

Electrificación ferroviaria de alta velocidad en España

David Gómez Berzosa y Gregorio Velasco Rivero

High speed railway electrification in Spain

RESUMEN

El 21 de abril de 1992 un tren AVE hizo el primer viaje comercial entre las ciudades de Madrid y Sevilla. En la actualidad, cada día circulan más de 200 trenes de alta velocidad que dan servicio, aproximadamente, a casi 70.000 viajeros diarios y llegan a 80 municipios españoles. Que un tren pueda circular a 300 km/h depende de las características geométricas del trazado, pero necesitamos un “combustible” para alcanzar esa velocidad. En este caso el “combustible” del tren es el sistema de electrificación ferroviaria que comprende todos los elementos que hacen posible que la energía eléctrica llegue al tren, con la potencia necesaria para que este pueda alcanzar las prestaciones para las que ha sido diseñado, dentro de los criterios de explotación previstos. En las líneas ferroviarias de alta velocidad españolas la electrificación se realiza en corriente alterna a 50 Hz, a una tensión de 25 kV, y las configuraciones existentes son las conocidas como: 1x25 kV y 2x25 kV.

Recibido: 29 de mayo de 2013
Aceptado: 1 de septiembre de 2013

ABSTRACT

On 21st April 1992, an AVE train made the first commercial journey between Madrid and Seville. At present, almost 200 high-speed trains serve about 70,000 passengers every day, reaching up to 80 Spanish towns.

In order for a train to reach 300 kph, the track needs to have certain geometrical characteristics. Not only this, but also a special fuelling system is necessary. In this particular case, the fuelling system corresponds to the railway electrification system, comprising all the elements that enable electricity to reach the train, with the power required for it to achieve the performance for which it was designed and within the expected operating criteria. In the Spanish high-speed railway lines, electrification is done at 50 Hz alternating current and at a voltage of 25 kV, with the existing configuration known as 1x25 kV and 2x25 kV.

Received: May 29, 2013
Accepted: September 1, 2013

Palabras clave

Alta velocidad, ferrocarriles, energía eléctrica, sistema eléctrico

Keywords

High speed, railways, electric power, electric system



Foto: Shutterstock

En febrero de 1912 se puso en servicio el primer tramo ferroviario electrificado de la red nacional de vía ancha en España, entre las estaciones almerienses de Santa Fe-Alhama y Gérgal, con un recorrido de 20,8 km (figura 1). La Compañía de los Caminos de Hierro del Sur de España fue la impulsora del proyecto. La electrificación de esta línea se realizó a una tensión de 6.000 V en corriente alterna trifásica y 25 Hz. El sistema de alimentación disponía de dos líneas aéreas de contacto y junto con el carril alimentaba la locomotora con las tres fases, y la velocidad constante era de 12 o 25 km/h. El sistema de electrificación en corriente continua fue introducido en 1925 en la rampa de Pajares, con una tensión de 3.000 V, aunque fue un caso aislado, porque las siguientes electrificaciones en corriente continua se hicieron a 1.500 voltios. Esta última electrificación fue dominante hasta bien entrado el siglo XX. En 1946 se implantó el Plan General de Electrificación con una tensión elegida de 3.000 V en c.c. La crisis del petróleo de 1973 motivó la redacción del Plan de Electrificación de 1974, que dio un nuevo empuje al proceso de electrificación a 3.000 V, que extendió la tracción eléctrica al 51% de la red.

La corriente alterna (desde que fue suprimida en 1966 de Almería a Nacimiento) no volvió a utilizarse hasta 1992, al entrar en funcionamiento la línea de alta velocidad Madrid-Sevilla, con una tensión de 25 kV y 50 Hz. A partir de esa fecha todas las líneas de alta velocidad lo hacen en corriente alterna.

Sistemas de electrificación en Europa

De manera global, la mitad de la electrificación ferroviaria en el mundo todavía usa la corriente continua. La desventaja está en que se utiliza una tensión más baja y, por tanto, las corrientes son muy elevadas cuando los vehículos de tracción demandan potencias altas. En Europa los tres tipos de tracción eléctrica normalmente utilizados son los siguientes:

- Corriente continua 0,6 kV, 0,750 kV, 1,5 kV y 3 kV.
- Corriente alterna 16 2/3 Hz, 15 kV.
- Corriente alterna 50 Hz y 25 kV.

