



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

Análisis de Tensión de Restablecimiento Transitoria (TRT) en interruptores de la futura línea de transmisión 500 kV Margen Derecha – Villa Hayes

Ubaldo Fernández Krekeler
(ubaldo_fernandez@ande.gov.py)

Tito Ocariz Krauer
(tito_ocariz@ande.gov.py)

**Administración Nacional de Electricidad (ANDE)
Paraguay**

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es presentar los resultados de los estudios de Tensión de Restablecimiento Transitoria (TRT) en condiciones de fallas trifásicas y fase-tierra en los terminales de la línea 500 kV Margen Derecha – Villa Hayes (MD-VHA), con vistas a la caracterización de los interruptores 500 kV.

Estos estudios verifican las sobretensiones aparecidas en los terminales de los interruptores luego de la apertura de una corriente de cortocircuito, así como la correspondiente tasa de crecimiento de la tensión de restablecimiento transitoria (TCTRT), las cuales son comparadas con los límites establecidos en las normas. En particular, son utilizadas como referencias la “Norma ABNT NBR IEC 62271-100 – Equipamientos de Alta Tensión Parte 100: Disyuntores de Alta-Tensión de Corriente Alterna” y la “ABNT NBR IEC 60694:2006-Especificaciones comunes para normas de equipamientos de maniobra de alta tensión”.

Los estudios se basan en simulaciones realizadas con el programa ATP (Alternative Transient Program) para análisis de transitorios electromagnéticos.

Un caso particular analizado es la apertura de un cortocircuito trifásico con bloqueo del convertidor CA/CC de Foz de Yguazú, el cual presenta condiciones severas y desfavorables desde el punto de vista de TRT.

PALABRAS CLAVES

Tensión de restablecimiento transitoria, tasa de crecimiento de la tensión de restablecimiento transitoria, desempeño de interruptores.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se desarrolló como parte de los estudios de caracterización de una línea de transmisión en 500 kV a ser construida entre la Central Hidroeléctrica de ITAIPU y el sistema metropolitano de Asunción, mayor centro de cargas del país. Específicamente, la línea interconectaría a la Subestación Margen Derecha de ITAIPU con la Subestación Villa Hayes de la ANDE, en las cercanías de Asunción. La línea en estudio tendría una longitud aproximada de 341 km, simple terna con estructura metálica autoportante, con 4 conductores 636 MCM por fase. A continuación se presenta la configuración del sistema, con la línea e interruptores en estudio.

