

Transient Recovery Voltage simulation for a 500 kV power breaker

Simulación de la Tensión Transitoria de Recuperación para un interruptor de potencia de 500 kV

*David, MARTÍNEZ-MARTÍNEZ¹, José Francisco, SOLÍS-VILLARREAL¹, Oscar, ESPINOZA-ORTEGA¹

¹Universidad Autónoma del Estado de México. Cerrada Nezahualcóyotl S/N, Sto. Domingo Aztacameca, Axapusco, Estado de México.

(0000-0002-1450-8310; 0000-0003-3159-9223; 0000-0002-2304-7587)

Sent date: 28/October/2024 Acceptance date: 30/November/2024

Abstract:

Power systems are frequently exposed to configuration changes due to either disturbances or system switching, which produce dangerous over voltages and over currents. One of the most important components in an electric power system are the circuit breakers, which perform the important function of disconnecting equipment either due to a failure in the system or to execute programmed switching for maintenance for example (Lazzarri & De Morais, 2023). Transient Recovery Voltage (TRV) analysis is a type of electromagnetic study designed to prove if a circuit breaker can withstand switching transients (Filipovic-Grcic, et al., 2023). As a phenomenon, the TRV is defined as the voltage present between contacts of a circuit breaker while interrupting an electrical current. This paper shows a case study to analyze the TRV in a circuit breaker using the simulator ATPDraw (Bonnevillle Power Administration, 2012). Different cases are simulated in order to identify the severity of each one. The results show that single phase fault causes a more severe TRV than three phase fault and that, for the system analyzed, a grading capacitor was not useful to reduce the TRV.

Keywords: electromagnetic transients, TRV, TTR, ATPDraw.

Resumen:

Los sistemas eléctricos de potencia están expuestos frecuentemente a cambios en su configuración debido a disturbios o maniobras, los cuales producen sobrevoltajes y sobrecorrientes peligrosos. Uno de los componentes más importantes en un sistema eléctrico de potencia son los interruptores, los cuales realizan la importante función de desconectar equipos debido a fallas en el sistema o para ejecutar maniobras programadas por mantenimiento, por ejemplo (Lazzarri & De Morais, 2023). El análisis de la Tensión Transitoria de Recuperación (TTR ó TRV) es un tipo de estudio electromagnético diseñado para probar si un interruptor puede soportar los transitorios de maniobra (Filipovic-Grcic, et al., 2023). Como fenómeno, el TRV se define como el voltaje presente entre los contactos del interruptor mientras interrumpe una corriente eléctrica. Este trabajo muestra un caso de estudio para analizar el TRV en un interruptor de potencia utilizando el simulador ATPDraw (Bonnevillle Power Administration, 2012). Se simulan diversos casos para identificar la severidad de cada uno de ellos. Los resultados muestran que la falla monofásica ocasiona un TRV más severo que

la falla trifásica y que, para el sistema analizado, no resulto útil la inclusión de un capacitor de gradiente para reducir el TRV.

Palabras clave: Transitorios electromagnéticos, TRV, TTR, ATPDraw.

* Corresponding author. E-mail: dmartinezm@uaemex.mx
Tel. (595)-922-6531

1. Introducción

Un sistema eléctrico de potencia se define como el conjunto de elementos que sirven para transportar la energía eléctrica desde los centros de generación, hasta los centros de consumo. Se compone de elementos tales como generadores, transformadores, líneas de transmisión y cargas.

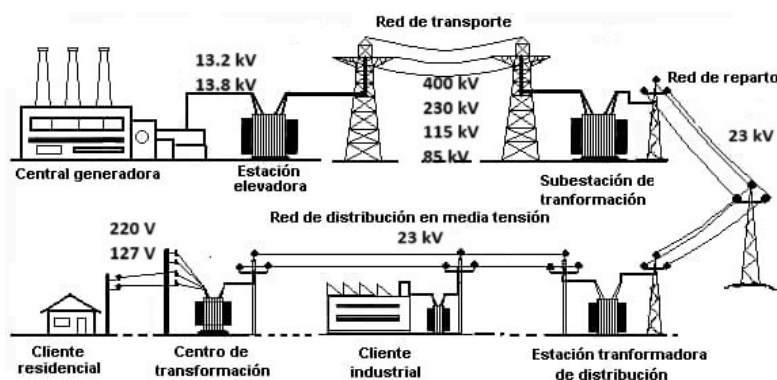


Figura 1. Representación de un sistema de suministro eléctrico, incluyendo el sistema de potencia y el sistema de distribución.

Durante la operación de un sistema eléctrico de potencia se presentan una gran variedad de fenómenos que influyen en la confiabilidad y calidad del servicio, ya que las empresas suministradoras deben cumplir con códigos de red que limitan la salida de ciertos parámetros por sobre las especificaciones establecidas.