En España, la distribución de la electrificación es la siguiente (figura 2):

- Ancho ibérico (1.668 mm): 11.750 km de vías; 2.914 km de vía doble electrificada, 74 km de vía doble sin electrificar, 3.576 km de vía única electrificada, 5.191 km de vía única sin electrificar, 3.000 V, CC.

- Ancho Internacional (1.435 mm): 1.636,2 km de vías. 1.548,2 km vía doble, 68 km vía única, 20 km triple carril, 25 kV, 50 Hz, AC.

Sistemas de electrificación en alta velocidad ferroviaria

Debido a la elevada potencia que demandan los trenes de alta velocidad, es necesario alimentar la catenaria con la máxima tensión posible al objeto de reducir la corriente demandada por los trenes. En las especificaciones técnicas de interoperabilidad para ferrocarriles de alta velocidad se ha adoptado la tensión de 25 kV, en sus configuraciones de 1x25 kV y 2x25 kV.

Sistemas de electrificación en 1x25 kv

La energía requerida para alimentar las subestaciones de tracción monofásicas a 50 Hz se obtiene conectando a dos fases de la línea de alta tensión trifásica de la compañía suministradora o red de transporte. Típicamente se conectan a redes de 132 kV, 220 kV o 400 kV. Una salida del secundario del transformador de tracción se conecta a la línea aérea de contacto y la otra al carril, estando este unido rígidamente a tierra. Esta carga bifásica provoca desequilibrios en la tensión y corriente de la red trifásica.



Figura 1. Inauguración del tendido de la línea aérea del ferrocarril eléctrico entre Gergal y Santa Fe (Almería) el 10 de abril de 1909, viaducto del Andarax. Tren de tracción eléctrica.

El desequilibrio de tensión U_u (tensión nominal) es el cociente entre la tensión inversa V_i y la tensión directa V_d . Desarrollando esta ecuación observamos que también es inversamente proporcional a la potencia de cortocircuito S_k de la red trifásica. Si conocemos la potencia monofásica S_e demandada por la subestación de

tracción, entonces el desequilibrio de tensión en la red trifásica en barras de la subestación viene dada por la fórmula:

$$U_u = V_i/V_d \approx S_e/S_k$$

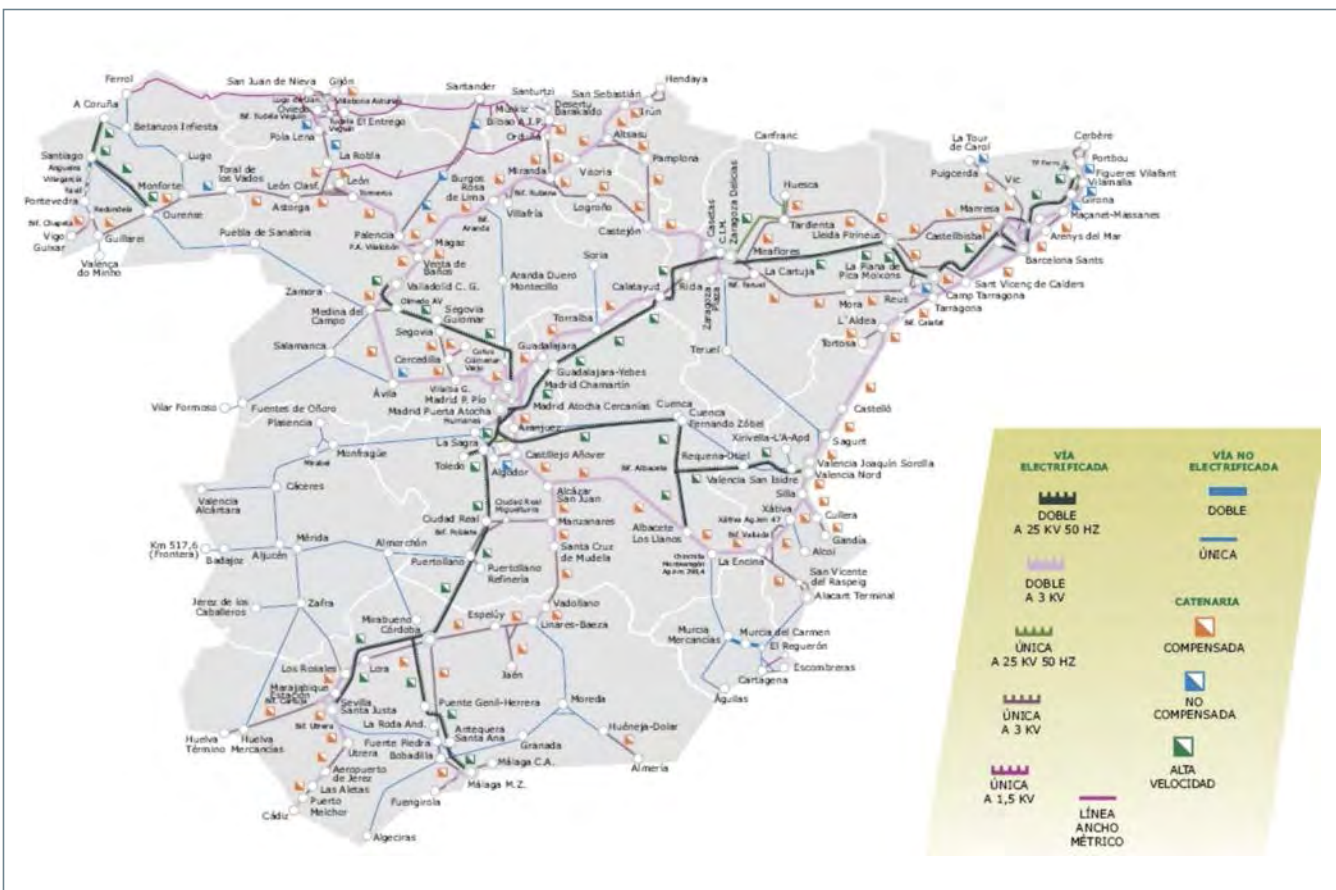
Con potencias de cortocircuito que pueden variar entre los 700 MVA y los 3.000

