

Determinación de métodos de control del voltaje transitorio de restablecimiento durante la desenergización de reactores conectados en barras de 500 kV

Pilicita Veloz Santiago David, Pérez Yauli Fabián Ernesto, Dután Amay Luis Manuel

Resumen- El presente estudio técnico analiza y determina los métodos de mitigación para control de altos valores de Voltaje Transitorio de Restablecimiento (TRV por sus siglas en inglés) que se presentan durante la operación de apertura de reactores de barra a un nivel de voltaje de 500 kV, mediante la implementación de un caso general tomado de la bibliografía técnica, en el software ATP Draw. Para realizar el análisis, previo a la determinación de métodos de control, se requiere de una modelación detallada de una bahía típica de reactor de barra, con todos los elementos constitutivos que pueden afectar a la respuesta del TRV, así como la implementación de modelos para el arco eléctrico en los terminales del interruptor, que permitan describir el comportamiento dinámico del arco. Posteriormente, a través de simulación se determinan los niveles de corriente de corte que son más severos durante la operación de apertura. De los datos obtenidos del TRV en los diferentes casos de estudios, se procede a detallar sus valores y formas de onda, considerando que estos datos son los que determinan los métodos que se requiere aplicar para su control. Finalmente, los métodos aplicados se basan en la supresión de los picos del TRV, así como la tasa de crecimiento del voltaje de recuperación, que permitan tener una idea cuantitativa del TRV y mitigar sus efectos, como son: la reignición del arco y el escalonamiento de voltaje; que por consiguiente provoca daños en los equipos asociados al reactor.

Palabras Clave— Arco eléctrico, corriente de corte, interruptor de potencia, reactor de barra, tasa de crecimiento del voltaje de recuperación y voltaje transitorio de restablecimiento

I. INTRODUCCIÓN

La operación de apertura de los reactores de barra de las subestaciones merece un análisis particular, para el dimensionamiento del reactor y los equipos asociados en las bahías de reactores de barra, el propietario de estas instalaciones se basa en lo establecido en normas internacionales y ejecuta estudios eléctricos utilizando modelos disponibles por defecto en diversos programas computacionales. El estudio que se va a realizar hace referencia a la maniobra de apertura del reactor de barra donde se presentan problemas originados principalmente por el Voltaje

Transitorio de Restablecimiento (TRV por sus siglas en inglés), el cual aparece a los terminales del interruptor de potencia mientras se realizan dichas maniobras, que en muchos casos son las causantes del reencendido del arco eléctrico.

Con este trabajo se busca ejecutar estudios transitorios para sistemas de extra alto voltaje en lo referente a la desconexión de los reactores de barra haciendo uso de una modelación adecuada del sistema bajo estudio y determinar métodos de control para valores altos de TRV.

II. ANÁLISIS DEL VOLTAJE TRANSITORIO DE RESTABLECIMIENTO

Para la determinación de los métodos de control del TRV, en primer lugar, se debe definir los conceptos básicos como el interruptor de potencia, el arco eléctrico, reactores de barra, sobrevoltaje transitorio de restablecimiento y los modelos de arco eléctrico.

A. Interruptor de potencia

El interruptor de potencia es el encargado de interrumpir la corriente que fluye a través del mismo ya sea en caso de fallas del sistema o condiciones normales de operación [1]–[3].

El interruptor de potencia se puede clasificar de acuerdo a los siguientes criterios [4]–[6]:

- Características externas.
- Medio de interrupción de la corriente.
- Según el mecanismo de operación.

B. Reactor de barra

Los reactores de barra son usados para controlar el aumento de voltaje en un circuito abierto o por la desconexión de grandes cargas. Es decir el objetivo principal para el uso de reactores es la compensación reactiva, como un medio económico para controlar el nivel de voltaje y contribuir a la estabilidad transitoria [7], [8].

C. El Arco eléctrico

De manera general el arco es representado como una resistencia conectada entre los contactos o electrodos, como un

S. Pilicita Veloz y F. Pérez Yauli son parte de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, Escuela Politécnica Nacional y L. Dután Amay es colaborador de Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP- Unidad de Negocios

Translelectric, Quito 170525, Ecuador (e-mail: santiago.pilicita@epn.edu.ec; fabian.perez@epn.edu.ec; luis.dutan@celec.gob.ec).

elemento más que conforma el circuito, el arco se comporta como una resistencia no lineal con el voltaje del arco en fase con la corriente de arco [9].

1) Operación de apertura

Se realiza para desconectar o interrumpir alguna parte del sistema, mediante la operación de apertura del sistema de accionamiento, estando cerrado el interruptor hace que los contactos se separen en la cual se forma una separación, dicha separación hace que en los contactos se genere el arco eléctrico debido a que el espacio está altamente ionizado [10], [11]. La interrupción de corriente consiste en que este espacio altamente ionizado sea convertido en un buen aislante con la finalidad de que la corriente deje de fluir a través de él. A medida que la corriente senoidal se aproxima al cruce por cero, el elemento aislante pierde rápidamente la temperatura, con lo cual recupera sus características aislantes, como se muestra en la Figura 1 [12]. En esta última condición, cuando los contactos se abren y la corriente se aproxima al cruce por cero, es en donde se desarrolla un voltaje transitorio a través de los contactos, dicho voltaje transitorio es conocido como TRV y en donde su duración está en el orden de los milisegundos [12].

