

- Posición del depósito conservador para facilitar labores de acceso para montaje, inspección y ensayos, en el caso de pasatapas del tipo diferente a aceite-aire.

- Normalización de válvulas para instalación de equipo de monitorización de aceite.

- Sistemas de refrigeración mediante aerorefrigerantes: normalización de edificios y filosofía N-1.  
 • Estudio para prever la forma de realizar ensayos eléctricos de mantenimiento predictivo durante la vida del transformador en el caso de pasatapas (ej. SF6) que imposibilitan la accesibilidad de modo sencillo a los terminales del transformador para la realización de los ensayos. Se aportará el caso de ensayos eléctricos de resistencia óhmica, relación de transformación, resistencia de aislamiento, tangente delta, capacidad, etc., previos a la puesta en servicio y que servirán de futura huella, de un transformador 220/20kV 50MVA con bornas aceite-SF6 en AT y enchufables en MT, ensayos realizados desde la posición GIS de interruptor de trafo, sin necesidad de desabrochar la máquina.

• Sistemas de protección y control: nueva estrategia de Iberdrola de incluir dentro de la lógica existente de protección y control actividades de mantenimiento y supervisión. Ejemplo: nueva protección de imagen térmica y evaluación de vida residual del transformador en base a guías de carga.

• Definición de sistemas de seguridad para trabajo en altura (sobre el transformador).

•...

En resumen: el papel describirá cual es la relación a nivel organizativo del personal técnico de Iberdrola Distribución involucrado en la normalización y el mantenimiento de transformadores de potencia, y como se han resuelto desde la fase de definición del equipo aspectos básicos que posibilitarán la realización eficaz de las futuras actividades de mantenimiento. Como se explicará ambas actividades, NORMALIZACIÓN (definición de los equipos) e INGENIERIA DE MANTENIMIENTO (definición de las gamas de mantenimiento), están centralizadas en Iberdrola en una misma organización, lo que posibilita indudables sinergias.

## 03. Especificación de nuevos transformadores de potencia Aspectos básicos de mantenimiento

H. Gago García, J. Vadillo Iturrioz, E. Sierra Gomez, J. Aguirre Odrizola y M. Martínez Ronderos  
 Iberdrola Distribución (España)

**Study committee A2.  
 Preferential subject: PS2 Reliability and risk assessment of transformers in service**

En los últimos años se ha producido en Iberdrola un cambio de filosofía en la especificación de los nuevos transformadores de potencia de sus instalaciones, motivado por cambios tecnológicos en equipos y accesorios y cambios de diseño de las subestaciones en que irán instalados. En este cambio de referenciales se han primado aspectos de mejora de la fiabilidad y mantenimiento de los equipos durante su vida útil.

Un aspecto importante en este cambio de especificación ha sido el cambio sustancial en la tipología de las subestaciones, motivado en gran medida por la necesidad de reducir el espacio de ocupación en planta de las mismas, lo que esta llevando, al menos en los grandes núcleos urbanos, a diseñar subestaciones de interior con aparataje tipo GIS, lo cual ha dado lugar en Iberdrola a un cambio importante en la especificación de sus transformadores de potencia para adaptarse a las nuevas necesidades de implantación dentro de edificios, con requisitos especiales en cuanto a dimensiones, refrigeración, tipo de pasatapas, etc.

Dentro de las actividades de mantenimiento de los transformadores de potencia, existen multitud de aspectos que deben ser tenidos en cuenta y resueltos en la fase de normalización de los equipos. Este papel explicará como ha resuelto Iberdrola este binomio Normalización-Mantenimiento dentro de su estructura organizativa. A continuación se recogen a modo de resumen algunos de los aspectos constructivos y de gestión de vida tenidos en cuenta en la normalización de los transformadores de potencia para a realizar de un modo eficiente las futuras labores de mantenimiento:

- Normalización de pasatapas:
- Definición de especificación única de pasatapas por tipo de transformador, lo que permite su instalación en cualquier máquina de Iberdrola en caso de incidencia.
- Intercambiabilidad de pasatapas: normalización de un pasatapas 100% intercambiable y que permita su sustitución por cambio de función: ej. Sustitución aceite-aire por aceite-enchufable en media tensión.
- Normalización de pasatapas de papel impregnado en resina (RIP) para todos los niveles de tensión. Mejora de fiabilidad.
- Cambiadores de tomas en carga:
- Previsión de equipos y accesorios disponibles en la subestación para futuras labores de mantenimiento de cambiadores de tomas en carga.
- Normalización de cambiadores de tomas en carga con bajos requerimientos de mantenimiento.
- Revisión de aspectos constructivos de detalle:

## 04. Cálculo de capacidad de transporte de líneas subterráneas que comparten canalización

F. M. Echavarrin y L. Rouco  
 Universidad Pontificia Comillas

E. Navarro y A. González  
 Socolin

J. P. Fernández  
 Unión Fenosa Distribución

**Study Committee: B1 Insulated Cables  
 Preferential Subject: PS1 Technical challenges overcome in newly installed underground and submarine transmission systems**

En los últimos años, el número de líneas eléctricas de alta tensión soterradas ha aumentado considerablemente. Este aumento es debido fundamentalmente a la expansión de las grandes ciudades, al aumento de las cargas y la presión social por un menor impacto ambiental. Esta proliferación de líneas soterradas implica optimizar tanto su diseño como su explotación con objeto de maximizar sus capacidades de transporte. El límite que marca dicha capacidad de transporte es la temperatura límite que puede alcanzarse en cada caso el conductor de cada fase de cada línea. Esta temperatura será función no sólo de las pérdidas de la propia fase, sino también de las pérdidas de las otras fases y de las otras líneas.

La metodología empleada habitualmente en el cálculo de capacidad de transporte de líneas soterradas se encuentra recogida en las normas UNE 21144. Este conjunto de normas UNE se encuentra a su vez basado en las normas internacionales CEI-IEC 60287, respectivamente. Dicha metodología se basa fundamentalmente en un modelo discreto de la instalación, basado en la analogía eléctrica de las ecuaciones de Fourier. La analogía

