



# Transient Recovery Voltage (TRV) y su impacto en el Sistema Eléctrico Nacional Experiencia Chilena



VÍCTOR VELAR G.  
COORDINADOR ELÉCTRICO  
NACIONAL  
Noviembre 2017

# Índice

- ❑ INTRODUCCIÓN
- ❑ DIRECTRICES ESTUDIOS DE TRV
- ❑ EXPERIENCIA CHILENA: SISTEMA 500 kV CHARRÚA-ANCOA-ALTO JAHUEL
- ❑ EXPERIENCIA CHILENA: SISTEMA 500 kV LOS CHANGOS-NUEVA CARDONES-POLPAICO
- ❑ DESAFÍOS Y TEMAS FUTUROS

# INTRODUCCIÓN

# INTRODUCCIÓN

## □ Importancia del fenómeno de TRV en Chile

❖ Asociado a la expansión del sistema de transmisión de 500 kV con Compensación Serie:

- Charrúa – Ancoa 2x500 kV
- Ancoa – Alto Jahuel 2x500 kV



Primeros estudios de TRV desarrollados por Transelec el año 2002

- Los Changos – Nueva Cardones 2x500 kV
- Nueva Cardones – Polpaico 2x500 kV



Estudios de TRV desarrollados por TEN, ISA-InterChile y El Coordinador entre el 2015 y 2017

## □ Principales Equipos Afectados

- ❖ Interruptores de 500 y 220 kV aledaños a la Compensación Serie
- ❖ Interruptores de 500 kV de reactores de línea

# INTRODUCCIÓN

## □ Formas de abordar el análisis de TRV

- ❖ Diseño de equipos □ Estudios de responsabilidad del propietario de las instalaciones
- ❖ Dada la envergadura e importancia del proyecto de Interconexión del SEN, el Coordinador encargó estudios propios de verificación
- ❖ El Coordinador desarrolló directrices internas para los estudios propios y para evaluar los estudios de los propietarios
- ❖ Criterio común para abordar el estudio de TRV
  - Simulaciones estadísticas □ Dan cuenta de la naturaleza compleja y aleatoria del fenómeno
  - Simulaciones deterministas □ Análisis detallado de los casos críticos
  - Diversos escenarios y localizaciones y tipos de falla
  - Software EMTP-ATP o similar

# DIRECTRICES ESTUDIOS DE TRV

# DIRECTRICES ESTUDIOS DE TRV

## ❑ **Objetivo**

- ❖ Directrices internas del Coordinador (formuladas el año 2016) en el marco de los estudios de la operación interconectada del SEN
- ❖ Indicaciones generales para realizar y revisar estudios de TRV
- ❖ Establecer alcances y metodologías comunes
- ❖ Reconocer que las normas internacionales (IEC 62271-100, IEEE C37.04) están orientadas al diseño y prueba de interruptores, no al estudio del fenómeno de TRV

## ❑ **Escenarios**

- ❖ Generación Máxima (condición de operación factible)
- ❖ Verificación de casos más exigentes en Generación Mínima

## ❑ **Condiciones de operación**

- ❖ Red N
- ❖ Verificación de casos más exigentes en Red N-1

# DIRECTRICES ESTUDIOS DE TRV

## □ Tipos de análisis: interrupción de corrientes de falla

❖ Tipos de falla: 3FT, 3F, 2FT, 2F, 1FT.

❖ Localización de falla:

- Falla en Terminal (Terminal Fault [TF])
  - Falla en terminal de transformador (Transformer-Limited Fault [TLF])
  - Falla en terminal de reactor
- Falla en Línea de Transmisión (Line Fault [LF])
  - Inicio o final de la línea (portales)
  - $A < 5$  km del interruptor de línea (falla kilométrica o Short Line Fault [SLF])
  - Al 25, 50 y 75% de la longitud de la línea (Long Line Fault [LLF])
  - Terminales de la CCSS (podrán estar cubiertas por la TF o la SLF)
- Falla en Oposición de Fase (Out-of-Phase-Fault [OPF])