MVA en la red trifásica de 110 kV y subestaciones de tracción de 40 MVA, se producen grandes desequilibrios de tensiones. Para minimizar el efecto desfavorable del desequilibrio de tensión, se han establecido unos valores U_u permitidos. Según la norma EN-60034-1, los motores trifásicos pueden trabajar en un sistema trifásico en el que se admite un desequilibrio del 1% en régimen permanente o del 1,5% durante unos pocos minutos. Para cumplir con este requisito, es necesario limitar o compensar el desequilibrio.

Lo ideal sería conectar todas las subestaciones de la línea a la misma fase, pero en la práctica, las subestaciones se conectan alternativamente a las fases de la red de alta tensión trifásica, para limitar desequilibrios en la red de alta tensión. Este tipo de conexión nos plantea los siguientes problemas en la explotación de las subestaciones de tracción:

- Existencia de zonas neutras de separación de fase entre subestaciones colaterales.
- Diferencias de tensión entre subestaciones de $\sqrt{3} \times 25 \text{ kV} \approx 43,3 \text{ kV}$.
- Caídas de tensión elevadas en los extremos de los tramos alimentados por las subestaciones.

Figura 2. Sistemas de electrificación en España.



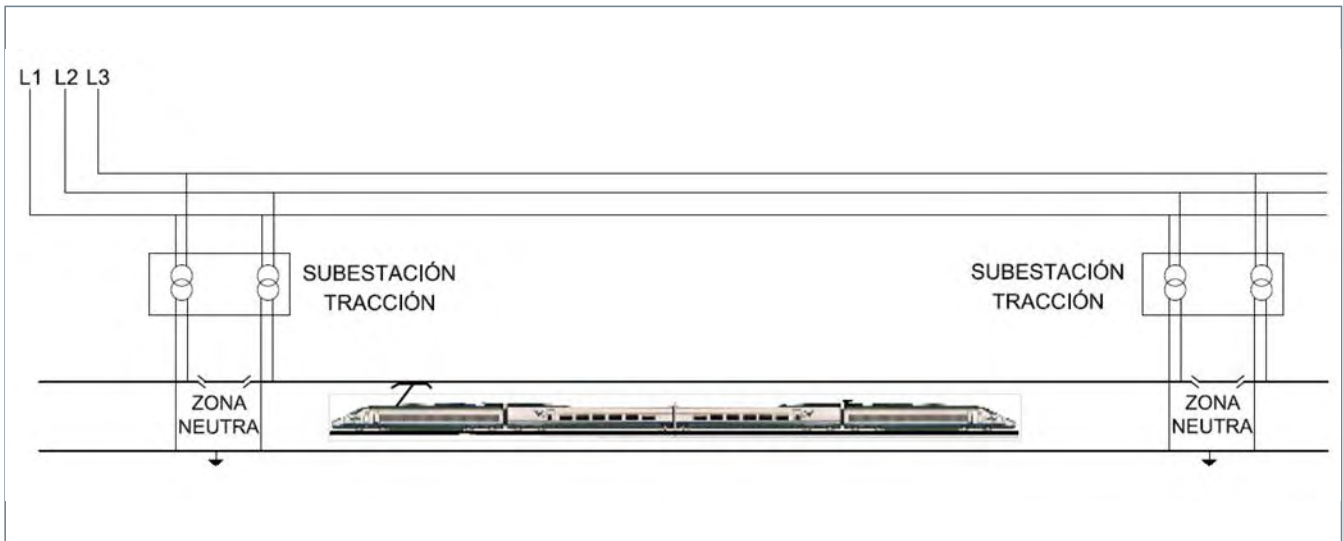


Figura 3. Sistema 1x25 kV.

