

HERRAMIENTA METAHEURÍSTICA DE ASISTENCIA A LA TOMA DE DECISIONES DE INVERSIÓN EN RENOVACIÓN DE CABLES MT, CON DATOS DISPONIBLES DE LA SMART GRID

Borja Barricarte Navas, Ingeniero I+D, Instituto Tecnológico de la Energía (ITE)

Guillermo Allende Aranguiz, Responsable Estandarización, i-DE, Grupo Iberdrola

Lorena Jiménez Chillarón, Ingeniero I+D, Instituto Tecnológico de la Energía (ITE)

Oscar Rodríguez Gutiérrez, Estandarización, i-DE, Grupo Iberdrola

Luis Carlos Bonfil Marti, Responsable Mantenimiento, Región Este i-DE, Grupo Iberdrola

David Gómez Arciniega, Responsable Mantenimiento de red, Región Este i-DE, Grupo Iberdrola

José Luis Picard López, Responsable Planificación de red, Región Este i-DE, Grupo Iberdrola

Marta García Pellicer, Directora, Ingeniero I+D, Instituto Tecnológico de la Energía (ITE)

Resumen: Para atenuar el impacto de las averías en red subterránea MT sobre la continuidad del suministro eléctrico, desde su planificación de renovación, operación y mantenimiento, se desarrolla una herramienta de apoyo a la toma de decisiones. La herramienta se aplica en cables MT de papel impregnado en aceite (PILC) a renovar y así planificar la adecuada priorización. Se proporciona como resultado un Índice de Priorización que se atribuye a cada tramo PILC a renovar en la Región Este de España de i-DE. Es un índice actualizado con el registro sistemático de incidencias y el avance en la ejecución de la renovación planificada. Centra la atención en cables cercanos al final de vida útil, permitiendo anticipar el fallo en base a su condición y estado.

Palabras clave: Renovación, cable PILC, asistencia toma decisiones, herramienta metaheurística.

INTRODUCCIÓN

Las compañías eléctricas, tanto en España como en otros países, se enfrentan al reto tecnológico de una creciente demanda de suministro eléctrico. Mientras tanto, los cables de alimentación subterráneos instalados van envejeciendo en todas las redes, especialmente en las grandes ciudades y lugares en donde se adoptó de manera inicial o primigenia la modalidad subterránea de red en Media Tensión (MT). Con el objetivo de preservar la operación y servicio de la infraestructura de distribución eléctrica de cables subterráneos MT, así como optimizar la planificación de su renovación regulada, preservando la fiabilidad reglada de su servicio (calidad y seguridad del abastecimiento eléctrico), se hace necesario disponer de una herramienta de apoyo para establecer su ordenada priorización en la toma de decisiones.

Son muchas las distribuidoras y transportistas eléctricas, que se plantean la implantación de un índice de salud para determinar la condición de sus activos: GB Distribution Networks Operator [1], EDF, [2], [4], Stedin [5]. En el caso de i-DE, Grupo Iberdrola, ya hace algún tiempo que se evidenció la necesidad de implantar una metodología adecuada para el mantenimiento optimizado de los activos, debido principalmente a priorización de necesidades dentro de la limitación de la capacidad para su atención material en tiempo y dentro de un presupuesto finito asignado [6].

Un índice de salud es una herramienta que, alimentada desde los datos de diversas variables de entrada [7] (parámetros de diseño o características técnicas, averías registradas, condiciones de operación, inspecciones de mantenimiento), establece el estado del activo. Es decir, cómo se encuentra el activo en dicho momento. Se trata de una valoración absoluta.

La herramienta que se propone y describe en este artículo permite establecer el estado del activo.

La estructura que se sigue es la siguiente: origen de la herramienta, datos disponibles de la Smart Grid, metodología, resultados y conclusiones.

HERRAMIENTA DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES

Se presenta una herramienta automatizada que se alimenta del registro sistemático de incidencias y estado topológico de la red. Dicha herramienta permite asignar un índice de prioridad de sustitución a cada tramo de cable MT PILC a renovar en la red de distribución eléctrica de i-DE en su Región Este de España.

Cabe mencionar que i-DE considera tres subdivisiones en la infraestructura eléctrica, correspondientes a: línea, tramo (parte de línea entre centros de transformación) y segmento (parte de tramo separada por uno o varios empalmes o cambios de sección).

Origen

La herramienta nace debido a la necesidad de atenuar el impacto de las averías en la calidad y seguridad del suministro en grandes núcleos de población, a través de una mejor planificación de las acciones de renovación, operación y mantenimiento.

