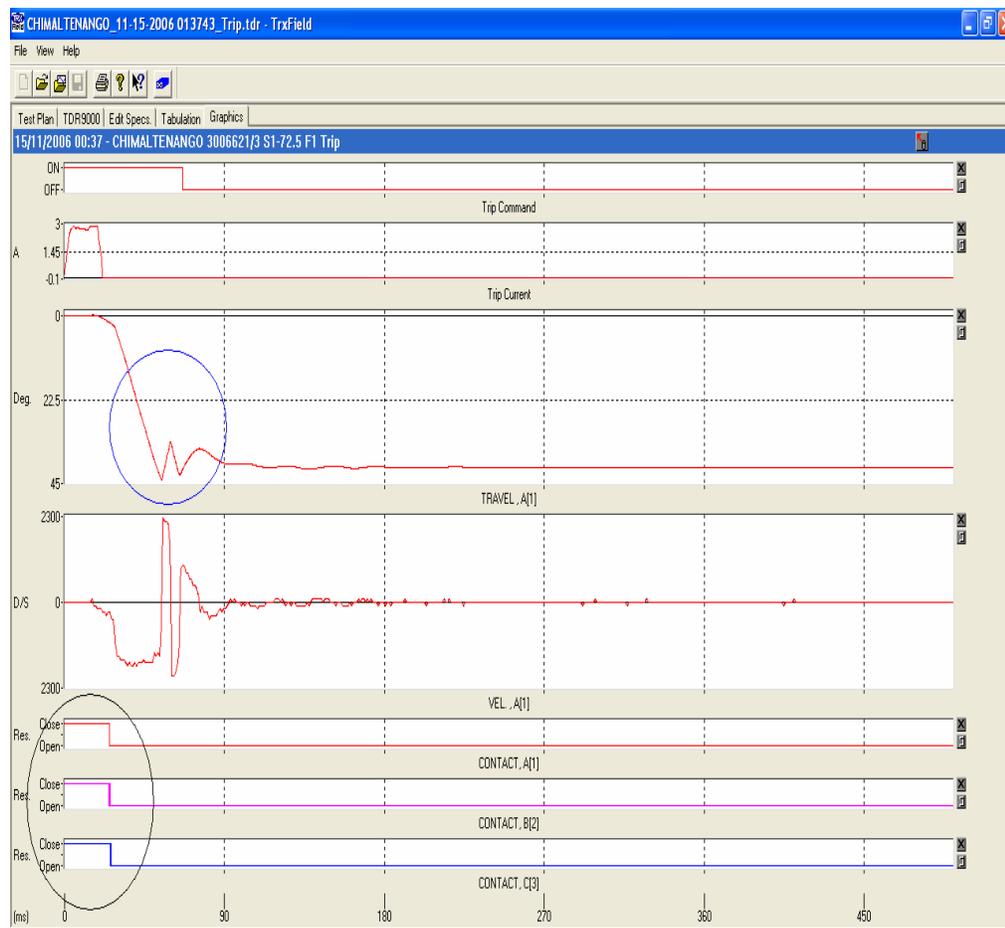
Número de modelo: S1-72.5F1

Ubicación: Guatemala Sur

Identificación especial: Chimaltenango

Número de serie: 3006621/1

Figura 76. Gráfica de desplazamiento para una operación de apertura



Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

Tabla VIII. Resultados obtenidos de la prueba

MECHANICAL MOTION CHANNELS 1-3
TRIP OPERATION

Specifications		Test results	Compare
Total Travel			
Expected	65.0 degrees	TRAVEL 1 40.5 degrees	Investig
Tolerance +	2.0	TRAVEL 2	
-	2.0	TRAVEL 3	
Overtravel			
Expected	***** degrees	TRAVEL 1 3.5 degrees	
Tolerance +	*****	TRAVEL 2	
-	*****	TRAVEL 3	
Rebound			
Expected	***** degrees	TRAVEL 1 6.7 degrees	
Tolerance +	*****	TRAVEL 2	
-	*****	TRAVEL 3	

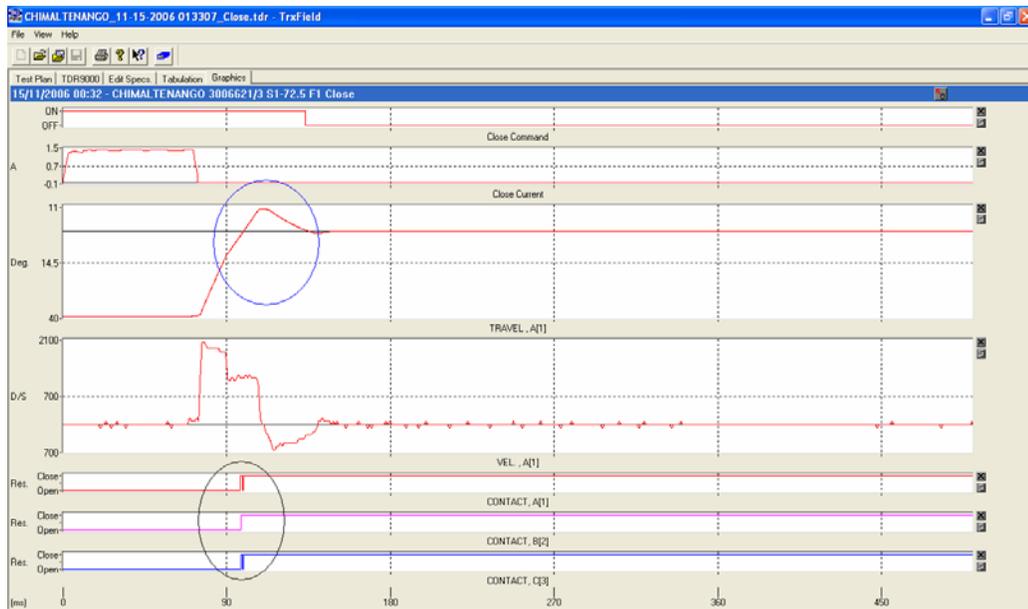
OCB CONTACT TIMING - MOTION CHANNELS 1-3
TRIP OPERATION

Main Contact Opening Time Measured From Test Initiation					
Specifications		Test results	Travel	Velocity	Compare
Maximum***** ms		CONTACT1 25.2 ms	1.9 deg	360 d/s	
Minimum*****		CONTACT2 26.0	2.2	270	
		CONTACT3 26.1	2.2	360	

Delta Main Contact Opening Time Within the Breaker				
Specifications		Test results	Compare	
Maximum***** ms		Breaker 0.9 ms		

Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

Figura 77. Gráfica de desplazamiento para una operación de cierre



Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

Como podemos observar, a veces no es suficiente con realizar solo las pruebas de tiempo (círculos negros) ya que para este caso en particular las operaciones de apertura y cierre en este interruptor se encuentra dentro de los límites establecidos por el fabricante.

Incluyendo la prueba de desplazamiento (círculo azul), podemos visualizar una gráfica de desplazamiento con un comportamiento bastante diferente al del primer interruptor en cuestión.

Tabla IX. Resultados obtenidos de la prueba

MECHANICAL MOTION CHANNELS 1-3
CLOSE OPERATION

Specifications		Test results	Compare
Total Travel			
Expected	65.0 degrees	TRAVEL 1 40.9 degrees	Investig
Tolerance +	2.0	TRAVEL 2	
-	2.0	TRAVEL 3	
Overtravel			
Expected	***** degrees	TRAVEL 1 9.4 degrees	
Tolerance +	*****	TRAVEL 2	
-	*****	TRAVEL 3	
Rebound			
Expected	***** degrees	TRAVEL 1 0.1 degrees	
Tolerance +	*****	TRAVEL 2	
-	*****	TRAVEL 3	
Contact Wipe			
Expected	***** degrees	TRAVEL 1 2.3 degrees	
Tolerance +	*****	TRAVEL 2	
-	*****	TRAVEL 3	

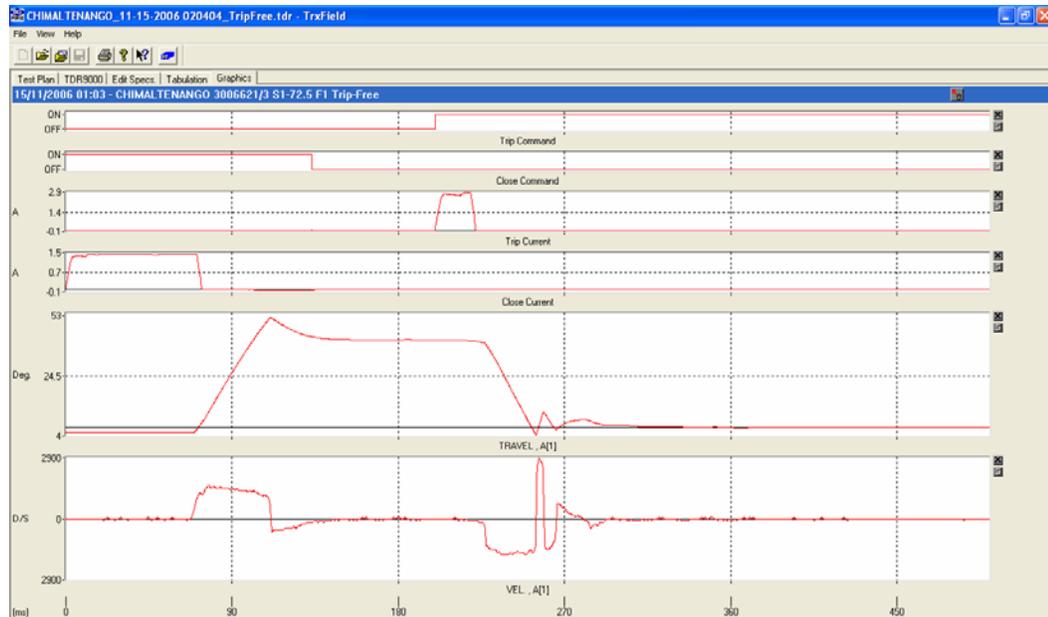
OCB CONTACT TIMING - MOTION CHANNELS 1-3
CLOSE OPERATION

Main Contact Closing Time Measured From Test Initiation				
Specifications	Test results	Travel	Velocity	Compare
Maximum***** ms	CONTACT1 97.4 ms	37.1 deg	1170 d/s	
Minimum*****	CONTACT2 97.8	37.5	1170	
	CONTACT3 97.9	37.6	1170	

Delta Main Contact Closing Time Within the Breaker			
Specifications	Test results	Compare	
Maximum***** ms	Breaker 0.5 ms		

Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

Figura 78. Gráfica del desplazamiento para una operación cierre-apertura

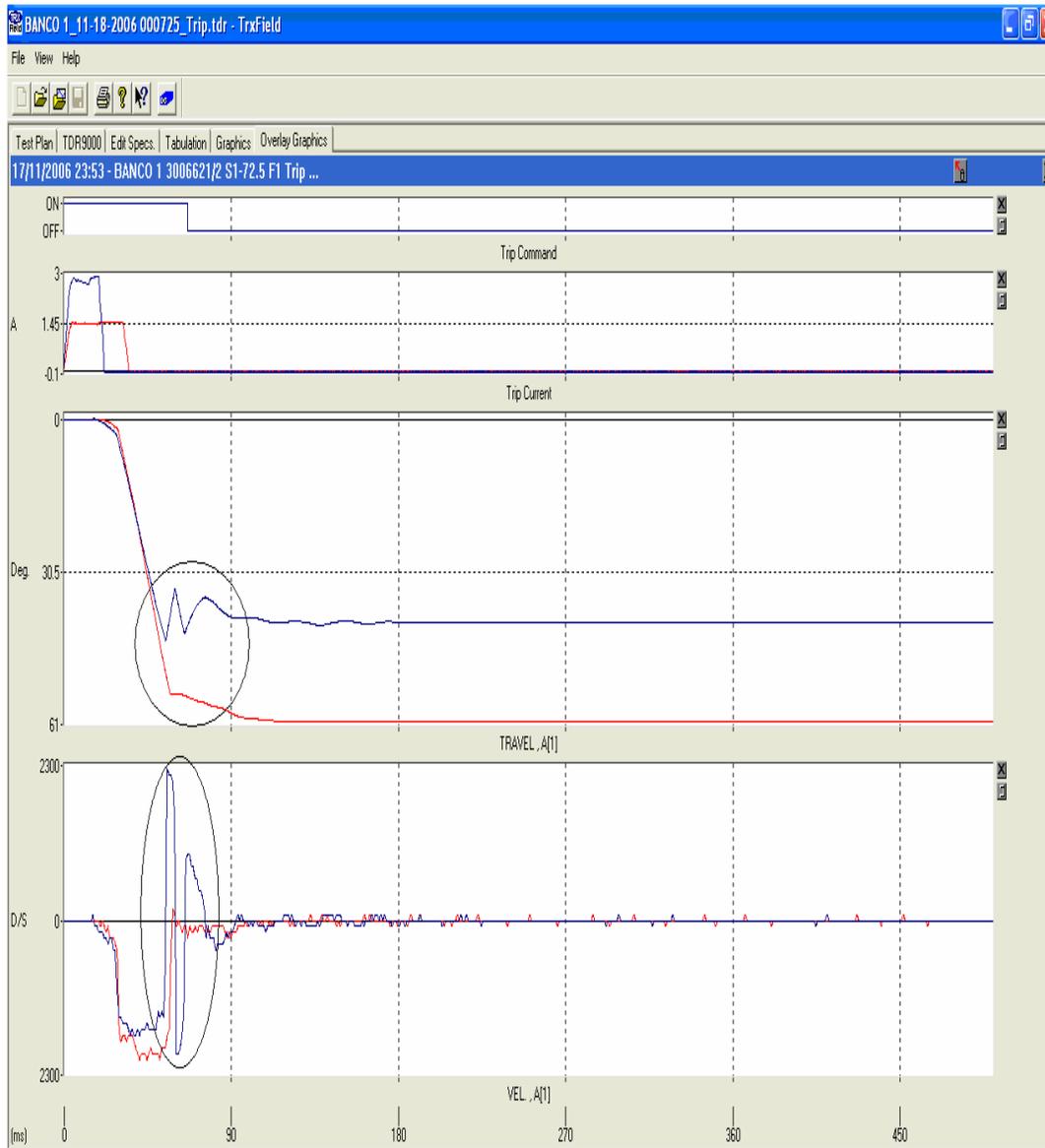


Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

Continuando con las pruebas, podemos observar que la gráfica de desplazamiento para una operación de cierre apertura para el segundo interruptor, difiere de gran manera con la gráfica del primer interruptor, para verificar esto a continuación procedemos a transponer las gráficas de ambos interruptores.

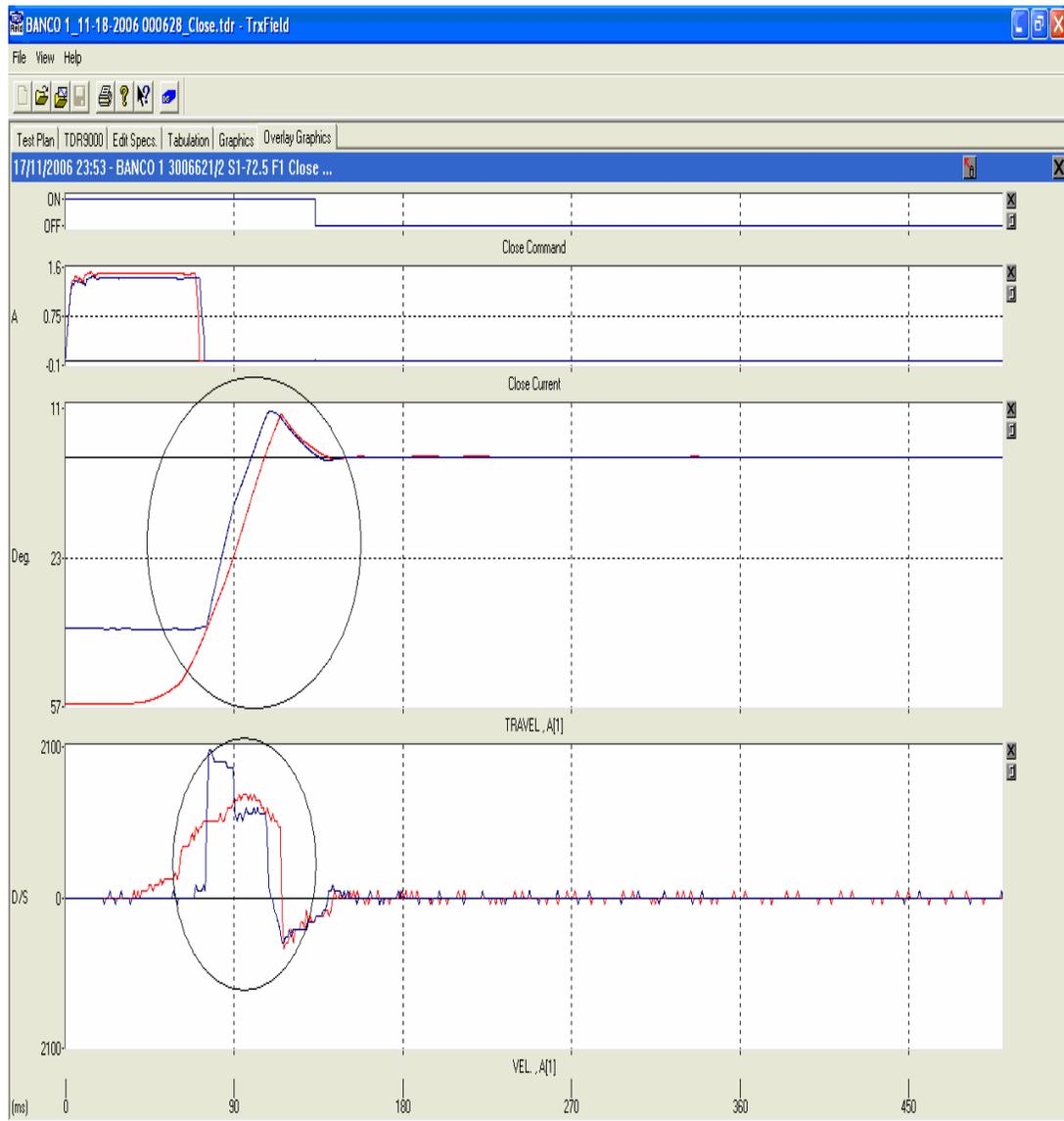
La gráfica en rojo corresponde al interruptor del banco número uno en la subestación Guatemala-Sur, y la gráfica en azul corresponde al segundo interruptor de la línea Chimaltenango, de la subestación Guatemala-Sur

Figura 79. Gráficas sobrepuestas de desplazamiento operación de apertura



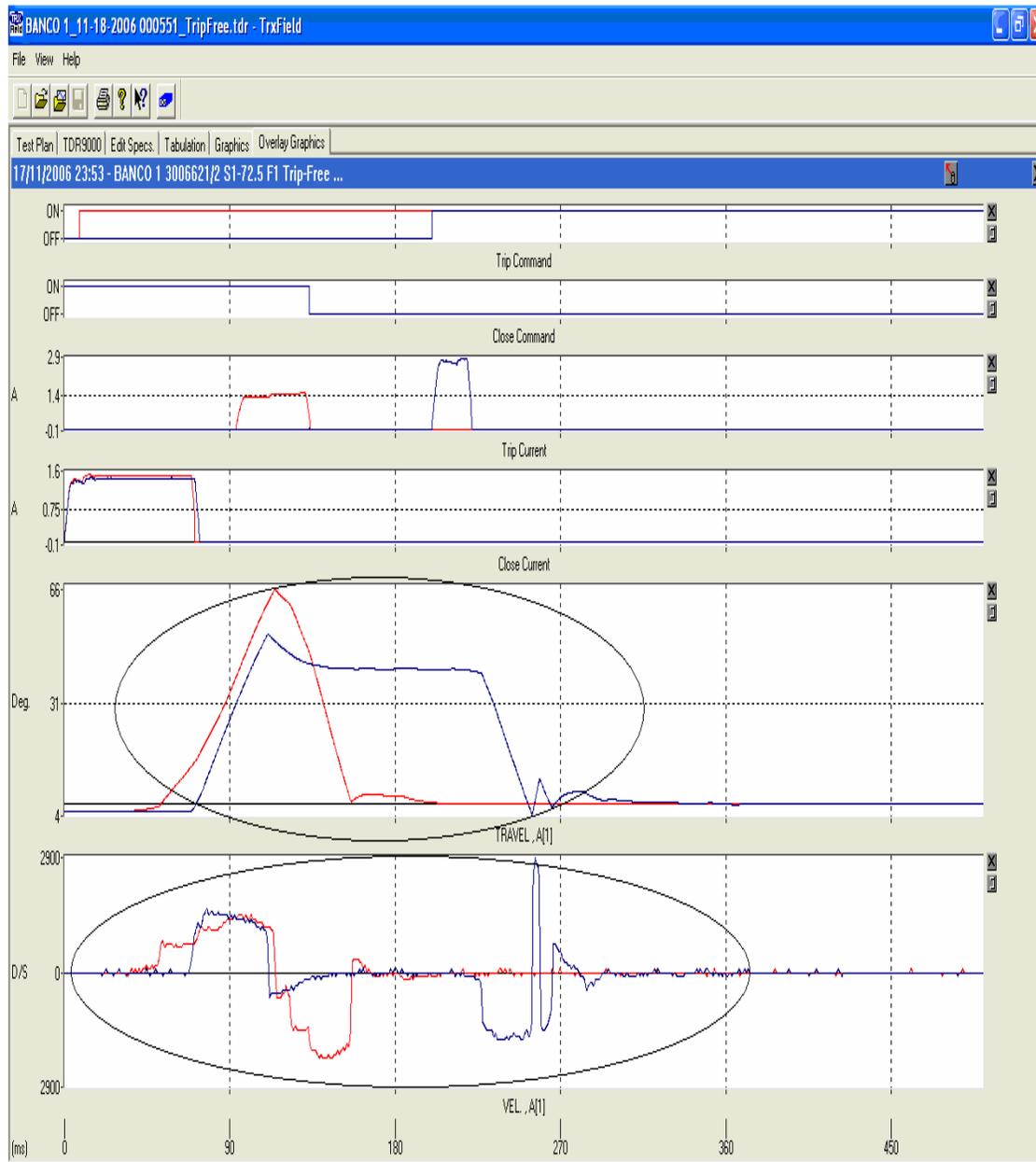
Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

Figura 80. Gráficas sobrepuestas de desplazamiento de operación de cierre



Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

Figura 81. Gráficas sobrepuestas de desplazamiento en una operación de cierre-apertura



Fuente: Pruebas realizadas con el TDR9000

Después de realizar las pruebas de desplazamiento y comparar los resultados de los dos interruptores, se pudo observar una gran diferencia, tanto en el recorrido como en las velocidades, y según la experiencia del personal el interruptor ubicado en la subestación Guatemala-Sur de la línea de Chimaltenango es el que presenta un curva de desplazamiento de manera anómala, con respecto al interruptor también ubicado en la subestación Guatemala-Sur del banco de capacitores número uno, motivo por el cual se procedió a una inspección de dicho interruptor, revisando el plan de mantenimiento del segundo interruptor se pudo comprobar que fue sujeto a un mantenimiento mayor y es probable que durante dicho proceso no se haya calibrado en forma correcta el ajuste del movimiento de los contactos del interruptor, debido a que al realizar una inspección visual de campo se corroboró que dicho ajuste en el interruptor no estaba calibrado adecuadamente, y este era el inconveniente que estaba afectando el desplazamiento de los contactos del interruptor.

