Restablecimiento de sistemas de potencia usando teoría de grafos

Roberto Alonso Urrea Ramírez / XM COMPAÑÍA DE EXPERTOS EN MERCADO
COLOMBIA
raurrea@xm.com.co

III Congreso CIER de la Energía - CONCIER 2007
27 al 30 de noviembre de 2007
Medellín, Colombia

INDICE

1. OBJETIVOS
2. MODELO
3. CONCLUSIONES
4. LECCIONES APRENDIDAS
5. RECOMENDACIONES
6. REFERENCIAS

Resumen: Con la entrada de los mercados de energía a la operación de los sistemas eléctricos de potencia, las redes eléctricas se operan cada vez más cerca de sus límites de estabilidad y cargabilidad, lo que aumenta la probabilidad de ocurrencia de eventos que generen desconexión parcial o total de la demanda, generando gran impacto económico y social para los países.

En consecuencia, cada día cobra más relevancia la pregunta de cómo enfrentar un restablecimiento por lo cual a nivel mundial se están desarrollando diferentes herramientas que pretenden apoyar al personal encargado de la operación de sistemas de potencia en esta difícil tarea.

Al revisar los métodos y modelos empleados a nivel mundial para enfrentar este problema, nos encontramos con que las herramientas propuestas, van desde la realización de un plan o guías de restablecimiento hasta modelos computacionales complejos que recurren a los algoritmos de aprendizaje y evolución, y algunos más sofisticados son complementados con programas que resuelven el problema de reparto de carga, la estabilidad de voltaje, estabilidad dinámica, etc.

En este artículo, se expone un modelo para restablecimiento de sistemas de potencia basado en la teoría de grafos, complementado con un ambiente gráfico y un modelo experto desarrollado mediante un lenguaje de programación clásico.

Para enfrentar un problema de tal magnitud como el del restablecimiento de una red eléctrica es necesario dividirlo en subproblemas específicos a resolver.

El modelo propuesto logra resolver independientemente cada uno de los subproblemas y como producto final presenta la solución integral mediante el relacionamiento de las variables controladas.

1. Objetivos

Presentar una metodología para enfrentar el proceso de restablecimiento, basado en la teoría de grafos y complementado con un modelo experto que controla las restricciones del sistema de potencia.

Ofrecer una metodología que permita reducir los tiempos del restablecimiento, mediante la identificación rápida, clara y fundamentada técnicamente de posibles rutas de energización.

Disminuir la incertidumbre del proceso de restablecimiento mediante el seguimiento de las variables de control del sistema y su impacto en el mismo.

2. Modelo

El modelo propuesto se centra en resolver los siguientes aspectos:

- Preparar el sistema para su restablecimiento
- Determinar rápida y eficientemente las posibles rutas de restablecimiento
- Controlar las variables eléctricas del sistema dentro de rangos seguros.
- Supervisar gráficamente la operación del sistema mediante una identificación rápida del estado de sus elementos y las variables que los gobiernan.

Al implementar un modelo que cumpla las restricciones impuestas anteriormente, se tendrá una solución eficiente al problema del restablecimiento.

El modelo propuesto se concibe inicialmente como una herramienta para entrenamiento de operadores y a largo plazo como una herramienta de apoyo en restablecimiento para tiempo real.

A continuación se desarrollarán cada uno de los módulos que conforman el modelo para Restablecimiento de Sistemas Eléctricos de Potencia (RESEP).

2.1. Preparar el sistema

Si se comprende que de una buena preparación del sistema de potencia depende el éxito del restablecimiento, se hace perentorio realizar previamente una secuencia de tareas que garanticen que realmente se tiene el control del sistema, mediante la administración de la mejor información disponible del mismo. Para lograr este objetivo, el modelo usa un despliegue principal que contiene los pasos mínimos que se deben seguir para garantizar una preparación eficiente y rápida de un sistema de potencia para su restablecimiento.

Basado en la información almacenada en la base de datos, el modelo realiza en conjunto con el usuario un chequeo y validación de cada una de las condiciones necesarias para preparar el restablecimiento, los cuales consisten en:

Identificar la Zona fallada: Se realiza con el fin de definir rápidamente la estrategia de restablecimiento más aplicable (Transmisión, Generación o ambas).

Identificar la causa de la falla: Si se conoce el origen de la falla se reducen las posibilidades de seleccionar rutas que puedan presentar problemas al energizar nuevamente la red.

