

PROTECCIONES DISTANCIA EN NUEVAS REDES A 500 kV DE CHILE EN PRESENCIA DE COMPENSACIONES SERIE: RETOS Y EXPERIENCIAS MEDIANTE ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE LAZO ABIERTO Y LAZO CERRADO (RTDS).

Ing. MSc. Jhon Albeiro Calderón Serna - Interconexión Eléctrica S.A

AGENDA

- Introducción.
- Estudios de Coordinación y Ajuste de Protecciones (ECAP).
- Esquema de Puenteo de Compensaciones Serie de la subestación Nueva Pan de Azúcar a 500 kV.
- Pruebas de lazo abierto a los relés Siemens 7SA8.
- Pruebas de lazo cerrado a los relés Siemens 7SA8.
- Conclusiones.

INTRODUCCION

El 21 de noviembre de 2017 se interconectaron por primera vez los sistemas eléctricos Chilenos SING (Sistema Interconectado del Norte Grande) y el SIC (Sistema Interconectado Central) a través de la línea de interconexión de doble circuito Los Changos-Nueva Cardones a 500 kV propiedad de TEN (Transmisora Eléctrica del Norte) la cual se unió con la línea de doble circuito Nueva Cardones-Polpaico a 500 kV (ISA/Interchile). Con este hito se inició en el sistema eléctrico Chileno una nueva era de optimización de los recursos energéticos consistente en el intercambio de ERNC (Energías Renovables No Convencionales) actualmente disponible desde las fuentes de energía eólica y fotovoltaica en el norte del país con la Energía Convencional térmica e hidráulica disponible en el resto del país.

Para lograr esta capacidad de transmisión de 1700 MVA a través de la interconexión SING-SIC a 500 kV fue necesario complementar los sistemas de transmisión mediante la instalación de compensaciones serie tanto en subestaciones de TEN (Los Changos y Cumbre) como de ISA/Interchile (Nueva Pan de Azúcar).

El esquema de protección de la línea Nueva Cardones-Polpaico a 500 kV consideró desde el diseño una diferencial de línea 87L como protección principal 1 y un esquema de protección distancia como protección principal 2.

Los estudios eléctricos del ECAP (Estudio de Coordinación y Ajuste de Protecciones) que se efectuaron mediante el software Digsilent evidenciaron riesgos de operación indeseada del esquema de protección distancia debido a la presencia de las compensaciones serie de TEN y de Interchile, lo cual conllevó a un análisis muy detallado tanto de ajustes como del desempeño esperado de los algoritmos reales de tales protecciones.

ESTUDIOS DE COORDINACION Y AJUSTES DE PROTECCIONES (ECAP)

Los Estudios de Coordinación y Ajuste de protecciones se ejecutaron de manera conjunta entre todas las empresas involucradas (ENGIE, TEN, TRANSELEC E INTERCHILE) acorde con las diferentes etapas de ejecución del proyecto de Interconexión a 500 kV desde la subestación Los Changos hasta finalizar en la subestación Polpaico a 500 kV.

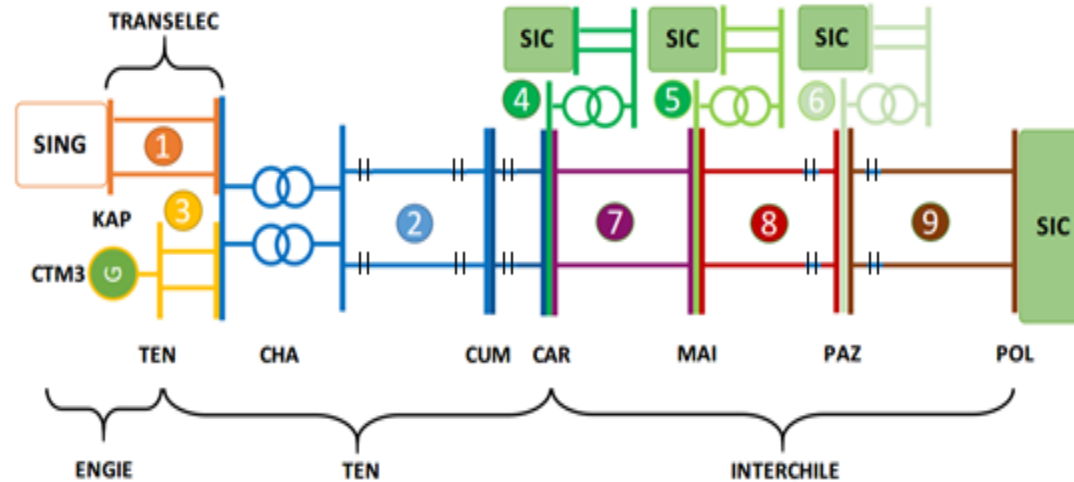


FIGURA 1 - Etapas de construcción de la interconexión SING-SIC a 500 kV.

En función de lo anterior se construyeron 4 escenarios referenciales a partir de los cuales se fueron estudiando las posibles variaciones de los mismos:

Configuración 1: Energización de TEN desde el SIC (Etapas 2, 3, 4, 5 y 6)..

Configuración 2: Energización de TEN desde el SING (Etapas 1, 2 y 3).

