

AUMENTO A LA PROTECCIÓN CONTRA EVENTOS ELÉCTRICOS TRANSITORIOS PARA SUBESTACIONES Y TRANSFORMADORES

ROY B. CARPENTER, JR.
LEC, INC., BOULDER, COLORADO, U.S.A.

ANTECEDENTES

Un elemento básico en el Diseño de Subestaciones Eléctricas, es el concepto del Subsistema de Protección contra Eventos Eléctricos Transitorios (surge). La efectividad de este subsistema, la determinarán los requisitos del Nivel Básico de Aislamiento (BIL), para el Transformador y los componentes de la subestación. Ya que los transformadores son el factor de mayor costo de la subestación, su BIL es el factor de más costo en el diseño. Reduciendo los requerimientos del BIL de la Subestación, se puede tener un mayor impacto, tanto en costo, como en riesgo, y finalmente, en la confiabilidad de la subestación.

Manejando desde un principio el diseño en función del BIL, los otros requerimientos están relacionados con el riesgo de sobrecargas y eventos eléctricos transitorios en las líneas de transmisión. Una descarga de rayo cercana (dentro de un kilómetro más o menos), está considerada como el caso límite. Las componentes de alta frecuencia creadas por el rápido crecimiento de las sobrecargas, requieren de protecciones de respuesta rápida. Interrumpiendo los transitorios y los rayos lejanos, se disminuye el riesgo, porque disminuye la corriente pico y usualmente, la magnitud de ésta es mucho menor.

Para eliminar el riesgo creado por la rápida elevación de altas corrientes transitorias dentro de la subestación, se requiere de dos Sistemas de Protección principales:

1. La PREVENCIÓN de rayos directos, en cualquier componente operativo DENTRO de la Subestación.
2. La PREVENCIÓN de la rápida elevación de altas corrientes transitorias que entran a la subestación por las líneas de entrada o de salida.

Uno de los documentos técnicos (1), describe como un sistema de protección contra rayos de una Subestación, puede diseñarse para prevenir descargas o impactos directos sobre cualquier componente de la subestación. Este sistema ha estado en uso desde hace más de 10 años en muchas subestaciones, en áreas de alta incidencia de rayos, todas sin falla por descargas eléctricas atmosféricas, que indican que lo importante, es prevenir el paso de la entrada de transitorios con características de peligro potencial a los componentes de la Subestación.

INTERRUMPIR LOS EVENTOS ELÉCTRICOS TRANSITORIOS

Normalmente, la protección contra descargas eléctricas atmosféricas de una subestación, está equipada de alguna manera, por una estación de arrestadores de Eventos Eléctricos Transitorios (surge). Estos dispositivos, limitan el voltaje pico de sobrecarga simultáneamente, por medio de un camino de baja impedancia a tierra. Sin embargo, el desempeño de un solo arrestador de surge convencional haciendo esta función depende de muchos factores, algunos de los cuales no pueden ser controlados. Cuando un arrestador de rayos o apartarrayos está instalado a alguna distancia de los aparatos protegidos (transformador, interruptor, etc.), siempre existe la probabilidad de algún sobrevoltaje a través del transformador, debido a las longitudes de esas distancias. Como resultado, donde se usan arrestadores convencionales solamente, la onda viajera de surge puede alcanzar a la terminal del transformador antes de que opere el arrestador. En ese caso, la onda de voltaje de surge reflejada desde el transformador, siempre se duplicará en amplitud y pondrá en peligro el aislamiento del transformador o requerirá un alto BIL.