Un fenómeno de interés en un sistema eléctrico de potencia es la tensión transitoria de recuperación, conocida también como TRV, por sus siglas en inglés (Transient Recovery Voltage). Este fenómeno se define como el voltaje que aparece entre los contactos de un interruptor al abrir un circuito, pudiendo presentarse, además, un arco eléctrico entre los contactos. La Figura 2 ilustra este fenómeno.

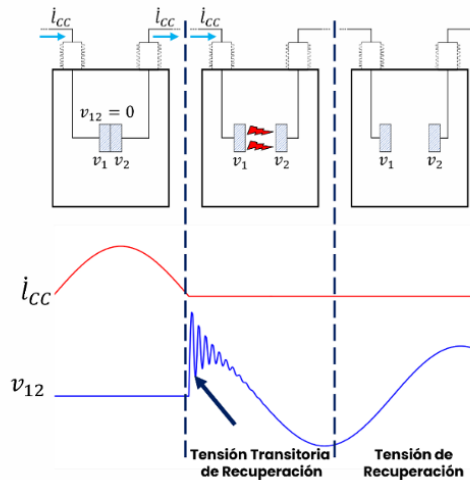


Figura 2. Representación física del fenómeno de TRV.

Durante la actuación del interruptor, el voltaje que aparece entre sus contactos puede ocasionar el re-encendido del arco eléctrico. Así mismo, la norma IEC 60071-1 (International Electrotechnical Comision IEC, 2019) establece la clasificación de sobretensiones con una forma de onda y duración normalizadas, como se muestra en la siguiente Figura.

TIPO	Baja Frecuencia		Transitorio		
	Continua	Temporal	Frente Lento	Frente Rápido	Frente muy Rápido
Formas de onda de tensiones y sobretensiones					
Gama de formas de onda de tensiones y sobretensiones	$f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3,600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_t \leq 3,600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5,000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Formas de onda de tensión normalizada					a
Ensayo de tensión soportada normalizada	a	Ensayo a frecuencia industrial de corta duración	Ensayo impulso tipo maniobra	Ensayo impulso tipo rayo	a

^a A especificar por el comité de producto concerniente

Figura 3. Clasificación de sobretensiones de acuerdo con la norma IEC-60071-1.

Dentro de esta clasificación, existe una gran variedad de fenómenos transitorios de frente lento, entre los que se pueden mencionar la energización de líneas de transmisión, el rechazo de carga, la energización de transformadores de potencia, la energización de bancos de capacitores, la resonancia o ferresonancia y la tensión transitoria de recuperación o TRV, el cual es el fenómeno de interés para el presente trabajo.

Debido a que el TRV es un fenómeno que puede ocasionar daños de aislamiento en los interruptores, es importante contar con medidas de mitigación que reduzcan las sobretensiones ocasionadas. Algunas de las medidas de mitigación más utilizadas son las resistencias de preinserción, los descargadores de sobretensiones y los mandos sincronizados en interruptores.

Es importante mencionar que el TRV es referido a la apertura del primer polo del interruptor, por lo que en un escenario de simulación se puede considerar la apertura sincronizada de los polos, situación que se realiza en el presente trabajo. Algunos factores que pueden influir en la naturaleza del TRV son, el modo de operación del sistema, la puesta a tierra (neutro aislado o aterrizado), el tipo de falla, los tiempos de liberación de falla y el instante en que se realiza la maniobra, entre otros. Se considera además que la corriente es interrumpida en un cruce natural por cero, que un arco eléctrico (de muy alta temperatura) sostiene la corriente durante ese intervalo y que, si una tensión excesiva es aplicada a través del interruptor inmediatamente después de la interrupción, existe riesgo de reencendido. Estas consideraciones se representan en la Figura siguiente.

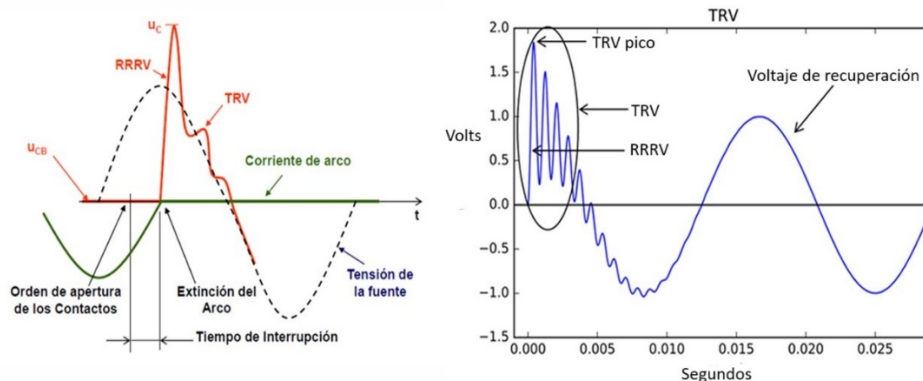


Figura 4. Consideraciones del TRV.