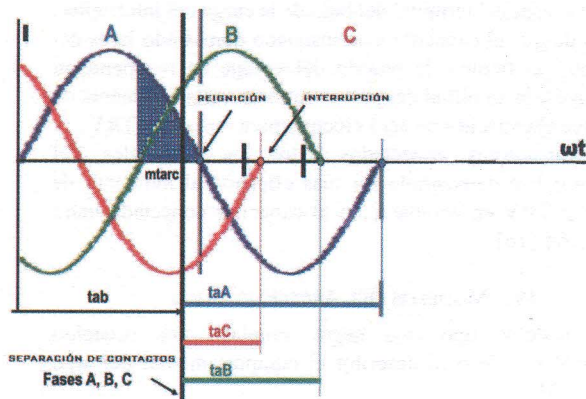


Fig. 1 operación de apertura controlada de un banco de reactores trifásicos [12].

D. Voltaje transitorio de restablecimiento

Los transitorios son causados por operaciones de conmutación. Cuando los contactos de un interruptor comienzan a separarse, se desarrolla un voltaje transitorio a través de estos. Este voltaje, es conocido como TRV, el cual está presente cuando la corriente de arco se extingue en un cruce por el cero natural y en los sistemas reales su duración es del orden de milisegundos [13], [14].

1) Corriente de origen inductivo

La operación de apertura del interruptor para la desenergización de reactores de barra, se enmarca en la interrupción de pequeñas corrientes inductivas. Durante la apertura del interruptor generalmente las corrientes inductivas no son considerablemente altas. Por lo tanto, se dan los efectos mencionados anteriormente, para el caso del reactor se da el fenómeno de corriente de corte, debida a la inestabilidad del

arco eléctrico, como se muestra en la Figura 2 [15].

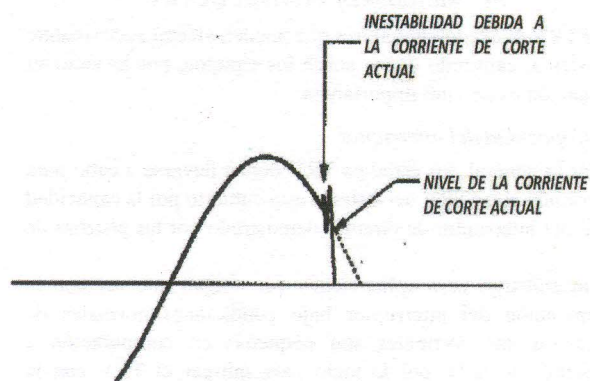


Fig. 2 Corriente a través del interruptor [14].

Si la corriente se interrumpe en el cruce por cero, la interrupción es normal (interruptor ideal) y los TRV generalmente están dentro de los valores especificados. Sin embargo, si ocurre una interrupción prematura (unos milisegundos antes del cruce por cero), debido a la corriente de corte, la interrupción será anormal (interruptor real) y puede causar re-ignición o reencendido del arco y como consecuencia un sobrevoltaje de alta frecuencia, como se muestra Figura 3 [13].

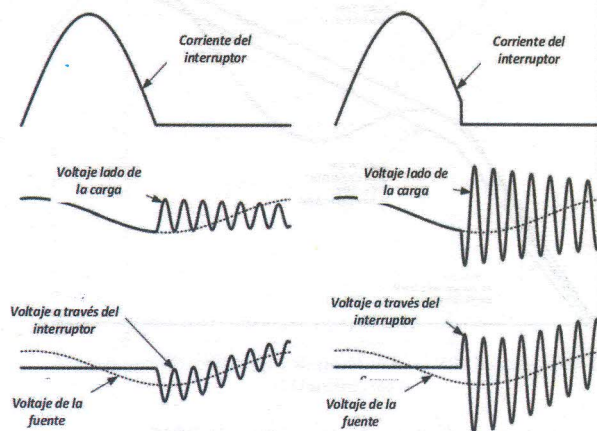


Fig. 3 Formas de onda de la corriente a través del interruptor, del voltaje de lado del reactor y el voltaje a través del interruptor [13].

2) Estándares para análisis de TRV

Dado que el TRV tiene su origen basado en el tipo de circuito (resistivo, capacitivo e inductivo) y también depende si se origina debido a una falla o a maniobras de apertura. Para cada una de estas instancias se definen estándares y procedimientos para su estudio y análisis. El presente trabajo hace especial enfoque en el estándar IEEE Std C37.015-2009 (Revision of IEEE Std C37.015-1993), el cual define las características básicas del TRV debido a la conmutación de reactores, considerando únicamente banco de reactores monofásicos aterrizados [14].

También se dispone del estándar IEEE Std C37.011-2011 (Revision of IEEE Std C37.011-2005), el cual es una guía para

el estudio de TRV, en interruptores de potencia [16].

III. MÉTODOS DE CONTROL DE TRV

El TRV puede tomar valores que pueden afectar severamente al sistema, causando daños sobre los equipos, por lo tanto su mitigación es de vital importancia.

A. Capacidad del interruptor

Por lo general, los estudios TRV deben llevarse a cabo para determinar si un TRV del sistema está cubierto por la capacidad TRV del interruptor de circuito demostrado por las pruebas de tipo.

Sin embargo para aplicaciones que tengan que ver con la conmutación del interruptor bajo condiciones normales de operación, las corrientes son pequeñas en comparación a corrientes de falla, por lo tanto para mitigar el TRV con la capacidad de soportabilidad del interruptor, basta que la envolvente del TRV o la forma de onda del TRV este bajo la envolvente definida o establecida por el fabricante, en caso de que no cumpla este requisito, se debe recurrir a un interruptor con mayor capacidad dieléctrica [17].