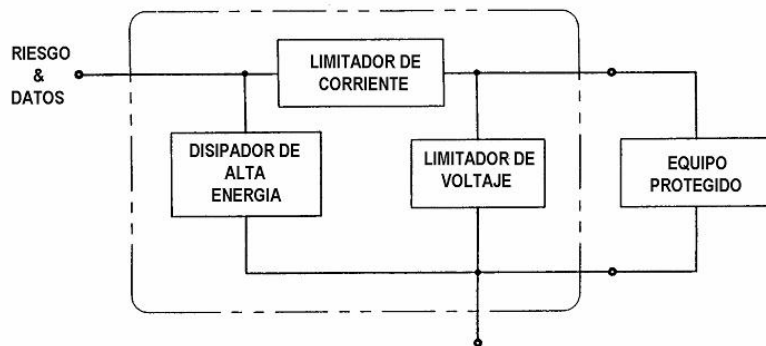


FIGURA 1. SERIES HÍBRIDAS, PARA LÍNEAS SOLAS REFERENCIADAS A TIERRA

Respecto al tiempo de reacción del arrestador, su uso en circuito paralelo, no puede darle una reacción instantánea, hay una demora antes de que operen. Como resultado, el efecto de protección de los arrestadores de surge contra el crecimiento rápido de voltajes de surge es limitado.

Una cierta “distancia de separación” (distancia límite) o impedancias en serie, es necesaria para limitar la elevación del tiempo de surge (2). En casos severos, estas separaciones y distancias límite, con frecuencia no son adecuadas para la operación del arrestador de surge y la conducción del surge a tierra. Por tanto, siempre existirá algún riesgo de un sobrevoltaje de surge por un corto período de tiempo, generalmente causado por un rayo.

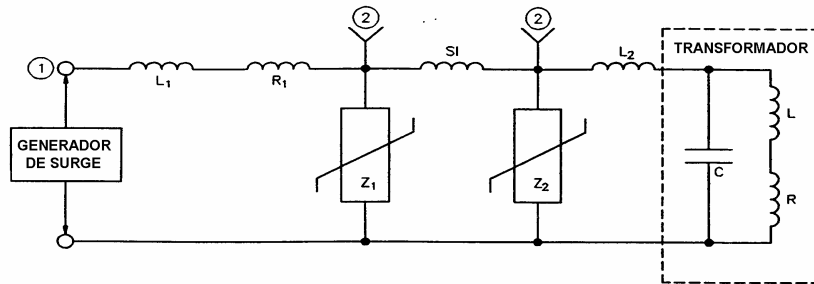
Desde 1975, LEC ha venido ofreciendo un sistema conocido como “Eliminador de Surge” (SE), es una familia de protectores compuestos diseñados para usarse en circuitos de voltaje secundario. La familia del SE es una forma de protector de la serie híbrida, de funcionamiento similar al que se ilustra en la Figura 1. Están compuestos de tres elementos:

1. 1. EL DISIPADOR DE ALTA ENERGÍA (HED). Su función es disipar lo más posible de la energía de surge en el disipador y reducir la impedancia del Sistema de Tierras.
2. 2. LAS IMPEDANCIAS EN SERIE O INTERCEPTOR DE SURGE (SI). Su función es reducir los transitorios de entrada, tanto como lo permita el HED para conducir y limitar el voltaje pico a un nivel seguro, sin ninguna interrupción.
3. 3. EL CONTROLADOR DE VOLTAJE, es el segundo elemento en paralelo, calibrado para asegurar el voltaje pico al nivel adecuado abajo del sistema BIL protegido. El tiempo de elevación se reduce por factores de arriba de 100 a uno en este punto, debido a la función del interceptor de surge. El remanente de la energía de surge resultante es insignificante. Esta función puede ser provista por un arrestador de distribución.

Existen literalmente miles de Sistemas de Eliminadores de Surge (SE) de LEC , instalados en líneas de voltajes de 120 Vrms a 4160 Vrms. Ningún sistema protegido con SE ha sufrido daños, cuando el cliente los ha instalado correctamente. Estos tienen 5 años de garantía contra daños. Extendiendo el concepto de los Sistemas de Eliminadores de Surge a los voltajes primarios, su aplicación es obvia. El único componente nuevo requerido (que no está en uso todavía), es el elemento de la serie llamado por LEC “Interceptor de Surge” (SI).

