CIIC 2018
"POR UNA INGENIERÍA INCLUSIVA, SEGURA, RESILIENTE Y SOSTENIBLE"

Análisis de cogeneración, cortocircuitos y mitigación de sus efectos en la textilera "Desembarco del Granma".

Autores: MSc. Ing. Emilio Andrés Francesena Bacallao y colaboradores.

Centro de Estudios Electroenergéticos. Universidad Central ¨Marta Abreu¨de Las Villas. Santa Clara. Cuba

emiliof@uclv.edu.cu CI. 62100103481

Resumen

En el trabajo se expone la factibilidad de implementación de cogeneración en la textilera y posible ubicación de dicha planta, se actualiza y simula el diagrama del sistema eléctrico de la industria en el software IPA y otros especializados, acorde a varios escenarios de operación posibles y bajo las normativas establecidas al respecto, se realiza un estudio completo de cortocircuitos, que arroja la existencia de un gran número de interruptores en 0.48kV mal seleccionados en el estado en que trabaja o puede trabajar la industria en un futuro cercano con la inclusión de la cogeneración, debido a que su capacidad interruptiva y momentánea está por debajo de las corrientes de cortocircuito máximas a las que pudieran enfrentarse.

Se seleccionó el escenario de operación más crítico en cuanto a interruptores fallados y se proponen distintas medidas de sustitución, reducción de los niveles de cortocircuitos en los mismos o mitigación de sus efectos, se realiza el análisis técnico y la simulación de dichas medidas en el propio software para comprobar su efectividad. Se llega a conclusiones importantes por su implicación sobre la seguridad de operación del sistema eléctrico en la fábrica y se emiten recomendaciones sobre las medidas necesarias a ser aplicadas hoy para evitar el efecto de fallas muy peligrosas, según su nivel de complejidad técnica y posible inversión en la industria. Trabajo avalado por la Dirección Técnica de la Empresa Textil UB "Desembarco del Granma".

Introducción

Debido al proceso de ampliación y modernización de la UEB Textil "Desembarco del Granma" se requiere evaluar posibilidades de implementar la cogeneración, es en este punto que se le solicitó al Centro de Estudio Energéticos y Tecnologías Ambientales (CEETA) y al Centro de Estudios Electroenergéticos (CEE) de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas el año pasado, analizar la inclusión de la cogeneración, de forma tal que se obtengan los mayores beneficios energéticos y financieros posibles considerando las necesidades tecnológicas y su influencia en la instalación ya existente; así, entre otras cosas chequear los desconectivos por las normativas actuales y disponer de una base de datos, que permita incorporar nuevos análisis y posibles estudios para la ubicación más factible del nuevo nodo de generación; en el informe de los resultados de dicho estudio entregado a la dirección técnica de la entidad, se observa que en todos los escenarios actuales de operación del sistema de suministro eléctrico a la fábrica, se presenta un número considerable de interruptores fundamentalmente en las barras de 0.48kV que no tienen la capacidad interruptiva necesaria para una desconexión segura de las altas corrientes de cortocircuito estimadas, situación alarmante y peligrosa para el correcto funcionamiento actual y futuro de la industria.

Por lo que la dirección de dicha empresa solicita este año, que el CEE realice un proyecto de medidas encaminadas a reducir dichas corrientes de cortocircuito o mitigar los efectos de las mismas sobre los elementos del sistema, fundamentalmente sobre los interruptores encargados de aislar dichas fallas que están instalados en la actualidad en la empresa.

Objetivos

- Enunciar las posibilidades de cogeneración en la Textilera "Desembarco del Granma".
- Determinar los niveles de cortocircuito y la capacidad momentánea e interruptiva necesaria en los interruptores de 6KV y 0.48KV al introducir cogeneración.
- Exponer posibles acciones para reducir o mitigar los efectos sobre interruptores afectados por altas corrientes de cortocircuito.

Desarrollo

Implementación de cogeneración en la Textilera "Desembarco del Granma".

En la Empresa Textil "Desembarco del Granma" se consumen aproximadamente 200 t de vapor al día. El consumo de electricidad promedio es de 8 700 MW.h/año y 4 000 t de combustible fuel oil. Existen planes de recuperar la Planta de Acabado con nuevas máquinas, lo que llevaría el consumo de vapor a cerca de 30 t/h con 7 000 t de fuel oil al año. El consumo eléctrico ascendería a 12 000 MW.h/año.

Debido a la simultaneidad de las demandas de vapor y energía eléctrica, la estabilidad de las mismas y los planes de operar más de 3 800 horas al año, traen consigo la posibilidad de un proyecto de cogeneración de calor y electricidad, con el mismo se pudiera disminuir el consumo eléctrico en unos 7 000 MW.h/año lo que significaría incluso una reducción del consumo con respecto al actual.

La planta de Cogeneración, según la disponibilidad de espacio físico, por asociarse su generación a la Planta de Acabado y previo análisis técnico de la empresa, se simula conectada a la subestación de Acabado A2 o a la barra 1 de 6 kV a través de un transformador, lo que se mostrará posteriormente.

Al equipamiento eléctrico actual de la Textilera se le incorporará, fundamentalmente el generador asociado a la Planta de Cogeneración prevista. Una oferta de solución se presenta por la empresa italiana LUZI INPIANTI TERMICI SRL para un sistema de cogeneración de 2 MW y 30 t/h de vapor en el escape de la turbina, cuyos datos principales del generador propuesto por la firma italiana son:

- Presión de entrada: 4.2 MPa.
- Presión de escape: 1.2 MPa.
- Tensión: 480 V tres fases.
- Potencia: 2 MW aproximadamente.
- Sistema de sincronización, protecciones eléctricas.
- Control de presión en la descarga y conexión a sistema de supervisión SCADA.

Determinación de los niveles de cortocircuito y la capacidad momentánea e interruptiva de los interruptores de 6KV y 0.48KV al introducir cogeneración.

Uno de los problemas que hacen necesario el estudio de los niveles de cortocircuito en la Industria Textilera "Desembarco del Granma" es que no se dispone de información sobre el estado actual de los dispositivos de interrupción ante las nuevas condiciones de trabajo, dadas estas por la implementación de un proyecto de cogeneración, lo que representa una gran preocupante debido a que son los encargados de poner fuera de servicio a aquellos circuitos que están bajo regímenes anormales, con el objetivo de garantizar: en primer lugar la seguridad del personal y la instalación, así como la confiabilidad y calidad en el suministro de la energía eléctrica.

En primer lugar se enuncian dos conceptos básicos para los dispositivos de desconexión, como los mostrados a modo de ejemplo en la Figura 1, para el caso de voltajes inferiores a 1000 V.