Las envolventes del TRV para 2 parámetros tal como se muestra en la Figura 4 están definidos de la siguiente manera:

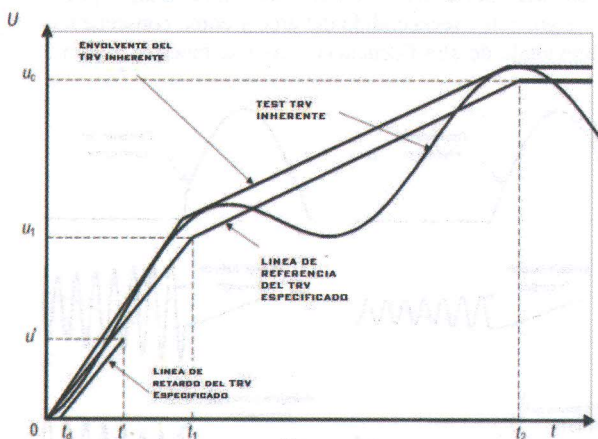


Fig. 2 Envolvente de TRV (a) Envolvente de 2 parámetros (b) Envolvente de 4 parámetros [17]

- 1) u_2 : Voltaje de Referencia (Valor pico de TRV)
- 2) t_2 : Tiempo de crecimiento de u_2 en microsegundos.

Las envolventes del TRV para 4 parámetros están definidos de la siguiente manera:

- 1) t_1 : Tiempo de crecimiento de u_1 en microsegundos.
- 2) u_2 : Segundo Voltaje de Referencia (Valor pico de TRV).
- 3) t_2 : Tiempo de crecimiento de u_2 en microsegundos.

Estos parámetros han sido definidos por el estándar IEEE Std C37.06-2009, para interruptores por debajo de los 100 kV y para los interruptores que funcionan a un nivel de voltaje por encima de 100 kV.

B. Pararrayos

Los pararrayos de óxido metálico se clasifican en función de

la capacidad de absorber una cantidad determinada de energía y, posteriormente, de soportar la aplicación inmediata de un determinado valor de sobrevoltaje a 60 Hz (un sobrevoltaje temporal) durante 10s. En donde el pararrayos es una resistencia no lineal dependiente de voltaje y funciona al limitar el voltaje a su característica de voltaje-corriente (es decir, esencialmente corta el voltaje) [18].

C. Capacitor Grading

El estándar [16], menciona que la instalación de un capacitor entre los terminales del interruptor o entre fase – tierra en el lado de la carga, permitirá tener los siguientes efectos:

- 1) Disminuye la frecuencia de oscilación y el RRRV del TRV del lado de la carga.
- 2) Aumenta el tiempo de retraso del TRV del lado de la carga.

Históricamente se usaron resistencias en los interruptores de chorro de aire para reducir el RRRV y facilitar la interrupción. Como los interruptores automáticos SF6 son más sensibles a la parte inicial del TRV (primeros microsegundos), el uso de condensadores adicionales ha demostrado ser más eficiente.

Para que el capacitor tenga efecto sobre el TRV, debe ser instalado cerca del terminal del lado de la carga del interruptor, en caso de que el capacitor este instalado demasiado lejos del interruptor el tiempo de retardo del voltaje de recuperación disminuye y la amplitud del primer salto de voltaje aumenta de modo que el capacitor no será efectivo para reducir el TRV.

Los capacitores conectados entre los terminales del interruptor han demostrado ser más eficiente al momento de mitigar el TRV en comparación al capacitor conectado entre fase – tierra [16].

IV. MODELOS DEL ARCO ELÉCTRICO

Los modelos tipo caja negra, emplean una ecuación diferencial simple para describir el comportamiento del arco eléctrico [3].

A. Modelo de Cassie

Este tipo de modelo asume un canal de arco con temperatura constante, densidad de corriente e intensidad de campo eléctrico. Los cambios de la conductancia del arco resultan de los cambios en la sección transversal del arco; la eliminación de energía se obtiene por convección, ver Figura 5 [2].

Este modelo viene dado por la ecuación (1).

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\left(\frac{v}{v_0} \right)^2 - 1 \right) = \frac{1}{\tau_c} \left(\left(\frac{1}{v_0 g_c} \right)^2 - 1 \right) \quad (1)$$

* En donde v_0 es el voltaje inicial del arco en estado estable, v es el voltaje, g es la conductancia y τ_c es la constante de tiempo y está dada por la siguiente expresión $\tau_c = Q_0/P_0$ donde Q_0 y P_0 son energía y potencia respectivamente.

Este modelo es aplicable para aquellas condiciones en donde se requiere simular comportamiento del arco a corrientes relativamente grandes (100 A a 100 kA), es decir altas

temperaturas en donde el plasma del arco es muy alta.

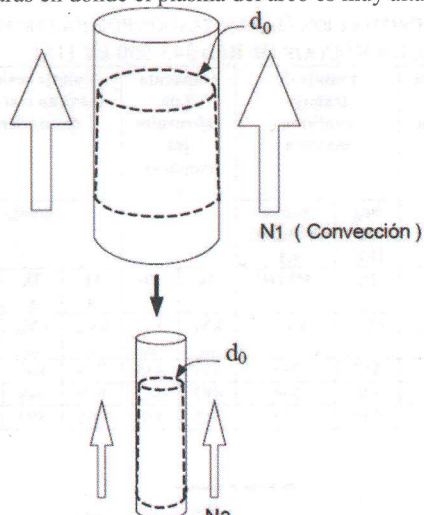


Fig. 3 Canal de arco eléctrico según Cassie [2].

