

24
2e)



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGON

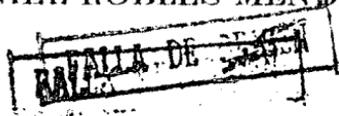
ANALISIS DEL CIRCUITO WEIL
PARA ENSAYOS SINTETICOS
DE CORTOCIRCUITO EN INTERRUPTORES
Y OBTENCION DE LA TTR CRITICA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO-ELECTRICISTA

PRESENTA

DANIEL ROBLES MENDOZA



ENEP
ARAGON

Escuela Nacional de Estudios Profesionales
Aragón

MEXICO, D. F. - 1990



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

I N D I C E

INTRODUCCION

CAPITULO 1.

TIPOS DE PRUEBA DE CORTOCIRCUITO EN INTERRUPTORES.

	PAGINA
1.1 Introducción. _____	1
1.2 Pruebas Directas. _____	4
1.2.1 Pruebas de campo. _____	4
1.2.2 Pruebas de laboratorio. _____	5
1.3 Pruebas Indirectas. _____	7
1.3.1 Pruebas de un Solo Polo. _____	7
1.3.2 Pruebas en dos Partes. _____	13
1.3.3 Pruebas Unitarias. _____	15
1.3.4 Pruebas Sintéticas. _____	18
1.3.4.1 Proceso de Interrupción _____	21
1.4 Métodos utilizados para la ejecución de Pruebas Sintéticas. _____	24
1.4.1 Método de inyección de corriente tipo paralelo. _____	26
1.4.2 Método de inyección de corriente tipo serie. _____	30
1.4.3 Método de inyección de tensión tipo serie. _____	32
1.4.4 Método de inyección de tensión tipo paralelo. _____	35
1.5 Condiciones de equivalencia que deben cumplirse para una prueba sintética. _____	37
1.6 Referencias. _____	42

CAPITULO 2.

DESCRIPCION DEL CIRCUITO SINTETICO
DEL LABORATORIO DE SALAZAR

2.1	Introducción.	43
2.2	Diagrama y componentes del circuito.	44
2.3	Breve descripción de las principales componentes del circuito sintético.	45
2.4	Secuencia de operación del circuito sintético del IIE.	53
2.5	Capacidad de prueba del Laboratorio de Salazar.	57
2.6	Referencias.	58

CAPITULO 3.

ANALISIS MATEMATICO DEL CIRCUITO
Y OBTENCION DE LA TTR.

3.1	Introducción.	59
3.2	Planteamiento de las ecuaciones del circuito.	60
3.3	Solución de las ecuaciones para obtener la TTR.	64
3.4	Referencias.	71

CAPITULO 4.

REQUERIMIENTOS DE LAS NORMAS INTERNACIONALES
QUE DEBE SATISFACER LA TTR.

4.1	Introducción.	72
4.2	Definición de IEC-56 para la TTR.	74
4.2.1	TTR Nominal para falla en terminales.	74
4.2.2	Representación normalizada de la TTR.	74
4.2.3	Representación de la TTR Nominal.	76
4.3	Definición de ANSI/C37 para la TTR.	78
4.4	Referencias.	80

CAPITULO 5.

PROGRAMAS DE COMPUTADORA PARA EL CALCULO
DE LA TTR Y DE LOS PARAMETROS DE PRUEBA.

5.1	Introducción.	81
5.2	Definición de los parámetros D, F y P en el modelo matemático de la TTR y su influencia en éste.	83
5.3	Programa para obtener la gráfica de la TTR en función de D, F y P.	97
5.4	Programa para el cálculo de los parámetros que generan a la TTR esperada.	100
5.5	Comparación entre los valores obtenidos teóricamente y los oscilogramas reales de prueba.	103

INDICE

CAPITULO 6.

TTR CRITICA.

6.1	Definición de la TTR Critica.	105
6.2	Modificaciones al programa CALCTTR para obtener las TTR's criticas.	106
6.3	Valores de los bancos Ch, Lh, C1 y R1 para generar las TTR's Criticas en el Laboratorio de Salazar.	108
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	115

INTRODUCCION

INTRODUCCION

En los últimos años las tensiones de transmisión en el mundo se han elevado de 750 kV a 1200 kV.

Las capacidades interruptivas requeridas, se han elevado de 1GVA a 50GVA y para los próximos años es posible que lleguen a los 1500kV y 200 GVA.

Por lo que respecta a las redes nacionales que cuentan actualmente con un nivel máximo de 400kV, se esperan incrementos inferiores, sin embargo, es posible que en los próximos 25 años las capacidades interruptivas asciendan a 50 GVA.

Las capacidades instaladas de los laboratorios actuales no son suficientes para hacer la prueba directa trifásica para los interruptores de mayor capacidad, por lo que se recurre a los métodos sintéticos para poder probar estos equipos.

Debido a lo anterior, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) decidió desarrollar la infraestructura necesaria en las instalaciones de Salazar, Edo. de México, con la finalidad de impulsar el desarrollo tecnológico de la industria eléctrica, tanto en la fabricación de equipos como en la adecuada aplicación y utilización de los mismos.

INTRODUCCION

Uno de los problemas a los que se enfrentó la puesta en marcha del laboratorio, fue que el proceso de cálculo de los valores de las componentes del circuito de prueba se hacía a través de tablas, lo que implicaba exceso de tiempo en la preparación de una prueba y cálculos con poca precisión.

El presente trabajo soluciona este problema a través del desarrollo de dos programas de cómputo, uno de los cuales calcula los valores de las componentes del circuito de prueba y otro la gráfica de la TTR (Tensión Transitoria de Restablecimiento) esperada.

Estos programas se diseñaron de tal manera que proporcionan las siguientes ventajas:

- Conocer la forma de onda de la Tensión Transitoria de Restablecimiento (TTR) antes de efectuar la prueba.
- Conocer los valores de las componentes del circuito sintético (C_h , L_h , C_l y R_l) para dicha prueba.
- Si los valores de C_h , L_h , C_l y R_l que arrojó el programa no se pueden ajustar exactamente en los bancos del circuito sintético, se hará otra corrida del programa con los valores reales que se midieron para obtener la gráfica de la TTR esperada con estos valores.

INTRODUCCION

Además, los programas permitieron hacer un análisis de todas las posibles pruebas sintéticas a realizarse de 3.6kV a 34.5kV con sus respectivos ciclos de operación (30%, 60% y 100% de la corriente máxima de cortocircuito) lo cual condujo a la necesidad de modificar el banco de capacitores C1 y el banco de inductancias Lh (parte del circuito sintético) para cumplir con la norma IEC-56 para la prueba de equipos de interrupción ya que los actuales bancos C1 y Lh, sólo cumplen con un cierto número de pruebas normalizadas.

A diferencia de otros equipos eléctricos, el diseño completo de interruptores de media y alta tensión no puede hacerse a partir de parámetros que permitan estimar su completo comportamiento en operación.

Dada su importante función de aislar e interconectar circuitos bajo condiciones críticas muy diversas, la única manera conocida de garantizar su correcto funcionamiento es sujetar al interruptor prototipo a pruebas exhaustivas que simulan las condiciones de operación.

Por lo tanto, la prueba a los interruptores de potencia tiene un gran valor al integrar la función de diseño con la de seguridad de la operación.

Los métodos empleados para tal efecto son los siguientes:

Pruebas Directas, que pueden ser:

- Pruebas de Campo.
- Pruebas de Laboratorio.

Pruebas Indirectas, que se dividen en:

- Pruebas de un solo polo.
- Prueba unitaria.
- Pruebas en dos partes.
- Pruebas sintéticas.

Cada uno de los métodos indirectos, tiene que observar ciertos criterios de equivalencia con la prueba directa para que ésta sea válida.

1.2 PRUEBAS DIRECTAS.

Son pruebas de cortocircuito en las cuales el voltaje aplicado, la corriente y la Tensión Transitoria de Restablecimiento son cual puede ser un sistema de potencia o generadores especiales como los usados en las estaciones de prueba de cortocircuito, el voltaje aplicado y el voltaje de restablecimiento del circuito corresponden al voltaje de la fuente de potencia.

1.2.1 PRUEBAS DE CAMPO.

Las pruebas de campo, son las pruebas ejecutadas en los sistemas de potencia reales. Son una buena herramienta para verificar el rendimiento del interruptor en las mismas condiciones que ocurrirán en el sistema. «Ref. 2»

Esto es una ventaja por que la simulación de las condiciones de campo nos lleva a grandes simplificaciones. Sin embargo, esta ventaja es restringida por un buen número de inconvenientes. El principal es la muy limitada posibilidad de variación de los parámetros de prueba.

1.2.2 PRUEBAS DE LABORATORIO.

Las pruebas de laboratorio son realizadas en una instalación especial de prueba, construida especialmente para este propósito. Todo el circuito de potencia y el equipo de medición es completamente especializado.

En la Fig. 1.1, se ilustra el diagrama básico de un laboratorio típico de alta potencia para pruebas directas.

Los principales componentes del circuito de prueba son:

- G - Fuente de cortocircuito, que puede estar integrada por transformadores, generadores de cortocircuito o tomada del sistema.
- P - Interruptor de protección, el cual interrumpe la corriente en caso de falla del interruptor bajo prueba.

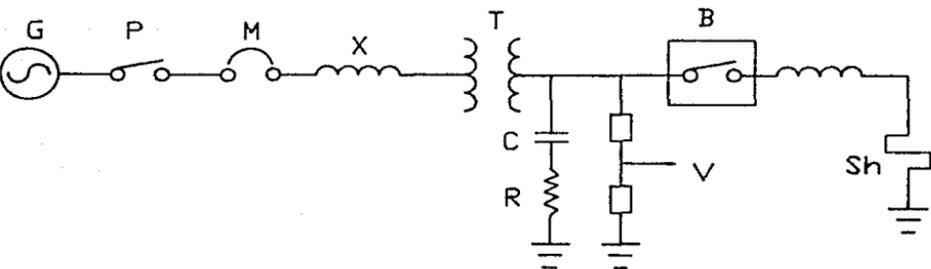


Figura 1.1 Diagrama básico de un circuito de prueba directa.

-
- X - Reactores inductivos de corriente, que limitan la corriente de cortocircuito al valor deseado.
 - T - Transformadores con relación de transformación variable en un amplio rango.
 - C - Capacitancia de control de la TIR.
 - R - Resistencia de control de la ITR.
 - B - Interruptor bajo prueba.
 - V - Divisor de voltaje para mediciones.
 - I - Transductor de corriente.

Como el laboratorio está diseñado para propósitos determinados de pruebas específicas, su principal ventaja con respecto a las pruebas de campo es la rapidez y la gran flexibilidad de los parámetros de prueba.

La desventaja es el alto costo de equipo, que junto con la potencia disponible pone una limitante en la capacidad de las instalaciones.

Todo esto implica que el laboratorio sea más versátil.

1.3 PRUEBAS INDIRECTAS.

Los métodos indirectos de prueba, son aquéllos que permiten la evaluación de la capacidad de los interruptores de tres polos, lo que significa pruebas a interruptores trifásicos con los MVA de cortocircuito totales.

Hay una gran variedad de métodos indirectos de prueba.

Sólo los mas importantes son tratados en el presente estudio de acuerdo con la siguiente clasificación: «ref. 2».

- 1) Pruebas de un solo polo.
- 2) Pruebas en dos partes.
- 3) Pruebas unitarias.
- 4) Pruebas sintéticas.

1.3.1 PRUEBAS DE UN SOLO POLO.

La relación que debe guardarse entre la prueba trifásica directa y la de un solo polo, se basa en el principio ilustrado en la figura 1.2.

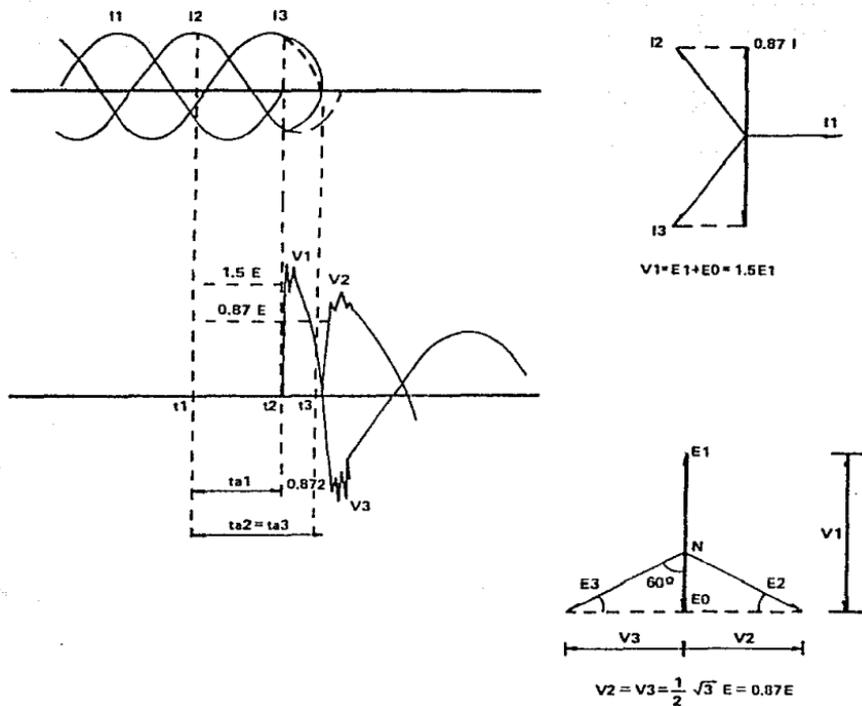


Figura 1.2 Interrupción de un cortocircuito trifásico.

en donde:

I_1, I_2, I_3 , Corrientes a través de cada fase del interruptor.

E_1, E_2, E_3 , Tensiones del sistema.

V_1, V_2, V_3 , Tensiones entre terminales de cada polo.

La figura muestra la secuencia en que ocurre la interrupción en las tres fases del circuito, aplicable a los siguientes tipos de sistemas:

- a) Sistema aterrizado con una falla aislada.
- b) Sistema con neutro aislado con falla aislada o no.

En ambos casos, se está considerando un sistema trifásico balanceado, es decir, la falla trifásica.

Cada polo puede interrumpir su corriente respectiva sólo cuando ésta pasa por cero; por lo tanto, la interrupción no puede ocurrir simultáneamente en las tres fases.

Uno, cualquiera de los tres polos, en forma aleatoria, interrumpirá primero (fase 1 en este caso), el cual lo hace en el tiempo t_1 . A partir de ese instante, el circuito trifásico se convierte en bifásico, como se indica en la figura 1.3.

La corriente que interrumpe el polo 1, en el circuito trifásico equilibrado en el instante t_1 es:

$$I_1 = I = \frac{E_1}{X} = \frac{E}{X} ; (E_1 = E_2 = E_3) \quad (1.1)$$

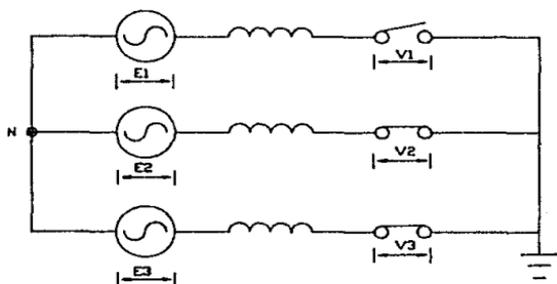


Figura 1.3 Apertura del primer polo del interruptor.

A partir del instante t en que el sistema se transforma en bifásico, compuesto por las fases 2 y 3, el punto N toma el valor:

$$E_0 = E \sin 30^\circ = 0.5 E \quad (1.2)$$

La tensión a través del polo 1 alcanza el valor :

$$V_1 = E_1 + 0.5 E = 1.5 E \quad (1.3)$$

En tanto que en las fases 2 y 3 se tiene :

$$V_2 = V_3 = \frac{V_{23}}{2} = \frac{\sqrt{3} E}{2} = 0.87 E \quad (1.4)$$

En donde V_{23} es la tensión existente entre las dos fases y E es la tensión por fase del sistema original.

Por otra parte:

$$I_2 = I_3 = \frac{V_{23}}{2 X} = \frac{\sqrt{3} E}{2 X} = 0.87 I \quad (1.5)$$

Esto es que el polo 1 se ve sometido a una tensión 1.5 veces mayor, interrumpiendo la corriente plena de cortocircuito, en tanto que los polos 2 y 3 interrumpen corrientes al 87% y con tensiones entre sus terminales también del 87%.

Las corrientes de las fases 2 y 3, sufren otro cambio compensatorio que consiste en que una se anticipa 30° y la otra se retrasa, para llegar al cero de interrupción en el mismo instante (t_2), obligadas por la ley de Kirchhoff ($\sum I = 0$). Este instante t_2 ocurre precisamente 90° después que t_1 , como puede apreciarse en la figura 1.2.