Como se puede observar, y como se ha mencionado anteriormente, este tipo de pruebas que se practican con los analizadores son de mucha utilidad para comprobar el estado de los interruptores, sin embargo, al realizar solo un tipo de pruebas no podemos asegurar que el interruptor está en buenas condiciones para operar durante cualquier eventualidad, por ello es recomendable que se realicen varias pruebas como: las pruebas de tiempo, desplazamiento, las cuales por lo general nos ayudan a detectar averías en los mecanismos de accionamiento, y por último, en este trabajo se desarrollará la prueba de resistencia de contactos la cuál se describe a continuación y es otra herramienta muy útil que nos ayuda a comprobar el estado de los interruptores de potencia.

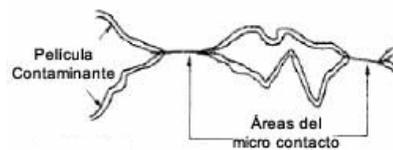
3.3. Prueba de resistencia de contactos a interruptores

3.3.1. Resistencia de contactos

La observación a nivel microscópico muestra que la superficie de contacto es realmente áspera aunque parezca suave al ojo sin entrenamiento.

De hecho, como se muestra en el microscopio, el verdadero contacto entre dos superficies ocurre a través de una serie de pequeños dispositivos llamados micro contactos (figura 82), distribuidos aleatoriamente dentro de los límites del área visible de contacto.

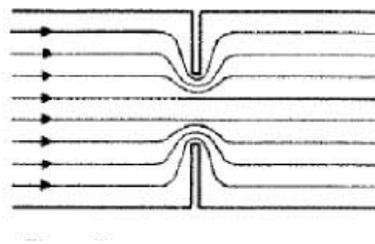
Figura 82. Los micros contactos



Fuente: Zensol

Dado que la resistencia del contacto eléctrico es inversamente proporcional al área de contacto, cuanto menor sea el área eficaz, mayor será la resistencia (figura 83).

Figura 83. Resistencia de contacto



Fuente: Zensol

3.3.2. Efecto de la resistencia de contactos

Cuando una corriente I pasa a través de un área A que tiene una resistencia R , la energía E absorbida por A es:

$$E = R I^2 t$$

Donde t es la duración del tiempo de I .

Sabemos que la temperatura T de A es directamente relacionada a E por la siguiente ecuación:

$$E = \lambda T$$

λ es una función de la velocidad de disipación de calor.

Para una corriente constante I , si R aumenta, entonces E aumentará, lo que nos llevará a un incremento de la temperatura del contacto. Si T continúa en aumento, el material del contacto puede alcanzar su punto de fundición, llevando a su destrucción.

3.3.3. Elementos que afectan la resistencia de contactos

3.3.3.1. Oxidación

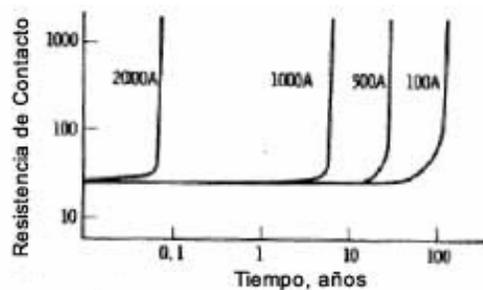
Una delgada capa de óxido aislado que cubre el área de un sólo micro contacto podría tener poco efecto en la conductividad de los contactos en total.

Pero apenas la capa de óxido se extiende hasta un número significativo de micro contactos, el área relacionada con la corriente se reducirá, incrementando de esta manera su resistencia, un aumento en la resistencia aumentará la temperatura de contacto, llevando a su destrucción.

Todos los ambientes que contengan gases capaces de reaccionar con el material del contacto, tales como O_2 , SO_2 , H_2O , H_2S , etc., serán favorables para producir capas de óxido aunque se cierre el contacto. Con el tiempo, el gas logrará penetrar y reaccionar con la superficie de contacto para degradar sus características e incrementará su resistencia.

Como se puede ver, el cambio de la resistencia no es significativo hasta un cierto punto en el tiempo donde la degradación aumenta rápidamente, LEMELSON obtuvo resultados similares para los contactos de cobre en aceite.

Figura 84. Aumento de la resistencia con el tiempo



Fuente: Zensol

Estos resultados muestran un comportamiento interesante e indican la urgencia de una intervención en el mantenimiento cuando la resistencia del contacto empieza a incrementarse.

3.3.3.2. Desgaste de contactos

Mecánicamente, puede deberse al movimiento y a la fricción de los contactos y eléctricamente debido al efecto de arco (principalmente el contacto de cierre y apertura).

El desgaste del contacto afecta directamente la resistencia de contacto y hace que aumente dramáticamente si el desgaste está en un estado avanzado

3.3.3.3. Frotamiento

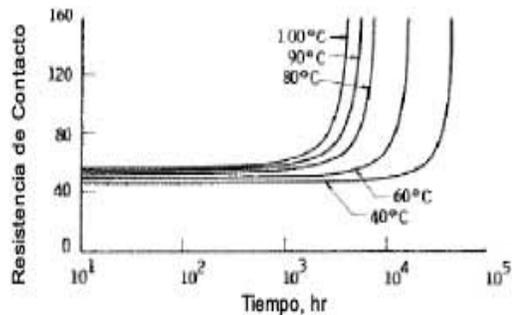
Una forma de oxidación acelerado es posible, si las superficies de contacto experimentan un movimiento cíclico entre ellos, por ejemplo, si los contactos no se cierran cada vez en la misma área.

Este fenómeno fue observado hace tiempo pero su magnitud no fue reconocida hasta hace poco, cuando se mueve un contacto de su posición anterior, una parte está expuesta al ambiente, luego se forma una capa de oxidación; cuando el contacto regresa a su posición, rompe la delgada capa y lo empuja a un lado, este fenómeno se repite varias veces hasta que la capa de oxidación tiene un espesor lo suficientemente significativo para incrementar su resistencia.

BRAUNOVIC experimentó con el fenómeno del frotamiento (*fretting*) con bajas corrientes en el aluminio, y JOHNSON & MOBERLY lo estudiaron en altas corrientes y lograron resultados similares.

La resistencia se incrementa rápidamente luego de empezar a cambiar. La figura 79 muestra un caso similar a la figura 78, pero acelerado.

Figura 85. Incremento de la resistencia con el tiempo en forma acelerada



Fuente: Zensol

3.3.3.4. Fuerza del contacto

Como es conocido, la resistencia R es una función de la resistividad ρ y del área S del material de contacto, ($R = \rho / S$).

$$R = K \rho H/F$$

S es la suma de todas las áreas de los puntos de contacto, las áreas de los puntos de contacto son una función de la fuerza aplicada F y de la dureza del material H (k es una constante), si F disminuye, S también disminuye y entonces R aumentará.

F puede disminuir debido a los siguientes factores, por ejemplo:

1. Excesivo desgaste de la superficie de contacto;
2. Fatiga de los resortes de contactos con el tiempo;
3. Reacción química del material de resorte con el ambiente;
4. Contacto suelto o desalineado, etc.

Los materiales de resorte por lo tanto son elementos importantes a tomarse en cuenta; usando la misma lógica, una precaución importante a tomar es evitar dejar que el resorte sea un camino de corriente, dado que el incremento de su temperatura ocasionará una debilidad de la fuerza F resultante.

3.3.3.5. Temperatura

Para un aumento de la temperatura T de los contactos, el material de los contactos se puede suavizar hasta el punto en que se reducirá la fuerza del contacto, lo que lleva a un rápido incremento de la resistencia de contacto.

3.3.4. Pruebas

La oxidación, el desgaste, el frotamiento, la fuerza y la temperatura afectan directamente al valor de la resistencia R (en micro ohmios) de los contactos.

De modo que para evaluar fácilmente las condiciones de los contactos del interruptor, se han establecido dos tipos de pruebas, ambos miden la resistencia R estática y dinámicamente y se usan ampliamente.

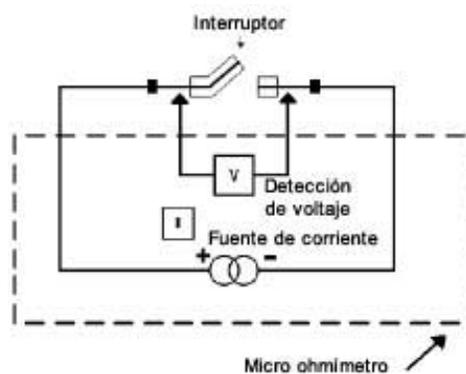
3.3.4.1. Medición de la resistencia de contactos

La medición de la resistencia de contacto se realiza usualmente usando los principios de la ley de Ohm: $V = R I$; V es el voltaje a través del contacto; I es la corriente; R es la resistencia.

Si aplicamos una corriente I y medimos el voltaje V , la resistencia R se puede obtener directamente dividiendo V por I .

$$R = V / I$$

Figura 86. Medición de la resistencia de contacto



Fuente: Zensol

Dado que la cámara de interrupción es un contenedor cerrado, sólo tenemos acceso a los conductores de entrada y de salida; la R medida entre estos dos puntos sería la suma de todas las resistencias de contacto halladas en serie (contactos fijos, de cierre y apertura y los deslizantes).

De acuerdo a la norma IEC 694, Artículo 6.4.1, el valor de la corriente a usar debería ser lo más cercana a la corriente nominal para la que fue diseñada la cámara de interrupción; si esto es imposible de lograr, se pueden usar corrientes más pequeñas pero no menos a 100 A para eliminar el efecto galvánico que podría afectar las lecturas.

Se deben observar precauciones especiales cuando se mide:

1. Los puntos medidos deben estar limpios y libres de oxidación;
2. Los puntos de medición siempre deben ser los mismos cada vez;
3. Realizar varias pruebas consecutivas y calcular el promedio.

La unidad usada es micro ohmio ($\mu \Omega$):

$$1 \mu \Omega = 10^{-6} \text{ ohms } (\Omega)$$

Podemos tener en cuenta que el rango de los valores de la resistencia en micro ohmios que se pueden encontrar en los interruptores se divide en forma general de acuerdo a la capacidad de transporte del voltaje y de la corriente:

- 25 kV – 100 hasta 350 $\mu \Omega$;
- 120 kV – 80 hasta 200 $\mu \Omega$;
- 120 hasta 330 kV – 100 $\mu \Omega$ máx.
- 735 kV – 20 hasta 80 $\mu \Omega$.

3.3.4.2. Medición dinámica de la resistencia de contactos

El micro ohmímetro descrito antes se usa para medir la resistencia de contacto con la cámara de interrupción en la posición cerrada, pero no da ninguna indicación de la condición de los contactos de arco.

