

Evaluación de la calidad del suministro eléctrico de una planta industrial. Modelo y simulación dinámica ante fallas en la red de alimentación

M. Beatriz Barbieri, Carlos Biteznik, Mario Beroqui, Patricia Arnera / IITREE – UNLP
Jorge Albarazin / Y.P.F. S.A.
ARGENTINA

bbarbieri@iitree-unlp.org.ar, cebiteznik@iitree-unlp.org.ar,
mberoqui@iitree-unlp.org.ar, pla@iitree-unlp.org.ar,
jalbarrazinv@ypf.com

Congreso Internacional de Distribución Eléctrica – Cidel 2010
27 al 29 de septiembre de 2010
Buenos Aires, Argentina

ÍNDICE

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN
2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN
3. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO
4. MITIGACIÓN
5. MODELO DE LA PLANTA Y SIMULACIÓN DE FALLAS
6. CONCLUSIONES
7. REFERENCIAS

Resumen

Se realiza un análisis de registros obtenidos ante perturbaciones en el sistema eléctrico de suministro a una planta industrial. Se clasifican y agrupan los distintos eventos de acuerdo con su origen y se evalúa para cada tipo de perturbación los cortes de carga asociados.

Con objeto de analizar el impacto de las distintas fallas y huecos que aparecen en la red pública de distribución, se arma un modelo eléctrico de la planta y su red de alimentación. Se valida el mismo con los registros obtenidos en alguna de las fallas consideradas. Luego con este modelo se realizarán simulaciones de fallas posibles en la red, observando el comportamiento dinámico de distintos puntos de la planta a fin de detectar situaciones críticas, con el objeto de poder mejorar la confiabilidad y calidad del sistema industrial.

1. Introducción

La calidad de la energía en el suministro eléctrico resulta un elemento relevante en la operación de refineras e industrias petroquímicas. Los microcortes y las caídas de tensión afectan a las plantas industriales de forma mucho más significativa que a otros tipos de demandas, tales como cargas residenciales o comerciales. En este tipo de instalaciones industriales los riesgos asociados a estos fenómenos afectan la seguridad de las personas, producen fuerte impacto ambiental y cuantiosas pérdidas económicas.

Actualmente, las instalaciones eléctricas de las plantas cuentan con registradores de magnitudes eléctricas asociados a las nuevas protecciones digitales y/o a equipos diseñados específicamente para ese fin, los cuales almacenan, en ocasiones de perturbaciones, las tensiones y/o corrientes en distintos puntos de la red. El análisis de estos registros tiene un valor importante pues evidencia posibles problemas en las redes eléctricas ya sean internos o externos a la planta.

Dentro de un plan de mejora de la fiabilidad eléctrica de una planta industrial de refinado de gran demanda de potencia, se realiza desde hace más de 4 años un programa de "Seguimiento de fallas", basado en el análisis de registros. Este trabajo es la continuación del presentado en la Ref [1].

Se presenta un análisis de las fallas ocurridas en la red interna y externa del complejo industrial. El análisis se enfoca principalmente en los eventos externos, es decir en la red de la distribuidora o nodos del resto del Sistema de Interconexión Argentino (SADI), pues estos son uno de los parámetros determinantes de la calidad del suministro eléctrico. Para realizar este trabajo se cuenta con registros oscilográficos e informes de eventos ocurridos en el período Enero de 2006 a Octubre de 2009.

2. Análisis de la información

a) Datos de la instalación

La red eléctrica de la planta se alimenta a través de una subestación 132/33 kV (SE) localizada en el mismo predio industrial. Esta SE se conecta a los nodos de 132 kV de la Distribuidora, a través de una línea aérea y un cable Ref [1]. A la SE. también se conecta un generador (130 MW). La

SE actualmente tiene tres transformadores (Yn/Yn/D 132/35kV/13.8) TR1 y TR2 de 63 MVA, y TR3 de 90 MVA.