B. Modelo de Mayr

Este modelo supone que los cambios de temperatura de arco son dominantes, y el tamaño y el perfil de la columna de arco son constantes. La conducción térmica es el principal mecanismo de eliminación de energía [3], ver Figura 6 [3].

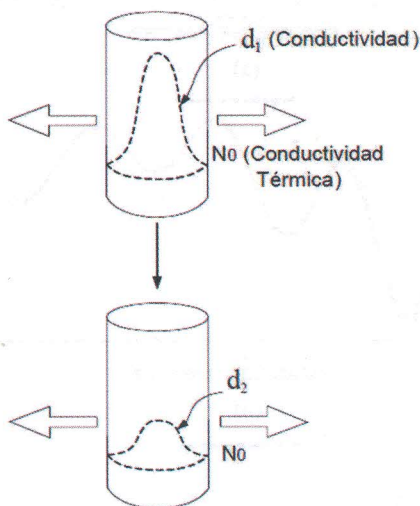


Fig. 4 Canal del arco eléctrico de acuerdo a Mayr [3].

Este modelo viene dado por la ecuación (2).

$$\frac{1}{g_m} \cdot \frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{v i}{P_0} - 1 \right) = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{i^2}{P_0 g_m} - 1 \right) \quad (2)$$

En donde en g_m es la conductancia del arco, i es la corriente de arco, v es el voltaje de arco y P_0 es la pérdida de potencia de estado estacionario.

Este modelo describe el comportamiento del arco eléctrico cercano al cruce por cero, en donde la temperatura del arco es mucho menor comparado al modelo de Cassie, por lo tanto su aplicación en cuanto a la simulación del comportamiento del

arco eléctrico se limita a pequeñas corrientes de pre-arco hasta 100 A [3].

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente análisis hace uso de los resultados obtenidos durante la operación de apertura del interruptor en condiciones de demanda máxima, los cuales se obtuvieron en base a la topología de una bahía típica de reactor de barra, es decir considerando todos los elementos que son necesarios para realizar un estudio de TRV, para lo cual se debe tener en cuenta las características del reactor y del circuito [14], el esquema del modelo implementado se muestra en la Figura 7.

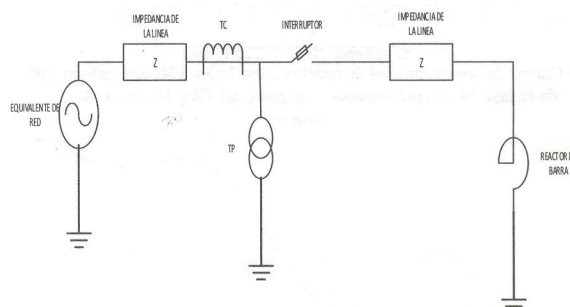


Fig. 7 Esquema de la modelación para la bahía de reactor de Barra.

A. Aplicación de curvas de soportabilidad de interruptores de potencia

Este tipo de estudio por lo general se lo realiza para determinar si el valor de TRV del sistema, que se origina por la operación de apertura del reactor, está cubierto por la capacidad del TRV del interruptor de la bahía [16]. Por lo tanto, es el principal estudio que se debe hacer en cuanto a métodos de control del TRV.

Para el caso de estudio, el interruptor debe ser capaz de controlar los altos valores de TRV, además como se menciona en [19], los valores obtenidos en pruebas para la corriente de corte (I_{ch}), las cuales fueron realizadas a interruptores que funcionan a un nivel de extra alto voltaje mayor a 400 kV, determinan valores típicos de entre 10 a 16 A, y únicamente se empleará las curvas de soportabilidad T30 y T10 (30 % y 10% de la corriente nominal de cortocircuito respectivamente), debido a la alta tasa de crecimiento que posee, ocasionada por la carga inductiva de la bahía de reactor de barra; las demás curvas T60 y T100 (60% y 100% de la corriente nominal de cortocircuito), tienen una mayor aplicación a TRV por origen de carga capacitiva.

El análisis determina la posibilidad de que exista reignición o reencendido, entre los contactos del interruptor, en base a las formas de onda y valores del TRV, como se muestra en la Figura 7 y en la Figura 8.

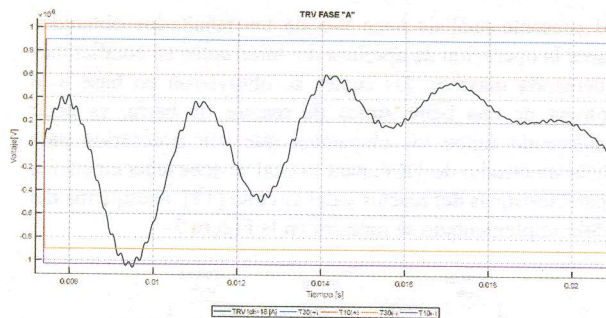


Fig. 6 Curvas de soportabilidad de interruptores T10 y T30, aplicado al TRV de la fase "A"-Representación completa del TRV Ich de 16 A.

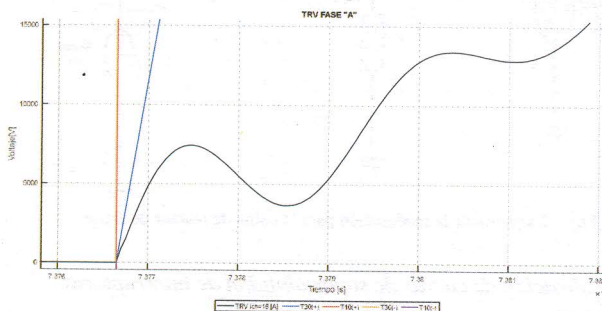


Fig. 5 Curvas de soportabilidad de interruptores T10 y T30, aplicado al TRV de la fase "A"-Primeros picos del TRV durante 5 μs Ich 16 A.