Capacidad momentánea: Todos los elementos de la red tales como cables, barras y dispositivos de desconexión deben resistir los esfuerzos térmicos y mecánicos debidos a las elevadas corrientes de cortocircuito. En el caso de los interruptores, la capacidad momentánea se considera como la capacidad del interruptor para permanecer cerrado y resistir los esfuerzos térmicos y mecánicos producidos por la corriente máxima de cortocircuito del primer medio ciclo de falla.

Capacidad interruptiva: Capacidad de un interruptor para interrumpir de manera segura el flujo de corriente de cortocircuito después de dos, tres, cinco u ocho ciclos de iniciarse el cortocircuito.

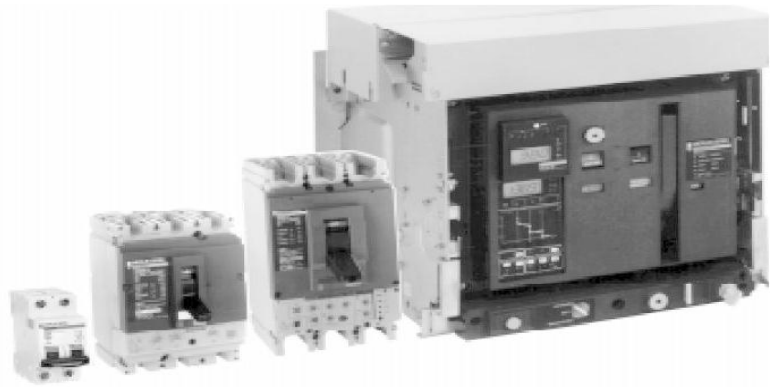

Figura 1: Interruptores de menos de 1000 V.

En la figura 2 se muestra el diagrama monolineal de la alimentación eléctrica a la industria.

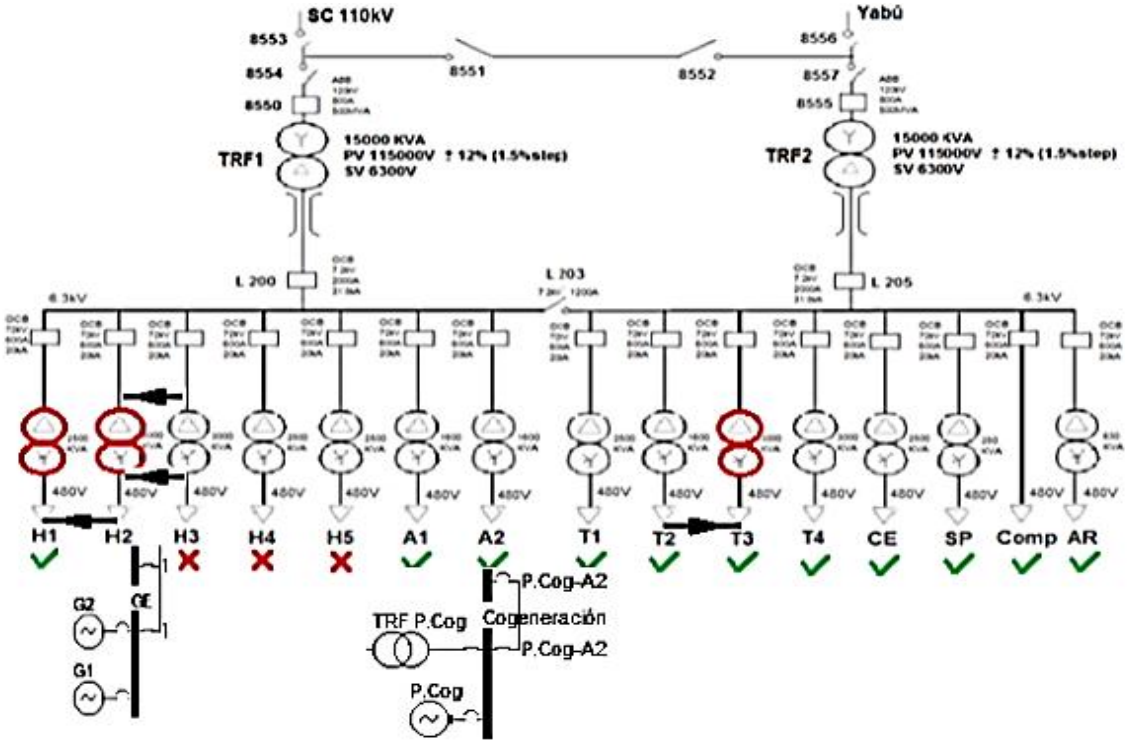

Figura 2 Subestación principal de la industria

La energía eléctrica llega a la empresa desde el SEN mediante un circuito de doble alimentación a través de la subestación eléctrica principal reductora de 110 / 6,3 kV, consta de dos transformadores de 15 MVA. Solo un trasformador se encuentra en servicio, debido a la disminución de la demanda. De las dos líneas que conectan a la empresa solo la de la subestación Santa Clara 110kV la alimentan, la otra proviene de la Sub-Santa Clara 220kV, que se utiliza solo en casos de averías. Los interruptores aéreos que enlazan las secciones del TRF1 con el TRF2 por 110kV están cerrados permitiendo alimentar simultáneamente a los dos transformadores desde una línea u otra. Esta subestación alimenta por secundario dos barras que tienen la posibilidad de enlace, distribuyendo la energía eléctrica a 2 turbocompresores de refrigeración de 6 kV y a 11 subestaciones auxiliares de 14 que existían originalmente, situadas en diferentes plantas y protegidas por interruptores de 600 A.

Existen algunas conexiones particulares donde la subestación ASB H2 se alimenta a través del TRF de H3 y esta a su vez enlaza a H1 por barra de bajo voltaje, situación similar que se presenta en T3 que se alimenta por el enlace de barra de T2.

Las subestaciones auxiliares reducen el voltaje de 6.3 kV a 480V. En este nivel de voltaje existen interruptores de 400 A, que son los que protegen los bancos de capacitores y los centros de control de motores de las cámaras de clima. Los interruptores de 225 A, protegen la alimentación de las máquinas del proceso productivo y los de 100 A, protegen los circuitos de iluminación y misceláneas.

En el secundario de la subestación H2 están instalados 2 grupos electrógenos de 600 kVA o 480 kW cada uno, que en la situación actual son sincronizados frecuentemente por orden del despacho territorial de carga.

Para la simulación de fallas y obtención de los niveles de cortocircuitos, así como el análisis de la capacidad momentánea e interruptiva necesaria en los desconectivos se utilizaron varios productos de software, fundamentalmente el IPA (Industrial Power Analyst).

