



Estudio de la cargabilidad de cables de alta tensión de aislamiento sólido con las variaciones periódicas de la carga

Juan F. Zúñiga
Juan A. Almirall

Recibido: Junio del 2005
Aprobado: Septiembre del 2005

Resumen / Abstract

Se plantean los resultados obtenidos al introducir una corrección al método desarrollado en el CIPEL para el cálculo de la cargabilidad de cables soterrados considerando las variaciones periódicas de la curva de carga diaria y la impedancia compleja del medio que rodea a la instalación a partir del empleo de funciones Bessel y Hankel. La validación de la corrección propuesta se realizó mediante el cálculo, con y sin la corrección planteada, de la temperatura superficial de cables en servicio por el método de cálculo propuesto y su comparación con los medidos en la superficie de dichos cables

Palabras clave: cables soterrados, cargabilidad, curva de carga diaria, funciones Hankel

This work presents the results obtained after the introduction of a correction to the method developed in the CIPEL to calculate the current capacity of underground cables considering the periodical changes of the load changes of the daily load curve and the complex impedance of the environment surrounding the installation using Bessel and Hankel functions. The validity of the proposed correction was carried out calculating the surface temperature of the cables in service by means of the calculating method with and without the correction and the comparison of these values with the temperature measured on the surface of the cables

Key words: cables current capacity, complex impedance, cables, Hankel functions

INTRODUCCIÓN

Los cables y alambres pueden ser aislados o desnudos. Los cables y alambres desnudos se usan básicamente en líneas aéreas de transporte de energía, las que imponen a los mismos serios requerimientos mecánicos. En el resto de las instalaciones eléctricas, equipos, aparatos, etc., se emplean los cables y alambres aislados. El uso básico de los cables aislados de alta tensión es en las redes soterradas.

Los materiales aislantes empleados en los cables soterrados son: Papel impregnado, aislantes secos o sólidos y aislantes especiales.

La determinación de la máxima corriente de operación continua en los cables aislados de alta tensión es mucho más difícil que en los cables de baja tensión, debido fundamentalmente a que el circuito térmico de ellos es mucho más complejo y en él tiene un peso de mucha importancia la resistencia térmica del medio que rodea al cable, medio que en muchos casos no es homogéneo como es el caso de los cables tendidos por líneas de conductos. Además, las instalaciones soterradas constan por lo general de varios cables que llevan cargas desiguales y es necesario tener en cuenta el efecto que tiene el calor generado por un cable sobre los demás cables de la instalación.¹

Por tal motivo, el estudio de la cargabilidad de los cables de alta tensión es de gran utilidad para las instalaciones de cables soterrados, debido a que se puede efectuar el cálculo de la temperatura de trabajo de uno o de todos los cables de dicha instalación para la condición de carga según se trate y además, se puede determinar a la hora de diseñar una nueva instalación si la misma se ajusta a los requerimientos de cargabilidad de los cables propuestos para su utilización en ella.

El Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL) desarrolló un método de cálculo de los regímenes térmicos de cables por conductos soterrados en bloques de hormigón con variaciones periódicas de la corriente de carga, el cual se comprobó experimentalmente para cables de aislamiento de papel.^{2,3}

El presente trabajo tiene como objetivos mostrar las modificaciones introducidas al método de cálculo de los regímenes térmicos de cables por conductos soterrados en bloques de hormigón con variaciones periódicas de la corriente de carga y los resultados de su aplicación para cables de aislamiento sólido instalados por línea de conductos.

CÁLCULO DE LOS REGÍMENES TÉRMICOS EN CABLES DE AISLAMIENTO SÓLIDO

Como regla, la corriente admisible de carga de los cables aislados se relaciona a partir de los resultados del cálculo del régimen térmico en condiciones estacionarias. Sin embargo, en los circuitos de distribución eléctrica las cargas pueden variar significativamente en el transcurso del día, repitiéndose las mismas en los siguientes días. En este caso, el valor máximo de carga puede superar notablemente la magnitud obtenida para régimen estacionario.