El límite de soportabilidad para un interruptor tipo T10 es de 1.03 MV y para un interruptor tipo T30 es 899 kV.

En la Tabla I, se muestran los resultados obtenidos de los valores pico de TRV para cada una de las 3 fases, de los casos de I_{ch} (corriente de corte) de 12, 14 y 16 A.

TABLA I

VALOR PICO DE TRV DE LAS 3 FASES PARA UN I_{ch} DE 12, 14 Y 16 A

I_{ch}	Fase "A" kV	Fase "B" kV	Fase "C" kV
16	-1060	-1001	1061
14	-988.58	-946.65	999.60
12	-930.38	-895.35	937.27

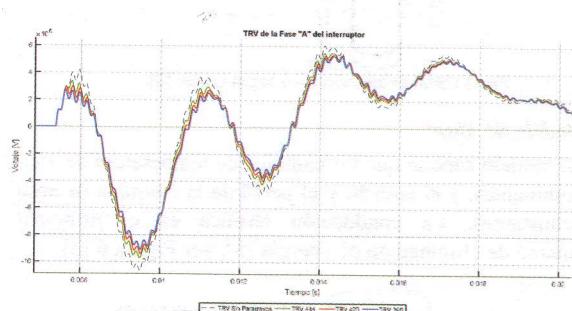
B. Aplicación de pararrayos para control de TRV

Generalmente el dimensionamiento de pararrayos para subestaciones está enfocado para fallas en líneas de transmisión además de sobrevoltajes atmosféricos. Observando los valores obtenidos en la Tabla I, donde el TRV alcanza valores significativos; por lo tanto, es importante realizar un estudio también para sobrevoltajes de maniobra, ya que pueden superar el voltaje soportado por los equipos de la bahía.

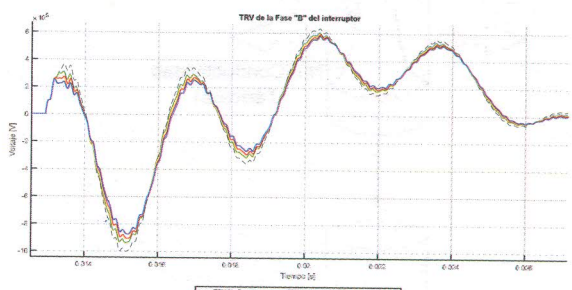
Para el caso de estudio se empleó diferentes tipos de pararrayos los cuales pertenecen a la clase 4; con una capacidad de voltaje de red U_m 245-550 kV y una capacidad de energía de 10,5 kJ/kV (U_r), como se muestra en la Tabla II.

TABLA II DATOS DE PROTECCIÓN GARANTIZADOS POR FABRICANTE PARA UN VOLTAJE DE RED 245-550 kV [15].

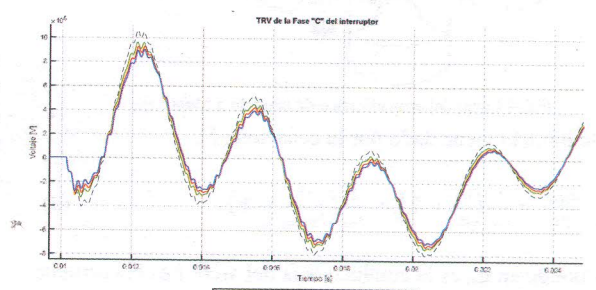
Volta je nominal de red	Volta je nominal	Voltaje de trabajo continuo máxima		Capacida d de sobrevoltajes temporales		Voltaje residual máximo con onda de corriente		
		Seg ún IEC	Seg ún ANSI/IE EE	1s	10s	1k A	2k A	3k A
U_m	U_r	U_c	$MCOV$	1s	10s	1k A	2k A	3k A
kV _{rms}	kV _{rms}	kV _{rm}	kV _{rms}	kV _r	kV _r	kV _{pi}	kV _{pi}	kV _{pi}
550	396	317	318	459	435	773	800	820
	420	336	336	487	462	819	849	870
	444	349	353	515	488	866	897	920



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 TRV medido entre los terminales del interruptor de potencia, aplicando los 3 pararrayos de voltaje continuo máximo de 444 kV, 420 kV y 396 kV (a) Fase "A" (b) Fase "B" (c) Fase "C".

Para el presente análisis se hace uso de los pararrayos que

funcionan a una voltaje máximo de red de 550 kV_{rms}, los cuales tienen una voltaje nominal de 444, 420 y 396 kV_{rms} [15], [20].

En la simulación realizada los pararrayos fueron ubicados del lado del reactor, ya que en este lado se tienen los picos más altos de sobrevoltaje, permitiendo limitar los picos máximos y mínimos del TRV a valores inferiores como se puede observar en la Figura 9 y reducir los picos de sobrevoltaje que se originan del lado del reactor de barra, como se muestra en la Tabla III.

El pararrayos de voltaje nominal de 396 kV_{rms} reduce en un 15% y un 11.71% el valor pico máximo y mínimo respectivamente de la fase “C”.

Tabla III
TRV VALOR PICO MÁXIMO Y MÍNIMO DE LAS 3 FASES APLICANDO LOS 3 TIPOS DE PARARRAYOS.