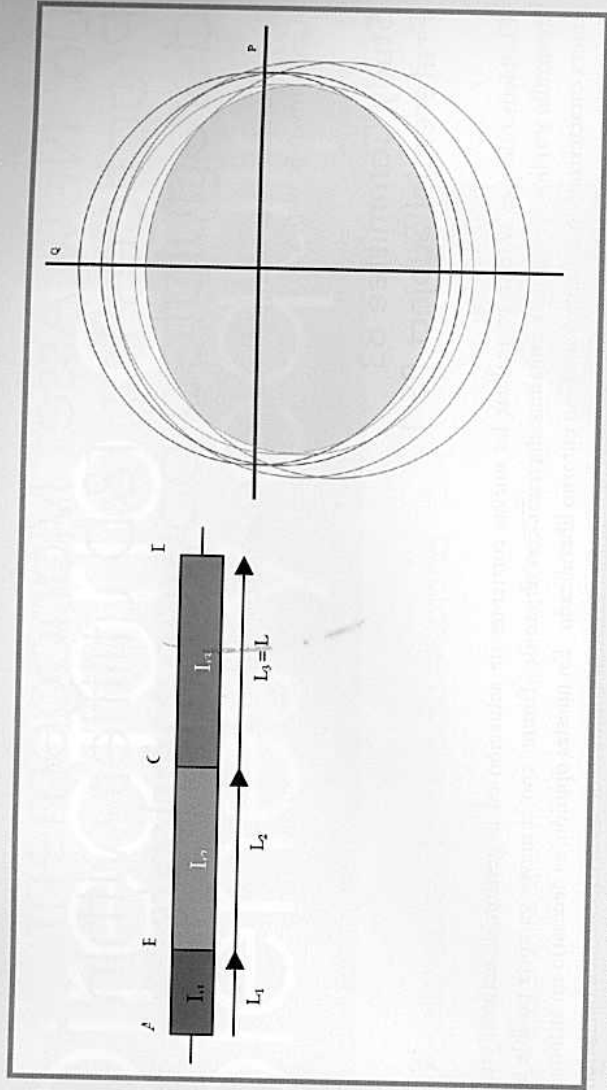


Figura 1. Cable aislado con diferentes límites

consiste en considerar cada una de las diferentes capas que separan el conductor del exterior de la instalación como una resistencia térmica. Este tren de resistencias en serie es atravesado por el flujo de calor asociado a la evacuación de las pérdidas de potencia activa del conductor. Al atravesar dicho flujo de calor las diferentes resistencias térmicas que va encontrando a su paso, va provocando gradientes de temperatura. La suma de todos los gradientes de temperatura determina la diferencia total de temperatura existente entre el conductor y la temperatura ambiente.

La precisión de esta metodología depende fundamentalmente del cálculo de las resistencias térmicas correspondientes a cada una de las capas de cada fase, desde el conductor hasta el exterior. Éste cálculo dependerá del medio o del material del que se compone cada capa. En el caso de medios donde transmisión la transmisión de calor se realiza mediante convección y/o radiación (galerías, tubos sin relleno, ...), el cálculo de las resistencias térmicas correspondientes se realiza mediante fórmulas empíricas. Sin embargo, cuando la transmisión de calor se realiza por conducción, las fórmulas empleadas se basan en el cálculo de factores de forma. El empleo de los factores de forma implica una serie de simplificaciones, tales como considerar isoterms y sin generación interna de calor las diferentes capas entre las que se modelan las resistencias. Por otro lado, el empleo de resistencias térmicas dificulta el modelado de la influencia que tienen las pérdidas de una determinada fase en la temperatura de las otras fases y de las otras líneas. El empleo del modelo de conducción basado en resistencias térmicas implica por tanto pérdida de precisión en los resultados, lo cual se puede traducir en un cálculo inexacto de la capacidad de transporte de las instalaciones.

El presente artículo presenta una metodología para el cálculo de la capacidad de transporte de instalaciones soterradas basada en modelos continuos de conducción. El modelo se basa en considerar la distribución real de temperaturas en toda la instalación. La distribución total se obtiene como superposición de las distribuciones parciales debidas a cada una de las fases de cada una de las líneas de la instalación. Por otra parte, los modelos de no-conducción se pueden hacer siguiendo la norma que corresponda, obteniendo una determinada conductividad térmica equivalente a partir de la resistencia térmica especificada por la norma, y aplicando posteriormente modelos de conducción equivalentes. La metodología desarrollada en el presente artículo cuenta con determinadas ventajas con respecto de la metodología recogida en las normas CEI-IEC y UNE. Entre estas ventajas, destaca el disponer de un modelo más preciso de interacción térmica entre las diferentes fases de las diferentes líneas de la instalación, el poder localizar los puntos calientes de la instalación, o el considerar las pérdidas de cada capa como elementos con generación interna de calor.

Si bien las pérdidas producidas en los conductores son una fuente fundamental de calor a considerar a la hora de evaluar la temperatura de funcionamiento de la instalación, resultan también relevantes las pérdidas de potencia que aparecen en las pantallas de los cables. Estas pérdidas son debidas a las corrientes que se inducen en las pantallas resultado del acoplamiento electromagnético existente entre conductores y pantallas. Por lo tanto, estas pérdidas en pantalla dependerán fundamentalmente del tipo de puesta a tierra existente en la instalación. Las normas CEI-IEC y UNE evalúan las pérdidas en las pantallas a partir de un determinado coeficiente multiplicado por las pérdidas del conductor correspondiente. No tiene por tanto en cuenta la posible influencia en una determinada pantalla de las corrientes que circulan en el resto de conductores. Con el objeto de obtener mayor precisión en el cálculo de corrientes por pantallas, en el presente artículo se propone el empleo de modelos eléctricos reales para evaluar la relación existente entre las corrientes de los diferentes conductores y las que se inducen en las diferentes pantallas por acoplamiento electromagnético, en función de los diferentes tipos de puesta a tierra que pueden emplearse en instalaciones soterradas.