La temperatura máxima de un cable aislado en explotación y por tanto su cargabilidad desde el punto térmico, depende básicamente de la carga que esté llevando el mismo. Por tanto, la determinación del efecto que tiene sobre la cargabilidad de una instalación soterrada la variación de los valores máximos de corriente de la curva de carga diaria de cada alimentador, es de gran importancia para su explotación, pues permite conocer hasta donde se puede cargar la misma.

En el CIPEL fue desarrollado un método de cálculo de los regímenes térmicos de los cables de aislamiento sólido para variaciones periódicas de las

cargas, el cual fue comprobado para cables de aislamiento de papel. Este contempla el cálculo de: las pérdidas dieléctricas en el aislamiento, en la vaina y en la armadura, el cálculo de las resistencias térmicas, capacitancias térmicas, la capacidad térmica de la vaina y de la cubierta protectora, la descomposición en armónicos de la curva de carga diaria del cable, el cálculo de la impedancia compleja para un cable, y por último el cálculo de la temperatura del conductor.⁴⁻⁶

La impedancia compleja (S_z) para un cable fue calculada de la siguiente forma:

El valor de la impedancia compleja no es fijo y depende del orden del armónico del flujo de potencia que se esté considerando y la misma está dada por:

$$S_{z,n} = \frac{1}{2\pi r_0 K_{bn}} \cdot \frac{H_0^{(2)}(b_n \cdot r)}{H_1^{(2)}(b_n \cdot r)} \quad \dots (1)$$

donde:

K : Conductividad térmica del material (w/ °C.m).

$$b_n = \sqrt{\frac{nw}{a}} = \sqrt{\frac{2\pi n}{aT}}$$

n : Orden del armónico considerado ($n = 10$).

$$w = 2\pi fn = \frac{2\pi n}{T}$$

$$aT = \frac{K}{C}$$

C : Capacitancia térmica de la unidad de volumen del medio (J/kg °C).

T : Lapso de tiempo considerado para la carga cíclica (24 horas).

$r = r_0$: Radio de la superficie externa del cable.

$H_0^{(2)}(b_n \cdot r)$: Función Hankel de orden cero y de segunda especie de argumento ($b_n \cdot r$).

$H_1^{(2)}(b_n \cdot r)$: Función Hankel de primer orden y de segunda especie de argumento ($b_n \cdot r$).

Un resultado que se obtuvo del estudio del comportamiento térmico en cables de aislamiento sólido instalados en líneas de conductos es la corrección realizada al cálculo de la impedancia compleja.

En el método desarrollado se asumió que los cables estaban instalados en un medio homogéneo, o sea, que no existían diferencias de las características térmicas entre el bloque de hormigón y la tierra, por lo que la impedancia compleja fue calculada utilizando la expresión 1. Esto en la práctica no es así ya que las resistencias térmicas del hormigón y la tierra difieren, por ello en este caso se introdujo una corrección que consiste en sumarle a la expresión 1 el siguiente término:

$$\frac{(\rho_T - \rho_c) H_0^{(2)}(b_n \cdot r_0)}{2\pi r_0 H_1^{(2)}(b_n \cdot r_0)} \quad \dots (2)$$

donde:

ρ_T : Resistividad térmica del hormigón ($^{\circ}\text{C m} / \text{W}$).

r_0 : Radio externo del conducto (cm).