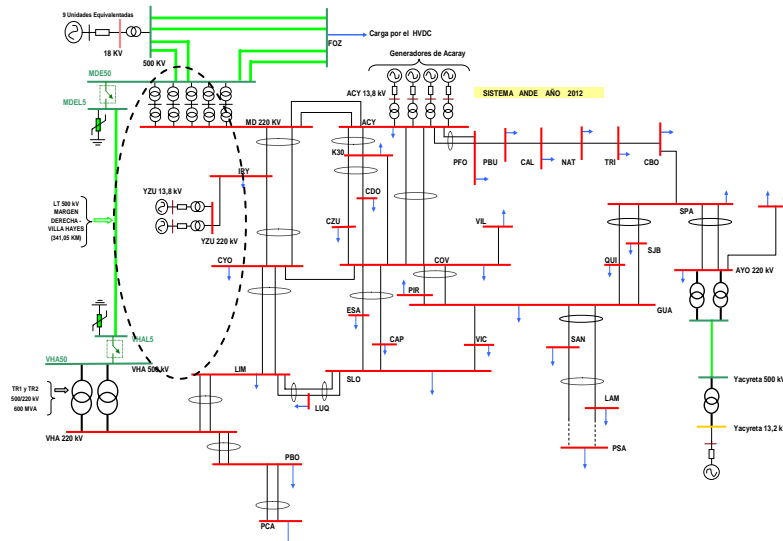


Figura 1. Sistema modelado

El estudio se centra en la verificación de las tensiones de restablecimiento transitorias (TRT) y de las respectivas tasas de crecimiento de la TRT (TCTRT) a las cuales se verían sometidas los interruptores destinados a maniobrar la línea de transmisión. Como indicado en la referencia [3], la tensión de restablecimiento transitoria (TRT) es la tensión que se establece a través de los contactos del interruptor después de la separación eléctrica de los mismos. Las tensiones de restablecimiento transitorias son obtenidas a través de simulaciones de transitorios electromagnéticos con el programa ATP. Estos estudios son normalmente realizados despreciando el arco eléctrico, hipótesis simplificadora pero suficiente para establecer la envolvente de los esfuerzos a los que el interruptor podrá estar sometido. Se analizan los requerimientos para los interruptores de ambas terminales de la línea, es decir, tanto en Margen Derecha (MD), como en Villa Hayes (VHA).

Diferentes situaciones son analizadas del punto de vista de TRT:

- Fallas terminales y kilométricas trifásicas, caracterizadas por tener sobretensiones en los primeros milisegundos tras la interrupción de la corriente.
- Fallas fase-tierra en el terminal de línea opuesto al interruptor en estudio, evaluándose las sobretensiones que típicamente alcanzan sus valores máximos en algunos ciclos de 50 Hz, razón por la cual son comparadas con las características de soportabilidad a sobretensiones de maniobra del interruptor.
- Finalmente, apertura del interruptor en discordancia de fases, producida ante una eventual condición de fuera de sincronismo de generadores en los extremos opuestos de la línea, situación ante la cual los interruptores podrían abrir con una elevada diferencia angular entre sus terminales.

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

Los resultados obtenidos de las simulaciones son evaluados usando como referencia la Norma “ABNT NBR IEC 62271-100 – Equipamientos de Alta Tensión, Parte 100: Disyuntores de Alta Tensión de Corriente Alterna” y la “ABNT NBR IEC 60694:2006 – Especificaciones comunes para equipamientos de maniobra de alta tensión”.

2. CONDICIONES GENERALES ADOPTADAS

La TRT y TCTRT están relacionadas con la corriente de cortocircuito a ser interrumpida, así como la impedancia equivalente del sistema. Por ello, diferentes condiciones deben ser estudiadas en las simulaciones de apertura de los interruptores de terminal de línea:

- Tensión de pre-falla en 500 kV: 1,10 pu
- Configuración del sistema en MD: a) completa; b) completa con una la línea IPU-MD fuera de servicio y, c) Reducido en MD (4 generadores de ITAIPU aislados para suministro exclusivo de energía a la ANDE.
- Configuración del sistema en VHA: a) Completa y b) Sin un auto-transformador 500/220 kV.

Un punto importante a considerar es que los resultados de la TRT de los interruptores son influenciados por las capacitancias parásitas de los equipos y barras en el lado de la fuente del sistema que alimenta el corto circuito. Por ello se consideran casos de 50 y 150 nF en Margen Derecha y de 30 y 60 nF en Villa Hayes.

3. CRITERIO DE EVALUACIÓN DE LA TRT

3.1 TRT para falla terminal, falla kilométrica y en discordancia de fase

Para este tipo de fallas, la norma ABNT NBR IEC 62271-100:2006 presenta valores normalizados para ensayo de TRT para interruptores de tensión nominal 550 kV, en la forma de representación por cuatro parámetros (Tabla 1d de la Norma), mostrados a continuación:

Tabla I: Valores normalizados de TRT – interruptor de 550 kV
(Parte Tabla 1d de la Norma IEC 62271 – 100:2006)

Tipo de interrupción	Primera tensión de referencia - kV cresta (u_1)	Tiempo (t_1) μ s	Valor de cresta de la TRT (u_c)-kV cresta	Tiempo (t_2) μ s	TCTRT (u_1/t_1) kV/ μ s
Falla terminal	438	219	817	876	2
Falla kilométrica (*)	337	168	629	672	2
Discordancia de fases	674	438	1123	876	1,54