La potencia total transferida es:

$$P_1 = 3 E I = \sqrt{3} V I \quad (1.6)$$

La potencia que interrumpe el primer polo:

$$P_1 = V_1 I_1 = 1.5 E I \quad (1.7)$$

$$P_1 = \frac{1}{2} P_t \quad (1.8)$$

y la potencia que interrumpen los polos 2 y 3,

$$P_2 = P_3 = V_2 I_2 = \left(\frac{\sqrt{3} E}{2} \right) \left(\frac{\sqrt{3} I}{2} \right) = \frac{3 EI}{4} \quad (1.9)$$

o sea que:

$$P_2 = P_3 = \frac{1}{4} P_t \quad (1.10)$$

El primer polo que abre, soporta el 50% de la potencia total de cortocircuito trifásico, en tanto que entre los otros dos polos se reparten el 50% restante.

El primer polo además, se ve expuesto a una sobre tensión mayor que los otros dos y 1.5 veces mayor que la tensión nominal. Cuando el sistema está aterrizado a través de impedancias, este factor se ve reducido; en la practica hasta un valor aproximado de 1.3.

El factor del primer polo que abre, es uno de los principales aspectos que debe ser considerado cuando se realiza la prueba de un solo polo; es decir, la prueba se efectúa sobre las condiciones más críticas que se presentan en el polo en servicio.

Si se tiene por ejemplo un interruptor de 245 kV, aplicando un factor de primer polo que abre de 1.5, la tensión de prueba monopolar será:

$$V_p = \frac{245}{\sqrt{3}} * 1.5 = 213 \text{ kV (valor eficaz)}$$

$$= 213 * \sqrt{2} = 301 \text{ kV (valor cresta)}$$

La corriente de prueba por aplicar, como se ha visto, es la corriente plena de cortocircuito.

1.3.2 PRUEBAS EN DOS PARTES.

Cuando el laboratorio no está en posibilidad de realizar la prueba con todas sus características, puede recurrirse al método en dos partes sucesivas, cada una de las cuales proporciona una parte de las sollicitaciones requeridas. «ref. 3».

De acuerdo con la norma IEC-56, se puede realizar este método mediante el criterio de mantener constante la corriente y obtener la TTR por medio de dos pruebas, como se muestra en la fig. 1.4.

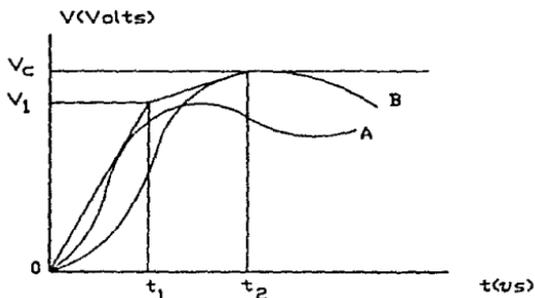


Figura 1.4 Obtención de la TTR a 4 parámetros.

El criterio para aplicar este método es el siguiente:

1^o prueba: La curva A se obtiene con el 100% de la corriente de prueba, la TTR es reducida, pero se cumple con la relación de crecimiento de la primera parte.

2^o prueba: En forma consecutiva se realiza la prueba de acuerdo con la curva B, también con el 100% de la corriente de prueba, alcanzándose el valor máximo de la TTR pero con una relación de crecimiento reducida.

1.3.3 PRUEBAS UNITARIAS.

Las pruebas unitarias, son aquéllas que se llevan a cabo sobre una de las unidades que componen el polo o un grupo de ellas que formen una fracción del mismo. «ref. »

La prueba se hace con la corriente de prueba plena especificada para el polo completo, y con la fracción apropiada de la tensión aplicada y de la TTR.

Para esto último, se hace intervenir en la prueba el concepto del factor de repartición de la tensión a través de las distintas unidades que integran el polo, o sea, que la distribución de la tensión no es uniforme.

La tensión que se aplica a la unidad, es la más severa que sufriría cualquiera de ellas durante la prueba del polo completo.

En la práctica, los interruptores son construidos con capacitores de repartición en paralelo con cada unidad de interrupción, con el objeto de lograr una repartición lo más uniforme posible. Aún así esto no se logra por los siguientes motivos: «ref. »

Los capacitores no resultan de valores exactamente iguales; se construyen dentro de ciertas tolerancias.

Se presentan capacitancias parásitas diferentes de cada unidad a tierra y a las distintas partes del interruptor.

La construcción del polo del interruptor no es de una simetría perfecta.

Considérese como ejemplo el interruptor de dos unidades por polo mostrado en la figura 1.5, con capacitores de repartición de cada unidad exactamente iguales.

En el caso de una prueba sobre el polo completo, el elemento de interrupción más solicitado es el que se conecta del lado de la fuente de alimentación.

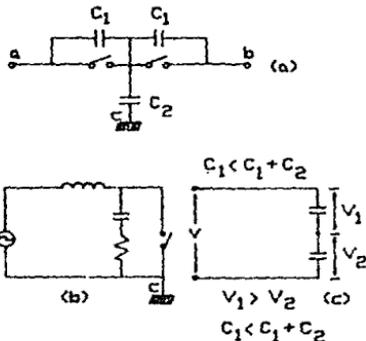


FIG 1.5 PRUEBA AL POLO COMPLETO DE UN INTERRUPTOR DE DOS UNIDADES POR POLO.

- Diagrama del polo del interruptor.
- Circuito de prueba.
- Distribución de la tensión aplicada.

Se tienen los siguientes valores típicos de un cierto interruptor:

$$C_1 = 2000 \text{ pF}$$

$$C_2 = 200 \text{ pF}$$

$$\frac{V_1}{V} = \frac{\frac{1}{C_1}}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_1 + C_2}} = \frac{\frac{1}{C_1}}{\frac{C_1 + C_2 + C_1}{C_1 (C_1 + C_2)}}$$

$$\frac{V_1}{V} = \frac{C_1 + C_2}{2C_1 + C_2} = \frac{2200\text{pF}}{4200\text{pF}} = 0.52$$

Como se ve la unidad 1, conectada del lado de la fuente, soporta el 52% de la tensión total en vez del 50% si la repartición fuera uniforme.

Como se ha anotado, el factor de repartición para la unidad más solicitada debe hacerse intervenir para afectar tanto la tensión de prueba como la tensión transitoria de restablecimiento (TTR).

Para el caso considerado en el punto 1.3.1 de un interruptor de 245 kV, si se desea hacer la prueba unitaria considerando el polo constituido por dos cámaras, se tiene:

$$V_p = (1/2 \text{ polo}) = 245 \text{ kV} * 0.52 = 127 \text{ kV eficaz}$$

$$= 127 * \sqrt{2} = 180 \text{ kV cresta}$$

$$V_m = (1/2 \text{ polo}) = 180 * f_a = 180 * 1.4 = 252 \text{ kV cresta}$$

En donde V_m es el valor máximo que alcanza la TTR y f_a es el factor de amplitud con respecto a la tensión de prueba nominal. Para que la prueba unitaria pueda ser válida, es indispensable que las unidades sean idénticas; también se requiere que cuando se use una fuente externa de suministro del medio de extinción en el diseño del interruptor, la alimentación a la unidad sea prácticamente independiente al de las otras dos unidades. «ref 3».

Este método de prueba se usa ampliamente en la actualidad, combinando incluso con el recurso del método sintético para ampliar la capacidad de prueba del laboratorio.

1.3.4 PRUEBAS SINTETICAS.

Es una prueba de cortocircuito en la que toda la corriente, o la mayor parte de ella, se obtiene de una fuente (circuito de corriente) y en el cual toda o la mayor parte de la TTR es obtenida de una o más fuentes independientes (circuitos de voltaje), este voltaje corresponde al voltaje nominal del interruptor bajo prueba.

El voltaje de la fuente de corriente es una fracción del voltaje nominal del interruptor bajo prueba. «ref. 4»

El uso de dos circuitos en el método sintético, se basa en el propio proceso de interrupción y en las dos diferentes condiciones que puede guardar un interruptor en servicio. Es decir:

a) Cuando el interruptor está cerrado (Fig 1.6) y aparece un cortocircuito, entre sus contactos se tiene:

$$V_i = 0$$

$$i = I_{cc}$$

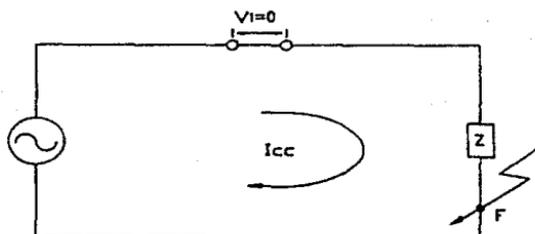


Figura 1.6 Interruptor en la posición de cerrado en el instante de presentarse la falla.

b) En el momento en que interrumpe la corriente de falla (Fig 1.7):

$$i = 0$$

$$v = V_i = TTR \text{ (Tensión Transitoria de Restablecimiento).}$$

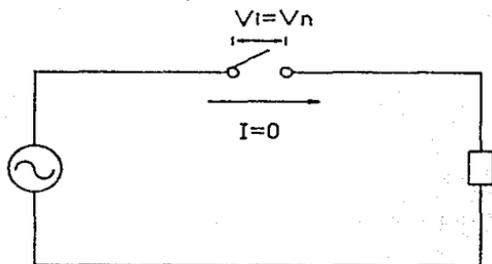


Figura 1.7 Interruptor en la posición de abierto en el instante de interrumpir una falla.

Los dos circuitos anteriores pueden combinarse, según el arreglo del principio de la Fig 1.8, el cual es la base del método de prueba sintética.

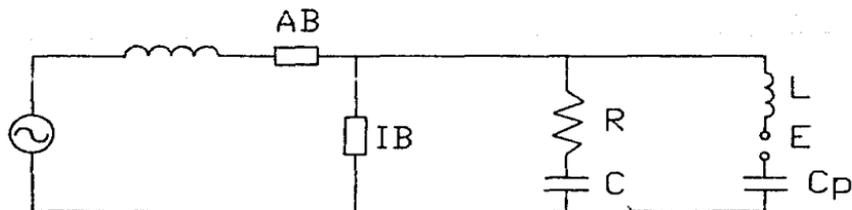


Figura 1.8 Esquema básico del método de prueba sintética.

1.3.4.1 PROCESO DE INTERRUPCION.

El proceso de interrupción presenta las características mostradas en la Fig. 1.B.1

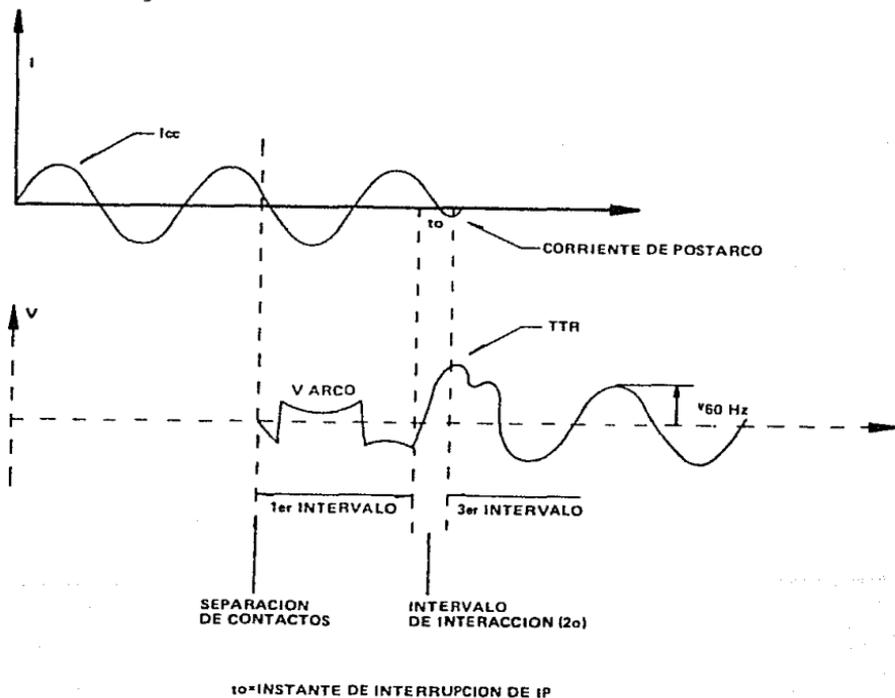


Figura 1.B.1 Proceso de interrupción.

En la Figura anterior podemos apreciar tres intervalos. «ref 5»

1er Intervalo: En el cual los esfuerzos predominantes se deben a la corriente de cortocircuito I_{cc} . La tensión que aparece es de valor bajo (tensión de arco).

2o Intervalo: Es el intervalo de Interacción entre el arco del interruptor y el circuito de prueba.

3er Intervalo: En el cual los esfuerzos predominantes son de tensión, los mayores debidos a la tensión transitoria de restablecimiento.

El primer intervalo (intervalo de corriente), somete fuertemente al interruptor a esfuerzos térmicos, con producción de una cantidad de energía considerable, derivada de la gran elevación de temperatura que se alcanza en el proceso de interrupción y de la ionización del medio de extinción que se use entre contactos. La tensión de arco para un cierto interruptor de alta tensión, es un parámetro característico del diseño del mismo, que permanece prácticamente constante, al variar, dentro de ciertos límites, la tensión aplicada. El valor de dicha tensión de arco es una fracción pequeña de la tensión de servicio del interruptor; por lo tanto, es posible mediante una potencia reducida, proporcionar al interruptor la misma energía de arco que si se alimentara a la tensión de servicio plena.

En el tercer intervalo (intervalo de tensión), la potencia del circuito es baja, ya que la corriente que puede existir es pequeña (corriente de post-arco).

1.4 METODOS UTILIZADOS PARA LA EJECUCION DE PRUEBAS SINTETICAS.

Desde el punto de vista de las maniobras que conforman el ciclo de operación del interruptor, las pruebas pueden ser:

- De apertura o interrupción
- De cierre o conexión

Los diferentes métodos sintéticos utilizados para pruebas de apertura con cortocircuito entre sus terminales parten de la siguiente clasificación y de sus diferentes tipos de conexiones «ref. 2».

Métodos:

- Inyección de corriente
- Inyección de tensión

Tipos de circuito

- Paralelo
- Serie

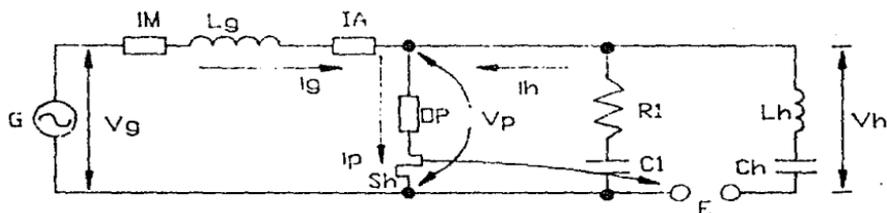
Uniendo cada método con cada tipo de circuito, resultan las combinaciones siguientes:

Métodos:

- Método de inyección de corriente tipo serie.
- Método de inyección de corriente tipo paralelo.
- Método de inyección de tensión tipo serie.
- Método de inyección de tensión tipo paralelo.

1.4.1 METODO DE INYECCION DE CORRIENTE TIPO PARALELO.

El esquema correspondiente es el de la Fig. 1.9.



G = Fuente de potencia.

IA = Interruptor auxiliar.

DP = Objeto bajo prueba.

Ch = Batería principal de capacitores que proporciona la TTR.

C1, R1 = Elementos de regulación de la TTR.

Lg = Reactores limitadores de la corriente de cortocircuito.

E = Explosor controlado.

i_p = Corriente de prueba = $i_g + i_h$ donde $i_g \gg i_h$.

V_h = Tensión de carga de Ch.

V_g = Tensión del circuito de corriente.

V_p = Tensión de prueba.

Sh = Shunt de medición de i_p para el comando de E.

Lh = Inductancia de regulación de la corriente i_h .

IM = Interruptor de sincronización.

Figura 1.9 Esquema del principio del método de inyección de corriente tipo paralelo (circuito Weill).

La prueba se inicia con la batería C_h cargada y cerrados los interruptores I_A e I_p ; este último es el interruptor bajo prueba. Mediante el interruptor de sincronización IM que controla la fuente de potencia, se aplica la corriente de prueba al interruptor I_p a través del circuito de corriente. En la secuencia de la prueba se programa el instante en que deberá intervenir I_A e I_p , utilizando para esto un Controlador Programable de Secuencias (CPS).

Sin embargo, la intervención del explosor dependerá de la orden que reciba de un sensor de la corriente de prueba, que se instala en serie con I_p (Sh en la Fig 1.9).

El principio aplicado llamado 'Inyección de Corriente', consiste en inyectar un poco antes del cero prefijado de la corriente de prueba i_g una corriente i_h de frecuencia superior f_h , la cual se suma a la primera al pasar por el interruptor bajo prueba.

Las relaciones que se deben conservar son:

$$\frac{i_h}{i_h} = \frac{f_g}{f_h} \quad (60 \text{ Hz}) \quad (1.11)$$

(250-1000 Hz)

$$i_h \cong \frac{1}{10} i_g \quad (1.12)$$

$$\frac{di_g}{dt} = \frac{di_h}{dt} \quad (1.13)$$

La expresión condiona a que la velocidad de la corriente y su pendiente no deben modificarse al aproximarse y llegar al cero de interrupción.

La Fig 1.10, muestra las características del principio, en el cual puede apreciarse como se realiza la inyección de corriente sobre el interruptor disparando el explosor E en el momento preciso para descargar la energía almacenada en C_h .

