

高速列车与牵引供电网高次谐波谐振分析

初曦, 林飞, 杨中平, 孙湖

北京交通大学电气工程学院, 北京, 100044

摘要: 本文主要研究了由于高速列车与牵引供电网参数不匹配而引起的高次谐波谐振现象。首先, 简要介绍了高速铁路牵引供电系统与高速列车牵引传动系统建模的理论和方法。从理论上分析了高速列车网侧电流谐波特性, 基于传统的牵引网单线模型分析了谐振现象产生机理。然后, 参考京沪线先导段某供电区间和 CRH-380A 型动车组, 搭建了系统仿真模型, 仿真分析了高次谐波谐振引起的列车端电压升高的现象、供电区间谐振点分布规律及阻抗特性。

关键词: AT 供电方式, 三电平四象限整流器, 牵引网, 谐波特性, 谐振

Analysis of High Frequency Resonances in the Power Supply Line of the High Speed Train

Chu Xi, Lin Fei, Yang Zhongping, Sun Hu

School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044, China

Abstract: The high frequency resonance caused by the mismatch between the high speed train and the power supply line is analyzed in this paper. The modeling methods of the high-speed railway power supply system and high speed train traction drive system are described in detail. And the characteristic of harmonic current generated by the high speed train is mentioned in theory. The generation mechanism of resonance is investigated based on the traditional power supply line simulation model. Then, according to Beijing-Shanghai line and CRH-380A, the simulation model is built with the MTL model. It's resulted that high frequency resonances may cause the high value of harmonic voltage. In addition, the distribution pattern of resonant points and impedance characteristic are researched deeply.

Key words: AT power supply, three-level PWM rectifier, power supply line, harmonic characteristic, resonance

1. 引言

随着高速列车的大量使用, 其注入牵引网的高次谐波带来的问题也日趋严重, 由于车网参数不匹配而引起的谐振现象便是其中之一。当列车注入牵引网的某次谐波频率在系统谐振点频率附近时就会引起谐振现象, 此时列车端会产生幅值很高的谐波电压, 严重时会影响列车的正常运行。车网谐振现象给列车运行带来的不良影响是一个值得深入

研究并亟待解决的问题。

目前, 对车网谐振现象的研究主要分两个方面: 一是分析牵引网的谐波特性^{[3][4]}, 二是分析高速列车注入牵引网电流的谐波特性^{[5][6]}。分析车网谐振现象一般采用牵引供电网单线简化模型^[4]。这种方法将变电所等效成阻感负载, 将牵引网看成一根均匀的传输线, 在电路中用串联的阻感和并联的电容等效, 将列车等效成一个谐波电流源。根据电路相关知识可以准确写出列车两端阻抗值与列车

位置的关系，便于定性、定量分析系统谐波传播规律和谐振频率特性。但这种建模方法过于简单，并不适用于类似高速铁路采用的复线 AT 供电方式等复杂的牵引供电方式。文献[2]和[4]针对 AT 供电方式建立了牵引网的多线模型，对谐振现象进行了仿真，但未深入探讨牵引网的阻抗特性。文献[9]在牵引网多线模型的基础上研究了基于车网耦合的潮流计算方法，由于文章的重点在于潮流计算方法，所以并未对谐振现象进行进一步分析。

本文采用牵引网平行多导体传输线模型，参考京沪线先导段牵引供电系统建立了某一供电区间的仿真模型，将列车等效成谐波电流源，分析了牵引网阻抗特性，系统谐振点分布规律，以及谐波电压传播规律。

2. 谐振现象产生机理

车网谐振现象可以看成是列车运行过程中产生的某次谐波电流流入牵引网，与牵引网和牵引变电所的阻抗构成了某次谐振电路，使得牵引变电所或列车端阻抗值达到极大值，电压幅值明显升高。其谐振频率由牵引网和牵引变电所的阻抗参数决定。分析车网谐振现象普遍采用牵引网单线模型，其等效电路如图 1 所示。