Configuración 3: Interconexión SING-SIC 3a (Etapas 1 a 4), 3b (3a + 5 y 7) y 3c (3b + 6 y 8).

Configuración 4: Ingreso de la línea de transmisión Nueva-Pan de Azúcar-Polpaico a 500 kV (Etapa 9).

ESTUDIOS DE COORDINACION Y AJUSTES DE PROTECCIONES (ECAP)

Las configuraciones 3b (3a+Nueva Cardones-Nueva Maitencillo), 3c (3b + Nueva Maitencillo-Nueva Pan de Azúcar con compensaciones serie de Pan de Azúcar puenteadas) y 4 (3c+ Nueva Pan de Azúcar-Polpaico+todas las compensaciones serie de TEN y Nueva Pan de Azúcar en servicio) revisten especial importancia en torno de la validación del desempeño de las protecciones distancia del sistema de 500 kV de Interchile debido a la presencia de compensaciones serie tanto del lado de TEN como del lado del sistema eléctrico de Interchile.

Mediante el programa Digsilent es posible modelar con detalle el sistema eléctrico de potencia y los componentes asociados con los bancos de compensación serie (capacitores y MOVs) y determinar la impedancia aparente esperada en los puntos de ubicación de los relés distancia (relés de color verde y rojo en la Figura 2). En la Figura 2 se ilustran algunas fallas que se presentan en el sistema de TEN y que producen efectos de incursión de la impedancia aparente en las protecciones distancia de la línea Nueva Cardones-Nueva Maitencillo de Interchile a 500 kV.

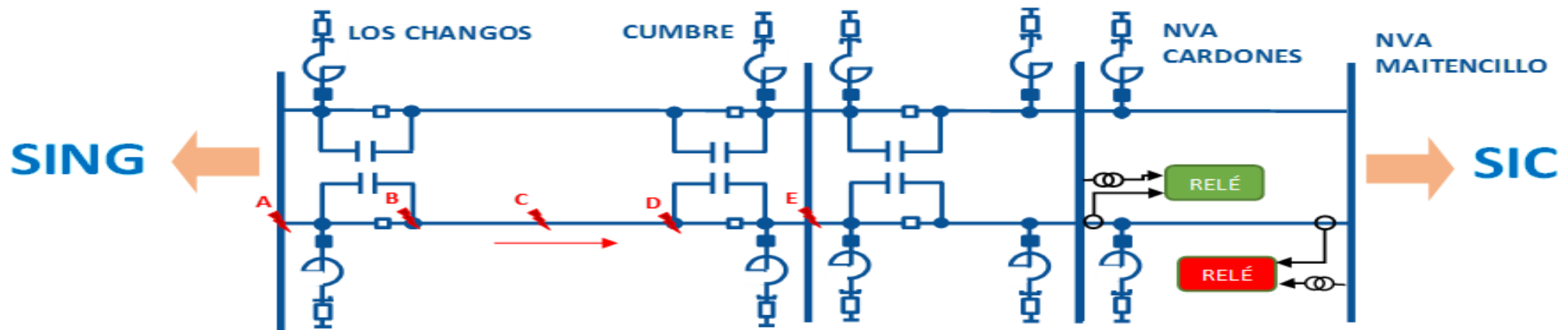
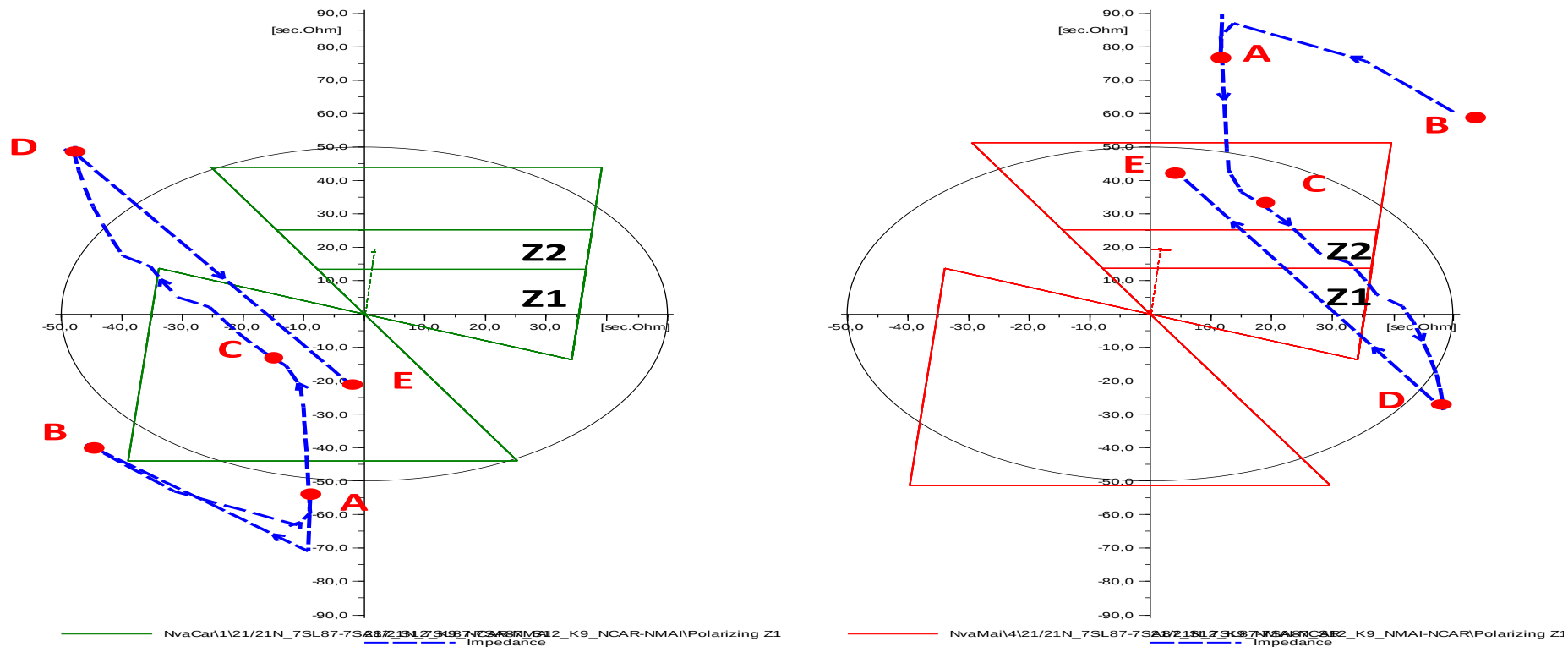