Esta SE fue ampliada en el 2008, agregando el tercer transformador (TR3), y cambiando la estructura de 132 kV de estación en *anillo* a estación *Interruptor y medio*.

La Figura 1 muestra el esquema general de la SE.

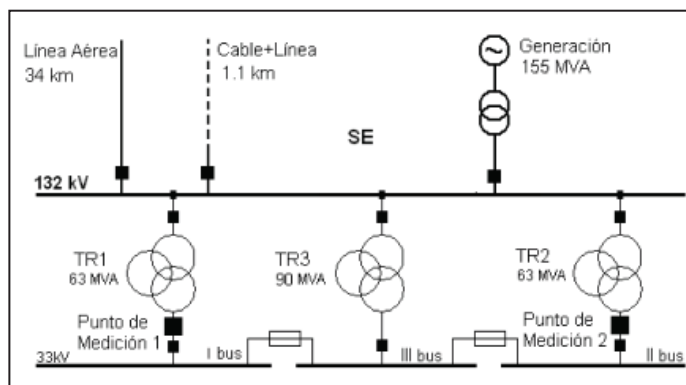


Figura 1. Esquema general de la S.E. y ubicación de los puntos de medición

Existen sistemas de registros oscilográficos de transitorios instalados en 33 kV y 132 kV, que toman lectura tanto de las tensiones como de las corrientes en cada una de las fases.

b) Análisis de los registros

Con la información disponible se procede a analizar los datos registrados de los eventos correspondientes al período 2006 hasta Octubre de 2009. La información debió compatibilizarse ya que a fines del 2007 con el cambio de la estructura de la SE se modificaron los puntos de medición.

De la totalidad de eventos registrados se tomaron aquellos que produjeron variaciones en el valor eficaz de la tensión suficientes para ser consideradas caídas de tensión (Ref. [1], [2] y [3]). Además se cuenta con un reporte por cada falla ocurrida, donde se especifica el origen de la falla, discriminando si la misma se originó en la red interna del complejo o en la red externa.

De la totalidad de los registros durante 46 meses, treinta y uno (31) correspondieron a caídas de tensión debido a fallas externas y once (11) fueron fallas internas.

La TABLA I muestra estos eventos (E) y sus principales características:

- Duración de la falla (D): la misma es estimada a partir de los registros, como el tiempo durante el cual la tensión permanece por debajo del 90% de su valor nominal.
- Tensión mínima (Vm): se considera el valor eficaz de la tensión de fase que sufre mayor caída de tensión durante el evento.
- Fase con mayor caída (Fase).
- Potencia perdida en la falla.(Per).
- Ubicación de la falla (Ubi) E(externa), I(interna).
- Para las fallas externas se indica el Tipo de falla: monofásica (1f), bifásica (2f), trifásica (3f).

