

Adecuación de la capacidad de cortocircuito de un disyuntor de alta tensión en el contexto en el que es utilizado

Roberto Campoy. Ingeniero Electrónico Electricista Universidad de Mendoza. Ha sido Jefe de Obra Línea de Alta Tensión en 132 KV, Central Hidroeléctrica Nihuil I – ET Malargüe. Actualmente Gerente Técnico de La Cooperativa, Empresa Eléctrica de Godoy Cruz. Como Docente Profesor Titular Ordinario Sistemas de Potencia. Director del Instituto de Energía de la Facultad de Ingeniería. Profesor en el Postgrado “Diseño y Construcción de Líneas y Estaciones Transformadoras” CFNEE y ATEERA y Disertante en varios seminarios de carácter nacional e internacional.

Mario Cebreiro. Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional del Sur. Ha sido Gerente Operaciones TRANSBA, Gerente de Planta de las Centrales Eléctricas Necochea y Piedrabuena. Director Técnico Distrocuyo y Jefe Departamento en Investigación y Desarrollo de Electricité de France. Como Docente en la UNS, profesor del Posgrado Latinoamericano de Economía de la Energía del IDEE de la Fundación Bariloche y Profesor de la materia “Planeamiento Sistemas Eléctricos” en Universidad de Mendoza. Profesor en Postgrado “Diseño y Construcción de Líneas y Estaciones Transformadoras” CFNEE y ATEERA. Disertante en seminarios de carácter nacional e internacional.

RESUMEN-ABSTRAC

Durante años, la potencia de cortocircuito de la red de Argentina era lo suficientemente baja para permitir que la mayor parte de los interruptores/disyuntores de alta tensión tuvieran capacidad suficiente para interrumpir las máximas corrientes de cortocircuito. En ese momento, las empresas eran propiedad del Estado. Si las corrientes de cortocircuitos estaban cerca del límite del interruptor/disyuntor, entonces se decidiría su reemplazo. En la actualidad, con empresas privatizadas gestionando tanto transporte como distribución, al igual que las bajas tarifas, las decisiones de reemplazo de equipos se deben tomar con la mayor certeza de cuál es el equipo a sustituir.

PALABRAS CLAVE-KEYWORDS

Interruptor, Falla de Línea Corta, Capacidad de Ruptura, Impedancia Característica, Factor de Gravedad de la Falla.

Circuit Breaker, Short Line Fault, Rupture Capacity, Impedance Characteristic, Fault Gravity Factor.

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios del Sistema Eléctrico realizados con motivo de su expansión debidos a la puesta en servicio de la Central Hidroeléctrica Caracoles y la futura línea en 500 KV Chocón – Los Reyunos – Gran Mendoza, mostraban que la capacidad de cortocircuito en la Estación Cruz de Piedra, en 220 KV, se encontraba muy próxima a la potencia nominal de los interruptores allí instalados. Con el fin de evaluar los riesgos para el Sistema se realizaron estudios teóricos y ensayos para verificar la potencia de cortocircuito y si los interruptores mantenían su capacidad de ruptura, respectivamente. Se encontró que para tecnología de los interruptores y las características del sistema, las fallas conocidas como “Línea Corta”, eran las más exigentes.

2. CONDICIONES DEL SISTEMA ELÉCTRICO.

Las corrientes y tensiones que se utilizan para los estudios, se corresponden con las de máxima sollicitación del Sistema. La demanda es la máxima pronosticada por Cammesa ^[9], el operador del Sistema, como también la generación en el Área Cuyo, donde se ubica la Estación Transformadora Cruz de Piedra.

3. ESTUDIO DE COMPORTAMIENTO DE INTERRUPTORES CON APAGADO DEL ARCO POR SOPLADO DE AIRE COMPRIMIDO, ANTE LA FALLA DE LÍNEA CORTA

3.1 Diferencias de comportamiento entre distintas técnicas de corte. Extinción del arco por soplo de aire y en SF6

En la **Tabla I**, y **Figura 1**, se aprecian las diferencias de comportamiento ^{[1][2]}.