Inicialmente la rama $C_1 - R_1$ se encuentra en cortocircuito, de modo que el circuito en que circula i_h se forma con C_h , L_h y el interruptor bajo prueba I_p . En el momento de la interrupción se elimina el cortocircuito de $C_1 - R_1$, estableciéndose otro circuito oscilatorio en el que influye predominantemente la impedancia de C_1 ; la tensión que se genera entre las terminales de la rama de regulación, es a la vez la tensión entre las terminales del interruptor I_p , que deberá corresponder a la TTR requerida de prueba.

Por otra parte, la corriente a través del interruptor auxiliar I_A es solamente i_g , la cual es interrumpida por éste en forma natural al llegar al cero un poco antes de que I_p interrumpa y en consecuencia aparezca la TTR, aislando de este modo al circuito de corriente para librarlo de la alta tensión.

El instante de inyección de corriente puede apreciarse mejor en la Fig 1.11.

De acuerdo con la experiencia, el principio de inyección de corriente cumple satisfactoriamente con los requisitos de equivalencia con respecto al método directo. «Ref 3.0»

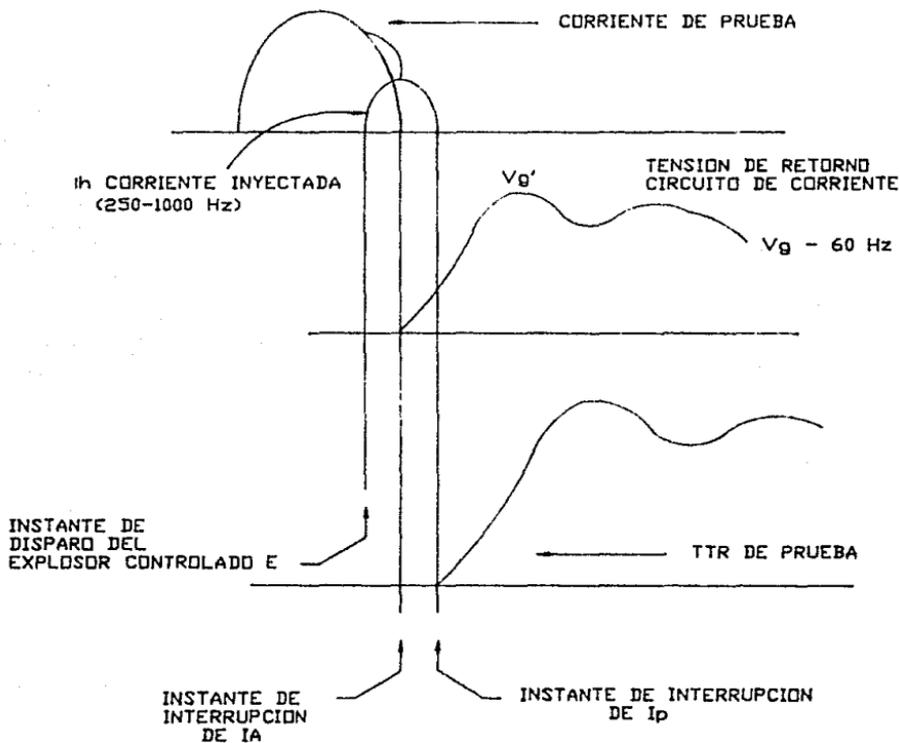


Figura 1.10 Interrupción por el método Well.

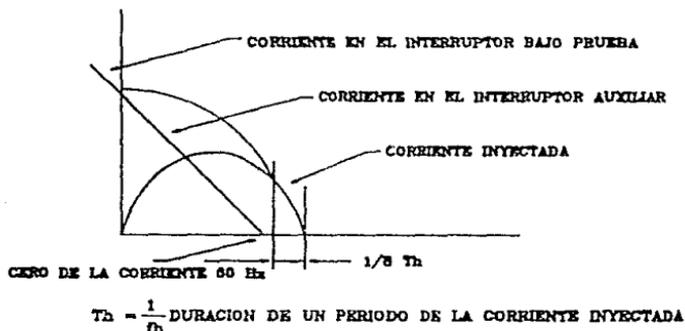


Figura 1.11 Detalle de inyección de corriente en la prueba sintética

1.4.2 METODO DE INYECCION DE CORRIENTE TIPO SERIE.

El método de inyección de corriente tipo serie o Kaplan «ref.4» como su nombre lo indica, aplica el principio de inyección de corriente descrito anteriormente, es decir, el disparo del explosor E se origina antes de la interrupción del interruptor bajo prueba I_p , haciéndose pasar por éste la corriente inyectada i_h producida por la descarga de Ch. Su diferencia con el circuito Weil es que utiliza un *círculo tipo serie*. Su diagrama básico es el de la Fig 1.12.

En este caso la capacitancia C_1 recibe una carga previa, a partir del instante en que abre I_A , al aplicársele la tensión transitoria de retorno V_g , terminando de cargarse con la descarga de C_h . Debido a esta circunstancia, la energía de C_h es menor que en el método de Inyección de Corriente Tipo Paralelo. Sin embargo, se tiene entendido que la operación del circuito de Inyección de Corriente Tipo Serie resulta más complicado que el de Inyección de Corriente Tipo Paralelo y más peligroso para el Circuito de Corriente, por el hecho de quedar conectado directamente a éste.

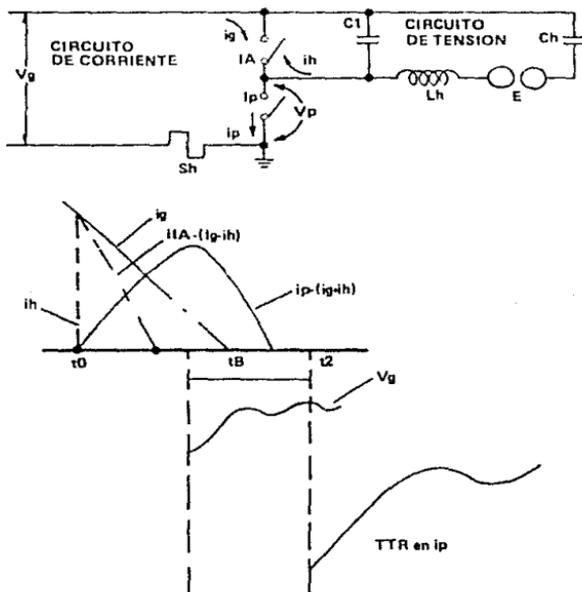


Figura 1.12 Circuito sintético de inyección de corriente.

1.4.3 METODO DE INYECCION DE TENSION TIPO SERIE.

En el principio de 'Inyección de tensión' Fig. 1.13, el disparo del explosor E se produce hasta después de que ha abierto el interruptor bajo prueba I_p . El interruptor auxiliar I_A , interrumpe al mismo tiempo que I_p , ya que ambos ven la misma corriente i_g .

Por lo tanto, a partir del instante t_0 , se genera la tensión transitoria de retorno del circuito de corriente (V_g). En el instante t_1 dispara el explosor E para descargar la batería C_h y a partir de este momento se inicia la carga del capacitor C_a , que corresponde en la figura a la oscilación de tensión V_a que se superpone a V_g' para dar en las terminales del interruptor en prueba la TTR requerida. Debido a que se aprovecha la V_g' , la energía de C_h necesaria, es menor que en los métodos de inyección de corriente paralelo.

Mediante este principio lo que se *inyecta* al interruptor en prueba, es por lo tanto, tensión; de aquí su nombre.

En el circuito, la capacitancia C_a tiene un valor tal, 50 a 100 nF «ref. 4», que permite repartir en forma desigual la tensión V_g' entre los dos interruptores en serie, de modo que la mayor parte cae sobre I_p y por lo tanto permite aplicar a éste, a partir del instante de interrupción, la tensión adecuada, mientras aparece la tensión inyectada por el circuito de apertura.

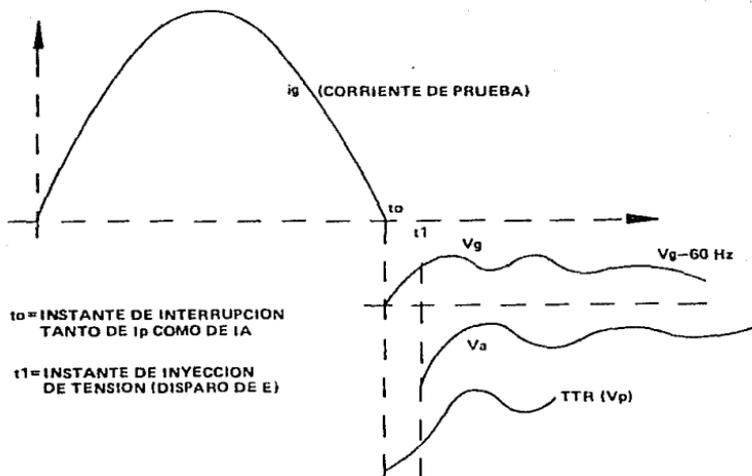
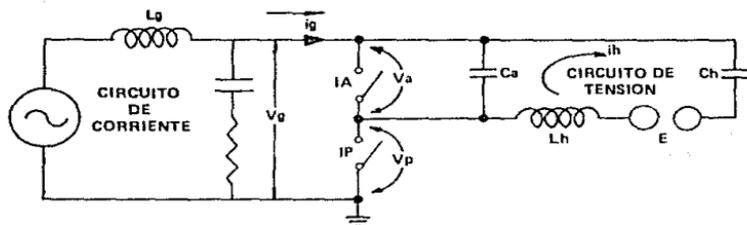


Figura 1.13 Método Sintético de Inyección de tensión Tipo Serie.

La capacitancia C_a , además garantiza la alimentación de la eventual corriente de postarco entre los contactos del interruptor en los primeros instantes posteriores al cero de interrupción «ref. 4».

La tensión inyectada depende de los valores de L_h , C_h y de la tensión de C.D. de precarga de ésta última. Como se ha dicho, la energía de C_h puede ser de bajo valor, en cambio L_h resulta de un valor mucho más alto que el del circuito de inyección de Corriente Tipo Paralelo, de todos modos, el circuito resulta menos costoso y no tiene límites en la realización de la TTR a baja frecuencia y valores de bajos de dv/dt , pero se duda de que este método cumpla con los requisitos de *equivalencia*, debido principalmente al hecho de que la interrupción de la corriente de prueba se realiza simultáneamente por los dos interruptores I_p e I_A ; por lo tanto, se dice que I_A le ayuda a I_p en la interrupción y es con toda seguridad un elemento perturbador en el intervalo de interacción.

De hecho, se afirma que este método no tiene en general gran validez «ref. 6» sino sólo puede aceptarse en ciertos tipos de prueba, esencialmente aquéllas que no someten al interruptor a esfuerzos térmicos importantes, sino sólo dieléctricos, es decir, pruebas de corrientes bajas con respecto a la capacidad interruptiva nominal del interruptor, por ejemplo, pruebas de oposición de fase o ciclos del 10%. Desde el punto de vista de la TTR y esfuerzos dieléctricos que ésta produce, el método no es objetable.

1.4.4 METODO DE INYECCION DE TENSION TIPO PARALELO.

En este método también se utiliza el principio de 'inyección de Tensión' esto es, el disparo del explosor E se produce hasta después que ha abierto el interruptor bajo prueba I_p .

El interruptor auxiliar IA, interrumpe al mismo tiempo que I_p puesto que ve la misma corriente i_g .

En el momento que interrumpe I_p (t_0), se genera la tensión de retorno V_g' en IA cargando a Ca. En el tiempo t_1 , se dispara el explosor E para descargar el banco Ch que sumado con la carga Ca proporciona la TTR en I_p .

Debido a que se aprovecha la Tensión de retorno V_g' , la energía de Ch necesaria es menor que en los métodos de inyección de corriente.

En este método no se usa en la práctica tal como se muestra; pero en esencia corresponde al método conocido como Skeats, el cual se realiza con una concepción de las instalaciones bastante diferente a los hasta ahora vistos.

El circuito correspondiente se ilustra en la Fig. 1.14.

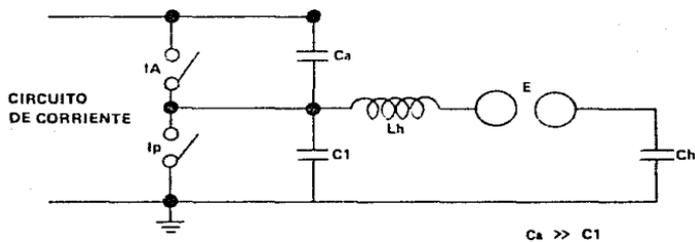


Figura 1.14 Método de Inyección de Tensión Tipo Paralelo.

15 CONDICIONES DE EQUIVALENCIA QUE DEBEN CUMPLIRSE PARA UNA PRUEBA SINTETICA.

La prueba sintética, debe cumplir de la manera más estricta con las siguientes condiciones para que sea válida. «ref. »»

1) Para probar un interruptor adecuadamente ya sea a través de ensayos directos o sintéticos, es necesario que los valores instantáneos tensión de arco sean lo más idénticos posible a los que aparecerían en el servicio normal. Para ello es suficiente que se cumplan las dos condiciones siguientes:

a) Que para la prueba sintética, la energía de arco sea la misma que para la prueba directa. La energía de arco liberada durante el tiempo de arqueo depende de la tensión de arco y de la corriente. Por ello, es necesario verificar que durante la ejecución de una prueba sintética las tensiones de arco combinadas de los interruptores auxiliar y de prueba no reduzcan la amplitud y duración del último semiciclo de arco.

b) Durante las prueba directas, la tensión de arco cambia significativamente cuando la corriente tiende a cero y causa una distorsión en la forma de onda de la corriente con relación a su forma original. Esta distorsión se manifiesta de hecho en un cambio en la di/dt de la corriente. Por lo tanto, la pendiente de la corriente debe ser similar para ambos tipos de prueba.

2) Es necesario que la Tensión Transitoria de Restablecimiento (TTR), del circuito sintético sea equivalente a la de la prueba directa.

3) Es preciso demostrar que los esfuerzos que producen tanto la tensión como la corriente de prueba sobre el interruptor son de efectos similares, dentro de cierta tolerancia, para los dos circuitos.

Para circuitos de prueba sintéticos que usan el esquema de inyección de corriente, su equivalencia se puede demostrar si se cumplen las siguientes condiciones:

- El valor de la frecuencia de inyección f_i , es tal que la transición del periodo de corriente de inyección ocurre antes del inicio del periodo de cambio significativo de la tensión de arco. Esta transición se logra satisfactoriamente, si el momento de la inyección de la corriente con relación al cero de corriente de prueba se escoge de manera tal que el interruptor auxiliar alcance a abrir antes de la ocurrencia del cambio significativo de la tensión de arco en el interruptor bajo prueba.

- También se requiere, que la relación de cambio de la corriente de inyección en el momento que tiende a cero sea la misma que la que tendría la corriente de cortocircuito en el circuito directo equivalente.

El valor de las componentes del circuito que controlan la TIR en el circuito sintético, deberán ser similares a las del circuito directo equivalente.

Cumplidas las condiciones anteriores, el comportamiento del interruptor en el periodo de corriente cero, será el mismo tanto en un circuito directo como en uno sintético. El éxito o fracaso del interruptor para interrumpir la corriente de falla, se definirá al observar los oscilogramas de la TIR y de la corriente a través del interruptor.

Una cuantificación de estas condiciones de equivalencia se establece de la siguiente manera:

- La inductancia de un circuito sintético (L), debe ser idéntica a la inductancia (Ld) del circuito directo equivalente. «a».

»)

$$L = L_d = \frac{KT V_n^2}{\omega_o P}$$

donde:

- KT - Factor de primer polo que abre.
- Vn - Tensión nominal del interruptor.
- ωo - Frecuencia nominal.
- P - Potencia trifásica de la prueba directa.

Esta condición asegura que la impedancia del circuito Weil, vista por el interruptor, es similar a la del circuito directo que reemplaza. Así, la distorsión de la corriente producida por la tensión de arco del interruptor durante la interrupción de la corriente, será similar a la de la prueba directa, y el fenómeno de interrupción será idéntico en ambos circuitos.

- debe existir identidad en la pendiente de la corriente de ambos circuitos en el cero de corriente, es decir:

$$i \omega_0 = i \omega_1 = \left. \frac{di}{dt} \right|_{i=0}$$

donde:

- i - Valor de cresta de la corriente de cortocircuito.
- i - Valor de cresta de la corriente de inyección.
- ω_1 - Frecuencia de la corriente de inyección.
- ω_0 - Frecuencia de la corriente de cortocircuito.

Además, como:

$$i \omega_0 = \frac{V_1}{L_d} \quad \vee \quad i \omega_1 = \frac{V_0}{L}$$

Se tiene entonces que la tensión de carga:

$$V_0 = V_1$$

donde:

$$V_1 = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} K I V_n$$

V_1 es el valor de cresta de la tensión de restablecimiento a la frecuencia del sistema.

Por esta razón, las condiciones de equivalencia determinan los valores de L y V_0 quedando entonces por determinar los valores de las variables Ch , $C1$ y $R1$, las cuales controlarán la forma de la IIR y serán definidas en el capítulo 5.