FIGURA 2 - Sitios de ubicación de fallas en la línea Los Changos-Cumbre a 500 kV.

ESTUDIOS DE COORDINACION Y AJUSTES DE PROTECCIONES (ECAP)

En la Figura 3 se observa el lugar geométrico de la impedancia aparente vista por los relés de distancia de la línea Nueva Cardones-Nueva Maitencillo para la configuración 3 en un escenario de demanda baja e hidrología seca ante la exploración de fallas a lo largo de la línea Los Changos-Cumbre en los distintos sitios indicados con la incursión en zona 1 en el relé de distancia de Nueva Maitencillo a pesar de que la falla es externa y lejana. En este caso se hace necesario retardar el tiempo de operación de la zona 1 de este relé a 150 ms para evitar su disparo indeseado.



ESTUDIOS DE COORDINACION Y AJUSTES DE PROTECCIONES (ECAP)

En la Figura 4 se observa cómo influye el cambio de topología del sistema (un circuito Los Changos-Cumbre fuera de servicio). En este caso se produce, además, la incursión indeseada de la impedancia aparente en zona 1 y en zona 2 del relé de Nueva Cardones con lo cual existe el riesgo de disparo indeseado del esquema de distancia POTT (Permissive Overreach Transfer Trip) asistido por teleprotección.