Una opción es realizar una inspección interna pero esto toma bastante tiempo, en el caso de los interruptores SF6, se deben cumplir estrictamente los procedimientos de mantenimiento para manejar de forma segura el gas SF6 y los subproductos del arco.

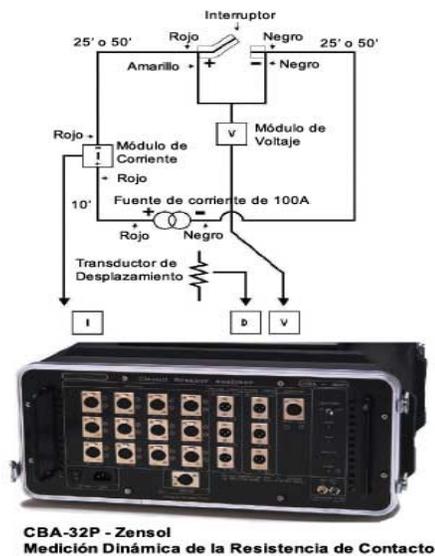
Por ello se ha desarrollado la medición dinámica de la resistencia de contactos.

Por definición, como sugiere su nombre, empieza desde una posición cerrada, y a medida que se mueve a su posición de apertura, se inyecta una corriente y se mide el voltaje, esto nos dará el valor de la resistencia en todo su recorrido desde la posición cerrada hasta la posición abierta.

Esta prueba requiere de un equipo especial (figura 81) y un procedimiento más complicado que el método estático.

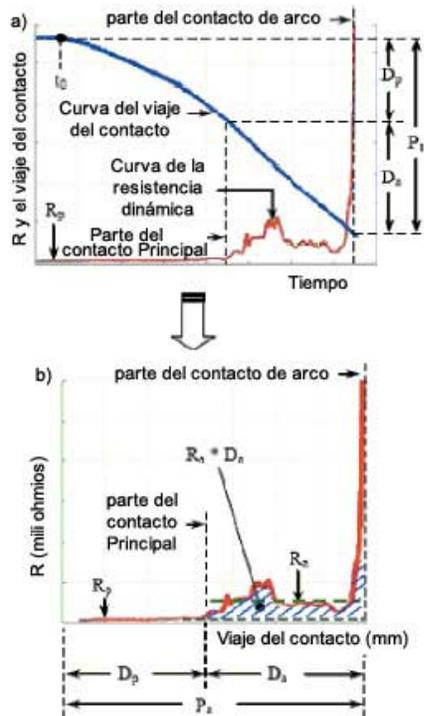
La información recogida es de una naturaleza diferente y nos da un mayor entendimiento de la condición del contacto que no está disponible en la prueba estática.

Figura 87. Equipo para medición dinámica de la resistencia de contacto



Fuente: Zensol

Figura 88. Gráfica de la medición dinámica de la resistencia de contactos



Fuente: Zensol

Podemos tener en cuenta que esta prueba es capaz de darnos buena información del valor de la resistencia del contacto de arco y de la parte erosionada.

Esta información es crucial para ciertos interruptores, donde la calidad del apagado del arco es influenciado en gran medida por este hecho. El efecto sería tan grande que podría llevar a la explosión de la cámara de interrupción, también debemos saber que al realizar una medición dinámica de la resistencia de contacto en los contactos de tope no tiene sentido.

3.3.5. Resultados de las pruebas de resistencia de contactos

Tabla X. Prueba de resistencia de contactos al interruptor del banco de reactores de la subestación Guatemala-Norte

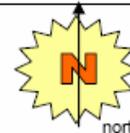
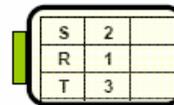
REF.: TC- 07-024	LUGAR: Guatemala	DIA	MES	AÑO
EMPRESA: INSTITUTO NACIONAL DE ELECTRIFICACION - INDE		30	5	2007
SUBESTACION: GUATEMALA NORTE				

DATOS TECNICOS:

MARCA: MAGRINI GALILEO	SERIE: GENM0212005	NÚMERO DEL EQUIPO:
RANGO DE VOLTAJE EN KV: 24 KV	CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO:	CORRIENTE CONTINUA: 2000A
NÚMERO DE OPERACIONES: 2400	TIEMPO DE OPERACIÓN:	AÑO DE FABRICACIÓN:
AÑO DE FABRICACIÓN:	MANUAL DE INSTRUCCIÓN:	VOLTAJE DE CONTROL:
PRESION NORMAL DE OP.:	PRESION ALARMA:	PRESION DE BLOQUEO:
UBICACION: BANCO DE REACTORES	MEDIO DE EXTINSION:	PESO TOTAL: 600 KG

+	1
TRIP	22
CLOSE	21

ORIENTACION DE LOS POLOS



MEDICION DEL TIEMPO DE OPERACIÓN:

- 1 TIEMPO DE CIERRE
- 2 TIEMPO DE APERTURA
- 3 TIEMPO DE CIERRE/APERTURA

TIEMPO EN MILLISEGUNDOS		
POLO A	POLO B	POLO C
76	77	78
39	39	39
49	50	49
CENTRO	NORTE	SUR

MEDICION DE LA RESISTENCIA DE CONTACTOS:

- 1 RESISTENCIA DEL CONTACTO
- 2 CORRIENTE DIRECTA APLICADA

RESISTENCIA EN MICRO-OHMS		
POLO A	POLO B	POLO C
15	208, 206, 200	11
99.6	99.6	99.6

Fuente: Tamsa

En la parte encerrada con rojo (tabla X), podemos observar que para al aplicar la misma corriente en los tres polos del interruptor del banco de reactores de la subestación Guatemala-Norte, se obtiene una lectura de la resistencia de contacto muy distinta en el polo B con respecto a los polos A y C, se realizaron 3 pruebas diferentes para corroborar la información y los resultados son similares.

Se concluyó como resultado de las pruebas que es probable que dicho polo maneje una corriente de falla según la experiencia del personal ya que es empleado para conexión o desconexión del banco de reactores, pero para mayor certeza se deberá consultar con el fabricante para coordinar el plan de mantenimiento necesario para asegurar el correcto funcionamiento del interruptor.

Tabla XI. Prueba de resistencia de contactos al interruptor del banco de capacitores No. I de la subestación Guatemala-Sur

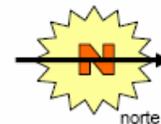
REF.: TC- 07-024	LUGAR : Guatemala	DIA	MES	AÑO
EMPRESA: INSTITUTO NACIONAL DE ELECTRIFICACION - INDE		30	5	2007
SUBESTACION: GUATEMALA SUR				

DATOS TECNICOS:

MARCA:	SIEMENS	SERIE:	S.O. 50847-4	NÚMERO DEL EQUIPO:
RANGO DE VOLTAJE EN KV:	72.5 KV	CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO:		CORRIENTE CONTINUA:
NÚMERO DE OPERACIONES:	2400	TIEMPO DE OPERACIÓN:		AÑO DE FABRICACIÓN:
AÑO DE FABRICACIÓN:		MANUAL DE INSTRUCCIÓN:		VOLTAJE DE CONTROL:
PRESION NORMAL DE OP.:		PRESION ALARMA:		PRESION DE BLOQUEO:
UBICACIÓN:	BANCO DE CAPACITORES I	MEDIO DE EXTINSION:	SF6	PESO TOTAL:

ORIENTACION DE LOS POLOS

R	2	1
S	4	3
T	6	5



MEDICION DEL TIEMPO DE OPERACIÓN:

- 1 TIEMPO DE CIERRE
- 2 TIEMPO DE APERTURA
- 3 TIEMPO DE CIERRE/APERTURA

TIEMPO EN MILLISEGUNDOS		
POLO A	POLO B	POLO C
53	52	52
23	23	23
31	29	31

MEDICION DE LA RESISTENCIA DE CONTACTOS:

- 1 RESISTENCIA DEL CONTACTO
- 2 CORRIENTE DIRECTA APLICADA

RESISTENCIA EN MICRO-OHMS		
POLO A	POLO B	POLO C
84	85	87
99.6	99.1	99.2

Fuente: Tamsa

Podemos observar en los resultados obtenidos para el interruptor del banco de capacitores número uno, que los valores de la resistencia de contacto para los tres polos son similares (tabla XI), pero debido a que no se cuenta con la información de pruebas de este tipo en el momento del montaje de los interruptores no tenemos una referencia de la resistencia inicial que presentaban los interruptores, motivo por el cual se deberá contactar al fabricante para una correcta interpretación de los resultados.

Tabla XII. Prueba de resistencia de contactos al interruptor del banco de capacitores No. II de la subestación Guatemala-Sur

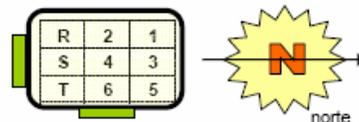
REF.: TC- 07-024	LUGAR : Guatemala	DIA	MES	AÑO
		30	5	2007
EMPRESA: INSTITUTO NACIONAL DE ELECTRIFICACION - INDE				
SUBESTACION: GUATEMALA SUR				

DATOS TECNICOS:

MARCA:	SIEMENS	SERIE:	S.O. 50947-3	NÚMERO DEL EQUIPO:
RANGO DE VOLTAJE EN KV:	72.5 kv	CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO:	CORRIENTE CONTINUA:	
NÚMERO DE OPERACIONES:	2400	TIEMPO DE OPERACIÓN:	AÑO DE FABRICACIÓN:	
AÑO DE FABRICACIÓN:	MANUAL DE INSTRUCCIÓN:		VOLTAJE DE CONTROL:	
PRESION NORMAL DE OP.:	PRESION ALARMA:		PRESION DE BLOQUEO:	
UBICACION:	BANCO CAPACITORES II	MEDIO DE EXTINSION:	PESO TOTAL:	

+	5
TRIP	9
CLOSE	7

ORIENTACION DE LOS POLOS



MEDICION DEL TIEMPO DE OPERACIÓN:

- 1 TIEMPO DE CIERRE
- 2 TIEMPO DE APERTURA
- 3 TIEMPO DE CIERRE/APERTURA

TIEMPO EN MILLISEGUNDOS		
POLO A	POLO B	POLO C
54	54	54
24	24	24
32	32	31

MEDICION DE LA RESISTENCIA DE CONTACTOS:

- 1 RESISTENCIA DEL CONTACTO
- 2 CORRIENTE DIRECTA APLICADA

RESISTENCIA EN MICRO-OHMS		
POLO A	POLO B	POLO C
181	184	186
99.6	99.7	99.7

Fuente: Tamsa

Los valores de la resistencia de contactos obtenidos de las pruebas para el interruptor del banco de capacitores número dos, son altos (tabla XII), en comparación con el interruptor del banco de capacitores número uno, que nos puede servir de referencia debido a que son de fabricación similar y fabricados al mismo tiempo por tener números de serie parecidos; nos damos cuenta de que existe una diferencia significativamente alta por lo cual se deberá consultar con el fabricante, aunque estos interruptores pueden presentar valores altos debido a que realizan dos operaciones diarias, ya que su función es conectar y desconectar los bancos de capacitores de la subestación Guatemala Sur, y al interrumpir corrientes capacitivas con factor de potencia en adelanto, se ocasionan voltajes altos (ver página 45).