Tabla I. Eventos Registrados

| E | D (ms) | Vm 33kV (pu) | Fase | Per (MW) | Ubi | Tipo Falla |
|-----------|-------------|--------------|--------------|--------------|----------|--------------------|
| 1 | 115 | 0,55 | R | 3,20 | E | 1f |
| 2 | 115 | 0,29 | S | 5,40 | E | 1f |
| 3 | 75 | 0,85 | T | 0,00 | E | 3f |
| 4 | 75 | 0,29 | T | 4,00 | E | 1f |
| 5 | 90 | 0,69 | S | 8,13 | I | |
| 6 | 1485 | 0,74 | R,S,T | 3,50 | E | 3f |
| 7 | 155 | 0,43 | T | 6,00 | E | 2f |
| 8 | 400 | 0,35 | T | 10,50 | E | 2f |
| 9 | 100 | 0,79 | R | 2,60 | I | |
| 10 | 180 | 0,80 | S | 16,80 | I | |
| 11 | 100 | 0,83 | T | 0,80 | E | 2f |
| 12 | 75 | 0,64 | T | 4,00 | E | 2f |
| 13 | 660 | 0,59 | T | 7,40 | E | 2f |
| 14 | 150 | 0,36 | R | 8,50 | E | 1f |
| 15 | 120 | 0,74 | T | 2,60 | E | 3f |
| 16 | 75 | 0,72 | S | 6,20 | I | |
| 17 | 175 | 0,65 | R | 8,00 | I | |
| 18 | 170 | 0,26 | S | 7,80 | E | 1f |
| 19 | 120 | 0,36 | T | 9,60 | E | 2f |
| 20 | 125 | 0,32 | R | 7,80 | E | 1f |
| 21 | 85 | 0,41 | R | 4,80 | E | 1f |
| 22 | 150 | 0,51 | R | 7,80 | E | 1f |
| 23 | 360 | 0,73 | S | 8,40 | I | |
| 24 | 120 | 0,75 | R | 3,00 | E | 2f |
| 25 | 260 | 0,31 | R | 9,00 | E | 1f |
| 26 | 100 | 0,77 | R | 0,80 | E | 2f |
| 27 | 100 | 0,78 | R | 1,00 | E | 2f |
| 28 | 75 | 0,78 | T | 0,00 | E | 2f |
| 29 | 100 | 0,47 | T | 1,20 | I | |
| 30 | 150 | 0,375 | T | NC | E | 2f |
| 31 | 160 | 0,47 | ST | 6,8 | E | 2f |
| 32 | 240 | 0 | R,S | 5,5 | E | 2f |
| 33 | Inf. | 0 | R,S,T | Total | E | 3f |
| 34 | 145 | 0,23 | T | 5 | E | 1f |
| 35 | 148 | 0,15 | R | 5,1 | E | 1f |
| 36 | 10 | 0,78 | S | 3,7 | I | |
| 37 | 210 | 0,42 | T | 8,3 | E | 2f |
| 38 | 210 | 0,04 | T,R | 10 | I | |
| 39 | Isla | F/S | Gene | Total | E | 3f |
| 40 | 122 | 0,66 | T | 1,1 | E | 1f |
| 41 | 570 | 0,08 | S | 2,9 | I | |
| 42 | 320 | 0,073 | R,S,T | 5,6 | I | 3f 33kV |

3. Tratamiento estadístico

a) Fallas en la Red externa

Dado que uno de los objetivos planteados, corresponde a diagnosticar el estado de la red de alimentación en cuanto a su confiabilidad, se analiza exclusivamente el impacto de las fallas originadas en la red de alimentación externa.

Se realiza un post procesamiento de los registros de tensiones y corrientes trifásicas en los distintos nodos de medición y se calcula entre otras cosas las componentes de secuencia (Ref[1]).

En el período de análisis, de un total de cuarenta y dos (42) eventos analizados, treinta y uno (31) resultaron ser fallas externas al complejo industrial, de las cuales doce (12) correspondieron a fallas monofásicas con tiempos de duración de 75 ms hasta 260 ms y potencias cortadas entre 3,2 y 9 MW, catorce (14) bifásicas con tiempos de duración de 75 ms hasta 660 ms y potencias cortadas entre 0 y 10,5 MW y cinco (5) fallas trifásicas: tres (3) lejanas con tensiones mínimas de secuencia directa de alrededor de 0.8 p.u. en 33 kV y tiempos de duración de 75 ms hasta aproximadamente 1,5 s y potencias cortadas entre 0 y 3,5 MW y dos (2) fallas cercanas con colapso del sistema y corte total.

Las distribuciones porcentuales de tipo de fallas externas corresponden a: 39%, 45% y 16 %, para fallas monofásicas, bifásicas y trifásicas respectivamente.