	Air blast	SF6
Thermal period duration	22 μ seg	5 μ seg
Current range before zero	500 A	100 A
Post arc current peak value	20 A	2 A
Voltage range after zero	40 KV	20 KV

Tabla I. Los valores típicos de magnitudes que caracterizan el período térmico del proceso de conmutación en el caso de una falla de línea corta.

Es muy importante recalcar que el período térmico, durante el cual puede haber re ignición del arco, es 5 veces mayor para el sistema de apagado del arco en aire que el

correspondiente al SF6. Además la tensión post cero es el doble en un caso, aire, respecto al otro, SF6.

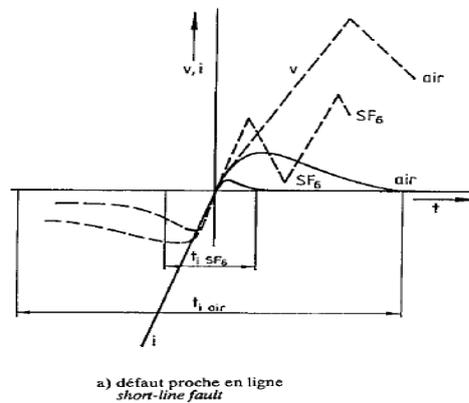


Figura 1. Período térmico t_i para falla de línea corta.

3.2 Datos característicos de las líneas de alta tensión

LÍNEA ALTA TENSIÓN (LAT) / DATOS	LAT 220 KV Agua De Toro	LAT 220 KV San Juan
<i>Longitud (Km)</i>	177,9	171,6
<i>Sección Al-Ac (mm²)</i>	435/35	435/35
<i>Cable guardia Ac-galv (mm²)</i>	70	70
<i>Resistividad terreno (Ω/m)</i>	590	70
<i>Potencia Natural (MW)</i>	120	123
<i>Impedancia Característica (Ω)</i>	402	392
<i>Resistencia Directa (Ω/Km)</i>	0,0746	0,0746
<i>Reactancia Directa (Ω/Km)</i>	0,4141	0,4141
<i>Susceptancia Capacitiva Directa (μS/Km)</i>	2,7322	2,7322
<i>Resistencia Homopolar (Ω/Km)</i>	0,3259	0,3168
<i>Reactancia Homopolar (Ω/Km)</i>	1,1917	1,2032
<i>Susceptancia Capacitiva Homopolar (μS/Km)</i>	1,8899	1,8899
<i>Relación R/X</i>	0,18	0,18
<i>Relación R₀/X₁</i>	0,78	0,76
<i>Relación X₁/X₀</i>	0,3474	0,3441
<i>Relación X₀/X₁</i>	2,8785	2,9061

Tabla II. Datos de las líneas de alta tensión, suministrados por la Empresa Transportista.

3.3 Condiciones para el estudio de la Falla de Línea Corta

El esquema eléctrico del estudio, **Figura 2**, que se muestra continuación, responde a la Figura 48 de la Norma IEC 62271-100, que se reproduce a continuación ^[31]:

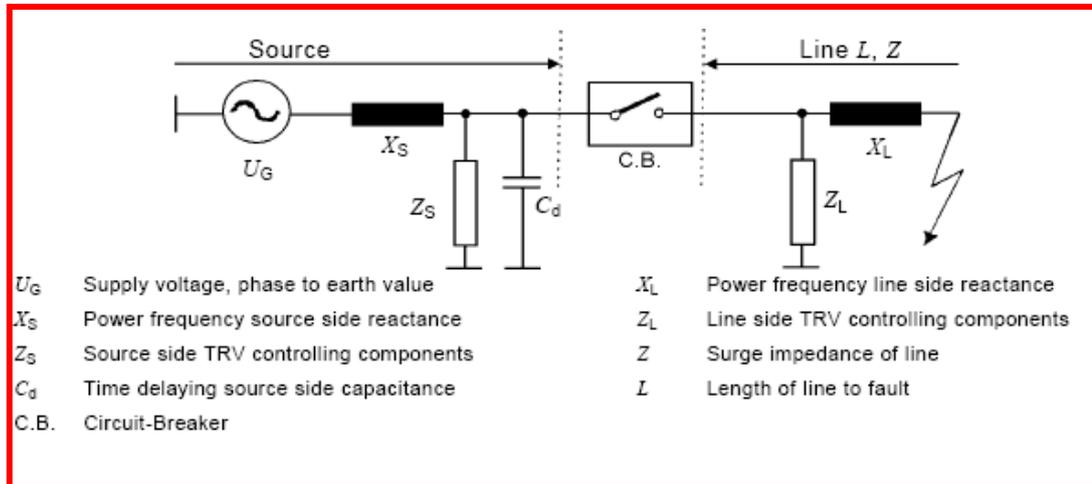


Figura 2. Circuito básico de falla de línea corta.