# DIRECTRICES ESTUDIOS DE TRV

## ☐ Tipos de análisis: interrupción de corrientes de carga

### ❖ Corrientes de carga capacitiva (Capacitive-Load Switching)

- Desenergización de líneas en vacío
- Desenergización de cables en vacío
- Desenergización de bancos de condensadores

### ❖ Corrientes de carga inductiva (Inductive-Load Switching)

- Interrupción de corrientes en reactor shunt
- Desenergización de transformador en vacío

## ☐ Modelación

- ❖ Software recomendado: ATP o similar

# DIRECTRICES ESTUDIOS DE TRV

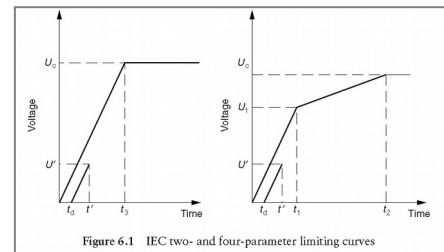
## ❑ Modelación

- ❖ Sistema eléctrico modelado en detalle en la zona de interés
- ❖ Sistemas equivalentes en zonas no relevantes
- ❖ Capacitancias de elementos relevantes: transformadores de corriente y potencial, pararrayos, bushings SF6-aire, enrollados trafos de poder, etc.
- ❖ Modelación simplificada de barras: con capacitancias concentradas. Ver si se justifican modelaciones más detalladas ☐ Excesivo tiempo de simulación computacional
- ❖ Líneas dentro zona de influencia: modelo de parámetros distribuidos
- ❖ Líneas fuera zona de influencia: modelo de parámetros concentrados
- ❖ CCSS: modelar el sistema de protección: varistor (MOV), Spark gap, interruptor de bypass.
- ❖ Interruptor ideal

# DIRECTRICES ESTUDIOS DE TRV

## □ Simulación

- ❖ Simulaciones Estadísticas □ Tiempos aleatorios de falla y apertura de interruptores
  - Aplicación de falla: en cualquier instante dentro de un ciclo □ Distribución de probabilidad Uniforme en un ciclo (20 ms). N° de simulaciones: 20-100.
  - Apertura de interruptores: distribución de probabilidad Normal
- ❖ Simulaciones Deterministas □ Tiempos de los casos estadísticos más exigentes
  - Casos: los estadísticos de máximo TRV y RRRV
  - Resultados: para las tres fases o polos □ No siempre el máximo TRV se da en el primer polo en abrir
    - Magnitud del primer “peak” de TRV (en kVpeak).
    - Tiempo en alcanzar el primer “peak” de TRV (en  $\mu$ s).
    - Magnitud de RRRV (en kVpeak/ $\mu$ s).
    - Magnitud del máximo TRV (en kVpeak).
    - Tiempo en alcanzar el máximo TRV (en  $\mu$ s).
    - Corriente interrumpida (en kApeak y kArms).



# DIRECTRICES ESTUDIOS DE TRV

## ☐ Análisis

- ❖ Comparar resultados de simulaciones deterministas con:
  - Curvas de TRV normalizadas según las normas IEC o IEEE (envolvente de 2 o 4 parámetros)
  - Curvas de TRV o informes de prueba del fabricante del interruptor
  - Las curvas de TRV determinadas por las simulaciones deberán estar por debajo de las envolventes normalizadas o las informadas por el fabricante

## ☐ Entregables

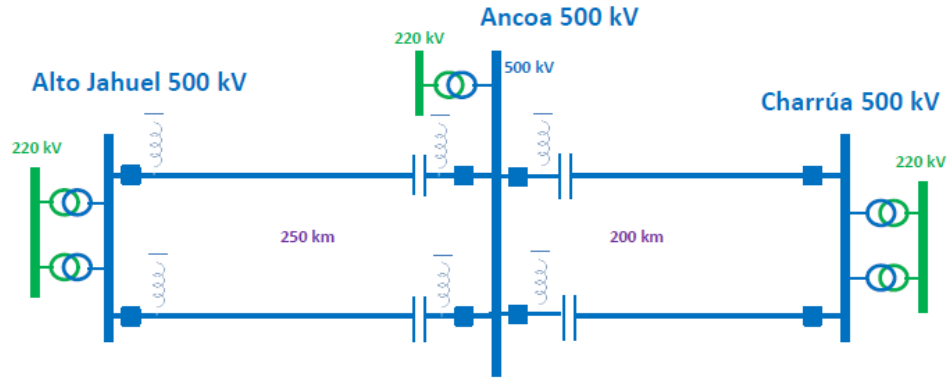
- ❖ Informe técnico
- ❖ Bases de datos ATP-EMTP (o similar) con el fin de reproducir los resultados principales