Los resultados del análisis de los datos indican que en la red externa las fallas más comunes son las monofásica y bifásicas, que representan aproximadamente el 84% de los casos. Esto es algo esperable ya que generalmente las fallas son monofásicas derivando posteriormente a bifásicas, pero es poco probable que la misma logre convertirse en trifásica por la actuación de las protecciones previamente a que esto ocurra.

b) Impacto en la planta ante fallas en la red externa

Una forma de presentar los resultados, cuando se desea analizar las caídas de tensión, es expresando la frecuencia de caídas y su histograma correspondiente. Para ello se expresan, referidos a un año, los resultados del período de análisis (46 meses), señalando los números de caídas según su severidad y su duración. El histograma es una herramienta muy práctica para la interpretación de los resultados.

En la TABLA II se presenta la frecuencia de caídas de tensión producidas por fallas externas en valores anuales. Se muestran los valores mínimos de tensión de fase en cada caso, no los de secuencia.

Se puede ver que la mayor parte de las caídas poseen tiempos menores a los 200 ms. Esta característica es de esperar para el tipo de fallas analizadas, ya que se trata en su mayoría de eventos en la red de Alta Tensión perteneciente a la empresa prestadora del servicio eléctrico y estos tiempos están asociados a la operación en primera zona de las protecciones de impedancia de las líneas aéreas y cables subterráneos en este nivel de tensión.

En la Figura 2 se presenta el histograma de frecuencias de caídas de tensión presentada en la TABLA II.

El impacto que ocasionan las caídas de tensión dentro del complejo industrial es la pérdida de cargas y consecuentemente el perjuicio en el proceso de producción, rondando los valores de dichos cortes entre 3 y 10 MW sobre un valor promedio de demanda del complejo de alrededor de 42 MW. Para un mismo valor de tensión varía mucho el módulo de potencia que sale de servicio dependiendo del tiempo de duración de la caída de tensión y el tipo de falla. Se observa en el período de análisis dos cortes totales de carga por colapso del sistema, uno con formación de isla entre el generador y la planta industrial, pero a posteriori sale el generador (evento 39).

Tabla II: Frecuencia de caídas [veces por año]

| Magnitud | 0-200 ms | 200-400 ms | 400-600 ms | 600-800 ms | >800 ms |
|----------|----------|------------|------------|------------|---------|
| 80-90% | 0,522 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 70-80% | 1,304 | 0 | 0 | 0 | 0,261 |
| 60-70% | 0,522 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50-60% | 0,522 | 0 | 0 | 0,261 | 0 |
| 40-50% | 0,783 | 0,261 | 0 | 0 | 0 |
| 30-40% | 1,043 | 0,261 | 0,261 | 0 | 0 |
| 20-30% | 1,043 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10-20% | 0,261 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0-10% | 0 | 0,261 | 0 | 0 | 0,522 |

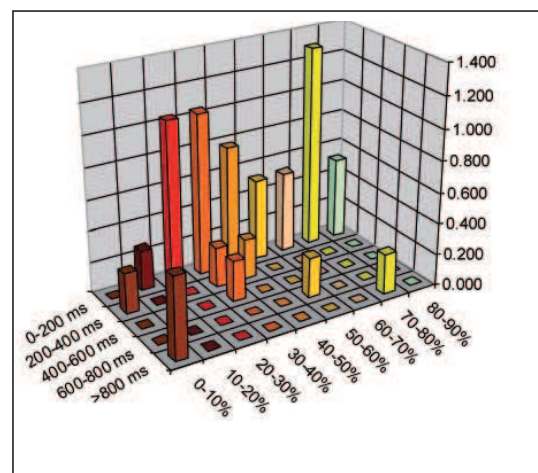


Figura 2. Histograma de frecuencias de caídas

4. Mitigación

El hecho que el 74% de las fallas externas, posean caídas de tensión con tiempo de duración menor a 200 ms, se debe a que las fallas son despejadas en primera zona por las protecciones de impedancia del sistema de distribución en 132 kV del área, por lo tanto no resulta posible minimizar estos tiempos de operación para mitigar su efecto en las caídas de tensión.