REFERENCIAS

- [1] "Power Circuit Breakers Theory and Design" Edited by C.H. Flurschein, B.A.
- [2] FRAUSTO R. SALVADOR. "Proyecto de un Laboratorio de Alta Potencia con Circuitos Sintéticos para Pruebas de Interruptores de Alta Tensión." IPN, Sección de Graduados e Investigación. ESIME, México 1980
- [3] IEC Publications 56. "High Voltage AC Circuit Breakers, Rating and Type Test and Routine Test", 1987.
- [4] IEC Report, Publication 427. "Report on Synthetic Testing of High-Voltage Alternating Current Circuit Breakers". 1973.
- [5] Caccia Dominioni, Malaguti, Rovelli, Villa, "Corso di aggiornamento per collaudatori di Macchine e apparecchiature elettriche". CESI, Documento K-349/3
- [6] J. PANEK, "Synthetic Methods for Testing of Vacuum Breakers" IEEE Transactions PAS-97, 132B-36.1978
- [7] D. Robles, M. García, "Determinación de la TTR y los valores de las componentes de un circuito Weill a dos parámetros para ensayos sintéticos de interruptores", Boletín IIE, Enero-Febrero 1990, Vol.14, Num. 1.

C A P I T U L O 2

DESCRIPCION DEL CIRCUITO SINTETICO DEL LABORATORIO DE SALAZAR.

2.1 INTRODUCCION.

La necesidad de contar con instalaciones de prueba de interruptores de potencia, tanto en forma directa como en forma sintética, originó el proyecto del IIE para construir en Salazar, Edo. de México, un Laboratorio de prueba sintética para equipos de interrupción de media tensión hasta 34.5 kV como máximo.

Como se vio en el Capítulo 1, existen varios métodos en la realización de pruebas sintéticas; en este trabajo se analizará el circuito de inyección de corriente tipo paralelo o circuito Weil, ya que es el circuito que nos permite demostrar, de una manera más clara, la equivalencia entre una prueba directa y la prueba sintética que lo sustituye y que es el que se utiliza en el IIE.

2.2 DIAGRAMA Y COMPONENTES DEL CIRCUITO SINTÉTICO.

En la siguiente figura se muestra el circuito sintético utilizado en el IIE en su forma simplificada.

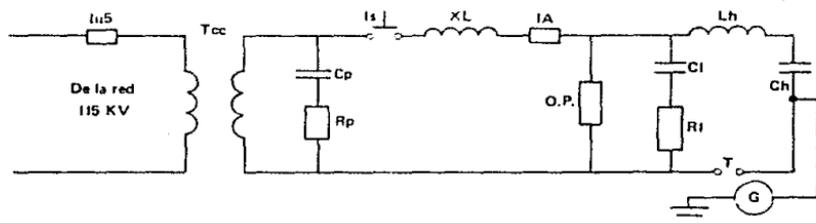


Fig. 2.1 Diagrama del circuito sintético.

En donde:

- Iu5 → Interruptor de respaldo 115 KV.
- Tcc → Transformador de cortocircuito.
- Is → Interruptor de sincronización.
- Cp Rp → Rama de control de la ITR del circuito de corriente.
- XL → Reactores limitadores de corriente.
- IA → interruptor auxiliar.
- O.P. → Objeto bajo prueba.
- Ci-Ri → Rama de control de la ITR del circuito de tensión.
- Lh → Reactores para el control de frecuencia de la corriente de inyección.
- Ch → Banco principal de capacitores.
- T → Trígatón
- G → Generador de corriente directa.

2.3 BREVE DESCRIPCION DE LAS PRINCIPALES COMPONENTES DEL CIRCUITO SINTETICO

TRANSFORMADOR DE CORTOCIRCUITO (Tcc).

Es un transformador trifásico, con potencia nominal de 15 MVA, el secundario está compuesto por dos embobinados por fase con todas las terminales al exterior, lo que hace posible realizar las conexiones delta estrella serie o paralelo; estas conexiones se realizan en forma manual y se realizarán directamente sobre las boquillas del transformador. La impedancia del mismo es del 7.8%.

El primario tiene cinco derivaciones de 2.5% a -7.5% lo que permite tener una gama amplia de tensiones necesarias para realizar pruebas directas, así como para alimentar equipos de diferentes tensiones.

Tiene además las siguientes características:

- Diseñado para soportar esfuerzos continuos de cortocircuito.
- Nivel máximo de cortocircuito de prueba 120 MVA, 3ϕ .
- Diseñado para soportar frecuentes maniobras de conexión y desconexión.
- Corriente máxima de cortocircuito en el secundario 20 kA a 3kV durante 0.5 seg.

INTERRUPTOR DE SINCRONIZACION (Is).

Es un interruptor de vacío tipo intemperie que, además de proteger al transformador de cualquier falla, se utiliza como interruptor de sincronización denominado Is; éste controla el inicio de la prueba con una precisión aceptable. Las características del interruptor son: Medio de interrupción vacío, corriente nominal 2000 A, 23 kV de tensión nominal, capacidad interruptiva 25 kA y corriente de cierre contra falla 63 kA.

REACTORES LIMITADORES DE CORRIENTE (XL).

Para limitar la corriente de prueba, se utiliza un banco de reactores conectados en serie con el objeto bajo prueba. El conjunto de reactores forma una serie geométrica que permite cubrir un amplio intervalo de valores de corriente con escalones iguales al reactor de menor valor; en este caso, los reactores van de 0.062 a 8 ohms para un intervalo de corriente de 1 a 20 kiloamperes.

INTERRUPTOR AUXILIAR (IA).

Su función es desconectar la fuente de corriente de la fuente de tensión. (Este interruptor tiene las mismas características que Is).

RAMA DE CONTROL DE LA TTR (C1-R1).

La función de esta rama, es controlar la forma de onda de la Tensión Transitoria de Restablecimiento. Está compuesta por un banco de capacitores y un banco de resistencias; ambos bancos se caracterizan por que debe evitarse en lo posible cualquier inductancia parásita.

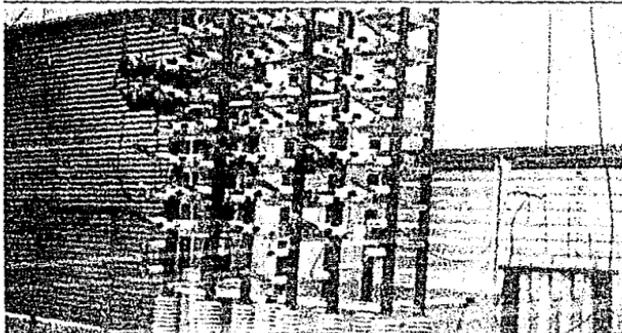
El banco de capacitores C1 está formado por 24 capacitores de $1\mu\text{Fd}$, 20 kV, CD, montados en 3 torres. Es posible conectar todos los capacitores en serie o paralelo por medio de cuchillas de accionamiento manual.

Podemos obtener un máximo y un mínimo de capacitancia de acuerdo a las siguientes conexiones: «x/ /»

Para la conexión serie $\frac{1\ \mu\text{F}}{24} = 0.041\ \mu\text{F}$

Para la conexión paralelo $1\ \mu\text{F} \times 24 = 24\ \mu\text{F}$

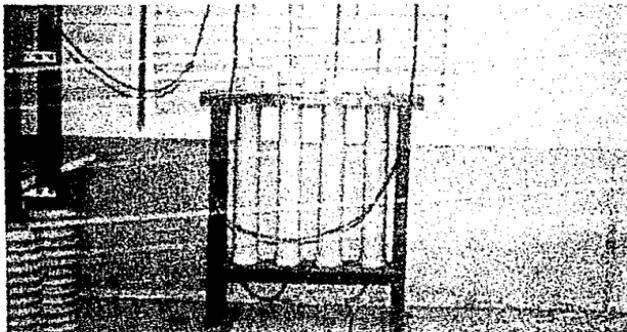
En la fotografía 2.1 se muestra la distribución real del banco C1 dentro del Laboratorio.



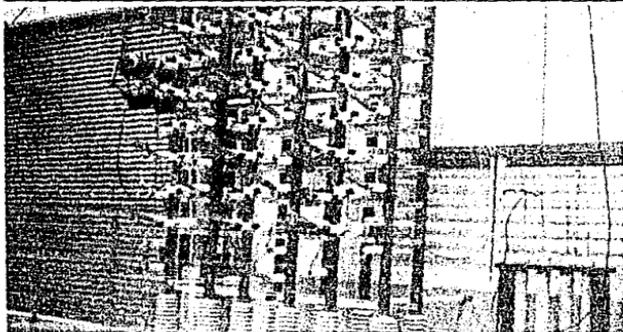
Fotografía 2.1 Distribución del banco C1 dentro del Laboratorio.

El banco de resistencias R1, lo constituyen 4 unidades de resistencias de agua de valor ajustable en cada unidad. El valor de la primera resistencia varía de 32.5 a 43.5 ohms; la segunda, de 51 a 95 ohms; la tercera, de 80 a 260 ohms; y finalmente, la cuarta de 248 a 1235 ohms.

En la fotografía 2.2, se muestra la distribución de estas resistencias dentro del Laboratorio.



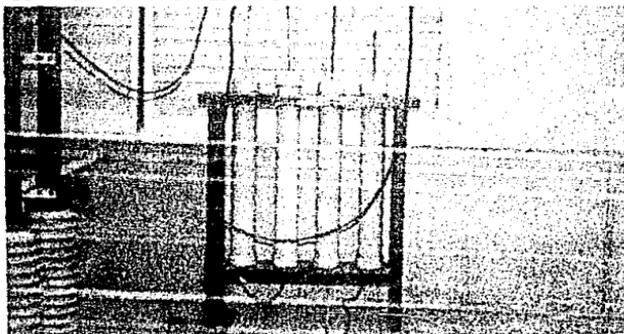
Fotografía 2.2 Distribución del banco R1 dentro del Laboratorio.



Fotografía 2.1 Distribución del banco C1 dentro del Laboratorio.

El banco de resistencias R1, lo constituyen 4 unidades de resistencias de agua de valor ajustable en cada unidad. El valor de la primera resistencia varía de 32.5 a 43.5 ohms; la segunda, de 51 a 95 ohms; la tercera, de 80 a 260 ohms; y finalmente, la cuarta de 248 a 1235 ohms.

En la fotografía 2.2, se muestra la distribución de estas resistencias dentro del Laboratorio.



Fotografía 2.2 Distribución del banco R1 dentro del Laboratorio.

BANCO PRINCIPAL DE CAPACITORES (Ch).

El banco de capacitores Ch está compuesto por 48 capacitores electrolíticos tipo descarga de 2 μF , 20 KV, CD. Estas unidades están montadas en una torre formada con fibra de vidrio y acero soportado sobre aisladores tipo concreto polimérico.

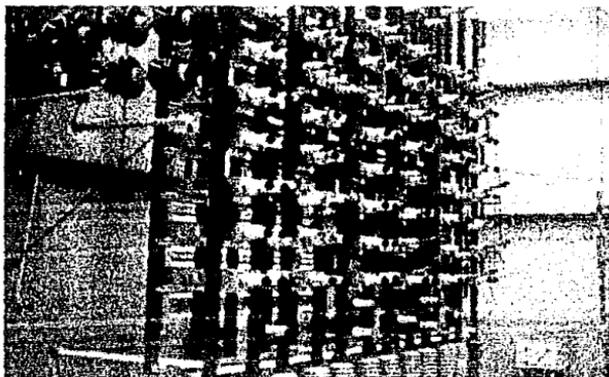
El banco se compone de tres grupos que pueden conectarse entre ellos, en serie o paralelo. Cada grupo forma una serie geométrica abarcando los valores de 1 a 30 μF , los valores se seleccionan conectando y desconectando cuchillas manualmente. Las cuchillas de descarga y de puesta a tierra son de operación neumática y a control remoto.

Podemos obtener un máximo y un mínimo de capacitancia de acuerdo a las siguientes conexiones. (Ver. 1)

Para la conexión serie $\frac{2 \mu\text{F}}{48} = 0.041 \mu\text{F}$

Para la conexión paralelo $2 \times 48 = 96 \mu\text{F}$

En la fotografía 2.3, se muestra la distribución de este banco dentro del Laboratorio.

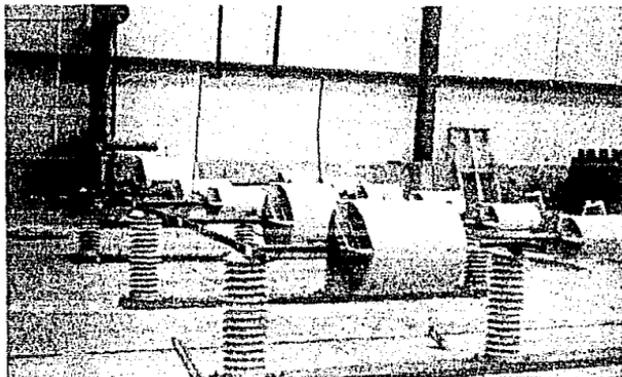


Fotografía 2.3 distribución del banco Ch dentro del Laboratorio.

BANCO PRINCIPAL DE INDUCTANCIAS (LH).

Este banco junto con el banco principal de capacitores Ch, controlan la frecuencia y la magnitud de la corriente de inyección. El banco está integrado por 11 reactores, formando una serie geométrica que cubre valores desde 0.0125 hasta 16 mH. Su distribución dentro del Laboratorio es la mostrada en la Fotografía 2.4.

Estas inductancias sólo pueden ser conectadas en serie como se puede apreciar en la fotografía 2.4; por lo que se tiene un valor mínimo de 0.0126 mH y un valor máximo de 31.9375 mH. «Ref. 1»



Fotografía 2.4 Distribución del banco Lh dentro del Laboratorio.

TRIGATRON

El trigatrón es un sistema formado por dos electrodos principales y una punta de disparo. Los electrodos principales son esferas de un tamaño adecuado a la tensión que se maneja en la fuente. Uno de los electrodos presenta una pequeña cavidad, dentro de la que se encuentra la punta de disparo, separada del electrodo principal por un espacio anular de un milímetro.

El encendido del trigatrón se efectúa al aplicar un pulso de alta tensión entre la punta de disparo y el electrodo principal que lo contiene (ver Fig. 2.2).

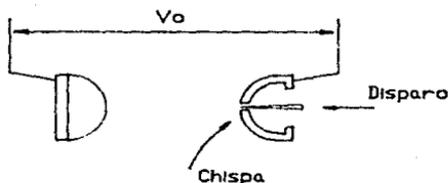


Figura 2.2 Encendido del Trigatrón.

Lo anterior produce, entre la punta y el electrodo, una descarga que ioniza y distorsiona el campo eléctrico existente entre los electrodos principales, originando la ruptura de la tensión aplicada entre ellos.

GENERADOR DE CORRIENTE DIRECTA (G).

El generador se emplea para cargar a un valor de tensión directa positiva o negativa al banco de capacitores Ch, determinada por la condición de prueba.

Los datos de placa son los siguientes:

Tensión de carga nominal ---- ± 80 kV CD.

Tensión de carga máxima ---- ± 100 kV CD.

Energía máxima de la carga capacitiva ---- 8 kJoules.

2.4 SECUENCIA DE OPERACION DEL CIRCUITO SINTETICO DEL IIE

En la Fig. 2.3, se muestra el diagrama eléctrico completo del Laboratorio de Salazar para pruebas sintéticas. «Ref. 2»

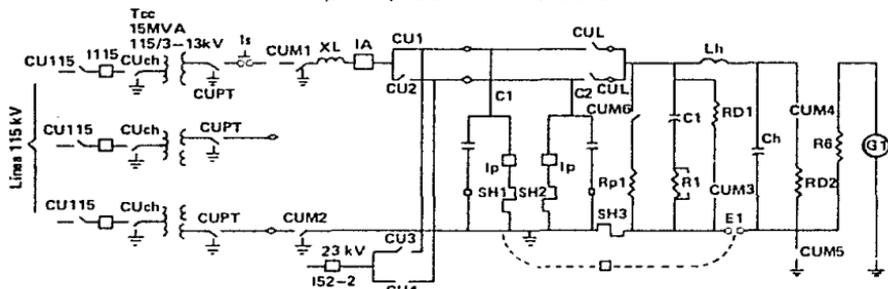


Figura 2.3 Diagrama eléctrico completo del Laboratorio de Salazar.

La secuencia nominal de eventos en la prueba sintética a equipos de interrupción, se muestra en el diagrama de bloques de la Fig. 2.4

a) Inicio de la prueba. En este momento el estado de los equipos

es :

- CU115, I115, CUCh y CUPT : cerrados
- I5 : abierto
- CUM1,2 : abiertas.
- IA : abierto
- CU1,2 : cerrada sólo una de las dos
- CU3,4 : abiertas

- CUM6 : abierta
- CUM3,4 y CUM5 : cerradas
- C1 y Ch : descargados
- G1 desconectado

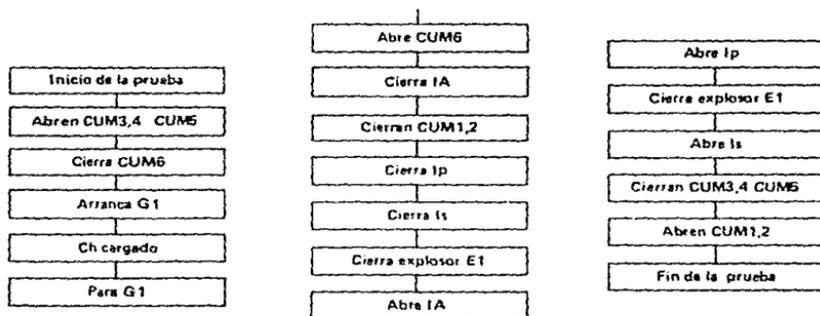


Figura 2.4 Secuencia normal de eventos en la prueba de un interruptor.

