



Ubicación óptima de los desconectivos en la red de 33 kV de la provincia Santiago de Cuba

Javier E. de la Fé
Rafael M. Robert
Sergio de la Fé

Recibido: Octubre del 2004
Aprobado: Diciembre del 2004

Resumen / Abstract

Se determinan los puntos de ubicación óptima de los desconectivos de la red de 33 kV de la provincia de Santiago de Cuba, aplicando una variante del método de la numeración exhaustiva. Se analiza la metodología para la ubicación óptima de los desconectivos en las redes eléctricas como una de las vías para mejorar la fiabilidad de las mismas. Se aplica la metodología y se realiza el análisis económico de todas las variantes escogiéndose la más adecuada para cada uno de los circuitos.

Palabras clave: fiabilidad, redes de distribución

The paper is dedicated to the determination of the optimal location of the switch of the net of 33 kV of Santiago's county, applying a variant of the method of the exhaustive numeration. The methodology for the optimal location of the switch in the electric nets is analysed like one of the methods of improving the reliability of the circuits; by means of the methodology the location of the switch is obtained; is carried out the economic analysis of all the variants and the most appropriate is chosen for each one of the circuits.

Key words: reliability, distribution network

INTRODUCCIÓN

Para el planeamiento y operación de los sistemas de potencia de la forma más económica y fiable es necesario contar con el número y la localización adecuada de los desconectivos de línea que permitan seccionar los tramos, ya sea por fallas, por operaciones o por mantenimiento, de manera que la afectación se extienda al menor número de consumidores; por tanto, el problema consiste en encontrar la cantidad de desconectivos y las combinaciones de ubicación de los mismos, que ocasione el mínimo daño; para lo cual es necesario conocer la tasa de interrupción de los circuitos, el tiempo promedio de afectación, el tipo de consumidor (residencial, no residencial, mixto, etcétera), así como la demanda media de los mismos.

En las últimas décadas con el desarrollo de las técnicas de computación han aparecido nuevos métodos para mejorar la fiabilidad de las redes eléctricas. El método de la ubicación óptima de los desconectivos en las redes, es uno de ellos y se basa en la selección de los lugares adecuados donde se puedan ubicar los desconectivos, de manera tal, que en caso de avería el daño por la energía dejada de suministrar sea mínimo.

DESARROLLO

Planteamiento del problema

Si se considera un circuito con n posibles localizaciones donde los desconectivos pueden ser instalados, para un número fijo de desconectivos

existen varios conjuntos de localizaciones. Para cada número de desconectivos el número total de conjuntos de localizaciones es:

$$Ncl = \frac{N!}{l!(N-l)!} \quad \dots(1)$$

donde:

l : Número de desconectivos.

N : Número posible de localizaciones de los desconectivos.

Si se analiza para $l = 1, 2, \dots, N$ desconectivos se genera entonces el número total de posibles combinaciones, es decir:

$$N_{lc} = 2^N + 1$$

Si se consideran los tramos correspondientes entre desconectivos, el costo del daño producido a los consumidores durante las interrupciones en estos tramos puede ser evaluado a partir de:

$$C_{Daño} = \sum_{i=1}^{N+1} P_i \lambda_i L_i T_{pi} C_{ei} \quad \dots(2)$$

donde:

- P_i : Demanda promedio del tramo i (kW).
- λ_i : Tasa de fallo del tramo i (fallas/años.km).
- L_i : longitud del tramo (km).
- T_{pi} : Tiempo promedio de interrupción del tramo i .
- C_{ei} : Costo de la energía interrumpida.

Cuando se evalúan múltiples desconectivos el daño puede ser expresado en forma matricial como:

$$D = LMP \quad \dots(3)$$

donde:

L : Matriz que contiene los índices de fiabilidad de la red.

$$L = [\lambda_{11} T_1 \lambda_{21} T_2 \dots \lambda_{n1} T_n] \quad \dots(4)$$

M es una matriz que acopla los índices de fiabilidad de los tramos con la potencia media de otros tramos y que tiene la siguiente configuración:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & M12 & \cdot & \cdot & M1j & \cdot & \cdot & M1n \\ M21 & 1 & \cdot & \cdot & M2j & \cdot & \cdot & M2n \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ Mj1 & Mj2 & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & Mjn \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ Mn1 & Mn2 & \cdot & \cdot & Mnj & \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix}$$

...(5)

Cuando existen múltiples posibilidades de alimentación: $M_{(i,j)} = M_{(j,i)}$; y cuando el circuito posee alimentación por una sola cabeza entonces $M_{(i,i)} = 1$.