– Menor rendimiento del frenado por recuperación debido a que la sección alimentada por la subestación es menor y, por tanto, existen menos trenes en el trayecto que puedan utilizar la energía suministrada por los trenes durante el frenado por recuperación.

La catenaria está dividida en tramos eléctricos. El planteamiento es que cada tramo pueda ser alimentado por uno de los dos transformadores de potencia instalados en cada subestación eléctrica (en adelante SE) estando conectado cada transformador a una fase diferente a la de los transformadores contiguos (figura 3).

Es necesaria la existencia de una zona neutra de separación de fases en cada

SE, para evitar que el tren pueda cortocircuitar los secundarios de los transformadores conectados a distintas fases con los pantógrafos delantero y posterior. También, en los puntos intermedios entre dos SS EE, existen zonas neutras para aislar eléctricamente los tramos alimentados por los diferentes transformadores de cada SE.

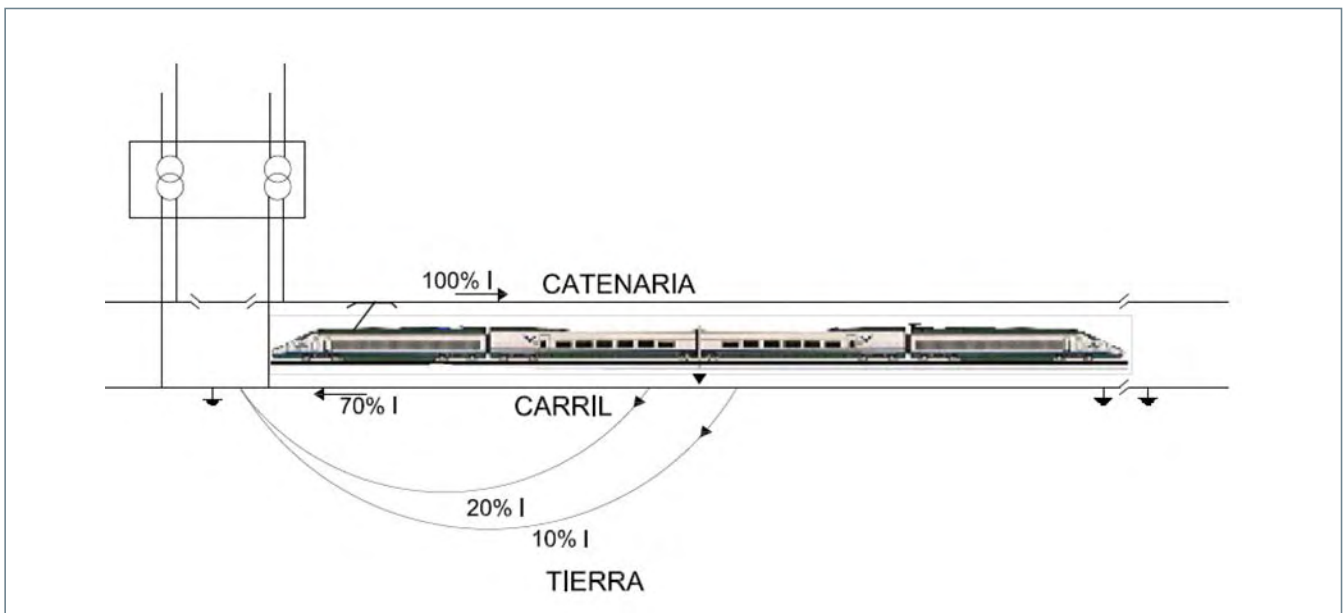
El retorno de corriente se realiza en gran parte por los carriles. Se calcula que del orden del 70% de la corriente retorna por el carril, mientras que el 10% lo hace por capas profundas del terreno y el 20% por capas más superficiales, provocando perturbaciones en los cables de señalización y comunicaciones cercanos a la vía. La distancia

media entre subestaciones es de 40 km, aproximadamente (figura 4).