La Falla de Línea Corta, se caracteriza por presentar dos condiciones distintas de funcionamiento a ambos lados de los terminales del interruptor, hacia el lado fuente y hacia el lado línea. Este comportamiento a su vez está caracterizado por una onda viajera hacia el lado línea y una onda similar a la Falla Terminal, hacia el lado fuente. La diferencia de ambas tensiones máximas, es aquella efectivamente puesta en juego entre los terminales del interruptor, tal cual se ve en la **Figure 3**.

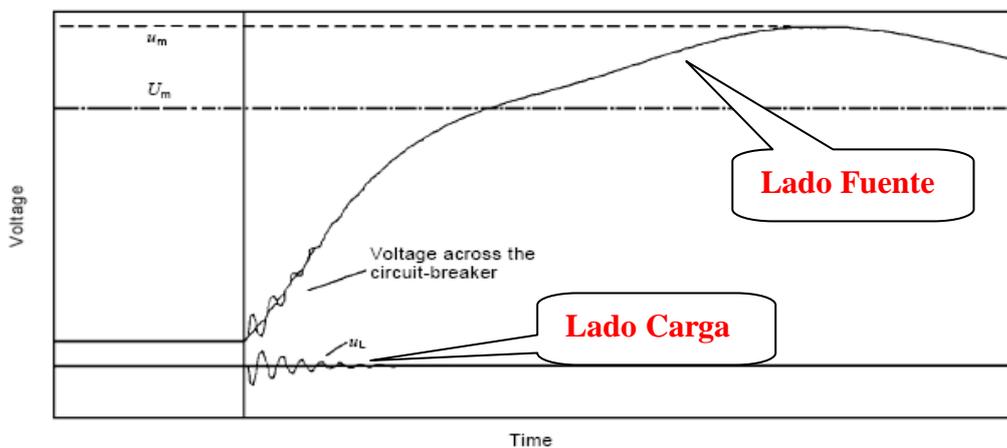


Figure 3. Tensión lado fuente, lado carga y a través del interruptor.

3.4 Solicitud en condición de falla sobre el interruptor

La sollicitación sobre el interruptor, impuesta por la SLF, se puede visualizar claramente en la **Figure 4**, donde el paralelepípedo formado por: i) el valor de la Corriente de Falla donde está emplazado el interruptor ($I_{K''IAP}$), ii) el Pico de la Tensión Transitoria de Restablecimiento (TTR) (U_{IIAP}) y iii) la Velocidad de Crecimiento de esa TTR (V_{IIAP}), conforman un volumen que determina la gravedad de la falla [4].

El punto C, donde se cortan las tres magnitudes, se desplaza a lo largo de la recta AB, que representa la distancia desde el interruptor a la falla, con longitud igual a infinito, en el punto A y a cero en el punto B. Cuando el paralelepípedo tenga volumen máximo aparece la peor condición para el interruptor. Se demuestra que por la interrelación existente entre las tres magnitudes involucradas, el volumen máximo corresponde a un valor de la corriente de falla sobre la línea igual a 2/3 de la correspondiente en bornes del interruptor. Se puede definir el Factor de Gravedad de la Falla, G, a través de la vinculación de las magnitudes involucradas según la siguiente expresión:

$$G = I_{K''IAP} (KA) * V_{IIAP} \left(\frac{KV}{\mu seg} \right) * U_{IIAP} (KV)$$