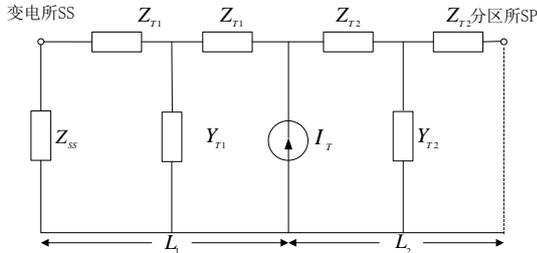


图 1 牵引供电网单线简化模型

Z_{SS} 为牵引变电所的等效阻抗， Z_{T1} 、 Y_{T1} 为动车组和变电所之间的牵引网等效电路中的阻抗和导纳值， Z_{T2} 、 Y_{T2} 为动车组和分区所之间的牵引网等效电路中的阻抗和导纳值，将动车组近似等效为谐波电流源， I_T 为动车组注入牵引网的谐波电流， L_1 为动车组与变电所之间的距离， L_2 为动车组与分区所之间的距离。该模型将供电区间按列车位置分成了两部分，一部分是变电所与列车之间的线路，另一部分是列车与分区所之间的线路，将两部分的线路分别等效成 T 型等值电路，根据均匀传输线理论和电路知识可得列车两端等效阻抗表达式^[2]为：

$$Z_q = \frac{Z_c \cosh(\gamma L_2)(Z_{ss} \cosh(\gamma L_1) + Z_c \sinh(\gamma L_1))}{Z_{ss} \sinh(\gamma L) + Z_c \cosh(\gamma L)} \quad (1)$$

其中：

$$\gamma = \sqrt{Z_0 Y_0} \quad (2)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} \quad (3)$$

$$Z_0 = R_0 + j\omega L_0 \quad (4)$$

$$Y_0 = j\omega C_0 \quad (5)$$

式中， Z_0 为传输线单位长度的阻抗， Y_0 为传输线单位长度的导纳， R_0 为单位长度传输线分布电阻值， L_0 为单位长度传输线分布电感值， C_0 为单位长度传输线分布电容值， Z_{ss} 为变电所等效阻抗， L 为供电段长度。根据等效阻抗的公式便可得到列车两端不同频率下等效阻抗与列车位置的关系。由于模型中存在大量的串并联的电阻、电感、电容元件，在某一位置列车两端的等效阻抗值如图 2 所示。

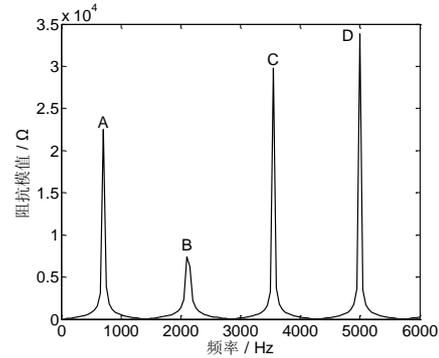


图 2 列车两端等效阻抗值

从图 2 中可以看出，A、B、C、D 四个点为列车在该位置的谐振点，谐振点处阻抗达到极大值，其附近一定频率范围内的阻抗值也明显高于其他频率处的。列车端谐波电压幅值为列车注入牵引网的谐波电流幅值与列车端等效阻抗值的乘积，当列车注入牵引网的谐波电流频率在系统的谐振频率处或其附近，就会产生并联谐振，在列车两端产生几千甚至几十千伏的谐波电压。

这种建模方法主要是针对由一根接触线和钢轨组成的牵引网，只适用于直接供电方式（T-R 方式）^[3]，无法针对比较复杂的供电系统进行建模。而高速铁路牵引网结构复杂，多为多导线并联结构，导线之间互有影响。因此，本文采用多导体传