Con objeto de disminuir las perturbaciones producidas por las corrientes de retorno en el terreno, se implementa un circuito con cable de retorno.

Otra solución para evitar las perturbaciones producidas por las corrientes de retorno es la instalación de transformadores Booster. La alimentación con transformadores Booster se utilizó en primer lugar en la línea Tokaido-Shinkansen (Japón) en 1964. Estos trafos se instalaron en la catenaria con intervalos entre 3 y 4 km. El primario del transformador se conecta a la catenaria, mientras que el secundario a una sección aislada del cable de retorno.

Figura 4. Retorno de corriente en 1x25kV.



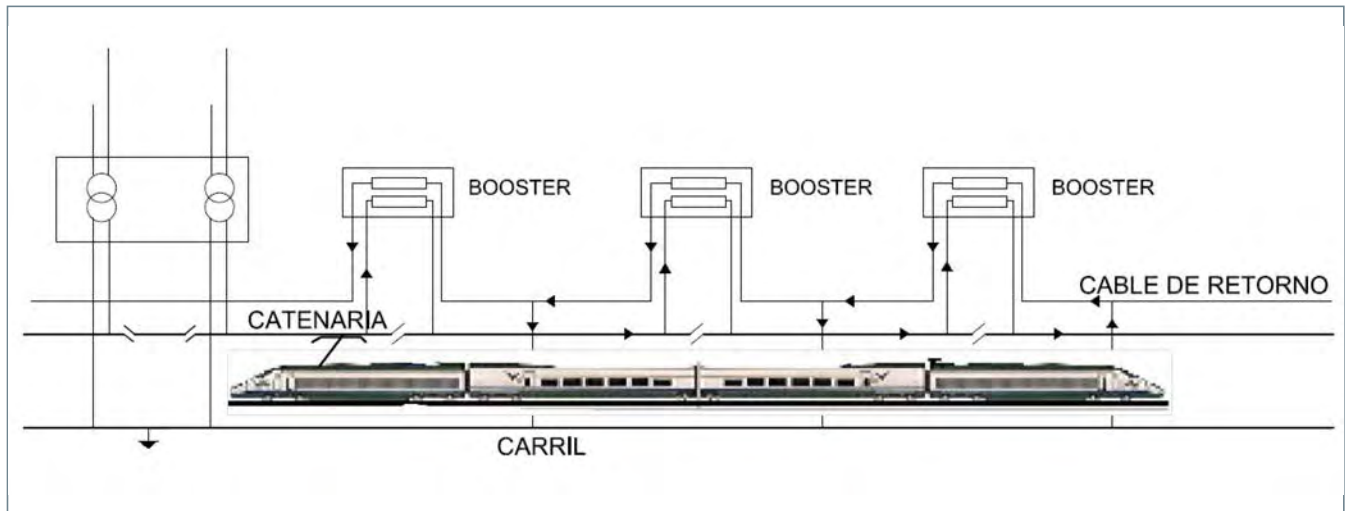


Figura 5. Transformadores Booster en 1x25 kV.

Al seccionar la catenaria cada 3-4 km se obliga a la corriente a circular por el devanado primario de los transformadores, que tienen una relación de transformación 1:1, lo cual permite en la posición donde se encuentre el tren repartir parte de la corriente de los carriles y tierra hacia el cable de retorno. La instalación de estos trafos tiene el inconveniente de aumentar la impedancia del circuito de tracción, lo que incrementa la caída de tensión, y por eso es necesario disminuir la distancia entre SS EE (figura 5).

Sistemas de electrificación en 2x25 kV

Para poder alimentar un tramo mayor de línea aérea de contacto sin superar las caídas de tensión permitidas, se utiliza un sistema denominado 2x25 kV. Este sistema se utiliza en Francia, Japón, España, Italia, Rusia y poco a poco se

está implantando en países que utilizan alimentación en 25 kV c.a.

Esta configuración eléctrica se caracteriza por la existencia de dos conductores, uno es la catenaria y el otro es el *feeder* de retorno de 25 kV a lo largo de toda la línea. Este *feeder* de retorno se denomina normalmente como *feeder* negativo o *feeder* de -25 kV. La tensión entre este *feeder* de retorno y el carril es de 25 kV con un desfase de 180° respecto a la tensión entre la línea aérea de contacto y el carril.