VALIDACIÓN DEL SOFTWARE DESARROLLADO Y DE LAS CORRECCIONES ESTABLECIDAS

En el método desarrollado en el CIPEL para el cálculo de la temperatura de trabajo de los conductores de los cables instalados por líneas de conducto y sometidos a variaciones periódicas de la curva de carga diaria a partir del cálculo de la impedancia compleja del medio ambiente que rodea a dichos conductores, no se consideró la diferencia entre la resistividad térmica del hormigón y la tierra, diferencia que en este trabajo se tiene en cuenta a partir de la ecuación 2, quedando por tanto la expresión de la impedancia compleja del medio como sigue:

$$S_{t,n} = \frac{\rho_t}{2\pi r_0} \frac{H_0^{(2)}(b_n \cdot r_0)}{H_1^{(2)}(b_n \cdot r_0)} + \frac{(\rho_t - \rho_c)}{2\pi r_0} \frac{H_0^{(2)}(b_n \cdot r_0)}{H_1^{(2)}(b_n \cdot r_0)} \dots (3)$$

donde:

ρ_c : Resistividad térmica del hormigón.

r_0 : Radio externo del conducto.

$H_0^{(2)}(b_n \cdot r)$: Función Hankel de orden cero y de segunda especie de argumento $(b_n \cdot r)$

$H_1^{(2)}(b_n \cdot r)$: Función Hankel de primer orden y de segunda especie de argumento $(b_n \cdot r)$

Para el cálculo de la temperatura en el conductor y en la superficie de los cables aislados instalados en línea de conductos y en tierra muerta fue creado un software, el cual fue aplicado a una subestación de distribución de 110 kV.⁶

Los resultados obtenidos de temperatura en la superficie durante 24 horas para el cable 10 de la subestación considerando esta corrección y sin considerarla se muestran en la tabla 1. En la figura 1

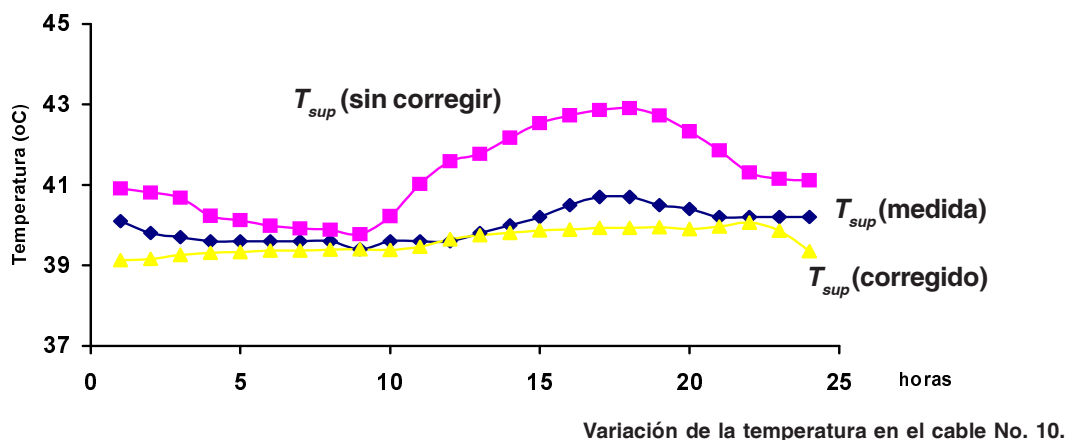
se presentan además, los resultados de la variación de la temperatura en dicho cable.

Como se puede apreciar la diferencia entre los valores medidos y los calculados se reduce de forma considerable, principalmente para las temperaturas, más altas, lo que demuestra tanto la validez de esta corrección como la del software diseñado en comparación con el anteriormente desarrollado por el CIPEL.

Tabla 1

Comparación de los valores de temperatura medidos con los calculados

Horas	Cable 10		
	T_{sup} (medida)	T_{sup} (sin corregir)	T_{sup} (corregido)
1	40,1	40,91	39,13
2	39,8	40,81	39,16
3	39,7	40,68	39,26
4	39,6	40,23	39,31
5	39,6	40,12	39,33
6	39,6	39,98	39,37
7	39,6	39,92	39,37
8	39,6	39,88	39,39
9	39,4	39,77	39,40
10	39,6	40,22	39,38
11	39,6	41,02	39,46
12	39,6	41,58	39,65
13	39,8	41,77	39,75
14	40,0	42,17	39,81
15	40,2	42,53	39,87
16	40,5	42,73	39,89
17	40,7	42,86	39,93
18	40,7	42,91	39,93
19	40,5	42,72	39,95
20	40,4	42,33	39,97
21	40,2	41,86	39,96
22	40,2	41,31	40,06
23	40,2	41,15	39,86
24	40,2	41,11	39,35