Informar del evento a los agentes involucrados: Con el fin de disminuir el riesgo de que se presente colapso en las comunicaciones y dar celeridad a la coordinación de las maniobras.

Verificar el estado de los equipos de control automático de voltaje: Como el voltaje se ve afectado directamente por las maniobras de restablecimiento, se deben identificar rápidamente que equipos de este tipo se tienen en la zona de influencia del evento y en lo posible realizar el control manual sobre estos, para evitar acciones indeseadas que pongan en peligro el restablecimiento.

Verificar el estado de los equipos sin tensión: Para tener el control de la red a energizar es necesario garantizar la apertura de todos los equipos que quedaron sin tensión y evitar el riesgo de sobretensiones o daño de equipos al energizar grandes porciones de red.

Actualizar los elementos fallados: Si se actualizan los elementos fallados, se optimiza el tiempo del restablecimiento, excluyendo dichos elementos de las rutas de propuestas.

En la Figura 1 se muestra el despliegue principal para la preparación del sistema.

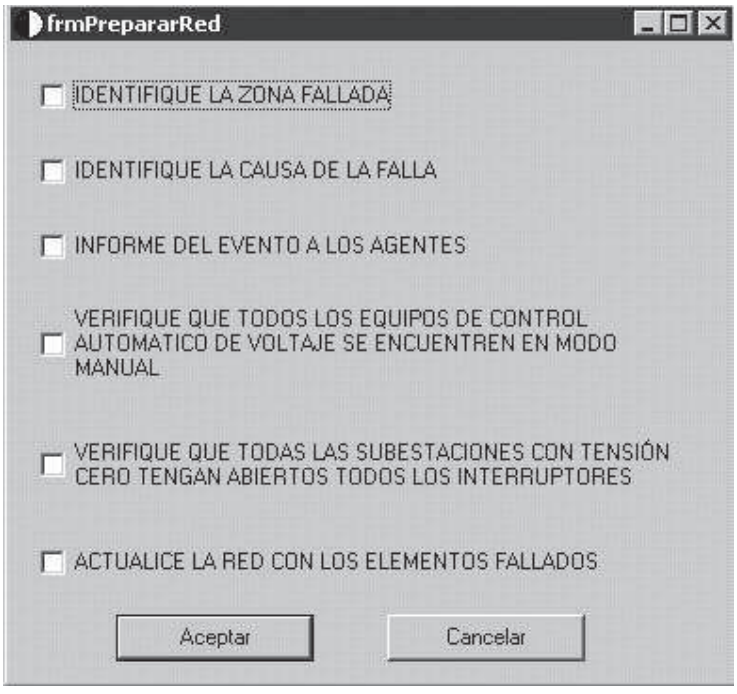

Figura 1. Despliegue Preparar Sistema.

2.2. Determinar rutas de restablecimiento

Después de preparar el sistema de potencia para iniciar el restablecimiento, el principal problema al que se enfrenta el personal encargado de esta tarea, es decidir cuales son las mejores maniobras que se deben realizar para lograr un restablecimiento eficiente y seguro.

Normalmente se cuenta con planes que incluyen las premisas generales y adicionalmente algunos de los posibles escenarios de restablecimiento, pero en la mayoría de los casos no tienen estricta aplicabilidad en la práctica por la misma dinámica de los sistemas y lo aleatorio de las fallas y eventos que se pueden presentar en un sistema de potencia.

Por lo expuesto anteriormente el modelo propuesto cuenta con la flexibilidad necesaria para ofrecer una posible solución a cada escenario que se presente.

Al implementar un modelo basado en la teoría de grafos y no un modelo de aprendizaje y evolución, se facilita la actualización del mismo ante cambios en la topología y restricciones del sistema y por ser un modelo que almacena su conocimiento mediante un arreglo matricial, no requiere de entrenamiento.

Si recordamos que durante un restablecimiento uno de los objetivos a nivel de sistema, consiste en minimizar los problemas de tensión que puedan presentarse, se puede separar el problema en dos objetivos principales que son:

- Minimizar la distancia eléctrica entre los elementos a restablecer, para minimizar el problema del efecto ferranti en la energización de elementos en vacío y este se resuelve con la implementación del algoritmo de caminos mínimos.
- Garantizar la aplicabilidad de la ruta propuesta mediante el control de las restricciones del sistema, lo cual se modela mediante el algoritmo de flujo de carga y la implementación de un modelo experto que incluye un árbol de decisión que permite el control de las variables eléctricas del sistema de potencia (voltaje, frecuencia y cargabilidad de equipos).