Tipo Pararrayos	VALOR MÁXIMO		
	TRV Fase “A” kV	TRV Fase “B” kV	TRV Fase “C” kV
444	553.094	605.134	963.006
420	542.326	592.743	929.120
396	531.307	580.535	901.818
Sin Pararrayos	608.623	635.782	1,061.000
Tipo Pararrayos	VALOR MÍNIMO		
	TRV Fase “A” kV	TRV Fase “B” kV	TRV Fase “C” kV
444	-970.894	-937.894	-752.889
420	-938.503	-905.362	-731.167
396	-907.893	-875.002	-709.249
Sin Pararrayos	-1,060.970	-1,001.130	-803.297

C. Aplicación de capacitores grading para control de TRV

Otra forma de controlar estos sobrevoltajes, es mediante la instalación de capacitores monofásicos en cada una de las fases, lo que evita la posible reignición en la mayoría de los interruptores. Los capacitores recomendados en [16] para control de TRV, oscilan entre 100-1500 pF.

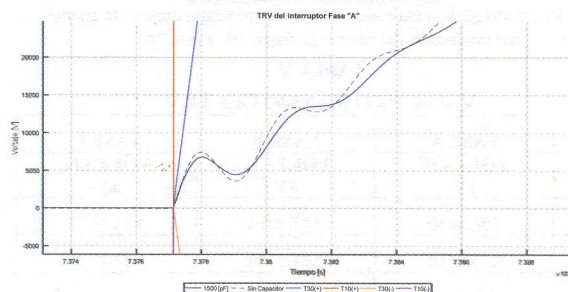
Para el presente trabajo se hace uso de capacitores de 1500 pF, el cual es un valor de capacitancia similar a lo que recomienda la norma [16], para transformadores de potencial capacitivo, para un nivel de voltaje de 500 kV.

La incorporación del capacitor a la salida del interruptor y paralelo a los terminales del interruptor permite la reducción de la tasa de recuperación de voltaje (RRRV); sin embargo, debido a la frecuencia a la cual oscila el TRV, que depende de la frecuencia natural del circuito y que llega hasta un valor de 2 kHz, hace que el capacitor entre en un proceso de carga y descarga, el cual da como resultado el retraso del valor máximo de TRV.

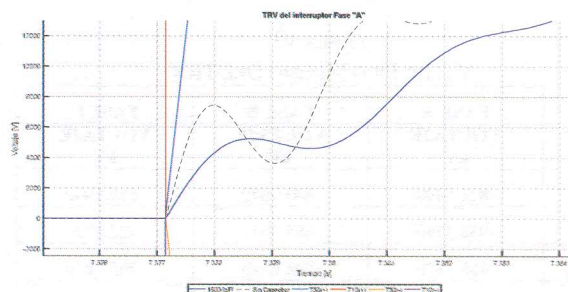
La reducción en el primer pico del TRV se puede observar en la Figura 10, debido a que la forma de onda obtenida posee una pendiente (RRRV) menor en comparación con aquella registrada al no aplicar ningún método de control. Esto permite que los valores del TRV sean menores al caso original, como se muestra en la Tabla IV.

Tabla IV
RRRV OBTENIDO DE AMBOS MÉTODOS DEL CAPACITOR

	Fase A	Fase B	Fase C
	kV/us	kV/us	kV/us
Sin Capacitor	7,45	6,99	-6.91
Capacitor incorporado a la salida del interruptor del lado del reactor	6,75	3,45	-8.02
Capacitor incorporado entre los terminales del interruptor	3.17	1,50	-1.00



(a)



(b)

Fig. 8 Primer pico del TRV de la fase “A” (a) Método capacitor incorporado a la salida del interruptor (b) Método capacitor incorporado entre los terminales del interruptor.

D. Aplicación de mando sincronizado para la apertura del interruptor

Para diseñar este tipo de sincronización se debe considerar que el sobrevoltaje generado el momento de la apertura de los polos no sobrepase el límite de soportabilidad, evitando de esta manera la reignición del arco eléctrico. Para ello, se establecen zonas seguras de operación dadas en amperios o su equivalente en milisegundos, considerando la onda de corriente variable en el tiempo [21].

Como consecuencia de la disminución de la corriente de corte (I_{ch}), el TRV medido entre los terminales del interruptor disminuye en su valor pico, en cada una de las 3 fases como se muestra en la Figura 11, en la cual se muestra el TRV obtenido considerando corrientes I_{ch} de: 10, 12, 14 y 16 A. De esta misma figura se observa que, mientras la apertura sea más próxima al cruce por cero de corriente, el TRV disminuye y queda por debajo de la curva de soportabilidad del interruptor.

La aplicación de interruptores de mando sincronizado,

permite obtener los siguientes resultados.

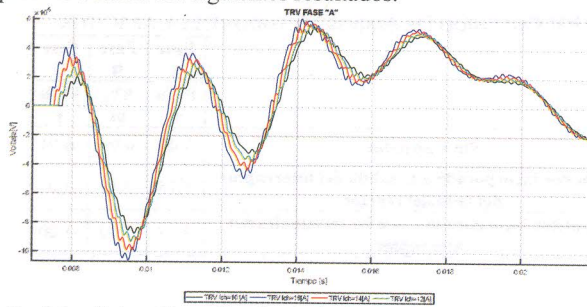


Fig. 9 Resultado gráfico aplicando mando sincronizado durante la apertura del interruptor del reactor de barra, de la fase "A".

