

ELECTROMAGNETIC MODELING OF ELECTRIC RAILWAY SYSTEMS TO STUDY ITS COMPATIBILITY

MODELAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS FERROVIARIOS PARA ESTUDIAR SU COMPATIBILIDAD

Patrick Journey M., Jeremy Steel O., Kilena Forte B.

The Elect group, UK.
electgroup@london.com

(Artículo de INVESTIGACIÓN) (Recibido 14 de febrero de 2010. Aprobado 10 de mayo de 2010)

Abstract – *This article describes a technique for determining the longitudinal and transverse electromagnetic parameters of the rails of a railroad. The technique is based on measurements of differential mode and in the theory of transmission lines. The results have been used to validate a mathematical model for electromagnetic compatibility studies, and in particular, for the design and optimization of electromagnetic devices signaling. The model describes with sufficient precision the behavior of longitudinal parameters -inductance and resistance- to change the frequency. The cross parameters - capacity and conductance- heavily dependent on ground conditions, and can not be represented accurately by a purely electromagnetic model*

Keywords: *electromagnetic compatibility, railway tracks, transmission lines.*

Resumen – En este artículo se describe una técnica para determinar los parámetros electromagnéticos longitudinales y transversales de los rieles de una vía férrea. La técnica está basada en medidas de modo diferencial, así como en la teoría de las líneas de transmisión. Los resultados han sido utilizados para validar un modelo matemático para estudios de compatibilidad electromagnética y, en particular, para el diseño y la optimización de dispositivos electromagnéticos de señalización. El modelo describe con precisión suficiente los comportamientos de los parámetros longitudinales -resistencia e inductancia- al variar la frecuencia. Los parámetros transversales -capacidad y conductancia- dependen fuertemente de las condiciones del terreno, y no pueden ser representados con precisión por un modelo meramente electromagnético.

Palabras clave: compatibilidad electromagnética, líneas de transmisión, rieles.

INTRODUCCIÓN

Construir y montar trenes de alta velocidad es una de las áreas en las que están más interesados los países que cuentan con las características geográficas para hacerlo:

Francia con el TGV, Italia con el Pendolino, España con el AVE, son algunos ejemplos. A la vez que se ejecutan proyectos de implementación, los dispositivos eléctricos necesarios para la tracción y los sistemas para la señalización han incrementado su sofisticación.

Para suplir estos requerimientos, frecuentemente se recurre a la utilización de electrónica de potencia, lo que origina que las corrientes y tensiones incrementen su contenido armónico, lo que, a su vez, genera problemas de incompatibilidad electromagnética entre las partes constitutivas de los sistemas eléctricos ferroviarios. En relación con otros sectores de transporte, como el aeronáutico, en el ferroviario, hasta el momento, se ha hecho poca investigación acerca de esta temática, pero cada vez se nota un mayor interés de la comunidad por aportar a la solución de este problema (Kadhim et al., 1995) (CENELEC, 1996) (Yazdi et al., 1998) (Bialon and Kazimierczak, 1999). Con estos aportes es posible tener claridad acerca del ambiente electromagnético ferroviario, que es necesario para el diseño y optimización de los dispositivos eléctricos y electrónicos.

El circuito de potencia de los sistemas eléctricos ferroviarios lo constituyen las subestaciones, el motor y el funcionamiento del tren, lo mismo que las líneas de contacto y los mismos rieles; infraestructura que también comparte el sistema de señalización. Para un adecuado funcionamiento, el sistema necesita mantener interconectadas sus partes entre sí y con otros sistemas, para lo que se utilizan acoples inductivos y capacitivos, además de que el sistema genera emisiones de radiofrecuencia (Marvin et al., 2002). Son estas características las que justifican esta investigación, dada la importancia de

desarrollar un modelo de la estructura electromagnética de los sistemas eléctricos ferroviarios que permita comprender adecuadamente los fenómenos de incompatibilidad electromagnética.