El SI debe presentar una alta impedancia a la entrada del surge, pero virtualmente no al voltaje de operación. Además, no debe permitir el paso de transitorios de altas frecuencias a través o por medio del SI. Esto requiere de una capacitancia de entrada-a-salida menor a 50 picofarads. LEC ha desarrollado varias formas de presentación del SI para aplicaciones en subestaciones que ofrecen el desempeño requerido, para impedir el paso de los transitorios relacionados con las descargas eléctricas atmosféricas. Estos dispositivos han sido patentados por LEC.

ANÁLISIS DE DESEMPEÑO



DONDE: $L_1 = 20$ MICROHENRIES
 $L_2 = 2$ MICROHENRIES
 $R_1 = 2$ OHMS
 $SI = 60$ MICROHENRIES
 $Z_1 =$ ARRESTADOR CLASE ESTACION *
 $Z_2 =$ ARRESTADOR CLASE DISTRIBUCION *
 PARA TRANSFORMADOR
 $C = 1000$ PICO FARADIOS
 $L = 0,15$ MILLIHENRIES
 $R = 4$ OHMS

* SELECCION BASADA EN VOLTAJE DE OPERACION

Para ilustrar el concepto y el resultado del desempeño del Sistema, la revisión de una sencilla prueba de desempeño de estas unidades es más efectiva. La Figura 2, ilustra el circuito de prueba equivalente. El SI tiene aproximadamente 60 microhenries de inductancia con menos de 50 picofarads de capacitancia de entrada a salida. La figura 3, ilustra un SI actual. Se consideran para el circuito de entrada a la subestación los parámetros siguientes: 2 Ohms de resistencia, y 20 microhenries de inductancia. La inductancia, el SI y el bushing del transformador, se consideran de 2 microhenries. Los parámetros del transformador, son los indicados y se consideran típicos para un transformador de una Subestación de tamaño medio.

FIGURA 2. CIRCUITO EQUIVALENTE, PROTECCIÓN DE SUBESTACIÓN



FIGURA 3. INTERCEPTOR DE SURGE Y SU CIRCUITO EQUIVALENTE

Una prueba de forma de onda, es aplicada a este circuito en la POSICIÓN I de la entrada del circuito equivalente, aproximadamente como se ilustra en la figura 4. Los resultados se ilustran en la Figura 5, donde los puntos 2 y 3 son

superpuestos. Notar que en la prueba, la onda de surge alcanzó un pico de 50 KV en UN MICROSEGUNDO. Fue reducido a 12.5 KV a la entrada del SI (Posición 2) y baja a 7.5 KV, el voltaje de cierre (clamping), a la salida del SI (Posición 3). La diferencia de 5 KV, fue desarrollada a través del SI.