- b) Abrir cuchillas CUM3,4 y CUM5 para desconectar resistencias de descarga RD1 y RD2 y para desconectar de tierra el circuito de carga del banco Ch.
- c) Cerrar cuchilla CUM6 para conectar el lado negativo del G1 al banco de capacitores Ch, a través de la resistencia Rpr.
- d) Conectar el generador G1 y carga del banco de capacitores Ch.
- e) Desconectar el generador G1.

-
- f) Abrir la cuchilla CUM₁ para preparar la descarga del banco de capacitores Ch sobre el interruptor bajo prueba, a través del explosor E1.
 - g) Cierre del interruptor IA.
 - h) Cierre de las cuchillas CUM_{1,2}, con lo cual el interruptor bajo prueba queda listo para conectarse al circuito de corriente, faltando únicamente el interruptor Is.
 - i) Cierre del interruptor bajo prueba Ip.
 - j) Cierre del interruptor Is, con lo cual se inicia el flujo de corriente de cortocircuito a través del interruptor bajo prueba.
 - k) Cierre del explosor E1, mediante una orden de un circuito de control que detecta la corriente que pasa a través del 'Shunt' SH1 o SH2.
 - l) Abre el interruptor IA, aislando el circuito de corriente.
 - m) Abre el interruptor Ip, generándose la tensión transitoria de Restablecimiento (FIR).
 - n) Abre el explosor E1, mediante una orden del circuito de control.
 - o) Abre el interruptor Is para desconectar el circuito de corriente de la red de 115 kilovolts.
 - p) Cierran las cuchillas CUM_{3,4} y CUM₅, descargando la carga remanente de los capacitores Ch y C1 y conectando a tierra el circuito de tensión.
 - q) Abren las cuchillas CUM_{1,2} aislando y poniendo a tierra el circuito de corriente.
 - r) Fin de la prueba.

De esta secuencia los pasos 1 al 6 son ejecutados por un microprocesador, denominado Controlador Programable de Secuencias (CPS), que admite el programa en forma digital y envía las órdenes a los equipos en el momento preciso, a través de relevadores de mercurio.

2.5 CAPACIDAD DE PRUEBA DEL LABORATORIO DE SALAZAR.

El Laboratorio fue dimensionado para probar equipos de interrupción a nivel distribución, y es posible probar interruptores a los siguientes valores de potencia equivalente: «Ref. 3,4»

Tensión (kV)	Corriente (kA)	Potencia de cortocircuito (MVA)
13.8	20	500
23	20	800
34.5	20	1200

Cabe mencionar que estos valores son para interruptores en SF₆ y vacío ya que la tensión de arco es pequeña y esto nos da una ganancia para la prueba sintética del orden de 12.

También, es posible realizar pruebas a equipos de pequeña ganancia para la prueba sintética (6 como máximo) como interruptores de gran volumen de aceite, de soplo magnético, restauradores, etc., en este caso la posibilidad de prueba será de: «Ref. 5»

Tensión (kV)	Corriente (kA)	Potencia de cortocircuito (MVA)
13.8	12.5	300
23	12.5	500
34.5	12.5	750

REFERENCIAS

- [1] D. Robles , M García, ' Definición de los valores de las componentes del circuito sintético para cumplir con las recomendaciones IEC-56. 'Estudio Interno IIE, 30/32/6675/89/EIN/01, Febrero 1989.
- [2] J. Carrillo, 'Descripción del sintético en media tensión' Estudio Interno IIE, 3772-04-12-I-B, Agosto 1983.
- [3] R. Covarrubias, 'Investigación y desarrollo objetivos del Laboratorio del IIE en Salazar', Boletín IIE, Mayo/Junio 1987, pp 87-92.
- [4] R. Ochoa, 'Construcción del Laboratorio de pruebas de cortocircuito por el método sintético del IIE en Salazar. 'IEEE MEXICON 86, Vol. 86MEX115, Octubre 1986, pp 1-5.
- [5] D. García, R. Covarrubias, R. Ochoa, 'Pruebas realizadas en el Laboratorio de Pruebas a Equipos Eléctricos de Salazar.' IEEE I-RVP-88-AP-01, Julio 1988, pp 1-6.

CAPITULO 3.

ANALISIS MATEMATICO DEL

CIRCUITO Y OBTENCION

DE LA TTR.

3.1 INTRODUCCION.

TIPO DE CIRCUITO A CONSIDERAR.

Consideraremos el circuito de inyección de corriente tipo paralelo o Weil, mostrado en la Fig. 2.1 del Capítulo 2.

Se estudiará solamente el comportamiento del Circuito de Tensión ya que éste es el que proporciona la Tensión Transitoria de Restablecimiento (TTR).

3.2 PLANTEAMIENTO DE LAS ECUACIONES.

El problema a analizar en un circuito de este tipo, consiste en calcular principalmente: «ref. 1»

- La corriente inyectada, en función de los parámetros del circuito, cuando el interruptor está cerrado.
- La Tensión Transitoria de Restablecimiento V_{TTR} , que aparece a partir del instante de interrupción.

Por lo tanto, tomaremos solamente el circuito de tensión el cual aparece en la Fig. 3.1.

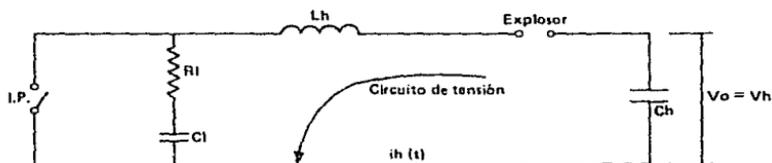


Fig. 3.1 Circuito de tensión.

Aplicando leyes de voltajes de Kirchoff para este circuito: «ref. 2»

$$V_{Ch} + V_{Lh} + V_{R1} + V_{C1} = 0 \quad (3.0)$$

Como es un circuito serie, $i_h(t)$ es la misma para todos los elementos.

esto es

$$i_{R1} = i_{Lh} = i_{C1} = i_{Ch}$$

donde i_{C1} está definida como

$$i_{C1} = C1 \frac{d}{dt} V_{C1}(t)$$

e i_{Ch} está definida también como

$$i_{Ch} = Ch \frac{d}{dt} V_{Ch}(t)$$

Por lo tanto $C1 \frac{d}{dt} V_{C1}(t) = Ch \frac{d}{dt} V_{Ch}(t)$

Integrando ambos miembros de la ecuación:

$$C1 \int \frac{d}{dt} V_{C1} dt = Ch \int \frac{d}{dt} V_{Ch} dt$$

Resolviendo la integral tenemos:

$$C1 V_{C1}(t) + C1 V_{0C1} = Ch V_{Ch}(t) + Ch V_{0Ch}$$

Para $t = 0$ tenemos que; $V_{0C1} = 0$ y $V_{Ch} = V_{0Ch} = V_0$

donde: V_{0Ch} representa las condiciones iniciales de carga de voltaje en el capacitor Ch .

sustituyendo V_o en $C1$ tenemos:

$$C1 V_{C1}(t) = Ch V_{Ch}(t) - Ch V_o$$

el signo es negativo, porque indica la descarga del capacitor Ch

despejando el voltaje en el capacitor $C1$

$$V_{C1}(t) = \frac{Ch}{C1} [V_{Ch}(t) - V_o] \quad (3.1)$$

el voltaje en $R1$ será:

$$V_{R1} = R1 i_h(t)$$

donde: $i_h(t) = i_{Ch}(t)$

sustituyendo $i_h(t)$

$$V_{R1}(t) = R1 Ch \frac{d}{dt} V_{Ch}(t) \quad (3.2)$$

Además

$$V_{Lh} = Lh \frac{d}{dt} i_h(t) \quad \text{pero } i_h(t) = i_{Ch}(t) = Ch \frac{d}{dt} V_{Ch}(t)$$

Por lo tanto

$$V_{Lh} = L_h C_h \frac{d^2}{dt^2} V_{Ch}(t) \quad (3.3)$$

Sustituyendo (3.1), (3.2) y (3.3) en (3.0) obtenemos una ecuación diferencial de 2^o orden, la cual al ser resuelta, nos describirá la respuesta en el tiempo del transitorio de voltaje.

$$\frac{d^2}{dt^2} V_{Ch}(t) + \frac{R_1}{L_h} \frac{d}{dt} V_{Ch}(t) + V_{Ch}(t) \left[\frac{1}{L_h C_1} + \frac{1}{L_h C_h} \right] = \frac{V_0}{L_h C_1}$$

ecuación .. (3.4)

3.3 SOLUCION DE LAS ECUACIONES PARA OBTENER LA TTR.

Una vez obtenida la ecuación diferencial de 2^o orden no homogénea procedamos a resolverla. Para lo cual, utilizaremos el método de transformada de Laplace de la siguiente manera: (Aol. 2.3)

$$s^2 V_{Ch}(s) - sV_{Ch}(0) + \frac{R_1}{Lh} (sV_{Ch}(s) - V_{Ch}(0)) + Wn^2 V_{Ch}(s) = \frac{V_0}{sC_1Lh}$$

$$\text{donde } Wn^2 = \frac{1}{C_1 Lh} + \frac{1}{C_2 Lh} \quad \text{y} \quad 2\alpha = \frac{R_1}{Lh}$$

$$\text{para } t = 0 \quad V_{Ch}(0) = V_0 = V_{Ch}$$

reacomodando y sustituyendo 2α y Wn^2 tenemos que:

$$\frac{V_{Ch}(s)}{V_0} = \frac{\left(\frac{1}{s C_1 Lh} + s + 2\alpha \right)}{(s^2 + 2\alpha s + Wn^2)}$$

desarrollando el denominador.

$$s^2 + 2\alpha s + Wn^2 = (s + \alpha)^2 + Wn^2 - \alpha^2$$

Reacomodando términos para poder aplicar la transformada inversa de Laplace.

$$\frac{V_{Ch}(s)}{V_0} = \frac{\left[\frac{1}{s C_1 L_h} \right]}{(s^2 + 2\alpha s + \omega_n^2)} + \frac{s + \alpha}{(s^2 + 2\alpha s + \omega_n^2)} + \frac{\alpha}{(s^2 + 2\alpha s + \omega_n^2)}$$

ecuación (3.5)
ecuación (3.6)
ecuación (3.7)

tomando la ecuación 3.6 y aplicando transformada inversa de Laplace

$$\frac{s + \alpha}{(s + \alpha)^2 + (\omega_n^2 - \alpha^2)} = e^{-\alpha t} \cos \sqrt{\omega_n^2 - \alpha^2} t$$

donde por definición $W = \sqrt{\omega_n^2 - \alpha^2}$

por lo tanto $\frac{s + \alpha}{(s + \alpha)^2 + (\omega_n^2 - \alpha^2)} = e^{-\alpha t} \cos Wt$

de la ecuación 3.7 aplicando la transformada inversa de Laplace se obtiene:

$$\frac{\alpha}{(s + \alpha)^2 + (\omega_n^2 - \alpha^2)} = \frac{\alpha e^{-\alpha t} \operatorname{sen} \sqrt{\omega_n^2 - \alpha^2} t}{\sqrt{\omega_n^2 - \alpha^2}}$$

Para resolver la ecuación 3.5 utilizamos fracciones parciales de la siguiente manera:

$$\frac{1}{(s - C) Lh (s^2 + 2\alpha s + Wn^2)} = \frac{A}{s} + \frac{Bs + E}{s^2 + 2\alpha s + Wn^2}$$

donde: $A = \frac{1}{C Lh Wn^2}$; $B = \frac{-1}{C Lh Wn^2}$; $E = \frac{-2\alpha}{C Lh Wn^2}$

Por lo tanto:

$$\frac{1}{(s - C) Lh (s^2 + 2\alpha s + Wn^2)} = \frac{1}{C Lh Wn^2} \left[\frac{-1}{C Lh Wn^2} s + \frac{-2\alpha}{C Lh Wn^2} \right] \frac{1}{s^2 + 2\alpha s + Wn^2}$$

Aplicando transformada inversa de Laplace:

$$\frac{1}{(s - C) Lh (s^2 + 2\alpha s + Wn^2)} = \frac{1}{C Lh Wn^2} \left[\frac{1}{C Lh Wn^2} e^{-\alpha t} \cos Wt \right] - \left[\frac{1}{C Lh Wn^2} e^{-\alpha t} \frac{\sin Wt}{W} \right]$$

Sumando los resultados parciales de aplicar la transformada inversa de Laplace a las ecuaciones 3.5, 3.6 y 3.7 obtenemos:

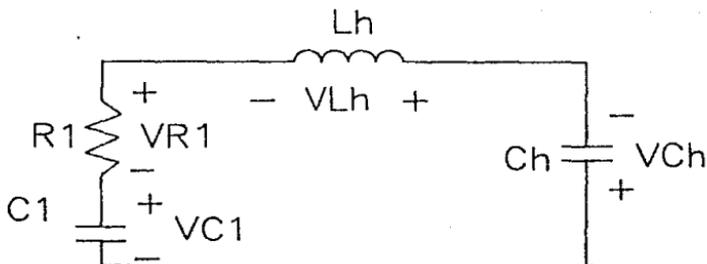
$$\frac{V_{Ch}(t)}{V_0} = \frac{1}{C_1 L_h \omega_n^2} \left[1 - e^{-\alpha t} \cos \omega t - \frac{\alpha}{\omega} e^{-\alpha t} \sin \omega t \right] + e^{-\alpha t} \cos \omega t + \frac{\alpha}{\omega} e^{-\alpha t} \sin \omega t$$

Sustituyendo a la constante $D = \frac{1}{C_1 L_h \omega_n^2}$, para simplificar la ecuación anterior

$$V_{Ch}(t) = V_0 \left[D + \left(e^{-\alpha t} (1-D) \right) \left(\cos \omega t + \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t \right) \right] \quad (3.8)$$

Donde en la ecuación 3.8 tenemos el voltaje en el capacitor Ch.

Recordando el circuito de tensión.



El voltaje en la rama $C1 R1$, que es la tensión transitoria de Restablecimiento, está dado por la suma de $V_{Lh} + V_{Ch}$.

El voltaje en la inductancia Lh está dado por la ecuación 3.3.

Pero antes calcularemos la corriente del circuito. La cual está dada por la siguiente ecuación:

$$i_{R1} = Ch \frac{d}{dt} V_{Ch}(t)$$

Sustituyendo a $V_{Ch}(t)$ tenemos:

$$i_{Ch}(t) = \frac{d}{dt} Ch V_o D + \frac{d}{dt} Ch V_o (1 + D) e^{-at} \left(\cos Wt + \frac{\alpha}{W} \sin Wt \right)$$

Resolviendo la derivada:

$$i_{Ch}(t) = Ch V_o (1-D) \left[(e^{-at} \sin Wt) \left(\frac{-Wn^2}{W} \right) \right]$$

sustituyendo D tenemos:

$$i_{Ch}(t) = Ch V_o \left[1 - \frac{1}{C1 Lh Wn^2} \right] \left(\frac{-Wn^2}{W} \right) (e^{-at} \sin Wt)$$

69

BIBLIOTECA DE LA UNIVERSIDAD DE LOS ANGELES

sustituyendo ωn^2 :

$$i_{Ch}(t) = - \frac{V_o}{\omega L_h} e^{-at} \text{sen } \omega t \quad (3.9)$$

Que es la corriente que circula por todo el circuito de tensión.

Ahora calculando el voltaje en la inductancia L_h .

$$V_{L_h}(t) = L_h \frac{d}{dt} i_{L_h}$$

sustituyendo valores:

$$V_{L_h}(t) = \frac{-L_h V_o}{\omega L_h} \frac{d}{dt} e^{-at} \text{sen } \omega t$$

Realizando la derivada tenemos el voltaje en la inductancia L_h

$$V_{L_h}(t) = -V_o e^{-at} \left(\cos \omega t - \frac{a}{\omega} \text{sen } \omega t \right) \quad (3.10)$$

Para obtener la tensión transitoria de restablecimiento sumamos las ecuaciones 3.8 y 3.10.

$$V_{TTR} = V_0 \left[\frac{\alpha}{\omega} e^{-\alpha t} \operatorname{sen} \omega t \left(\frac{C_h + 2C_l}{C_h + C_l} \right) - \frac{C_l}{C_h + C_l} e^{-\alpha t} \cos \omega t + \frac{C_h}{C_h + C_l} \right]$$

ecuación. (3.11)

donde:

$$\alpha = \frac{R_l}{2L_h}$$

$$\omega^2 = \omega_n^2 - \alpha^2$$

$$\omega_n^2 = \frac{1}{C_l L_h} + \frac{1}{C_h L_h}$$

REFERENCIAS

- [1] S. Frausto, 'Proyecto de un Laboratorio de Alta Potencia con Circuitos Sintéticos para Pruebas de Interruptores de Alta Tensión', Tesis IPN, Sección de Graduados ESIME, Julio 1980 México.
- [2] V. Gerez, 'Circuitos y Sistemas Electromecánicos' Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A. México.
- [3] V. Gerez, 'Teoría de Sistemas y Circuitos' Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A. México.