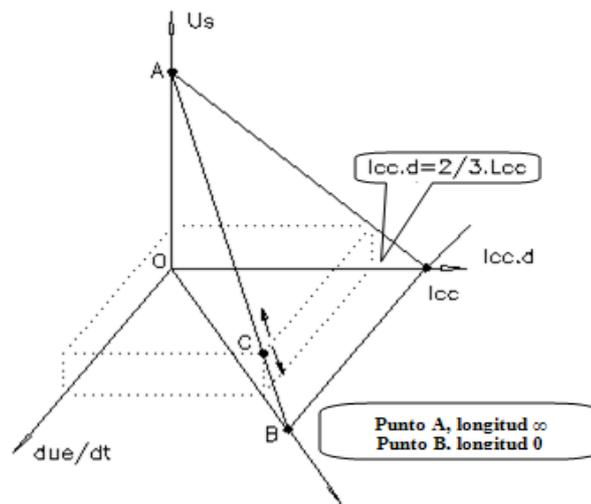


Figure 4. Comportamiento del Factor de Gravedad de la falla en función de las magnitudes involucradas.

$$V_{IIAP} = \text{Pendiente de la TTR lado LAT} = \frac{dU_{LAT}}{dt} = \frac{1}{\sqrt{LZ * CZ}} * XZ * I_{K''IAP} * \sqrt{2}$$

$$V_{IIAP} = -Z(\Omega) \cdot \sqrt{2} \cdot I_{K''IAP} (KA) \cdot 2\pi \cdot fz (KHz) \cdot 10^{-6} KV / \mu seg$$

$$U_{IIAP} = 2 * \text{Distancia a la falla} * XZ * I_{K''IAP} * \sqrt{2}$$

Es decir que el factor de gravedad es proporcional a la tercera potencia de la corriente de falla en la ubicación del interruptor y proporcional a la longitud donde se produce la falla.

El valor de la corriente de falla a una distancia del interruptor, será:

$$I_{K^{n}distancia} = \frac{U_{impuesta\ por\ el\ sistema}}{X_S + X_Z}$$

La longitud que produce la peor condición será:

$$l = \frac{U_{impuesta\ por\ el\ sistema}}{I_{K^{n}distancia} * X_Z} - \frac{X_S}{X_Z}$$

De donde el factor de gravedad toma la siguiente forma:

$$G = Constante * I_{K^{n}distancia}^3 * \left[\frac{U_{impuesta\ por\ el\ sistema}}{I_{K^{n}distancia} * X_Z} - \frac{X_S}{X_Z} \right]$$

Simplificando, la expresión queda:

$$G = Cte * I_{K^n}^3 \left[\frac{U}{I_{K^n} * X_Z} - \frac{X_S}{X_Z} \right]$$

El valor máximo se obtiene para $dG/dI_{K^{n}distancia} = 0$, derivando la expresión anterior como un producto es decir:

$$\frac{dG}{dI_{K^n}} = Cte * 3I_{K^n}^2 \left[\frac{U}{I_{K^n} * X_Z} - \frac{X_S}{X_Z} \right] + Cte * I_{K^n}^3 \left[-\frac{U}{I_{K^n}^2 * X_Z} \right]$$

Igualando a cero y sacando factor común $Cte * I_{K^n}^2$, resulta:

$$0 = Cte * I_{K^n}^2 \left\{ 3 * \left[\frac{U}{I_{K^n} * X_Z} - \frac{X_S}{X_Z} \right] + I_{K^n} \left[-\frac{U}{I_{K^n}^2 * X_Z} \right] \right\}; \quad 0 = \frac{3 * I_{K^n} * U - 3 * X_S * I_{K^n}^2 - U * I_{K^n}}{X_Z}$$

$$0 = 2 * U - 3 * X_S * I_{K^n}$$

$$I_{K^{n}distancia} = \frac{2}{3} * \frac{U_{impuesta\ por\ el\ sistema}}{X_S} = \frac{2}{3} * I_{K^{n}IAP}$$

Con lo cual, el interruptor es expuesto a la máxima sollicitación cuando la corriente en el punto de falla denota dos tercios de la corriente en bornes del interruptor.

