

Dimensionamiento de cables de potencia aislados

Ricardo L.MESA, Andrés M. HENAO

*Universidad Pontificia Bolivariana, Cq. 1 # 70-01, Medellín, Colombia,
ricardoleon.mesa@alfa.upb.edu.co, tel. (+574) 2352379.*

Resumen: Este trabajo presenta un modelo matemático para el cálculo de la capacidad portante de corriente en conductores de potencia aislados, teniendo en cuenta los diferentes parámetros eléctricos y térmicos que intervienen en los cables ubicados en túneles, ductos, al aire o directamente enterrados. *Copyright © UPB 2013*

Palabras clave: Resistencia térmica, efecto Joule, transferencia de calor, ampacidad.

Abstract: This project presents a mathematical model for the computation of the current rating of isolated power cables, accounting the different electrical and thermal parameters that define the operation of power cables laying in tunnels, ducts, in air or directly buried.

Keywords: Current rating, thermal resistance, Joule losses, heat transfer, ampacity.

UPB_autoArt 2013-07-19, s 2013-10-19, s 2013-10-21

1. INTRODUCCIÓN

Debido al elevado costo de las instalaciones con cables aislados están son normalmente usadas para los grandes centros urbanos y en las salidas de potencia desde las centrales de generación hacia las subestaciones. Además de ello, como lo expone Anders (1997) el enorme capital requerido para este tipo de construcciones hace necesario que se realice un buen dimensionamiento técnico/económico, de tal manera que se pueda garantizar la vida útil del conductor.

La información sobre la capacidad de soporte de corriente de los cables de potencia es importante para garantizar que no se pone en riesgo el conjunto de todos los materiales que componen el cable. Los valores de ampacidad de los cables deben ser calculados para cada nueva instalación, teniendo en cuenta que las condiciones del medio ambiente en que serán dispuestos cambian.

Los cálculos de la ampacidad del cable deben tener en cuenta las pérdidas por efecto Joule (I^2R) que ocurren a medida que la energía eléctrica circula a través del conductor. Dichas pérdidas se convierten en calor que debe ser transferido al medio ambiente que circunda al conductor, o en su defecto, ocasionarán el sobrecalentamiento del mismo.

La ampacidad de conductores de potencia depende tanto de factores relacionados con sus materiales de construcción, como de los conductos a través de los cuales serán instalados. El alcance de este trabajo es definir las propiedades termodinámicas del cable y de los ambientes de instalación, y a partir de ellos estudiar el

modelo matemático para el cálculo de la ampacidad de los conductores bajo dichas condiciones instalación.

2. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE CABLES DE POTENCIA AISLADOS

En general los cables de potencia aislados están compuestos por varias capas de materiales aislantes y conductores. La primera, ubicada en el centro, consiste de uno o más conductores, que es seguida de una capa de material aislante, una pantalla y una chaqueta protectora. En ocasiones se adiciona una cinta semiconductora entre el aislante y los conductores con el fin de igualar los esfuerzos eléctricos en el aislamiento del cable. Para evitar cualquier flujo longitudinal a lo largo del cable se adiciona una cinta expandible a cada lado de la pantalla, el material se expandirá cuando tenga contacto con el agua, y prevendrá el flujo de ésta a lo largo de los conductores de la pantalla.

Cada uno de los materiales con los que se conforma el grupo de elementos que componen a los cables de potencia, tiene diferentes propiedades termodinámicas que afectan el comportamiento del cable durante su operación, y por consiguiente impactan sobre la capacidad de transporte de corriente del mismo.

Entre estos parámetros, el que cobra mayor importancia para la evaluación de las interacciones de calor al interior y exterior del cable es la resistividad térmica, puesto que es ésta la que limita la transferencia de la energía perdida hacia el exterior, ocasionando el sobrecalentamiento de los materiales. En la Tabla 1 se muestran

las propiedades térmicas de los materiales más utilizados para la construcción de cables aislados de potencia, determinados según IEC (1994).

Tabla 1. Propiedades térmicas de materiales típicos de construcción de cables aislados de potencia

Material	Resistividad Térmica	Calor específico
	(ρ) [K · m/W]	($c \cdot 10^6$) [J/(m ³ · K)]
<i>Materiales de aislamiento</i>		
Aislamiento de papel en cables de aceite	5,0	2,0
PE	3,5	2,4
XLPE	3,5	2,4
PVC	6,0	1,7
<i>Pantallas protectoras</i>		
Poli-cloropreno	5,5	2,0
PVC	6,0	1,7
PE	3,5	2,4
<i>Material de instalaciones en ductos</i>		
Concreto	1,0	1,9
Fibra	4,8	2,0
Asbestos	2,0	2,0
Barro	1,2	1,7
PVC	6,0	1,7

3. MODELADO TERMODINÁMICO

El modelado termodinámico de los diferentes tipos de instalaciones con cables de potencia aislados, puede ser realizado a partir de la analogía existente entre los sistemas eléctricos y los sistemas térmicos. La ley de Fourier, que para el caso de los sistemas térmicos sería la ecuación análoga a la propuesta por la ley de Ohm para el análisis de circuitos eléctricos, puede ser escrita como se muestra a continuación: Kreith et. al (2001)

$$W = \frac{\Delta\theta}{T} \quad (1)$$

donde W es el flujo de calor, T la resistencia térmica y $\Delta\theta$ la diferencia de temperaturas.