CONCLUSIONES

1. Para las pruebas de tiempo que se le practicaron al interruptor que protege la línea San José Carbonera en la subestación Escuintla 2, se obtuvo un tiempo de 311.4 milisegundos para una operación de cierre en el contacto número 1, siendo este un tiempo muy elevado respecto a los contactos 2 y 3 (171.0 ms, 178.5 ms, respectivamente), esto fue debido a que el mecanismo de operación del contacto 1 presentaba una lubricación deficiente, lo cual impedía el libre movimiento de dicho contacto produciendo un atraso en su movimiento.
2. En el interruptor ubicado en la subestación Guatemala-Sur de la línea Chimaltenango se detectaron irregularidades en las curvas de desplazamiento, motivo por el cual se procedió a sobreponerlas con las curvas de desplazamiento del interruptor del banco uno, el cual tiene características similares; se comprobó que el interruptor de la línea de Chimaltenango presentaba problemas y se procedió a una inspección de campo, se encontró que el ajuste de movimiento del mecanismo de operación había sido alterado, siendo esta la razón de la falla que se encontró con la prueba de desplazamiento.
3. Para las pruebas de tiempo y desplazamiento que se realizan en los interruptores de potencia, la mayor parte de las fallas detectadas corresponden a averías en los mecanismos de operación de los contactos y en una menor proporción las fallas corresponden a problemas eléctricos.

4. Las pruebas de resistencia de contactos proporciona una idea del estado en que se encuentran los contactos en la cámara de extinción, para el interruptor del banco de reactores ubicado en la subestación Guatemala-Norte, se obtuvo un resistencia muy grande ($208\mu\Omega$) en su polo B, mientras que en los otros polos A y C se obtuvieron valores de $15\mu\Omega$ y $11\mu\Omega$ respectivamente, este problema puede ser debido a que este interruptor pueda estar manejando alguna corriente de falla o es probable que presente un desgaste de contactos pues realiza dos operaciones diarias.

5. Para garantizar el funcionamiento adecuado del interruptor es necesario realizar diversas pruebas, como las descritas en este trabajo, ya que en algunos casos no es posible detectar fallas con una sola de estas pruebas, como se observó, las pruebas de tiempo y desplazamiento por lo regular proporcionar información de los mecanismos de operación y las pruebas de resistencia de contactos nos proporcionan información del grado de deterioro en que se encuentran los contactos de arqueo.

RECOMENDACIONES

1. Al llevar un registro de las pruebas podemos observar la evolución del comportamiento del interruptor, por medio de una base de datos se puede llegar a predecir, mediante la experiencia cuáles serían las condiciones críticas para el reemplazo de un interruptor dado, lo cual ayudaría a prevenir eventuales problemas con el interruptor por un mal funcionamiento durante una contingencia o falla.
2. Para obtener mejores resultados en las pruebas es preciso desconectar y aterrizar los cables de potencia de las terminales del interruptor, para que estos no introduzcan alteraciones en la medición por el fenómeno de la inducción electromagnética, se recomienda también la limpieza de la porcelana de los interruptores para dejarlos libres de humedad y polvo que pudieran introducir errores en las pruebas.
3. Es importante realizar varias veces la misma prueba durante el mismo día, para verificar la consistencia de los resultados, siempre y cuando se cuenten con las condiciones necesarias ya sea por clima o tiempo.
4. De ser posible y si se cuentan con los recursos necesarios, realizar las pruebas durante cada desenergización que se realice, si esto no es posible como mínimo se deben de realizar las pruebas una vez por año, para asegurar el correcto funcionamiento del interruptor.

5. Realizar inspecciones de mantenimiento de manera continua para evitar fallas en los interruptores por cuestiones como la lubricación o algún otro tipo de desperfectos de los mecanismos de operación, ya que por experiencia del personal del laboratorio, las fallas en los interruptores son en su mayoría debidas a problemas mecánicos, con una inspección de rutina evitamos problemas potencialmente dañinos para el sistema.

REFERENCIAS

1. Enríquez Harper, Gilberto. **Elementos de diseño de subestaciones eléctricas**. (2ª Edición; México: Editorial Limusa, 2002) pp. 93-111.
2. Comisión Federal de Electricidad. **Manual de interruptores de potencia**. (CFE, México, 2005).
3. *CIGRE working group 13.02m. Switching overvoltage in HHV and UHV systems with special reference to closing and reenergization studies on lines fed by an inductive source.* (*Electra*, No. 32).
4. Coordinadora de transmisión y transformación/Comisión Federal de Electricidad. **Manual de interruptores de potencia**. (México, 2003).
5. *Grainger John J. Análisis de sistemas de potencia*. (México: Editorial McGraw Hill, 1996).
6. *Stevenson William D. Análisis de sistemas eléctricos de potencia*. (2ª Edición; México: Editorial McGraw Hill, 1988).
7. *B. Ravindranath M. Chander. Protección de sistemas de potencia e interruptores*. (*Malaviya Regional Engineering College Jaipur*, 1980).
8. M.C. Joaquín Rodríguez Rodríguez. **Prospectiva y ruta tecnológica para la aplicación de MEMS en el sector eléctrico**. (Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Investigaciones Eléctricas, mayo del 2004) pp. 90-93.
9. Manuel A. Salmerón. **Pruebas doble par interruptores en SF6**. (Doble Engineering Company).
10. IEEE 37.09 – 1999. **Standards Test Procedure for AC High – Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis**. (IEEE Standards Board, 1999).

11. IEEE 37.10 – 1995. ***Guide for Diagnostics and Failure Investigation of Power Circuit Breakers.*** (IEEE Standards Board, 1995).

12. Doble Engineering. **Guía del Usuario del TDR9000.** pp. 10-45.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

1. www.zensol.com (junio de 2008)
2. www.doble.com (junio de 2008)

BIBLIOGRAFÍAS

1. ANSI / IEEE C37.081: **“Circuit Breakers Rated on a Symmetrical current Bases”**.
2. BRASCA E, A. CACCIA DOMINIONI, S. BOVELLI, A.R. TIRAMANI (1983): **“Requeriments and Performance of the New CESI High Power Facilities”**. IEEE Transactions on Power apparatus and Systems, (Vol. PAS-102 No. 7), July 1983.
3. CHARLES H. FLURSCHEIM., **“Power Circuit Breaker**. England: Edit by C.H. Flurscheim, 1975.
4. GUY ST-JEAN, REN FU WANG: **“Equivalence Between Direct and Synthetic Short-Circuit Interruption Test on HV Circuit Breakers”**, IEEE Transactions on Power Apparatus and System. (Vol PAS-102, No. 7), July 1983.
5. ISODEL – SPRECHER: **“Prescripciones de Puesta en Servicio y Conservación para la Maniobra de Interruptores de alta Tensión y Pequeño Volumen de Aceite”**, España, 1968.
6. **Manual de Instalación del Disyuntor FSL – 120**.
7. PELENC. Y., (1979): **“Review of Current Interruption Techniques”**, Middletow: Published by Middletown Headquarters or Square D Company, 1979.
8. Blackburn J. Lewis. **Symmetrical components for power systems engineering**. New York: Editorial Marcel Dekke, 1997.
9. A.J. Fakheri, T.C. Shuter, J.M Schneider, C.H. Shih. **Single phase switching test on the AEP 765 kV system – extinction time for large secondary arc currents**. IEEE TPAS, (Vol. PAS – 102, No. 8), August 1983.

10. Garrard, C.J.O. "**H.V. Switchgear a review of progress**". Proc. IEEE, 113, 1996.
11. Rieder, W. "**Circuit Breakers**". Scientific American (Vol. 50), 1971.
12. Chatterjee, R. "**Electric arc and the Circuit Breaker**". Registros del seminario del R.D.O.E.I., Bhopal, 1970
13. Baltensperger, P. y Ruoss, E. "**Switching overvoltage's in EHV y UHV networks: methods of limitation**". CIGRE, Report 13 – 14, 1970.
14. Harle, J.A. y Wild, R. W. "**Restriking Voltages as a Factor in the Performance, Rating and Selection of Circuit Breakers**". J.I.E.E., 1944.
15. Reider W. y Pratl J. "**Quenching and Reignition of a Circuit Breakers arcs**". Scintia Electrica, 1965.
16. Leeds, W. M. y Freidrich. "**High Voltages Oil Current Breakers**". Electrical Engineering, 1950.
17. Roshan Lal. "**Recent Developments in Air Blast Breaker Technology**". Circuit Breaking Phenomena and Circuit Breakers, Registro del seminario del R.D.O.E.I., Bhopal.
18. Charbonnier, F.M., Benette, C.J., Swanson, L.W. "**Electrical Breakdown Between Metal Electrodes in High Vacuum**". J. Appl. Phys, 1967.
19. Fukuda, S. y asociados. "**Recent Studies on arc Behaviors around current zero on SF6 gas**". C.I.G.R.E., Reporte 130, 1968.
20. Gauglione, G.P. y Meier, H.G. "**A new line of dead tank SF6, H.V. circuit Breaker**". Trans. I.E.E.E., 1970.

ANEXO A

RELACIÓN DE LO RESULTADOS DE PRUEBA TABULADOS CON EL PLAN DE PRUEBAS

Este apéndice cubre los parámetros de la sección plan de pruebas y sus efectos en los resultados de las pruebas, los parámetros están agrupados como aparecen en la sección plan de pruebas.

- Información de datos de placa del interruptor de circuito
- Parámetros de comando
- Canales de movimiento
- Activación de canales OCB/Tanque muerto
- Activación de canales EHV/Tanque vivo
- Activación de canales de contactos auxiliare
- Activación de canales de corriente
- Activación de canales de voltaje
- Especificación de tiempo de operación de contactos
- Especificación de tiempo de operación de contactos de resistor
- Especificaciones de viaje
- Especificaciones de velocidad promedio

Información de dato de placa del interruptor de circuito

Los campos en esta sección de plan de pruebas de librería/interruptor determinan si el plan de pruebas es una librería o un plan de pruebas de interruptor.

Un plan de pruebas de librería llega a ser un plan de pruebas de interruptor (la etiqueta en la parte superior del plan de pruebas cambia para reflejar esto), una vez que cualquiera de los siguientes campos son llenados.

- Fabricante
- Número de serie
- Localización
- ID especial

Todos los otros campos e relacionan solamente con la información general del interruptor de circuito y son, por lo tanto, reusables de prueba a prueba.

Parámetros de comando

Los parámetros de comando son aquellos parámetros a través de los cuales el control de pruebas es configurado, cada parámetro viene con un ajuste predeterminado el cual es comúnmente utilizado como un valor predeterminado. Algunas pruebas de interruptor de circuito, tales como una prueba de multi-operaciones, puede requerir que en segundo pulso de comando sea iniciado utilizando un retardo más allá de la terminación del primer pulso de comando, para disparo libre o recierre, cambie el ajuste de *Standing* a Retardo, e ingrese un número en el campo “Longitud de Retardo”.

Cada uno de los campos de parámetro de comando es explicado abajo:

- **Rango de corriente de disparo/cierre:** Los rangos de corriente de disparo y cierre deben ser ajustados correctamente, si el rango es muy grande o muy pequeño, la corriente puede no ser mostrada adecuadamente en la sección de gráficos del TDR9000.

- **Medición del tiempo de operación:** Las opciones incluyen milisegundos o ciclos esto puede alternado en la sección de gráficos.

Parámetros de disparo

- **Pulso de disparo:** Este marco de tiempo determina el pulso de disparo enviado al interruptor de circuito.

Parámetros de cierre

- **Pulso de cierre:** Este marco de tiempo determina el pulso de cierre enviado al interruptor de circuito.

Parámetros de cierre eventos de tiempo de operación

Estos parámetros determinan cuando la medición del tiempo de operación inicia.