3.5 Determinación del valor de la corriente de falla en el punto de emplazamiento del interruptor

Se calculan las corrientes de cortocircuito tripolar y unipolar a tierra, en el punto de instalación del interruptor, a través de las siguientes fórmulas ^[5]:

$$I_{K''1P} = \frac{3 \cdot 1,1 \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot \left(2 + \frac{Z^0}{Z^1}\right) \cdot Z^1}; I_{K''3P} = 1,1 \cdot \frac{U_N}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{Z^1}$$

Se calculan las impedancias de secuencia, de la red asociada a la Potencia de Cortocircuito tripolar ($S_{K''3P} = 3400$ MVA) y unipolar ($S_{K''1P} = 4700$ MVA), ambas en Barras de 220 KV, extraída de la Guía de Referencia de la empresa Transportista ^[10], a través de las siguientes expresiones:

$$Z_Q^1 = 1,1 \frac{U_N^2}{S_{K''3P}} = 1,1 \frac{220^2}{3400} = 15,65 \Omega$$

$$Z_Q^0 = \frac{3 \cdot 1,1 U_N^2}{S_{K''1P}} - 2Z_Q^1 = \frac{3 \cdot 1,1 \cdot 220^2}{4700} - 2 \cdot 15,65 = 18,33 \Omega$$

Los valores obtenidos, para la corriente de cortocircuito alterna eficaz, son:

$I_{K''3PIAP} = 8938$ A; para la condición más exigente: $2/3 I_{K''3PIAP} = 5959$ A
 $I_{K''1PIAP} = 12348$ A; para la condición más exigente: $2/3 I_{K''1PIAP} = 8232$ A

También se considerará el valor de la corriente alterna inicial de cortocircuito y el de la de choque, presuponiendo que el interruptor, debe realizar un cierre sobre falla, producto de un recierre. Para la determinación de ésta última se recurre a la **Figura 5** ^[6].

The factor κ for the R/X or X/R ratio shall be obtained from figure 15 or calculated by the following expression:

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \quad (55)$$

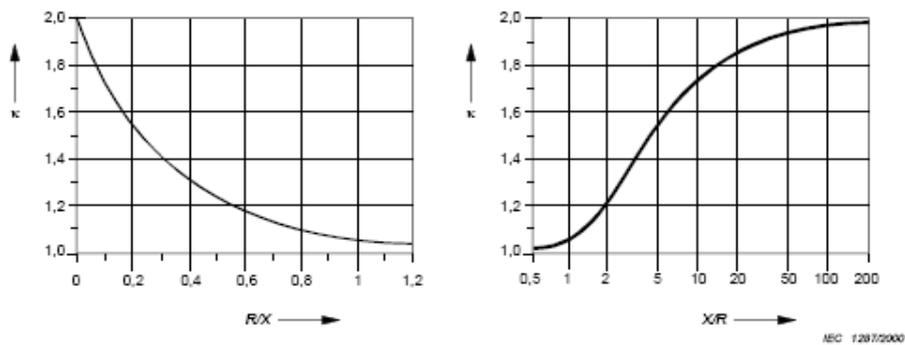


Figura 5. Factor K para circuito en serie como una función de la relación R / X o X / R.

Con **$K = 1,6$** , los valores obtenidos son:

$I_{S3IAP} = K \cdot 1,4142$. $I_{K''3PIAP} = 20224$ A; para la condición más exigente: $2/3 I_{S3PIAP} = 13483$ A

$I_{SIAP} = K \cdot 1,4142$. $I_{K''IPIAP} = 27940$ A; para la condición más exigente: $2/3 I_{SIPIAP} = 18627$ A

Los valores pico de la alterna inicial de cortocircuito son:

$I_{P3IAP} = 1,4142$. $I_{K''3PIAP} = 12640$ A; para la condición más exigente: $2/3 I_{P3PIAP} = 8427$ A

$I_{PIIAP} = 1,4142$. $I_{K''IPIAP} = 17462$ A; para la condición más exigente: $2/3 I_{PIPIAP} = 11641$ A

3.6 Determinación del valor Pico de la Tensión Transitoria de Restablecimiento

El valor a considerar es el correspondiente a la TTR del lado de fuente, ya que efectivamente el interruptor debe soportar esta condición y no la producida hacia el lado de carga, pues su efecto al momento de la interrupción ya ha desaparecido [7].

$$U_{fuente} = (1 + 0,4 \cdot S) \frac{\sqrt{2} U_n}{\sqrt{3}} ; \quad U_{fuente} = (1 + 0,4 \cdot 0,666) \frac{\sqrt{2} U_n}{\sqrt{3}} = 227,74 \text{KV}$$

Donde S , es la relación de corrientes en el punto de falla y la que produce la peor condición para el interruptor.

