

UTILIZACIÓN DE MÉTODOS MULTICRITERIALES PARA MEJORAR LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO EN INTERRUPTORES DE POTENCIA*

THE USE OF MULTI-CRITERIA METHODS TO IMPROVE THE MANAGEMENT OF POWER SWITCH MAINTENANCE

Israel Gondres Torné**

Santiago Lajes Choy***

Héctor Hidalgo Hidalgo****

Alfredo del Castillo Serpa*****

Resumen: el presente trabajo trata sobre la utilización de métodos multicriteriales para mejorar la calidad del suministro de energía eléctrica mediante la selección adecuada de la variante óptima de mantenimiento de los interruptores de potencia. Las diferentes variantes se analizan a partir del sistema de mantenimiento por diagnóstico y pueden ser valoradas teniendo en cuenta los criterios de los fabricantes, los criterios de los expertos, los datos históricos de las corrientes acumuladas, los costos de las reparaciones parciales o capitales, etc., a

* Fecha de recepción: 12 de marzo de 2007. Fecha de aceptación para publicación: 20 de junio de 2007. El artículo es el resultado de las actividades de investigación en el área de gestión de mantenimiento en subestaciones eléctricas del grupo de investigación Eficiencia Energética de los Sistemas Eléctricos, de la Universidad de Camagüey, Cuba.

** Ingeniero electricista y magister en Ingeniería Eléctrica, Universidad de Camagüey, Cuba. Profesor, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Camagüey, Cuba. Correo electrónico: israel-gondrescu@yahoo.es

*** Ingeniero electricista, Universidad Central de Las Villas, Cuba. Doctor en Ciencias Técnicas, Instituto Politécnico de Minsk, República de Belarús. Profesor titular, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Camagüey, Cuba. Correo electrónico: santigolajes@reduc.edu.cu

**** Ingeniero electricista, Universidad de Camagüey, Cuba. Ingeniero especialista, ACERPROT, Camagüey, Cuba. Correo electrónico: hectorhh1974@yahoo.es

***** Ingeniero electricista, Universidad de La Habana, Cuba. Doctor en Ciencias Técnicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Cuba. Profesor titular, del Centro de Estudio de Innovación y Mantenimiento (CEIM) y del Cujae, Camagüey, Cuba. Correo electrónico: acastillo@mecanica.cujae.edu.cu

fin de tratar de darle al interruptor un promedio mínimo de fallas y un incremento de su confiabilidad, lo cual conllevaría una mejor calidad en el suministro de energía eléctrica.

Palabras clave: interruptores de alto voltaje —mantenimiento y reparación, distribución de energía eléctrica—, control de calidad, métodos de diferencias finitas.

Abstract: This paper is about the use of multi-criterial methods with the objective of improving the electric power supply by means of the selection of the best high voltage breaker maintenance variant. These different variants are analyzed based on the diagnostic maintenance system and they can be valued bearing in mind the criteria use by the manufactures, the experts, historical data of accumulated currents, the costs of partial or capital repairs, etc., with the objective of having high voltage breaker with minimum failure averages and increase their dependability, that which would bear a better quality in the electric power supply.

Key words: High voltage circuit breakers —maintenance and repair, electric power distribution, quality control, finite difference method.

INTRODUCCIÓN

El principal problema de los interruptores se deriva de la naturaleza de su existencia. Un interruptor de circuitos tiene la capacidad de interrumpir desde las corrientes débiles de capacidad o de inducción hasta las corrientes de cortocircuitos altos, y como resultado, extinguir los arcos poderosos de electricidad. Un buen número de sustancias tiene calidad aceptable para ser un medio de interrupción del arco. Tres de ellas son preferidas ampliamente por los diseñadores de los interruptores alrededor del mundo. Esto es debido a sus excelentes propiedades de rotura o aislamiento que guían en los diseños de rendimiento y economía. Ellos son los aceites minerales, el aire comprimido y el hexafluoruro de azufre.

En años recientes los interruptores han alcanzado un alto grado de confiabilidad, pero a pesar de ello siguen ocurriendo averías, fallas e incluso catástrofes lamentables. Así, muchas veces llegamos a la conclusión de que esta problemática tiene que ver con el mantenimiento de los interruptores; de aquí nuestro interés en abordar el tema para lograr una mejor calidad en el suministro de energía e incluso ahorro energético por todo lo que se deriva del buen funcionamiento de estos elementos.

1. ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS MULTICRITERIALES

El problema de seleccionar el mejor proyecto o, mejor aún, de obtener una ordenación del mejor al peor de ellos, basada en un conjunto de criterios (cuantitativos o no), es la cuestión central que resuelven los métodos multicriteriales (Barba y Pomerol, 1997). Todos los métodos multicriteriales parten del siguiente modelo de trabajo único:

	Criterios	C1.....Cj Cn
Proyectos	p1	:
	:	:
	pie _{ij}
	:	
	pm	
	Pesos	W1..... Wj Wn

Matriz de decisión

Donde:

e_{ij} : evaluación (cuantitativa) del criterio j con relación al proyecto.

W_j : peso (importancia) del criterio j .

El problema de estos métodos es seleccionar aquel proyecto que mejor satisfaga las preferencias del decisor. De hecho, ningún método puede alcanzar el óptimo y todos ellos producen resultados que están por debajo de la solución óptima. Todos los métodos multicriteriales exigen que las evaluaciones e_{ij} sean comparables en magnitud, unidad de medida, posición del cero, etc., por lo que está implícita en todo método la normalización de las evaluaciones.

Actualmente, los métodos más utilizados son el de optimización de los productos indeterminados, el de empleo de la optimización en la solución de problemas de perfeccionamiento de las redes eléctricas (Borisov, 1984) y el método de la media aritmética (Díaz, 2002). La Tabla 1 resume las principales ventajas y desventajas de cada método.

Tabla 1. Principales ventajas y desventajas de los métodos de optimización multicriterial

Método	Ventajas	Desventajas
Media aritmética	Análisis multicriterial Varia la importancia de cada criterio Posibilidad de múltiples soluciones	Gran cantidad de cálculos
Productos indeterminados	Análisis multicriterial Sencillez en las operaciones	Solución limitada
Método de Borisov	Análisis multicriterial Permite variar las importancias de los criterios	Cálculo complejos y voluminosos

Fuente: presentación propia de los autores.

En este trabajo se utiliza el método de la media aritmética, ya que ofrece la posibilidad de priorizar una función con respecto a otras. Además, es un método muy sencillo de implementar en un programa de computación. Respecto a los demás métodos, con éste se calcula el coeficiente de importancia (u_j), el cual permite trabajar de acuerdo con el orden de prioridad que el especialista considere y que, a su vez, se ajuste a las restricciones del trabajo en cuestión.

2. DETERMINACIÓN DE LOS CRITERIOS QUE SE VAN A UTILIZAR EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE LA MEDIA ARITMÉTICA

A continuación se explican las principales características del método seleccionado sobre la base de las funciones o criterios reales que se emplearán en este trabajo. Las posibles variantes y los criterios que se van a comparar en la implementación del método multicriterial son los siguientes (Gondres, 2005):

Variantes	1	2	3	4	5	6
Mantenimiento	1 mes	3 meses	6 meses	9 meses	1 año	1 año y 3 meses

Los criterios que se van a comparar son:

1. El VAN de Costo (VANc) (Hidalgo y Sanfield, 2006): este criterio tiene gran importancia, pues brinda información de cuál es el valor total de los costos de cada una de las variantes.
2. Los disparos fallidos a valores nominales, que indicarán el porcentaje de error que pudiera existir de acuerdo con el criterio del fabricante.
3. Los disparos fallidos a valores de cortocircuitos mínimos.
4. Los disparos fallidos a cortocircuitos máximos.
5. El índice de deterioro, que indica el grado de deterioro que va tener el interruptor de acuerdo con la cantidad de disparos que ha realizado por los diferentes niveles de corriente.

Las ecuaciones que describen los criterios que se van a comparar en las seis variantes son:

2.1 VAN DE COSTO (VANc): MÍNIMO

$$\text{VANc} = -K_0 + \sum_{j=1}^N \frac{G_{RCM} + G_{RK} + \Delta\epsilon\beta}{(1+TD)^j} \quad (1)$$

Dónde:

K_0 : inversión inicial.

G_{RCM} : gastos en reparaciones corrientes de mantenimiento.

$$G_{RCM} = P_{RCM} \cdot K_0 \quad (2)$$

Donde:

P_{RCM} : coeficiente de gastos por reparaciones corrientes y mantenimientos.

G_{RK} : costo de capital de las reparaciones.

$$G_{RK} = P_{\varepsilon} \cdot K_o \quad (3)$$

$$P_{\varepsilon} = Pa + P_K \quad (4)$$

$$Pa = \frac{1}{t_{nd}} \quad (5)$$

Pa: coeficiente de amortización.

t_{nd} : tiempo normativo de vida útil.

P_K : coeficiente de gastos por reparaciones capitales.

TD: tasa de interés.

J: años.

ΔE : pérdidas a la economía por interrupciones.