- **Iniciación de la prueba:** Inmediatamente después de que la prueba comienza
- **Corriente de cierre:** Cuando un porcentaje de la corriente o voltaje de cierre a plena escala es alcanzado en un canal en particular.
- **Contacto/corriente/voltaje:** Cuando un porcentaje de la corriente o voltaje de cierre o plena escala es alcanzado en un canal en particular o cuando un contacto es leído en un canal auxiliar

Parámetros de disparo libre

Estos parámetros determinan cuando el pulso de cierre es inicial.

- **Standing:** 8.3 milisegundos (0.5 ciclos) después de arrancar la prueba, esto ocurre cuando la opción *Standing* es seleccionada en el campo de disparo libre
- **Retardo:** Después de que el marco de tiempo ingresado en el campo de disparo libre.

Parámetros de Recierre

Estos parámetros determinan cuando un pulso de cierre es iniciado.

- **Standing:** 8.3 milisegundos (0.5 ciclos) después de arrancar la prueba; esto ocurre cuando la opción *Standing* es seleccionada en el campo de Recierre.
- **Retardo:** Después de que el marco de tiempo ingresado en el campo Longitud de retardo que aparece cuando Retardo es seleccionado en el campo de Recierre.

Parámetro de O-C-O (comando de cierre, retardo 1 y retardo 2)

Estos parámetros determinan cuando un pulso de cierre es iniciado.

- **Standing:** 8.3 milisegundos (0.5 ciclos) después del pulso de disparo, el segundo pulso de disparo ocurre (medido desde el arranque de pulso de cierre) después del tiempo especificado en retardo 1.

- **Retardo:** Después del marco de tiempo ingresado Retardo 1 que aparece cuando retardo es seleccionado, retardo 2 también aparece, el cual determina cuando el segundo pulso de disparo es enviado; ambos retardos son medidos desde el arranque del pulso de cierre.
- **Primero en hacer contacto:** El pulso de cierre es iniciado después del tiempo especificado en retardo 1. El segundo pulso de disparo ocurre cuando el primer canal censa que el contacto principal ha cerrado.

Parámetros de activador externo (evento activador)

Seleccionando contacto auxiliar se despliegan los siguientes campos.

- **Activador:** Determina la condición del evento externo que sirve como un activador.
- **Canal activador:** Determina el canal para monitorear la condición del activador.

Canales de movimiento

Los parámetros primarios configurables para los parámetro de movimiento directamente afectan los resultados de prueba son los encontrados en los campos tipo de transductor y función de transferencia. Estos campos dictan el tipo de transductor en uso y como su movimiento es interpretado.

- **Tipo de transductor:** Determina si el transductor lineal o rotativo está en uso y las unidades para su uso.

- **Función de transferencia:** Determina la relación entre los movimientos del transductor y el de los contactos principales.

Activación del canal OCB/tanque muerto

Los parámetros primarios configurables de estos canales que directamente afectan a los resultados de prueba son los rangos de resistor OCB, el rango para el resistor de disparo o cierre debe ser ajustado a **None** si el resistor no está en uso.

Activación del canal EHV/tanque vivo

Los parámetros primarios configurables de estos canales que directamente afectan a los resultados de prueba son configuración del contacto principal y rangos de resistor OCB.

- **Configuración del contacto principal:** Determina cuando los contactos principales están configurados como; EHV, los cuales miden dos interruptores por fase en las tres fases y seccionador, el cual prueba los interruptores de circuito con número odd de interruptores por fase o activa y prueba un canal a la vez en el módulo.
- **Rangos de resistor EHV:** El rango para el resistor de disparo cierre debe ser ajustado a None si el resistor no está en uso.

Activación del canal de contacto auxiliar

No hay elementos que afecten directamente los resultados de la prueba.

Activación del canal de corriente

Los canales de corriente pueden ser configurados para leer datos de un transductor o un gancho. Cada tipo de configuración viene con sus propios rangos para los cuales una prueba puede ejecutarse, estos son los parámetros primarios que afectan los resultados de la prueba, el rango configurado debe reflejar el rango actual de las lecturas que ocurren.

Activación del canal de voltaje

Los canales de voltaje pueden ser configurados para leer datos de varios rangos diferentes, el rango seleccionado es el parámetro primario que afecta los resultados de prueba, el rango configurado debe reflejar el rango actual de las lecturas que ocurren.

Especificaciones del tiempo de operación de los contactos

Hay tres tiempos de operación de contactos principales, para los cuales los resultados prueba son enlistados:

- Apertura del contacto principal
- Cierre del contacto principal
- Recierre del contacto principal

Por cada una de estas tres operaciones, las especificaciones del interruptor de circuito pueden ser introducidas para la evaluación de Pasa/falla.

- **Mínimo:** El tiempo mínimo para la operación de apertura, cierre o recierre que ocurrirá, desde la iniciación de la prueba.
- **Máximo:** El tiempo máximo para la operación de apertura, cierre o recierre que ocurrirá, desde la iniciación de la prueba.
- **Módulo:** La diferencia de tiempo entre la operación del primer y último contacto dentro de un módulo, un módulo está situado en la parte alta del interruptor de circuito de tanque vivo tipo columna, y generalmente tiene dos juegos de interrupción. No tiene ningún significado útil en interruptores en donde solamente una etapa de interrupción está siendo medida, si el interruptor solamente tiene un módulo por fase este valor es el mismo valor de la columna fase.
- **Fase:** La diferencia de tiempo entre la operación entre el primer y último contacto dentro de una fase.
- **Interruptor:** La diferencia de tiempo entre la operación entre el primer y último contacto dentro de un interruptor de circuito.
- **Tiempo muerto de recierre:** El tiempo en el que el contacto principal está abierto durante una prueba de recierre.
- **Tiempo de enclave de disparo libre:** El tiempo en el que el contacto principal está cerrado durante una prueba de disparo libre.

Especificación de tiempo de operación del contacto del resistor

Hay dos tiempos de operación del contacto del resistor para los cuales los resultados de prueba son enlistados.

- Apertura del contacto del resistor
- Cierre del contacto del resistor

Por cada una de estas dos operaciones, las especificaciones del contacto del resistor pueden ser introducidas para la evaluación pasa/falla.

- **Mínimo:** El tiempo mínimo para la operación de apertura, cierre o recierre que ocurrirá, desde la iniciación de la prueba.
- **Máximo:** El tiempo máximo para la operación de apertura, cierre o recierre que ocurrirá, desde la iniciación de la prueba.
- **Módulo:** La diferencia de tiempo entre la operación del primer y último contacto dentro de un módulo, un módulo está situado en la parte alta del interruptor de circuito de tanque vivo tipo columna, y generalmente tiene dos juegos de interrupción. No tiene ningún significado útil en interruptores en donde solamente una etapa de interrupción esta siendo medida, si el interruptor solamente tiene un módulo por fase este valor es el mismo valor de la columna fase.
- **Fase:** La diferencia de tiempo entre la operación entre le primer y último contacto dentro de una fase.
- **Interruptor:** La diferencia de tiempo entre la operación entre el primer y último contacto dentro de un interruptor de circuito.
- **Resistor relativo:** Esto mide el tiempo de operación del interruptor del resistor relativo a la operación de los contactos principales, o relativo a la iniciación de la prueba.

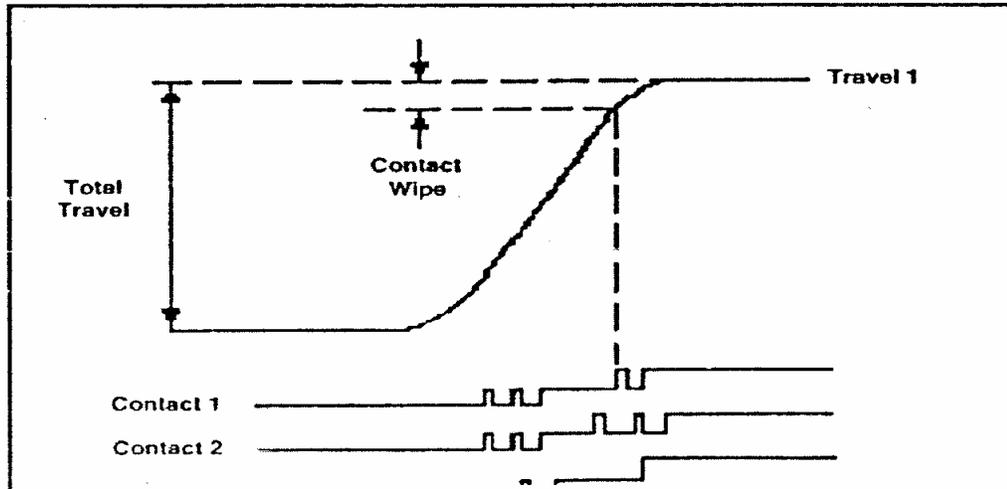
- **Discriminador digital:** Este valor es automáticamente ajustado cuando está en auto, pero puede ser cambiado en la sección de plan de prueba.
- **Tabulación de calificadores del resistor:** Esto ajusta la cantidad mínima de tiempo del nivel del resistor, debe estar presente para el primer toque a ser considerado el inicio del nivel de resistor para propósitos de tabulación.
- **Resistor de inserción de apertura/cierre:** Los rangos de entrada determinan los rangos aceptables óhmicos experimentados por el resistor durante una operación de apertura o cierre.

Especificaciones de viaje

Penetración del contacto (close)

Este valor es medido durante un comando de cierre, es la distancia que la varilla de conexión al transductor o el adaptador rotativo se mueve desde que se hace el primer contacto principal hasta la posición completamente cerrada del interruptor de circuito; la figura 83 muestra los parámetros físicos a partir de los cuales este valor es derivado.

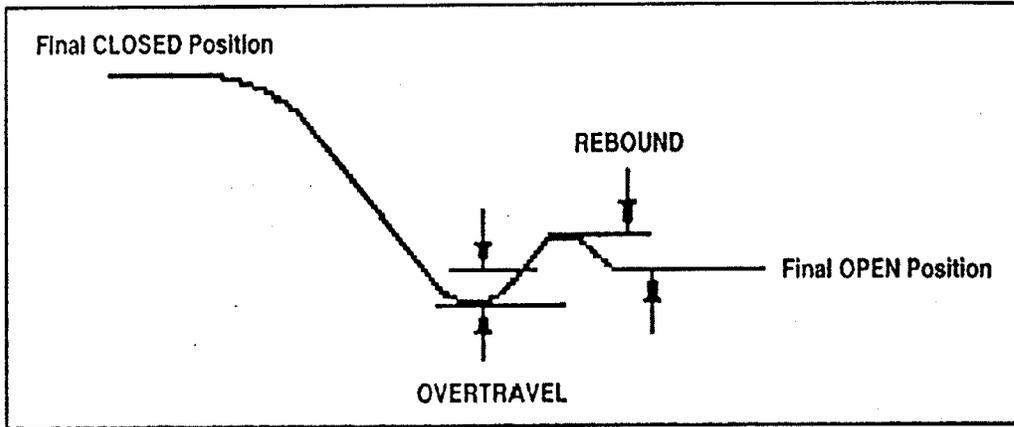
Figura 89. Penetración de contacto - cierre



Sobre viaje

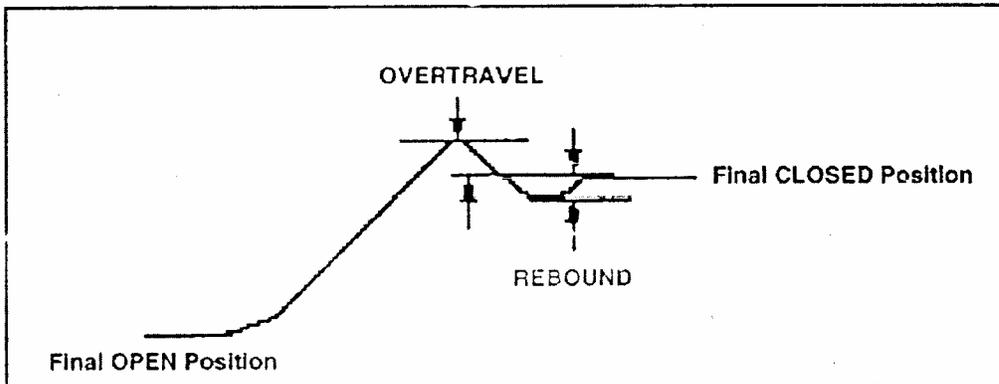
Durante una operación de apertura, esta es la distancia entre el desplazamiento temporal máximo de los contactos principales del interruptor de circuito más allá de la posición de apertura final, y la posición de apertura final, la figura 84 da un ejemplo gráfico de cómo esto es derivado.