Por otra parte, el control de tensión por parte del generador conectado en barras de la subestación no es efectivo para mejorar esta situación debido a que la excitación se alimenta de bornes del generador, y por lo tanto ante una falla cercana a la subestación del complejo, la capacidad de entregar potencia reactiva y recuperar la tensión de 132 kV disminuye.

Para evitar o disminuir el impacto de las fallas de corta duración (< 200 ms) sobre la red interna del complejo, sólo existe la posibilidad de tomar medidas inmunizando los equipos sensibles a los huecos de tensión.

Una de estas medidas es reemplazar los comandos de los contactores de los motores por alimentación independiente, o disponer de aparatos de maniobra que queden retenidos ante caídas de tensión.

Las fallas en el sistema externo más severas, con duraciones mayores a los 200 ms y tensiones menores a 0,4 pu en 132 kV, producen la salida del generador conectado en el nodo de 132kV (por inestabilidad o actuación de sus protecciones). Para evitar esta situación se dispone de un sistema de formación de Isla eléctrica de la planta y el generador. En esta situación se debe recurrir al corte de carga de la planta para evitar el colapso de tensión del sistema dado el alto consumo de corriente de los motores durante la reacceleración de los mismos. El sistema de deslastre de carga debe ser tal que permita mantener la carga prioritaria en servicio ante el pasaje a Isla y desconectar la carga no esencial, de este modo se reduce el consumo de corriente requerida y se evita el colapso. También puede resultar necesario el deslastre de carga controlado en distintos nodos de la planta, para otras fallas que no impliquen la formación de Isla.

5. Modelo de la planta y simulación de fallas

Con objeto de mejorar la confiabilidad se plantea la necesidad de concretar un programa para la desconexión de carga no prioritaria ante determinadas fallas que provoquen el colapso de tensión en la planta. Si es necesario también se puede recurrir a la desconexión de parte de la carga prioritaria que admite un lapso breve desconectada pero en algunos segundos se debe re-arrancar.

Dentro de este marco, se plantea como primera etapa, disponer de un modelo de simulación dinámica del sistema eléctrico contrastado y validado con los registros obtenidos.

De este modo se puede analizar el impacto sobre la planta industrial de las distintas fallas y huecos que aparecen en la red eléctrica.

Las simulaciones de fallas en la red, permiten observar el comportamiento dinámico de tensiones y corrientes de distintos puntos de la planta, a fin de detectar situaciones críticas. Los resultados de las simulaciones permitirán programar el sistema de deslastre y reconexión de carga para más de 50 subestaciones y más de 2000 motores con que cuenta el complejo.

Con datos recogidos de la estructura de la planta, los tipos de cargas, su ubicación se realiza un modelo en un simulador de transitorios electromecánicos. Se modela además de la planta la red externa y el generador próximo. Se ajusta el modelo del generador con sus sistemas de control que determinan los transitorios de paso a Isla. Se detallan los motores de la planta de potencia mayores a 70 kW y se agrupan los de menor potencia.

El modelo se ajusta hasta lograr un comportamiento dinámico similar a los registros obtenidos en las fallas.

A modo de ejemplo se muestran los valores de tensión y corrientes registradas y simuladas en 132 kV y en algunos de los cables de 33 kV que constituyen la alimentación a los centros de carga desde las barras I, II, o III de la Figura 1.

Las fallas testigo analizadas son: una externa (evento 39, formación de Isla y posterior salida del generador por problemas internos) y otra interna (evento 42, cortocircuito trifásico en el extremo de un alimentador de 33 kV).

Los valores registrados corresponden a los valores eficaces de tensiones y corrientes de las tres fases y los valores simulados corresponden a los valores eficaces de secuencia directa, dado que los fenómenos electromecánicos analizado solo son sensibles a la secuencia directa.

La Figura 3 presenta las tensiones de 132 kV medidas y simuladas del evento 39.

La Figura 4 muestra la corriente entregada por el generador registrada (en las tres fases) y simulada (secuencia directa ITRM) durante una falla del sistema y sus posterior paso a Isla.