La obtención de una ruta de restablecimiento, rápida y basada en un criterio técnico, reduce el tiempo que dura el restablecimiento.

La estrategia consiste en modelar el sistema de potencia mediante una matriz de impedancias, que es actualizada con los estados de los elementos del sistema; y a través de la ejecución del algoritmo de Caminos Mínimos (Teoría de Grafos), se encuentra la mejor ruta entre el nodo a restablecer y los nodos ya restablecidos del sistema de potencia.

La ecuación (1) determina el criterio de optimización del algoritmo.

$$DISTMIN = \min \sum_{\substack{j=1 \\ i=1}}^{n} Zij \qquad (1)$$

Donde:

n: Es el número de barras entre el nodo fuente y el nodo objetivo.

Zij: Es la impedancia entre las nodos a conectar.

La ruta óptima, será la ruta que presente menor distancia eléctrica, y por lo tanto, menor incremento de voltios/kilómetro, minimizando el efecto ferranti de las líneas, logrando controlar el problema de la sobretensión en los terminales remotos de las líneas energizadas en vacío. En la Figura 2 se muestra la interfaz para obtención de rutas de restablecimiento.

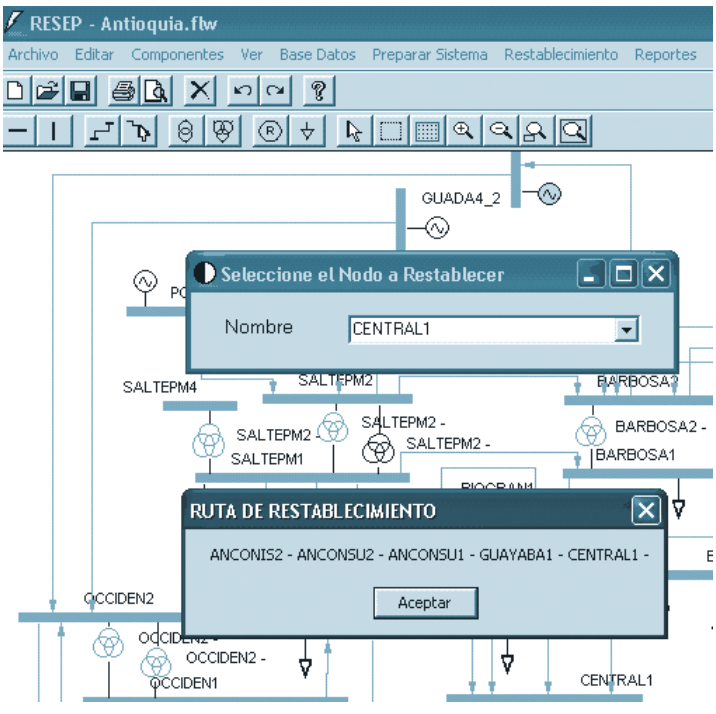

Figura 2. Selección de Rutas de Restablecimiento.

2.3. Controlar restricciones

Para garantizar el cumplimiento de las restricciones eléctricas del sistema, la estrategia de restablecimiento se complementa con el algoritmo de reparto de carga, que permite realizar el seguimiento a las maniobras propuestas por el algoritmo de Caminos Mínimos (Teoría de grafos).

Para tener control sobre las restricciones del sistema de potencia, los resultados del algoritmo de flujo de cargas se usan como entrada de un módulo que evalúa y controla las restricciones impuestas al sistema de potencia para garantizar un restablecimiento seguro.

Una vez definidos los criterios de seguridad que se deben cumplir durante el restablecimiento, se ingresan al modelo experto como restricciones, para que sean verificados en cada paso del proceso.

Las mínimas restricciones que se modelan son:

- Control de Voltaje
- Control de Frecuencia (Margen de Potencia Activa)
- Cargabilidad de Equipos

El modelo experto Evaluador y Controlador del proceso de restablecimiento, advierte en cada paso del proceso de restablecimiento sobre la violación de alguna de las restricciones impuestas y recomienda al operador acciones tendientes a solucionar la violación de la restricción comprometida.