$M_{(i,j)}$ depende de si existe un desconectivo entre los segmentos i y j . Es decir, si al ocurrir una falla en el tramo i no existe desconectivo entre el y el tramo j entonces $M_{(i,j)} = 1$, es decir, la falla en el tramo i produce daño en el tramo en el tramo j .

P es una matriz que contiene el costo específico de la energía para el consumidor promedio del tramo.

$$P = [C_{e1} P_1 \ C_{e2} P_2 \ \cdot \ \cdot \ C_{en} P_n]^T \quad \dots(6)$$

Algoritmo de solución

El análisis muestra que el costo total es una función de los conjuntos de localizaciones con varios mínimos locales.¹ No existe un algoritmo aconsejable para resolver el problema de optimización planteado, por lo que para encontrar la solución del problema se utilizara una técnica de enumeración.

Para aplicar la enumeración completa a este problema el desconectivo en cada localización i es representado por una variable switch S_i la cual toma valor de 1 si existe desconectivo en esas localización y 0 si no existe.

Los conjuntos de localizaciones de los desconectivos pueden ser determinados utilizando los estados de las variables switch en todas las posibles localizaciones. Cada conjunto desconectivo/localización es representado por un número binario, el cual puede ser representado por su número decimal equivalente.

El procedimiento de numeración para determinar la localización de un número fijo de desconectivos, comprende los siguientes pasos:

1. Determinar el número de conjuntos desconectivos / localizaciones para un número fijo de desconectivos.

2. Seleccionar un conjunto de localizaciones de acuerdo con el orden del número decimal en su correspondiente representación binaria lo cual determina el estado del desconectivo en cada localización

3. Realizar un análisis de los costos por conceptos de daños y los costos de inversión de los desconectivos.

4. Determinar el costo mínimo o el valor actual neto (VAN) máximo según sea el procedimiento utilizado.

Repetir los pasos 2, 3 y 4 hasta que todas las localizaciones sean evaluadas y comparadas y el conjunto con el costo total mínimo sea obtenido.

Es aconsejable realizar primero la localización de los desconectivos del tronco y luego aplicar el mismo procedimiento para aquellos ramales largos e importantes que así lo requieran.²

Procedimientos para evaluar los índices de la inversión

El costo mínimo de interrupciones (daño) correspondiente a la localización óptima de los desconectivos decrece no linealmente y los costos de inversión, mantenimiento y operación se incrementan cuando el número de desconectivos crece. Si se tiene en cuenta la diferencia entre el daño actual y el obtenido después de evaluar cada combinación de desconectivos, esta diferencia se puede considerar como **fondos generados**, mientras que inversión, operación y mantenimiento son considerados **fondos absorbidos**, lo que permite realizar los **flujos de caja operativos**, y evaluar entonces las ganancias a través del valor **actual neto** (VAN), el periodo de recuperación y (PR), el **índice beneficio costo** (IBC), etcétera.^{2,3}

Dado el volumen de la información necesaria para la realización de estos cálculos, se emplean técnicas de computación, que agilizan los mismos y dan mayor garantía de exactitud y seguridad.

Procesamiento de la base de datos

Para la aplicación del procedimiento planteado se requiere del procesamiento de la base de datos de los circuitos seleccionados, para ello se operó de la siguiente manera:

Todos los datos se obtuvieron del estudio de los esquemas de los circuitos, de estos se determinaron los tramos, así como su longitud, demanda media, KVA instalados y el factor de potencia.