En la Figura anterior, el RRRV (Rate of Rise of Restriking Voltage) se define como el valor pico del TRV dividido entre el tiempo transcurrido para alcanzar ese pico. Se entiende también como la pendiente del TRV desde el inicio del mismo hasta su valor pico inicial.

2. Metodología

2.1. Software de simulación

Para realizar el estudio de TRV del presente trabajo se utiliza el software ATP-EMTP en su versión ATPDraw, por ser uno de los programas más utilizados a nivel mundial para el estudio de transitorios electromagnéticos, además de ser un software libre, aunque de distribución controlada (EEUG European EMTP-ATP User's group, 2024).

2.2. Sistema de prueba

Se considera un caso de estudio de un sistema eléctrico de potencia de 4 buses, el cual se muestra en la Figura siguiente.

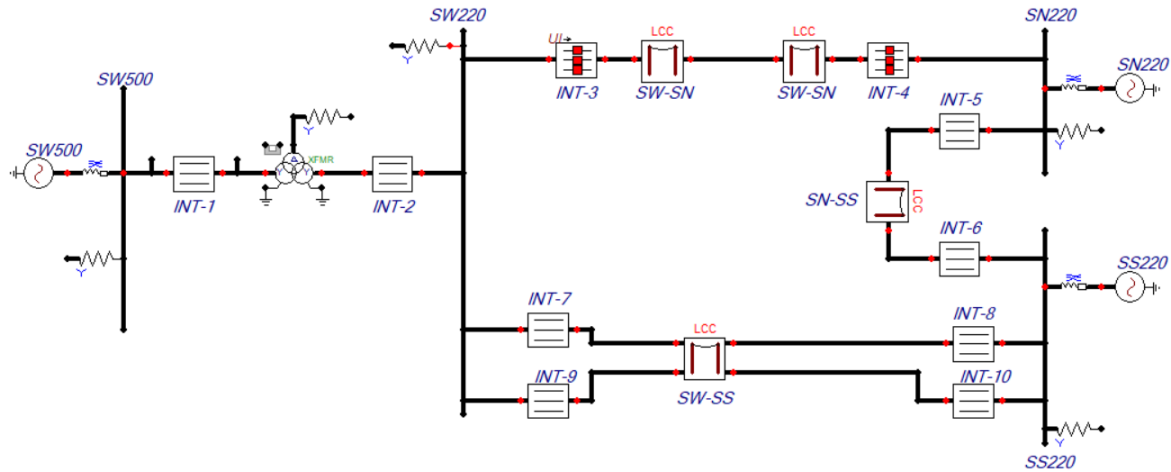


Figura 5. Sistema de prueba de 4 buses.

El Sistema consta de un equivalente de red en el nodo SW500 de 500 kV, voltaje que se reduce a 220 kV hacia el nodo SW220, a través de un transformador trifásico Y-Y. Del bus SW220 sale una línea de transmisión trifásica de doble circuito hacia el nodo SS220 de 220 kV, donde se cuenta con otro equivalente de red. El nodo SS220 está conectado con el nodo SN220 de 220 kV a través de una línea de transmisión de 220 kV. Finalmente, el nodo SW220 se conecta con el nodo SN220 a través de una línea de transmisión de 220 kV.

El estudio de TRV del presente trabajo se realiza en el interruptor denominado INT-3, perteneciente a la línea de transmisión SW-SN que conecta la subestación SW220 con la subestación SN220.

2.3. Modelado de elementos

Para realizar la simulación del TRV es necesario modelar elementos tales como generadores, transformadores, líneas de transmisión, equivalentes de red, descargadores de sobretensiones, resistencias de preinserción en interruptores, capacitancias parásitas de diversos elementos, entre otros. En el presente trabajo se modelan todos los elementos mostrados en el circuito de la Figura 5.

2.3.1. Equivalentes de red

Para representar el efecto de una red extensa se utilizan equivalentes de red. Los parámetros de los equivalentes de red se pueden obtener de la aplicación de un corto circuito monofásico en el nodo donde se desea representar el equivalente de red, aislando el nodo del equivalente de la red de interés y obteniendo los valores de resistencia e inductancia de secuencia positiva

y secuencia cero. Así mismo, el voltaje y ángulo de la fuente del equivalente se obtienen mediante una corrida de flujos de carga en el nodo de interés. Para el presente estudio se tienen tres equivalentes de red en los nodos SW500, SN220 y SS220. Los datos de los equivalentes de red son los siguientes (INEL Engineering Education, 2024).

Tabla 1. Equivalentes de red.