Para el caso de equipos que estén cerca de superar las restricciones de cargabilidad, se usa el mismo algoritmo de Caminos Mínimos, pero en este caso el objetivo del algoritmo, será buscar el camino de mínima impedancia, que drene la mayor cantidad de corriente del elemento, hacia el nuevo elemento a conectar al sistema (Divisor de corriente).

Para el caso en el que el voltaje este en rangos que se consideren riesgosos para la operación del sistema, el modelo mediante el algoritmo de caminos adaptado, identifica cuales son el transformador y el generador eléctricamente más cercanos al nodo problema y los recomienda como soluciones para el control de dicho voltaje.

Siempre se tendrá la opción de que la herramienta proponga una solución al problema de cargabilidad o control de tensión presentado, sin embargo la experiencia del operador sigue siendo un factor determinante al momento de tomar o desechar las acciones propuestas, ya que no es conveniente delegar ciegamente el proceso a un modelo matemático que tiene un margen de actuación limitado por su información de entrada.

La integración de los algoritmos mencionados anteriormente, logran que el proceso de restablecimiento sea seguro, eficiente y flexible, y al mismo tiempo, minimiza el riesgo de pérdidas adicionales de red, por actuación de las protecciones del sistema, mejorando drásticamente el tiempo de restablecimiento, lo que a su vez conlleva a disminuir el impacto económico que un apagón genera sobre el sistema productivo de un país.

Adicionalmente se incluye un módulo de verificación del estado de la red, en el cual el operador encuentra todas las líneas y transformadores, que luego de realizadas las maniobras para recuperar las barras de carga y de generación del sistema, continúan fuera de servicio y disponibles, para garantizar la recuperación total del sistema, mejorando la confiabilidad del sistema ante posibles fallas que puedan presentarse en el transcurso o al final del restablecimiento.En la Figura 3 se muestra el interfaz para verificación del estado de la red.

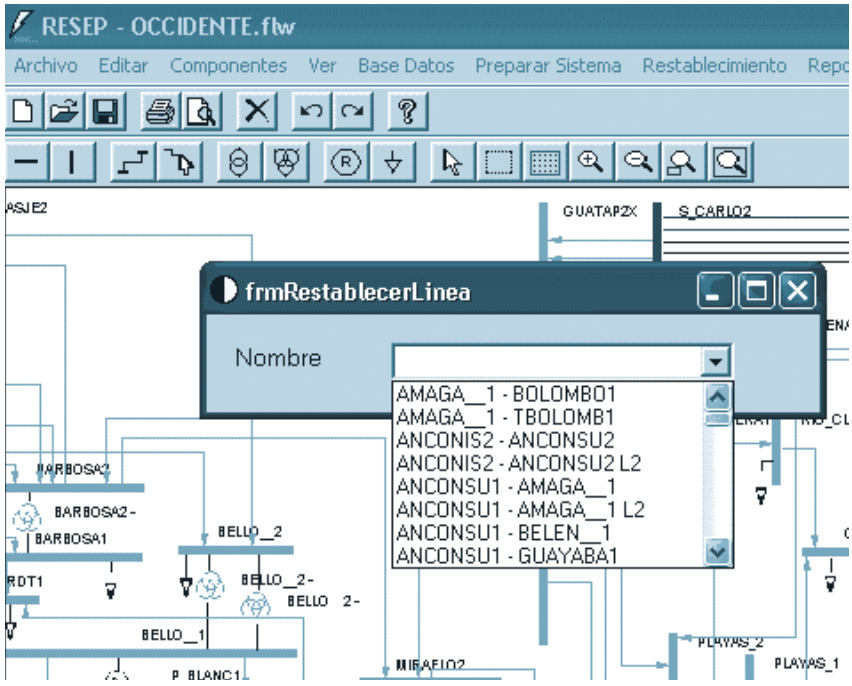

Figura 3. Verificación del Estado de la Red.

2.4. Supervisar gráficamente

Es claro que para lograr realizar la supervisón, operación y control eficiente de un sistema de potencia es necesario contar con ambientes gráficos, que faciliten y agilicen la identificación de problemas y la toma de decisiones, por lo que para el modelo de restablecimiento propuesto se creo una interfaz gráfica.

