

AT 供电系统阻抗频率特性及谐波电流放大分析

张 培, 黄彦全, 芦思为

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:为研究高速列车注入谐波电流与 AT 供电系统之间参数匹配引起的谐波谐振问题, 根据经典 Carson 理论和多导体传输线理论, 建立牵引网多导线等值 Π 型谐波模型。利用 Matlab/Simulink 仿真平台搭建模型进行仿真, 研究了机车不同位置时、牵引网不同长度时和外部电源短路容量改变时对系统阻抗频率特性和谐波电流放大情况的影响, 探讨了阻抗频率特性和谐波电流放大的相关性, 得到了 AT 供电系统谐波谐振的相关规律, 可以对 AT 牵引供电系统的谐波谐振现象研究提供参考。

关键词:AT 供电系统; 谐波谐振; 阻抗频率特性; 谐波电流放大

中图分类号:U223.6+3 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2017)02-0077-07

0 引言

牵引供电系统网络结构及其分布参数特性, 决定了其必然存在谐振点, 当机车向牵引网注入的谐波频率等于牵引网谐振点时就可能引起系统谐振。机车发出的谐波电流可能引起牵引网谐振, 从而造成过电压或过电流对牵引供电系统的安全稳定运行造成危害, 也使得电气化铁道成为电力系统主要谐波干扰源之一^[1-3]。谐波阻抗随频率变化的极端状态即是谐振, 研究牵引网的阻抗特性, 特别是牵引供电系统发生谐振时的阻抗频率特性, 有助于找出牵引网谐波谐振规律, 识别谐振种类。文献^[4]从牵引网谐波放大倍数的角度考察谐振以及谐波放大特性, 并未涉及 AT 牵引网阻抗特性规律的探索。文献^[5]以京津城际铁路为例建立了牵引网的仿真模型, 获得了不同供电方式牵引网的谐振频率, 但对并联谐振频率对应阻抗模值和串联谐振频率的变化规律涉及较少。目前, 相关文献对牵引网阻抗频率特性与谐波电流放大之间的关联性分析较少。

本文以牵引网单位串联阻抗矩阵和并联导纳矩阵为单元, 结合 Matlab/Simulink 软件的相关功能模块, 建立一种适合于谐波仿真研究和分析的 AT 牵引网链式模型, 分析谐振现象的产生机理, 对外部条件的改变对牵引网阻抗频率特性的影响做详细论述, 探索谐波电流放大的规律以及与阻抗特性的关联性。

1 AT 供电方式仿真模型

目前主流的高速铁路 AT 供电方式有 55 kV 模式和 2×27.5 kV 模式, 这两种模式在我国均有采用。二者比较而言, 2×27.5 kV 模式直接在牵引变压器的次边中点抽头, 省掉了牵引变电所内 AT。本文将采用 2×27.5 kV 模式的 AT 牵引供电系统进行建模仿真。AT 牵引网由多导体传输线等值型模型构建, 采用包含串联阻抗矩阵和并联导纳矩阵的集中参数模型来搭建, 将线与线间的互电容等效到每条线与地之间的电容^[6], 结合 Matlab 里提供的仿真模块, 采用 Sim Power Systems 里的自阻抗“Series RLC Branch”模块和互阻抗“Mutual Inductance”模块来分别表示单位长度导线之间的自阻抗、对地电容和互阻抗, 根据简化的牵引网模型进行搭建、封装、级联, 即可获得任意长度的牵引网模型。系统仿真模型由 110 kV 系统作为外部电源, 短路容量 2 000 MVA, 牵引变压器采用二次侧中点抽出式单相牵引变压器, 额定容量 31.5 MVA, AT 自耦变压器容量 8.5 MVA, 牵引网导线型号: 接触线 CuMg-150, 承力索 THJ-120, 钢轨

收稿日期: 2016-03-25 责任编辑: 刘宪福 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxxbzrb.2017.02.14

作者简介: 张培(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为牵引供电系统仿真。E-mail: 390900973@qq.com

张培, 黄彦全, 芦思为. AT 供电系统阻抗频率特性及谐波电流放大分析[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2017, 30(2): 77-82.