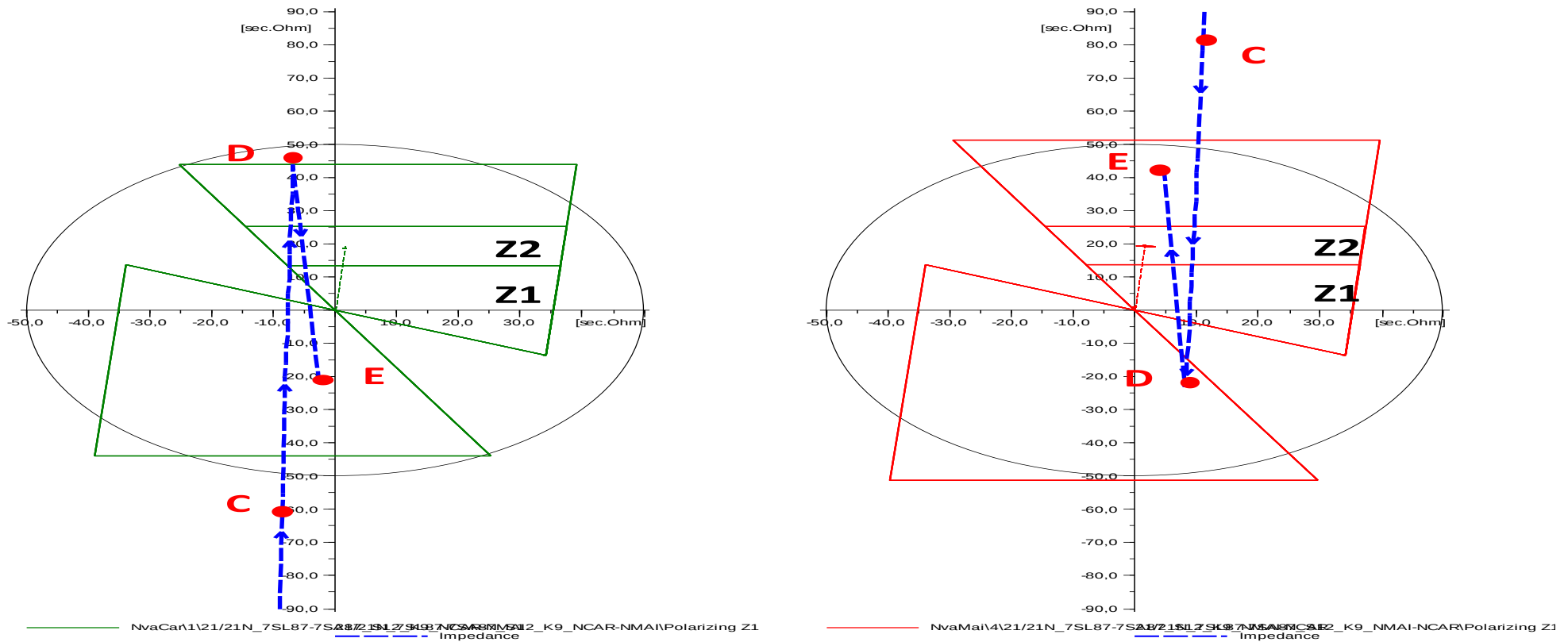


FIGURA 4 - Influencia de las compensaciones serie de TEN sobre las protecciones distancia Nueva Cardones-Nueva Maitencillo a 500 kV red N-1 Changos-Cumbre 2 fuera de servicio.

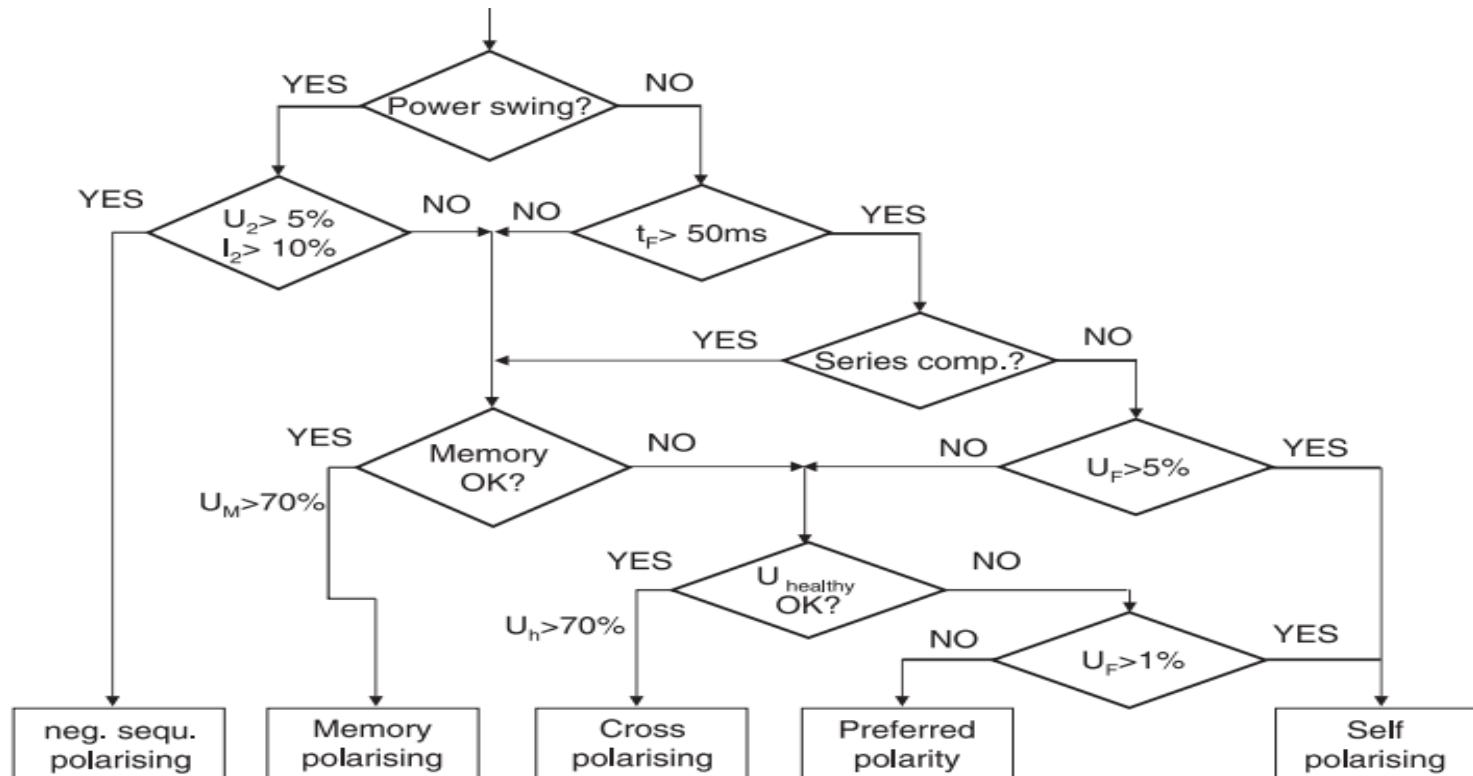
ESQUEMA DE PUENTE DE COMPENSACIONES SERIE DE LA SUBESTACION NUEVA PAN DE AZUCAR

Con el fin de controlar el TRV (Transient Recovery Voltage) en los interruptores de los paños con compensación serie en la subestación Nueva Pan de Azúcar se implementó desde la etapa de diseño del proyecto de Interchile un esquema para puenteo de los interruptores de bypass de las compensaciones serie mediante la operación de las protecciones principales de los paños de Nueva Pan de Azúcar de tal manera que se cierren primero los interruptores de bypass de la compensación serie antes que se produzca la extinción del arco en los interruptores de los paños en Nueva Pan de Azúcar. Se asignó, además, un retardo intencional de 10 ms al disparo de los paños de Nueva Pan de Azúcar con el fin de garantizar la coordinación adecuada entre el cierre de los interruptores de bypass y el disparo de los interruptores de los paños de Nueva Pan de Azúcar. Con este esquema se previene el efecto que tiene la compensación serie sobre el TRV resultante.