La interfaz gráfica implementada pretende desplegar visualmente la mejor información disponible y necesaria para realizar el restablecimiento de un sistema de potencia, para lo cual se mencionaran sus principales facilidades:

- Se identifican rápidamente los elementos, conectados, desconectados e indisponibles.
- Se identifican fácilmente las plantas conectadas y desconectadas con y sin capacidad de arranque autónomo (Black Start), agilizando el inicio del restablecimiento.
- Se visualizan rápidamente los elementos con violación de restricciones de voltaje y cargabilidad.
- Se visualizan sobre la red las rutas de restablecimiento sugeridas.

En la Figura 4 se muestra la interfaz gráfica desarrollada.

3. Conclusiones

El modelo propuesto usa un método práctico y novedoso, que utiliza el algoritmo de Caminos Mínimos para solucionar tanto el problema del restablecimiento, como el de violaciones a las variables de control (tensión, frecuencia y cargabilidad).

Con la implementación de las restricciones del sistema de potencia a partir de los resultados del algoritmo de reparto de carga, se logra que el proceso de restablecimiento sea seguro y se validan eléctricamente las rutas propuestas por el algoritmo de Caminos Mínimos.

El modelo propuesto, logra resolver el problema de restablecimiento desde una óptica diferente a la convencional, por lo que se propone como una herramienta de apoyo y entrenamiento de operadores en restablecimiento de Sistemas de Potencia.

Contar con una opción de energización rápida, basada en un criterio técnico sustentable le da más confianza y celeridad al proceso de restablecimiento.

Con el seguimiento paso a paso de las variables de control durante el restablecimiento, mediante la evaluación de las restricciones del sistema de potencia, se garantiza la continuidad y seguridad del proceso.

Un modelo que no solo advierte sobre violaciones a las restricciones impuestas, sino que propone soluciones realmente agrega valor y genera conocimiento sobre el sistema de potencia.

Si se entiende que el modelo propuesto se usa inicialmente como herramienta de entrenamiento de operadores, al realizar la selección y ejecución paso a paso de cada ruta propuesta, permite ser flexibles ante la aparición de problemas operativos, como el hallazgo de elementos fallados durante el proceso, encontrando nuevas rutas de restablecimiento a partir del nuevo punto de operación.

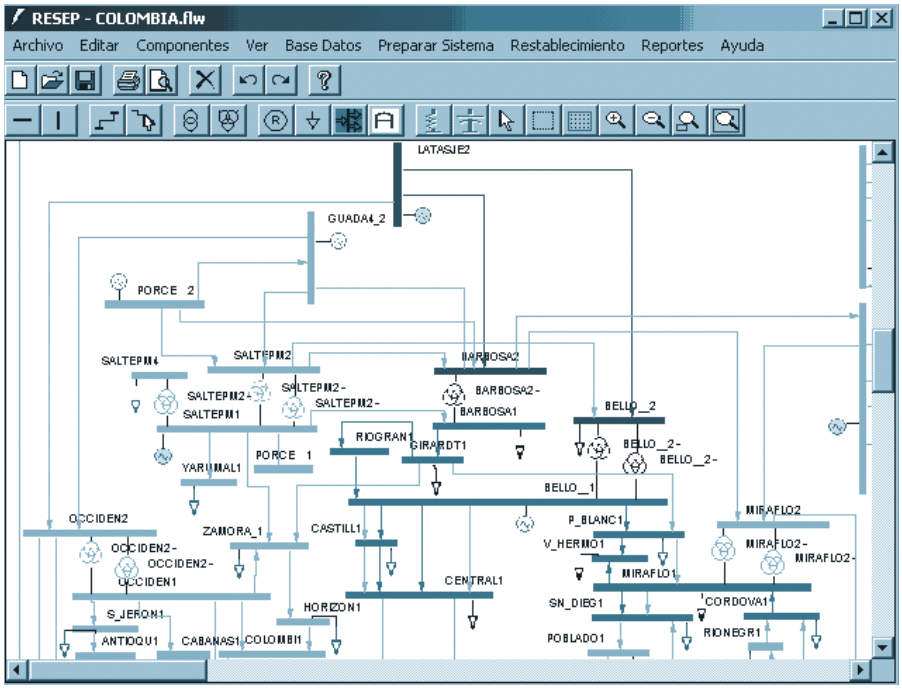

Figura 4. Interfaz Gráfica.

4. Lecciones aprendidas

La operación de sistemas de potencia requiere de algoritmos rápidos, flexibles y dinámicos que enfrenten problemas como el del restablecimiento desde el punto de vista práctico, para garantizar su aplicabilidad.