和 β 分别为载波和调制波的初相角； $J_n(m\pi M/2)$ 为贝塞尔函数项，其中 0 为阶数， $m\pi M/2$ 为自变量^[5]。

采用二重化拓扑结构时，系统变压器一次侧电流表达式为：

$$i_N(t) = \frac{2\sqrt{M^2 U_d^2 - 2U_N^2}}{k\omega_m L_N} \cos(\omega_m t + \beta) + \sum_{m=4,8,\dots} \sum_{n=\pm 1, \pm 3, \dots} \frac{4U_d}{km\pi L_N (m\omega_c + n\omega_m)} J_n(m\pi M) \sin \frac{n\pi}{2} \sin(m\alpha_1 + n\beta + m\omega_c t + n\omega_m t) \quad (10)$$

式中， k 为变压器变比， α_1 为整流器1的载波相角， α_2 为整流器2的，其中 $\alpha_2 = \alpha_1 + \pi/2$ 。

从公式(9)(10)中，可以得出以下结论：

- 1) 电流谐波分量为集中分布在偶数倍于开关频率附近的高次谐波，由于贝塞尔函数的衰减作用，频带频率越高，谐波幅值越小，谐波含量越小；
- 2) 谐波的含量受直流电压幅值、网侧电压有效值、网压频率和PWM调制载波频率等影响，各次谐波幅值还与交流侧电感值有关；
- 3) 二重化拓扑结构消除了单个整流器单独运行时产生的2、6、10...倍于开关频率附近的谐波，使得4、8...倍于开关频率附近的谐波幅值加倍。

4. 车网谐振现象仿真结果

4.1 算例模型

本文应用3.1节的建模方法，以京沪线采用的复线AT供电方式为例，建立了某一供电区间的仿真模型，线路变电所布置示意图如图9所示。该供电区间全长48km，从牵引变电所起，每隔10km设一个AT分区所，所内放置一台自耦变压器。变电所、自耦变压器和单位长度牵引网模型参数均采用京沪线实际参数。牵引网传输线型号及其位置分布如图10所示。根据导线合并原则，将上行接触线和上行承力索合并为上行接触线，将下行接触线和下行承力索合并为下行接触线，将四根钢轨和上下行保护线合并为一根导线，合并后系统共有5根导线，降低了模型计算的复杂度。变电所变压器参数如表1所示。自耦变压器额定频率为50Hz，等效电阻为 0.208Ω ，等效电感为 1.29mH ^[4]。

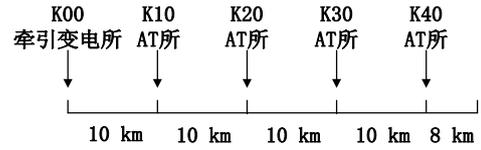


图9 线路变电所布置示意图

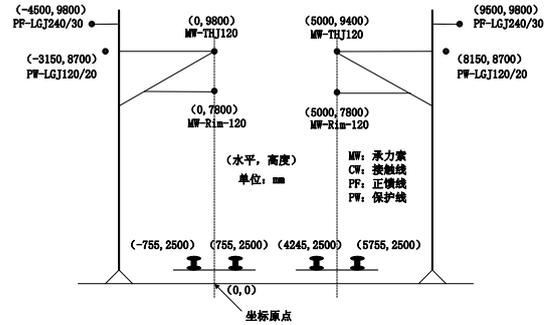


图10 复线AT供电方式传输线分布图

4.2 仿真结果

仿真参数如下：变电所输入为220kV三相交流电压源；列车编组方式为14M2T长编组，共7个动力单元，每个整流器直流侧功率为1690kW。

表1 变压器参数

		变电所变压器	牵引变压器
额定功率/kVA		50000	3855
额定频率/Hz		50	50
原边	额定电压	220000	25000
	绕组 有效值/V		
	电阻/ Ω	1.36	0.981
	电感/mH	159.9	46.88
副边	额定电压	55000	1658
	绕组 有效值/V		
	电阻/ Ω	0.085	0.0185
	电感/mH	10	1.195
励磁	电阻/ Ω	1520000	567000
绕组	电感/H	2801	358.62