Los dos objetivos principales que persigue son:

1. Disponer de una **herramienta que permita mejorar la priorización de la renovación de activos** anticipándose a su fallo o al final de su vida. Es decir, generar el conocimiento necesario para mejorar el **criterio de priorización** habitual, en base al número de averías registradas en los cables subterráneos PILC de la infraestructura de Media Tensión en la ciudad de Valencia.

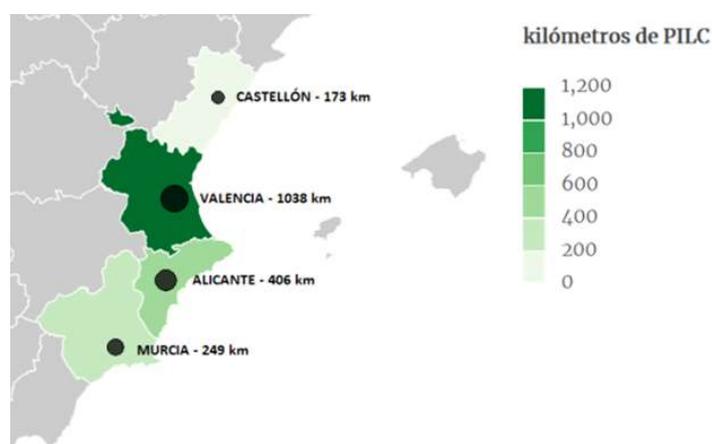


Figura 1. Mapa conceptual de los kilómetros de cable tipo PILC, por provincias, en la Región Este de i-DE en España.

2. Realizar un **aprovechamiento de los nuevos datos de la red** inteligente para la **gestión** de dichos activos, preservando tanto su adecuada operación como su servicio, con el fin de **optimizar las inversiones** reguladas en la infraestructura referida, así como la **fiabilidad de la red** de distribución, a través de la calidad y seguridad de su abastecimiento eléctrico.

Datos disponibles de la Smart Grid

La información relativa al comportamiento y estado de la red de distribución eléctrica que como Smart Grid se registra en la actualidad y que se utiliza en la herramienta se puede agrupar en tres grandes bloques:

- Datos de Averías: Contemplan las incidencias registradas en la red: fecha de la avería, localización por línea y tramo, tipo de cable implicado, tipo de fallo y causa, y año de instalación del segmento implicado.
- Datos de topología de red: Se identifica la composición de cada línea y tramo, indicando los CTs entre los que se encuentran los diferentes segmentos existentes, la tipología de cable, su longitud, año de instalación y tensión nominal de explotación.
- Datos de la carga de la red: Información de la corriente horaria de las líneas en cabecera de subestación y, de forma progresiva, en los centros de reparto y transformación BT con supervisión avanzada, o bien por agregación de consumos.

Adicionalmente, a través de la colaboración ITE – i-DE también se han llevado a cabo otras actividades destinadas a aumentar el conocimiento sobre la degradación y diagnóstico de la condición de los cables de tecnología PILC, con la finalidad de mejorar la herramienta de apoyo a la toma de decisiones.

Entre estas actividades destacan ensayos eléctricos de tangente delta y ensayos químicos de espectroscopía infrarroja (FTIR), análisis termogravimétrico (TGA) y contenido en humedad sobre muestras de cable PILC retiradas de servicio,

junto con pilotos de monitorización de descargas parciales on-line en varias líneas de la ciudad de Valencia, evaluando su envejecimiento con la tecnología ofrecida por DIAEL y DNV-GL para anticipar la localización de potenciales averías, junto con el margen temporal para su renovación.

Además, se encuentran en desarrollo otras dos iniciativas: la posible aplicación de la nueva generación de relés de protección en cabecera de línea MT capaces de detectar las faltas intermitentes; y el posible diagnóstico del estado de envejecimiento del cable MT y sus accesorios (empalmes y terminales) a partir del registro de la evolución de la impedancia al paso de la señal de comunicaciones de PLC que se puede transmitir a través de los mismos.

Además de toda esta información actualmente disponible, gracias a los esfuerzos en el despliegue de las tecnologías de digitalización de las redes de distribución eléctrica y, en consecuencia, de su evolución progresiva efectiva hacia Smart Grids, éstas podrán contribuir como plataformas habilitadoras de nuevos datos para alimentar los modelos y algoritmos, y mejorar los resultados aportados por la herramienta de apoyo a la toma de decisiones. Hay que tener en cuenta que la disponibilidad de datos y su consistencia asociada (fiabilidad) son aspectos clave para su tratamiento matemático y, con ello, el mejor funcionamiento de este tipo de herramientas [3].