Para determinar cuál es la condición más crítica ante los cortocircuitos y el consiguiente chequeo de los interruptores, se definen 5 escenarios o modos de operación de la planta, los cuales son:

1. Alimentación por la línea Santa Clara 110kV, funcionando el transformador TRF2, alimentando a la barra 2 que enlaza a barra 1, a través de la cuchilla L-203, ambas de 6.3kV y distribuyendo la energía eléctrica a 11 subestaciones auxiliares (ASB), situadas en diferentes plantas (Estado actual).
2. Estado actual y Grupos Electrógenos en servicio.
3. Estado actual, Grupos Electrógenos en servicio y Planta de cogeneración conectada a la subestación de Acabado ASB A2.
4. Estado actual, Grupos Electrógenos en servicio y Planta de cogeneración conectada a: la ASB A2 y Barra 1 de 6,3kV a través de un transformador.
5. Estado actual, Grupos Electrógenos en servicio y Planta de cogeneración conectada a la Barra 1 de 6,3 kV a través de un transformador.

En las tablas 1 y 2 se puede observar la comparación de la capacidad de los interruptores en 6 kV, con las corrientes obtenidas según los cálculos implementados en los productos de software a partir de la norma ANSI en el nivel de 6 kV, la última columna expresa OK o ERROR según se satisfacen o no las condiciones de capacidad del interruptor, solo se muestran a modo de ejemplo el escenario actual (tabla 1) y el 5 (tabla 2) porque es donde la cogeneración se inyecta a 6kV directamente.

Tabla 1: Chequeo de los interruptores en media tensión para el estado de operación No.1.

Nombre	Capacidad interruptiva(kA)	Iasim adj (kA)	Chequeo	Capacidad de cierre pico(kA)	I"pico (kA)	Chequeo	Capacidad de cierre total (kA)	I"tot (kA)	Chequeo
TRF2.PCB2	32	16	OK	85	37	OK	50	22	OK
FDR1.PCB1	20	18	OK	54	47	OK	32	28	OK
FDR17.PCB1	20	17	OK	54	46	OK	32	27	OK
FDR15.PCB1	20	17	OK	54	46	OK	32	27	OK
FDR49.PCB1	20	17	OK	54	46	OK	32	27	OK
FDR59.PCB1	20	18	OK	54	46	OK	32	27	OK
FDR14.PCB1	20	18	OK	54	47	OK	32	28	OK
FDR3.PCB1	20	17	OK	54	44	OK	32	26	OK
FDR103.PCB1	20	18	OK	54	47	OK	32	28	OK
FDR81.PCB1	20	17	OK	54	45	OK	32	27	OK
FDR104.PCB1	20	18	OK	54	47	OK	32	28	OK
FDR111.PCB1	20	18	OK	54	47	OK	32	28	OK

Tabla 2: Chequeo de los interruptores en media tensión para el estado de operación No.5.

Nombre	Capacidad interruptiva(kA)	Iasim adj (kA)	Chequeo	Capacidad de cierre pico(kA)	I"pico (kA)	Chequeo	Capacidad de cierre total (kA)	I"tot (kA)	Chequeo
TRF2.PCB2	32	16	OK	85	37	OK	50	22	OK
FDR1.PCB1	20	19	OK	54	49	OK	32	29	OK
FDR17.PCB1	20	19	OK	54	48	OK	32	29	OK
FDR15.PCB1	20	19	OK	54	48	OK	32	29	OK
FDR49.PCB1	20	19	OK	54	48	OK	32	29	OK
FDR59.PCB1	20	19	OK	54	49	OK	32	29	OK
FDR14.PCB1	20	19	OK	54	49	OK	32	29	OK
FDR3.PCB1	20	18	OK	54	47	OK	32	28	OK
FDR103.PCB1	20	19	OK	54	49	OK	32	29	OK
FDR81.PCB1	20	18	OK	54	48	OK	32	28	OK
FDR104.PCB1	20	19	OK	54	49	OK	32	29	OK
FDR111.PCB1	20	19	OK	54	49	OK	32	29	OK
FDR2.PCB1	32	18	OK	85	47	OK	50	28	OK

Como se observa en las tablas 1 y 2 todos los interruptores de media tensión se encuentran bien seleccionados en cada uno de los estados de operación que se analiza, debido a que su capacidad de interrupción, de cierre pico y de cierre total se encuentran por encima de las corrientes obtenidas a partir de los niveles de cortocircuito, analizados para cada caso según las normas.

En las tablas 3 y 4 se puede observar la comparación de la capacidad interruptiva de los interruptores de bajo voltaje 0.48 kV con las corrientes ajustadas según los resultados promedios de los productos de software a partir de la norma ANSI para algunos estados o escenarios de operación; debido al considerable número de desconectivos, solo aparecen los que no cumplen con la capacidad necesaria.

En el escenario 3, existe un aumento de los interruptores afectados (101), en comparación con los anteriores, debido a la inclusión de la planta de cogeneración, que al igual que los GE contribuyen al aumento de las corrientes de cortocircuito.

La figura 3 permite una visualización de los resultados obtenidos, para cada escenario de operación de la fábrica.

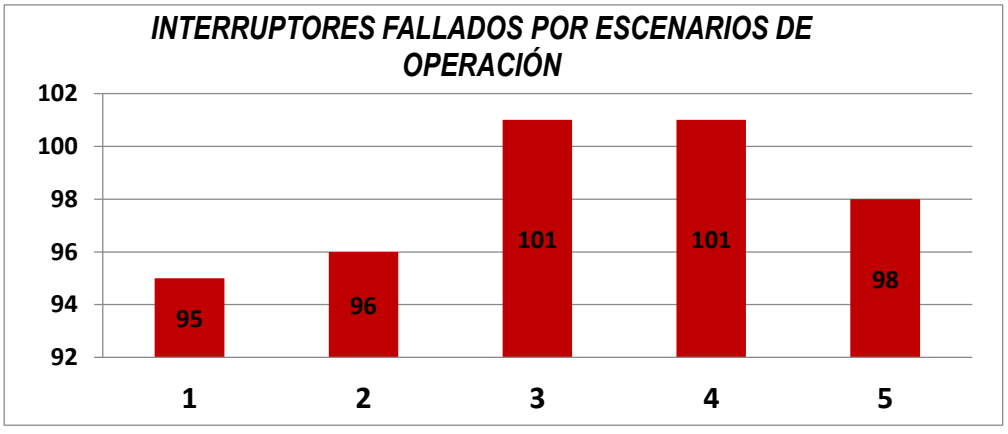

Figura 3: Número de interruptores de 480 V con insuficiente capacidad interruptiva ante un cortocircuito máximo para los diferentes escenarios de operación de la textilera.

Se puede observar desde el estado actual de operación (escenario1), ya existe un número elevado de interruptores de bajo voltaje que no satisfacen en mayor o menor medida la capacidad interruptiva necesaria, las afectaciones más desfavorables debido al incremento de las corrientes de cortocircuito se manifiesta en los escenarios de operación 3 y 4.

