Ingeniería y Ciencia, ISSN 1794-9165
Volumen 2, número 3, páginas 39-50, marzo de 2006

Método heurístico para restauración del servicio en sistemas de distribución de energía eléctrica

César Arango Lemoine[1], Jesús María López Lezama[2] y
Mónica Alejandra González Londoño[3]

Recepción: 25 de julio de 2005 — Aceptación: 15 de noviembre de 2005
Se aceptan comentarios y/o discusiones al artículo

Resumen

Cuando ocurre una falla en un sistema de distribución de energía eléctrica de topología radial, el aislamiento de la sección donde ocurrió la falla provoca el aislamiento de algunas porciones del alimentador aguas abajo del área fallada, por lo tanto, el paso a seguir debe ser restaurar el servicio a los usuarios afectados. Dicha restauración debe hacerse tan rápido como sea posible, teniendo en cuenta restricciones de topología del sistema y capacidad de los alimentadores. En este artículo se presenta un método heurístico que permite la restauración del servicio mediante la reconfiguración de alimentadores. Se presentan los resultados para un sistema de distribución de 11 barras y tres alimentadores principales.

Palabras claves: restauración del servicio, reconfiguración de alimentadores, optimización en sistemas de distribución, confiabilidad de sistemas de distribución.

[1] Especialista en Sistemas de Distribución, carango@nevado.manizales.unal.edu.co, Director del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación, Universidad Nacional de Colombia–Sede Manizales.

[2] Ingeniero Electricista, candidato a Magíster en Ingeniería Eléctrica, jesusmarialopezl@yahoo.com, docente temporal, Universidad Nacional de Colombia–Sede Manizales.

[3] Ingeniera Electricista, monialeja119@hotmail.com, Universidad Nacional de Colombia–Sede Manizales.

Abstract
When there is an outage in a radial electrical distribution system, the isolation of the faulted section will result in the isolation of some portions of the feeder downstream from the affected area. Therefore, the next step will be to restore the service to the affected users. This restoration must be done as quickly as possible considering topology and feeder capacity restrictions. This paper describes an algorithm for service restoration via feeder reconfiguration. Results are shown under a distribution system with 11 buses and 3 main feeders.

Key words: service restoration, feeder reconfiguration, optimization of distribution systems, reliability of distribution systems.

1 Introducción

El tema de reconfiguración de circuitos fue propuesto por primera vez por Merlín y Back en 1975, cuando se proponen como función objetivo la minimización de pérdidas de potencia sin incluir restricciones operativas. Posteriormente, en los años 1988 y 1990, se utilizan las técnicas heurísticas para resolver el problema.

A partir de 1990 aparecen nuevas técnicas de reconfiguración de circuitos, basadas en programación lineal, enfriamiento simulado y algoritmos genéticos. Dichas técnicas plantean básicamente como función objetivo, la minimización de pérdidas de potencia considerando las restricciones operativas de la red [1]. En los últimos años, la reconfiguración de circuitos para restauración del servicio ha cobrado gran importancia, ya que el actual esquema de competitividad en el sector eléctrico exige a las empresas distribuidoras de energía, operar los sistemas con criterios técnicos de confiabilidad y seguridad apropiados, para garantizar la calidad del servicio a sus clientes.

Una característica importante de los nuevos mercados de energía eléctrica es la búsqueda de la eficiencia, tanto en la gestión administrativa como en la técnica. Por esto, las empresas del sector están incentivadas a promover la calidad del servicio que prestan y a realizar su función de la manera más eficiente posible. La eficiencia técnica de una red se asocia, no sólo con el nivel de pérdidas existentes sino también con la confiabilidad del suministro; en este último aspecto la restauración de servicio juega un papel muy importante. Tal importancia ha sido reconocida por autores y por grupos de investigación de

diversas instituciones [2][3][4]. Cuando ocurre una contingencia en un sistema de distribución, la práctica común es aislar el área afectada abriendo todos los interruptores adyacentes. Para los sistemas de distribución radiales, esta operación hace que los usuarios aguas abajo del alimentador afectado queden sin servicio; por lo tanto el próximo paso a seguir debe ser restaurar el servicio a las ramas afectadas, mediante la reconfiguración de alimentadores (apertura o cierre de interruptores). Dicha restauración se debe hacer tan rápido como sea posible, teniendo en cuenta restricciones de topología del sistema y capacidad en los alimentadores [5].