S.E.	Nivel de tensión [kV]	Tensión [kV]	Ángulo [°]	R0 [Ohms]	X0 [Ohms]	R1 [Ohms]	X1 [Ohms]
SW	500	511.94	0	12.053	90.052	4.637	70.052
SS	220	230.25	0	47.357	158.349	7.084	36.614
SN	220	230.25	0	4.163	56.122	25.741	157.843

2.3.2. Líneas de transmisión

Existen diversos modelos de líneas de transmisión para el análisis de transitorios electromagnéticos, que pueden ser implementados dependiendo de la naturaleza del fenómeno a reproducir (León, 2018). Para el caso del TRV es conveniente utilizar el modelo de Bergeron, el cual es un modelo basado en la teoría de ondas viajeras, por lo que resulta simple y eficiente. Este modelo está constituido por parámetros constantes y distribuidos que puede ser utilizado en simulaciones de sobretensiones por maniobras, conmutación y descargas atmosféricas (Araujo, 2014). La información de las líneas de transmisión es la siguiente (INEL Engineering Education, 2024).

Tabla 2. Línea de transmisión SW-SN.

No. fase	Rin [cm]	Rout [cm]	R-DC [ohm/km]	X [m]	Y [m]	Vano medio [m]
1	0	1.266	0.0995	-14.95	17.5	17.5
2	0	1.266	0.0995	0	17.5	17.5
3	0	1.266	0.0995	14.95	17.5	17.5
0	0	0.457	4.1889	-7.16	30.19	30.19
0	0	0.7	0.89	7.16	30.19	30.19

Tabla 3. Línea de transmisión SN-SS.

No. fase	Rin [cm]	Rout [cm]	R-DC [ohm/km]	X [m]	Y [m]	Vano medio [m]
1	0	1.132	0.055	0	26	26
2	0	1.132	0.055	2	22	22
3	0	1.132	0.055	-4	22	22
0	0.05	0.7	0.37	2.85	30	30

Tabla 4. Línea de transmisión SW-SS.

No. fase	Rin [cm]	Rout [cm]	R-DC [ohm/km]	X [m]	Y [m]	Vano medio [m]
1	0	1.387	0.068	-4.25	17.06	17.06
2	0	1.387	0.068	-5.25	24.07	24.06
3	0	1.387	0.068	-4.25	31.06	31.06
4	0	1.387	0.068	4.25	17.06	17.06

5	0	1.387	0.068	5.25	24.07	24.06
6	0	1.387	0.068	4.25	31.06	31.06
0	0	0.7	0.068	0	38.99	38.99

Tabla 5. Resistividad del suelo y longitud de las líneas.

Línea	Rho [ohm*km]	Longitud [km]
Línea SW-SN	600	454.4
Línea SN-SS	800	196.4
Línea SW-SS	10	9.7

2.3.3. Transformadores

Al igual que en el caso de las líneas de transmisión, los modelos de transformadores son muy variados dependiendo de los datos disponibles y la naturaleza del fenómeno a reproducir. Para el presente estudio, de acuerdo con la información disponible, se utiliza el modelo híbrido de transformador (XFMR). El principio de este modelo consiste en derivar un modelo topológicamente correcto con el núcleo conectado a un arrollamiento artificial en la superficie del núcleo (Hoidalen, 2023). Este modelo en el ATPDraw tiene la ventaja de contar con valores típicos que pueden ser utilizados en caso de no contar con toda la información requerida. La información del transformador modelado en el presente trabajo es la siguiente (INEL Engineering Education, 2024).

Tabla 6. Datos del transformador.

No.	Descripción	Unidad	Valor
1	Tipo		Monofásico
2	Cantidad		3
3	Número de fases		1
4	Número de devanados		3
5	Tensión nominal HV/MV/LV	kV	500/220/33
6	Cambiador de tomas bajo carga por 220 kV		+10/-10*1%
7	Potencia garantizada ONAN	MVA	200/200/2
8	Potencia garantizada ONAF	MVA	250/250/2.5
9	Potencia de diseño ONAN (cortocircuito)	MVA	200/200/60
10	Potencia de diseño ONAF (cortocircuito)	MVA	250/250/75
11	Frecuencia nominal	Hz	60
12	Grupo de conexión		YNyn0d1
13	Impedancia de corto circuito de secuencia positiva, negativa y cero:		
13-1	HV – MV (250 MVA)	%	16
13-2	MV – LV (250 MVA)	%	96.9
13-3	HV – LV (250 MVA)	%	112.8

2.3.4. Interruptores

Los interruptores utilizados en la simulación son interruptores convencionales dependientes del tiempo, cuyos cierres y aperturas sirven tanto para simular la falla como para liberarla.