Metodología

La herramienta de apoyo a la toma de decisiones se ha desarrollado para cables subterráneos de Media Tensión de aislamiento de papel impregnado en aceite (PILC). La metodología, con tecnología algorítmica del ITE (Instituto Tecnológico de la Energía), está basada en la determinación de un índice de priorización (IP) para cada tramo PILC de la red subterránea. El cálculo se realiza a partir de una combinación lineal de ocho variables y la ponderación según su importancia a través de unos pesos asociados, mediante la siguiente ecuación, que se calcula para cada tramo de línea, i :

$$IP_i = \sum_{j=1}^8 \psi_{i,j} \cdot P_j \quad (1)$$

Con:

| | |
|--------------|---|
| IP_i | Valor del índice de priorización del tramo i |
| $\psi_{i,j}$ | Valor normalizado de la variable ψ_j para el tramo i |
| P_j | Peso asociado a la variable $\psi_{i,j}$ |
| i | Tramo donde se estima el índice de priorización |
| j | Cada una de las variables empleadas en el modelo |

Los valores de índice de priorización (IP) obtenidos son un número comprendido entre cero y uno, de manera que reflejan la urgencia en la sustitución de cada tramo PILC incluido en la herramienta, siendo uno el más prioritario y cero el menos prioritario de cara a su renovación.

La herramienta permite establecer una comparación relativa entre los diferentes tramos y focalizar la disponibilidad de medios y presupuesto en aquellos que presentan una mayor probabilidad de fallo.

Tras la ejecución de las sustituciones, los tramos finalmente renovados ya no son considerados y se recalculan los valores automáticamente, prescindiendo de ellos.

El esquema con el proceso de cálculo realizado se esquematiza en la siguiente figura:

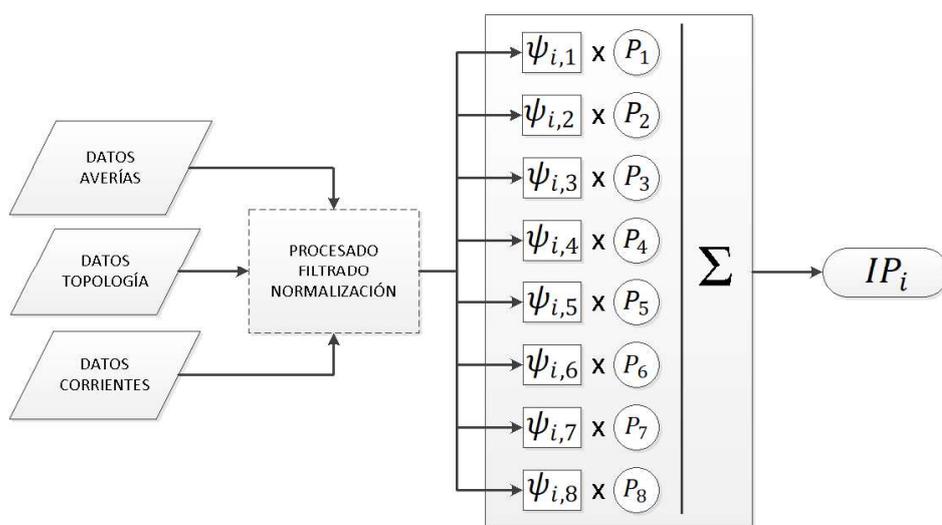


Figura 2. Esquema de cálculo del índice de priorización.

Debe apreciarse que las diferentes variables que forman parte del modelo resultan de un preprocesado de cada tipo de datos provenientes de las bases de datos que proporciona la Smart Grid. Por ello se requiere la aplicación de algoritmos de procesado de la información, filtrado y normalización de las variables, como se comenta en el siguiente apartado.