Debido a los efectos esperados de incursión de impedancia aparente sobre las protecciones distancia de los paños asociados con las compensaciones serie de la subestación Nueva Pan de Azúcar (como se describió en el numeral anterior), surgió la incertidumbre por parte del Coordinador Eléctrico Nacional de Chile (CEN) con relación al desempeño esperado de este esquema de puenteo debido a los fenómenos transitorios esperados sobre los relés de distancia de 500 kV. Por tal motivo, el CEN solicitó a Interchile realizar pruebas en un simulador de tiempo real (RTDS) con el fin de validar el adecuado desempeño del esquema de puenteo de tal manera que se mantenga la estabilidad adecuada del sistema eléctrico de potencia (tiempos críticos de despeje de falla inferiores a los 120 ms de acuerdo con la NTSyCS de Chile).

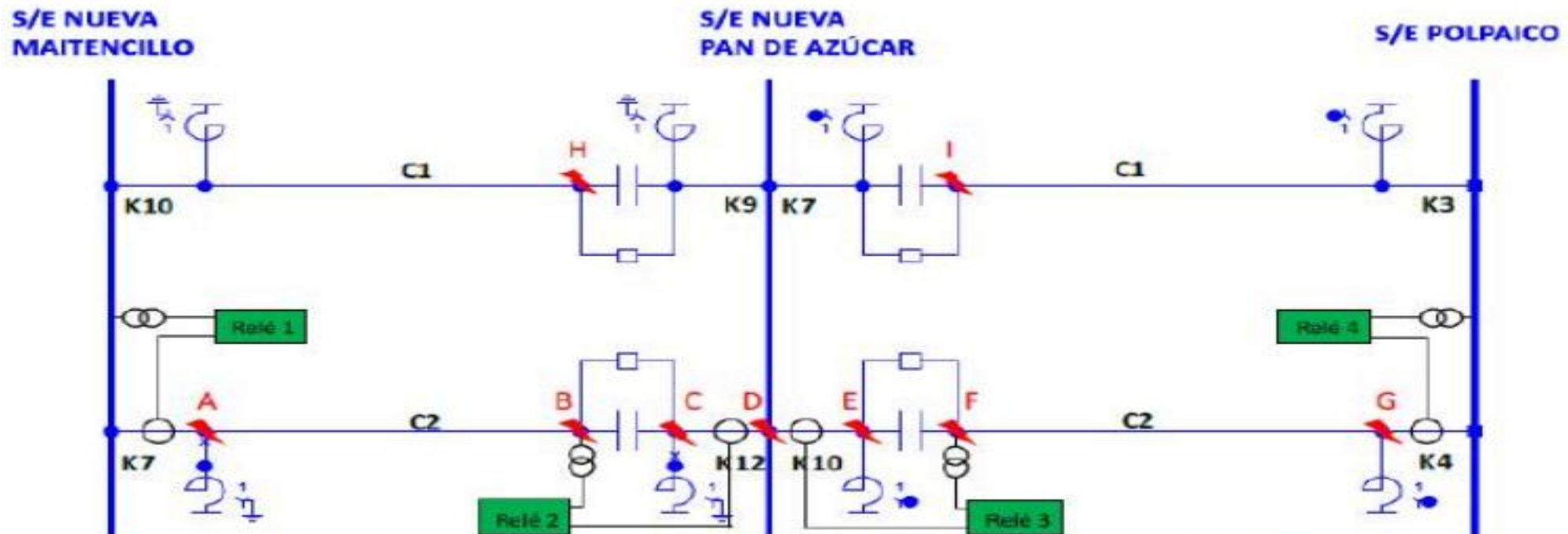
PRUEBAS DE LAZO ABIERTO A LOS RELES SIEMENS 7SA8

Los relés de distancia Siemens 7SA8 disponen de algoritmos especializados para considerar los efectos adversos que se esperan de incursión de la impedancia aparente dentro de las características de operación de los relés de protección debidos a la presencia de compensaciones serie. En la Figura se ilustra el concepto de polarización adaptativa utilizada por la protección distancia Siemens 7SA para considerar estos efectos. Como se observa, el relé compensa los efectos de presencia de compensaciones serie utilizando el algoritmo basado en el estado de las muestras previo a la falla (polarización con memoria) o el algoritmo basado en la tensión previa de fases sanas (polarización cruzada). La utilización de uno u otro algoritmo dependerá de la evaluación hecha por el relé de la tensión de memoria $U_{\text{memory}} > 70\%$ (selecciona algoritmo de memoria) o en caso contrario valida si la tensión previa de fases sanas $U_{\text{healthy}} > 70\%$ (selecciona algoritmo de polarización cruzada).