Tabla 3: Chequeo de los interruptores en baja tensión para el estado de operación No.1

Nombre	Ubicación	Capacidad interrupti (kA)	Int sim adj (kA)
Carda(1-7).CB	ASB H2(N°141)	5	7.0
Manuares.CB	ASB H2(N°6)	5	6.0
Mecherat s 2.CB	ASB H2(N°6)	5	6.0
RFH(1-6).CB	ASB H2(N°9)	7.5	8.2
RFH(7-12).CB	ASB H2(N°10)	7.5	8.1
Torcedora(1-5).CB	ASB H2(N°12)	7.5	7.9
Torcedora(6-10).CB	ASB H2(N°13)	7.5	7.8
Vent 3Colector(ACR111).CB	ASB H2(ACR111)	7.5	8.3
FDR22.CB1	ASB A1	30	33.6
FDR23.CB1	ASB A1	30	34.1
FDR24.CB1	ASB A1	30	33.6
FDR26.CB1	ASB A1	30	33.6
Condensación(ACR146).CB	ASB A1(ACR146)	7.5	9.9
Evaporador1 s 2(ACR146).CB	ASB A1(ACR146)	7.5	9.9
INP.CB	ASB A1(N°35)	5	6.0
ROM1 s 2.CB	ASB A1(N°35)	5	6.0
SHG1 s 2.CB	ASB A1(N°36)	5	6.1
INP+UVD.CB	ASB A1(N°27)	5	9.6
VRP.CB	ASB A1(N°37)	7.5	9.7
THV.CB	ASB A1(N°9)	5	6.2
FDR31.CB1	ASB A2	30	34.1
FDR39.CB1	ASB A2	30	34.1
Secadora Bellini.CB	ASB T1	30	42.3
FDR32.CB1	ASB T1	5	52.2
FDR42.CB1	ASB T1	5	52.2
FDR43.CB1	ASB T1	30	42.8
FDR50.CB1	ASB T1	10	52.2
FDR51.CB1	ASB T1	42	42.8
FDR52.CB1	ASB T1	42	42.8
FDR53.CB1	ASB T1	30	42.3
FDR54.CB1	ASB T1	30	42.3
FDR55.CB1	ASB T1	42	42.8
FDR56.CB1	ASB T1	42	42.8
FDR57.CB1	ASB T1	42	42.8
FDR58.CB1	ASB T1	42	42.8
Vent 3Colector(ACR127).CB	ASB T2(ACR127)	7.5	10.0
Bba 1Spray(ACR127).CB	ASB T2(ACR127)	7.5	10.0
Bba 1Spray(ACR128).CB	ASB T2(ACR128)	7.5	16.1
Vent 1Suministro(ACR128).CB	ASB T2(ACR128)	10	16.1
Vent 2Retorno(ACR128).CB	ASB T2(ACR128)	10	16.1
Vent 3Colector(ACR128).CB	ASB T2(ACR128)	7.5	16.1
Enconadoras old .CB	ASB T2(Enconadoras)	7.5	12.3
Enconadoras old+new.CB	ASB T2(Enconadoras)	7.5	12.3
Enconadoras new.CB	ASB T2(Enconadoras)	7.5	12.3
Encanilladoras.CB	ASB T2(Enconadoras)	7.5	12.3
Bba 1Spray(ACR133).CB	ASB T3(ACR133)	10	13.5
Vent 1Suministro(ACR133).CB	ASB T3(ACR133)	10	13.0
Vent 2Retorno(ACR133).CB	ASB T3(ACR133)	10	13.5
Vent 3Colector(ACR133).CB	ASB T3(ACR133)	10	13.5
Bba 1Spray(ACR134).CB	ASB T3(ACR134)	10	13.7
Bba 2Lavado(ACR134).CB	ASB T3(ACR134)	10	13.7
Vent 1Suministro(ACR134).CB	ASB T3(ACR134)	10	13.7
Vent 2Retorno(ACR134).CB	ASB T3(ACR134)	10	13.7
FDR46.CB1	ASB T3(Picañol 4 Caja)	7.5	8.5
FDR47.CB1	ASB T3(Picañol 4 Caja)	7.5	8.5
FDR48.CB1	ASB T3(Picañol 4 Caja)	7.5	8.5
FDR62.CB1	ASB T3(N°16)	7.5	8.4
FDR70.CB1	ASB T3(N°46)	7.5	8.5
FDR71.CB1	ASB T3(N°46)	7.5	8.5
FDR73.CB1	ASB T3(N°46)	7.5	8.5
FDR63.CB1	ASB T4	30	41.4
Bba 1Spray(ACR140).CB	ASB T4(ACR140)	10	23.5
Vent 1Suministro(ACR140).CB	ASB T4(ACR140)	10	23.0
Bba 2Lavado(ACR140).CB	ASB T4(ACR140)	10	23.5
Vent 2Retorno(ACR140).CB	ASB T4(ACR140)	10	23.0
Compresor de Aire.CB	ASB T4(N°30)	7.5	9.9
FDR82.CB1	ASB CE	30	52.2
FDR83.CB1	ASB CE	30	52.2
FDR84.CB1	ASB CE	30	52.2
FDR85.CB1	ASB CE	30	52.2
FDR88.CB1	ASB CE	42	52.7
FDR89.CB1	ASB CE	30	52.7
FDR90.CB1	ASB CE	30	52.7
FDR91.CB1	ASB CE	42	52.7
FDR92.CB1	ASB CE	42	52.7
FDR93.CB1	ASB CE	42	52.7
FDR94.CB1	ASB CE	42	52.7
FDR95.CB1	ASB CE	42	52.7
FDR96.CB1	ASB CE	42	52.7
FDR98.CB1	ASB CE	42	52.7
FDR100.CB1	ASB CE	30	52.7
FDR101.CB1	ASB CE	7.5	64.4
FDR64.CB1	ASB CE	7.5	64.4
Bba a Suavizadores1,2 s 3.CB	ASB CE(N°103)	7.5	8.4
Bba Agua Cruda1 s 2.CB	ASB CE(N°103)	7.5	8.4
Bba Ejector.CB	ASB CE(N°103)	7.5	8.4
Bba Lavado Superficial.CB	ASB CE(N°103)	7.5	8.4
FDR112.CB1	ASB AR	10	22.0
FDR113.CB1	ASB AR	18	21.5
FDR114.CB1	ASB AR	18	21.5
FDR115.CB1	ASB AR	10	22.0
FDR116.CB1	ASB AR	18	21.5
FDR117.CB1	ASB AR	18	21.5
FDR118.CB1	ASB AR	18	21.5
FDR119.CB1	ASB AR	10	21.5