该供电区间内不同位置0~6000Hz处的阻抗值如图11所示。从谐波次数的坐标轴看过去，得供电区间内的谐波频率分布如图12所示。结合图11和图12可已看出，对于该段结构、长度和导线参数确定的供电区间而言，系统有多个谐振点，谐振点的谐振频率与线路位置无关。各谐振点所达到的阻抗最大值不同，达到阻抗最大值的位置也不同，例如14次谐波频率阻抗最大值为 1226Ω ，71次谐波频率的为 2502Ω 。对于同一谐振频率而言，阻抗值

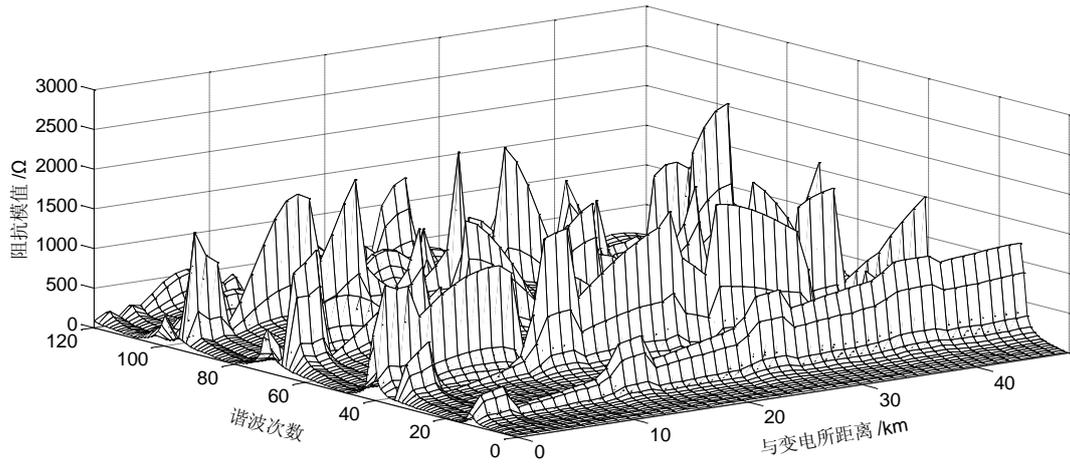


图 11 系统等效阻抗模值图

随位置呈波动性变化。不同谐振频率阻抗值随位置变化的趋势及幅度不同。

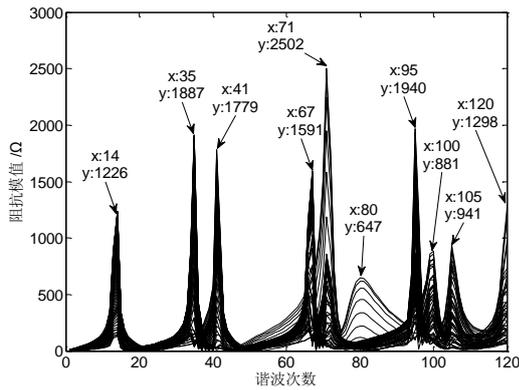


图 12 供电区间内谐波频率分布图

计算得列车运行至 K00、K12、K24、K36、K48 处列车端电压幅值如图 13 所示，其中一个动力单元中一台整流器的负载功率为 1690kW。其中，主要成分 95、97、99、101、103、105 次谐波电压幅值如图 14 所示。

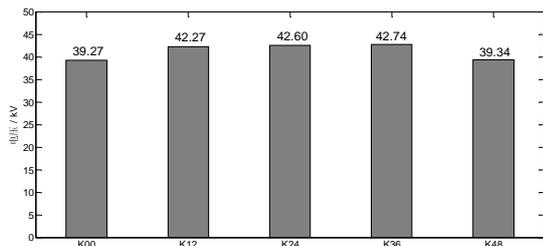


图 13 供电区间内不同位置处网侧电压幅值

从图 14 可以看出，列车运行到 K24 处，网压中 95 次谐波电压幅值明显升高。结合图 12 可知，这是由于此时 95 次谐波频率为列车端一个谐振频率，阻抗值较高，而且 95 次谐波属于列车注入牵引网的高次谐波的主要成分。95 次谐波电压在其他位置处幅值不高。可见，对某一供电区间而言，谐振时列车端产生了幅值较高的谐振频率附近的谐波电压，其幅值与列车位置有关。

