



Las catenarias de alta velocidad

Se conoce como catenaria, en el lenguaje ferroviario, a la línea que suministra energía al tren a través de un captador móvil denominado pantógrafo. Ni la línea tiene la forma de una catenaria ni el captador cumple funciones de multiplicación de dimensiones, pero los años de utilización de estos términos hacen inútil cualquier esfuerzo por cambiar sus nombres por otros más adecuados.

El estudio y diseño de catenarias es un trabajo multidisciplinar que requiere conocimientos y estudios eléctricos, mecánicos, medioambientales y reglamentarios que exigen, en muchos casos, el empleo de medios informáticos avanzados y el esfuerzo conjunto de equipos de ingeniería bien coordinados, particularmente en las líneas de alta velocidad en que los requerimientos son más estrictos.

En efecto, una catenaria de alta velocidad es una línea eléctrica que suministra a los motores del tren potencias muy elevadas mediante el rozamiento de una pletina conductora a velocidades muy altas. La línea Madrid-Barcelona, por ejemplo, está equipada con una catenaria que puede alimentar trenes de 20.000 KVA a velocidades de 350 km/hora. Para que esto sea posible y además la instalación sea duradera es preciso que el contacto con la línea sea continuo, sin interrupciones de contacto y

con presiones de contacto no muy elevadas para evitar el desgaste acelerado de la línea.

Repasaremos los distintos aspectos que es preciso considerar en el diseño de una catenaria así como los métodos y soluciones que pueden emplearse.

El entorno

Las facetas del entorno que influyen en la catenaria son:

- La climatología, particularmente el hielo, el viento y el nivel isoceráulico.
- La infraestructura de vía, es decir curvas y pendientes.
- La infraestructura energética del territorio, es decir, las líneas existentes en la zona y la potencia de cortocircuito en los puntos de alimentación.
- La contaminación atmosférica.

Todos estos factores deben tenerse en cuenta en el diseño de los elementos, tanto desde el punto de vista eléctrico como mecánico, según se indicará en los apartados correspondientes.

La catenaria, por su parte, también influye en el entorno, particularmente las catenarias de alta velocidad ya que a velocidades inferiores a los 200 km/h las potencias a conducir disminuyen considerablemente. Estas influencias son:



Agustín Hernández Velilla

Doctor Ingeniero del ICAI de la promoción de 1965. Ha desarrollado toda su labor profesional en SEMI –fue su director general entre 1989 y 2003– simultáneamente con trabajos de investigación y desarrollo de catenarias. Entre 2003 y 2005 fue presidente de COSEMEL, ingeniería depositaria de la tecnología de la catenaria de la línea Madrid-Barcelona. Desde 2005, ya jubilado, es presidente honorario de la Ingeniería COSEMEL.

Comentarios a:
comentarios@icai.es

- Sobre las aves, que en zonas ZEPA y de paso pueden chocar con los conductores originando muertes de aves y averías en la línea, particularmente en épocas de grandes concentraciones, como los estorninos en otoño, que producen cortocircuitos instantáneos al formarse cadenas de pájaros que puentean aisladores.
- Sobre las líneas paralelas a su trazado, particularmente de baja tensión y telefónicas no digitalizadas, pues las elevadas intensidades pueden inducir tensiones que es preciso tener en cuenta.
- Sobre personas y animales que puedan transitar por las inmediaciones de los elementos de la línea, postes principalmente, en que las tensiones de paso y contacto que se originan en casos de avería pueden resultar peligrosas.

Al igual que las influencias del entorno sobre la línea, los efectos que produce la línea en sus alrededores deben tenerse en cuenta al estudiar la línea desde el punto de vista eléctrico y mecánico.

Los reglamentos

Los efectos que en uno y otro sentido se producen entre catenaria y entorno se recogen normalmente en los reglamentos nacionales y, en Europa, en las normas CENELEC, particularmente en la EN 50125 sobre Condiciones Medioambientales, EN 50122 sobre Protecciones, EN 50124 sobre Coordinación de Aislamiento y EN 50119 que indica los valores que deben cumplir los distintos parámetros de la catenaria.