En este evento si bien se forma la Isla el generador termina saliendo con el consiguiente paro total de la planta. El sistema externo de protección del generador, al cual se tiene acceso, no fue el que actuó, presumiblemente actuaron protecciones internas de la excitación que están siendo investigadas. En la simulación no se saca el generador, sino que se continúa en isla de modo de ver la evolución del sistema ante esta situación. En dos fases el registro de corriente resulta mayor que en la otra fase por la presencia de la corriente continua, como se observa en la Figura 5, la cual tampoco se simula.

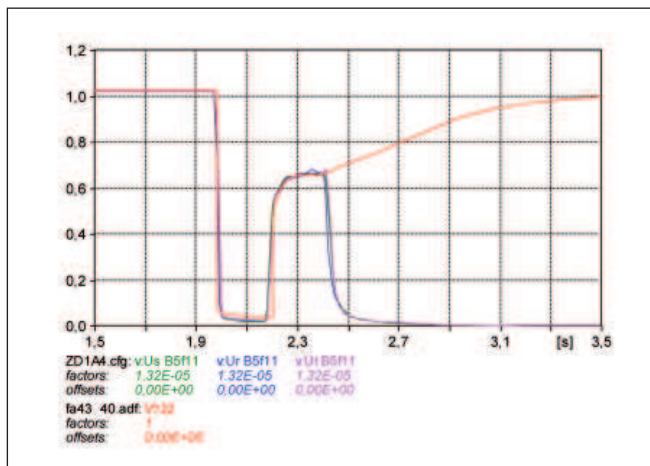


Figura 3. Tensión eficaz de 132 kV de las tres fases (evento 39) registrada y la secuencia directa simulada (V132).

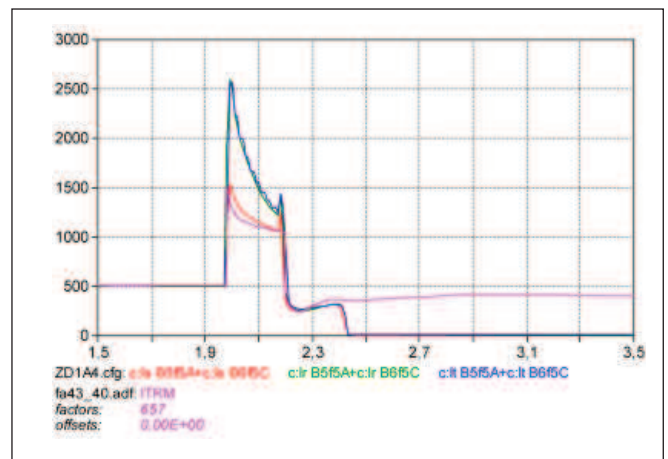


Figura 4. Corriente eficaz entregada por el Generador en 132 kV registrada (de las tres fases del evento 39.) y simulada (secuencia directa ITRM)

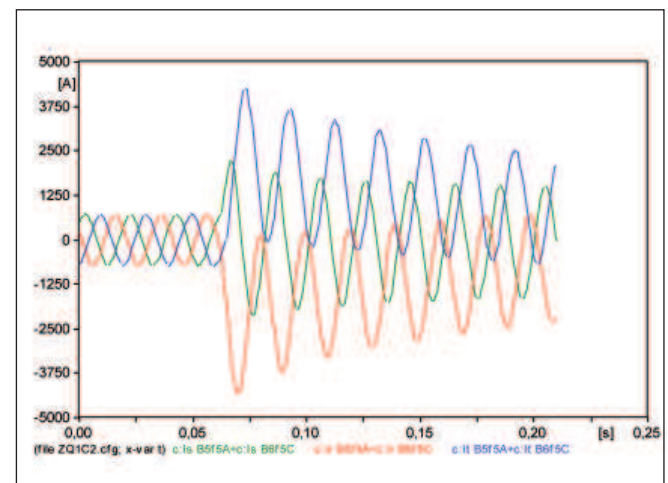


Figura 5. Registro de corriente instantánea entregada por el Generador en 132 kV de las tres fases correspondiente al evento 39.