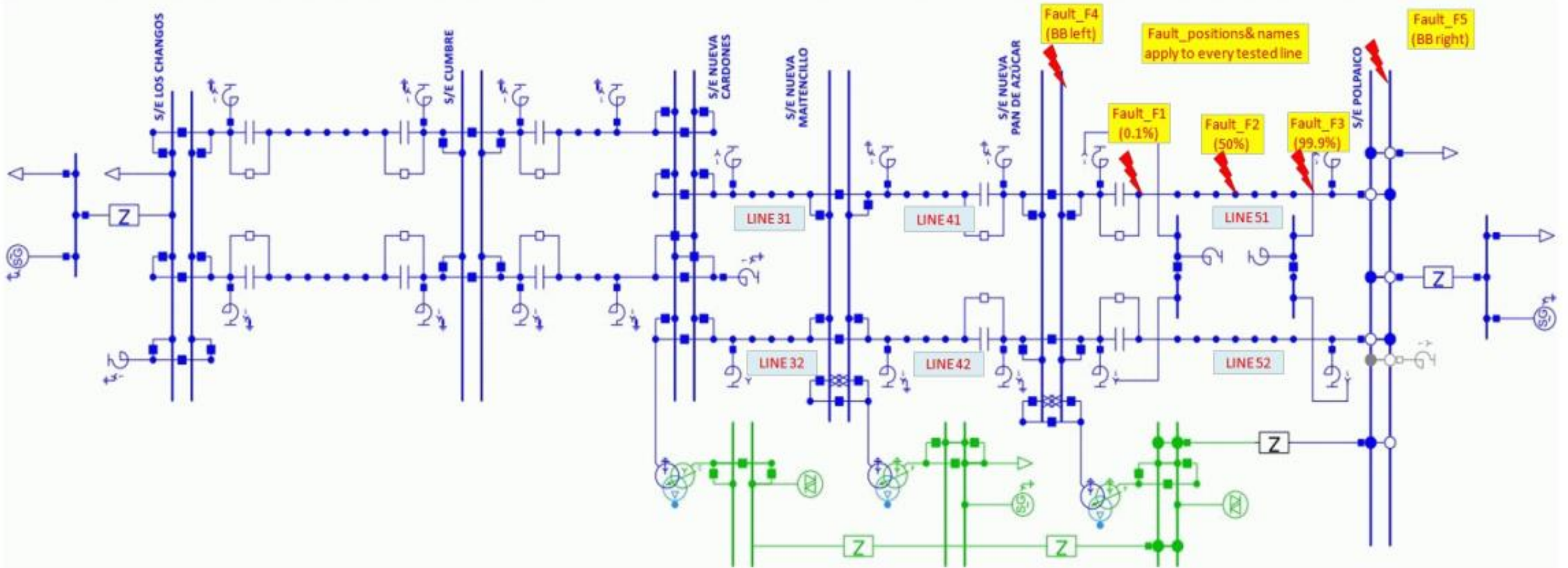
PRUEBAS DE LAZO ABIERTO A LOS RELES SIEMENS 7SA8

A partir de los estudios de ECAP y la exploración sistemática de fallas en el Digsilent para las distintas configuraciones de operación esperadas de la interconexión a 500 kV se derivaron las condiciones más exigentes esperadas para el desempeño adecuado de las protecciones distancia de las líneas del proyecto de Interchile (Nueva Cardones-Polpaico). En la Figura se ilustran algunas de estas condiciones críticas encontradas. Estas condiciones más exigentes fueron llevadas a formato COMTRADE e inyectadas en lazo abierto en el laboratorio de Siemens en Bogotá a un relé Siemens 7SA8 de características similares a las de los relés utilizados en las líneas a 500 kV de Interchile. Los resultados encontrados de las pruebas realizadas fueron exitosas, es decir, el relé 7SA8 logró distinguir en todos los casos críticos el fenómeno de inversión de tensión y conmutarse adecuadamente de manera adaptativa y automática a la polarización adecuada de tal forma que siempre identificó la dirección correcta de la falla a pesar de la incursión de la impedancia aparente dentro de las zonas de protección del relé.



PRUEBAS DE LAZO CERRADO A LOS RELES SIEMENS 7SA8

En la Figura se ilustra el sistema eléctrico utilizado en el RTDS en Alemania. Se utilizaron equivalentes de Ward derivados con el Digsilent y se consideraron equivalentes dinámicos en Los Changos (SING), Polpaico (SIC Centro-Sur) y Nueva Maitencillo (SIC Norte).



Se utilizaron 6 relés Siemens 7SL87 para ser inyectados simultáneamente en lazo cerrado, es decir, se ubicaron en sitios estratégicos de la red eléctrica y sus disparos se cablearon para producir la apertura de los interruptores respectivos en los paños donde se ubicaban.

PRUEBAS DE LAZO CERRADO A LOS RELES SIEMENS 7SA8

Se efectuaron fundamentalmente 2 tipos de pruebas especializadas: Pruebas a los esquemas de puenteo de las compensaciones serie de Nueva Pan de Azúcar y pruebas de desempeño de la función 21/21N ante la influencia de las compensaciones serie de los sistemas de TEN y de Interchile. En la siguiente tabla se presenta la nomenclatura utilizada para la ejecución de los distintos casos de prueba: 224 casos con procesador CP200 y 312 casos con procesador CP300.