Existen premisas generales que aplican a cualquier evento del sistema de potencia y que son de obligatorio cumplimiento, para asegurar que el proceso de restablecimiento sea eficiente y seguro.

La variable a optimizar es tiempo, pero se deben garantizar las condiciones de seguridad, calidad, confiabilidad, flexibilidad y economía, lo cual se logra al tener celeridad en la toma de decisiones, disminuyendo la incertidumbre sobre el impacto que estas decisiones puedan tener en las variables de control del sistema de potencia.

El proceso de restablecimiento parte de la siguiente premisa general que siempre debe estar presente; tenga un Plan de referencia, pero sea flexible y este preparado para cambiar el plan con criterio, manteniendo las restricciones de calidad, confiabilidad, seguridad y economía.

Si se dota al personal encargado del proceso de restablecimiento de las herramientas y los conocimientos suficientes y necesarios para actuar con rapidez y seguridad, se evitan reprocesos que alarguen los tiempos del restablecimiento.

La herramienta propuesta responde a todas estas necesidades que se tienen como lecciones aprendidas y se presenta como un modelo experto que siempre ofrece soluciones a los problemas que se puedan presentar durante un restablecimiento.

Esta herramienta es un prototipo que se encuentra en periodo de prueba dentro de la empresa XM COMPAÑÍA DE EXPERTOS EN MERCADOS.

Como resultado de estas pruebas se encontró que al restablecer una determinada área eléctrica con el apoyo de la herramienta propuesta, el operador adquiere más confianza y un mejor desempeño durante el proceso, minimizando su tiempo de respuesta y realizando un control más efectivo de las variables eléctricas, lo que implica un restablecimiento más seguro, flexible y efectivo.

5. Recomendaciones

Incluir la herramienta propuesta dentro de los planes de entrenamiento de operadores.

Integrar el modelo experto en restablecimiento (RESEP) con herramientas de simulación de sistemas de potencia como Dispatcher Training Simulators, para permitir el apoyo en “línea”, agilizar la toma de decisiones y reducir el riesgo de ejecución de maniobras ineficientes que puedan acarrear reprocesos y así lograr reducir drásticamente los tiempos del restablecimiento.

Como el modelo de restablecimiento genera automáticamente un reporte con la información de las maniobras realizadas, las restricciones violadas y las recomendaciones propuestas durante el proceso de restablecimiento, se puede tomar esta información para realizar una evaluación objetiva del desempeño tanto de la herramienta como del personal objeto de entrenamiento.

Seguir trabajando en la implementación de módulos adicionales de estabilidad dinámica, estabilidad de voltaje y corto circuito, que redunden en reducir la incertidumbre de las maniobras realizadas y brinden información adicional que mejore la seguridad y confiabilidad del proceso.

6. Referencias

[1] FLORES , Roberto. Algoritmos, estructuras de datos y programación orientada a objetos. Medellín: Ecoe Ediciones,1998..

2] STEVENSON, William D. Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia. Mexico: Mc Graw Hill, 1979

[3] Chowdhury N. – Zhou B. An Intelligent Training Agent for Power System Restoration. Power System Research Group. University of Saskatchewan, Saskatoon Canada. IEEE 1998.

[4] Huang J.A. – Galiana F.D. – Vuong G.T. Power System Restoration Incorporating Interactive Graphics and Optimization. MacGill University and Hydro-Québec. Montreal Canada. IEEE 1991.

[5] Huang J.A. – Audette L. – Harrison S. A Systematic Method For Power System Restoration Planning. IEEE Transaction on Power System. May 1995.

[6] Islam S. – Chowdhury N. A Case-Based Expert System for Power System Restoration. Power System Research Group. University of Saskatchewan, Saskatoon Canada. IEEE May 1999.

[7] Kirschen, Daniel S. – Volkmann Terry L. Guiding a Power System Restoration whit an Expert System. IEEE Transactions on Power Systems. May 1991.

[8] Nagata T. – Sasaki H. – Yokoyama R. Power System Restoration by Joint Usage of Expert System and Mathematical Programming Approach. IEEE Transaction on Power System. August 1995.

[9] Analytical Tools for Power System Restoration – Coceptual Design F.F. Wu et al., (IEEE Transactions on Power Systems, February 1988).