β : costo del kwh.

2.2 DISPAROS FALLIDOS A VALORES NOMINALES (NN)

Para seleccionar los disparos fallidos en cada una de las variantes de análisis se realizaron gráficas de tendencias (Hidalgo y Sanfield, 2006) de los datos históricos de las muestras utilizadas. Dichos datos se obtuvieron del registro histórico de disparos de todos los interruptores que se lleva en la Organización Básica Eléctrica de la Provincia de Camagüey.

2.3 DISPAROS FALLIDOS A VALORES DE CORTOCIRCUITOS MÍNIMOS (NCCMÍN)

Para este caso se utiliza el mismo procedimiento expuesto, pero con la diferencia de que el análisis se realiza para operaciones a cortocircuitos mínimos y las tendencias llegan hasta un 15% de falla, ya que son de mayor consideración que las de corrientes nominales y de menor consideración que las corrientes de cortocircuitos máximos, debido al nivel de corriente al cual operan.

2.4 DISPAROS FALLIDOS A VALORES DE CORTOCIRCUITOS MÁXIMOS (NCCMÁX)

De igual forma se procede al análisis de este criterio. Las tendencias llegan hasta un 20% de disparos fallidos por las razones expuestas.

2.5 ÍNDICE DE DETERIORO

Este criterio fue valorado a través de una ecuación exponencial, que aproxima la dependencia que tendrá el deterioro en función de la corriente acumulada por cada uno de los niveles, los cuales se seleccionaron en correspondencia de los datos históricos que arrojan cada una de las tendencias en cada una de las variantes y su influencia en el deterioro que representa según el fabricante. La fórmula analizada obtenida de manera empírica es la siguiente:

$$I_g = \frac{\ell - \ell^{\lambda_i}}{1,71} \quad (6)$$

$$\lambda_i = (I_{an}/1600 + I_{acc \text{ mín}}/200 + I_{acc \text{ máx}}/300)$$

Donde:

I_g : índice de deterioro.

λ_i : coeficiente de deterioro.

I_{an} : corriente acumulada a valores nominales.

$I_{acc \text{ mín}}$: corriente acumulada a valores de cortocircuitos mínimos.

$I_{acc \text{ máx}}$: corriente acumulada a valores de cortocircuitos máximos.

$I_{an} = D_{an} * 1$, $I_{acc \text{ mín}} = D_{acc \text{ mín}} * 10$, $I_{acc \text{ máx}} = D_{acc \text{ máx}} * 20$

Los coeficientes 1, 10 y 20, utilizados en estas fórmulas, permiten llevar los disparos al valor de corriente en kA. Éstos se seleccionaron a partir de datos que considera el fabricante para cada una de estas corrientes. Los coeficientes 1.600, 200 y 300 significan la corriente acumulada máxima permisible de acuerdo con las especificaciones del fabricante (NRIB-303, 1980).

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS PRÁCTICOS

La experiencia ha demostrado que la vida real de equipos eléctricos es mayor que la que habían estimado los fabricantes y que los equipos en buenas condiciones pueden seguir operando sin tener que reemplazarlos. Por medio del control y diagnóstico continuo, es posible encontrar defectos y pronosticar el proceso de degradación que tiene lugar en el equipo. De esta forma se lleva a cabo el mantenimiento, se evita que ocurra una avería mayor y se alarga el tiempo de vida útil del equipamiento, con lo cual los elementos de la red proporcionan una mayor confiabilidad y un ahorro considerable.

Para efectuar el análisis histórico se tomaron como base mediciones de veinte interruptores ubicados en la provincia de Camagüey de tipo MkPI 35 (aceite) de nacionalidad rusa con las siguientes especificaciones: tensión nominal 35 kV, corriente nominal 1.000 A y capacidad interruptiva de 20 kA. Los criterios del fabricante adecuados a las normas (NRIB-303, 1980; NRIB-422, 1981) para las operaciones por niveles de corriente con el fin de realizar el mantenimiento se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos de operación del interruptor MkPI 35 de aceite según el fabricante

Corriente de operación	$I_n=1.000 \text{ A}$	$I_{cc}=1.000 \text{ a } 10.000 \text{ A}$	$I_{cc}=10-20.000 \text{ A}$
Número de operaciones admisibles	1.600	20	15

Fuente: presentación propia de los autores.

En las tablas 3, 4 y 5 se presentan los resultados de la corriente nominal, la corriente de cortocircuito mínima y la corriente de cortocircuito máxima de los interruptores ubicados en las subestaciones analizadas.