A partir de la ley de Fourier, los sistemas termodinámicos en el estado estable pueden ser modelados por medio de una red escalera, cuyos peldaños se componen de las fuentes de calor, y que se encuentran unidos entre sí por medio de las resistencias térmicas. En la Figura 1 se muestra la red escalera para un caso típico de instalación con cables de potencia aislados.

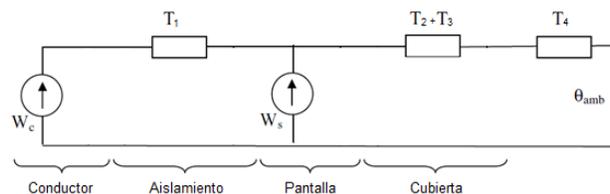


Figura 1. Red escalera para cables de potencia aislados

donde W_c es el calor de pérdidas por efecto joule en el núcleo conductor, W_s las pérdidas totales por corrientes circulantes en las pantallas y cubiertas metálicas; T_1 es la resistencia térmica del aislamiento; las resistencias térmicas T_1 y T_2 corresponden al aislamiento entre la pantalla y la armadura, y a la chaqueta, respectivamente; y T_4 es la resistencia térmica exterior, que varía en función del tipo de instalación.

4. CÁLCULO DE LA AMPACIDAD

A partir del diagrama escalera presentado en la sección anterior, conforme a la primera ley de la termodinámica y a los parámetros establecidos en IEC (2006), la expresión general para el cálculo de la ampacidad de cables de potencia en diferentes condiciones de instalación se puede escribir como

$$\Delta\theta = \left(I^2 R + \frac{W_d}{2} \right) T_1 + [I^2 R(1 + \lambda_1) + W_d] n T_2 + [I^2 R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] n (T_3 + T_4) \quad (2)$$

donde $\Delta\theta$ es el aumento permisible de temperatura en el conductor, R la resistencia eléctrica, n es el número de conductores activos de igual tamaño al interior del cable y W_d las pérdida por efectos dieléctricos, que para efectos prácticos pueden ser despreciadas. Moller (2001).

La ampacidad de los cables de potencia puede ser encontrada a partir de la Ecuación 2; teniendo en cuenta cada una de las variaciones que deben ser introducidas en las resistencias

térmicas, de acuerdo a los tipos de cable y ambientes de instalación.

Para la evaluación del impacto de las condiciones de instalación de los conductores de potencia aislados, sobre la capacidad de transporte de corriente de los mismos, se realizó un análisis de sensibilidad de la ampacidad respecto a los parámetros más relevantes. En la Tabla 2 se muestra el resumen de resultados del estudio realizado.

5. CÁLCULO DE LA AMPACIDAD

Se deben realizar los cálculos de ampacidad para cada instalación que involucre la utilización de cables de potencia aislados, con el fin de garantizar la seguridad de las personas y evitar el deterioro acelerado de los materiales que componen al cable. Además de ello, un buen cálculo de la capacidad de transporte de corriente, permite optimizar la selección tanto técnica como económicamente.

Cuando se realiza la selección de los cables de potencia para ser implementados en todo tipo de instalación, es necesario tener en cuenta parámetros de diseño adicionales a la ampacidad; como lo son las corrientes de cortocircuito y la regulación de tensión. En sistemas con grandes longitudes de cable y niveles de cortocircuito elevados, es posible que las secciones de los conductores deban ser incrementadas para mitigar sus efectos.

Tabla 2. Resumen de resultados

Condición	Efecto
Incremento de la profundidad de enterramiento.	Reducción de la capacidad de transporte de corriente.
Incremento de la resistividad térmica del terreno.	Reducción de la capacidad de transporte de corriente.
Incremento de la temperatura de la tierra.	Reducción de la capacidad de transporte de corriente.
Incremento de la separación entre conductores.	Aumento de la capacidad de transporte de corriente.
	Aumento de las pérdidas por circulación de corrientes en las pantallas.
Circulación de corrientes por la pantalla.	Reducción de la capacidad de transporte de corriente.
Incremento del área transversal del conductor.	Aumento de la sensibilidad de la ampacidad a la variación en los parámetros de la instalación.