Las Figuras 6 a 9 muestran, para una falla interna (evento 42), los valores registrados y simulados de corrientes y tensiones en distintos nodos de la red. La falla consistió en un cortocircuito monofásico de muy corta duración que evolucionó a trifásico y duró alrededor de 320 ms.

En la Figura 6 se muestra las corrientes eficaces en el alimentador en falla, la Figura 7 muestra las tensiones eficaces de 132kV y de la barra de 33 kV en falla. La Figura 8 muestra la evolución temporal de las corrientes en otro alimentador de 33 kV que se encuentra acoplado a la barra donde se encuentra el alimentador en falla.

En la Figura 9 se muestra la evolución temporal de las corrientes de un alimentador de 33 kV,

desacoplado de la barra en falla (el acoplador entre barra I y III abre a los 5 ms de iniciada la falla trifásica pues cuenta de un fusible rápido en 33 kV que limita la corriente de falla). En la Figura 9 también se muestra la tensión simulada en 33 kV de la barra I, la cual no fue registrada.

Se observa una muy buena concordancia entre la simulación y los registros. En la falla externa se valida el comportamiento dinámico del generador (corriente y tensión del generador) y en la falla interna se valida dentro de márgenes aceptables el comportamiento dinámico de la planta y sus motores. Por lo tanto se cuenta con un modelo electromecánico aceptable para realizar simulaciones de fallas y observar la evolución en el tiempo las tensiones y corrientes en distintos puntos.

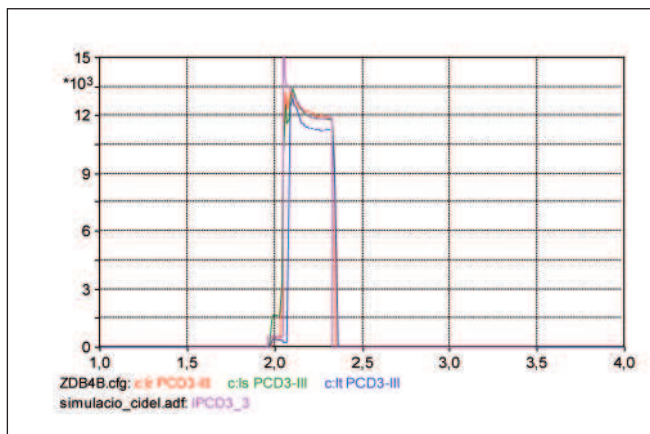


Figura 6. Corriente de falla del alimentador de barra III de 33 kV (evento 42), las tres fases registradas y corriente de secuencia directa simulada (IPCD3_3).

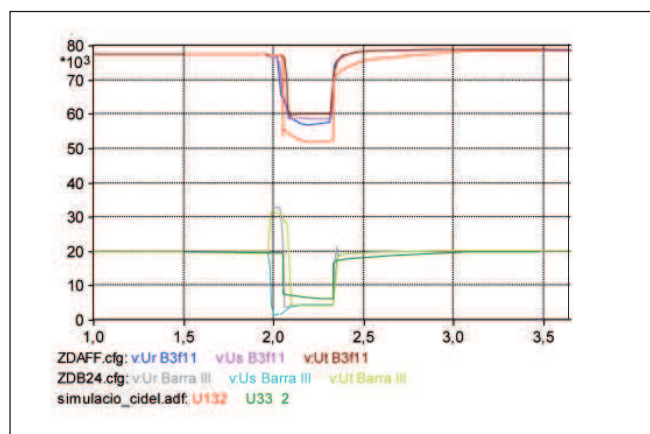


Figura 7. Tensión de 132 kV y 33 kV de las tres fases (evento 42) registrada y tensiones de secuencia directa simuladas (U132, U33_2).