C A P I T U L O 4

REQUERIMIENTOS DE LAS NORMAS INTERNACIONALES

QUE DEBE SATISFACER LA TTR

4.1 INTRODUCCION.

En la operación de un laboratorio de pruebas de cortocircuito como el de Salazar, es necesario, entre otras muchas cosas, observar la normalización de todas la pruebas que en el se efectúen.

En este trabajo se analizan las normas que actualmente existen para las pruebas de cortocircuito. Estas son la *International Electrotechnical Commission* en su publicación 56 (IEC-56) y la *American National Standards Institute* es sus publicaciones C37.04, C37.09, C37.011.

Las pruebas de capacidad interruptiva a las cuales pueden ser sometidos los interruptores de media y alta tensión, son entre otras las siguientes: «ref. 1»

- Pruebas de interrupción de falla en terminales.
- Pruebas de interrupción de falla en línea corta.
- Pruebas de interrupción de falla en oposición de fase.
- Pruebas de interrupción de corrientes de carga de líneas
- en vacío.
- Pruebas de interrupción de pequeñas corrientes inductivas.

Las operaciones de apertura y cierre del interruptor en condiciones de cortocircuito entre terminales, son los que lo someten a los mayores esfuerzos térmicos y mecánicos. «ref. 2»

En el laboratorio de Salazar, se realizan únicamente pruebas de cortocircuito para falla en terminales. Es por ello que en este trabajo, se analizan solamente las normas en su definición para este tipo de fallas.

4.2 DEFINICION DE IEC-56 PARA LA TTR.

4.2.1 TTR NOMINAL PARA FALLA EN TERMINALES.

La tensión Transitoria de Restablecimiento (TTR) que se produce durante la apertura del interruptor con su corriente interruptiva nominal y el voltaje de referencia (el cual constituye el límite de la misma) en condiciones de falla en terminales es la TTR nominal del mismo.

4.2.2 REPRESENTACION NORMALIZADA DE LA TTR.

La forma de onda de la TTR es muy variable, ya que depende de los parámetros RLC del circuito en que opere el interruptor, es decir, de las características particulares de éste.

En algunos casos, particularmente en sistemas de más de 100 kV y con corrientes de cortocircuito relativamente altas, la forma de onda de la TTR que resulta de la interrupción de la corriente de cortocircuito contiene una parte de alto valor de la relación de crecimiento (dv/dt), seguida por una segunda parte con un valor más bajo de esta relación.

De acuerdo a la norma IEC-56, este tipo de onda queda bien representado mediante una envolvente formada por 3 segmentos de línea definidos por "4 parámetros", dos de tensión U_1 y U_2 y dos de tiempo, t_1 y t_2 como se representa en la Fig. 4.1.

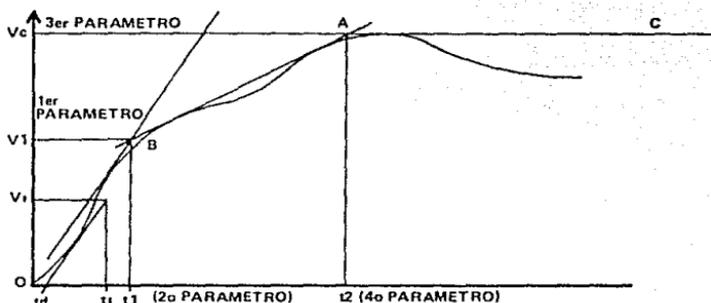


Fig. 4.1 Representación de la TTR a 4 parámetros.

En sistemas de menos de 100 kV, con cualquier valor de corriente de falla y en sistemas de más de 100 kV pero con corrientes relativamente ligeras en relación a la máxima corriente de cortocircuito, se ha encontrado que la forma de onda de la TTR se aproxima a una oscilación de frecuencia simple y amortiguada, la cual de acuerdo a la misma norma IEC-56, se describe adecuadamente por una envolvente constituida por dos segmentos de línea definidos por medio de "2 parámetros", una tensión V_c y un tiempo t_3 como se representa en la Fig. 4.2.

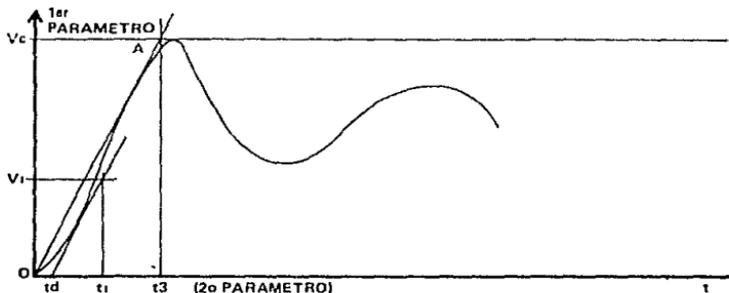


Fig. 4.2 Representación de la TTR a 2 Parámetros.

4.2.3 REPRESENTACION DE LA TTR NOMINAL.

Los siguientes parámetros son utilizados para representar a la TTR nominal.

a) Línea de referencia "4 Parámetros" ver Fig. 4.1.

U_1 --> Primer voltaje de referencia, en kV.

t_1 --> Tiempo en alcanzar U_1 , en μ Seg.

U_2 --> Segundo voltaje de referencia (valor pico de la TTR), en kV.

t_2 --> Tiempo en alcanzar U_2 , en μ Seg.

b) Línea de referencia "2 Parámetros", ver Fig. 4.2.

U_c --> Voltaje de referencia (valor pico de la TTR), en kV.

t_a --> Tiempo en alcanzar U_c , en μ Seg.

c) Línea de retardo de la TTR para 2 y 4 parámetros ver Fig.4.1 y 4.2.

t_d --> Tiempo de retardo en μ Seg.

U' --> Voltaje de referencia en kV.

t' --> Tiempo en alcanzar U' , en μ Seg.

La línea de retardo empieza en el eje del tiempo, en el punto de tiempo de retardo nominal y se desplaza paralela a la primera sección de la línea de referencia de la TTR nominal y termina en el cruce con el voltaje de referencia U' .

La introducción del tiempo de retardo en la norma, se debe a que existe una influencia de la capacitancia local del lado de la fuente del interruptor en los primeros microsegundos de la TIR, además de que es necesario limitar su valor a un máximo valor dado por las normas.

Dada la capacidad del Laboratorio de Salazar (ver Capítulo 2), sólo se podrán realizar pruebas sintéticas hasta 34.5 kV por lo que siempre se usará la línea de referencia a "2 Parametros".

La prueba de falla en terminales, debe incluir los siguientes ciclos de prueba de acuerdo a IEC 56.

Ciclo No.1 : Al 10% de la corriente interruptiva nominal simétrica.

Ciclo No.2 : Al 30% de la corriente interruptiva nominal simétrica.

Ciclo No.3 : Al 60% de la corriente interruptiva nominal simétrica.

Ciclo No.4 : Al 100% de la corriente interruptiva nominal simétrica.

Ciclo No.5 : Al 100% de la corriente interruptiva nominal asimétrica (con máxima asimetría)

4.3 DEFINICION DE ANSI/C37 PARA LA TTR.

El criterio para la especificación de la TTR, relacionada para el caso particular de interruptores de media y alta tensión que la *American National Standards Institute* (ANSI) considera se expresan en la normas C37.04, C37.09, C37.011 de la siguiente manera.

La norma ANSI, define para tensiones nominales de hasta 72.5 kV una forma de onda limitada por el ajuste de una curva cosenoidal $(1-\cos \omega t)$, como se muestra en la Fig. 4.3-*a* y 4.3-*b*.

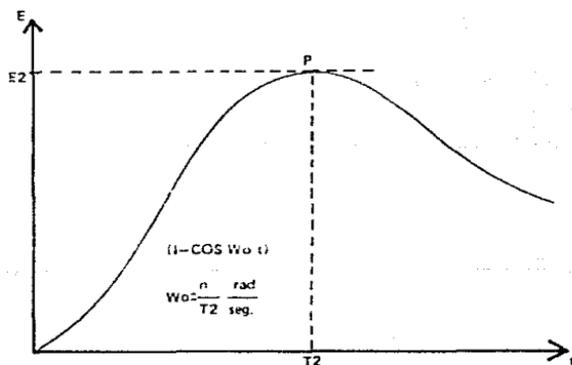


Fig. 4.3 Forma de onda de la TTR en función de una curva cosenoidal.

Para tensiones mayores a 72.5 kV, se considerara ajustada la envolvente de una exponencial-cosenoidal como la de la Fig. 4.4. La prueba de la falla en terminales, debe incluir los siguientes ciclos de operación de acuerdo a la norma ANSI/C37.06.

Ciclo No. 1 : Al 7% de la corriente interruptiva nominal simétrica.

Ciclo No. 2 : Al 30% de la corriente interruptiva nominal simétrica.

Ciclo No. 3 : Al 60% de la corriente interruptiva nominal simétrica.

Ciclo No. 4 : Al 100% de la corriente interruptiva nominal simétrica.

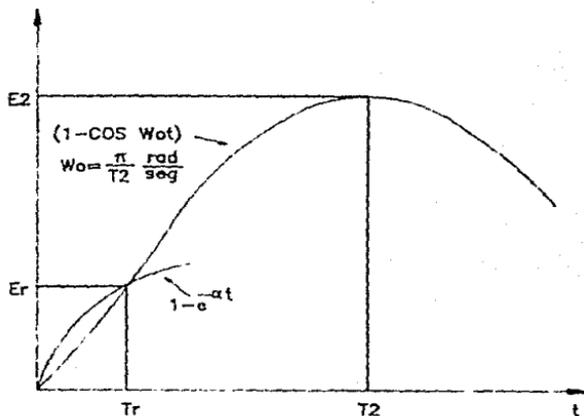


Fig. 4.4 Forma de onda de la TTR en función de las curvas exponencial-cosenoidal.

REFERENCIAS

- [1] IEC Publications 56-2and4, "High-Voltage AC Circuit Breakers ; Rating and Type Test and Routine Test". (1971 and 1972)
- [2] "Power Circuit Breakers Theory and Design" Edited by C.H. Flurscheim, B.A.
- [3] IEC Publication 56, "High Voltage Alternating-Current Circuit Breakers ; Rating and Type Test and Routine Test". (1987)
- [4] ANSI/C37.04, "IEEE Standard Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis".
- [5] ANSI/C37.09, "IEEE Standar Test Procedure for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis".
- [6] ANSI/C37.011 , "An American National Standar IEEE Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis".

CAPITULO 5.

PROGRAMAS DE COMPUTADORA PARA EL CALCULO

DE LA TTR Y DE LOS PARAMETROS DE PRUEBA.

5.1 INTRODUCCION.

La necesidad de preparar una prueba, definir los valores de los parámetros y calibrarla antes de efectuarla, surgida del hecho de que se tiene que preparar el circuito de tensión y el circuito de corriente, nos crea la necesidad de desarrollar programas de computadora para tal efecto.

Uno de ellos, llamado CALCIR produce la gráfica de la tensión transitoria de Restablecimiento, que se obtendrá como resultado de una prueba sintética dada, utilizando para esto la ecuación 3.11 obtenida en el Capitulo 3.

Un programa llamado CALCOMP, calcula los valores que deberán fijarse en los bancos Ch, Lh, C1 y R1 del circuito sintético para obtener la TTR esperada.

Esto se calcula a partir de ciertos valores de las constantes D, K y F las cuales se definen a continuación.

5.2 DEFINICION DE LOS PARAMETROS D, K Y P EN EL MODELO MATEMATICO DE LA TTR Y SU INFLUENCIA EN ESTE.

De acuerdo a la Referencia 1, del Capítulo 1, en la cual se sustituyen los valores de las variables físicas Ch, Lh, C1 y R1 por las variables adimensionales, D, K y P las cuales representan de una manera más fácil de analizar las características específicas que se desean obtener durante la prueba sintética, por lo cual se procederá a validarlas a partir de la ecuación 3.11.

Estos parámetros se definen respecto a las variables del circuito, de la siguiente manera:

$$D = \frac{Ch}{C1} \quad (5.1)$$

$$K = \frac{R}{\sqrt{\frac{L(Ch + C1)}{C1Ch}}} \quad (5.2)$$

$$P = \frac{2ts}{T_L} = \frac{tsW_c}{\pi} \quad (5.3)$$

Sustituyendo las variables anteriores en la ecuación 3.11, se obtiene la siguiente ecuación:

$$V(t) = V_0 \left[\frac{D}{1+D} \right] \left[1 + \frac{e^{\left\{ -\frac{K}{2} \left(\frac{Pn}{ts} \right) \sqrt{1+D} \right\} (t)}}{\text{sen } \theta} \right. \\
 \left. \text{sen} \left\{ \left[\left(\frac{Pn}{ts} \right) \sqrt{1+D} \right] \sqrt{1 - \left(\frac{K}{2} \right)^2} t - \theta \right\} \right] \quad (5.4)$$

donde:

$$\theta = \text{sen}^{-1} \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \frac{\left(\frac{K}{2} \right)^2}{1 - \left(\frac{K}{2} \right)^2} \left(\frac{2+D}{D} \right)^2 \right]}} \quad (5.5)$$

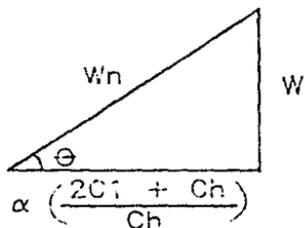
Para validar las ecuaciones 5.4 y 5.5 se procede a calcularlas a partir de la ecuación 3.11 esto es:

$$V_{TTR} = V_0 \left[\frac{\alpha}{W} e^{-\alpha t} \text{sen } Wt \left(\frac{Ch+2C1}{Ch+C1} \right) - \frac{C1}{Ch+C1} e^{-\alpha t} \cos Wt + \frac{Ch}{Ch+C1} \right]$$

Para encontrar la ecuación 5.5 factorizamos $\frac{C1}{Ch + C1} e^{-\alpha t}$

$$\frac{v_{TTR}}{v_o} = \frac{Ch}{Ch + C1} + \frac{C1}{Ch + C1} e^{-\alpha t} \left[\frac{\alpha}{\omega} \operatorname{sen} \omega t \left(\frac{Ch + 2C1}{C1} \right) - \cos \omega t \right]$$

Analizando el siguiente triángulo de frecuencias:



donde: $\cot \theta = \frac{\alpha}{\omega} \left(\frac{Ch + 2C1}{C1} \right)$ y $\cot \theta = \frac{\cos \theta}{\operatorname{sen} \theta}$

Sustituyendo:

$$\frac{v_{TTR}}{v_o} = \frac{Ch}{Ch + C1} + \frac{C1}{Ch + C1} e^{-\alpha t} \left[\frac{\cos \theta}{\operatorname{sen} \theta} \operatorname{sen} \omega t - \cos \omega t \right] \frac{\operatorname{sen} \theta}{\operatorname{sen} \theta}$$

$$\frac{v_{TTR}}{v_o} = \frac{Ch}{Ch + C1} + \frac{C1}{Ch + C1} e^{-\alpha t} \left[\frac{\cos \theta \operatorname{sen} \omega t - \cos \omega t \operatorname{sen} \theta}{\operatorname{sen} \theta} \right]$$

El numerador del paréntesis cuadrado puede escribirse como el seno de una diferencia, por lo tanto:

$$\frac{V_{TTR}}{V_o} = \frac{Ch}{Ch + C1} \left[1 + e^{-\alpha t} \left(\frac{\text{sen}(Wt - \theta)}{\text{sen } \theta} \right) \right] \quad (5.6)$$

del triángulo tenemos que:

$$\text{sen } \theta = \frac{W}{Wn'} \quad \text{y} \quad Wn' = \sqrt{W^2 + \alpha^2 \left(\frac{2C1 + Ch}{Ch} \right)^2}$$

por lo tanto:

$$\text{sen } \theta = \frac{W}{\sqrt{W^2 + \alpha^2 \left(\frac{2C1 + Ch}{Ch} \right)^2}}$$

desarrollando

$$\text{sen } \theta = \frac{\frac{W}{W}}{\sqrt{W^2 + \alpha^2 \left(\frac{2C1 + Ch}{Ch} \right)^2}} \left(\frac{1}{W} \right)$$

$$\text{sen } \theta = \frac{1}{\sqrt{\frac{W^2}{W^2} + \frac{\alpha^2}{W^2} \left(\frac{2C1 + Ch}{Ch} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{Wn'^2 - \alpha^2} \left(\frac{2C1 + Ch}{Ch} \right)^2}}$$

$$\text{sen } \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{\alpha^2}{Wn^2} \right] \left[\frac{2Cl + Ch}{Ch} \right]^2}}$$

Por semejanza $\frac{\alpha}{Wn}$ debe ser igual a $\frac{K}{2}$

$$\frac{K}{2} = \frac{R}{2 \sqrt{\frac{Lh}{Cr}}} = \frac{K}{2} \frac{Lh}{Lh} \frac{1}{\sqrt{\frac{Lh}{Cr}}} \quad \text{y} \quad \alpha = \frac{R}{2Lh}$$

Por lo tanto

$$\frac{K}{2} = \frac{\alpha}{\frac{1}{Lh} \sqrt{\frac{Lh}{Cr}}} = \frac{\alpha}{\frac{1}{Lh} \frac{\sqrt{Lh}}{\sqrt{Cr}}} = \frac{A}{\frac{Lh^{-1/2} Lh^{1/2}}{\sqrt{Cr}}}$$

de aquí
$$\frac{K}{2} = \frac{A}{\frac{1}{\sqrt{Cr}}} = \frac{A}{Wn}$$

Por lo tanto

$$\boxed{\frac{K}{2} = \frac{\alpha}{W_n}}$$

Sustituyendo

$$\text{sen } \theta = \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \frac{\left(\frac{K}{2}\right)^2}{1 - \left(\frac{K}{2}\right)^2} \left(\frac{2C_1 + Ch}{Ch}\right)^2 \right]}}$$

Para completar la ecuación 5.5 se tiene que demostrar que:

$$\frac{(2 + D)^2}{D^2} = \left(\frac{2C_1 + Ch}{Ch}\right)^2$$

$$\left(\frac{2C_1 + Ch}{Ch}\right)^2 = \frac{4C_1^2 + 4C_1Ch + Ch^2}{Ch^2} = \frac{4C_1^2}{Ch^2} + \frac{4C_1}{Ch} + 1$$

Tenemos que, por definición $D = \frac{Ch}{C_1}$, sustituyendo tenemos:

$$\left(\frac{4}{D^2} + \frac{4}{D} + 1\right) \frac{D^2}{D^2} = \frac{4 + 4D + D^2}{D^2} \frac{(2 + D)^2}{D^2}$$

Por lo tanto
$$\left(\frac{2C1 + Ch}{Ch} \right)^2 = \frac{(2 + D)^2}{D^2}$$

Sustituyendo, finalmente tenemos:

$$\theta = \text{sen}^{-1} \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \frac{\left(\frac{K}{2}\right)^2}{1 - \left(\frac{K}{2}\right)^2} \left(\frac{2 + D}{D}\right)^2 \right]}} \quad (5.7)$$

La cual cumple con la ecuación 5.5 de la Referencia 1.