Tabla 3. Datos históricos de los valores de la corriente nominal de los interruptores ubicados en las subestaciones

I nominal	1 mes	3 meses	6 meses	9 meses	1 año	1 año y 3 meses
Subestación 1	5	13	34	51	56	71
Subestación 2	3	8	20	42	56	69
Subestación 3	4	19	57	71	91	121
Subestación 4	8	19	55	83	113	137
Subestación 5	8	20	66	93	117	145
Subestación 6	0	3	23	36	51	61
Subestación 7	2	7	28	51	66	97
Subestación 8	5	9	38	71	98	132
Subestación 9	1	5	51	101	129	165
Subestación 10	12	23	73	95	151	178

Fuente: presentación propia de los autores.

Tabla 4. Datos históricos de los valores de la corriente de cortocircuito mínima de los interruptores ubicados en las subestaciones

Icc mínima	1 mes	3 meses	6 meses	9 meses	1 año	Más de 1 año
Subestación 1	2	6	16	21	22	30
Subestación 2	3	6	10	13	15	16
Subestación 3	1	4	13	15	20	31
Subestación 4	1	3	10	11	13	14
Subestación 5	1	3	9	13	17	24
Subestación 6	4	7	14	20	25	32
Subestación 7	1	2	15	18	22	29
Subestación 8	1	2	7	9	13	17
Subestación 9	4	7	19	22	25	29
Subestación 10	2	3	15	15	16	22

Fuente: presentación propia de los autores.

Tabla 5. Datos históricos de los valores de la corriente de cortocircuito máxima de los interruptores ubicados en las subestaciones

Icc máxima	1 mes	3 meses	6 meses	9 meses	1 año	Más de 1 año
Subestación 1	1	2	7	9	9	13
Subestación 2	1	3	5	5	6	6
Subestación 3	1	2	5	6	9	11
Subestación 4	1	2	4	4	5	6
Subestación 5	1	1	3	5	7	10
Subestación 6	2	3	5	8	10	13
Subestación 7	1	1	6	7	9	12
Subestación 8	0	1	3	3	5	7
Subestación 9	1	3	8	9	10	12
Subestación 10	0	1	5	6	6	9

Fuente: presentación propia de los autores.

Este método de análisis multicriterial le permite al especialista asignarles a las funciones que satisfacen los criterios de estudio diferentes órdenes de prioridad de acuerdo con sus intereses. Para ello se emplea como criterio de optimización:

$$E = \sum_{i=1}^n U_i \cdot e_{ij}; \text{ sea máximo.} \tag{7}$$

Donde:

i : número de funciones objeto de análisis.

U_i : importancia o prioridad dada la función.

Se cumple que:

$$\sum_{i=1}^n U_i = 1$$

Y con e_{ij} que representa la efectividad de la función i en las j -ésimas variantes. Así, finalmente, se determina la efectividad de cada variante como:

$$E(j) = eVanc(j) \cdot U_1 + eNn(j) \cdot U_2 + eNcc \min(j) \cdot U_3 + eNcc \max(j) \cdot U_4 + eIg(j) \cdot U_5 \tag{8}$$

Donde:

U_1 : importancia asignada a la función del VAN de costo.

U_2 : importancia asignada a los disparos fallidos nominales.

U_3 : importancia asignada a los disparos fallidos a cortocircuitos mínimos

U_4 : importancia asignada a los disparos fallidos a cortocircuitos máximos.

U_5 : importancia asignada al índice de deterioro.

Los diferentes órdenes de prioridad como resultado de la consulta de expertos se muestran en la Tabla 6. De todos los órdenes de prioridad posible se presenta solamente uno de ellos, debido a la gran cantidad de combinaciones posibles.

Tabla 6. Asignación de órdenes de prioridades según los criterios utilizados

Criterios o funciones	Orden de prioridad	
	I	
1	U_1	0,1
2	U_2	0,1
3	U_3	0,1
4	U_4	0,2
5	U_5	0,5

Fuente: presentación propia de los autores.

Posteriormente se analizan los datos históricos para así realizar el cálculo pertinente en cada variante que se va a analizar, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados de los análisis de datos históricos según los criterios escogidos

Resultados de las funciones o criterios						
Variantes		VanC	Nn	Ncc mín	Ncc máx	Ig
	1	17.059,70	0,27	0,02	0,01	18,81
	2	16.039,82	0,28	0,03	0,01	11,12
	3	15.052,98	0,31	0,04	0,01	6,53
	4	14.123,87	0,37	0,07	0,03	3,82
	5	13.309,14	0,55	0,13	0,04	2,24
	6	12.725,38	1,00	0,22	0,07	1,30

Fuente: presentación propia de los autores.