## 05. Área de operación de potencia activa y reactiva de cables aislados

M. Márquez y G. Álvarez

### SC B1: Insulated Cables. PS3

Durante la operación normal de un cable aislado, no siempre resulta posible utilizar el concepto de capacidad de transporte tal y como es usado en líneas aéreas.

La intensidad que determina el límite térmico de un cable aislado no siempre fija una capacidad de transporte (MVA), si no que estos amperios traducidos a MVA únicamente establecen una cota muy superior de la potencia activa y reactiva transportable térmicamente. Esto es debido a la gran cantidad de energía que se acumula a lo largo de un cable aislado, la cual da lugar a que valores de intensidad térmicamente admisible en un extremo del cable, no lo sean en alguna otra sección. Este aspecto diferencia a los cables aislados operados en la red eléctrica de transporte de las líneas aéreas en cable desnudo o de los cables aislados operados en la red eléctrica de distribución. La energía acumulada en el cable aislado dependerá fundamentalmente de la tensión de explotación, dimensiones de su sección y la longitud de la línea.

Así, en la explotación de un cable aislado no va a ser siempre posible usar el concepto de capacidad de transporte, definido como aquellos MVA máximos inyectables en un extremo que hacen no superar el límite térmico, si no que resulta necesario de cara a la operación, definir aquellos valores de P y Q que presentes en un extremo del cable, no provocan intensidades superiores al límite térmico en ninguna sección del cable aislado, dando lugar al concepto de área de operación PQ, que sustituye al concepto de capacidad de transporte.

El área de operación PQ deja de ser los puntos interiores a una circunferencia centrada en el origen y de radio los MVA resultantes de la intensidad térmica admisible (concepto tradicional de capacidad de transporte), para ser los puntos interiores a la intersección de dos curvas. La primera de ellas es una circunferencia definida por las condiciones térmicas en un extremo y la segunda curva (con forma de circunferencia deformada), la definida por las condiciones térmicas en otro extremo, y resultante de aplicar sobre el cable aislado las ecuaciones en parámetros distribuidos de las líneas, dando lugar dicha intersección a una forma lenticular. Este razonamiento es extensible a un cable aislado con diferentes límites térmicos a lo largo de su longitud. Dependiendo de la longitud del cable, se puede dar la circunstancia de no poder operar el cable aislado en condiciones PQ admisibles térmicamente en un extremo (longitud máxima de operación), por ser inadmisibles térmicamente las condiciones en alguno de los tramos. Antes de llegar a esa longitud crítica a nivel de operación, se llega a una longitud crítica económicamente, entendida como aquella a la cual la energía acumulada por el cable limita mucho la capacidad de transporte dejando de ser rentable su instalación.

A lo largo del artículo se profundiza en el concepto de área de operación PQ y en la pérdida de zona PQ operable de un cable aislado frente al concepto de capacidad de transporte, debido a la energía acumulada en él, describiendo ejemplos de instalaciones reales donde la pérdida de área de operación PQ representa hasta un 30% de la capacidad de transporte. Se analizará también el caso de la interconexión España-Marruecos en 400 kV.

Se analizan las ventajas e inconvenientes del uso de dispositivos de compensación de reactiva que desplacen el punto de operación a la entrada del cable corrigiéndose el problema de la pérdida del área de operación, y pudiendo así mismo usarse para operar el cable aislado en zona de mínimas pérdidas óhmicas.