Aparte de las anteriores, deben considerarse también las normas EN 50149 sobre Normalización y Características del Hilo de Contacto, EN 50163 sobre Suministro de Tensión a Instalaciones de Tracción y EN 50367 sobre Interacción Dinámica entre Catenaria y Pantógrafo. También existen varias publicaciones de la UIC que es conveniente consultar aunque no suelen ser de obligado cumplimiento.

En líneas que han de ser circuladas por trenes internacionales que atraviesan fronteras europeas, es de aplicación la Especificación Técnica de Interoperabilidad (ETI) que indica determinadas características que deben cumplir las líneas para que cualquier tren autorizado pueda circular fuera de sus fronteras sin problemas.

Con independencia de lo anterior deben tenerse en cuenta las normativas nacionales que, en algunos casos, recogen condicionantes

particulares de cada país y el Eurocódigo que da normas de cálculo aplicables en Europa. En particular, el Eurocódigo indica, y la nueva versión de la Norma EN 50119 lo recoge, el doble modo de considerar los esfuerzos sobre los elementos:

- Límite de rotura: es decir, deben considerarse los esfuerzos que pueden producir la ruina de la instalación, comparados con la resistencia de la instalación a esa ruina. Como efectos variables deben considerarse el hielo y el viento con periodo de retorno de 50 años.
- Límite de servicio: deben considerarse qué esfuerzos pueden dejar a la instalación fuera de servicio, que en el caso de la catenaria es la suma del viento con periodo de retorno de tres años con otros esfuerzos que pueden deformar los cables de modo que el hilo de contacto quede fuera del pantógrafo. La resistencia a considerar es el límite elástico de los elementos, que al producir deformaciones permanentes podría inutilizar la operatividad de la línea.

Aspectos eléctricos

Tal como se indica más arriba, la línea está influida por la infraestructura energética del entorno y debe tener en cuenta sus efectos sobre el mismo. Además la línea debe cumplir con el fin para el que se instala, es decir, debe ser capaz de conducir la energía necesaria sin calentamientos de los conductores excesivos y debe mantener una tensión en el pantógrafo, que de acuerdo con la Especificación Técnica de Interoperabilidad, debe ser superior a los 19 KV en condiciones normales y debe mantenerse en condiciones degradadas entre 17 y 19 KV durante un periodo no superior a 2 minutos.

Por lo tanto deben conocerse con exactitud los valores de potencias necesarias y sus efectos.

Los datos que deben conocerse que afectan a potencias y otros parámetros eléctricos son:

- Curva de tracción del tren: indica, a cada velocidad, la fuerza de tracción en llanta que el tren es capaz de desarrollar.
- Rendimiento mecánico del tren: para transformar la potencia en llanta en potencia en pantógrafo.
- Curva de resistencia al avance del tren: del tipo $A+BxV+CxV^2$.
- Perfil de la línea: para poder calcular el suplemento, positivo o negativo de potencia, necesario para mantener el tren en la velocidad que lleva en las pendientes.

- Curva del coseno de ϕ en función de la velocidad para determinar la potencia reactiva necesaria.
- Tráfico de trenes: para determinar la posición de cada tren en cada momento.
- Posición de las subestaciones de alimentación y potencia de cortocircuito de la red de alimentación en esos puntos.
- Posición de las zonas neutras de separación de fases.
- Resistividad del terreno en el tramo de línea a estudiar.
- Disposición y características de conductores de la catenaria, tanto positivos (sustentadores, hilos de contacto y feeders de aumento de sección) como de retorno (carriles, cable de retorno) y negativos en el caso de alimentación en 2x25.

Con los datos anteriores, y contando con un simulador de tráfico, hay que determinar:

- Potencia a suministrar por cada subestación, en valores medios cuadráticos, medios y máximos instantáneos.
- Potencia instantánea en cada tren en cada instante.