Posteriormente se analiza e_{ij} para cada criterio, la cual puede ser mínima o máxima y está dada por:

- Si se desea que la efectividad de la función i en las j -ésimas variantes sea mínima, entonces:

$$e_{ij} = \frac{X_{ij\min}}{X_{ij}} \tag{9}$$

Donde:

$X_{ij\min}$: valor mínimo que toma la función i en las j -ésimas variantes.

X_{ij} : valores que toma la función i en las j -ésimas variantes.

- Si se desea que la efectividad de la función i en las j -ésimas variantes sea máxima, entonces:

$$e_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_{ij\max}} \tag{10}$$

Donde:

$X_{ij\max}$: valor máximo que toma la función i en las j -ésimas variantes.

En ambos casos se cumple que $e_{ij} \leq 1$.

Los X_{ij} se determinan por unidad. Los resultados de e_{ij} se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de los análisis de la efectividad de acuerdo con las variantes y los criterios escogidos

Variantes objeto de análisis	Criterios o funciones					
		Vanc	Nn	Ncc mín	Ncc máx	Ig
1	e_{11}	0,75	1,00	1,00	1,00	0,07
2	e_{12}	0,79	0,96	0,67	0,67	0,12
3	e_{13}	0,85	0,87	0,50	0,43	0,20
4	e_{14}	0,90	0,73	0,29	0,24	0,34
5	e_{15}	0,96	0,49	0,15	0,15	0,58
6	e_{16}	1,00	0,27	0,09	0,09	1,00

Fuente: presentación propia de los autores.

Luego se determina para cada variante objeto de análisis y cada orden de prioridad la sumatoria de productos $U_i \cdot e_{ij}$. Los resultados se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados de la sumatoria de productos $U_i \cdot e_{ij}$ para el orden de prioridad I

Variantes objeto de análisis	Orden de prioridad	
	I	
1	E_1	0,509
2	E_2	0,434
3	E_3	0,407
4	E_4	0,410
5	E_5	0,482
6	E_6	0,653

Fuente: presentación propia de los autores.

A partir del criterio de optimización se encuentra que la mejor variante será aquella con el mayor valor de $E(j)$, que en este caso es la variante 6. Por último, se determina la variante óptima para cada orden de prioridad, como aquella a la que le corresponda el mayor valor de la suma de productos $U_i \cdot e_{ij}$ (E) en cada caso.

4. CONCLUSIONES

- La mejor variante que se va a utilizar de acuerdo con el orden de prioridad I establecido fue determinada. La mejor variante fue la 6.
- Los valores acumulados de corriente nominal no definen la estrategia de los mantenimientos, ya que sus bajos valores acumulados no sugieren decisión alguna.
- La conjugación de los criterios y las variantes que se van a adoptar en la gestión del mantenimiento pueden variar de acuerdo con la necesidad de los especialistas.
- Los diferentes intervalos de mantenimiento se determinaron según las características obtenidas con los análisis de los diferentes órdenes de prioridad.
- La metodología propuesta puede usarse como una forma más de incidir positivamente en la vida útil del equipamiento mediante la optimización multicriterial de la gestión de mantenimiento.

REFERENCIAS

BARBA, S. y POMEROL, J. C. *Decisiones multicriterio: fundamentos teóricos y utilización práctica*. Alcalá: Universidad de Alcalá, 1997.

BORISOV, P. I. *Metodología para el empleo de la optimización en la solución de problemas de perfeccionamientos de las redes eléctricas*. Moscú: Energética, 1984.

- CAMPISTROUS, L. y RIZO, C. *Indicadores e investigación educativa*. La Habana: Editorial de Ciencias Sociales, 1998.
- CUBA. Norma Ramal de la Industria Básica (NRIB-303). *Interruptores de gran volumen de aceite de 35kV*. La Habana, 1980.
- CUBA. Norma Ramal de la Industria Básica (NRIB-422). *Interruptores de gran volumen de aceite de 35kV área capitalista*. La Habana, 1981.
- DÍAZ, R. *Optimización en la selección del sistema organizativo de reparaciones y mantenimientos en líneas de 33kV*. Trabajo de diploma. Camagüey: Universidad de Camagüey, 2002.
- GONDRES, I. Considerations about the Maintenance in Electrical Networks. *IEEE Power Tech Conference*. St. Petersburg, 2005, p. 3.
- HIDALGO, H. y SANFIELD, P. *Optimización multicriterial de la gestión de mantenimiento en interruptores de 33kV*. Trabajo de diploma. Camagüey: Universidad de Camagüey, 2006.