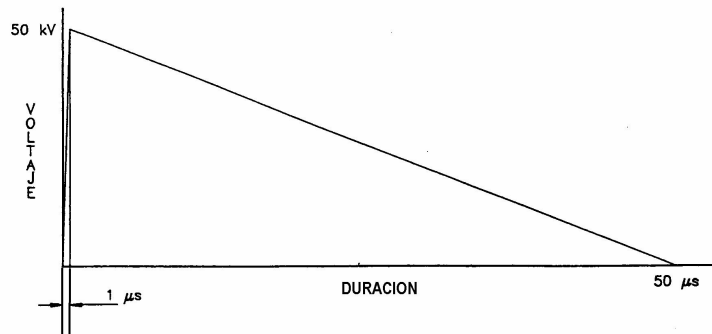


FIGURA 4. PRUEBA DE FORMA DE ONDA

-

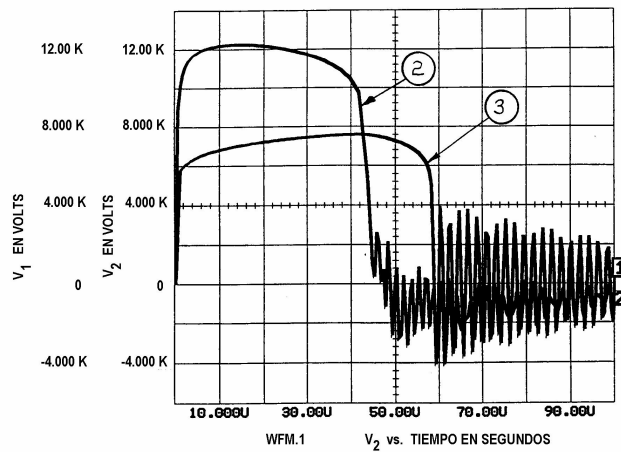


FIGURA 5. RESULTADOS DE PRUEBAS EN PUNTOS 2 Y 3

Para esta prueba, el punto de cierre o enlace para la salida, fue calibrado para 7.5 KV. Pudo haber sido calibrado para un valor más alto o más bajo, dependiendo del voltaje nominal de la línea y del nivel de protección requerido. La relación del voltaje pico de entrada y el de salida del SI, se mantendrá

aproximadamente igual, en relación a los voltajes de operación de la Subestación. O sea, se espera que a la salida del SI no sea mayor del 60% que a la entrada, otra vez, depende del voltaje de cierre (clamping) seleccionado.

Se recomienda un voltaje de cierre (clamping) 1.5 veces del voltaje pico normal. También deberá ser obvio que el voltaje a la corriente de surge pico, deberá ser mucho menor que con la protección convencional.

APLICACIÓN

Instalando un “Interceptor de Surge” entre las líneas de transmisión de entrada o salida y los transformadores de la Subestación, virtualmente se eliminará el riesgo de pérdida del transformador, que normalmente ocurre a causa de los Eventos Eléctricos Transitorios, derivados de los rayos y del rápido crecimiento de los transitorios por las interrupciones.

La reacción por la alta inducción sin acoplamiento de inductancia, virtualmente detiene la longitud de la onda viajera, que es suficiente para forzar al arrestador para operar con más eficiencia. La eficacia del “circuito abierto” a las frecuencias transitorias, causará la onda al doble del voltaje en la entrada del SI, disminuyendo el tiempo de reacción del arrestador.

Otro factor a considerar en el uso de este concepto, es la aplicación de la tecnología. ESTA ES UNA TECNOLOGÍA BASADA EN LOS PARÁMETROS MÁS IMPORTANTES DE UNA DESCARGA ELÉCTRICA ATMOSFÉRICA. Principalmente, la onda viajera relacionada con los Efectos Eléctricos Transitorios del Rayo, moviéndose a una alta velocidad. La inercia del movimiento de esa onda es tal, que se evitará haciendo un ángulo recto cambiando tantas veces como sea posible, incluso saltando através de un espacio de aire. Usando esta característica, los componentes de una Subestación distribuidos en planta, pueden diseñarse para mejorar el desempeño de los sistemas de protección de la Subestación.

La figura 6, ilustra una aplicación del concepto en donde el SI está integrado dentro del Diseño de la Subestación. En este Diseño, se hacen tres cambios de dirección de 90°, en donde la línea de alimentación está dirigida al interior del arrestador de surge, es el primer cambio de dirección. Conceptualmente, esta sería la configuración ideal. El Spline Ball Ionizer (3) SBI-48 de LEC, también se usa para PREVENIR rayos como cualquier componente de la Subestación.