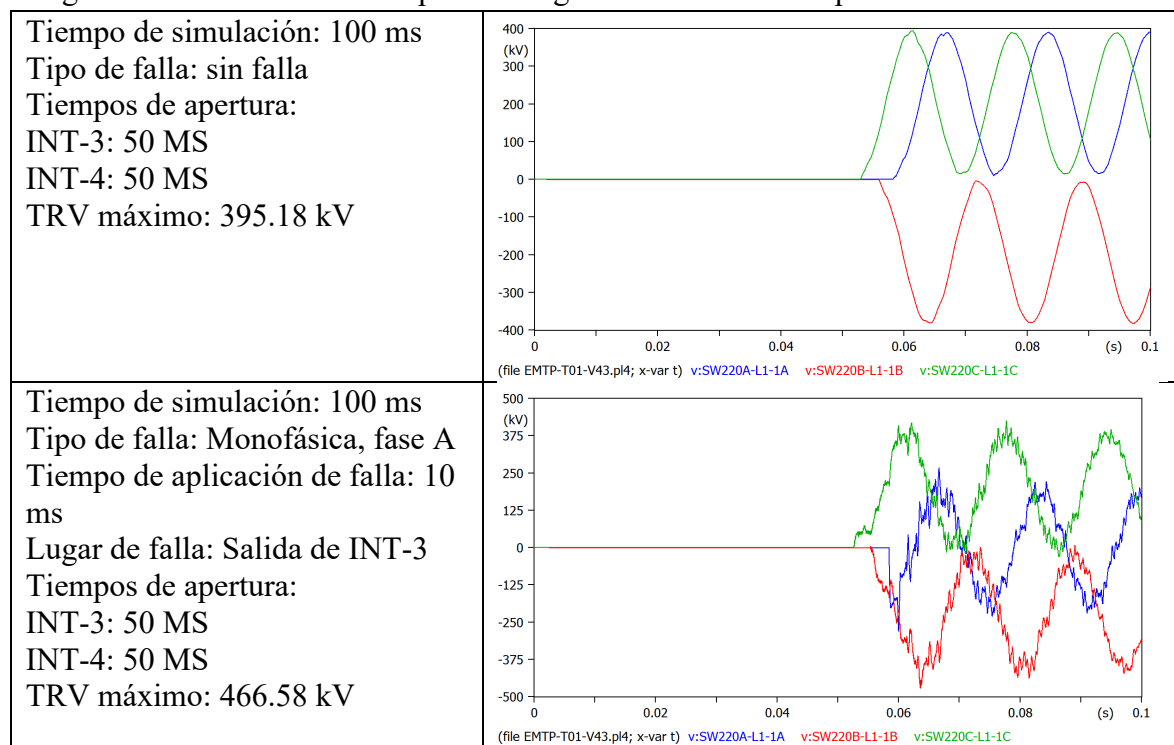
2.3.5. Otros elementos modelados

En el modelo se incluyen resistencias de muy alto valor conectadas a los nodos del sistema, las cuales no se encuentran físicamente, sino que se utilizan para evitar oscilaciones numéricas al momento de que el software realiza la solución de las ecuaciones diferenciales del modelo.

Así mismo, en algunas simulaciones se considera un capacitor de gradiente conectado en paralelo con los contactos del interruptor en el cual se calcula el TRV. Se pretende analizar el impacto del capacitor en el TRV. De acuerdo con la literatura consultada los valores típicos de capacitores de gradiente se encuentran entre 1,000 pF y 6,000 pF (Gaobo, et al., 2011).

3. Resultados

Se realizan diversas simulaciones buscando determinar el efecto del tipo de falla y la localización de la misma. Así mismo, se realiza una simulación incluyendo como medida de mitigación la inclusión de un capacitor de gradiente en el interruptor analizado.



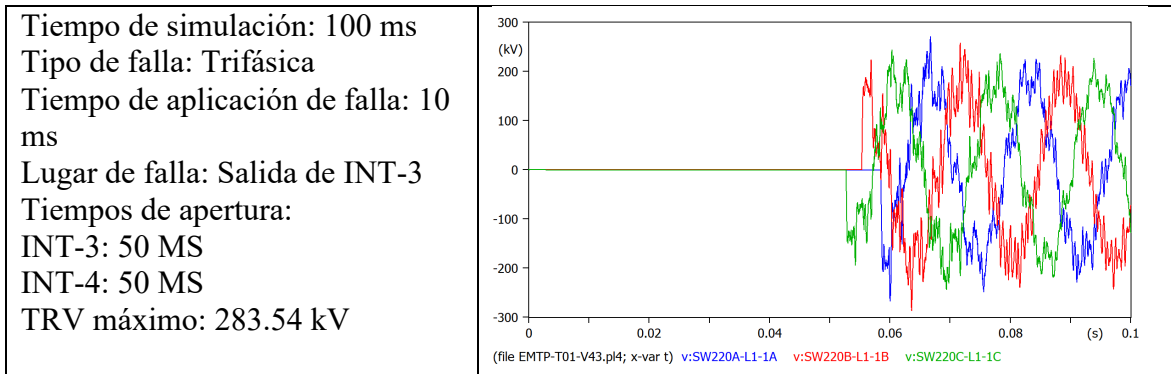


Figura 6. Falla a la salida del interruptor INT-3.

La primera gráfica de la Figura 6 muestra los voltajes presentes entre las terminales del interruptor bajo análisis, ante una apertura sin falla. Se nota una ligera perturbación ante la maniobra, pero básicamente los voltajes se mantienen estables.