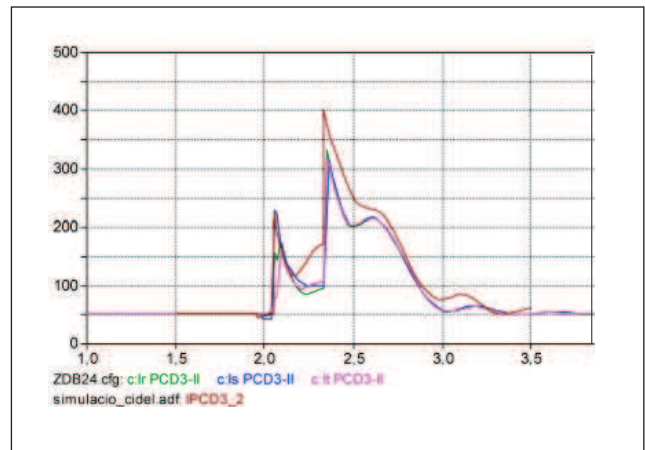


Figura 8. Corriente eficaz de un alimentador de 33kV Barra II. Valores registrados (evento 42) de las tres fases y simulada (secuencia directa PCD3_2)

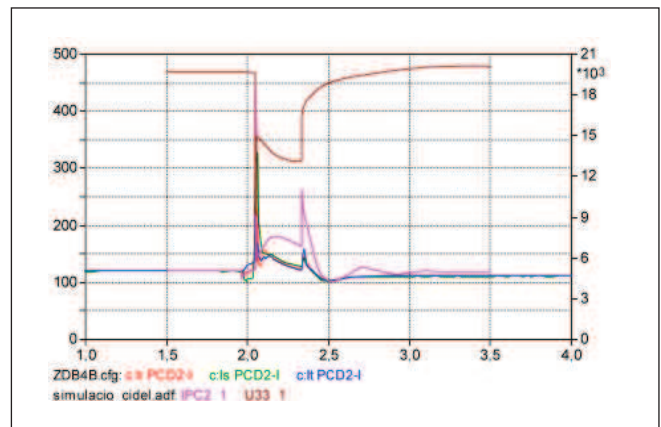


Figura 9. Corriente eficaz de un alimentador de 33kV Barra I. Valores registrados (evento 42) de las tres fases y simulada (secuencia directa PCD2_1). Tensión simulada barra I en 33 kV, U33_1

6. Conclusiones

La disponibilidad de registradores y el posterior procesamiento de sus resultados permite evidenciar las posibles causas de indisponibilidades existentes en la red eléctrica y el impacto de las mismas en la calidad del suministro.

Se ha determinado que para minimizar los efectos sobre los equipos sensibles a las caídas de tensión, las medidas de mitigación a adoptarse deben ser implementadas mediante modificaciones internas de la planta.

La etapa siguiente será realizar las acciones pertinentes a introducir los cambios necesarios

dentro de un sistema de “*Rearranque y Reaceleración controlado de motores*”. Dentro de este marco se cuenta con un modelo convalidado del sistema que permite realizar simulaciones confiables y evaluar el comportamiento dinámico del mismo. Con los resultados de las simulaciones se ajustará el sistema de control de desconexión y reconexión secuencial de carga.

Además se seguirá como metodología el análisis de los registros a lo largo del tiempo para evidenciar la efectividad de las medidas adoptadas y detectar los efectos adversos que permitan establecer los cambios necesarios, de modo de lograr una mejora de la fiabilidad y seguridad de la planta.

7. Referencias

1. C. Biteznik, B. Barbieri, P Arnera, M Beroqui, J. Albarrazín. “Análisis de la Calidad del suministro eléctrico de una planta Industrial” XIII ERIAC – CIGRE. Puerto Iguazú, Mayo del 2009.
2. IEC. “Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 2: Environment. Section 1: Description of the environment. Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and in public power supply systems” IEC 61000-2-1. Technical Report (1990).
3. IEEE. “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”. IEEE Std. 1159-1995.