Contar con un modelo preciso del subsistema de los rieles es necesario para el diseño de circuitos de señalización con audiofrecuencia (Fisher, 1987) (Bergiel and Solarek, 1999) (Rokita, 1999). Estos circuitos se utilizan para indicar la posición del tren a lo largo de la vía ferroviaria, y deben funcionar bajo cualquier condición operativa; para poder diseñarlos adecuadamente es importante conocer el grado en que los parámetros electromagnéticos de los rieles dependen de la frecuencia.

La estructura de los rieles está constituida por dos conductores ferro-magnéticos conectados a tierra, con la función de ser una línea multi-conductora pero con parámetros distribuidos; además, a diferencia de las líneas aéreas, los rieles son no lineales y tienen parámetros variables. Esta característica se debe a la presencia del hierro —saturación e histéresis—, y a su forma geométrica, que genera una distribución no uniforme de corriente. La tierra, como conductor de menor resistencia, origina incertidumbre y variabilidad de los parámetros eléctricos, por lo que se afectan los valores constantes de dieléctrica y resistividad, a la vez que los de capacitancia y conductancia transversales entre los rieles. Dichas propiedades varían en función de parámetros no eléctricos, como la humedad, pero principalmente de uno eléctrico: la frecuencia (Scott, 1967) (Solyar and Walsh, 1993).

En el presente artículo, en función de la frecuencia y de las condiciones climáticas, se analiza cómo determinar los parámetros eléctricos longitudinales y transversales por unidad de longitud de los rieles; además, los resultados se utilizan para validar un modelo matemático con parámetros distribuidos de los rieles.

TRABAJO RELACIONADO

Varias técnicas para modelar rieles ferroviarios e identificar sus parámetros electromagnéticos se han investigado en los últimos años. Tradicionalmente se modelan como un circuito equivalente de parámetros

concentrados; modelo que se ha utilizado por años para diseñar sistemas de señalización (Perticaroli, 1993), pero, dada su simpleza, no es adecuado para diseñar adecuadamente un sistema de audiofrecuencia.

Los investigadores se han interesado en el problema de identificar esos parámetros, y han usado el método que tiene a los campos electromagnéticos como base; utilizan el método de los elementos finitos para calcular la distribución de los campos eléctrico y magnético a lo largo y entre los rieles, proceso con el que obtienen los parámetros electromagnéticos (Hill et al., 1999, 1999-1, 2000). Es un método preciso que permite describir exactamente la geometría de los rieles. Pero, aunque su eficiencia está demostrada, introducir datos confiables para las propiedades eléctricas de los materiales continúa siendo un problema.

Otros investigadores utilizan los métodos basados en la teoría de las líneas para afrontar el problema, y desarrollan modelos de complejidad variable (Sollerkvist and Varjú, 1999) (Sollerkvist et al., 2000). Sin embargo, lo que realmente se requiere es el desarrollo de modelos en los que sea posible medir fácilmente los parámetros para su validación (Szelag, 1999).

METODOLOGÍA

El objetivo de la presente investigación es presentar un método semi-analítico que, con base en la teoría de las líneas de transmisión, permita determinar los parámetros de los rieles a partir del conocimiento de cantidades fácilmente medibles: impedancias en corto circuito y en circuito abierto.

Este sistema lo constituyen dos conductores normales y un conductor de regreso conectado a tierra. El modelo, estructurado a partir de la teoría de las líneas de transmisión (Yazdi et al., 1998), se describe con las siguientes fórmulas:

$$\frac{d[V]}{dx} = [Z][I]$$

$$\frac{d[I]}{dx} = -[Y][V]$$

En las que [V] e [I] son vectores que contienen respectivamente los valores de la resistencia de fase y las corrientes; y [Z] y

[Y] son las matrices de impedancias y admitancias por unidad de longitud.