La segunda y tercera gráficas de la Figura 6, muestran el voltaje en terminales del Interruptor INT-3, ante una falla monofásica y trifásica respectivamente, justo a la salida del interruptor. Se puede notar que la falla monofásica es más severa que la falla trifásica, aunque la distorsión de las señales es mayor en la falla trifásica.

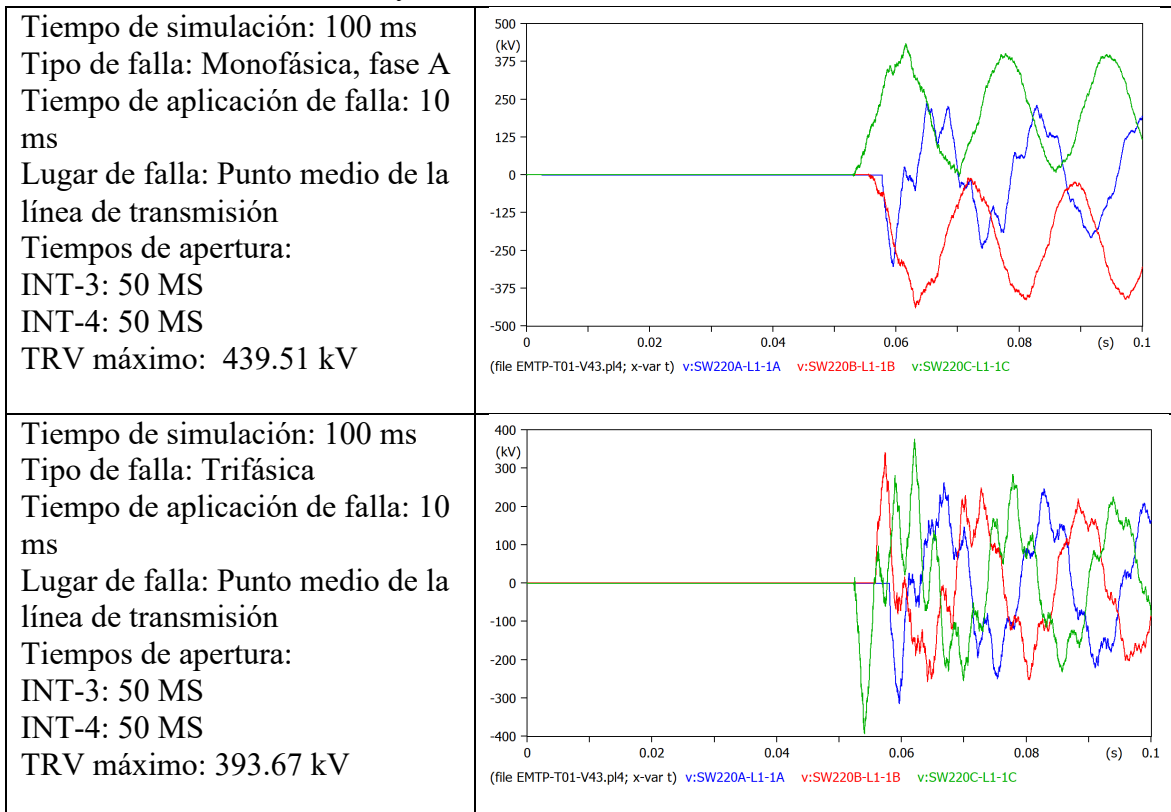


Figura 7. Falla en el punto medio de la línea de transmisión.

La Figura 7 muestra las gráficas de voltaje en terminales del interruptor INT-3, al liberar una falla aplicada en el punto medio de la línea de transmisión SW-SN de 220 kV. Al igual que

en el caso anterior, la falla monofásica es más severa que la falla trifásica, aunque esta última distorsiona más las señales de voltaje.