3.7 Determinación de la Velocidad de Crecimiento de la TTR

La dificultad en la interrupción, se da por la elevada velocidad de crecimiento de la TTR. Esto se visualiza en la **Figura 6**, donde U_a tensión de arco, U_e tensión inicial de extinción del arco, U_p recuperación de la rigidez dieléctrica del medio extintor del arco.

Es evidente que a mayor velocidad de crecimiento de la TTR, más fácil es que se presente la re-ignición de arco y por lo tanto que el interruptor falle [8].

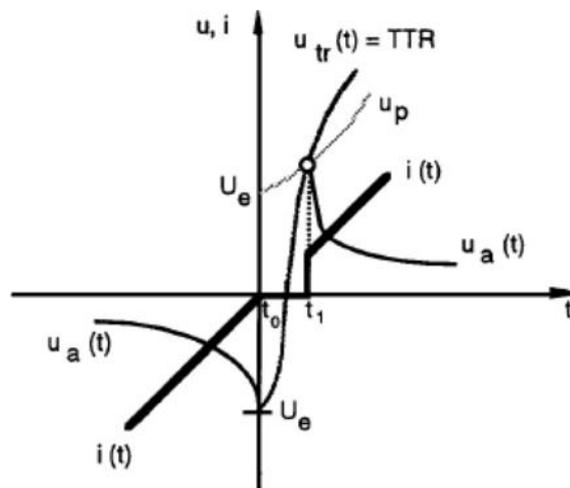


Figure 6. Fallo dieléctrico en el interruptor.

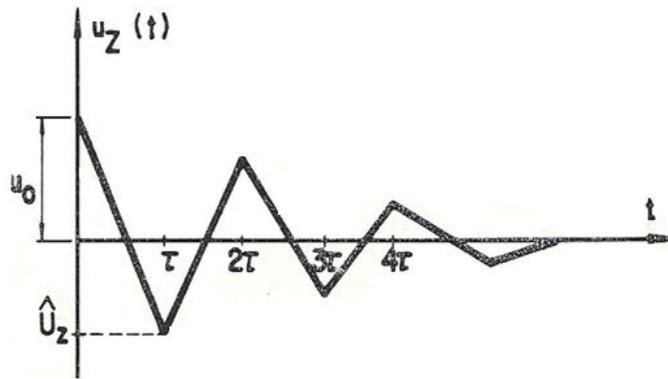


Figure 7. Onda propagada hacia lado de carga

La velocidad de crecimiento de la onda viajera hacia el lado de carga, depende de la conformación de una onda tipo diente de sierra que viaja de un extremo al otro hasta desaparecer, y durante este trayecto sufre reflexiones y refracciones. La onda se propaga entre una $Z=0$, que es el cortocircuito en el extremo en falla y una $Z \neq 0$ y cuyo valor está dado por el arco eléctrico que se produce en el interruptor o por una $Z = \infty$, si está abierto. Por lo tanto el valor de la onda de sobretensión se reduce a la mitad en uno de los extremos y se duplica en el otro.

Entonces la onda responde a la **Figura 7** y a la fórmula que se detalla a continuación:

$$Vl = -Z(\Omega) \cdot \sqrt{2} \cdot Ik'' \text{ pfalla}(KA) \cdot 2\pi \cdot fz(KHz) \cdot 10^{-6} \text{ KV} / \mu\text{seg}$$

La frecuencia de oscilación es:

$$fz = \frac{1}{2\pi\sqrt{Lz \cdot Cz}} \text{ Hz}; fz = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,00132 \cdot 0,008701 \cdot 10^{-6}}} = 46985 \text{ Hz}; Lz \text{ y } Cz, \text{ del lado de carga.}$$

La impedancia característica, en la peor condición para el interruptor, es la correspondiente a la que surge cuando se despeja el último polo en una falla monofásica a tierra.