1

CONCLUSIONES

- El modelo físico-matemático y la metodología de cálculo desarrollado en el CIPEL para el cálculo de los regímenes térmicos en cables soterrados de aislamiento de papel con variaciones periódicas de la corriente de carga es perfectamente aplicable a los cables de aislamiento sólido, tanto instalados por conducto como por tierra muerta, la diferencia entre ambos radica fundamentalmente en las características del aislamiento utilizado en los cables, el cual no influye en la metodología de cálculo de los regímenes térmicos.
- El programa de computación diseñado permite calcular la temperatura en el conductor y en la superficie de los cables de aislamiento de papel y aislamiento sólido instalados en tierra muerta o en líneas de conductos.
- Con aplicación del software se pudo determinar en la subestación de distribución de 110 kV, objeto de estudio, los alimentadores que estaban sometidos a una mayor temperatura por lo que en ese tramo es más probable la ocurrencia de averías por fallas en el aislamiento.
- La corrección de la impedancia compleja introducida permitió reducir la diferencia entre los valores medidos y los calculados por el programa.

REFERENCIAS

1. **Almirall Mesa, J.:** *Texto de consulta para la formación de ingenieros electricistas y de los especialistas en alta tensión y materiales electrotécnicos, Parte II. Conductores*, Ciudad de La Habana, 2000.
2. **Almirall Mesa, J.; V. Wong Galán y F. Frías Lira:** "Elaboración de un método de cálculo e investigación de los regímenes de trabajo cables por conductos soterrados en bloques de hormigón con variaciones

periódicas de las corrientes de carga", Informe de Investigación Terimnado, CIPEL, Ciudad de La Habana, 1989.

3. **Wong Galán, V.:** "Elaboración de métodos de cálculo e investigación de los regímenes térmicos de trabajo de los cables soterrados con gráficos variables de la corriente de carga," Tesis de doctorado, Moscú, 1981.

4. **Norma UNE 21144-1-2, mayo 1997.** *Cálculo de la intensidad admisible. Parte1: Ecuaciones de intensidad admisible (factor de carga 100%) y cálculo de pérdidas. Sección 2: Factores de pérdidas por corrientes de Foucault en las cubiertas en el caso de dos circuitos en capas.* (Esta norma es equivalente a la norma internacional CEI 287-1-2:1993.)

5. **Norma UNE 21144-2-1, mayo 1997.** *Cálculo de la intensidad admisible. Parte2: Resistencia Térmica. Sección 1: Cálculo de la resistencia térmica.* (Esta norma es equivalente a la Norma Internacional CEI 287-2-1:1994.)

6. **Norma UNE 21144-3-1, mayo 1997.** *Cálculo de la intensidad admisible. Parte3: Secciones sobre condiciones de funcionamiento. Sección 1: Condiciones de funcionamiento de referencia y selección del tipo de cable.* (Esta norma es equivalente a la Norma Internacional CEI 287-3-1:1995.)

7. **Zúñiga Santana, J. F.:** "Estudio de la cargabilidad de cables de alta tensión de aislamiento sólido con las variaciones periódicas de la carga", Tesis de Maestría, CIPEL, Ciudad de La Habana, 2001.

AUTORES

Juan F. Zúñiga, Ingeniero Electricista, CUBAENERGÍA, Cuba
e-mail: jfz@cubaenergia.cu

Juan A. Almirall Mesa, Ingeniero Electricista, Profesor Auxiliar, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana Cuba
e-mail:almirall@electrica.cujae.edu.cu