El mayor problema de este método es la medición de los elementos de las matrices. Proceso que se complica debido a que no se tiene acceso al conductor de regreso, por lo que no es posible realizar las medidas de modo común. Como alternativa se realizaron las medidas de modo diferencial, particularmente una en circuito abierto y otra en cortocircuito, de tal forma que es posible medir la impedancia de línea de ambos rieles. Cuando se trata de parámetros distribuidos –Figura 1– la impedancia resultante es función de las condiciones iniciales de la línea, más sus condiciones de frontera finales:

$$Z_{loop} = \frac{V_1(0) - V_2(0)}{I(0)}$$

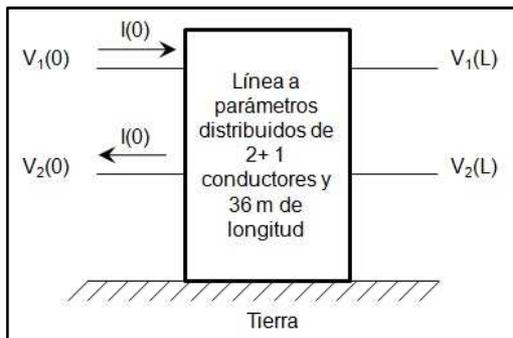


Figura 1. Circuito de parámetros distribuidos de los rieles

Para esta investigación se utilizó un enfoque experimental basado en medidas de impedancias en circuito abierto $-Z_{ca}$, y cortocircuito $-Z_{cc}$, con el consecuente cálculo de parámetros eléctricos. Los demás valores, resistencia longitudinal R, inductancia longitudinales L, capacitancia C y conductancia transversales G, se calculan desde los datos de Z_{ca} y Z_{cc} , la constante de propagación γ , y la impedancia característica de línea Z_0 .

Se definen:

$$\sqrt{ZY} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta$$

$$Z_0 = \frac{R + j\omega L}{\alpha + j\beta} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

En la que:

$$Z = R + j\omega L$$

$$Y = G + j\omega C$$

Aplicando la teoría de las líneas:

$$Z_0 = \sqrt{Z_{ca} Z_{cc}}$$

$$\tanh(\gamma l) = \sqrt{\frac{Z_{sc}}{Z_{oc}}}$$

Con la igualdad trigonométrica:

$$\tanh(\gamma l) = \frac{\tanh(\alpha l) + j \tan(\beta l)}{1 + j \tanh(\alpha l) \tan(\beta l)} = p + jq$$

Se resuelve respecto a α y β :

$$\alpha = \frac{1}{2l} \arctan h \left(\frac{2p}{1 + p^2 + q^2} \right)$$

$$\beta = \frac{1}{2l} \left(\arctan \left(\frac{2q}{1 - p^2 - q^2} \right) + n\pi \right)$$

Ahora los parámetros eléctricos:

$$R = \text{Re}(\gamma Z_0)$$

$$L = \text{Im}((\gamma Z_0)/\omega)$$

$$C = \text{im}((\gamma/Z_0)/\omega)$$

$$G = \text{Re}(\gamma/Z_0)$$

Con esta ecuaciones es posible determinar los parámetros de los rieles luego de conocer la constante de propagación y la impedancia característica de la línea, pero este método es preciso sólo para frecuencias menores a la resonancia de la línea, ya que cuando se acercan a ella, los valores Z_{ca} y Z_{cc} son parecidos, lo que causa imprecisión en las medidas.

RESULTADOS

Las medidas necesarias para la realización de la investigación se efectuaron sobre rieles experimentales de 36 m de largo soportados sobre travesaños de madera, y bajo diversas condiciones climáticas, con el objetivo de evaluar la influencia climática en los resultados.

Las tensiones y corrientes se midieron en circuito abierto y en corto circuito, y se calcularon Z_{ca} y Z_{cc} . Los rieles se alimentaron con una tensión sinodal de entre 1 Hz y 25 kHz, y las señales se capturaron en un osciloscopio digital. Para las medidas en cortocircuito se empleó un sensor de efecto Hall y para las de circuito abierto un resistor de medida. Las señales capturadas se transfirieron a un computador para procesarlos y obtener los datos para R, L, C, y G.