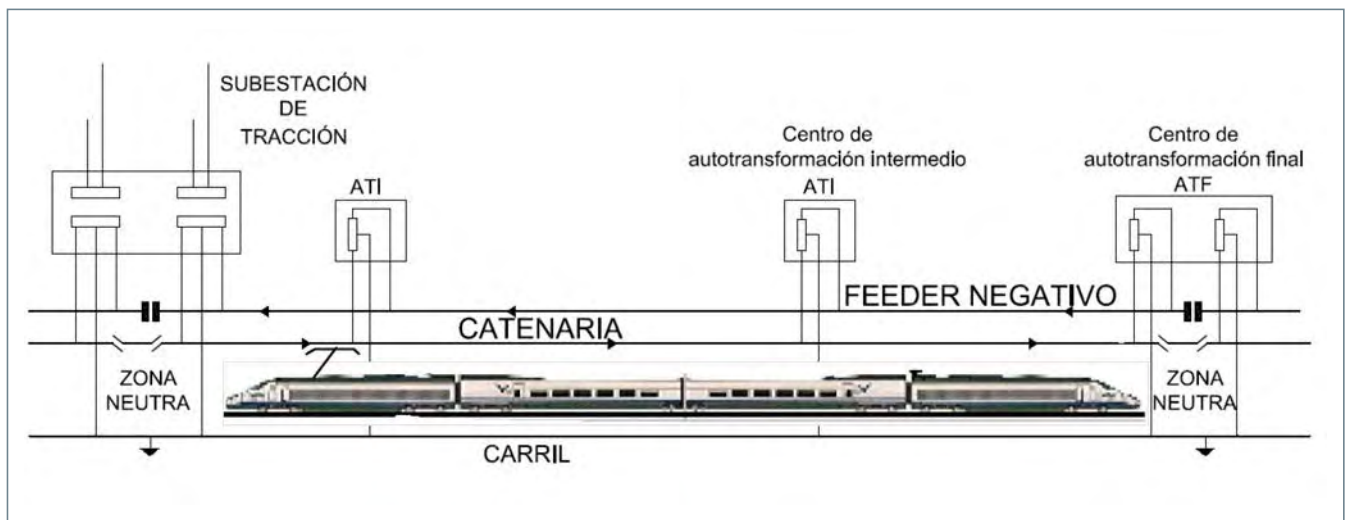
El transformador de las subestaciones tiene una toma central que se conecta al carril. La tensión entre cada toma del transformador y la toma a tierra es de 25 kV nominales, por lo que tenemos un secundario de 50 kV nominales dotado de cambiador de tomas. Los valores reales (55kV entre *feeder* y catenaria y 27,5 kV entre catenaria y

carril) superan los valores teóricos de 50 kV y 25 kV para compensar posibles caídas de tensión que se dan a lo largo de la línea. Una toma del transformador alimenta el *feeder* de retorno que va instalado a lo largo de la línea. La diferencia de tensión nominal, por tanto, entre la línea aérea de contacto y el *feeder* de retorno es de 50 kV. Pero la tensión entre la línea aérea de contacto y el carril es de 25 kV como en el anterior sistema de alimentación 1x25 kV.

La división en tramos de la línea aérea de contacto responde a los mismos criterios que en el sistema 1x25 kV.

Para mantener la tensión en la línea, son necesarios una serie de centros de autotransformación distribuidos a lo largo del trazado, situados cada 10 o 15 km. Las tomas de los extremos de los autotransformadores se conectan a la línea aérea de contacto y al *feeder*

Figura 6. Sistema 2x25 kV.