2 Definición del problema

Los sistemas eléctricos de distribución de media tensión normalmente son redes de tipo radial. En casos como la ocurrencia de una falla o la salida de operación de una parte del sistema por mantenimiento, existe la posibilidad de alimentar un tramo del alimentador desde distintos puntos, a través de la operación abierto/cerrado de interruptores. Cuando ocurre una falla en un sistema de distribución se establecen dos zonas: la zona fallada y la zona afectada, siendo la primera un tramo o nodo del sistema donde ha sucedido la contingencia, y la segunda, la región que queda aislada (sin servicio) debido a la falla. En este caso, es necesario llevar a cabo un proceso por medio del cual se restaure el servicio a tantos usuarios como sea posible.

La restauración puede ser considerada como un problema de asignación, donde se plantea la transferencia de cargas del área afectada a alimentadores adyacentes por medio de interruptores fronterizos. Una vez localizada y aislada la falla, se formula una serie de conmutaciones de los interruptores de la red, de modo que el mayor número posible de usuarios afectados pueda ser de nuevo atendido mientras se soluciona la contingencia y se regresa a la topología inicial. Si bien existen diferentes métodos para la restauración del servicio, la mayoría de estos hacen énfasis en el tiempo de restauración y/o en la minimización del número de conmutaciones. En el presente trabajo se plantea un algoritmo que permite restaurar el servicio, no sólo teniendo en cuenta los aspectos anteriores sino, también, tratando de mejorar a su vez las condiciones operativas de la red.

3 Algoritmo de restauración del servicio

Cuando ocurre una contingencia en un sistema de distribución, lo primero en hacerse es aislar la falla. Una vez aislada, se identifica la zona afectada y se restaura el servicio a los usuarios comprometidos. La restauración se debe hacer de forma tal que el nuevo sistema conserve la topología radial y cumpla con restricciones de capacidad de los alimentadores. Para la restauración del servicio y posterior reconfiguración del sistema, se ha usado una búsqueda heurística. Las búsquedas heurísticas son aquellas en las que se tiene un dato adicional que permite al algoritmo llegar a la solución con más rapidez. A este dato adicional se le denomina heurístico. El heurístico que se ha utilizado en este caso es la caída de tensión en los nodos finales de las trayectorias. Al usar un heurístico se aumenta la eficiencia del proceso de búsqueda; en ocasiones puede causar que una ruta sea pasada por alto, pero en promedio mejora la calidad de las rutas que exploran.

El algoritmo para restauración y reconfiguración consta de los siguientes pasos:

- **Paso 1.** Dado un sistema de distribución radial, se ingresa una falla al sistema en cualquier tramo o nodo de la red.
- **Paso 2.** Se aisla la falla mediante la apertura de interruptores adyacentes.
- **Paso 3.** Se identifican los nodos que han quedado sin servicio debido a la contingencia.
- **Paso 4.** Se crea una lista de nodos adyacentes a los que han quedado sin servicio. Estos nodos son candidatos a recibir la carga de la zona afectada. El mejor candidato a recibir carga es aquel que tenga mayor tensión, siempre y cuando el alimentador al que pertenezca tenga suficiente capacidad de reserva.
- **Paso 5.** Se hace la conmutación restaurando el servicio a los nodos afectados. Se corren los flujos de carga y se calcula la función objetivo. En este punto se ha cumplido con la primera parte del algoritmo, que es la restauración del servicio.

- **Paso 6.** Se inicia el proceso de reconfiguración. Es probable que el alimentador que ha recibido carga se encuentre muy cerca de sus límites de cargabilidad o que alguno de sus nodos presente una tensión demasiado baja. Lo que se hace es tratar de balancear la carga entre los otros alimentadores, para ello se hace una lista de nodos finales de cada alimentador y se selecciona el nodo final que tenga menor tensión (este será el candidato a entregar carga).

- **Paso 7.** Para ese nodo se identifican los nodos adyacentes. Estos se ordenan, según su tensión, de mayor a menor. De nuevo, el nodo candidato a recibir carga es aquel que presente la mayor tensión.

- **Paso 8.** Se realiza la conmutación (el nodo de menor tensión de la red entrega su carga al nodo adyacente de mayor tensión).

- **Paso 9.** Se evalúa la función objetivo. Si ésta ha mejorado, se vuelve al paso 6, de lo contrario se borra de la lista el nodo candidato y se repite el proceso con el siguiente nodo de mayor tensión. El proceso se repite con todos los nodos finales y sus respectivos nodos adyacentes, hasta que no existan más nodos adyacentes en las listas o hasta que no se pueda mejorar más la función objetivo.

Para realizar el proceso de reconfiguración, se elaboró un programa en Visual Studio. Éste permite al usuario ingresar el sistema de distribución, ubicar una falla en cualquiera de sus nodos, correr flujos de carga, restaurar y reconfigurar.