EXPERIENCIA CHILENA

# EXPERIENCIA CHILENA

## ☐ Sistema de 500 kV Charrúa – Ancoa – Alto Jahuel (año 2002)

- ❖ Estudios desarrollados por Alstom el año 2002 ☐ Extensión del sistema de 500 kV hasta Charrúa (con CCSS en Ancoa) y entrada de central Ralco



- ❖ Antes del 2002 el fenómeno de TRV no se había estudiado en detalle

# EXPERIENCIA CHILENA

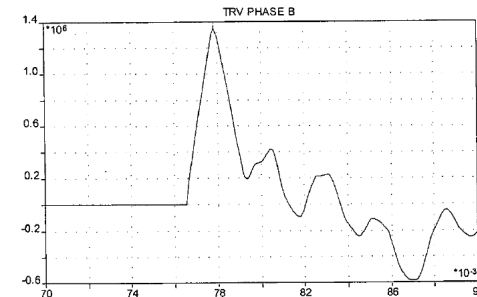
## □ Sistema de 500 kV Charrúa – Ancoa – Alto Jahuel (año 2002)

❖ Este estudio ya muestra aspectos metodológicos presentes en los estudios actuales:

- Análisis estadísticos y determinísticos con EMTP-ATP
- Diversos escenarios de nivel de cortocircuito
- Red N y Red N-1
- Fallas 1F-T, 2F-T, 3F-T y 2F. Cierre en Oposición de Fase.
- Se descarta falla 3F por su baja probabilidad de ocurrencia.
- Diversas localizaciones de falla: terminales y a lo largo de las líneas

❖ Resultados indicaron:

- Elevados niveles de TRV  $\approx 1200 - 1350$  kV



# EXPERIENCIA CHILENA

## □ Sistema de 500 kV Charrúa – Ancoa – Alto Jahuel (año 2002)

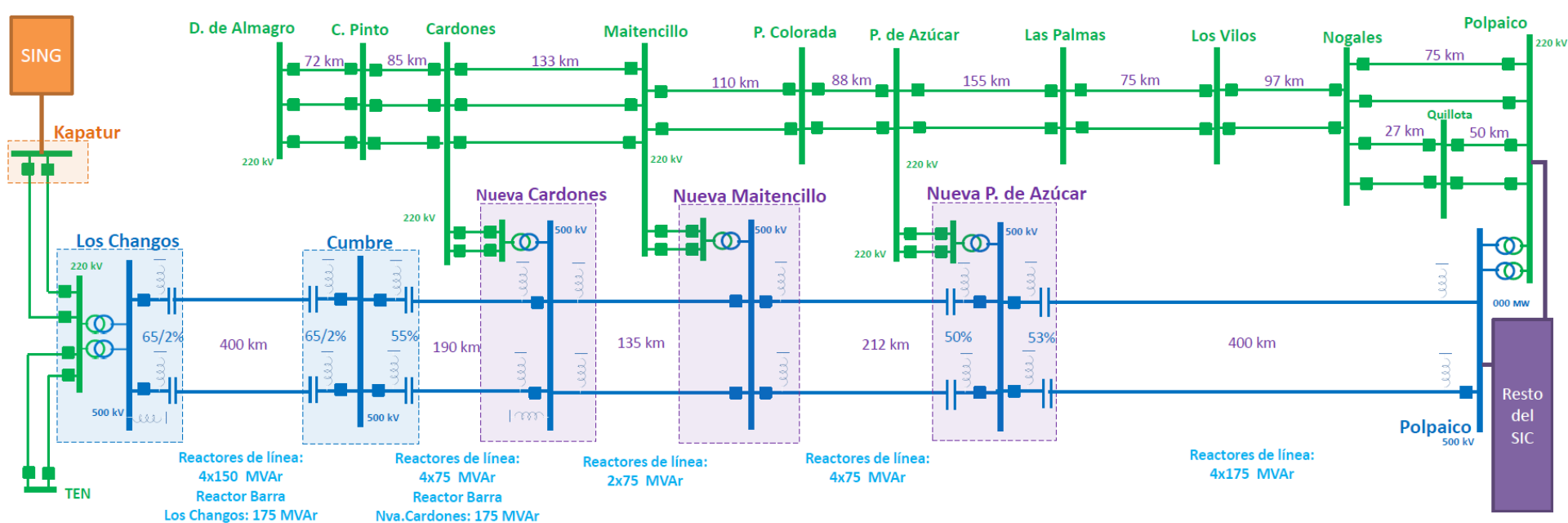
### ❖ Resultados indicaron:

- Altos niveles de TRV para bajas corrientes de interrupción □ No hay bypass de la CCSS □ Tensión longitudinal DC queda atrapada en el lado de la línea del interruptor
- El mayor nivel de TRV se produce para Red N
- Operaciones con protección de respaldo generan mayor nivel de TRV que operaciones con protección principal
- Baja frecuencia de ocurrencia de los más altos TRV: 1 en 40 simulaciones para una localización y falla dada.
- Interruptores antiguos (tramo Ancoa-Alto Jahuel) no soportarían el TRV □ No había información concluyente del fabricante



# EXPERIENCIA CHILENA

## ☐ Sistema de 500 kV Los Changos – Nueva Cardones – Polpaico (año 2018)



# EXPERIENCIA CHILENA

## ❑ Sistema de 500 kV Los Changos-Cumbre-Nueva Cardones

- ❖ Los interruptores soportan los TRV y RRRV impuestos por el sistema
- ❖ Interruptores de 500 y 220 kV de TEN con tensión de diseño para 800 y 365 kV respectivamente    ➤ Pueden soportar mayores niveles de TRV y RRRV

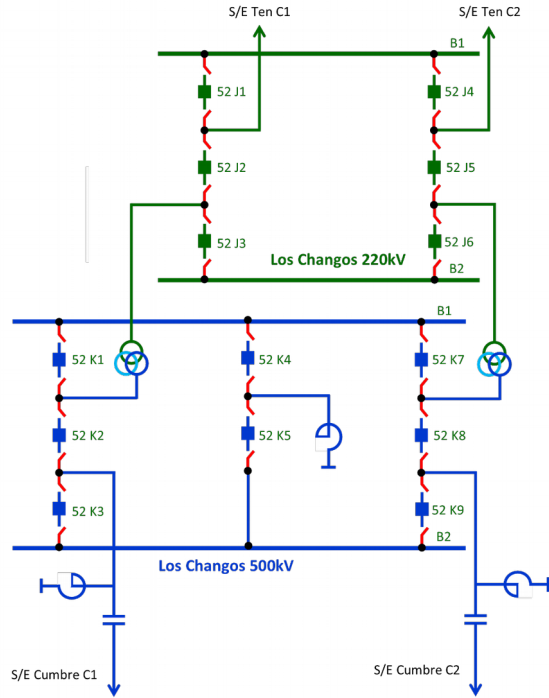
## ❑ Sistema de 500 kV Nueva Cardones-Nueva Maitencillo-Nueva Pan de Azúcar-Polpaico

- ❖ La mayoría de los interruptores soportan los TRV y RRRV impuestos por el sistema
- ❖ Interruptores de Nueva Pan de Azúcar no cumplen para:
  - Falla 2F en línea Nueva Maitencillo-Nueva Pan de Azúcar 2x500 kV, localizada en el terminal del condensador serie (lado de la línea)
  - Falla 2F en línea Nueva Pan de Azúcar-Polpaico, localizada en el terminal del reactor de línea