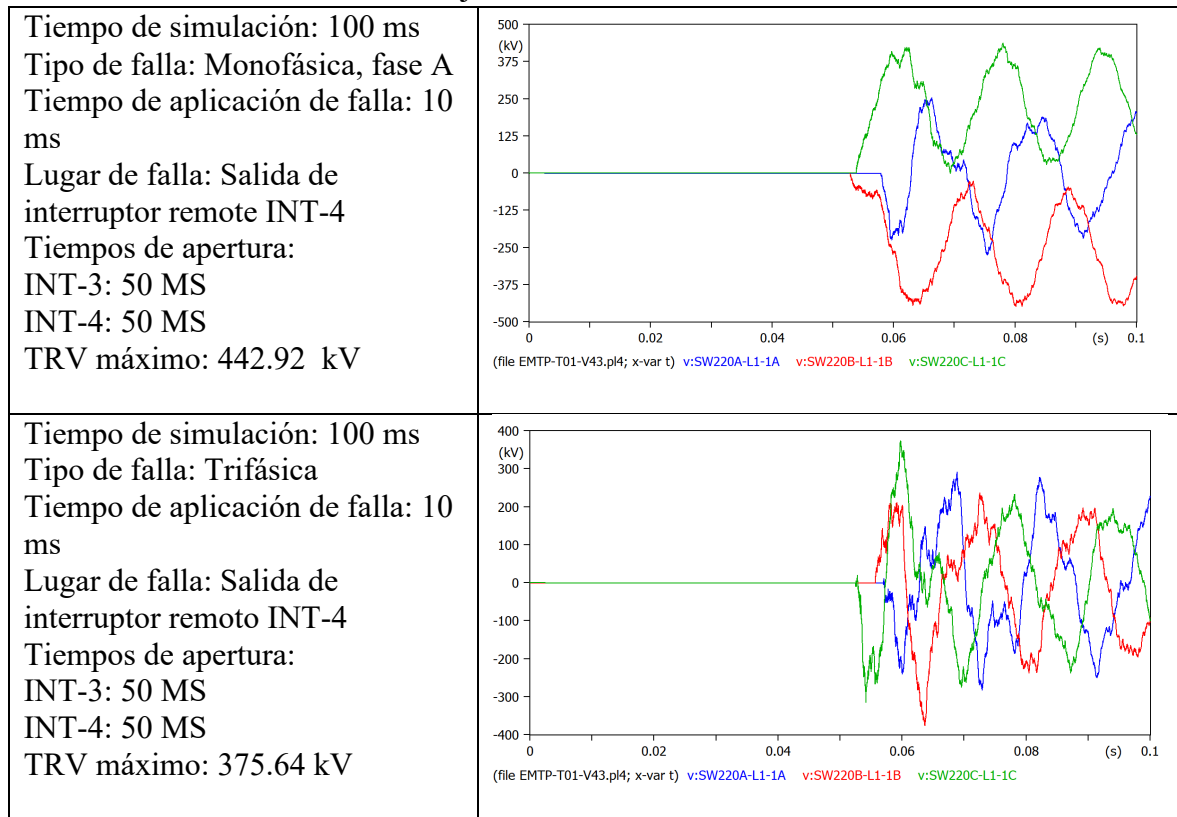
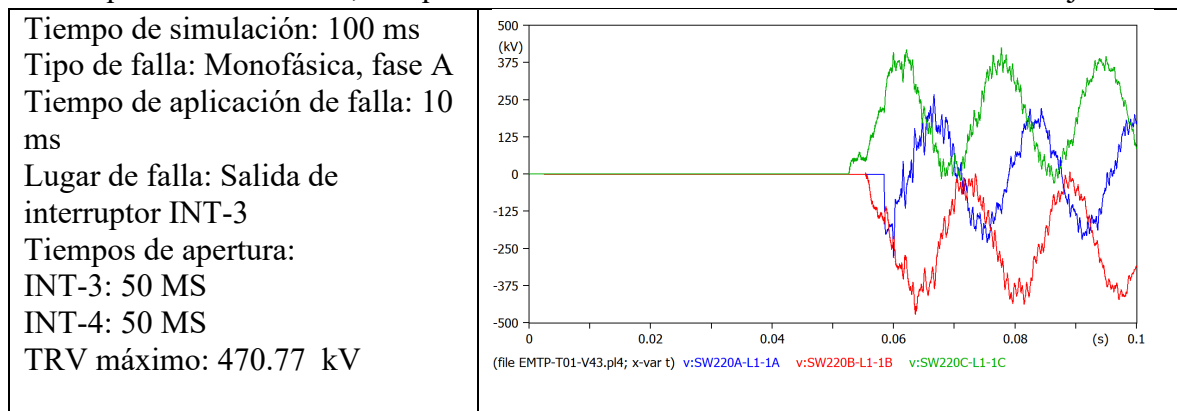


Figura 8. Falla a la salida del interruptor remoto INT-4.

La Figura 8 muestra las gráficas de voltaje en terminales del interruptor INT-3, al liberar una falla aplicada a la salida del interruptor remoto de la línea de transmisión SW-SN de 220 kV, es decir, el interruptor INT-4. Al igual que en el caso anterior, la falla monofásica es más severa que la falla trifásica, aunque esta última distorsiona más las señales de voltaje.