Al analizar los resultados que muestra la Figura 2 se observa que R aumenta en proporción a la frecuencia, con una pendiente inicial igual a la que proporciona el modelo de conductor cilíndrico con efecto piel, es decir, proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia. Luego de 2 kHz la pendiente aumenta, y la resistencia también aumenta, de forma proporcional a la frecuencia, debido a que la forma de los rieles causa una distribución no uniforme de la corriente en su interior.

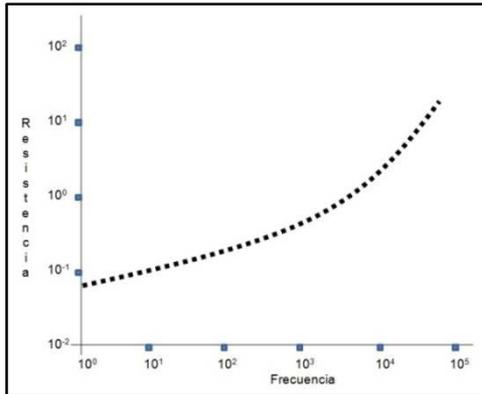


Figura 2. Frecuencia vs. Resistencia

A causa del efecto piel, la inductancia L baja con la frecuencia –Figura 3. Esto se debe a la manera cómo están distribuidos los parámetros, por lo que formalmente lo que se ha logrado medir es la parte imaginaria de una reactancia dividida por una pulsación. Otro dato colectado del experimento es que las condiciones climáticas no influyen significativamente en los parámetros R y L, como tal vez se esperaba.

Se encontró además que las condiciones del terreno tienen un efecto significativo en los parámetros capacitancia y conductancia. La capacitancia C baja con la frecuencia y al incrementar la humedad se incrementa, tal como se observa en la Figura 4.

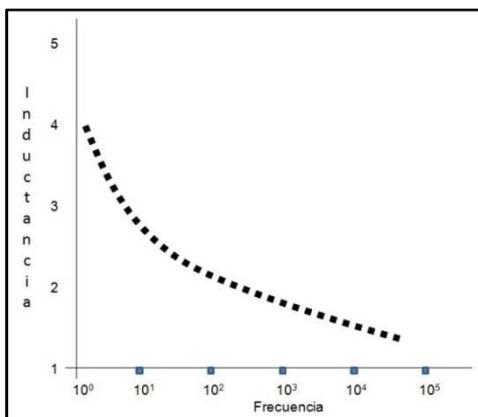


Figura 3. Frecuencia vs. Inductancia

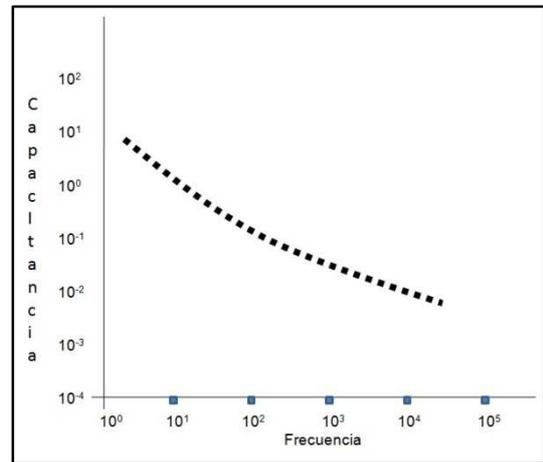


Figura 4. Frecuencia vs. Capacitancia

Al variar la frecuencia, la conductancia G no altera su comportamiento, pero su valor sube cuando el terreno es húmedo. No es posible obtener medidas repetibles para estos parámetros, ya que la constante dieléctrica y la resistividad del suelo son dependientes de la humedad, por lo que son muy variables.