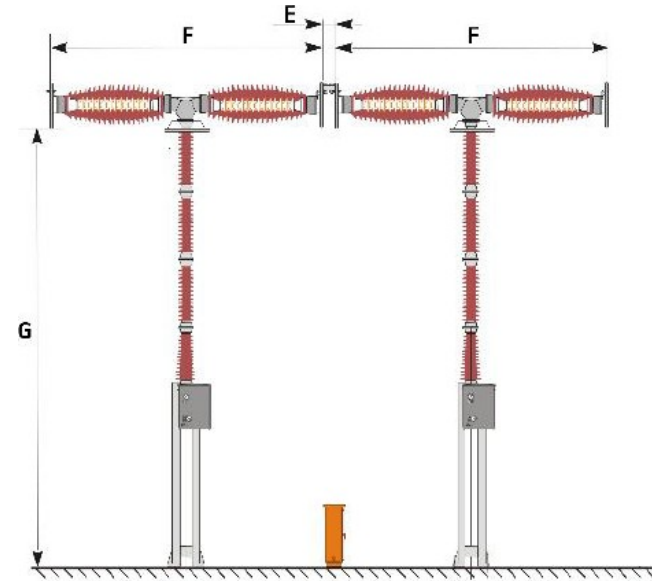
# EXPERIENCIA CHILENA

## ☐ Sistema de 500 kV Los Changos-Cumbre-Nueva Cardones

### S/E Los Changos 500 kV



Interruptor	
Modelo	GL318 / GL 318D
Fabricante	ALSTOM
Tipo	Tanque vivo
Ur	800 kV
Ik	50 kA
N° Cámaras	4
Medios para distribuir la tensión entre las cámaras de ruptura	Grading Capacitors (4)
Pruebas Tipo	De acuerdo con IEC 62271-100