$$Z_{equivalente\ ultima\ polo} = \frac{2 \cdot Z1 + Z0}{3}$$

$$Z1 = \sqrt{\frac{L1}{C1}} = \sqrt{\frac{0,4141 / 2,3,14,50}{2,7322 \cdot 10^{-6} / 314}} = \sqrt{\frac{0,00132 \text{ Hy}}{0,008701 \cdot 10^{-6} F}} = 389 \Omega ;$$

$$Z0 = \sqrt{\frac{L0}{C0}} = \sqrt{\frac{0,00379 \text{ Hy}}{0,006018 \cdot 10^{-6} F}} = 794 \Omega$$

$$Z_{equivalente\ ultima\ polo} = \frac{2 \cdot Z1 + Z0}{3} = 524 \Omega$$

La velocidad de crecimiento de la TTR es entonces:

$$U_i = -524 * 18,62 * 6,28 * 46,985 * 10^{-6} = 2,87 \text{ KV}/\mu\text{seg}$$

Como puede apreciarse en la **Tabla III**, se supera la velocidad de crecimiento lo que ya está indicando una situación desventajosa para el interruptor.

Rated voltage	Test-duty	First-pole-to-clear factor	Amplitude factor	First reference voltage	Time	TRV peak value	Time	Time delay	Voltage	Time	RRRV ^b
U _n kV		k _{pp} p.u.	k _{af} p.u.	u ₁ kV	t ₁ μs	u _c KV	t ₂ μs	t _d μs	u' kV	t' μs	u ₁ /t ₁ kV/μs
245	Terminal fault	1,3	1,40	195	98	364	392	2	98	51	2
	Short-line fault	1	1,40	150	75	280	300	2	75	40	2
	Out-of-phase	2	1,25	300	196	500	392-784	2-20	150	117	1,54

Tabla III. Valores estándar de tensión transitoria de restablecimiento.

3.8 *Determinación de la Capacidad de Ruptura del interruptor*

Según el Diccionario Electrotécnico Internacional, la Capacidad de Ruptura, es la tensión en la cámara del interruptor, multiplicada por la corriente que efectivamente interrumpe, ambas magnitudes al instante de la separación de los contactos.

$$CR = \sqrt{3} \cdot U_{entrepolos} \text{ (KV)} \cdot I_{k''1p} \text{ (KA)} = 1,73 \cdot 227,74 \cdot 18,62 = 7.336 \text{ MVA}$$

Valor que supera a la Capacidad de Ruptura que es de 5000 MVA.

4. CONCLUSIONES

Evidentemente los interruptores de apagado del arco con soplado de aire, presentan dos problemas críticos para seguir manteniéndolos en servicio: i) se supera su capacidad de ruptura y ii) se corre el riesgo de una falla dieléctrica al momento de su apertura. Por eso se justifica su reemplazo por interruptores con apagado del arco en SF6 o al menos, se deben evitar las condiciones en el Sistema con máxima generación local y todas las interconexiones vinculadas.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Working group 13.05 of Study Committee A3 CIGRÉ - "State of the art of circuit-breaker modeling." Brochure 135. December 1998.

- [2] Working Group A3 - “*Guide for application of IEC 62271-100 y IEC 62271-1*”, Part I and II. Brochures 304 and 305 – October 2006. Point 5.3. Part II.
- [3] IEC 62271-100. – “*Hight Voltage Switchgear and controlgear. Part 100*”.
- [4] SIEGERT, L. “Alta tensión y sistemas de transmisión”.
- [5] WAGNER, C. F., EVANS, R.D. - “*Symmetrical Components*”. Krieger Publishing Company, Florida, 2000
- [6] IEC 60909 – “*Short circuit current in three phase A.C. Systems*”.
- [7] J.C. TOBÍAS, J. C. “*Análisis de las tensiones de restablecimiento para ensayos de interruptores de alta tensión*”. Revista Electrotécnica, marzo – abril 1980.
- [8] RAVINDRANATH, B., CHANDLER, M. – “*Protección de sistemas de potencia e interruptores*”. Publisher, Limusa, 1980.
- [9] Distrocuyo S.A. Guía de - Referencia del Transporte - Año 2008.
- [10] DUFOURNET, D. “*Treatment of extreme stresses on high-voltage circuit-breakers in IEC 62271-100*”. Chairman IEC SC 17A France – CIGRÉ Paris 2006 – A3 302 - 2.3 pp 4,5. 2006.