EFFECTOS DE UNA FALLA DEL ARRESTADOR

Los arrestadores de surge fallan como resultado de múltiples operaciones, una muy alta corriente de surge o por ambas cosas. Esto es, tienen un límite en su vida útil. Esta es entonces la razón de tantas preguntas sobre el

impacto que causará en la subestación la pérdida de uno o más de los arrestadores con los Eventos Eléctricos Transitorios o Surge subsecuentes. Las consecuencias de diferentes formas de estos eventos y los resultados del uso de solamente un arrestador con el SI, se evalúan en el Apéndice de este documento.

También fue necesario hacer pruebas de los límites de seguridad del SI. Estas pruebas fueron hechas por un Laboratorio independiente. Las pruebas incluyen dos aspectos: 1) La prueba de la Elevación de Temperatura del Interceptor de Surge y 2) La prueba de Corriente de Corto Circuito. La primera prueba, es para verificar la capacidad del SI para una conductividad continua de la corriente normal relativa, sin importar el consumo de energía a 60 Hz. La temperatura del SI, es medida durante el tiempo de estabilización de la temperatura alcanzada. La segunda prueba, fue para determinar la capacidad del SI para la resistencia mecánica y térmica, bajo condiciones de corto circuito y condiciones de corrientes de corto tiempo, respectivamente. La prueba de corriente, fue hecha con 10 KA (RMS) y una duración de menos de 0.03 microsegundos.

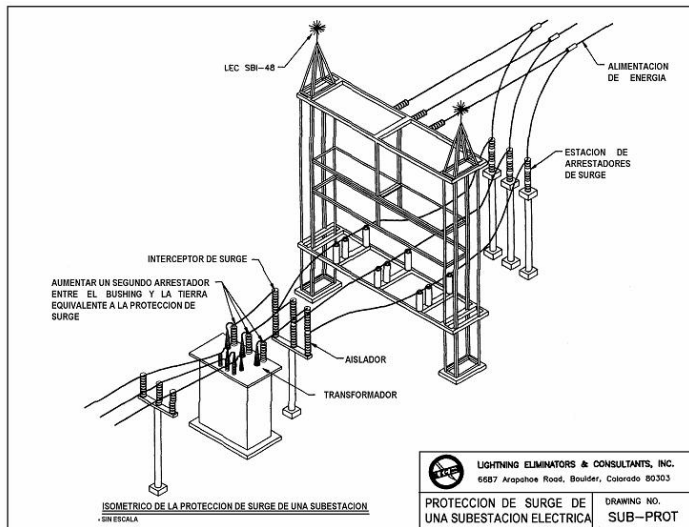


FIGURA 6.

CONCLUSIONES

El uso del Interceptor de Surge (SI), aumentará la capacidad del sistema de PROTECCIÓN para Subestaciones Eléctricas, y finalmente, permite el uso de bajos Niveles de Aislamiento Básico (BIL), dentro de la Estaciones de Transformadores.

Configurando la Subestación para hacer uso de la inercia de la onda de surge, se aumenta un factor de protección adicional. La única restricción, es que la estación de arrestadores, deberá ser calculada para manejar toda la Energía de Surge que pueda presentarse en la Estación arriba del voltaje de enlace (clamping). El uso del Sistema de Arreglo de Disipación por Ionización (DAS[®]) de LEC o los Spline Ball Ionizers (SBI[®]), como protección contra rayos, aislarán a la Subestación de impactos directos, también se puede decidir en PREVENIR todos los rayos con el DAS[®] o REDUCIR el riesgo de un rayo, colectando los otros con los SBI[®].

La instalación de los sistemas de PROTECCIÓN mencionados, reducirá los costos de construcción de una Subestación y aumentará su confiabilidad significativamente, eliminando las causas principales de las pérdidas en una Subestación.

REFERENCIAS:

- (1) (1) “Risk-Free Substation Protection that Costs Less” por Roy B. Carpenter, Jr. y Ted Orrell, Lightning Eliminatros & Consultants, Inc., Marzo 1990.