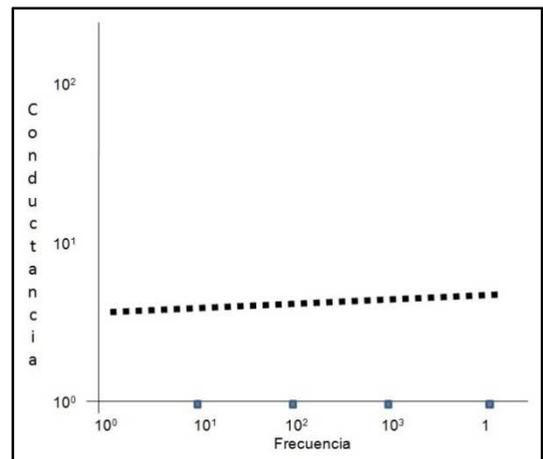


Figura 5. Frecuencia vs. Conductancia

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A las medidas de las impedancias en circuito abierto y en corto circuito obtenidas en la experimentación, con las ecuaciones $R = \text{Re}(\gamma Z_0)$ y $G = \text{Re}(\gamma / Z_0)$, se les hizo comparación en un modelo matemático de parámetros distribuidos para rieles basado en las ecuaciones de Carson (1994), que describen las líneas de transmisión en presencia de diferentes medios, en el presente caso, el hierro y la tierra. En el modelo, los rieles se reemplazaron por conductores cilíndricos de área equivalente, y los datos de entrada fueron: longitud, distancia entre rieles, distancia ideal a la tierra, entre otras, además de las propiedades eléctricas y magnéticas de los materiales utilizados.

La comparación se efectuó con R y L. Para realizar una comparación sencilla entre los parámetros transversales sería necesaria una modelación más sofisticada de la constante dieléctrica y resistividad del terreno. Además, se hizo un estudio de sensibilidad a través de la variación del valor de la permeabilidad relativa de los rieles entre 1 y 200, y de la resistividad entre $10^{-7} \Omega\text{m}$ hasta $2 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$.

Se encontró que el modelo no fue capaz de mostrar el cambio de pendiente en el comportamiento de la resistencia R, porque el efecto piel no es uniforme. Para el comportamiento a bajas frecuencias, un valor de $\mu_r=10$ se aproxima mejor, mientras que uno de $\mu_r=100$ se acerca mejor a las mayores. Con relación a L, $\mu_r=10$ se aproxima mejor al comportamiento medido. Se observa que a los resultados simulados de L convergen los medidos cuando aumenta la frecuencia. También en el modelo, el valor de la resistividad influye en la frecuencia a la que comienza el efecto piel, y describe bien el cambio de pendiente de L, porque las distribuciones de los parámetros en las frecuencias son más altas.

CONCLUSIONES

- En esta investigación se abordó el problema de determinar los parámetros electromagnéticos de los rieles de los ferrocarriles. Su objetivo fue modelar electromagnéticamente los sistemas eléctricos ferroviarios para estudiar su compatibilidad electromagnética. Los resultados son de interés para diseñar y

optimizar dispositivos electromagnéticos ferroviarios, en especial los sistemas de señalización en audiofrecuencia.

- Se describe un proceso experimental con base en la teoría de las líneas de transmisión para determinar los parámetros por unidad de longitud de los rieles, mediante medidas de impedancia en corto circuito y en circuito abierto, y su utilización para validar un modelo de rieles con parámetros distribuidos.
- En el modelo, los rieles se sustituyeron por conductores cilíndricos de área equivalente, lo que no permitió describir el efecto piel no uniforme. El modelo también describe con precisión, para el diseño, el comportamiento de los parámetros longitudinales cuando varía la frecuencia. No obstante, carece de precisión para describir los parámetros transversales, para lo que sería necesario introducir modelos de constante dieléctrica y resistividad del suelo, dependientes de la frecuencia. Además, es necesario tener en cuenta la dependencia de la humedad del terreno y de otras variables no eléctricas, en un modelo adecuado o a partir de correlaciones experimentales.
- Quedan planteadas investigaciones para analizar la validez del modelo, al trabajar con frecuencias superiores a 25 kHz, y con corrientes mayores, que lleven el hierro a la saturación.