Para la obtención de las interrupciones se trabajó con el registro de operaciones de los swith del despacho

eléctrico de la provincia. Es de destacar que durante el cálculo de las tasas de interrupciones y el tiempo promedio solo se tuvieron en cuenta aquellas fallas en las que fue necesario operar alguno o más de los desconectivos ubicados en el circuito, y que para el circuito 5 340 se tomó el promedio de los indicadores ya que en el tiempo analizado no tuvo interrupciones y por ende la tasa de fallos sería de cero; cosa que no es real.

A continuación se determinan las posibles localizaciones de los desconectivos a partir del número de tramos de los circuitos y teniendo en cuenta la alimentación sencilla o doble de los mismos.

De acuerdo con el número de tramos de cada uno de los circuitos se determinaron los posibles números de desconectivos a ubicar en estos circuitos; de cada tramo se determinó la longitud, demanda media y costo de la energía interrumpida.

Para analizar los costos de la energía interrumpida en cada tramo se consideran los siguientes tipos de carga: carga residencial (\$ 270/ MWh), industrial (\$ 405/ MWh), zafra (\$ 540/ MWh) y turismo (540 \$/MWh). En los tramos donde existía carga mixta el costo de la energía se determinó por la siguiente expresión:

$$C_E = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot C_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad \dots(7)$$

Los cálculos se realizan para el desconectivo tipo: interruptor de aire tripolar de acción conjunta, exterior, cuyo costo es \$ 1 111 y costo de montaje igual a \$ 240. Este sin ningún tipo de protección.

Programa de computación empleado

Para la obtención de la solución óptima en cada circuito se emplea el programa Selconec, realizado en MatLab, por el ingeniero Rafael Robert en la OBEP Santiago de Cuba.

El mismo procesa los datos de entrada y determina los valores de la inversión, operación y mantenimiento, la afectación a los consumidores durante la instalación de los desconectivos (fondos absorbidos), así como los beneficios obtenidos por reducción del daño, diferencia entre el daño actual y el menor resultante después de la inversión para cada número fijo de desconectivos (fondos generados).

La selección de las variantes óptimas se realizó tomando las de menor daños para los conjuntos de combinaciones de todos los números posibles de desconectivos y la mejor para el circuito, dentro de las variantes óptimas, se realizó tomando la de mayor VAN, la cual está destacada en negritas en la tabla 1.

Tabla 1 Resultados del valor actual neto (VAN), del índice beneficios-costos (IBC) y del período de recuperación (PR)				
Circuito	# de Desc.	VAN (\$)	IBC	PR
	5	60 769,64	2,99	1,52
900	6	257 043,71 -292 759,63	7,37	0,55
5 330	1	-18 331,33 5 168,82	4,20	0,96
5 335	2	9 031,48	3,80	1,07
	1	81 577,00	21,08	0,19
5 340	2	128 699,38	16,84	0,24
	3	131 260,01	11,77	0,34
	4	1 892 123,04	108,93	0,04
	5	2 134 116,23	98,39	0,04
5 385	6	2 374 649,06	91,31	0,04
	7	2 521,325,46	83,19	0,05
	8	2 612 410,94	75,51	0,05
	5	2 732 729,19	53,48	0,08
5 390	6	4 193 662,28	68,12	0,06
	7	5 410 010,55	75,21	0,05
	1	4 129,58	3,87	1,10
5 395	2	4 162,65	2,46	1,73
	3	3 066,77	1,71	2,59
	5	5 074,55	1,39	3,31
4 385	6	77 947,57	6,02	0,72
	3	1 981 164,30	100,63	0,04
4 390	4	2 580 797,78	98,56	0,04
	5	2 916 565,17	89,00	0,05
	3	2 883 350,51	93,64	0,05
4 395	4	4 492 787,38	97,58	0,04
	5	5 637 270,27	97,95	0,04
	3	2 380 339,83	97,02	0,04
	4	2 517 979,11	77,18	0,05
4 435	5	2 845 774,88	85,04	0,08

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los flujos de caja operativos, el programa Selconec determina los índices de inversiones para cada circuito.

El período de análisis del flujo de caja operativo es de seis años que es el tiempo para el cual está establecido recuperar la inversión realizada.