(2) (2) “Design Criteria for Lightning Protection of HV Substations”, por J. Panek, P.F. Albretch, y H. Elaih, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7 N° 2, Abril 1992, p. 489 – p. 498.

Rev. 7/97

07/99 Td.

APÉNDICE 1

DESEMPEÑO DEL INTERCEPTOR DE SURGE®

CONFIGURACIONES ALTERNAS

El Interceptor de Surge® SI, ha sido diseñado para facilitar el Diseño del Sistema de Protección contra Descargas Eléctricas Atmosféricas, que virtualmente libera de riesgos a los transformadores de alto voltaje, subestaciones y motores. El riesgo es eliminado o reducido a valores aceptables para el paso de corrientes de surge nocivas potencialmente, o elevaciones de voltaje en el componente protegido.

Para lograr este propósito, se requiere un Interceptor de Surge®. LEC ha asignado el nombre de acuerdo con la función que se va a efectuar. Para asegurar que se eliminará un riesgo específico (confiabilidad), el SI deberá ser muy confiable y operar en un circuito donde la confiabilidad ha sido base de sus componentes y en cierta forma redundante. Las series de circuito híbrido propuestas por LEC, ofrecen justamente esa confiabilidad. Esto puede ser mucho mejor ilustrado por medio de una revisión de los datos obtenidos en las pruebas.

Los diferentes tipos de falla potencial son:

1. Pérdida de la estación de arrestadores.
2. Pérdida del arrestador secundario.
3. Pérdida del SI.

El único tipo de falla razonable para el SI, es el circuito abierto. Situación muy improbable con la probabilidad de menos de uno en al menos 1000 años-sistema. Los arrestadores de surge, son los componentes con mayor probabilidad de que fallen ambos al mismo tiempo, es mucho menor de 1 sobre 100 años-sistema, si se seleccionan los arrestadores adecuados al hacer el diseño.

Después de ver los tipos de falla más probable de un SI en un Sistema de Protección basado en las series híbridas, está la pérdida de uno de los dos arrestadores de surge, es por tanto necesario, entender el resultado de una falla, ya sea en el arrestador primario o en el secundario.

La Figura A-1, ilustra las tres posibles configuraciones a probarse. La primera Figura A-1-1, es el primer circuito de la serie híbrida, el cual fue probado con tres diferentes corrientes de surge, para evaluar la respuesta del circuito. El circuito

ilustrado por la Figura 2 en la parte principal de este documento, representa el circuito equivalente del promedio de una subestación de capacidad media con el SI instalado.

Las Figuras A-2, A-3, y A-4, presentan el SI basado en la respuesta del circuito de la serie híbrida para varios niveles de corrientes de surge, i.e. corrientes de pico de 10.5 KA, 90 KA y 155 KA, respectivamente. La Figura A-5, presenta el desempeño de arrestador de surge solo. La Figura A-6, presenta los resultados de la pérdida del arrestador de estación primario. La Figura A-7, presenta los resultados de la pérdida del arrestador secundario. Los resultados del voltaje de pico impresos en la carga (Transformador simulado), están tabulados para varias condiciones en la Tabla A-1.

Las conclusiones son obvias: En relación con el tipo de falla considerada, la cara (el Transformador), está siempre sujeta a un voltaje transitorio bajo, cuando está protegido por un Sistema de PROTECCIÓN de la serie híbrida, aún después de la falla del componente. De ahí que, la confiabilidad de los sistemas protegidos en la Subestación, se incremente significativamente.

La confiabilidad suministrada, se obtiene como resultado de la PROTECCIÓN ABSOLUTA ofrecida por este concepto de PROTECCIÓN. Protección total, es el resultado de un mayor parámetro de desempeño del SI. Previene el paso de CUALQUIER transitorio de alta frecuencia (con elevación rápida).

Nota: El Interceptor de Surge® (SI), está patentado en sus diferentes tipos y modelos.