Tabla 4: Chequeo de los interruptores en baja tensión para el estado de operación No.3

Nombre	Ubicación	Capacidad interruptiva (kA)	Iint sim adj (kA)
Carda(1-7).CB	ASB H2(N°141)	5	8.3
Enconadora1 y 2.CB	ASB H2(N°4)	7.5	8.5
Manoares.CB	ASB H2(N°8)	5	8.1
Mechera1 y 2.CB	ASB H2(N°8)	5	8.1
RFH(1-6).CB	ASB H2(N°9)	7.5	9.7
RFH(7-12).CB	ASB H2(N°9)	7.5	9.6
Toreadora(1-5).CB	ASB H2(N°2)	7.5	9.2
Toreadora(6-10).CB	ASB H2(N°3)	7.5	9.2
Vent 3Colector(ACR111).CB	ASB H2(ACR111)	7.5	9.2
FDR22.CB1	ASB A1	30	33.7
FDR23.CB1	ASB A1	30	34.2
FDR24.CB1	ASB A1	30	33.7
FDR26.CB1	ASB A1	30	33.7
Condensación(ACR146).CB	ASB A1(ACR146)	7.5	9.9
Evaporador1 y 2(ACR146).CB	ASB A1(ACR146)	7.5	9.9
INP.CB	ASB A1(N°35)	5	6.0
ROMI y 2.CB	ASB A1(N°35)	5	6.0
SHG1 y 2.CB	ASB A1(N°38)	5	6.1
INP+UVD.CB	ASB A1(N°27)	5	9.6
VHP.CB	ASB A1(N°37)	7.5	9.7
THV.CB	ASB A1(N°8)	5	6.2
FDR29.CB1	ASB A2	42	47.1
FDR31.CB1	ASB A2	30	46.6
FDR37.CB1	ASB A2	42	47.1
FDR38.CB1	ASB A2	42	46.6
FDR39.CB1	ASB A2	30	46.6
Secadora Bellini.CB	ASB T1	30	42.4
FDR32.CB1	ASB T1	5	52.4
FDR42.CB1	ASB T1	5	52.4
FDR43.CB1	ASB T1	30	42.9
FDR50.CB1	ASB T1	10	46.9
FDR51.CB1	ASB T1	42	42.9
FDR52.CB1	ASB T1	42	42.9
FDR53.CB1	ASB T1	30	42.4
FDR54.CB1	ASB T1	30	42.4
FDR55.CB1	ASB T1	42	42.9
FDR56.CB1	ASB T1	42	42.9
FDR57.CB1	ASB T1	42	42.9
FDR58.CB1	ASB T1	42	42.9
Vent 3Colector(ACR127).CB	ASB T2(ACR127)	7.5	80.0
Bba 1Spray(ACR127).CB	ASB T2(ACR127)	7.5	80.0
Bba 1Spray(ACR128).CB	ASB T2(ACR128)	7.5	16.1
Vent 1Suministro(ACR128).CB	ASB T2(ACR128)	10	16.1
Vent 2Retorno(ACR128).CB	ASB T2(ACR128)	10	16.1
Vent 3Colector(ACR128).CB	ASB T2(ACR128)	7.5	16.1
Enconadoras old .CB	ASB T2(Enconadoras	7.5	12.3
Enconadoras old+new.CB	ASB T2(Enconadoras	7.5	12.3
Enconadoras new.CB	ASB T2(Enconadoras	7.5	12.3
Encanilladoras.CB	ASB T2(Enconadoras	7.5	12.3
Bba 1Spray(ACR133).CB	ASB T3(ACR133)	10	13.5
Vent 1Suministro(ACR133).CB	ASB T3(ACR133)	10	13.0
Vent 2Retorno(ACR134).CB	ASB T3(ACR134)	10	13.7
FDR46.CB1	ASB T3(Picañol 4 Caja	7.5	8.5
oFDR47.CB1	ASB T3(Picañol 4 Caja	7.5	8.5
FDR48.CB1	ASB T3(Picañol 4 Caja	7.5	8.5
FDR62.CB1	ASB T3(N°6)	7.5	8.4
FDR70.CB1	ASB T3(N°6)	7.5	8.5
FDR71.CB1	ASB T3(N°6)	7.5	8.5
FDR73.CB1	ASB T3(N°6)	7.5	8.5
FDR63.CB1	ASB T4	30	41.6
Bba 1Spray(ACR140).CB	ASB T4(ACR140)	10	23.6
Vent 1Suministro(ACR140).CB	ASB T4(ACR140)	10	23.1
Bba 2Lavado(ACR140).CB	ASB T4(ACR140)	10	23.6
Vent 2Retorno(ACR140).CB	ASB T4(ACR140)	10	23.1
Compresor de Aire.CB	ASB T4(N°30)	7.5	9.9
FDR77.CB1	ASB T4	42	42.1
TRF11.CB1	ASB T4	42	42.1
FDR82.CB1	ASB CE	30	52.4
FDR83.CB1	ASB CE	30	52.4
FDR84.CB1	ASB CE	30	52.4
FDR85.CB1	ASB CE	30	52.4
FDR88.CB1	ASB CE	42	52.9
FDR89.CB1	ASB CE	30	52.9
FDR90.CB1	ASB CE	30	52.9
FDR91.CB1	ASB CE	42	52.9
FDR92.CB1	ASB CE	42	52.9
FDR93.CB1	ASB CE	42	52.9
FDR94.CB1	ASB CE	42	52.9
FDR95.CB1	ASB CE	42	52.9
FDR96.CB1	ASB CE	42	52.9
FDR98.CB1	ASB CE	42	52.9
FDR100.CB1	ASB CE	30	52.9
FDR101.CB1	ASB CE	7.5	64.7
FDR64.CB1	ASB CE	7.5	64.7
Bba a Suavizadores1,2 y 3.CB	ASB CE(N°103)	7.5	8.4
Bba Agua Crudal y 2.CB	ASB CE(N°103)	7.5	8.4
Bba Eyector.CB	ASB CE(N°103)	7.5	8.9
Bba Lavado Superficial.CB	ASB CE(N°103)	7.5	8.9
FDR112.CB1	ASB AR	10	22.1
FDR113.CB1	ASB AR	18	21.6
FDR114.CB1	ASB AR	18	21.6
FDR115.CB1	ASB AR	10	22.1
FDR116.CB1	ASB AR	18	21.6
FDR117.CB1	ASB AR	18	21.6
FDR118.CB1	ASB AR	18	21.6
FDR119.CB1	ASB AR	10	21.6

Se concluye hasta aquí, que de los escenarios críticos, el más propenso a trabajar, según las características y proyectos previstos para la planta de cogeneración, es el escenario 3, por lo que será el objeto fundamental a tratar en las medidas de reducción o mitigación de los efectos de los cortocircuitos en la fábrica.