Con estos primeros datos puede conocerse si la relación potencia de cortocircuito de cada subestación a potencia a suministrar es suficiente para garantizar que los desequilibrios de fases no afecten a la calidad de servicio de la red. Si no lo fuera, sería preciso modificar el tráfico o la posición de subestaciones para disminuir la potencia a suministrar o modificar la infraestructura de líneas para aumentar la potencia de cortocircuito.

Debe tenerse en cuenta que las zonas neutras, que son zonas de la línea que no tienen tensión para separar tramos de línea alimentados por fases diferentes, deben estar situadas en zonas llanas o en vaguada para evitar la pérdida de velocidad de los trenes.

A continuación, conocida la potencia solicitada por los trenes y contando con un simulador de comportamiento eléctrico debe determinarse:

- Impedancia de la catenaria.
- Intensidades medias cuadráticas en cada conductor y en tierra.
- Tensión en el pantógrafo en cada instante y en cada tren.
- Tensiones de paso y contacto.
- Impedancia mutua respecto a conductores paralelos.
- Tensiones inducidas en conductores paralelos.

Cuando los valores obtenidos son admisibles, puede considerarse que la estructura de cables y el sistema de alimentación son válidos. En caso contrario, es preciso modificar alguna de sus características:

- Para modificar la impedancia debe cambiarse la posición relativa y respecto a tierra de los conductores.
- Si las intensidades en algún conductor no son admisibles, es preciso modificar la sección de los conductores.
- La tensión en pantógrafo se modifica cambiando la impedancia, cambiando el tráfico o las potencias de los trenes o cambiando la posición de subestaciones y zonas neutras.
- Las tensiones de paso y contacto se mejoran cambiando la estructura de tomas de tierra, es decir, instalando en las subestaciones o en puntos intermedios tierras más bajas o colocando estructuras de picas más complejas en cada apoyo que disminuyan la resistencia de puesta a tierra. Otra solución puede ser la instalación, en los tramos con alta resistividad, de conductores enterrados a lo largo del tramo y conectados a los apoyos o al carril según sea el sistema de señalización.
- Las tensiones inducidas en conductores paralelos se reducen poniendo pantallas en los conductores, conectadas a tierra.

Puede suceder que las caídas de tensión obliguen a colocar subestaciones muy cercanas, lo que si la infraestructura de líneas del territorio no es muy potente obliga a construir un número elevado de líneas. También puede suceder que la existencia de muchas líneas paralelas a la instalación pueda dar origen a un coste muy importante debido a la eliminación de los efectos de las inducciones de la línea. En ambos casos puede emplearse la solución de disminuir las corrientes por los conductores de la línea, lo que se consigue conduciendo la potencia a mayores tensiones aunque la distribución se haga a la tensión nominal.

Este sistema de alimentación a la catenaria, hasta este momento únicamente se ha empleado utilizando un sistema de transporte de potencia a tensión doble, llamado sistema 2x25 como oposición al sistema 1x25 simple.

En el sistema 1x25 se alimenta a la línea con un transformador monofásico de 25 KV que se conecta a la catenaria y al carril. La energía para alimentar a todos los trenes debe pasar por toda la línea a 25 KV.