Es de destacar que en todos los casos a medida que disminuye el daño a los consumidores el valor actual neto (VAN) aumenta, y esta diferencia se debe a que la influencia del aumento de los costos ante la disminución de los daños es muy pequeña lo que provoca que el VAN aumente siempre.

Los resultados obtenidos a partir de las corridas del programa Selconec para un circuito y las cantidades de desconectivos analizados se muestran en la tabla 1.

Como puede observarse en la tabla 1, todos los VAN dan valores positivos excepto en el caso del circuito 5 330 donde este es negativo ya que la ubicación de los desconectivos que representa el menor daño es la coincidente con la posición actual de los mismos, por lo cual no es necesario ubicar ningún desconectivo más en el circuito ni eliminar ninguno de ellos.

Los índices de beneficios-costos superan el valor de la unidad, siendo el menor el de la variante óptima del circuito 5 395 con un valor de 2,45 y el mayor tiene un valor de 97,75 y pertenece a la mejor variante del circuito 4 395.

Los valores del valor actual neto oscilan entre \$ 4 162,65 del circuito 5 395 y \$ 5 637 270,27 del circuito 4395.

Los periodos de recuperación son relativamente rápidos, estos oscilan entre los 0,04 y 3,31 años, lo que evidencia que con la aplicación de los desconectivos, debido al considerable ahorro que los mismos reportan, en la mayoría de los casos analizados en el primer año se recupera la inversión.

Otro aspecto de interés a destacar es que muchas de las variantes analizadas coinciden en el número de desconectivos que poseen los circuitos actualmente, en lo que no coinciden es en la posición de los mismo; por ejemplo, en el circuito 5 385, moviendo dos de los cuatro desconectivos que actualmente posee hacia la posición que el programa determina, el daño se vería reducido de \$ 3 114 700 a \$ 2 532 733,68, en este caso el valor actual neto (VAN) es de \$ 1 892 123,04 y el índice beneficio-costos (IBC) es

de 108,93; así ocurre con muchos de los circuitos analizados en este trabajo, lo que resulta una opción más a la hora de la instalación de estos desconectivos de acuerdo con las posibilidades de la Empresa Eléctrica.

CONCLUSIONES

- Fueron determinadas las localizaciones óptimas de los desconectivos de cada uno de los circuitos analizados.
- En la mayoría de los casos los mejores resultados se obtienen para el número máximo de desconectivos analizados, no siendo así en el circuito 5 395, donde el número óptimo de desconectivos es menor que el número de ellos evaluados.
- Existen circuitos donde con solo cambiar la posición de algunos de sus desconectivos disminuyen considerablemente los daños, con una gran recuperación monetaria.
- La nueva localización de los desconectivos disminuye el número de interrupciones a los consumidores y con ello las afectaciones, lo cual eleva el nivel de vida de la sociedad cubana.

REFERENCIAS

1. **Billinton, Roy:** "Optimal Switching Device Placement" in *Distribution System. IEEE on Power Systems*, No. 4, 1996.

2. **Fernández, A.:** "Localización de desconectivos para la red de distribución de la ciudad de Santiago de Cuba," Trabajo de Tesis, Cuba, 2001.

3. **César P., Jorge:** *Evaluación técnico económica de los desconectivos en redes de distribución primaria*, Ministerio de la Industria Básica, Unión Eléctrica, Cuba, 2001.

AUTORES

Javier E. de la Fé Noa

Ingeniero Electricista, Gerencia Energética de COPEXTEL SA, Santiago de Cuba, Cuba
e-mail: jedelafe@stg.copextel.cor

Rafael M. Robert García

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Profesor Adjunto, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba
e-mail: distribucion@elecstg.une.cu

Sergio de la Fé Dotres

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba
e-mail: sergiof@ee.fie.uo.edu.cu

CENTRO DE OPERACIONES LUIS FELIPE ALMEIDA OBE CIUDAD DE LA HABANA

Nuestro Centro Territorial de Producción, siempre dispuesto a satisfacer las necesidades del cliente, le oferta un grupo de producciones y servicios, para lo que cuenta con una reconocida experiencia