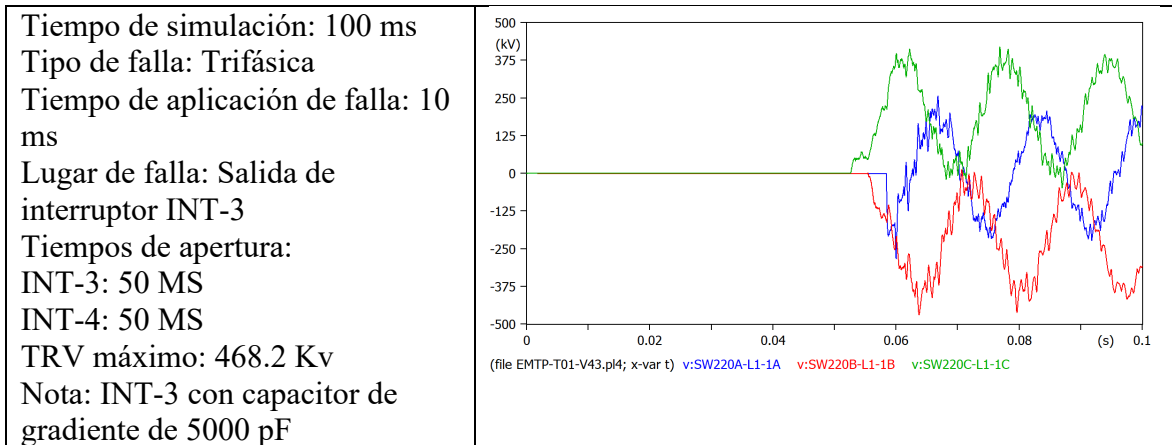


Figura 9. Efecto de un interruptor con capacitor de gradiente de 5,000 pF.

La Figura 9 muestra las gráficas de voltaje en terminales del interruptor INT-3, ante una falla a la salida del mismo interruptor con la inclusión de un capacitor de gradiente de 5,000 pF en paralelo con los contactos del interruptor. El comportamiento del TRV en el interruptor INT-3 es similar a los casos anteriores, no presentando una diferencia significativa la inclusión de los capacitores de gradiente.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se ha mostrado un estudio de Tensión Transitoria de Recuperación o TRV en un interruptor de 220 kV, analizando la influencia del tipo de falla, la localización de la falla y agregando una medida de mitigación consistente en la inclusión de un capacitor de gradiente en el interruptor analizado. Se ha utilizado el software ATPDraw por considerarlo una herramienta de uso extendido para este tipo estudios.

Se utilizó el modelo de Bergeron para las líneas de transmisión por ser considerado un modelo apropiado para estudios de TRV de acuerdo con la literatura consultada. Así mismo, de acuerdo con los datos disponibles del transformador se decidió utilizar un modelo Híbrido (XFMR) apoyándose de algunos datos típicos incluidos en el modelo. No se consideran generadores en el área de interés, únicamente los equivalentes de red para incluir el efecto del sistema completo.

Los resultados muestran que la falla monofásica presenta valores más severos de TRV que la falla trifásica, aplicadas ambas en el mismo punto del sistema, aunque la falla trifásica ocasiona una mayor distorsión de las señales de voltaje. Así mismo la falla trifásica se presenta más severa cuando ocurre a mitad de la línea de transmisión o en el interruptor del extremo opuesto de la línea, lo cual puede atribuirse al efecto capacitivo de la línea de transmisión.

Finalmente, la inclusión de un capacitor de gradiente en paralelo con los contactos del interruptor bajo estudio no ocasiona una diferencia significativa en los valores del TRV, por lo que en este caso no se considera una medida apropiada para la reducción del fenómeno analizado. Los resultados obtenidos son de utilidad para realizar la coordinación de

aislamiento de los equipos y para dimensionar los interruptores con base a los valores máximos de voltaje que deben soportar.

Para investigaciones futuras es conveniente incluir generación en el sistema, no solo los equivalentes de red, con el fin de analizar el comportamiento del TRV ante la inclusión de otras fuentes de corto circuito. Así mismo se puede modelar otras medidas de mitigación como las resistencias de preinserción o los mandos sincronizados en los interruptores.

5. Referencias

- Araujo, A. S. (2014). Comparing Lumped and Distributed Parameters Models in Transmission Lines during Transient Conditions. *IEEE PES T&D Conference and Exposition*.
- Bonneville Power Administration. (2012). *ATPDraw web page*. <https://www.atpdraw.net/index.php>
- EEUG European EMTP-ATP User's group. (2024). *ATP-EMTP*. <https://atp-empt.org/index.php>
- Filipovic-Grcic, B., Stipetic, N., Vukovic, F., Jerkovic, A., Sanic, M., & Musulin, K. (2023). Transient recovery voltage investigation on HV circuit breaker in hydro power plant. *Electric Power Systems Research*.
- Gaobo, W., Jiangjun, R., Daochun, H., Shengwen, S., & Kun, Z. (2011). Review of grading capacitors of Multi-Break Vacuum Circuit Breakers. *High Voltage Apparatus*, 77-81.
- Hoidalen, H. P. (2023). *ATPDraw User's Manual versión 7.5*. SYSTRAN Engineering Services.
- INEL Engineering Education. (2024). *Engineering Education*. <https://inelinc.com/>
- International Electrotechnical Commission IEC. (2019). *IEC 60071-1 Insulation Coordination*.
- Lazzarri, E., & De Morais, A. (2023). A Comprehensive Review on Transient Recovery Voltage in power systems: models, standarization and analysis. *Energies*.
- León, J. K. (2018). Mathematical models of transmission lines for electromagnetic transient simulations in power systems. *Tecnia*.