Figura 90. Sobre viaje – apertura



Durante una operación de cierre, esta es la distancia entre el desplazamiento temporal máximo de los contactos principales del interruptor de circuito más allá de la posición final de cierre, y la posición final de cierre, la figura 85 da un ejemplo gráfico de cómo esto es derivado.

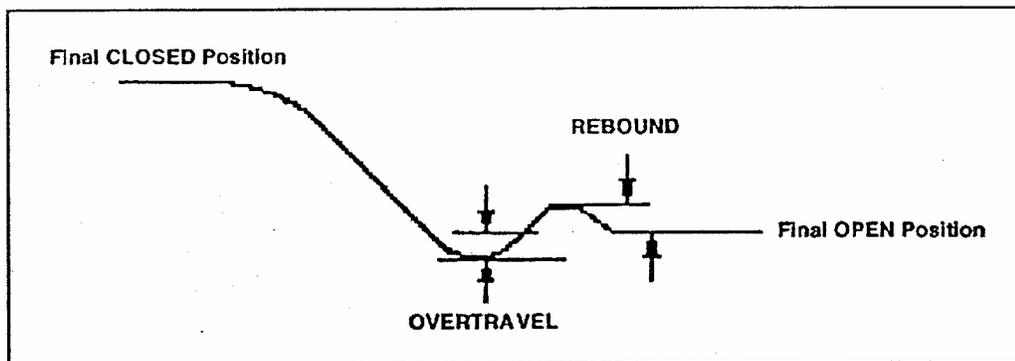
Figura 91. Sobre viaje – cierre



Rebote

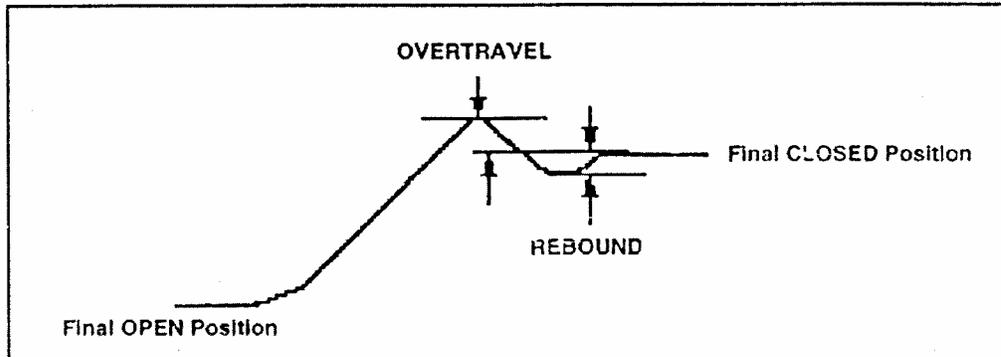
Durante una operación de apertura, esta es la distancia entre el desplazamiento temporal máximo de los contactos principales del interruptor de circuito, la cual es más corta que la posición de apertura final y la posición de apertura; la figura 86 da un ejemplo de cómo esto es derivado.

Figura 92. Rebote - apertura



Durante una operación de cierre, esta es la distancia entre el desplazamiento temporal máximo de los contactos principales del interruptor de circuito, la cual es más corta que la posición de cierre final y la posición de cierre, la figura 87 da un ejemplo gráfico de cómo esto es derivado.

Figura 93. Rebote - cierre



Viaje

Este es el viaje total del contacto principal del interruptor de circuito durante las operaciones cierre o apertura, este es el viaje de la varilla de conexión del transductor o adaptador rotativo, si el viaje del contacto principal y de la varilla de conexión del transductor o del adaptador son idénticos (función de transferencia 1:1).

Especificación de velocidad promedio

Velocidad promedio de apertura/cierre

Este es la velocidad promedio calculada dentro de la zona de velocidad especificada (1 ó 2), si la zona no es especificada, la velocidad no puede ser medida. Las pruebas pueden ser corridas usando combinaciones de distancia, tiempo y operación de contactos para determinar cuando las mediciones ocurren.

Estas son entonces comparadas contra las especificaciones dadas en los campos máximo y mínimo como velocidades operacionales esperadas; después de la prueba, la zona puede ser modificada y los resultados vistos con los ajustes de zona especificada.

Fuente: Manual del TDR9000

ANEXO B

CONCEPTOS DE OPERACIÓN

El TDR9000 es un registrador de datos de múltiple propósito equipado con diferentes fuentes de señal y canales receptores dependiendo del tipo de pueden estas instalados en numerosas configuraciones de canales de medición, un sexto módulo, el módulo de sistema, está configurado para controlar al interruptor de circuito bajo prueba, o iniciar el registro basado en una entrada de disparo externo.

Tipos de canales

Actualmente hay cinco tipos de canales soportados por el TDR9000:

- Medición del tiempo de contactos principales y del interruptor del resistor de pre inserción.
- Valor del resistor de pre inserción
- Canales de movimiento
- Canales análogos

Cada tipo de canal tiene una terminación frontal diferente, sin embargo, todos los canales son colectados y llevados al controlador para su procesamiento de la misma manera. El procesamiento de datos crea mediciones que son comparadas con las especificaciones dando como resultado decisiones sobre la aceptación pasa/falla.

Medición de tiempo de los contactos principales

La medición de tiempo de operación de los contactos se logra proporcionando una fuente de voltaje (aisladas en pares para EHV) a los contactos y comparando el voltaje a través de los contactos a referencias internas en el TDR9000; un voltaje menor del umbral más bajo (en el orden de 5% de la fuente de voltaje) es marcado como un estado cerrado. Un voltaje arriba del umbral más alto (en el orden del 95% de la fuente de voltaje) es marcado como un estado abierto, el estado es muestreado a 10kHz y almacenado en un espacio de memoria circular para transferirlo a la computadora.

Un discriminador físico califica la transición de estado para eliminar el ruido y la capacitancia de los cables que puede ser percibida como un rebote de contactos, el tiempo de discriminación es ajustado a 60µsegundos y es muestreado a 2MHz.

Medición de tiempo del resistor de pre inserción

El tiempo de operación del interruptor del resistor es medido al mismo tiempo que el contacto principal, cuando el voltaje medido cae entre el umbral más bajo y el umbral más alto, el canal es determinado a estar en el estado resistivo.

Valor óhmico del resistor de pre inserción

El circuito de medición del resistor de pre inserción emplea la misma fuente de voltaje y fuente de resistencia de los circuitos de medición de tiempo de los contactos; el voltaje a través de los contactos es monitoreado por un convertidor de voltaje a frecuencia cuya salida está acoplada ópticamente a un circuito de conteo digital.

Conociendo la fuente de voltaje, fuente de resistencia y voltaje a través de los contactos del resistor de pre inserción permite calcular la resistencia de pre inserción real, la salida del circuito de conteo digital es actualizada cada 800 μ segundos (1.25kHz).

Canales de movimiento

Los canales de movimiento aceptan entradas de los transductores de movimiento de Doble; los transductores sacan dos señales en cuadratura generadas por sensores ópticos los cuales conmutan encendido y apagado basado en un frente pico de línea pasando entre los sensores y la fuente de luz. Cada transición es igual a un movimiento de 0.0125" (0.09 de movimiento rotativo) impuesto en el transductor, las transiciones son contadas y muestreadas a 10kHz.

La dirección de los movimientos son identificados determinando cual señal en cuadratura está adelantada y cual atrasada en cualquier movimiento en el tiempo; la curva de distancia es generada por medio de una suma de las transiciones versus el tiempo, utilizando la posición inicial como cero, la curva de velocidad es generada por el seguimiento del cambio en distancia versus el tiempo.

Canales de contactos auxiliares

Los canales de contactos auxiliares mide y despliegan el tiempo de tres estados diferentes: Abierto-húmedo, abierto-seco, y cerrado. Un voltaje húmedo aislado es proporcionado para cada canal que no está externamente húmedo para permitir la diferencia de abierto versus cerrado y para limpiar cualquier oxidación en los contactos.

Ambas decisiones de abierto/cerrado y húmedo/ seco son realizadas en base al voltaje a través de las entradas del canal, los estados son muestreados a 10kHz

Canales analógicos

Los canales analógicos son registros de voltaje de propósito general, las entradas son aisladas una de otra y muestreadas por un convertidor A/D serial de 12 bits, el reloj del convertidor A/D es de 80kHz, ocho muestras consecutivas son promediadas y muestreadas por el sistema a 10kHz.

Control del interruptor de circuito

El sistema puede ser configurado con un módulo de disparo/cierre capaz de activar las bobinas de control del interruptor de circuito bajo prueba, las señales de comando son capaces de manejar 100A de corriente en el canal de disparo y de 20A de corriente en el canal de cierre. Estos niveles de corriente pueden ser sostenidos por decenas de milisegundos, con niveles más bajos de corriente sostenidos por décimas de segundo, cada canal está protegido con un fusible de fundición lenta.

Las señales de comandos de disparo y cierre son programadas dentro de los temporizadores, configurados a través de las entradas del usuario, cuando el operador inicia la prueba. Antes de que un comando de disparo o cierre salga del instrumento, cada señal de comando es interrumpida por un relé que tiene tres mecanismos de control.

- Cuando una prueba es iniciada, el micro código saca una señal lógica habilitada hacia la circuitería de control del relé.

- Una vez que el interruptor de seguridad es presionado, el voltaje es alimentado a un lado de la bobina del relé.
- El micro código detecta el cierre del interruptor de seguridad y saca una señal, lo cual completa el circuito de la bobina del relé permitiendo la salida de la señal de comando hacia el interruptor.

Operación del sistema

El sistema está compuesto de dos componentes funcionales, el instrumento y el programa controlador, el TRX de campo, corriendo en una computadora portátil, lo siguiente describe la interacción entre los dos componentes.

Arranque del sistema y configuración de la prueba

En el encendido, el instrumento corre una auto prueba corta para identificar todas las tarjetas y módulos que están presentes, una vez contactado por el controlador, el instrumento transfiere su configuración hacia el controlador y este es desplegado como un panel frontal virtual en la pantalla de la computadora.

Los canales de interés pueden ser activados desde el panel frontal virtual o vía el plan de pruebas creado con el TRX o con el TRX field, el tipo de prueba a ejecutarse es seleccionada desde un menú de múltiples opciones en el panel frontal virtual.