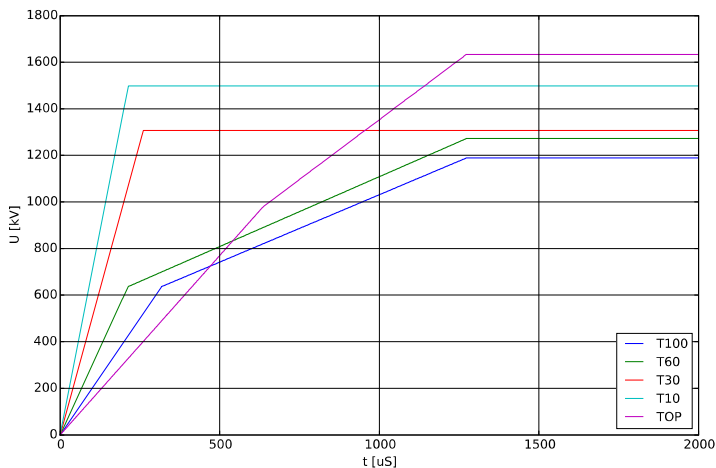


# EXPERIENCIA CHILENA

## ❑ Sistema de 500 kV Los Changos-Cumbre-Nueva Cardones

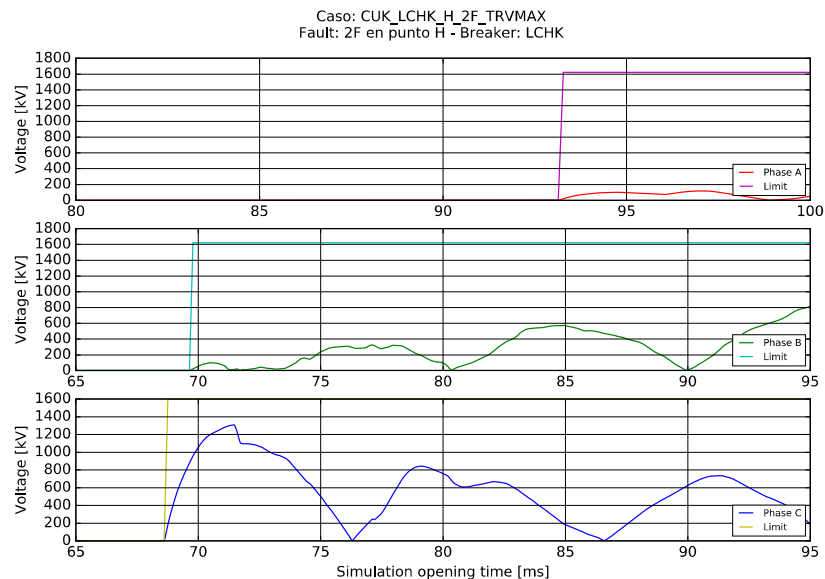
### S/E Los Changos 500 kV

- Máximo TRV: 1310 kV (corriente de interrupción 19% I<sub>k</sub>)
- Falla 2F Los Changos-Cumbre (terminales CCSS)
- TRV OP: 1633 kV @ 25% I<sub>k</sub> / 1905 kV @ 25% I<sub>k</sub>



Interruptor	I [%]	K <sub>pp</sub> [p.u.]	K <sub>af</sub> [p.u.]	637 (1090)	318 (214)	1189 (1465)	1272 (856)	2 (3,57)
GL 318 (I <sub>nom</sub> = 50kA)	T100	1,3	1,4	637 (1090)	318 (214)	1189 (1465)	1272 (856)	2 (3,57)
	OP	2	1,25	980 (1143)	636 (428)	1633 (1905)	1272 (856)	1,54 (2,67)

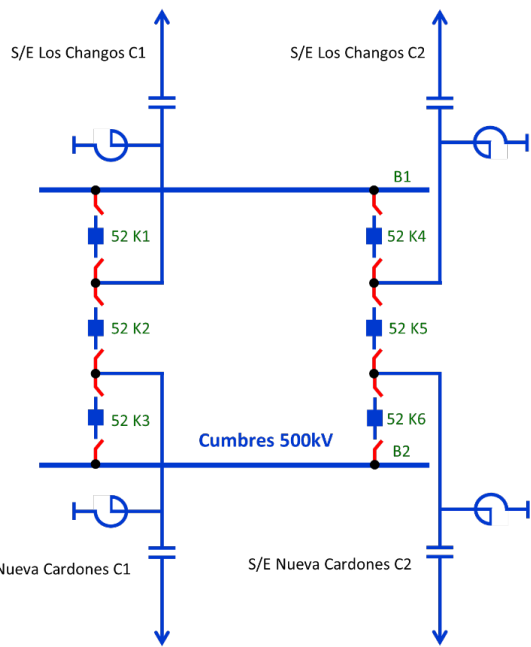
$$u_c = k_{pp} \cdot k_{af} \cdot U_r \sqrt{\frac{2}{3}} \quad u_1 = 0,75 \cdot k_{pp} \cdot U_r \sqrt{\frac{2}{3}}$$



# EXPERIENCIA CHILENA

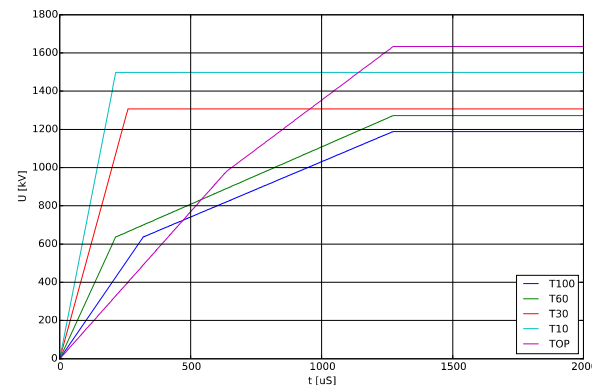
## ❑ Sistema de 500 kV Los Changos-Cumbre-Nueva Cardones