(*) Se refiere a la tensión del lado de la fuente

Tabla II: Valores normalizados de la TRT para interruptores 550 kV
(Parte Tabla 14a IEC 62271-100:2006)

Secuencia de ensayo	Primera tensión de referencia - kV cresta (u_1)	Tiempo (t_1) μ s	Valor de cresta de la TRT (u_c)-kV cresta	Tiempo (t_2) μ s	TCTRT (u_1/t_1) kV/ μ s
T100	438	219	817	876	2
T60	438	146	876	876	3
T30	-	-	899	180	5
T10	-	-	893	128	7

En la Tabla II, se puede apreciar que existen valores padronizados de ensayos para diferentes porcentuales de corriente con relación a la corriente nominal de corto circuito del interruptor. Por ello, considerando que los interruptores de MD serían de 50 kA nominal, para un nivel de cortocircuito de 25 kA, los valores correspondientes a 60% (T60) son utilizados como referencia. Por otro lado, en la evaluación de los interruptores de VHA, se considera la envolvente T10 de la misma tabla, suponiéndose su capacidad de interrupción de 40 kA y que el valor de la corriente a ser interrumpida con corto circuito terminal se encontraría en torno a 2 kA.

En el caso de falla kilométrica, los cuatro parámetros de la Tabla 1d de la IEC se aplican a las tensiones del lado fuente del interruptor. Para el lado de la línea se toma un valor para la TCTR de 0,20 kV/microsegundos.kA, obteniéndose una TCTR de 9,0 kV/microsegundos para una corriente de corto de 90% de la capacidad de interrupción de los interruptores.

Para el caso de apertura en discordancia de fase, la norma establece una condición de ensayo para una capacidad de interrupción de 25% de la corriente nominal de interrupción y con valores de $2,0/\sqrt{3}$ de la tensión nominal del interruptor para sistemas con neutro sólidamente aterrado.

3.2 TRT para falla fase-tierra en el terminal opuesto de la línea

Conforme la referencia [3], es pertinente realizar un análisis de las sobretensiones aparecidas en la apertura de las fases sanas de una línea en vacío con cortocircuito fase-tierra en el terminal opuesto de la línea. Esta situación generalmente produce una mayor sobretensión, ya que las fases sanas se ven sometidas a una elevación de tensión ante este tipo de falla.

La referencia pertinente en la IEC 62271-100 correspondería a lo que la norma le denomina "apertura de línea en vacío con o sin falla". Para ello, dicha norma exige la realización de maniobra de corrientes capacitivas, en donde la tensión antes de la apertura del interruptor debe ser $1,4 \times 550 \times \sqrt{2} / \sqrt{3} = 629$ kV, en la forma senoidal. Como la tensión que aparece a través de los polos del interruptor será el doble, se tiene un valor de soportabilidad de 1258 kV cresta, el cual es utilizado como límite de referencia y comparación en los casos simulados.

Se considera también como referencia, para verificación de la capacidad de los interruptores en condición de falla monofásica, la característica de soportabilidad dieléctrica a impulso de maniobra que supone una tensión senoidal en la fuente y un impulso de maniobra en el lado línea tras la apertura. Ese valor corresponde a lo indicado en la Tabla 2a de ABNT NBR IEC 60964 (2006), que considera los valores en el lado fuente una tensión senoidal de 450 kV cresta y en el lado línea de un impulso de 900 kV cresta, totalizando 1350 kV, coherentemente un poco superior al valor de 1258 kV cresta en la interrupción de línea a vacío.

4. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

a) TRT por apertura del interruptor 500 kV de MD, con fallas terminal y kilométrica trifásica

Con relación a los valores de referencia T60 de norma, indicados en el ítem anterior, de 876 kV para la TRT, se puede apreciar que los valores de TRT simulados en el tiempo quedan por debajo de la envolvente definida en la norma para falla terminal. Con relación a los valores de TCTR, fueron encontradas en las simulaciones algunas tasas elevadas, pero dichas tasas no son preocupantes ya que fueron alcanzadas con algún retardo de tiempo.