TABLA V
VALOR PICO MÁXIMO DEL TRV

I _{ch} A	FASE A	FASE B	FASE C
	VOLTAJE kV	VOLTAJE kV	VOLTAJE kV
10	556.8030	575.4910	873.6570
12	575.0410	593.0340	937.2730
14	592.1340	614.9110	999.6000
16	608.7500	635.7770	1,061.0900

TABLA VI
VALOR PICO MÍNIMO DEL TRV

I _{ch} A	FASE A	FASE B	FASE C
	VOLTAJE kV	VOLTAJE kV	VOLTAJE kV
10	-871.5490	-843.7020	-686.1960
12	-930.3790	-895.3530	-723.5720
14	-988.5820	-946.6580	-763.7870
16	-1,061.2800	-1,001.5700	-803.5120

Como se puede observar en la Tabla V y la Tabla VI, mientras más próximo sea la apertura del interruptor al cruce por cero, el valor del TRV será menor, es así que si se tiene un nivel de I_{ch} de 16 A se tendrá un valor de TRV de 608.75 kV y si se tiene I_{ch} de 10 A éste valor disminuye a 556.8030 kV.

TABLA VII
RESULTADOS DEL TIEMPO DE APERTURA DEL INTERRUPTOR DE LAS 3 FASES

FASES	Corriente de corte			
	10 A	12 A	14 A	16 A
	ms	ms	ms	ms
A	0,5548	0,6682	0,7821	0,8986
B	0,5610	0,6752	0,7912	0,9085
C	0,5600	0,6750	0,7900	0,9060

De los resultados obtenidos en la Tabla VII, se puede observar la diferencia de tiempo que existe en cada uno comparada con el cruce por cero respectivamente, dando como resultado un tiempo de apertura menor a 1 ms, para cada una de

las fases.

VI. CONCLUSIONES

Del análisis realizado a la operación de desenergización del reactor de barra que funciona a un nivel de 500 kV, se llega a tener un TRV de 1.06 MV, con una tasa de crecimiento 6.91 kV/μs, esto se debe al alto valor de inductancia que presenta el reactor de 30 MVar, lo que provoca que el TRV exceda los límites de soportabilidad de los interruptores y por consiguiente se tenga la presencia de reigniciones.

Los tres tipos de pararrayos empleados como método de control, con voltajes nominales de 444 kV, 420 kV y 396 kV, que pertenecen a la clase 4, con un voltaje máximo de red 550 kV, han permitido obtener diferentes resultados. Como ejemplo la fase "C", con una corriente estimada I_{ch} de 16 A y sin ningún método de control, tiene un TRV de 1.061 MV. Empleando los tres tipos de pararrayos se tiene los siguientes valores de TRV para la misma fase: 901.81 kV, 929.12 kV y 963 kV de los pararrayos 396, 420 y 444 respectivamente. Es decir, el pararrayos de 396 kV, corta 159 kV, ocasionando que el pico del TRV disminuya estando por debajo de los límites de capacidad del interruptor.

Teniendo en cuenta el límite de soportabilidad de los interruptores tipo T10 y T30, los resultados muestran que para una corriente estimada I_{ch} de 16 A, el límite de soportabilidad del interruptor T10, el cual es de 1.03 MV, no es lo suficientemente capaz de soportar el TRV, dado que el valor más alto que se tiene es de 1.061 MV, excediendo con 29 kV el límite del interruptor. Sin embargo, para los demás casos, los cuales tienen una corriente de I_{ch} entre 10 A y 14 A, controlar el TRV es posible, aumentando la capacidad del interruptor al máximo, el cual es un interruptor T10.

Del análisis de los dos estados de demanda, se obtienen diferentes valores de TRV, como ejemplo la fase "C"; el valor del TRV es de 1.061 MV y 1.038 MV, en demanda máxima y mínima respectivamente, de la fase "A" se obtiene -1.06 MV en demanda máxima y -1.072 MV en demanda mínima, se puede apreciar que su variación no es muy significativa, debido a lo siguiente: la carga en el caso de estudio no varía, en ambos análisis se hace uso del reactor de barra de 30 MVar y la configuración del circuito se mantiene, por lo tanto los métodos de control aplicados a los dos estados son exactamente iguales.

Al colocar un capacitor grading de 1500 pF instalado a la salida del interruptor (en el terminal del lado del reactor) entre fase - tierra, existe un aumento del RRRV de 6.91 kV/μs a 8.02 kV/μs; Por lo tanto el presente método en la fase "C", no reduce el RRRV del TRV, siendo así un método no aplicable al caso de estudio.

Con un capacitor grading de 1500 pF, instalado paralelo al interruptor, es decir conectado entre los terminales, minimiza el riesgo de reignición, ya que reduce el RRRV del TRV de la fase "C" de 6.91 kV/μs a 1 kV/μs.

De los resultados obtenidos del análisis del mando sincronizado en los dos casos de demanda, se puede decir que la operación de apertura para el presente caso de estudio debe darse cuando la corriente de corte está comprendida en un rango de 10 a 14 A y así poder evitar la reignición.

De los métodos analizados en el presente estudio, es recomendable el uso de una combinación de estos métodos, es decir para reducir los valores picos máximos y mínimos se hace uso del método del pararrayos, para reducir el RRRV del TRV es recomendable el uso de un capacitor grading conectado entre los terminales del interruptor y si se requiere reducir el valor alto del TRV lo más recomendable es el aumento de la soportabilidad del interruptor.