### S/E Cumbre 500 kV



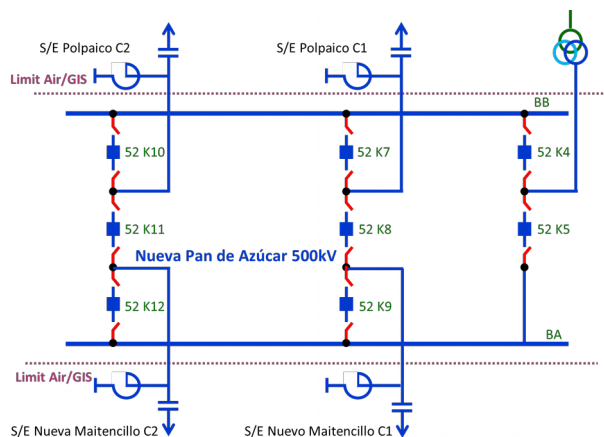
Interruptor	
Modelo	GL318 / GL 318D
Fabricante	ALSTOM
Tipo	Tanque vivo
Ur	800 kV
I <sub>k</sub>	50 kA
N° Cámaras	4
Medios para distribuir la tensión entre las cámaras de ruptura	Grading Capacitors (4)
Pruebas Tipo	De acuerdo con IEC 62271-100

- Máximo TRV: 1554 kV (corriente de interrupción 15% I<sub>k</sub>)
- Falla 2F Cumbre-Nva.Cardones (terminales CCSS)
- TRV OP: 1633 kV @ 25% I<sub>k</sub> / 1905 kV @ 25% I<sub>k</sub>



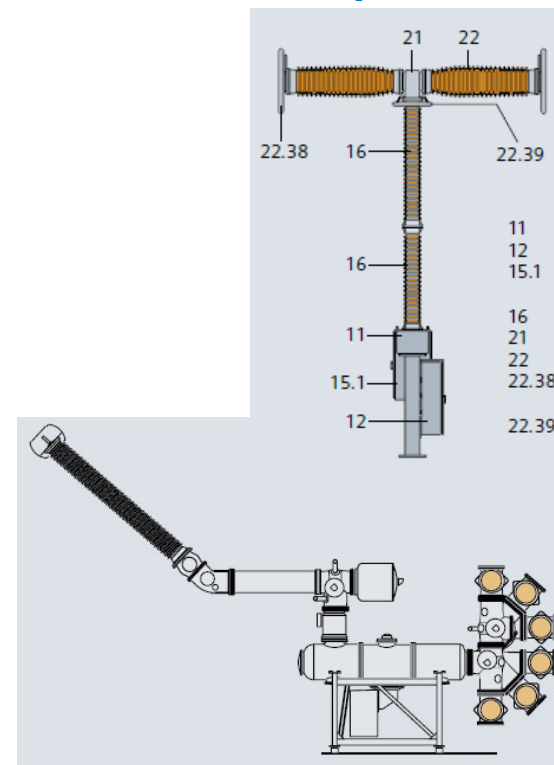
# EXPERIENCIA CHILENA

## ☐ Sistema de 500 kV Nva. Cardones-Nva. Maitencillo-Nva. Pan de Azúcar-Polpaico



### S/E Nva. Pan de Azúcar 500 kV

Interruptor	
Modelo	8DQ1 / 3AP2
Fabricante	Siemens
Tipo	GIS / Tanque vivo
Ur	550 kV
Ik	63 kA
Nº Cámaras	2
Medios para distribuir la tensión entre las cámaras de ruptura	Grading Capacitors (2)
Pruebas Tipo	De acuerdo con IEC 62271-100