TABLA A-1 RESULTADOS DEL DESEMPEÑO DEL INTERCEPTOR DE SURGE®			
<i>CONFIGURACIÓN DEL PROTECTOR</i>	<i>VOLTAJE DE SURGE (LÍNEA)</i>	<i>CORRIENTE DE SURGE</i>	<i>VOLTAJE PICO V₂ EN TRANSFORMADOR</i>
SERIE HÍBRIDA	50 KV 500 KV 500 KV	10.5 KA 90.5 KA 155.0 KA	7.9 KV 8.5 KV 9.5 KV
SI ANTES DEL ARRESTADOR DE SURGE	500 KV	155.0 KA	11.0 KV
SI ANTES DEL ARRESTADOR DE SURGE	500 KV	155.0 KA	9.0 KV
EL ARRESTADOR DE SURGE	500 KV	155.0 KA	16.0 KV

SOLAMENTE

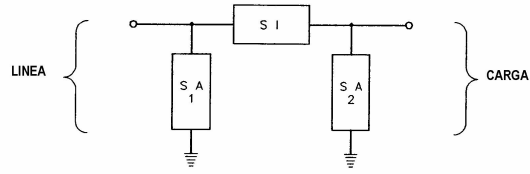


FIGURA 1: LA CONFIGURACION

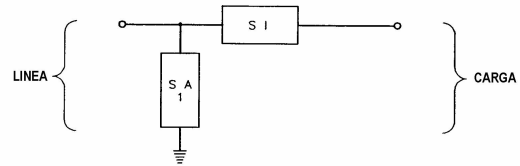


FIGURA 2: CONEXION DE ENTRADA CONFIGURACION L

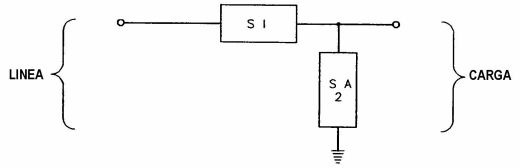
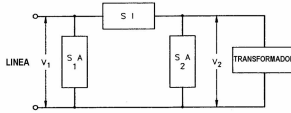
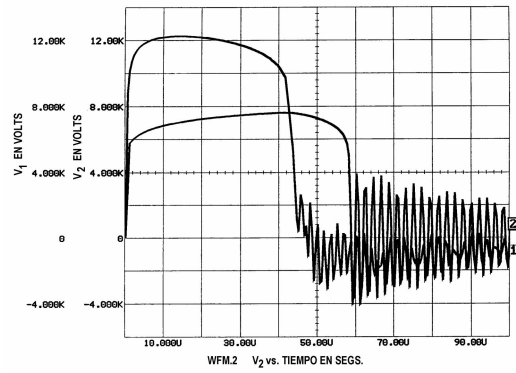


FIGURA 3: FASE DE ENTRADA CONFIGURACION L

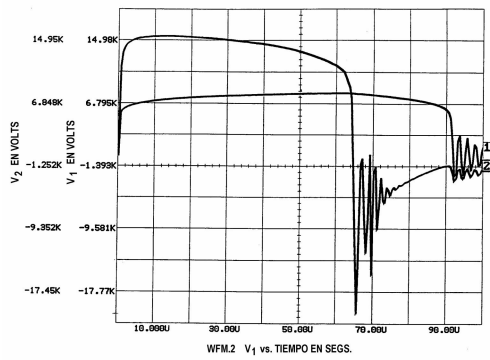
FIGURA A-1: CONFIGURACIONES DE PRUEBA



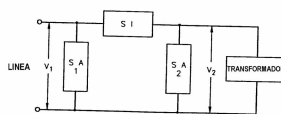
V₁ E_p = 12.5 KV
 V₂ E_p = 7.9 KV
 CORRIENTE DE SURGE = 10.5 KA
 VOLTAJE DE SURGE = 50 KV