Para demostrar la ecuación 5.4, a partir de la ecuación 5.6 tenemos que:

$$\frac{V_{TTR}}{V_D} = \frac{Ch}{Ch + C1} \left[1 + e^{-at} \left(\frac{\text{sen}(Wt - \theta)}{\text{sen } \theta} \right) \right] \quad (5.8)$$

Permitame demostrar que
$$\frac{Ch}{Ch + C1} = \frac{D}{D + 1}$$

Esto es:

$$\frac{D}{D+1} = \frac{Ch/C1}{\frac{Ch}{C1} + 1} = \frac{Ch/C1}{\frac{Ch + C1}{C1}} = \frac{Ch}{C1 + Ch}$$

Sustituyendo lo anterior tenemos:

$$V_{TTR} = V_0 \left[\frac{D}{D+1} \right] \left[1 + e^{-\alpha t} \left(\frac{\sin(\omega t - \theta)}{\sin \theta} \right) \right] \quad (5.9)$$

Para demostrar que $\alpha = \frac{K}{2} \left(\frac{Pr}{t_s} \right) \left(1 + D \right)$

sabiendo que $\frac{K}{2} = \frac{\alpha}{W_n}$

debe cumplirse que $W_n = \left(\frac{Pr}{t_s} \right) \left(1 + D \right)$

de la ecuación 5.3 tenemos que: $W_n = \left(\frac{Pr}{t_s} \right) = \frac{1}{\sqrt{LhCh}}$

donde W_n es la frecuencia natural de oscilación no amortiguada.

Sustituyendo W , obtenemos que:

$$W_n = \frac{\sqrt{1+D}}{\sqrt{L_h C_h}} = \sqrt{\frac{1 + \frac{C_h}{C_l}}{L_h C_h}} = \sqrt{\frac{1}{L_h C_h} + \frac{1}{C_l L_h}}$$

por lo tanto se cumple que $\alpha = \frac{K}{2} \left[\frac{P_n}{t_s} \right] \left[1 + D \right]$

Sustituyendo en 5.8 obtenemos que:

$$V_{TTR} = V_o \left[\frac{D}{D+1} \right] \left[1 + \frac{e^{-\left(\frac{K}{2}\right) \left[\frac{P_n}{t_s}\right] \sqrt{1+D}} \sin(Wt-\theta)}{\sin \theta} \right] \quad (5.10)$$

Ahora sólo queda demostrar que:

$$W = \left[\frac{P_n}{t_s} \right] \left(\sqrt{1+D} \right) \left[1 - \left[\frac{K}{2} \right]^2 \right]$$

sabemos que
$$W_n = \left[\frac{Pr}{t_s} \right] (\sqrt{1+D})$$

$$y \quad \left[1 - \left[\frac{K}{2} \right]^2 \right] = \sqrt{1 - \frac{A^2}{W_n^2}} = \sqrt{\frac{W_n^2 - A^2}{W_n^2}} = \frac{W}{W_n}$$

Por lo tanto:

$$\left[\frac{Pr}{t_s} \right] (\sqrt{1+D}) \left[1 - \left[\frac{K}{2} \right]^2 \right] = (W_n) \left(\frac{W}{W_n} \right) = W$$

Sustituyendo en 5.10 obtenemos finalmente la ecuación 5.4

$$V_{TTR} = V_0 \left[\frac{D}{D+1} \right] \left[1 + \frac{e^{-\left[\frac{K}{2} \right] \left[\frac{Pr}{t_s} \right] \sqrt{1+D}}}{\sin \theta} \right]$$

$$\left. \left[\left[\frac{Pr}{t_s} \right] (\sqrt{1+D}) \left[1 - \left[\frac{K}{2} \right]^2 \right] \right] t - \theta \right\}$$

Con el anterior análisis quedan demostradas las ecuaciones 5.4 y 5.5.

INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS D, K Y P EN LA FORMA DE LA TTR.

Al hacer un análisis experimental para conocer la influencia de estos parámetros sobre la forma de onda de la TTR y sus características llegamos a las siguientes conclusiones:

PARA EL PARAMETRO D.

Si mantenemos constante a los parámetros K y P, y variamos al parámetro D se tienen los siguientes comportamientos en la forma de onda de la TTR.

- Para la frecuencia de inyección, tenemos que se mantiene constante para cualquier variación del parámetro D.
- Para el factor de amplitud (FA), tenemos que al variar el valor del parámetro D en unidades varía el valor de KA en centésimas.
- Para el tiempo de retardo (t_d) tenemos que al aumentar el valor del parámetro D en unidades, disminuye el valor de t_d considerablemente.
- Para el tiempo t_3 al aumentar el valor del parámetro D, disminuye el valor del tiempo t_3 considerablemente aun mas que las variaciones que tiene el tiempo t_d .

Gráficamente la influencia de D en la forma de la onda de la TTR sería como la de la Fig. 5.1.

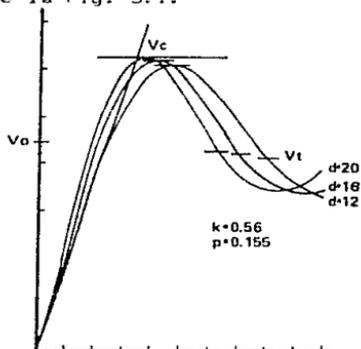


Fig. 5.1 Influencia del parámetro D en la forma de onda de la TTR.

PARA EL PARAMETRO K .

Si mantenemos a D y F constantes y variamos el valor del parámetro K se tiene que:

- La frecuencia de inyección se mantiene constante.
- El valor del factor de amplitud disminuye en décimas al aumentar el valor del parámetro K , y aumenta de igual manera al disminuir el valor del parámetro K .

- Para el tiempo de retardo, tenemos que al aumentar el valor de K , disminuye hasta llegar a cero (lo cual se sale de nuestro objetivo) en un valor aproximado de 0.7. Al disminuir el valor de K , aumenta el valor del tiempo de retardo significativamente.

Estos efectos se muestran gráficamente en la Fig. 5.2.

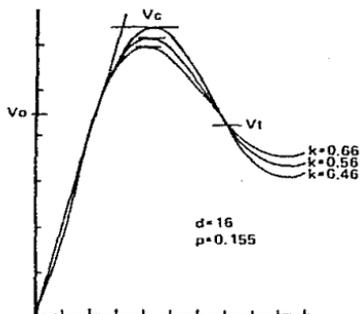


Fig. 5.2 Influencia del parámetro k en la forma de onda de la ITR.

PARA EL PARAMETRO P

Al mantener constantes a los parámetros D y P y variando el valor de P se tiene que:

- La frecuencia de inyección tiene variaciones muy considerables, al aumentar el valor de P aumenta la frecuencia de inyección y viceversa.
- El factor de amplitud se mantiene constante para cualquier valor de P .
- Para el tiempo de retardo al aumentar el valor de P tenemos disminuciones considerables de t_3 .

Todos estos efectos se muestran gráficamente en la Fig. 5.3.

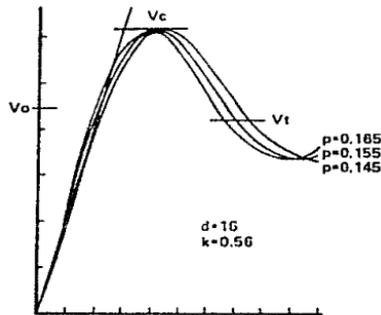


Fig. 5.3 Influencia del parámetro P en la forma de onda de la TTR.

5.3 PROGRAMA PARA OBTENER LA GRAFICA DE LA TTR EN FUNCION DE D, K Y P.

Una vez introducidos los parámetros D, K y P en la ecuación 3.11 para obtener de esta manera, la ecuación 5.10, se procedió a elaborar un programa de computadora el cual simula la forma de onda de la TTR para una prueba dada.

En la Fig. 5.4, se muestra el diagrama de flujo de este programa.

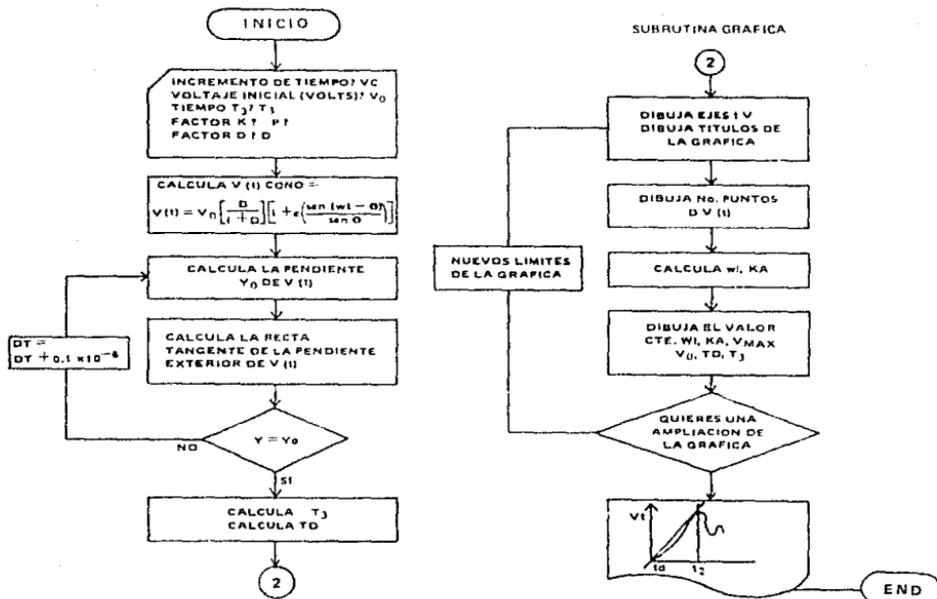


Fig 5.4 Diagrama de flujo del programa CALC TTR.

En las Figs. 5.5 y 5.6, se muestran las hojas de entrada de datos y de salida de resultados respectivamente. Este programa se correrá el número de veces que se necesite hasta encontrar la TIR esperada.

VOLTAJE INICIAL [VOLTS] ?
 INCREMENTO DE TIEMPO ?
 TIEMPO T3 DADO POR NORMAS ?
 VALOR U_c DADO POR NORMAS ?
 VALOR INICIAL DE D ?
 VALOR INICIAL DE K ?
 VALOR INICIAL DE P ?
 NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS A FORMAR... ?

Fig. 5.5 Hoja de entrada de datos del programa CALCITR.

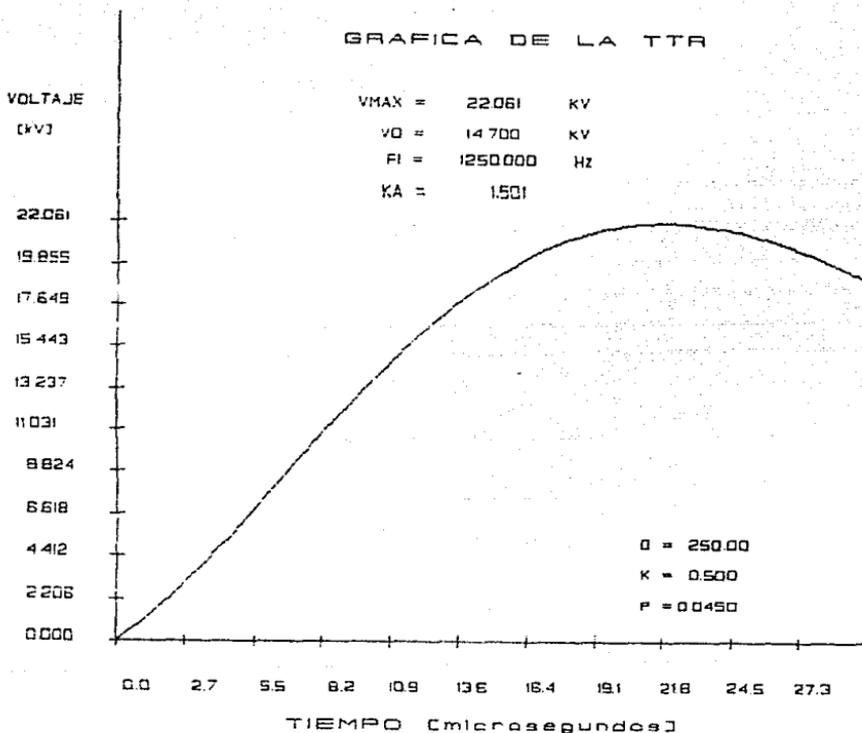


Fig. 5.6 Hoja de resultados del programa CALCITR.

5.4 PROGRAMA PARA EL CALCULO DE LOS PARAMETROS QUE GENERAN LA TTR ESPERADA.

Una vez obtenida la TTR que se necesita para realizar una prueba dada, se procede a correr el programa para calcular los valores de los parámetros físicos del circuito (C_h , L_h , C_l y R_l). Ya que para efectuar una prueba con condiciones preestablecidas, es necesario armar el circuito Weill con los valores definidos de sus parámetros, los cuales se calculan a través de este programa.

El diagrama de flujo es el de la Fig. 5.7.

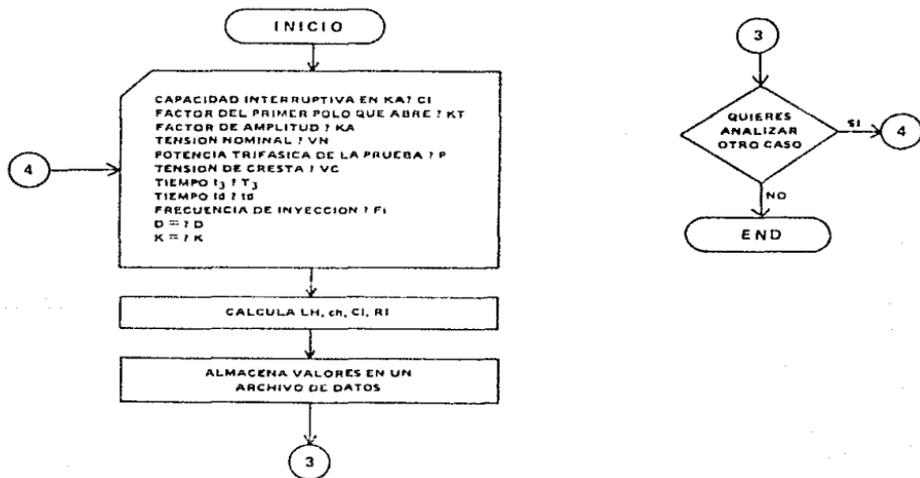


Fig. 5.7 Diagrama de flujo del programa CALCOMP.

En las Figs. 5.8 y 5.9, se muestran las hojas de entrada de datos y de salida de resultados respectivamente.

CAPACIDAD INTERRUPTIVA EN KA ?
FACTOR DEL PRIMER POLO QUE ABRE ?
FACTOR DE AMPLITUD KA ?
TENSION NOMINAL ?
FRECUENCIA NO ?
POTENCIA TRIFASICA DE LA PRUEBA ?
TENSION DE CRESTA ?
TIEMPO T3 ?
TIEMPO TD ?
FRECUENCIA DE INYECCION EN Hz ?
FACTOR D ?
FACTOR K ?