El tiempo que toma la búsqueda heurística para encontrar una solución depende de la complejidad del sistema, ya que a mayor número de nodos se requiere un mayor número de iteraciones. En sistemas con más de 50 barras, el algoritmo puede tardar hasta cinco minutos en realizar el proceso de restauración y reconfiguración. Debido a limitaciones de la interfaz es difícil ingresar sistemas con más de 80 barras; a este nivel el tiempo requerido por el algoritmo para encontrar una solución óptima es aún mayor (hasta 15 minutos).

Dada la naturaleza del algoritmo, es posible que se llegue a un mínimo local, ya que el criterio a seguir es que la próxima configuración sea mejor que la anterior (no se permiten empeoramientos en la función objetivo); de esta forma se selecciona una ruta en la cual, en cada iteración la función objetivo

mejora. Si en una de las iteraciones la función objetivo no mejora, entonces el algoritmo regresa a la iteración anterior y busca una nueva ruta que reduzca la función objetivo. Puede ocurrir que en una iteración no se obtenga ninguna reducción en la función objetivo, pero siguiendo esta ruta en la próxima iteración se llegue al mínimo global; en este caso la búsqueda heurística no lo encontraría. Es de aclarar, sin embargo, que el objetivo principal de este trabajo no es mejorar el estado de operación de la red (lo que efectivamente se hace con la reconfiguración), sino restaurar el servicio a los usuarios afectados después de una falla, lo cual es lo primero que hace el algoritmo. Es probable que después de la restauración del sistema no sea posible reconfigurarlo, por ausencia de líneas de enlace con alimentadores adyacentes, o falta de capacidad de reserva de los alimentadores adyacentes. Debido a esta situación, el algoritmo se diseñó para verificar las capacidades de los alimentadores que recibirán carga antes de realizar la restauración. De este modo se garantiza que no se presenten fallas en cascada causadas por sobrecargas en los alimentadores que reciben nuevos usuarios.

4 Modelo matemático de la función objetivo

La función objetivo es de la forma

$$FO = \quad k_1 A + k_2 B + k_3 C\,, \tag{1}$$

donde cada una de las variables (A, B, C) representa un parámetro de la red. A cada uno de estos valores se le asigna un factor de peso (k_1, k_2, k_3) y luego se suman, obteniendo un valor que representa el estado de la red. El objetivo es minimizar la función, y para tal fin se pueden aplicar diferentes criterios de optimización [6]. Parte de la formulación matemática para la función objetivo se ha tomado del trabajo desarrollado en [7].

1. **Minimización de pérdidas de potencia**

   Las pérdidas de potencia se pueden escribir como

$$A = \left(\sum_{i=1}^{nt} Ii^2 * Ri \right) /(Psub)\,,$$

donde:

nt: número de tramos

$Psub$: potencia activa que entrega la subestación

Ri: resistencia del tramo i

Ii: corriente en el tramo i.

2. **Mejoramiento del perfil de tensiones**

$$B = \sum_{i=1}^{nf} |1 - Vif| ,$$

donde:

Vif : tensión del i-ésimo nodo final por unidad,

nf: número de nodos finales.

3. **Balanceo de carga entre alimentadores**

$$C = \sum_{j=1}^{nj} |H_j - Q| ,$$

$$Q = \frac{\sum_{j=1}^{nj} Pej}{\sum_{j=1}^{nj} Pnj} ,$$

$$H_j = \frac{Pej}{Pnj} ,$$

donde:

nj: número de alimentadores principales

Pej: potencia entregada por el alimentador j

Pnj : potencia nominal del alimentador j.

Los factores de peso k_1, k_2 y k_3, mostrados en (1), se usan para darle prioridad al mejoramiento de un parámetro específico de la red; es decir, si

el usuario del programa no está interesado en la reducción de pérdidas de potencia, puede asociar a este parámetro un factor de peso igual a cero, o mucho más pequeño que el asociado a los parámetros restantes. Si se desea hacer una reconfiguración del sistema teniendo en cuenta los tres parámetros descritos, entonces se deben usar factores de peso, tales que los órdenes de magnitud de los tres sumandos de (1) sean iguales.

5 Ejemplo de aplicación

Una red de distribución como la que se muestra en la figura (1), se compone fundamentalmente de una subestación, líneas de distribución, barras o nodos de carga e interruptores. Las líneas que permanecen abiertas se denominan líneas de enlace; cada línea de enlace se encuentra entre dos nodos.