En el sistema 2x25 se emplea un transformador de 50 KV con una toma central y se

Figura 1. Sistema 1x25

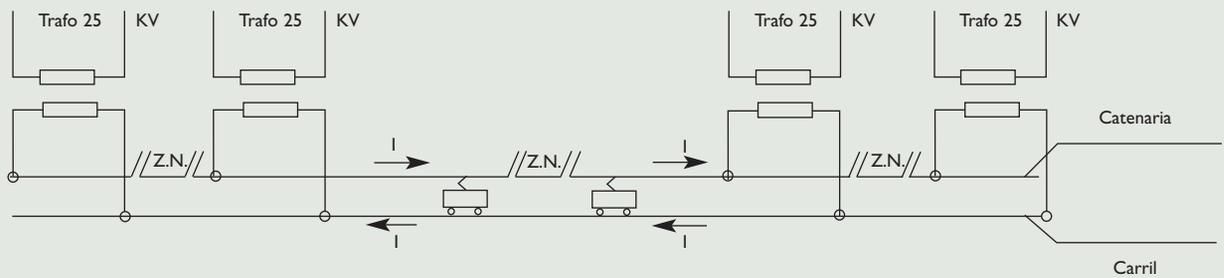
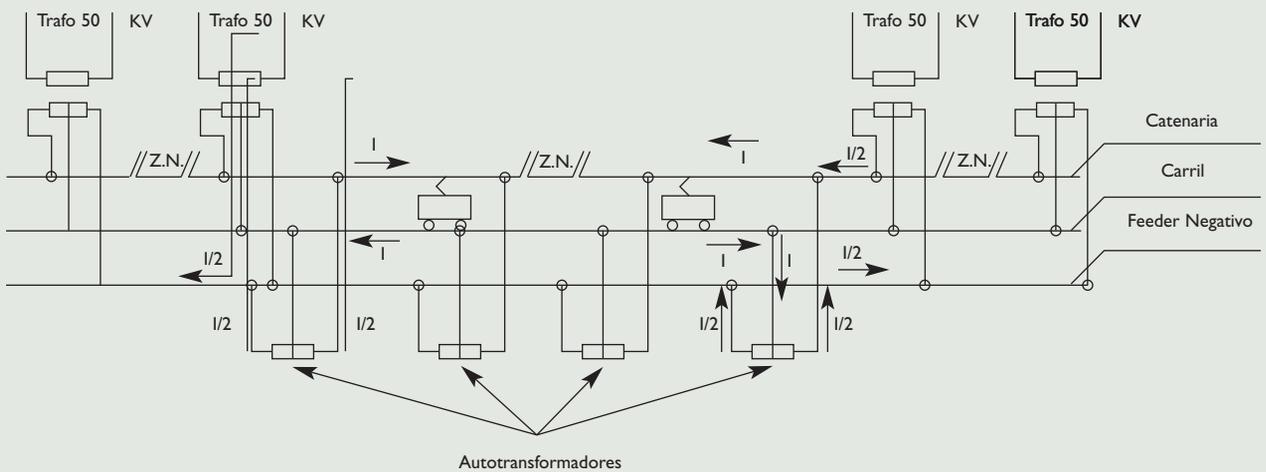


Figura 2. Sistema 2x25



conecta un extremo a catenaria y el otro a un feeder auxiliar denominado feeder negativo. El punto centro se conecta al carril.

En este sistema se colocan autotransformadores cada determinado espacio. La energía del tren o trenes situados en el módulo entre dos autotransformadores se conduce a 25 KV mientras que la energía de trenes situados fuera de ese módulo se conduce hasta el módulo en que se encuentran a 50 KV; por tanto, con la mitad de intensidad y la mitad de caída de tensión. Además, por el feeder negativo circula una corriente igual y contraria a la que circula por la catenaria, en los tramos exteriores al módulo en que se encuentra el tren, con lo que los efectos de la inducción de las corrientes por catenaria se contrarrestan con los efectos de las corrientes por el feeder negativo.

Las Figuras 1 y 2 indican el esquema de una línea entre dos subestaciones con el sis-

tema 1x25 y 2x25, indicando las intensidades que circulan por catenaria y por el feeder negativo.

Del mismo modo que se emplea un transformador de 50 KV con una toma central, podría emplearse un transformador de tensión triple o cuádruple, con lo que se disminuirían aún más las corrientes en catenaria y sería posible situar las subestaciones más alejadas. El Dr. Ingeniero del ICAI Eduardo Pilo ha desarrollado un estudio sobre el tema que sería interesante poder experimentar con la colaboración del Ministerio de Fomento y las campañas de fomento de I+D+i.