Fig. 5.8 Hoja de entrada de datos del programa CALCOMP.

```
*****
CALCULO DE COMPONENTES DEL CIRCUITO SINTETICO Y
TENSION TRANSITORIA DE RESTABLECIMIENTO ESPERADA
*****
```

```
*****
CASO NUMERO ..... 1
CLAVE DE IDENTIFICACION..... B0003
*****
```

VALORES NOMINALES DE LOS PARAMETROS DE PRUEBA:

```
CAPACIDAD INTERRUPTIVA = 8 [KA]
FACTOR DEL PRIMER POLO QUE ABRE KI = 1.5
FACTOR DE AMPLITUD KA = 1.5
TENSION NOMINAL = 34 [KV]
POTENCIA TRIFASICA DE LA PRUEBA = 332 [MW]
TENSION DE CRESTA = 44.4 [KV]
TIEMPO T3 = 35 [US]
TIEMPO DE RETARDO = 1 [US]
FRECUENCIA DE INYECCION = 1000 [Hz]
D = 100
K = .47
P = .07
```

VALORES CALCULADOS DE LAS COMPONENTES DEL CIRCUITO:

```
INDUCTANCIA L [mH] = 6.90294
CAPACITANCIA CP [uF] = 3.61855
CAPACITANCIA CI [uF] = 34.4624
RESISTENCIA RI [ohm] = 211.349
```

Fig. 5.9 Hoja de resultados del programa CALCOMP.

5.5 COMPARACION ENTRE LOS VALORES OBTENIDOS TEORICAMENTE Y LOS OSCILOGRAMAS REALES DE PRUEBA.

El siguiente ejemplo es representativo de todas las pruebas sintéticas que hasta ahora se han realizado en el Laboratorio de Salazar.

En la Fig. 5.10, se muestra la parte inicial de una TTR obtenida por medio del programa CALCTIR donde podemos apreciar los siguientes valores.

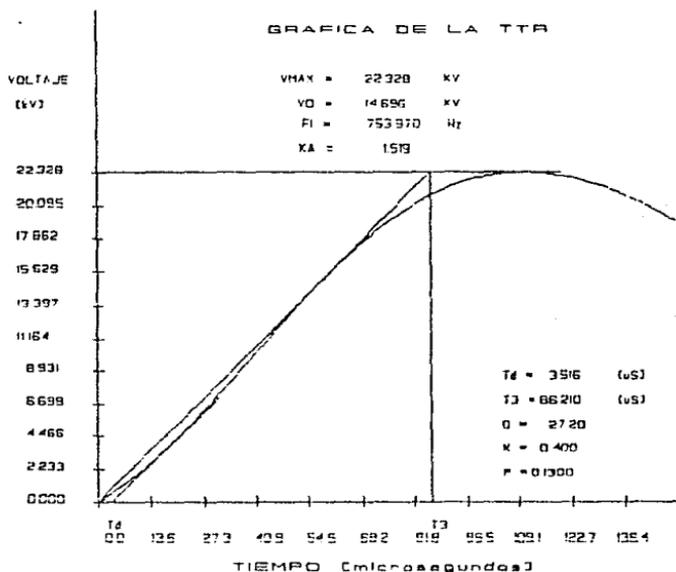


Fig. 5.10 Parte inicial de una TTR.

En la Fig. 5.11 se muestra, el oscilograma obtenido durante la ejecución de la prueba, en el cual los valores obtenidos fueron:

$V_c=20$ KV
 $t_3=100$ seg
 $t_d=6.6$ seg

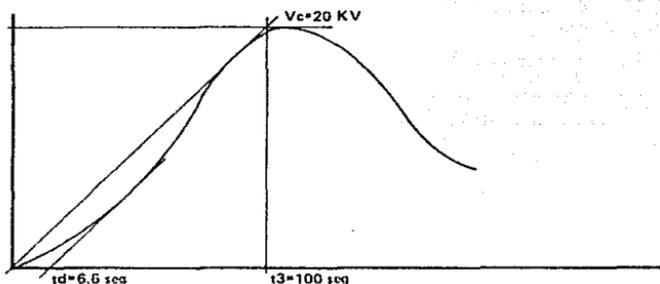


Fig. 5.11 Oscilograma de una prueba real.

Como se puede ver, existe una pequeña diferencia entre los valores teóricos y los valores reales de la prueba. En el caso de V_c la diferencia se puede explicar por la energía consumida en el arco y en la corriente de inyección.

En el caso de los tiempos t_3 y t_d , la diferencia se debe a las capacitancias parásitas aún no incluidas en los programas de cálculo.

CAPITULO 6

TTR CRITICA

6.1 DEFINICION DE LA TTR CRITICA

En la Fig. 6.1 se muestran los parámetros que definen, de acuerdo a la norma IEC-56 la TTR crítica a 2 parámetros.

El término *TTR Crítica* implica una curva IIR tangente a las 2 envolventes definidas por la norma.

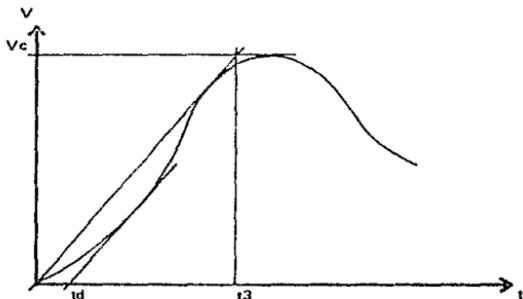


Figura 6.1 Definición de TTR Crítica a 2 parámetros.

6.2 MODIFICACIONES AL PROGRAMA CALCTTR PARA TTR's CRITICAS.

El programa CALCTTR como se diseño inicialmente calculaba la forma de onda de la TTR para valores de parámetros $D, K,$ y P fijos. Esto no necesariamente correspondía a una TTR Crítica.

Para conocer los valores de U_c, t_d y t_3 de una TTR con este programa se trazaban las envolventes de ésta geométricamente sobre la gráfica. Todo este trabajo implicaba perdidas de tiempo y resultados erróneos.

En el Laboratorio de Salazar, se realizan pruebas sintéticas normalizadas, esto es, pruebas de cortocircuito a equipos de interrupción bajo TTR's Críticas, por lo que surgio la necesidad de modificar el programa CALCTTR para que automáticamente las calculara.

Estas modificaciones consistieron en lo siguiente:

- 1.- Calculo del valor de t_3 analíticamente.
- 2.- Calculo del valor de t_d analíticamente.
- 3.- Modificaciones a los valores de D, K y P hasta encontrar valores críticos de t_3, t_d y U_c .
- 4.- Generación de una gráfica con todos estos valores críticos.

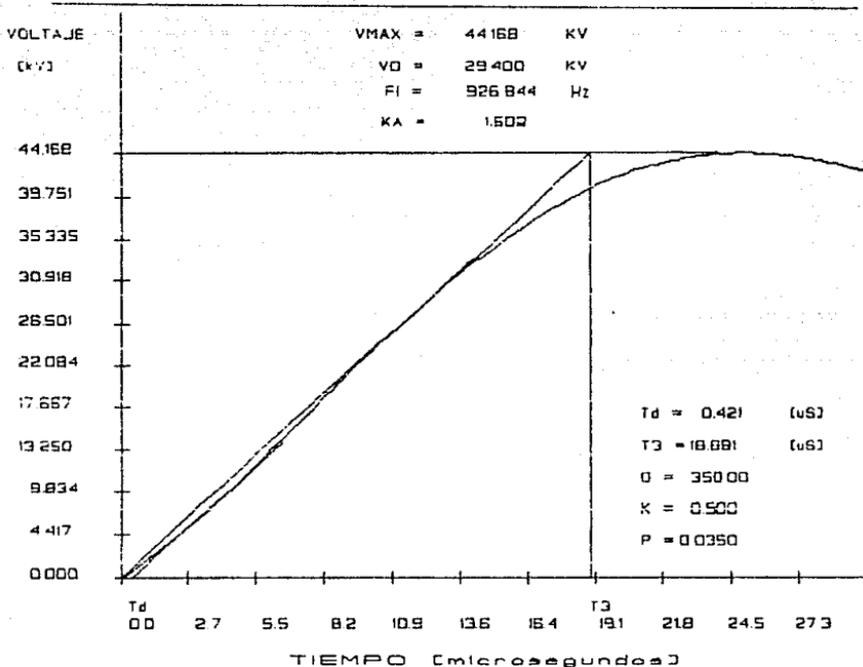


Figura 6.2 Gráfica de una TTR Crítica obtenida a través del programa CALCITR.

Como se puede observar en la gráfica, existen variaciones en los valores esperados para t_3 , t_d y U_c respecto a los valores de norma ($t_3 = 19 \mu\text{Seg}$, $t_d = 4 \mu\text{Seg}$ y $U_c = 44 \text{ kV}$), esto es debido a la introducción de un factor de tolerancia de $\pm 1\%$, el cual de acuerdo a la definición de TTR crítica no afecta significativamente nuestros resultados.

6.3 VALORES DE LOS PARAMETROS CH, LH, C1 Y R1 PARA GENERAR LAS TTR's CRITICAS EN EL LABORATORIO DE SALAZAR.

Con el objeto de conocer los valores extremos de los parámetros Ch, Lh, C1 y R1 del circuito sintético en el Laboratorio de Salazar para que cumplan con los requisitos que se exigen en las normas (IEC-56) se realizó un análisis de 90 casos, los cuales cubren todas las combinaciones posibles de tensiones nominales y capacidades interruptivas del Laboratorio.

En la tabla 6.1, se muestran los valores de Ch, Lh, C1 y R1 necesarios para cumplir con el ciclo de operación al 30% de la corriente máxima de cortocircuito.

CICLO DE OPERACION AL 30%

TENSION [kV]	Lh [mH]	Ch [μ F]	C1 [μ F]	R1 [Ω]	CORRIENTE [kA]
3.6	4.3	5.84	4.49	493	6.3
	3.44	7.42	5.71	388	8
	2.75	9.28	7.14	310	10
	2.20	11.60	8.93	248	12.5
	1.72	14.85	11.42	194	16
7.2	8.75	2.96	3.70	799	6.3
	6.89	3.76	4.71	629	8
	5.51	4.71	5.88	503	10
	4.41	5.88	7.36	402	12.5
	3.44	7.53	9.42	314	16
12	14.58	1.75	3.18	1070	6.3
	11.48	2.22	4.04	843	8
	9.18	2.78	5.05	674	10
	7.35	3.47	6.32	529	12.5
	5.74	4.45	8.09	421	16
17.5	21.27	1.20	2.68	1409	6.3
	16.75	1.53	3.40	1110	8
	13.4	1.91	4.25	888	10
	10.72	2.39	5.31	710	12.5
	8.37	3.06	6.81	555	16
24	29.17	1.03	2.94	1576	6.3
	22.97	1.30	3.73	1241	8
	18.37	1.63	4.67	992	10
	14.70	2.04	5.83	794	12.5
	11.84	2.61	7.47	620	16
36	43.75	0.77	3.08	1887	6.3
	34.46	0.97	3.91	1486	8
	27.56	1.22	4.89	1189	10
	22.13	1.52	6.09	954	12.5
	17.23	1.95	7.82	743	16

Tabla 6.1. Ciclo de operación al 30%.

En la tabla 6.2, se muestran los valores de Ch, Lh, C1 y R1 necesarios para cumplir con el ciclo de operación al 60% de la corriente máxima de cortocircuito.

CICLO DE OPERACION AL 60%

TENSION [kV]	Lh [mH]	Ch [μ F]	C1 [μ F]	R1 [Ω]	CORRIENTE [kA]
3.6	2.18	15.25	30.5	128	6.3
	1.72	19.37	38.75	101	8
	1.37	24.22	48.45	81	10
	1.10	30.28	60.57	64	12.5
	0.86	38.76	77.52	50	16
7.2	4.37	13.19	26.39	195	6.3
	3.44	16.75	33.51	154	8
	2.75	20.95	41.93	123	10
	2.20	26.19	52.38	98	12.5
	1.72	33.51	67.03	77	16
12	7.2	4.66	22.19	287	6.3
	5.74	5.91	28.18	226	8
	4.59	7.39	35.23	180	10
	3.67	9.24	44.04	144	12.5
17.5	2.87	11.83	56.37	113	16
	10.64	2.59	21.61	338	6.3
	8.37	3.29	27.46	266	8
	6.70	4.11	34.32	212	10
	5.36	5.14	42.90	170	12.5
24	4.18	6.59	54.92	133	16
	14.58	2.07	24.44	365	6.3
	11.48	2.63	31.04	287	8
	9.18	3.29	38.80	230	10
	7.35	4.12	48.50	181	12.5
36	5.74	5.27	62.08	143	16
	21.87	1.53	21.96	482	6.3
	17.22	1.95	27.89	379	8
	13.78	2.44	34.86	303	10
	11.02	3.05	43.57	243	12.5
	8.61	3.90	55.78	189	16

Tabla 6.2. Ciclo de operación al 60%.

En la tabla 6.3. se muestran los valores de Ch, Lh, C1 y R1 para cumplir con el ciclo de operación al 100% de la corriente máxima de cortocircuito.

CICLO DE OPERACION AL 100%

TENSION [kV]	Lh [mH]	Ch [μF]	C1 [μF]	R1 [Ω]	CORRIENTE [kA]
3.6	1.31	23.06	329.50	50	6.3
	1.03	29.28	410.42	24	8
	0.82	36.61	523.03	19	10
	0.66	45.76	653.81	15	12.5
	0.51	58.57	836.85	12	16
7.2	2.62	16.39	273.27	46	6.3
	2.06	20.76	346.09	36	8
	1.65	26.02	433.77	29	10
	1.32	32.53	542.23	23	12.5
	1.03	41.46	694.07	18	16
12	4.37	11.70	241.09	67	5.3
	3.44	14.96	272.11	53	8
	2.75	18.70	340.15	42	10
	2.20	23.38	429.18	34	12.5
	1.72	29.93	544.25	26	16
17.5	6.38	6.21	248.62	80	6.3
	5.02	7.89	315.74	63	8
	4.02	9.86	394.64	50	10
	3.21	12.33	493.20	40	12.5
	2.51	15.78	631.44	31	16
24	8.75	4.42	221.43	91	6.3
	6.89	5.62	281.18	72	8
	5.51	7.02	351.44	57	10
	4.41	8.78	439.35	46	12.5
	3.44	11.28	562.37	36	16
36	13.17	3.33	235.84	98	6.3
	10.33	2.95	299.49	77	8
	8.26	3.74	374.35	62	10
	6.61	4.67	467.94	49	12.5
	5.16	5.98	598.98	38	16

Tabla 6.3. Ciclo de operación al 100%.

De las tablas anteriores, podemos observar que los valores extremos de los parámetros Ch, Lh, C1 y R1 requeridos en el circuito sintético son los presentados en la tabla 6.4.

parámetro \ valor	Mínimo	Máximo
Ch [μ F]	0.77	8.5
Lh [mH]	0.51	43.34
C1 [nF]	2.68	6.36
R1 [Ω]	12.00	1.88

Tabla 6.4 Valores extremos de los parámetros Ch, Lh, C1 y R1.

Haciendo un análisis de la capacidad actual del laboratorio a los requerimientos de la norma, llegamos a las siguientes conclusiones:

Para cumplir con las recomendaciones IEC-56 para la prueba de equipos de interrupción, es necesario modificar los bancos C1, Lh y R1 con los que cuenta actualmente el laboratorio, ya que éstos sólo cumplen con un cierto número de prueba normalizadas.

A continuación se analiza cada caso por separado:

BANCO Ch

En el caso de Ch, no existe ningún problema ya que este banco es suficiente para cumplir con los valores mínimos y máximos requeridos.

BANCO C1

Para el banco C1, se sugiere utilizar 40 capacitores de 0.1 μF , con los cuales se tendrían los siguientes valores:

$$\text{Conexión serie } C1 = \frac{0.1 \text{ E-6}}{40} = 2.5 \text{ nF.}$$

$$\text{Conexión paralelo } C1 = (0.1 \text{ E-6}) (40) = 40 \mu\text{F.}$$

BANCO Lh

En el banco Lh, se sugiere adicionar una reactancia de 11.4 mH con lo cual se podría cumplir con el valor máximo requerido. El valor mínimo es cubierto por el banco actual Lh.

BANCO R1

En el actual banco R1, se necesitarían 235.4 Ω adicionales para cumplir con el valor máximo. El valor mínimo se puede obtener haciendo conexiones serie-paralelo de las resistencias actuales.

Debido a [#] que las resistencias con las que cuenta el laboratorio están hechas a base de agua y sal, con el simple hecho de cambiar la conductividad de la solución podemos muy bien cumplir con los valores requeridos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo del presente trabajo, ha tenido como propósito discutir los diferentes criterios para la ejecución de pruebas sintéticas de cortocircuito en interruptores.

Además, se presenta el desarrollo de dos programas de cómputo, uno de los cuales calcula la IIR crítica para valores de prueba dados, el otro calcula los valores de las componentes del circuito de prueba (C_h , L_h , E_1 y R_1).

En un futuro próximo, se trabajará para incluir en el programa los fenómenos de interacción del circuito con el arco durante la interrupción, así como los efectos de los parámetros parásitos del circuito.