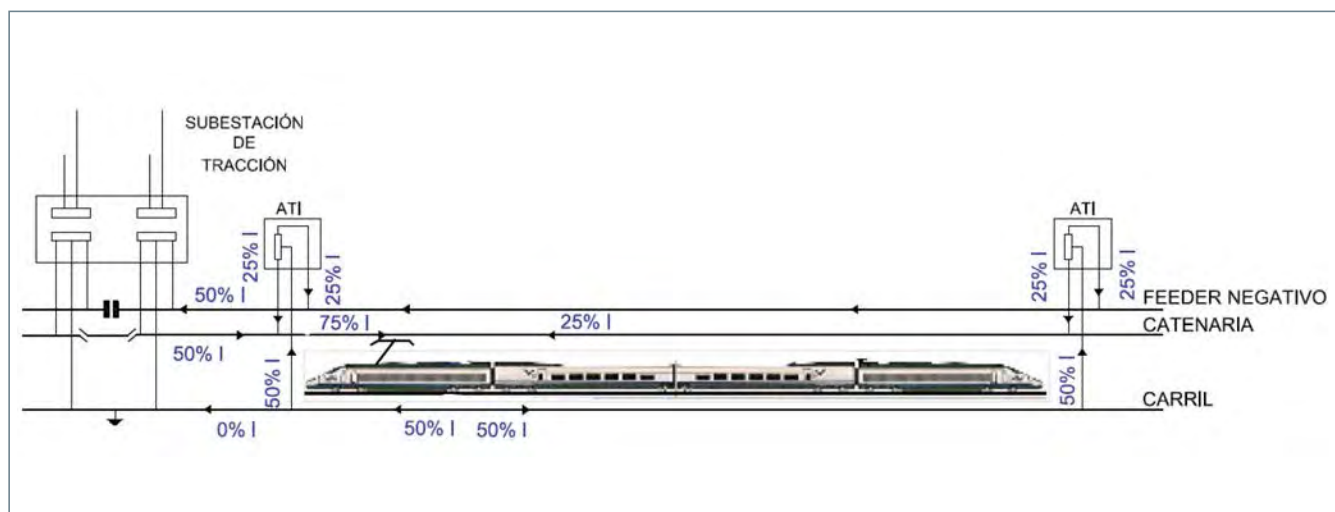


Figura 7. Reparto de corrientes en 2x25 kV.

negativo, y la toma media al carril (figura 6).

La transmisión de potencia entre la subestación y el autotransformador anterior a la posición del tren es similar a un sistema bifásico funcionando a 50 kV. Esto implica que al ser la tensión mayor, la corriente por la catenaria es menor en este tramo y por lo tanto la caída de tensión en esta configuración eléctrica es menor. También en este tramo casi toda la corriente regresa por el feeder de retorno (-25 kV) y por lo tanto apenas circula corriente por el carril. Esta forma de funcionamiento hace que las interferencias/afecciones por compatibilidad electromagnética sean menores.

En la figura 7 puede observarse como la intensidad de retorno por el carril queda limitada al tramo comprendido entre los autotransformadores en los que se encuentra el tren.

El sistema no es ideal ya que, aunque el autotransformador distribuye la intensidad en dos partes prácticamente iguales, existe una pequeña desigualdad que viene originada por la caída de tensión en el arrollamiento, que se procura que sea muy pequeña, del orden del 1%. En los casos en los que la intensidad de tracción es suministrada desde autotransformadores distantes, habrá una parte de esa corriente que pasará a tierra a través del carril. Esta corriente es la que causaría problemas de inducción en las líneas de telecomunicaciones o señalización que se encuentran en la plataforma del ferrocarril, aunque habitualmente se emplean unos tipos de cable inmunes a las perturbaciones así como fibra óptica para las transmisiones de señales. Estas perturbaciones son mayores en el sistema 1x25 kV.

Hay que tener en cuenta que este sistema funciona a 50 kV nominales, por lo que a igual potencia demandada por tren, la intensidad que circula por la catenaria entre la SE y el centro de autotransformación anterior a la posición del tren se reduce prácticamente a la mitad que en el sistema 1x25 kV, por lo que la caída de tensión también se ve reducida aproximadamente a la mitad. Por esto las subestaciones de tracción pueden distanciarse aproximadamente el doble (60-80 km) que en el sistema 1x25 kV.

Ventajas e inconvenientes de los sistemas 1x25 kV y 2x25 kV

El sistema 1x25 kV es muy fácil de explotar debido a la simplicidad de la instalación, tanto desde el punto de vista del sistema eléctrico de la catenaria como de las instalaciones de las subestaciones. Uno de los inconvenientes que nos encontramos es que la corriente de retorno que circula en las capas más externas del terreno es muy elevada

(aproximadamente el 20% de la corriente que circula por la catenaria), lo que induce perturbaciones electromagnéticas en los cables de telecomunicaciones tendidos por la plataforma, haciendo necesario recurrir a su apantallamiento. Otro inconveniente que presenta es que la distancia máxima que puede alimentar en punta es pequeña, del orden de unos 30-40 km, para no superar las caídas de tensión máximas admisibles.