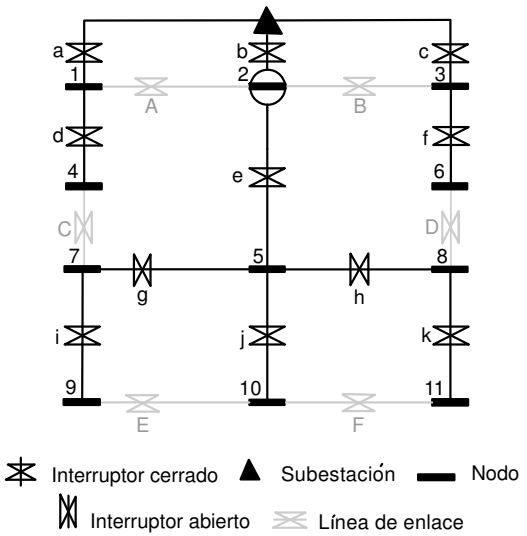

Figura 1: Sistema de distribución de 11 barras en el cual se ha ingresado una falla en el nodo 2

Los datos del sistema de distribución de 11 barras mostrados en la figura (1), son los siguientes:

- Potencia entregada por la subestación: 4000 kV

- Factor de potencia: 0,85 inductivo
- Tensión en la subestación: 13,2 kV
- Usuarios: 60 usuarios (nodos 1,3,4,6,8); 30 usuarios(nodos 2,5,7,9,10,11)
- Conductor: 1/0 AWG
- Impedancia del conductor: 6,0459E-4 + j3,3765E-4 $Ohmios/m$
- Longitudes: 600 m (líneas a,c,e); 300 m (líneas restantes).

Para los flujos de potencia se han hecho cálculos por unidad, usando como bases 4000 kVA y 13,2 kV.

Para el sistema de distribución de la figura (1), se ha ingresado la falla en el nodo 2, representada como un círculo alrededor del nodo comprometido. Una vez se ha ingresado la falla, ésta se debe aislar, como se muestra en la figura (2); para ello se abren los interruptores de las líneas b y e. Al hacer esto, los nodos $5, 7, 8, 9, 10$ y 11 quedan sin servicio (sección (3), pasos 1 a 3). El siguiente paso es restaurar el servicio a los nodos afectados. Para ello se corre un flujo de carga, se identifica el nodo a recibir carga (el de mayor tensión) y se conmuta, como se muestra en la figura (3) (sección (3), pasos 4 y 5). Una vez el sistema ha sido restaurado, se calcula la función objetivo, cuyos valores se muestran en la tabla (1).

Tabla 1: Valor de la función objetivo antes de reconfigurar

Variable	**Valor**	**Factor de peso**	**Nuevo valor**
Pérdidas de potencia	3,76E-3	1000	3,76
Perfil de tensión	0,255	10	2,55
Balanceo de carga	0,465	10	4,65
Total	-	-	10,96

En la figura (3) se puede observar que todos los nodos restaurados están siendo atendidos por el mismo alimentador. El siguiente paso es reconfigurar el sistema para balancear la carga entre los alimentadores, mejorar el perfil de tensiones y disminuir las pérdidas (sección (3), pasos 6 a 9).

En la figura (4) se muestra el sistema después de la reconfiguración. Se puede observar que los usuarios de los nodos 8 y 11 ahora son atendidos por

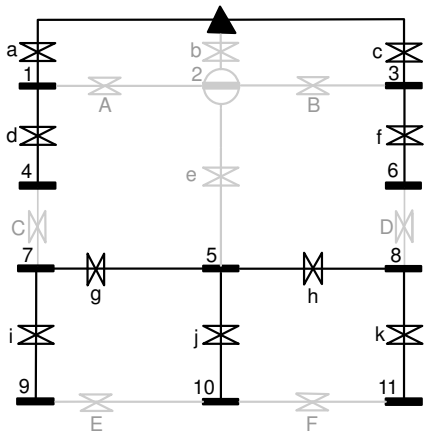

Figura 2: Sistema de distribución en el que se ha aislado el nodo 2, abriendo los interruptores de las líneas b y e

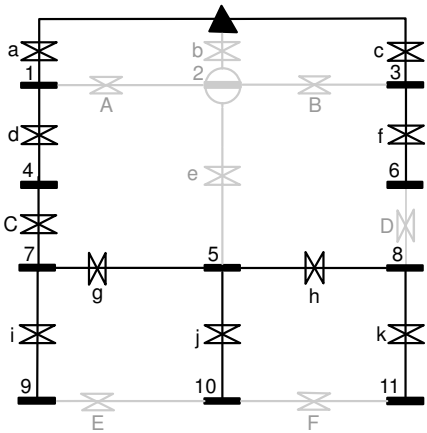

Figura 3: Sistema restaurado mediante la línea de enlace c (conmutando los nodos 4 y 7)

otro alimentador, mejorando de esta forma el balanceo de carga entre alimentadores. El valor de la función objetivo para el sistema reconfigurado se muestra en la tabla (2). En este caso, la reconfiguración también ha contribuido a la reducción de pérdidas y al mejoramiento del perfil de tensiones.