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

Tabla III: Resultados para falla terminal en MD

Tipo de falla	Caso	SE	Sistema	Capac. Parásita (nF)	Tipo Corto	Punto falla	I corto (kA-rms)	TRT máx. (kV)	TCTRT máx. (kV/us)
Terminal	TMD01	MD	Completo	50	3F	Terminal LT MD	26,3	864	1,00
Terminal	TMD02	MD	Completo	150	3F	Terminal LT MD	26,3	851	0,91
Terminal	TMD03	MD	Sin LT FOZ 500 - MD 500	50	3F	Terminal LT MD	26,3	854	1,33
Terminal	TMD04	MD	Sin LT FOZ 500 - MD 500	150	3F	Terminal LT MD	26,3	840	1,21
Terminal	TMD05	MD	Reducido 1 (4 maq. IPU)	50	3F	Terminal LT MD	12,2	749	4,24
Terminal	TMD06	MD	Reducido 1 (4 maq. IPU)	150	3F	Terminal LT MD	12,2	748	3,24
Máximos							26,3	864	4,24

Tabla IV: Resultados para falla kilométrica en MD

							Valor de referencia	
							629 kV	9 kV/us
							Lado Fuente	
							1º Polo	
Sistema	Capac. Parásita (nF)	Tipo Corto	Punto falla	I corto (kA-rms)	TRT (kV)	TCTR (kV/us)		
Completo	50	3F	LT 500 1 km	25,8	583	2,4		
Completo	150	3F	LT 500 1 km	25,8	565	3,4		
Completo	50	3F	LT 500 5 km	23,7	552	3,8		
Completo	150	3F	LT 500 5 km	23,7	547	3,4		
Completo	50	3F-T	LT 500 1 km	25,8	628	3,8		
Completo	150	3F-T	LT 500 1 km	25,8	459	3,4		
Completo	50	3F-T	LT 500 5 km	23,7	480	3,2		
Completo	150	3F-T	LT 500 5 km	23,7	472	3,4		

A continuación se muestra la TRT más severa obtenida en los interruptores de MD ante una falla terminal, y un detalle del mismo, donde se efectúa la comparación con la envolvente correspondiente de la norma.

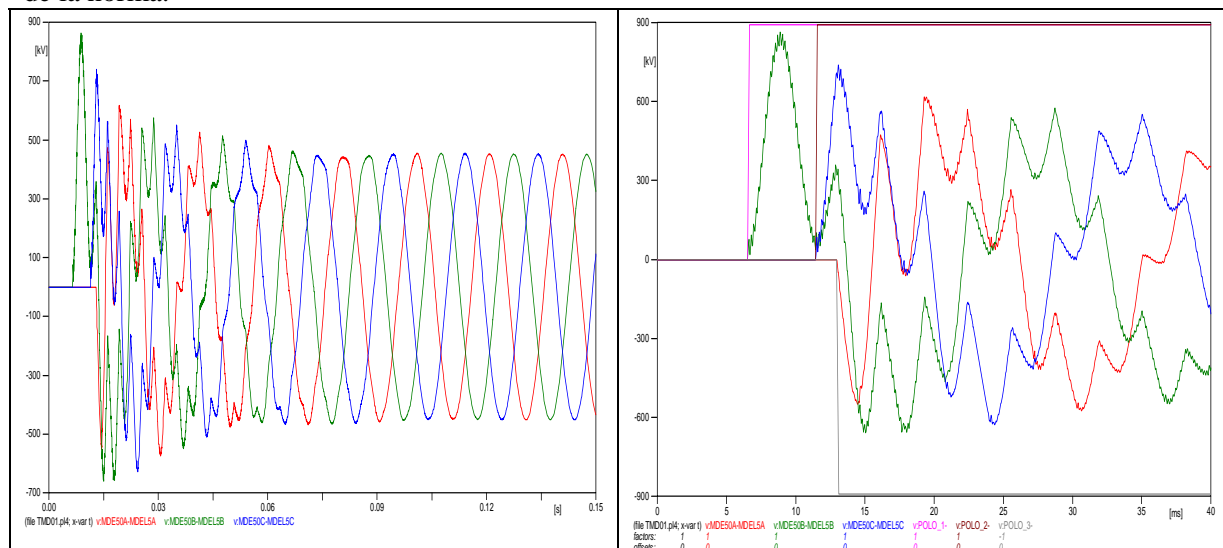


Figura 2. TRT en MD (con detalle) para falla terminal

b) TRT por apertura del interruptor 500 kV de VHA, con falla terminal y kilométrica trifásica