Cuando se consultan catálogos o manuales (Handbooks) de fabricantes de cables, es indispensable tener en cuenta las anotaciones que se hacen acerca de cada una de las recomendaciones, teniendo especial cuidado de las condiciones con que fue realizado el cálculo de las capacidades y/o distancias allí presentadas. Las variaciones que pueden presentarse en los valores de resistividad térmica de la tierra, temperatura del suelo, profundidad de enterramiento, tipo de conexionado de las pantallas, entre otras, pueden generar variaciones de magnitudes considerables, y que pueden causar dimensionamientos que comprometan la seguridad de la instalación, o la economía del proyecto. En el Anexo C se presentan curvas de sensibilidad de la ampacidad a algunos de los parámetros aquí mencionados.

Con el objetivo de maximizar la capacidad del cable se debe realizar una evaluación de los parámetros técnicos, las condiciones de seguridad y el impacto económico; que permitan optimizar la instalación mediante la implementación de las siguientes estrategias para la reducción de los efectos sobre la ampacidad:

- Reducción de la profundidad de enterramiento.
- Aumento de la separación de los conductores activos.
- Reducción de la resistividad térmica del terreno (Mediante el reemplazo del material del material de relleno).
- Utilización de haces de cables de potencia para la reducción de la susceptibilidad de la ampacidad ante los cambios en las condiciones de instalación.

6. CONCLUSIONES

Se desarrolló y clarificó una metodología para el cálculo de la capacidad de corriente de cables de potencia aislados en diferentes condiciones de instalación; tales como cables aéreos, directamente enterrados, al interior de tuberías, túneles y bancos de ductos.

Se identificaron de forma simple y sistemática los criterios para el dimensionamiento de conductores eléctricos de potencia en diferentes condiciones de instalación.

Se determinaron de forma clara las propiedades termodinámicas de los materiales de construcción del conjunto de elementos que componen el cable, así como de los diferentes ambientes a los que estos puedan verse expuestos.

Se estableció un modelo termodinámico para las siguientes condiciones de instalación: Cables directamente enterrados, aéreos y en bandejas, en ductos, bancos de ductos y túneles.

Se establecieron las relaciones respectivas entre cada uno de las características de la instalación, con la ampacidad de cables de potencia aislados, analizándose las sensibilidades de la capacidad de acuerdo a la variación en cada uno los parámetros.

Se identificaron estrategias simples y efectivas para la optimización de la capacidad de los conductores, y se presentaron recomendaciones al respecto.

AGRADECIMIENTO

Msc. Boris Darío Pérez Durán, por su apoyo y orientación para la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

- ANDERS, George J. Rating of Electric Power Cables, Ampacity computations for transmission, distribution and industrial applications. IEEE Press, 1997.
- IEC. International Standard 60287-1-1. *Calculation of the current rating, current rating equation (100% load factor) and calculation of losses*. International Electrotechnical Commission. Second edition. 2006.
- IEC. International Standard 60287-2-1. *Calculation of the current rating, Thermal resistance – Calculation of thermal resistance*. International Electrotechnical Commission. Second edition. 1994.
- KREITH, Frank, Mark S. Bohn. Principios de transferencia de calor. Sexta edición. Thomson Learning. México 2001.
- MØLLER Jensen, Morten. Overload Capacity of Polymer Insulated Medium Voltage Cables. Master's Thesis. Department of Electrical Engineering, Technical University of Denmark. March 2001. Recuperado el 04 de agosto de 2013 de http://www.cee.elektro.dtu.dk/education/student_projects/11/mmj

AUTORES



Ricardo León Mesa Pérez. Nace en Jardín-Antioquia, Colombia, el 4 de julio de 1990. Se gradúa del colegio Liceo Cartago en el municipio de Cartago – Valle del Cauca en el año 2007. Culmina su plan de estudios de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Pontificia Bolivariana en la ciudad de Medellín – Antioquia, Colombia en el año 2013.

Actualmente labora en el cargo de Auxiliar de Ingeniería para el área de proyectos tipo EPC de transmisión y distribución en la firma HVM Ingenieros.



Andrés Mauricio Henao Restrepo. Nace el 7 de octubre de 1986, en la ciudad de Medellín, departamento de Antioquia-Colombia. Realizo sus estudios secundarios en la institución educativa INEM José Félix de Restrepo en Medellín graduándose de ésta en diciembre de 2003, al año siguiente realiza un curso de mantenimiento de microcomputadores dirigido por ingenieros de la

asociación de ingenieros electricistas de la Universidad de Antioquia (AIE). Culmina su plan de estudios de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Pontificia Bolivariana en la ciudad de Medellín – Antioquia, Colombia en el año 2013.