Variables de entrada

La selección de variables de entrada forma parte del concepto metaheurístico de la herramienta. Se han realizado análisis exhaustivos de los datos disponibles para establecer cuáles pueden contribuir como una indicación del estado del cable y/o su probabilidad de fallo. Tras el preproceso de datos se ha obtenido información útil con las siguientes ocho variables, para cada tramo i :

| j | Variable | Nomenclatura |
|---|-----------------------------------|--------------|
| 1 | Tasa de fallo prevista | $\psi_{i,1}$ |
| 2 | Averías anuales/100 km de papel | $\psi_{i,2}$ |
| 3 | Frecuencia y evolución de averías | $\psi_{i,3}$ |
| 4 | Tipología de cable | $\psi_{i,4}$ |
| 5 | Nº de accesorios/km papel | $\psi_{i,5}$ |
| 6 | Tensión de explotación | $\psi_{i,6}$ |
| 7 | Variación corriente horaria | $\psi_{i,7}$ |
| 8 | Faltas intermitentes | $\psi_{i,8}$ |

Tabla I. Variables de entrada del modelo y su nomenclatura.

Se describe, a modo de ejemplo, el proceso de obtención de la variable tasa de fallo ($\psi_{i,1}$) prevista que tiene en cuenta el modelizado de los tiempos de fallo de la infraestructura de Media Tensión de PILC como una distribución estadística de Weibull. Para ello se utilizan como datos la información de averías (fecha de la incidencia y año de instalación del segmento averiado) e información topológica de red (longitud y año de instalación del segmento PILC).

El proceso de cálculo de esta variable tiene dos partes diferenciadas. Por un lado, es necesario estimar una edad representativa de la antigüedad de cada tramo. Esto se realiza a través del año de instalación promedio de los segmentos PILC que lo configuran, ponderado en función de sus longitudes. Una vez conocido el año de instalación promedio de cada tramo, la obtención de la edad promedio del mismo se establece por diferencia con el año de referencia de cálculo del índice de priorización.

Por otro lado, a partir del mencionado análisis estadístico de la edad promedio referida de los cables, se pueden parametrizar las curvas a través de los coeficientes de factor de escala (θ) y forma (β) [8]. La información de dichos coeficientes, junto con la edad estimada de los tramos PILC, se emplea para calcular la curva representativa de la tasa de fallo prevista.

Tras el proceso de obtención de los valores de las diferentes variables es necesario una etapa de filtrado, y por último, otra etapa de normalizado.

La primera de ellas tiene la finalidad de corregir los valores extremos (o atípicos) que puedan distorsionar la distribución de resultados y por tanto, alterar la comparación entre unos y otros. La metodología seguida está basada en los diagramas de cajas de John W. Tukey [9], de manera que se saturan aquellos valores que superan el límite superior (constituido como la suma del tercer cuartil más 1.5 veces el rango intercuartílico), al valor de dicho límite.

Una vez realizado el filtrado de valores atípicos, la etapa de normalizado permite definir una escala común de manera que los valores obtenidos para la variable calculada sean comparables con el resto de variables del modelo. La normalización se efectúa a través de un escalado sobre el valor máximo del conjunto de la infraestructura PILC.

Finalmente, se obtiene el valor normalizado de la variable de entrada correspondiente para cada tramo i considerado en el modelo de priorización.

RESULTADOS

Para ilustrar parte de los resultados obtenidos, se presenta un listado ordenado de los tramos i de línea en función del valor de índice de priorización obtenido (IP_i), de mayor a menor prioridad.

Para facilitar al equipo que realiza la gestión de la renovación, la interpretación de los resultados, se asigna un código de colores “semafórico” a cada uno de los tramos de tal forma que se identifiquen claramente las categorías de prioridad (ver figura 3):

- Color rojo: Tramos con mayor prioridad de renovación
- Color amarillo: Tramos con prioridad intermedia de renovación
- Color verde: tramos con menor prioridad de renovación

| POSICION IP | ID TRAMO | VALOR IP | METROS | METROS ACUMULADOS |
|-------------|----------|----------|--------|-------------------|
| 1 | 9875 | 0.97 | 117 | 117 |
| 2 | 10136 | 0.96 | 842 | 959 |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| 540 | 11745 | 0.73 | 731 | 99.897 |
| 541 | 13612 | 0.72 | 90 | 99.987 |
| 542 | 14122 | 0.71 | 144 | 100.131 |
| 543 | 11902 | 0.71 | 57 | 100.188 |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| 1332 | 1503070 | 0.44 | 184 | 199.662 |
| 1333 | 10143 | 0.43 | 323 | 199.985 |
| 1334 | 1512340 | 0.42 | 69 | 200.054 |
| 1335 | 12506 | 0.42 | 202 | 200.256 |
| ... | ... | ... | ... | ... |



Figura 3. Ejemplo de listado de tramos de línea ordenados, con sus respectivas códigos de prioridad.