A continuación se muestran los valores obtenidos para los interruptores de VHA, los cuales se encuentran bien por debajo de los valores referenciales de la norma.

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
 29, 30 y 31 de Octubre de 2008

Tabla V: Resultados para falla terminal en VHA

Tipo de falla	Caso	SE	Sistema	Capac. Parásita (nF)	Tipo Corto	Punto falla	I corto (kA-rms)	TRT máx. (kV)	TCTRT máx. (kV/us)
Terminal	TVHA01	VHA	Completo	30	3F	Terminal LT VHA	1,96	749	2,03
Terminal	TVHA02	VHA	Completo	60	3F	Terminal LT VHA	1,96	742	1,57
Terminal	TVHA03	VHA	Reducido (Sin 1 Autotrafo en VHA)	30	3F	Terminal LT VHA	1,73	766	2,48
Terminal	TVHA04	VHA	Reducido (Sin 1 Autotrafo en VHA)	60	3F	Terminal LT VHA	1,73	780	1,82

Tabla VI: Resultados para falla kilométrica en VHA

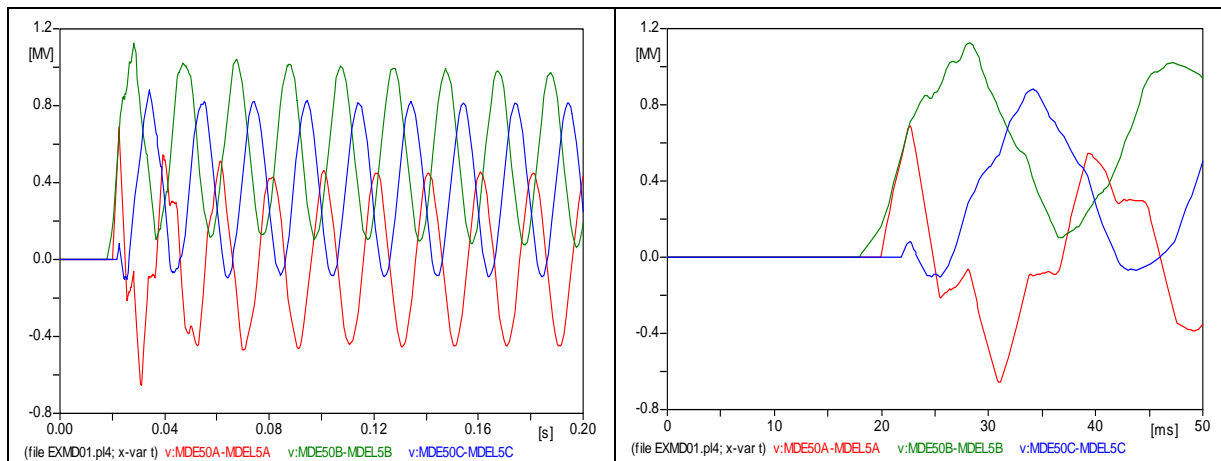
Tipo de falla	Caso	SE	Sistema	Capac. Parásita (nF)	Tipo Corto	Punto falla	I corto (kA-rms)	Valor de referencia	
								629 kV	9 kV/us
								Lado Fuente	
								1º Polo	
								TRT (kV)	TCTR (kV/us)
Kilométrica	KVHA01	VHA	Completo	30	3F	LT 500 1 km	1,96	475	0,04
Kilométrica	KVHA02	VHA	Completo	60	3F	LT 500 1 km	1,96	542	0,03
Kilométrica	KVHA03	VHA	Completo	30	3F	LT 500 5 km	1,94	547	0,08
Kilométrica	KVHA04	VHA	Completo	60	3F	LT 500 5 km	1,94	543	0,08
Kilométrica	KVHA05	VHA	Reducido (Sin 1 Autotrafo en VHA)	30	3F	LT 500 1 km	1,73	553	0,36
Kilométrica	KVHA06	VHA	Reducido (Sin 1 Autotrafo en VHA)	60	3F	LT 500 1 km	1,73	532	0,36
Kilométrica	KVHA07	VHA	Reducido (Sin 1 Autotrafo en VHA)	30	3F	LT 500 5 km	1,72	552	0,28
Kilométrica	KVHA08	VHA	Reducido (Sin 1 Autotrafo en VHA)	60	3F	LT 500 5 km	1,72	532	0,26