Posibles acciones para reducir o mitigar los efectos sobre interruptores afectados por altas corrientes de cortocircuito.

Algunas medidas no requieren una considerable inversión para su aplicación, otras sí , pero siempre debe efectuarse un análisis técnico de cada una.

- Reemplazo de interruptores actuales por otros de mayor capacidad interruptiva.

En la tabla 5, se puede observar una muestra de la comparación de la capacidad interruptiva de los interruptores con las corrientes ajustadas según los cálculos implementados en el producto de software IPA a partir de la norma ANSI, solo aparecen aquellos interruptores que no cumplen con la capacidad necesaria en el nivel de 0.48 kV, la sustitución se propone por interruptores modernos de la empresa Terasaki, de donde se suministraron los antiguos instalados en la fábrica.

Tabla 5: Chequeo de los interruptores en baja tensión para el estado de operación No.3, mediante el software IPA y propuesta de sustitución

Nombre	Ubicación	Capacidad interrupt actual (kA)	Isim adj (kA)	Capac interrup necesaria (kA)	Tipo existente actualmente	Tipo a sustituir
Carda(1-7).CB	ASB H2(Nº141)	5	7	10	TO-60P de 60A	XE100NS de 60A y 10KA
RFH(1-6).CB	ASB H2(Nº9)	7,5	9	10	TO-100G de 100A	XE100NS de 100A y 10KA
Bba 1Spray(ACR134)	ASB T3(ACR134)	10	8	15	EA203 de 150A	XE225NC de 150A y 15KA
FDR63.CB1	ASB T4	30	29	35	TO-400B de 400A	XS400CJ de 400A y 35KA
Bba 1Spray(ACR140)	ASB T4(ACR140)	10	17	20	EA203 de 150A	XS250NJ de 160A y 25KA
Compresor Aire.CB	ASB T4(Nº90)	7,5	8	10	TO-100G de 100A	XS125NJ de 100A y 25KA
FDR82.CB1	ASB CE	30	42	45	TO-400B de 400A	XS400NJ de 400A y 50KA
FDR84.CB1	ASB CE	30	41	45	TO-400B de 400A	XS400NJ de 400A y 50KA
FDR88.CB1	ASB CE	42	43	45	TG-225 de 225A	XH250NJ de 250A y 50KA
FDR89.CB1	ASB CE	30	42	45	TO-400B de 400A	XS400NJ de 400A y 50KA
FDR91.CB1	ASB CE	42	42	45	TG-225 de 225A	XH250NJ de 250A y 50KA
FDR94.CB1	ASB CE	42	43	45	TO-60P de 60A	XH125NJ de 63A y 50KA
FDR96.CB1	ASB CE	42	43	45	TG-225 de 225A	XH250NJ de 250A y 50KA
FDR100.CB1	ASB CE	30	42	45	TO-400B de 400A	XS400NJ de 400A y 50KA
FDR101.CB1	ASB CE	7,5	43	45	TO-100G de 100A	XH125NJ de 100A y 50KA
Bba Eyector.CB	ASB CE(Nº103)	7,5	8	10	TO-60P de 60A	XE100NS de 60A y 10KA
FDR105.CB1	ASB SP	10	11	15	TG-225 de 225A	XE225NC de 225A y 15KA

Esta medida como es de esperar demanda una inversión inicial en la adquisición de los interruptores y recursos financieros, materiales y humanos para el proceso de su instalación.

- División o seccionalización de las redes o circuitos en la industria.

Es una medida más inmediata para tratar de resolver parcialmente los problemas encontrados y que no necesita realizar una considerable inversión inicial, solo recursos humanos para las manipulaciones y/o restablecimientos de regímenes de operación, aunque quizás influyan en alguna medida el consumo de energía en la entidad. La partición de la barra en su forma más simple en subestaciones se lleva a cabo mediante la apertura de la sección de barra que opera en una posición normalmente abierta. Se efectúan varias propuestas de seccionalizaciones y/o divisiones, pero de estas las fundamentales se agrupan en:

- Poner a funcionar las dos líneas de 110 kV al mismo tiempo, pero separándolas abriendo sólo los interruptores 8551 y 8552, se mantienen 98 interruptores en riesgo en caso de un cortocircuito máximo.
-Con dos líneas en servicio por separado y abriendo el interruptor de enlace L 203 en 6kV permanecen 88 interruptores en riesgo.
- Con las dos líneas en servicio por separado, abriendo el interruptor L 203 y abriendo los demás enlaces por 0,48kV en subestaciones H1,H2,H3,T1 yT2, disminuye el número de interruptores en riesgo a 84, pero aún se mantiene un número considerable de interruptores con capacidad interruptiva insuficiente.

Se puede concluir que esta medida aunque no necesita inversión inicial, no es muy efectiva desde el punto de vista de reducir el número de interruptores en riesgo.

- Instalación de reactores limitadores de corriente

Los reactores propuestos se seleccionaron a partir de las siguientes condiciones:

- En régimen de carga normal, el Reactor no puede provocar una caída de tensión >6 % Un.
- En régimen de cortocircuito, el Reactor debe de mantener en barra alrededor del 70 % Un o mayor.
- Que la corriente de cortocircuito por el Reactor sea inferior a la de esfuerzos dinámicos Idin.

Por ejemplo, para la resolución de los problemas que presentan los interruptores de la Carda 1 hasta la Carda 7 ubicados en la barra N°141, se utilizó un único reactor en serie con ellos de 0.48 kV, 37.53A, una reactancia de 0.79 Ω y una Idin de 18 kA. En la figura 4 se muestra la ubicación del reactor en el monolineal y en la tabla 6 se pueden observar en los nuevos valores de corriente sobre los interruptores y que ahora se satisface la capacidad interrptiva.