REFERENCIAS

1. Bergiel, K. and Solarek T. (1999). Influence of Track Parameters on Operational Conditions of Separation of Coded Track Circuits. Fourth International Conference on Drives and Supply Systems for Modern Electric Traction in Integrated XXI Century Europe. Varsovia, Poland, pp. 56-63.
2. Bialon, A. and Kazimierczak A. (1999). High Power Locomotives and Disturbances in Signalling and Control Systems. Fourth International Conference on Drives and Supply Systems for Modern Electric Traction in Integrated XXI Century Europe. Varsovia, Poland, pp. 34-45.
3. Carson, P. (1994). Analysis of Multiconductor Transmission Lines. New York: Wiley & Sons.
4. CENELEC (1996). Norma ENV 5012. Railway applications: Electromagnetic compatibility. Part 4: Emission and immunity of the signalling and telecommunications apparatus.
5. Fisher, A. J. (1987). Track, Track Circuits and Traction. IEE International Conference on Electric Railway Systems for a New Century. Londres, UK, pp. 184-188.
6. Hill, R. J., Brillante S. and Leonard P. J. (1999). Electromagnetic Field Modelling for Transmission Line Distributed Parameters. IEE Proc. Electrical Power Applications, Vol. 146, No. 1, pp. 53-59.

7. Hill R. J., Brillante S. and Leonard P. J. (1999-1). Railway Track Transmission Line Parameters from Finite Element Field Modelling: Series Impedance. IEE Proc. Electrical Power Applications, Vol. 146, No. 6, pp. 647-660.
8. Hill R. J., Brillante S. and Leonard P. J. (2000). Railway Track Transmission Line Parameters from Finite Element Field Modelling: Shunt Admittance. IEE Proc. Electrical Power Applications, Vol. 147, No 3, pp. 227-238.
9. Kadhim, R., Shao Z. Y. and Allan J. (1995). System and EMC Modelling to Ensure System Compatibility. 2nd International Conference on Electric Transportation Systems Compatibility. Long Beach, USA, pp. 1-9.
10. Marvin, A., Marsham C., Pearce D., McCormack L. M. and Konefal, T. (2002). Radio Frequency Emissions from Railways and their Potential to Interfere with the Operation of Commercial Radio Services and Other Equipment. Workshop on Protection in Complex and Distributed Systems Including Railways. Budapest, Hungari, pp. 23-33.
11. Perticaroli, F. (1993). Sistemi elettrici per i trasporti. Trazione elettrica. Milán: Masson.
12. Rokita. B. (1999). Dependence of input impedance of a track circuit on the technical condition of a track. Fourth International Conference on Drives and Supply Systems for Modern Electric Traction in Integrated XXI Century Europe. Varsovia, Poland, pp. 46-52.
13. Scott, J. H., Carroll R. D. and Cunningham D. R. (1967). Dielectric Constant and Electrical Conductivity Measurements of Moist Rock: a New Laboratory Method. Journal of Geophysic Research, Vol. 72, No. 20, pp. 5101-5115.
14. Sollerkvist, F. J. and Varjú G. (1998). A Comparison of the AT and BT Railway Systems from an Induction Point of View, Using a Multiconductor Simulation. International Symposium on EMC. Rome, Italy, pp. 34-39.
15. Sollerkvist, F.J., Varjú G. and Károlyi K. (2000). Sophisticated Multiconductor Modelling in the Frequency Domain. Part 2: Case Studies. COST 261 Workshop, Cagliari, Italy.
16. Solymar, L. and Walsh D. (1993). Electrical Properties of Materials. Oxford University Press.
17. Szelag, A. (1999). Verification of models applied in simulation analysis of electrified railway lines. Fourth International Conference on Drives and Supply Systems for Modern Electric Traction in Integrated XXI Century Europe, Varsovia, Polonia.
18. Yazdi, H., Roberts C. and Fararooy S. (1998). Intelligent Condition Monitoring of Railway Signalling Equipment Using Simulation. IEE Seminar on Condition Monitoring for Railway Transport. Birmingham, UK, pp. 1-5.

Ω