REFERENCIAS

- [1] C. Rosero y L. Ruales, "Análisis del arco secundario en riecerres monopolares en el sistema de transmisión de 500 kV", Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2014.
- [2] J. Hernandez, "Implementación de Modelos de Arco Eléctrico para Simulación de Interruptores de Potencia en el EMTP", Para obtener el Grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México, D. F., 2006.
- [3] J. Castaño y H. Rodríguez, "Impacto de Modelos del Arco Eléctrico de un Interruptor de Potencia en un Sistema Eléctrico", Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2015.
- [4] M. Saldaña y M. Antonio, "Metodología para determinar las especificaciones técnicas de interruptores de potencia", *Universidad Nacional de Ingeniería*, 2010.
- [5] R. Barajas, "Modernización de Interruptores de Potencia de 400 kV en la Subestación Eléctrica Texcoco", Tesis para obtener el título de Ingeniero Electricista, Instituto Politécnico Nacional, Mexico, D. F., 2010.
- [6] J. Cuacuas, "Simulación de Interruptores de Potencia con gas SF6 en ATPDraw", Tesis para obtener el título de Ingeniero Electricista, Instituto Politécnico Nacional, México, D. F., 2010.
- [7] E. Moreno y V. Hinojosa, "Análisis de estabilidad transitoria para el sistema eléctrico ecuatoriano utilizando redes neuronales artificiales", Escuela Politecnica Nacional, Cenace, Quito, Ecuador, Técnico, 2012.
- [8] A. Pazmiño y F. Xavier, "Análisis de Compensación Reactiva Serie en la red de 230 kV del Sistema Nacional Interconectado Ecuatoriano", *JIEE XXV*, vol. 25, dic. 2012.
- [9] I. Pérez, "Interruptores de potencia y extinción del arco eléctrico", Para acreditar la experiencia recepcional de la carrera, Universidad de Veracruz, C.D. Mendoza., Ver., 2012.
- [10] R. Saavedra y G. Adolfo, "Modelado del Interruptor de Potencia", Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Electricista, Universidad de los Andes, Mérida, 2008.
- [11] C. Wagner y H. Smith, "Analysis Of Transient Recovery Voltage (TRV) Rating Concepts", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, núm. 11, pp. 3353-3363, nov. 1984.
- [12] D. P. Landazuri Moreno y M. Rumipamba Yungan, "Estudio y propuesta de un tipo de interruptor a ser implementado en la línea de 500 kV mediante la modelación en ATP", Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniera Eléctrica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2011.
- [13] J. Martinez, *Power System Transients Parameter Determination*, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business., vol. 1. New York, United States of America: Taylor and Francis Group, LLC, 2010.
- [14] "IEEE Guide for the Application of Shunt Reactor Switching", *IEEE Std C37.015-2009 (Revision of IEEE Std C37.015-1993)*, pp. 1-70, feb. 2010.
- [15] S. O. Frontin, *Equipamentos de alta tensão-prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas*, 1ª edição. Brasília: Goya Editora LTDA., 2013.
- [16] "IEEE Guide for the Application of Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers", *IEEE Std C37.011-2011 (Revision of IEEE Std C37.011-2005)*, pp. 1-97, nov. 2011.
- [17] "IEEE C37.06-2009 - IEEE Standard for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis--Preferred Ratings and Related Required Capabilities for Voltages Above 1000 V". [En línea]. Disponible en: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/C37.06-2009.html>. [Consultado: 26-ago-2018].
- [18] "IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems", *IEEE Std C62.22™-2009 (Revision of IEEE Std C62.22-1997)*, pp. 1-143, jul. 2009.
- [19] C. M. Portela, S. A. Morais, y J. S. Teixeira, "Circuit-breaker behaviour in reactor switching: applicability and limitations of the concept of chopping number", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, núm. 3, pp. 1009-1021, jul. 1988.
- [20] M. Mariño y N. Elizabeth, "Coordinación de aislamiento en subestaciones a nivel de 500 Kv. (Artículo)", 2009.
- [21] S. A. Morais, "Considerations on the specification of circuit-breakers intended to interrupt small inductive currents.", presentado en ELECTRA-CIGRE-, 1993, pp. 45-56.



Santiago Pilicita Veloz, nació en Quito-Ecuador, el 9 de julio de 1994. Sus estudios secundarios los realizó en el Instituto Nacional Mejía, obteniendo el título de Bachiller ciencias especialidad Físico-Matemáticas. Obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en mayo de 2019. Actualmente se desempeña como supervisor técnico en construcción de redes de distribución para diferentes empresas distribuidoras de energía del país. Sus áreas de interés son distribución, operación de subestaciones y estabilidad de SEP.



Fabián Pérez Yauli, nació en Ambato-Ecuador. Obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador en 2004. En 2012 obtuvo el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional de San Juan, San Juan-Argentina, con una beca otorgada por el Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD). Actualmente es profesor titular a tiempo completo en la Escuela Politécnica Nacional. Su rama de investigación incluye protecciones de sistemas de potencia y procesamiento de señales.



Luis Manuel Dután Amay.- Nació en la ciudad de Azogues, provincia de Cañar, en 1978. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional donde también ha cursado estudios de Maestría en Ingeniería Eléctrica. Desde el 2009 es colaborador de la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP - Unidad de Negocio Transelectric, en el departamento de Planificación y desde 2014 en la Subgerencia de Proyectos de Expansión – Área de Diseño de Subestaciones. Su campo de investigación se encuentra relacionado con transitorios electromagnéticos, equipo primario de subestaciones y coordinación de aislamiento de líneas de transmisión y subestaciones.