c) TRT interruptor MD con falla terminal fase-tierra en extremo VHA

En este tipo de análisis, la TCTRT presenta valores muy bajos, razón por la cual la atención se centra en los valores TRT obtenidos. Los valores obtenidos de la TRT se encuentran dentro del límite establecido como satisfactorio de 1258 kVcresta.

Tabla VII: Resultados interruptores de MD para falla en extremo opuesto

Caso	SE	Sistema	Capac. Parásita (nF)	Tipo Corto	Punto falla	I corto (kA-rms)	TRT máx. (kV)	Secuencia apertura
EXMD01	MD	Completo	50	1F-T (a)	Terminal LT VHA	1,64	1124	BAC
EXMD07	MD	Sin 1 LT FOZ 500 - MD 500	50	1F-T (a)	Terminal LT VHA	1,61	1124	BAC
EXMD13	MD	Reducido 1 (4 maq. IPU)	50	1F-T (a)	Terminal LT VHA	1,79	1119	BAC


Figura 3. TRT en MD (con detalle) para falla F-T en extremo opuesto
d) TRT interruptor VHA con falla terminal fase-tierra en extremo MD

A continuación se muestran las máximas tensiones obtenidas, las cuales se encuentran por debajo del valor de límite establecido como satisfactorio de 1258 kVcresta.

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

Tabla VIII: Resultados interruptores de VHA para falla en extremo opuesto

Tipo de falla	Caso	SE	Sistema	Capac. Parásita (nF)	Tipo Corto	Punto falla	I corto (kA-rms)	TRT máx. (kV)	Secuencia de apertura
Extremo opuesto	EXVHA01	VHA	Completo	30	1F-T (a)	Terminal LT VHA	0.963	919	CBA
Extremo opuesto	EXVHA07	VHA	Reducido (Sin 1 Autotrafo)	30	1F-T (a)	Terminal LT VHA	0.876	947	CBA

e) TRT interruptores de MD con discordancia de fase

Las simulaciones para verificación de las TRT en los interruptores de 500 kV de la línea MD-VHA en discordancia de fases fue hecha con el ATP, buscándose obtener un desfase en los ángulos eléctricos de las tensiones en los extremos de la línea en estudio.

Como en la operación de la línea en su fase inicial, la configuración no prevé una interconexión entre dos centrales, la maniobra de apertura con discordancia de fase se convierte en una situación poco probable, ya que la carga del sistema Metropolitano estaría acompañando las oscilaciones angulares de la Central de Itaipú. Sin embargo, de manera a contemplar la instalación de una fuente de generación en el área metropolitana de Asunción, para los efectos del análisis de TRT se consideró una eventual central térmica de 700 MVA conectada a la barra 220 kV de VHA, representada por una fuente ideal detrás de su reactancia subtransitoria (representación clásica). Para simular las condiciones de discordancia de fase, se ha procedido a una variación del ángulo de fase del generador conectado a VHA 220 kV con relación a los generadores de Itaipú. En la siguiente figura, se muestra esquemáticamente el sistema simulado, donde se resalta la fuente de generación introducida para producir el desfase deseado.