		CP200		CP300	
Name	Power System Configuration	Nomenclature	No. of tests	Nomenclature	No. of tests
Protection performance tests	Config 4	181_3x_xxx	56	182_3x_xxx	60
	Config 3c	181_4x_xxx	28	182_4x_xxx	28
	Config 3b	181_5x_xxx	28	182_5x_xxx	28
	Config 3c changed relay pos	181_6x_xxx	3	182_6x_xxx	3
	Config 3b changed relay pos	181_7x_xxx	9	182_7x_xxx	9
		Sum prot perf	124	Sum prot perf	128
Bypass tests (BP41)	Config 4 with relay on lines 41, 42 and 51	181_2x_xxx	60	182_2x_xxx	92
Bypass tests (BP51)	Config 4 with relay on lines 51, 52 and 41	181_1x_xxx	60	182_1x_xxx	92
		Total no. CP200	224	Total No. CP 300	312

PRUEBAS DE LAZO CERRADO A LOS RELES SIEMENS 7SA8

Del análisis efectuado a los casos considerados se obtuvieron los siguientes resultados relevantes:

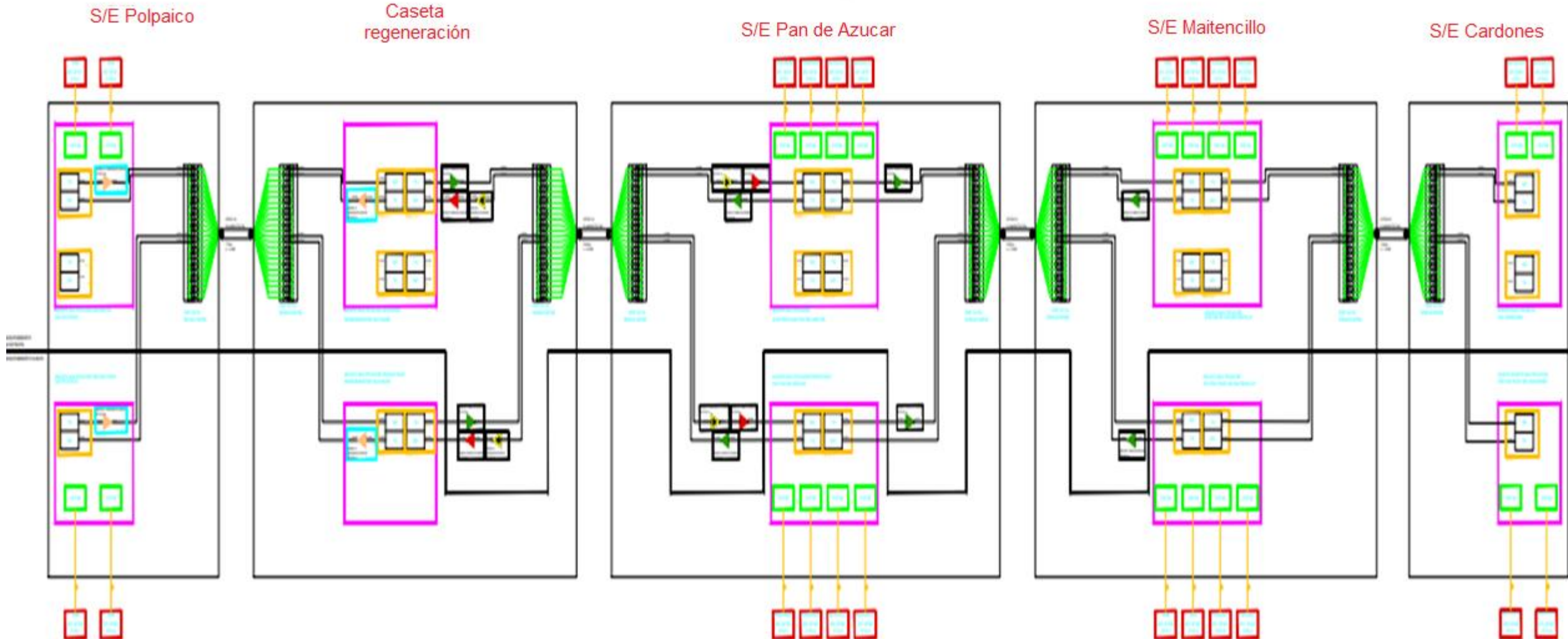
- Todas las pruebas de validación del esquema de puenteo de las compensaciones serie de Nueva Pan de Azúcar fueron exitosas obteniéndose en todos los casos tiempos de despeje de fallas inferiores a los 120 ms exigidos en la NTSyCS de Chile y validándose la adecuada coordinación entre el cierre de los interruptores de bypass de las compensaciones serie y la apertura de los interruptores de los paños asociados para el control de su TRV resultante.
- Se presentó omisión de actuación del auto recierre cuando se activó la función 87L fast. Se corrigió mediante prolongación de la señal de disparo del interruptor.
- Se presentaron casos con operación indeseada de la función 21/21N ante fallas externas. Se corrigió esta anomalía mediante la adición de un tiempo adicional de 20 ms al ajuste del minicircuit breaker del VT en los relés de distancia de Nueva Pan de Azúcar hacia Nueva Maitencillo.
- En algunos de los casos se produjo el envío indeseado de señal echo al extremo remoto produciendo actuación indeseada de la protección en ese extremo. Se corrigió esta anomalía mediante el bloqueo temporal del echo de envío dentro de la función de “Weak Infeed” en aquellos casos en que la función distancia haya arrancado en dirección reversa.