El límite entre las diferentes categorías de prioridad se determina en función del criterio de i-DE a partir de la responsabilidad operativa en la red que desempeña cada cable/tramo que se pondera mediante el análisis integral de riesgos en base a la potencia no garantizada (PNG) que provocaría su avería en contingencia de fallo simple (n-1), junto con la previsión de longitudes (km) a sustituir en las próximas partidas de renovación.

Hasta la fecha, la aplicación de la herramienta ha estado centrada en la región metropolitana de la ciudad de Valencia. Como punto a destacar, cabe mencionar que se ha realizado un seguimiento de las averías acontecidas en los últimos años en dicha ciudad, coincidiendo la mayor concentración de las mismas en varias líneas identificadas con las primeras posiciones del listado de índice de priorización obtenido (color rojo – mayor prioridad de sustitución). Estas primeras

aproximaciones constatan la utilidad de la herramienta como medida para la atenuación del impacto de las averías, al enfocar el esfuerzo de las actuaciones de renovación sobre los tramos priorizados con esta herramienta.

CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una herramienta para la ayuda a la toma de decisiones en la renovación de cables subterráneos de Media Tensión de aislamiento de papel impregnado en aceite (PILC). Dicha herramienta, articulada a través de un índice de priorización, permite planificar la renovación progresiva de los tramos focalizando los recursos en aquellos cables cercanos al final de su vida útil, permitiendo de esta manera atenuar el impacto por avería.

Actualmente, las compañías eléctricas están implantando progresivamente la digitalización en sus redes, y su transición hacia las denominadas Smart Grids está siendo notable. Este hecho abre las puertas a nuevas posibilidades de explotación de los datos emergentes de la red. La disponibilidad de herramientas como la presentada en este artículo contribuye a la valorización del dato que, mediante la aplicación de determinados algoritmos y reglas, permite al gestor disponer de mayor información sobre el estado de sus activos de red, permitiendo una mejor gestión de los mismos, y de manera integrada con el conocimiento propio de la red, desde la operación y planificación de la misma.

Como próximos pasos de desarrollo se continuará con el proceso de perfeccionamiento de la herramienta a través de la captación de nuevos datos de la Smart Grid requeridos por los algoritmos incorporados, y se efectuará la extensión metodológica de la herramienta a otras regiones y activos. Además, se encuentran en desarrollo otras dos iniciativas: la posible aplicación funcional de los relés de línea MT capaces de detectar las faltas auto extinguidas; y el posible diagnóstico del estado de envejecimiento del cable MT y sus accesorios a partir de la impedancia al paso de la señal de comunicaciones de PLC en los mismos.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de esta herramienta ha sido posible gracias al apoyo, iniciativa y los datos de la Smart Grid de i-DE, en estrecha colaboración con el ITE, centro tecnológico líder de la red de excelencia Cervera HySGrid+ (EXP - 00122779 / CER-20191019) apoyada por MICINN a través de CDTI.

REFERENCIAS

- [1] Booth, J. et. al, 2017, DNO Common Network Asset Indices Methodology. A common framework of definitions, principles and calculation methodologies, adopted across all GB Distribution Network Operators, for the assessment, forecasting and regulatory reporting of Asset Risk.
- [2] Dorison, E., Lesur, F., Meurice, D. & Roinel, G., 2007, Health Index, Jicable 07, Paris.
- [3] Gilabert, J. et. al, 2018. MAIGE - IoT infrastructure for online asset management, CIGRE, Paris.
- [4] Puluhen, B., Dorison, E., Murin, V. & Tambrun, R., 2011, Health Index: A Technical Indicator of Underground Network Reliability, CIRED. 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt.
- [5] Steennis, E.F., Buys, P., Mehairjan, R., Mehairjan, P.Y. & V. D. Wielen, P., 2014, Smart Cable Guard for PD-online monitoring of MV underground power cables in Stedin's network, International Conference on Condition Monitoring & Diagnosis, Jeju.
- [6] Tejedó, J. R., 2016, Metodología de gestión de activos aplicada a las subestaciones en base a índices de criticidad y salud, Jornadas Técnicas del Comité Nacional de CIGRE, Madrid.
- [7] Vermeer, M., Wetzler, J., V. D. Wielen, P., Haan, E. d. & Meulemeester, E. d., 2015, Asset-management decision-support modeling, using a health and risk model, IEEE Eindhoven PowerTech, Eindhoven.
- [8] WG D1.39, 2017, TB 706: Guidelines for the use of Statistics and Statistical tools on life data, CIGRE.
- [9] Wickham, H. & Stryjewski, L., 2011, 40 years of boxplots.