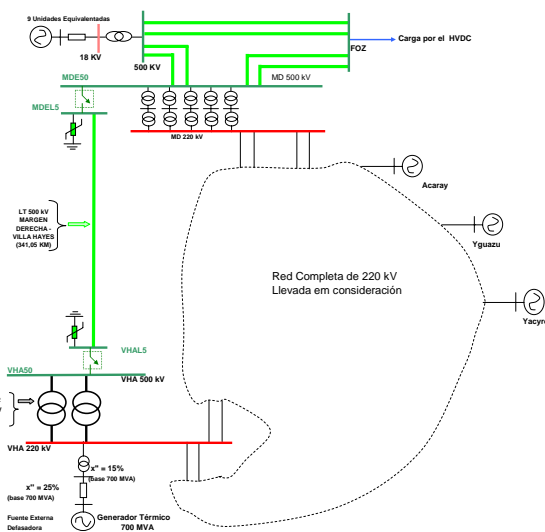


Figura 4. Sistema para modelar condición de fuera de fase.

Así, los valores máximos obtenidos de TRT fueron de 470 kV para el interruptor de MD, y 577 kV para el de VHA, los cuales se encuentran bien por debajo 1123kV de la norma.

5. ANÁLISIS DE LA TRT ANTE BLOQUEO DE LOS CONVERTIDORES CA/CC DE FOZ DE YGUAZÚ

Cuando se considera la existencia del sistema de Corriente Continua y los eventos asociados que el mismo podría producir en el Sistema Interconectado de 50 Hz, la peor condición de cálculo sería falla terminal y la condición de bloqueo de los convertidores. En estas circunstancias se tiene una elevada corriente de cortocircuito y un aumento de la impedancia equivalente del sistema, condiciones poco favorables desde el punto de vista de la TRT.

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

La ocurrencia de corto-circuito bifásico o trifásico en la red de 500 kV, en la vecindad de la SE Margen Derecha, implica bloqueo de los convertidores CA/CC de la SE Foz de Iguazu, debido a la caída abrupta de tensión para un valor próximo de cero. Así, de ocurrir el mencionado corto-circuito en la salida de la línea de 500 kV Margen Derecha - Villa Hayes, los interruptores correspondientes deberán abrir la línea simultáneamente con rechazo de toda la potencia exportada al Brasil, hecho que somete estos interruptores a los valores de TRT más severos. Aunque dicha ocurrencia tenga muy baja probabilidad, se evaluó la TRT para este evento debido a la severidad del mismo y a la importancia de asegurar la apropiada capacidad de interrupción de los equipos.

La secuencia de eventos simulada con el ATP fue la siguiente: aplicación de una falla trifásica sin tierra en la LT de 500 kV Margen Derecha – Villa Hayes en el terminal del interruptor de MD, posterior bloqueo de los convertidores de la SE Foz do Iguazu (y consecuente pérdida de carga) y remoción final de la falla trifásica con la apertura de la LT de 500 kV Margen Derecha – Villa Hayes.

Para la falla terminal trifásica sin tierra, el valor máximo observado de TRT (en la primera fase en abrir) es de 1159 kVcresta en unos 2 ms tras la falla, el cual es superior al valor T60 de 876 kV. Por ello, se requerirá que los interruptores tengan características especiales con relación a la TRT.