Aspectos mecánicos

Una vez que el estudio eléctrico ha determinado la composición y secciones de los conductores de la catenaria es preciso acometer el diseño mecánico que debe constar de los siguientes pasos:



1. Determinación de los vientos en la zona recorrida por la línea, bien los vientos máximos con periodo de retorno de 50 años o los vientos medios. Con estos datos y las indicaciones del Eurocódigo y de la Norma EN 50119 se determina el valor de las presiones de viento sobre conductores y sobre estructuras en los dos casos de límite de rotura y de límite de servicio.

2. Determinación de los vanos a emplear en recta y en curvas de distintos radios, de modo que con las presiones de viento calculadas en uno no haya lugar a deformaciones del hilo de contacto tales que pueda quedar fuera de la zona barrida por el pantógrafo y de acuerdo con las normas.

3. Determinación de las tensiones de los cables de la catenaria. Este punto es uno de los más delicados porque afecta al comportamiento dinámico de la catenaria. Es aconsejable, en una primera fase, escoger tensiones que cumpliendo con la norma EN 50119 cumplan también con las indicaciones de la norma UIC 799. Con estos valores debe comprobarse en un simulador de interacción catenaria-pantógrafo que se cumplen las exigencias de la ETI y demás normas de obligado cumplimiento en cuanto se refiere a presiones máximas entre pantógrafo y catenaria y a deformaciones del hilo al paso del pantógrafo, con un solo pantógrafo y con dos pantógrafos. Debe contemplarse que el pantógrafo cumple con los condicionantes de la ETI.

4. Determinación de las tensiones de los cables no compensados, es decir feeders y cables de retorno, de acuerdo con la norma EN 50119.

5. Determinación de la resistencia y deformación de los postes, para lo que previamente se ha debido diseñar el tipo de poste a emplear. Como ejemplo, en Alemania se emplean postes de hormigón, en Francia postes de doble T y en España postes de presillas o diagonales. Esta resistencia debe calcularse en los dos casos de límite de rotura y de límite de servicio.

6. Determinación de la cimentación a emplear para cada tipo de poste, para lo que previamente debe decidirse si se emplean cimentaciones hincadas, perforadas o rectangulares. Debe comprobarse, como seguridad, que aun en el caso de límite de rotura el posible giro de la cimentación sea inferior a 0,01 radianes.

7. Determinación de los esfuerzos que se transmiten a los postes en cada tipo de utilización y tanto para límite de rotura como para límite de servicio, y asignación del tipo de poste más adecuado de acuerdo con los cálculos realizados en el paso número 5.

8. A partir de este momento viene la parte más ardua, que consiste en diseñar cada una de las piezas a emplear en el montaje del mecano que permita que la catenaria se pueda instalar de modo que resulte de fácil montaje, de fácil mantenimiento, de gran duración, y además que su coste no sea muy elevado.

Esta última parte requiere un equipo con un gran componente de experiencia y perfectamente coordinado para que todos los diseños formen un todo que mantenga el estilo, que se pueda ensamblar perfectamente y cuya resistencia sea del mismo orden para evitar la creación de fusibles si no es un efecto buscado.

En cualquier caso, no existen dos instalaciones de catenaria exactamente iguales y en cada instalación hay que ingeniar soluciones variadas y de feliz idea en muchos casos para resolver las variadas situaciones que se presentan, como son túneles de diferentes gálibos, agujas de diferente geometría, combinaciones de alturas de todos los calibres, etc.

Una vez diseñado el mecano se replantea sobre plano la instalación y se calculan las ménsulas y las péndolas para que la instalación pueda construirse.

El carácter eminentemente electromecánico de este tipo de instalación la hace apropiada para la actividad de los ingenieros del ICAI, cuya participación en las catenarias españolas y muy particularmente en las de Alta Velocidad Madrid-Barcelona y Córdoba-Sevilla ha sido muy importante y numerosa. ■