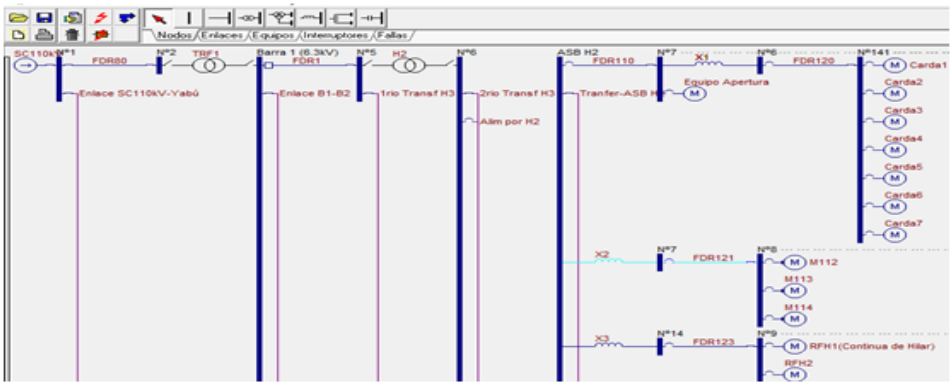

Figura 4 Simulación de reactores en el software IPA

Tabla 6: Resultado de corriente con el reactor instalado en el software IPA

Nombre	Ubicación	Capacidad interruptiva (kA)	Isim adj (kA) IPA
Carda(1-7).CB	ASB H2(N°141)	5	0,8

Otro caso es para los interruptores ubicados en la barra ASB A1(ACR146), se utilizó un sólo reactor en serie de 0.48 kV, 132.24 A, una reactancia de 0.27 Ω y una Idin de 20 kA. En la tabla 7 se pueden observar los nuevos valores de corriente.

Tabla 7: Resultado de corriente con el reactor instalado en el software IPA

Nombre	Ubicación	Capacidad interruptiva actual (kA)	Isim adj (kA) IPA
Condensación.CB	ASB A1(ACR146)	7,5	2
Evaporador1 y 2.CB	ASB A1(ACR146)	7,5	2
INP.CB	ASB A1(N°35)	5	1
ROM1 y 2	ASB A1(N°35)	5	1
SHG1 y 2.CB	ASB A1(N°38)	5	1

Se proponen en total la ubicación de 15 reactores con su análisis técnico pormenorizado.

Este es un modo muy práctico y beneficioso para la limitación de esfuerzos térmicos y dinámicos por corriente de cortocircuito en todos los elementos del sistema, pero su implementación en cada lugar implica una inversión sobre ofertas disponibles en el mercado o su fabricación específica en cada caso, lo que está en dependencia de las características de cada uno, así como la necesidad de ubicación en un local.

- Uso de fusibles limitadores de corriente

En general para encontrar los valores de limitación de la corriente de cortocircuito en la mayoría de los interruptores, se usa la característica de limitación del fusible clase J del fabricante Cooper Bussmann asociado a cada uno y ejemplos de los nuevos valores de corriente reducidas posibles a interrumpir por el interruptor se muestran en la tabla 8.

Tabla 8: Valores de corriente reducidos por fusibles limitadores clase J.

Nombre	Ubicación	Capacidad interruptiva actual (kA)	Isim adj (kA)	Corriente nominal del fusible (A)	Nuevo valor de corriente pico (kA)
Carda(1-7).CB	ASB H2(Nº141)	5	7	60	3,6
RFH(1-6).CB	ASB H2(Nº9)	7,5	9	75	5
RFH(7-12).CB	ASB H2(Nº10)	7,5	8	75	5
Vent 3Colector(ACR111).CB	ASB H2(ACR111)	7,5	8	50	3,5
FDR23.CB1	ASB A1	30	27	400	19
Evaporador1 y 2.CB	ASB A1(ACR146)	7,5	8	50	3,5
INP.CB	ASB A1(Nº35)	5	5	30	1,6
INP+UWD.CB	ASB A1(Nº27)	7,5	9	60	3,5
WRP.CB	ASB A1(Nº37)	7,5	8	100	5
THW.CB	ASB A1(Nº8)	5	5	60	3
FDR31.CB1	ASB A2	30	35	400	21
Secadora Bellini.CB	ASB T1	30	31	400	19
FDR50.CB1	ASB T1	5	32	60	8
FDR53.CB1	ASB T1	30	31	400	19
Vent 3Colector(ACR127).CB	ASB T2(ACR127)	7,5	9	50	3,5
Bba 1Spray(ACR127).CB	ASB T2(ACR127)	7,5	8	50	3,5
Bba 1Spray(ACR128).CB	ASB T2(ACR128)	7,5	13	50	4
Vent 1Suministro(ACR128).CB	ASB T2(ACR128)	10	13	150	8,9
Vent 3Colector(ACR128).CB	ASB T2(ACR128)	7,5	14	50	4,1
Encanilladoras.CB	ASB T2	10	10	100	5,1
Bba 1Spray(ACR134)	ASB T3(ACR134)	10	8	150	7,3
FDR63.CB1	ASB T4	30	29	400	19
Bba 1Spray(ACR140).CB	ASB T4(ACR140)	10	17	150	9,8
Vent 2Retorno(ACR140).CB	ASB T4(ACR140)	10	17	150	9,8
Compresor de Aire.CB	ASB T4(Nº90)	7,5	8	100	5
FDR82.CB1	ASB CE	30	42	400	22
FDR83.CB1	ASB CE	30	42	400	22
FDR84.CB1	ASB CE	30	41	400	21
FDR85.CB1	ASB CE	30	42	400	22
FDR88.CB1	ASB CE	42	43	225	23
FDR89.CB1	ASB CE	30	42	400	22
FDR90.CB1	ASB CE	30	42	400	22
FDR91.CB1	ASB CE	42	42	225	22
FDR98.CB1	ASB CE	42	43	225	23
FDR100.CB1	ASB CE	30	42	400	22
FDR101.CB1	ASB CE	7,5	43	100	9
FDR64.CB1	ASB CE	7,5	43	100	9
Bba Eyector.CB	ASB CE(Nº103)	7,5	8	15	1,2
Bba Lavado Superficial.CB	ASB CE(Nº103)	7,5	8	30	2
FDR105.CB1	ASB SP	10	11	125	8,1
FDR68.CB1	ASB SP	10	11	125	8,1
FDR112.CB1	ASB AR	10	13	200	8,9

Como se observa en cada caso, el fusible limita la corriente pasante a un valor menor que la capacidad interruptiva de los interruptores actuales, convirtiéndose en una medida que a pesar de tener una

inversión inicial y la desventaja de la necesidad de remplazos de fusibles operados, es más económica y menos complicada su implementación que el cambio de interruptores e instalación de reactores.

- Filiación

Con la filiación se pueden ahorrar limitadores de corriente de cortocircuito, pero se pierde selectividad en las protecciones, con las consecuentes implicaciones en el sistema de suministro ante fallas más violentas donde intervienen dichos limitadores. La mejor filiación se realiza entre interruptores estándares y limitadores de un mismo fabricante, e incluso hoy aparecen en tablas al respecto, pero los interruptores instalados actualmente en la fábrica son muy antiguos (década del 70 del siglo pasado) y por ejemplo los de la firma Terasaki usados en la fábrica ya no los produce, y según búsqueda realizada por el autor ni siquiera se emiten criterios de homologación con los de fabricación actual, por lo que es imposible realizar una filiación directa de los interruptores actuales con nuevos interruptores limitadores a instalar por tablas de filiación, lo que obliga a realizar una filiación caso a caso y que consiste en poner un fusible de mayor capacidad aguas arriba con el poder de corte necesario, protegiendo así los interruptores aguas abajo.