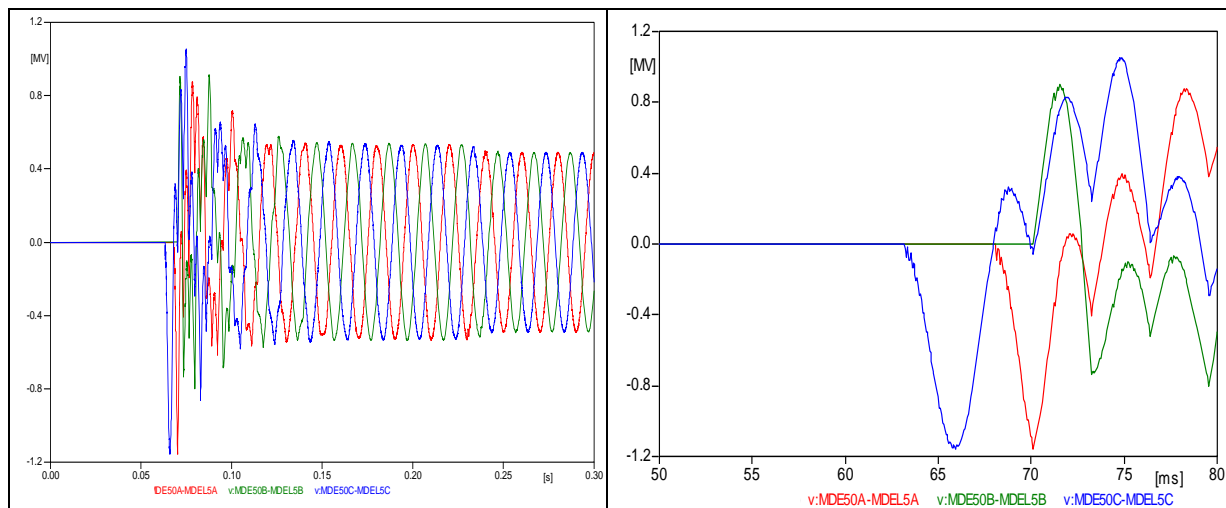


Figura 5. TRT en MD (con detalle) ante falla terminal con bloqueo del HVDC de Foz

Esta característica es compatible con la de los interruptores actualmente instalados en la Subestación Margen Derecha, los cuales fueron especificados en la época de la construcción con un valor T60 de 1300 kV.

6. CONCLUSIONES

El estudio muestra que desde el punto de vista de tensión de restablecimiento transitoria, los requerimientos de la norma IEC 62271-100 aseguran en general un desempeño satisfactorio de los interruptores tanto de la subestación Margen Derecha como de Villa Hayes. Sin embargo, que la ocurrencia de cortocircuito trifásico o bifásico en las cercanías de la subestación Margen Derecha produciría el bloqueo del convertidor (HVDC) de Foz de Yguazú, por lo que se tendría mayor sollicitación en cuanto a la TRT de los interruptores. Por ello, se consideró pertinente, que los interruptores de Margen Derecha tengan una característica especial, reflejadas en los parámetros de ensayo de la TRT para los valores de T60, T30 y T10 de la Tabla 14a de la ABNT NBR IEC 62271-

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

100, teniéndose una capacidad de interrupción nominal de 50 kA. Dichos valores son mostrados en la tabla siguiente.

Tabla VIII: Parámetros de ensayo de TRT para los interruptores de MD

Secuencia de ensayo	Primera tensión de referencia - kV cresta (u_1)	Tiempo (t_1) μ s	Valor de cresta de la TRT (u_c)-kV cresta	Tiempo (t_2) μ s	Tasa de crecimiento (u_1/t_1) kV/ μ s
T100	438	219	817	876	2
T60	637	212	1274	1272	3
T30	-	-	1308	262	5
T10	-	-	1299	186	7

Para los interruptores de Villa Hayes, con una capacidad de interrupción nominal de 40 kA, los valores ensayo de la norma ABNT NBR IEC 62271-100 (ya mostrados en la Tabla II) serían suficientes para asegurar el adecuado desempeño de los interruptores.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Norma Brasileira ABNT NBR IEC 62271-100, 04.01.2007 – Equipamentos de Alta Tensão Parte 100: Disjuntores de Alta-Tensão de Corrente Alternada

[2] ABNT NBR IEC 60694:2006-Especificações comuns para normas de equipamentos de manobra de alta tensão

[3] Disjuntores e Chaves – Aplicação em Sistemas de Potência – CE 13 do Cigré – Brasil, em parceria com FURNAS/UFF, 1996.

[4] Transitórios Elétricos e Coodenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão, FURNAS/UFF, 1987.