从仿真结果可以看出，列车运行在不同位置时，列车端电压幅值不同，网压幅值波动主要的影响因素是谐波电压。

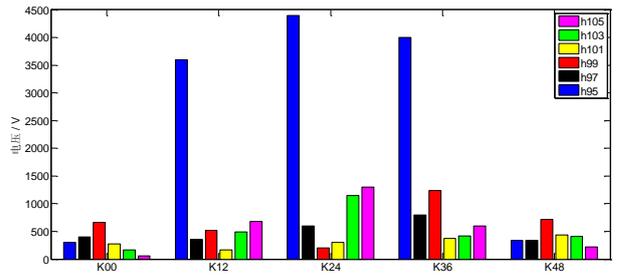


图 14 供电区间内不同位置处网侧谐波电压主要成分谐波幅值

5. 结论

本文以京沪线牵引供电系统和 CRH380A 型动车组牵引传动系统为例，搭建了用于分析车网谐振现象的 Matlab/Simulink 仿真模型。仿真分析了由列车与牵引网谐振引起的网压过高的现象，并进一步

探讨了列车位置对列车端等效阻抗的影响,分析了系统谐振点的分布规律。通过仿真分析,得到以下结论:

- 1) 车网谐振现象产生的主要原因是列车注入牵引网的某次谐波电流和系统阻抗构成了谐振电路,在列车端产生了幅值较高的谐波电压,造成了网压升高。影响列车端谐波电压幅值的两个重要因素是网侧谐波电流幅值和列车端等效阻抗值。
- 2) 对于某一确定的供电区段,系统有多个谐振点,谐振频率与位置无关,阻抗值与位置有关。
- 3) 列车端在谐振频率处会产生幅值较高的谐波电压,其幅值与列车位置有关。

影响列车端等效阻抗值的因素很多,例如列车输入端阻抗、线路长度、线路上其他装置、自然条件等。本文只是设计了一段简单的供电区间,并未考虑其他因素对系统阻抗特性的影响。这些情况都有待进一步研究探讨。

参考文献

- [1]. 裴顺鑫,苏鹏程,吴命利. 高次谐波谐振引起网压异常波动的治理措施[C]. 2008年铁路电气化新技术学术年会论文集,武汉,2008。
- [2]. 杨其林. 牵引供电系统与高速列车牵引传动系统耦合振荡研究[D]. 北京交通大学硕士学位论文,2012。
- [3]. 吴命利. 牵引供电系统电气参数与数学模型研究[D]. 北京交通大学博士学位论文,2006。
- [4]. 姚楠. 电气化铁道牵引网基波与谐波模型研究[D]. 北京交通大学硕士学位论文,2008。
- [5]. D. Grahame Holmes, Thomas A. Lipo 著,周克亮译. 电力电子变换器PWM技术原理与实践[M]. 北京,人民邮电出版社,2010。
- [6]. 刘玉洁,盛彩飞,林飞,游小杰,郑琼林. 高速动车组网侧电流谐波特性的研究[J]. 电气传动,2010,40(1): 33-50。
- [7]. 屈克庆,靳希,董立骏,张文斌. 基于载波移相技术的PWM多重化整流器[J]. 上海电力学院学报,2008,24(3): 282-290。
- [8]. 冯晓云. 电力牵引交流传动及其控制系统[M]. 北京,高等教育出版社,2009。
- [9]. 胡海涛,何正友,钱澄浩,张民. 基于模态分析的全并联AT网动态谐波谐振研究[J]. 电网技术,2012,36(1): 163-169。