Para llegar a los nuevos valores de corriente limitada se usó la curva del fusible clase J para aquellos con rango de corriente hasta los 600A como se hizo con fusibles en cada alimentador, y las curvas del fusible clase L para aquellos cuyo rango de corriente llega hasta los 6000 A. Como se muestra en la Tabla 9 en los ejemplos que aparecen, el fusible clase L en varios casos no limita la corriente de cortocircuito, situación no favorable para el uso de esta medida de limitación.

Tabla 9: Valores de corriente reducidos por filiación

Nombre	Ubicación	Capacidad interruptiva actual (kA)	Isim adj (kA) IPA	Corriente del fusible aguas arriba (A)	Nuevo valor de corriente (kA)
Carda(1-7).CB	ASB H2(Nº141)	5	7	400	12
Manuares.CB	ASB H2(Nº8)	5	7	225	12
Mechera1 y 2.CB	ASB H2(Nº8)	5	7	225	12
RFH(1-6).CB	ASB H2(Nº9)	7,5	9	225	13
Vent 3Colector(ACR111).CB	ASB H2(ACR111)	7,5	8	400	13
FDR23.CB1	ASB A1	30	27	3000	No limita
Condensación.CB	ASB A1(ACR146)	7,5	8	3000	No limita
INP.CB	ASB A1(Nº35)	5	5	3000	No limita
INP+UWD.CB	ASB A1(Nº27)	7,5	9	3000	No limita
WRP.CB	ASB A1(Nº37)	7,5	8	3000	No limita
THW.CB	ASB A1(Nº8)	5	5	3000	No limita
FDR31.CB1	ASB A2	30	35	3000	No limita
FDR39.CB1	ASB A2	30	34	3000	No limita
Secadora Bellini.CB	ASB T1	30	31	4000	No limita
FDR50.CB1	ASB T1	10	32	4000	No limita
FDR43.CB1	ASB T1	30	32	4000	No limita
FDR53.CB1	ASB T1	30	31	4000	No limita
Vent 3Colector(ACR127).CB	ASB T2(ACR127)	7,5	9	225	13
Bba 1Spray(ACR127).CB	ASB T2(ACR127)	7,5	8	225	13
Bba 1Spray(ACR128).CB	ASB T2(ACR128)	10	13	225	14
Vent 3Colector(ACR128).CB	ASB T2(ACR128)	10	14	225	15
Enconadoras .CB	ASB T2	10	10	225	14
Bba 1Spray(ACR134)	ASB T3(ACR134)	10	8	400	13
FDR63.CB1	ASB T4	30	29	4000	No limita
Bba 1Spray(ACR140).CB	ASB T4(ACR140)	10	17	400	16
Compresor de Aire.CB	ASB T4(Nº90)	7,5	8	400	13
FDR82.CB1	ASB CE	30	42	4000	No limita
FDR84.CB1	ASB CE	30	41	4000	No limita
FDR85.CB1	ASB CE	30	42	4000	No limita

FDR88.CB1	ASB CE	42	43	4000	No limita
FDR89.CB1	ASB CE	30	42	4000	No limita
FDR94.CB1	ASB CE	42	43	4000	No limita
FDR100.CB1	ASB CE	30	42	4000	No limita
FDR101.CB1	ASB CE	10	43	4000	No limita
Bba Eyector.CB	ASB CE(Nº103)	7,5	8	4000	No limita
FDR105.CB1	ASB SP	10	11	3000	No limita
FDR112.CB1	ASB AR	10	13	500	19

Conclusiones

- La inclusión de la cogeneración, aunque aumenta los niveles de cortocircuito, no ocasiona un incremento significativo de los interruptores afectados respecto al estado actual, por lo que es viable y puede ser conectada como se describe en los escenarios 3,4 ó 5.
- Existe un número considerable de interruptores que no tienen la capacidad interruptiva necesaria, situación peligrosa para el correcto funcionamiento de la industria desde la etapa actual.
- La seccionalización de las redes es la medida más inmediata y sin necesidad de inversión inicial, pero solo resuelve una pequeña parte de los interruptores y puede ocasionar incrementos de gastos.
- El reemplazo de interruptores es una medida conclusiva, pero necesita una inversión inicial mayor.
- Invertir en reactores limitadores, es un modo práctico y general que limita esfuerzos por cortocircuito.
- Los fusibles limitadores también necesitan inversión inicial y aunque hay necesidad de remplazarlos al operar, es más factible su implementación que el cambio de interruptores y uso de reactores.
- La filiación demanda un riguroso trabajo técnico de coordinación, pero ahorra por usar menos fusibles o interruptores limitadores, se restringe su uso por lo obsoleto de los interruptores actuales.

Recomendaciones

- Realizar en trabajos posteriores un detallado análisis económico de las medidas que conllevan a una inversión inicial y gastos de recursos materiales y humanos para su implementación.
- Partiendo del considerable número de interruptores afectados por altas corrientes de cortocircuito en el voltaje de 0.48 kV, se recomienda analizar en este sentido también las barras y los cables.

Bibliografía

[1] Apeltra. Reactor Limitador de Corriente de Cortocircuito. 2016
[2] CIGRE. Alternativas para reducir el nivel de cortocircuito en el sistema interconectado central (SIC) de Chile. Décimo Séptimo Encuentro Reg. Iberoam Cigre. May 2017.
[3] EATON, "Selecting Protective Devices Electrical Protection Handbook," 2014.
[4] Faradayos. Tipos de fusibles de baja tensión: valores característicos y diseño. Feb-2014.
[5] Francesena Bacallao E. A, ""Aplicación de Interruptores Automáticos de Caja Moldeada en la Industria Cubana" Tesis Maestría, Univ. Central de Las Villas. Santa Clara, 2001.
[6] Galván Hernández R, García Santana J y Rosas Reyes F J. Coordinación de Protecciones para un Sistema Eléctrico Industrial», Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México, 2009.
[7] IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems, First Printing. New York, 2001.
[8] Macdowell J, Pierre C St. and Huening W, "Recommended Practice for Calculating Short-Circuit in Industrial and Commercial Power Systems," IEEE Violet Book, 2006.
[9] Ramos R. Alternativas de reducción de corrientes cortocircuito en media tensión. El Salvador, 2015.
[10] Scientific Research. Appropriate Placement of Fault Current Limiting Reactors in Different HV Substation Arrangements. May 2012.
[11] Wu X, "An investigation of Network Splitting for Fault Level Reduction," The Manchester Centre for Electrical Energy (MCEE), UMIST, UK, January 2003.