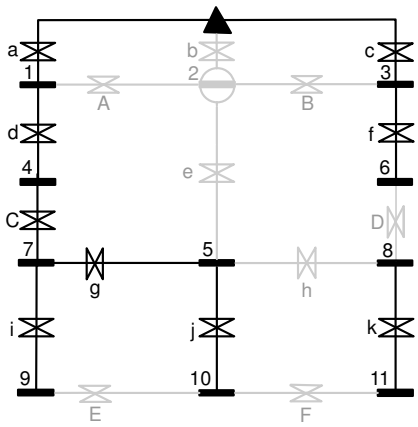

Figura 4: Sistema reconfigurado

Tabla 2: Valor de la función objetivo después de reconfigurar

Variable	Valor actual	Factor de peso	Nuevo valor
Pérdidas de potencia	3,15E-3	1000	3,15
Perfil de tensión	0,239	10	2,39
Balanceo de carga	0,398	10	3,98
Total	-	-	9,52

6 Conclusiones y recomendaciones

El producto de este trabajo fue el desarrollo y la implementación computacional de un algoritmo que permite la restauración del servicio en sistemas de distribución de topologías radiales. Dada una falla en el sistema de distribución, el algoritmo ha mostrado que cumple de forma eficiente con la restauración y posterior reconfiguración de la red. Dado que se implementó un método heurístico para la reconfiguración, se ha garantizado un buen desempeño del algoritmo en cuanto a complejidad espacial, ya que no se necesita de mucha memoria computacional para analizar sistemas de distribución de gran tamaño. Para cada iteración, el algoritmo sólo necesita tener la información de la configuración inmediatamente anterior y no de todas las posibles configuraciones de la red, como ocurriría en una búsqueda sin contar con información (sin un heurístico).

Se debe ser asertivo en la selección de los factores de peso, ya que estos juegan un papel determinante en el valor de la función objetivo, y por lo tanto en el proceso de reconfiguración como tal. Se recomienda utilizar factores de peso similares a los que se utilizaron en los ejemplos de este trabajo. Para una buena escogencia de los factores de peso, se deben tener en cuenta el orden de magnitud de las variables a optimizar y su rango de variación; nótese por ejemplo que el índice que mide el balanceo de carga entre alimentadores puede variar de un número x (usualmente menor que 10) hasta cero, mientras que otros índices, como el de pérdidas de potencia o mejoramiento del perfil de tensiones, nunca tendrán un valor igual a cero. En las tablas (1) y (2) se puede observar que se han usado factores de peso, tales que los órdenes de magnitud de las variables de la función objetivo sean iguales.

Referencias

[1] R. Grandobles, J. F. Díaz, G. Caicedo. *Estado del arte en reconfiguración de sistemas de distribución*, Energía y Computación, **10**(1), 50-58 (2001).

[2] D. Shirmohammadi. *Service Restoration in Distribution Networks via Network Reconfiguration*, Pacific Gas and Electric Company, San Francisco, California, 952-957 (1991).

[3] A. L. Morel y A. Monticelli. *Heuristic Search Approach to Distribution System Restoration*, IEEE Transactions on Power Delivery, **4**(4), 2235-2241 (1989).

[4] Chen Ching Liu y Seung Jae Lee. *An Expert Systen Operational Aid for Aid for Restoration and Loss Reductions of Distribution Systems*, IEEE Transactions on Power Systems, **3**(2), 619-627 (1998).

[5] Yuan Yih y Han Shing Kuo. *A Heuristic Based Fuzzy Reasoning Approach for Distribution Systems Service Restoration*, IEEE Transactions on Power Delivery, **9**(2), 949-953 (1994).

[6] J. M. López Lezama. *Reconfiguración de Alimentadores en Circuitos de Topologías Radiales mediante una Función Multiobjetivo*, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, 2001.

[7] I. Roytelman, V. Melnik, S. S. H. Lee y R. L. Lugtu. *Multiobjective Feeder Reconfiguration by Distribution Management System*, IEEE Transactions on Power Systems, **11**(2), 1996.