PRUEBAS DE LAZO CERRADO A LOS RELES SIEMENS 7SA8

- Se produjo la operación indeseada de la función 85/67N Dir. Comp. ante falla externa. Se corrigió mediante la actualización del firmware a la versión 7.54.
- En algunos casos se obtuvieron tiempos máximos de aclaramiento de fallas superiores a los 120 ms. Se actualizó el firmware del relé a la versión 7.54 y se cambió de procesador CP200 a CP300. Fue necesario repetir todas las pruebas teniendo en cuenta estos cambios en el software y en el hardware.
- A pesar del cambio de procesador de CP200 a CP300 y la actualización del firmware a la versión 7.54 no fue posible lograr por parte de Siemens el cumplimiento de un tiempo inferior a los 120 ms exigido por la NTSYCS para todas las fallas.
- Para 5 fallas de alta impedancia de 30 y 50 ohmios ubicadas muy cerca y lejanas a las compensaciones serie de la subestación Nueva Pan de Azúcar la función 85/67N Dir. Comp. no pudo lograr tiempos de actuación inferiores a los 120 ms.

PRUEBAS DE LAZO CERRADO A LOS RELES SIEMENS 7SA8

- Debido al inconveniente anterior de incumplimiento de la NTSyCS se hizo necesario actualizar el esquema actual de protección considerado para el proyecto para lo cual se adicionó un sistema redundante con función 87L.



CONCLUSIONES

- Con el crecimiento vertiginoso de los recursos de energías renovables no convencionales (fotovoltaica y eólica) y la necesidad de optimizar los recursos energéticos del país, la interconexión a 500 kV entre el SING y el SIC del sistema eléctrico Chileno a través de la línea Los Changos-Polpaico a 500 kV representará un eje fundamental para el crecimiento del país.
- En el contexto anterior, resulta de vital importancia garantizar la adecuada confiabilidad de esta Interconexión la cual será exigida a su máxima capacidad de 1700 MVA.
- En el presente artículo se describieron algunos aspectos técnicos relacionados con la operación esperada de los relés de distancia de la línea Nueva Cardones-Polpaico a 500 kV ante la presencia de compensaciones serie tanto en el sistema de TEN como en el sistema de Interchile.
- Los análisis realizados desde los estudios del ECAP han permitido la identificación minuciosa de los diferentes casos críticos esperados los cuales han sido validados mediante pruebas de lazo abierto en el laboratorio de Siemens en Bogotá y pruebas de lazo cerrado en el laboratorio de Siemens en Alemania.
- Las pruebas de lazo abierto realizadas en Bogotá, permitieron validar que funcionalmente el algoritmo de polarización adaptativa disponible en los relés de distancia Siemens permiten detectar y controlar de manera efectiva las condiciones críticas de incursión de impedancia aparente en las zonas de operación zona 1 y esquema POTT asistido por teleprotección.

CONCLUSIONES

- Las pruebas realizadas mediante el RTDS en Alemania a los esquemas de puenteo de las compensaciones serie de la subestación Nueva Pan de Azúcar para el control del TRV resultante en los interruptores de los paños asociados con las compensaciones serie, fueron exitosas y permitieron demostrar la adecuada coordinación entre el cierre de los interruptores de by-pass y la apertura de los respectivos paños asociados manteniendo a su vez tiempos de aclaramiento de fallas inferiores a los 120 ms exigidos en la NTCSyCS de Chile.
- Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en el RTDS al desempeño de la protección distancia en presencia de compensaciones serie han permitido evidenciar situaciones especiales que afortunadamente se han podido detectar desde esta etapa del proyecto permitiendo tomar acciones tanto en el software como en el hardware del relé de tal manera que se minimicen riesgos potenciales de afectación de la confiabilidad requerida para este sistema. Los resultados encontrados de este trabajo permiten confirmar la utilización de la protección distancia como una protección segura y confiable para ser utilizada como alternativa en líneas compensadas en serie para lo cual conviene validar de manera detallada su adecuado desempeño ante las condiciones reales esperadas en el sistema de potencias específico donde se aplique.
- El algoritmo actual de la función Dir. Comp. de Siemens no respondió de manera apropiada ante ciertas fallas de alta impedancia en las líneas compensadas en serie. Por tal motivo, y para cumplir con la normativa Chilena fue necesario considerar un esquema de doble protección diferencial para las líneas con compensación serie.
- Fue necesario además efectuar cambio de procesador CP200 a CP300, actualizar el firmware a versión 7.54 y modificar el esquema de protección (doble protección 87L) considerado en el proyecto de tal manera que se lograra cumplir con la NTSyCS de Chile.