La principal ventaja del sistema 2x25 kV es que las perturbaciones electromagnéticas que produce son mucho más pequeñas debido a que apenas circula corriente por los carriles entre la SE y el primer autotransformador que encuentra antes del tren. Otra ventaja es que la distancia en punta que puede alimentar es del orden de unos 60-80 km. Entre las desventajas que presenta este sistema, está que el sistema eléctrico de la catenaria se complica ante la necesidad de un *feeder* de retorno, que es necesario instalar autotransformadores

Tabla 1. Características principales de los sistemas de 1x25 kV y 2x25 kV.

Características principales	Sistema 1X25	Sistema 2X25
Complejidad de la instalación		Baja Alta
Distancia entre subestaciones		30-40 km 60-80 km
Potencia instalada		2x30 MVA (habitualmente) 2x60 MVA (habitualmente)
Autotransformadores		No Cada 10-15 km
Impedancia en la LAC		Alta Baja
Caída de tensión en la LAC		Alta Baja
Perturbaciones electromagnéticas en otras instalaciones		Alta Baja
Complejidad del mantenimiento		Baja Alta



Foto: pedrosala / Shutterstock

cada 10-15 km, que el aparellaje de maniobra de las subestaciones se complica al ser bifásico y de mayor tensión y que las protecciones son más costosas.

Debido a las ventajas del sistema 2x25 kV, en España se ha decidido instalar dicho sistema en todas las líneas de alta velocidad salvo en la línea inicial Madrid-Sevilla, en la cual se instaló el sistema 1x25 kV en 1992.

Sistemas de electrificación de la línea de alta velocidad Madrid-Valladolid

Configuración del sistema

El sistema de alimentación a la catenaria es el denominado 2x25 kV, 50 Hz. El sistema está constituido por:

– Tres subestaciones de tracción eléctrica bifásica/monofásica:

- Subestación de Tres Cantos (P.K. 15+768).
- Subestación de Segovia (P.K. 74+960).
- Subestación de Olmedo (P.K. 139+905).

– Once centros de auto transformación intermedios:

- Centro 1.2 (P.K. 7+717).

- Centro 1.3 (P.K. 22+688).
- Centro 2.2 (P.K. 43+917).
- Centro 2.3 (P.K. 53+917).
- Centro 2.4 (P.K. 66+517).
- Centro 2.5 (P.K. 84+468).
- Centro 2.6 (P.K. 94+265).
- Centro 3.2 (P.K. 116+900).
- Centro 3.3 (P.K. 126+935).
- Centro 3.4 (P.K. 148+199).
- Centro 3.5 (P.K. 159+600).

– Tres centros de autotransformación finales:

- Centro 2.1 (P.K. 35+781).
- Centro 3.1 (P.K. 105+483).
- Centro 4.1 (P.K. 170+600).

Bibliografía

ADIF. Ministerio de Fomento (Julio 2004). Proyecto, Suministro, Obra, Instalación y Mantenimiento de tres subestaciones eléctricas de tracción y centros de autotransformación asociados del Nuevo Acceso ferroviario al Norte y Noroeste de España. Madrid – Segovia – Valladolid/Medina del Campo. Victor Medina (2011). Energía para la más difícil pendiente: La línea Santa Fe-Gérgal (Almería) inauguró hace un siglo la electrificación ferroviaria en España. Revista del Ministerio de Fomento. 609: 58-62. Kiessling F, Puschmann R, Schmieder A y Vega T (2008), *Líneas de contacto para ferrocarriles electrificados: Planificación, Diseño, Instalación y Man-*

tenimiento. Siemens AG, Berlín. ISBN 978-3-9812742.0.2

Pérez de Perceval Verde M A (1989): *La minería almeriense contemporánea (1800-1930)*. Zéjel Editores, Almería. ISBN 84-87223-01-X

Clemente Álvarez (18 de febrero de 2011). El País. Blogs Sociedad: Otro transporte todavía por electrificar: el ferrocarril. Disponible en: <http://blogs.elpais.com/eco-lab/2011/02/otro-transporte-todavia-por-electrificar-el-ferrocarril.html> (Consultado el 18 de marzo de 2013).

David Gómez Berzosa

dberzosa@ya.com

Ingeniero técnico industrial por la Universidad de Valladolid.

Gregorio Velasco Rivero

gvelasco@adif.es

Ingeniero industrial por la Universidad de Valladolid. Técnico de energía y responsable de cambiadores de ancho LAV Norte en Adif.