FIGURA A-2

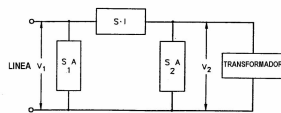
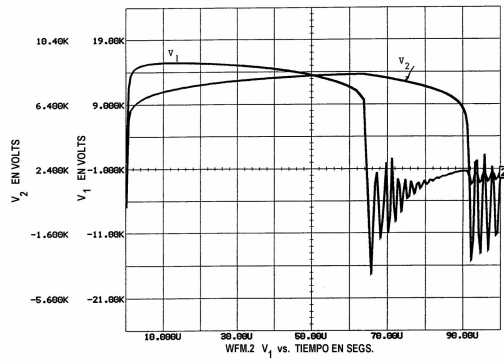
FIGURA A-3



V₁ E_p = 15.5 KV
 V₂ E_p = 8.5 KV
 VOLTAJE DE SURGE = 500 KV
 CORRIENTE DE SURGE = 90 KA



NOTA: LAS ESCALAS SON DIFERENTES



NOTA: LAS ESCALAS SON DIFERENTES

FIGURA A-4

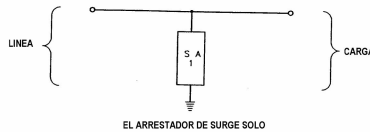
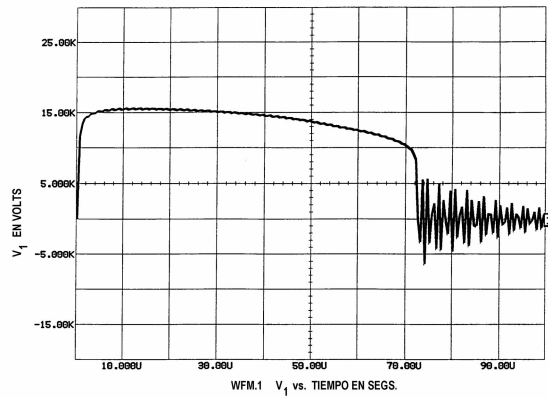
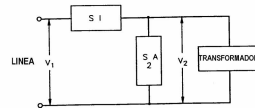
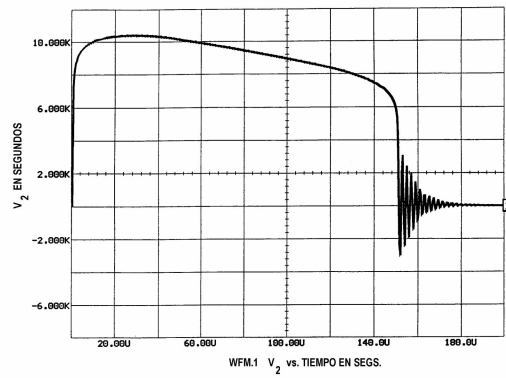
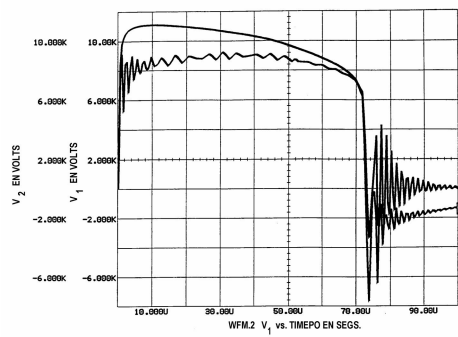


FIGURA A-5



VOLTAJE DE SURGE DE PICO 500 KV
 CORRIENTE DE SURGE DE PICO 155 KA
 $V_2 - E_p$ 11 KV

FIGURA A-6



$V_1 - E_p$ = 11 KV
 $V_2 - E_p$ = 9 KV
 CORRIENTE DE SURGE DE PICO = 90 KA
 VOLTAJE DE SURGE DE PICO 500 KV

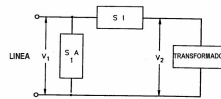


FIGURA A-7