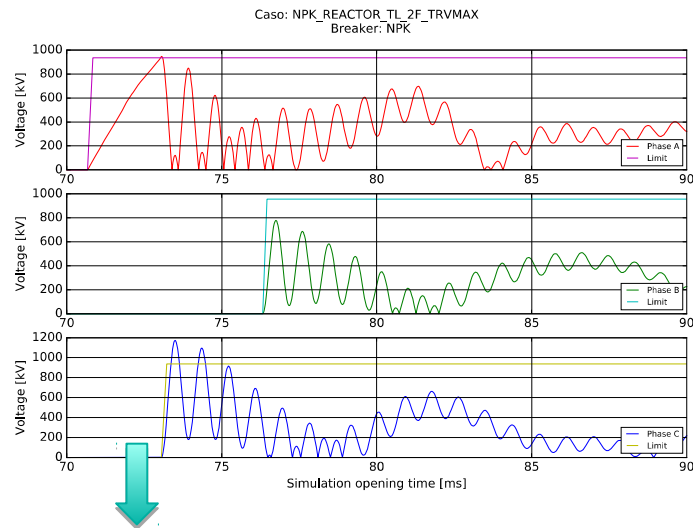
# EXPERIENCIA CHILENA

## ☐ Sistema de 500 kV Nva. Cardones-Nva. Maitencillo-Nva. Pan de Azúcar-Polpaico

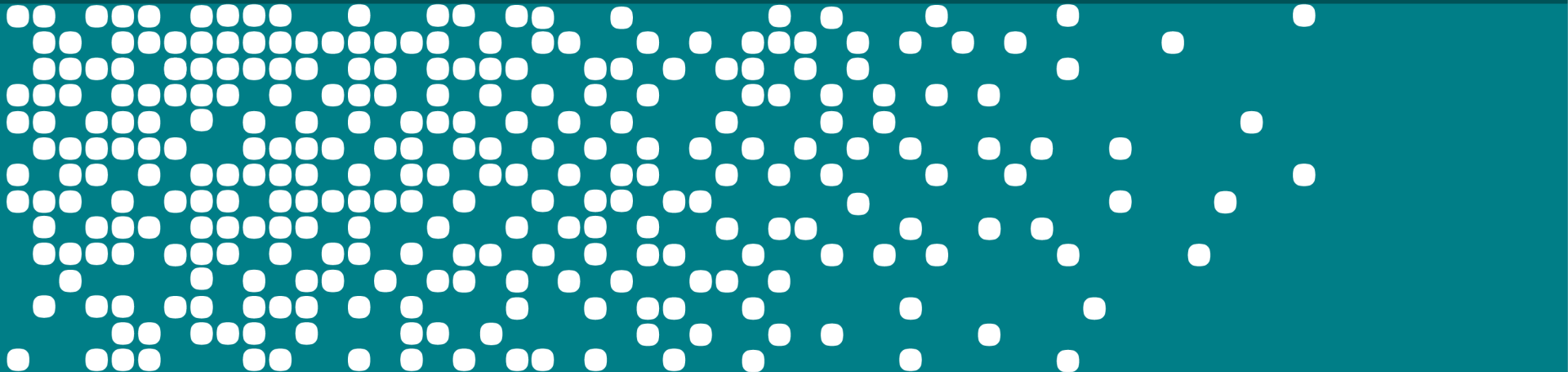
### S/E Nva. Pan de Azúcar 500 kV

- Máximo TRV: 1316 kV (corriente interrupción: 17% I<sub>k</sub>)
- Falla 2F Nva. Maitencillo-Nva. Pan de Azúcar (terminales CCSS)
- TRV OP: 1123 kV @ 25% I<sub>k</sub>
- Medida de Mitigación: esquema de Bypass de la CCSS antes de que abra el interruptor

- Máximo TRV: 1172 kV (corriente interrupción: 15% I<sub>k</sub>)
- Falla 2F Terminales Reactor de Línea hacia Polpaico
- TRV OP: 1123 kV @ 25% I<sub>k</sub>
- Medidas de Mitigación: a) que la falla sea despejada por los interruptores de línea; b) Instalar varistores MOV entre terminales del interruptor del reactor de línea



Máximo TRV se presenta en el segundo polo en abrir.



# DESAFIOS Y TEMAS FUTUROS



# DESAFÍOS Y TEMAS FUTUROS

## □ Estudios de TRV

- ❖ Alcanzar acuerdo en los alcances y metodología de los estudios de TRV
  - Nivel de tensión, ubicación de los equipos, cantidad de casos y combinaciones a analizar, etc.
  - Horizonte de tiempo para la evaluación
  - Análisis técnico-económico □ ¿Es razonable diseñar para casos muy improbables?

## □ Medidas de mitigación y soluciones

- ❖ Medidas de mitigación
  - Cambio en la filosofía de protecciones □ Impacto en la selectividad, estabilidad, etc.
  - Cambios operacionales □ No deberán degradar la seguridad
- ❖ Soluciones definitivas
  - ❖ Ver lo que ofrece el mercado y la experiencia internacional