Ejecución de la prueba

El controlador descarga una lista de canales para activar, rangos de los ajustes para los canales apropiados, y la señal en la cual el activador registrará. Las acciones apropiadas del operado encienden todos los voltajes de prueba e inicia el muestreo de todos los canales activados, las muestras son almacenadas en una memoria circular. Cuando la señal del activador predefinido es detectada, las muestras son transferidas desde la memoria circular a una memoria permanente pendiente de la terminación de la prueba, punto en el cual la información es transferida al controlador.

Transferencia de datos

La cantidad de datos transferidos al controlador es proporcional al número y tipo de canales activados, la medición de un contacto principal puede estar conformada por un canal de medición de tiempo de un canal de medición del valor de resistencia de pre inserción, cada canal análogo y/o canal de contacto auxiliar es un canal simple; los canales de corriente de la bobina de disparo y cierre internos son canales individuales.

Los datos son comprimidos y transferidos hacia el controlador a una velocidad de 38kbps, los diferentes tipos de canales se comprimen a diversos grados dependiendo del contenido; los canales de medición de tiempo se comprimen bastante bien.

Procesamiento de resultados

El TRX de campo recibe los datos de prueba y los descomprime, los cálculos son efectuados en una base de canal por canal resultando en tiempos de conmutación con valores máximos, y valores promedio durante tiempos específicos; los resultados de estos cálculos son entonces comparados con las especificaciones ya sea recibidas como parte de un plan de pruebas o ingresadas manualmente por el usuario previo a una prueba, una comparación de pasa/falla es efectuada y los resultados son reportados para todos los canales con las especificaciones.

Los resultados se hacen disponibles en forma tabular y en formato gráfico, numerosas utilerías como, aumentar, sobreponer y mediciones en la pantalla están disponibles como parte del paquete gráfico.

Auto prueba

El instrumento tiene una prueba de auto diagnóstico, compuesto de dos pruebas individuales, las cuales funcionalmente prueban la operación de todos los canales de medición, ninguna señal de comando de disparo o cierre son sacadas del instrumento durante su prueba de auto diagnóstico.

Una vez que la prueba es iniciada el panel frontal virtual, la primer prueba, la auto prueba global inicia. Cada canal de medición es desconectado del conector externo a través de los relés, esto permite a la prueba completa de auto diagnóstico correr sin desconectar el instrumento de su configuración; señales simuladas son inyectadas justo dentro del panel frontal físico y muestreadas como si se estuviera efectuando una prueba estándar.

Los resultados son interpretados por el programa TRX de campo y comparados con los resultados esperados, si los canales están funcionando adecuadamente la prueba termina, si una falla funcional es detectada la segunda prueba comienza, la auto prueba local, la cual continúa la prueba con los canales de medición desconectados entre los módulos del panel frontal físico y las tarjetas de medición en la caja de tarjetas. Una vez más, las señales de prueba son inyectadas y los resultados interpretados, se aplica lógica a los dos resultados de prueba y la tarjeta o módulo fallado es identificado y desplegado.

Fuente: Manual del TDR9000

ANEXO C

ESPECIFICACIONES DEL TDR9000

Este apéndice detalla las especificaciones del TDR9000 y sus operaciones en las siguientes áreas.

- Módulo OCB/movimiento
- Módulo EHV
- Módulo de eventos
- Módulo de sistema
- Físicas
- Ambientales

OCB/ movimiento

La tabla XIII enlista las características del módulo OCB/movimiento

Tabla XIII. Módulo OCB/movimiento

Características	Descripción
OCB	
Canales de contactos principales	3 canales con un interruptor por fase

Voltaje de censado de contacto para tiempo de contacto principal	48/15/17.5 VCD (modificado para el valor del resistor de pre inserción)
Voltaje de censado de contacto para tiempo de interruptor de resistor	48/15/17.5 VCD (modificado para le valor del resistor de pre inserción)
Resolución del tiempo de cierre y apertura	100 μ segundos
Exactitud de tiempo de cierre y apertura	\pm 100 μ segundos
Medición de mínimo rebote de contacto	60 μ segundos
Rango del valor del resistor de pre inserción	10-400 Ohmios o 300-700 ohmios
Exactitud de la medición del valor del resistor	\pm 10%
Transductores de movimiento	
Transductor lineal	
Rango	0.0 – 40.0"
Resolución	0.00125"
Exactitud	\pm 0.1% del valor medido \pm 0.1" como error máximo
Resolución desplegable	0.002"
Velocidad	50 pies/seg máx.
Aceleración	1200g para 50 μ segundos máx.
Transductor rotativo	
Rango	0 - 2880°
Resolución	0.09°

Resolución desplegable	0.1°
Exactitud	±0.1% del valor medido ±0.1° como error máximo
Velocidad	120 rev/seg máx.
Aceleración	30 x 10 ⁶ grad/seg ² máx.

Módulo EHV

La tabla XIV enlista las características del módulo EHV

Tabla XIV. Módulo EHV

Características	Descripción
Canales de contactos principales	6 canales con dos interruptores por fase
Voltaje de censado de contacto para tiempo de contacto principal	15/7.5 VCD (modificado para el valor del resistor de pre inserción)
Voltaje de censado de contacto para tiempo de interruptor de resistor	15/17.5 VCD (modificado para el valor del resistor de pre inserción)
Resolución del tiempo de cierre y apertura	100 µsegundos
Exactitud de tiempo de cierre y apertura	± 100 µsegundos
Medición de mínimo rebote de contacto	60 µsegundos
Rango del valor del resistor de pre inserción	10-300 Ohmios o 200-500 ohmios

Exactitud de la medición del valor del resistor	$\pm 10\%$
---	------------

Módulo de eventos

La tabla XV enlista las características del módulo de eventos

Tabla XV. Módulo de eventos

Características	Descripción
Canales análogos	
Número de canales	3 por módulo
Frecuencia de muestreo	10kHz
Rango de voltaje de medición	± 300 CA/CD pico
Ancho de banda de señal análogo	CD a 5kHz
Exactitud	300 V rango solamente $\pm 0.5\%$ de plena escala de $\pm 1.5\%$ de la lectura
Rangos de corriente	0-20A, 0-200 ^a
Voltaje de aislamiento a tierra	300 V
Canales de contactos auxiliara	
Números de canales de contactos auxiliares	3
Censado	Abierto húmedo/abierto seco/cerrado

Módulo de sistema

El módulo de sistema está conformado por varios componentes cuyas especificaciones están dadas en las siguientes tablas.

La tabla XVI enlista las características del módulo de disparo/cierre.

Tabla XVI. Módulo de disparo/cierre

Características	Descripción	
	Disparo	Cierre
Voltaje pico	300 VCD	
Máxima corriente no repetitiva	Pulso de 100 ^a CD	Pulso de 20 A CD
Tiempo máximo de encendido/apagado	10μsegundos	

La tabla XVII enlista las características de la función de activador de entrada

Tabla XVII activador de entrada

Característica	Descripción
Censado	Abierto, cerrado
Voltaje húmedo	28 VCD
Voltaje de entrada	0 – 600 VCD

La tabla XVIII enlista las características del módulo de sistema

Tabla XVIII. Características de la señal del módulo del sistema

Características	Descripción
Comando disparo/cierre	
Ancho de pulso	8.0 a 1600 milisegundos
Resolución	0.1 milisegundos
Rango de corriente de comando de disparo	2/5/20/100 A
Rango de corriente de comando de cierre	0.2/1/5/20 A

Especificaciones físicas

La tabla XIX enlista las especificaciones físicas del TDR9000

Tabla XIX. Especificaciones físicas del TDR9000

Características	Descripción
Cubierta	Alto impacto, moldeada retardante a la flama ABS. Cumple con las especificaciones de prueba "Nacional Safe Transit Association" No. 1ª para inmunidad ante golpes severos y vibración
Dimensiones	10.0" H X 16.0" W X 15.5" D
Peso máximo	30 lbs incluyendo la cubierta, impresora y máxima configuración

Voltaje de alimentación	85-264 VCA 50/60 Hz.
Inmunidad a la descarga electrostática	Cumple el IEC 1000-4-2 nivel 4 (formalmente IEC 801-2)
Capacidad de aguante al impulso	Cumple con ANSI C37.90 1989 ESD

Especificaciones ambientales

La tabla XX enlista las especificaciones ambientales del TDR9000

Tabla XX. Especificaciones ambientales del TDR 9000

Característica	Descripción
Rango de temperatura de aislamiento	-25°C a + 70°C
Rango de temperatura de operación	0°C a + 50°C
Humedad de almacenamiento	95%, sin condensación

Fuente: Manual del TDR9000

ANEXO D

TRANSDUCTORES DE MOVIMIENTO

Figura 94. Transductor de movimiento rotacional



Figura 95. Transductor de movimiento lineal

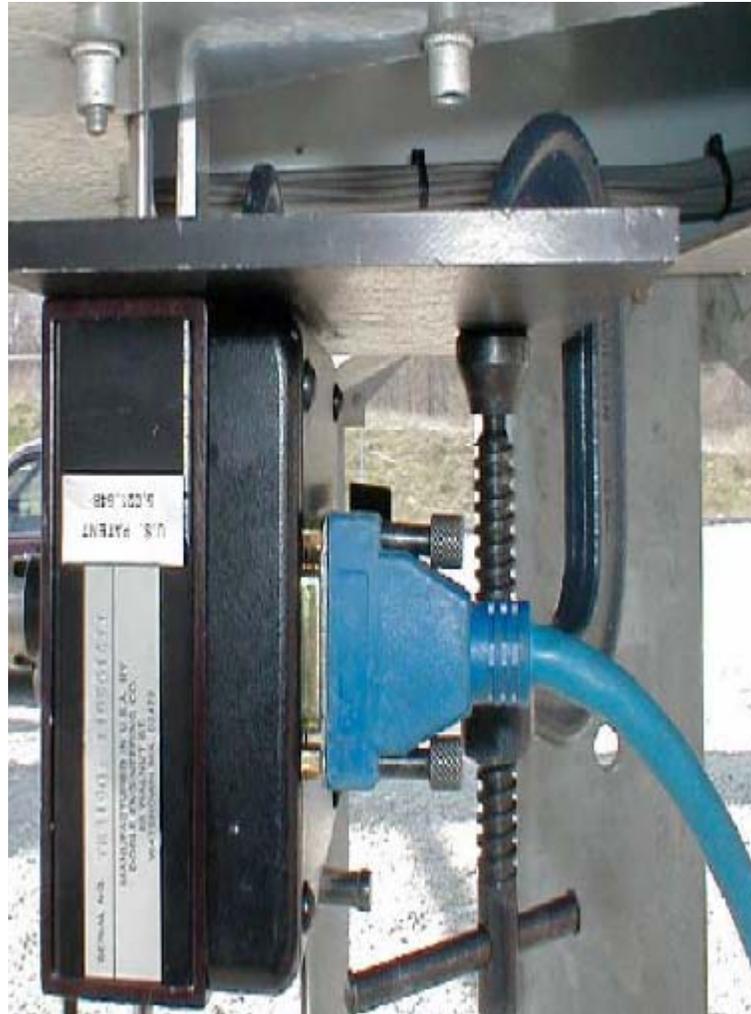


Figura 96. El movimiento lineal de los contactos

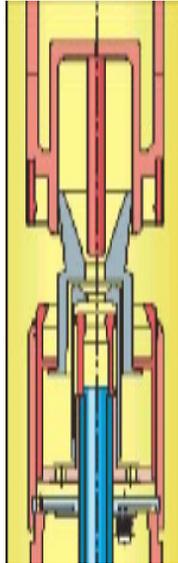


Figura 97. Mecanismo accionado por resortes