UIC60, 正馈线 LGJ-185。图 1 的仿真模型为牵引变压器采用二次侧中点抽出式单相接线, 运行方式为末端并联方式, 牵引网以 1 km 长度进行模型搭建并级联, 封装, 形成复线 AT 供电方式下的单段供电区间模型。

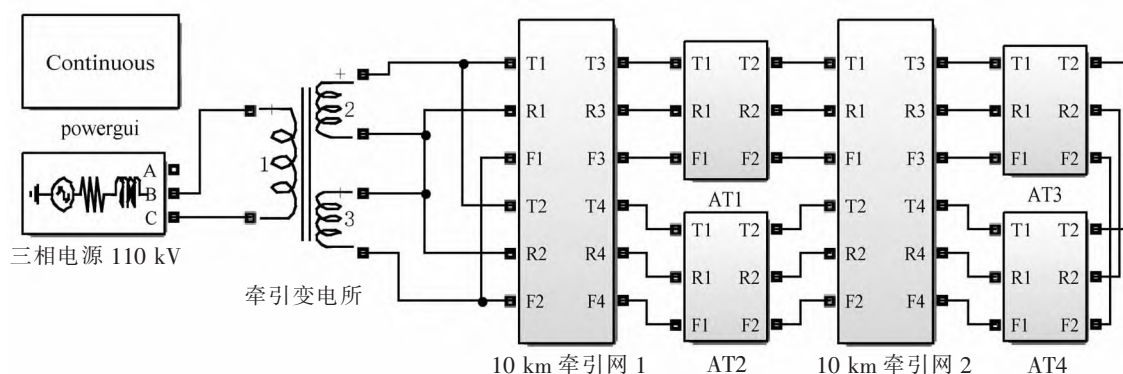


图 1 AT 牵引供电系统仿真图

2 阻抗频率特性和谐波放大

2.1 牵引网阻抗频率特性分析

串联谐振的阻抗特性有以下两点: 阻抗模值在谐振频率处取得极小值, 且为纯阻性, 阻抗角由负变正, 在谐振频率处过零。类似地, 并联谐振的阻抗特性包括: 阻抗模值在谐振频率处取得极大值, 且为纯阻性, 阻抗角由正变负, 在谐振频率处过零^[7]。使用仿真模型: 牵引网长度 20 km, 忽略 AT 漏抗, 运行方式为末端并联方式。每隔 1 km 对牵引网进行阻抗频率扫描, 图 2 给出了与牵引所不同距离时机车处看进去的牵引网阻抗模值-频率曲线和相位-频率曲线。

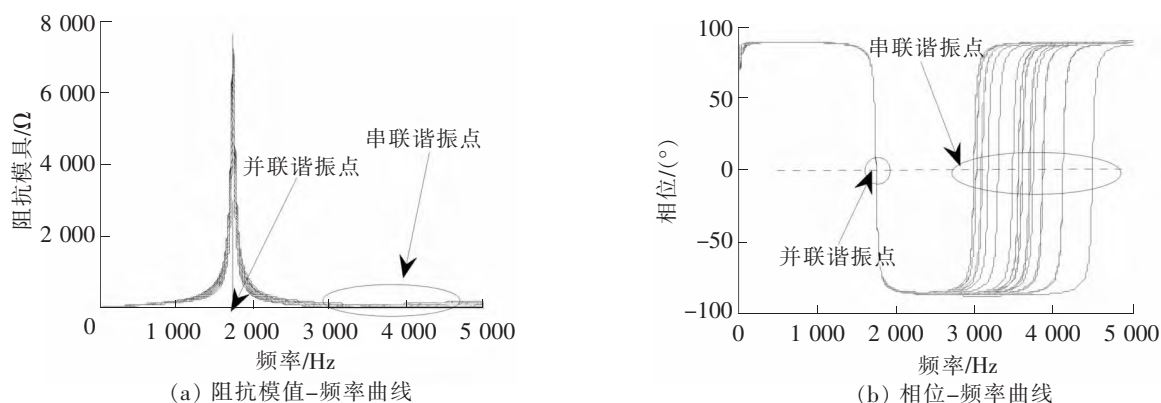


图 2 机车不同位置时阻抗模值和相位-频率曲线

由图 2(a)可知, 系统的第一个并联谐振点固定在 1 740 Hz, 不随机车位置的变化而改变, 但是并联谐振点对应的阻抗模值各有变化; 由图 2(b)可知, 第一个串联谐振点随着机车位置的改变而各有变化。普通直流机车的特征谐波是所有奇次谐波, 随着谐波次数增大其含有率快速衰减, 交直交机车和交直机车相比, 低次谐波含量较低, 但谐波频谱变宽, 含有一定量的数十倍于基波频率的高次谐波电流成分^[8], 因此机车由 3-101 次等幅奇次谐波电流源并联等效, 可覆盖不同类型机车的频谱宽度。机车在距牵引变电所 5 km、10 km、15 km、20 km 处, 向牵引网注入谐波电流, 考查馈线电流的谐波放大情况, 见图 3。

由图 3 可知, 机车位置改变时, 馈线电流均在 1 750 Hz 周围发生谐波电流放大, 且在 1 750 Hz 放大倍数最大, 接近并联谐振频率 1 740 Hz, 放大倍数分别为 17.51、19.15、20.16、20.56 倍。各次谐波电流只在并联谐振频率周围发生明显的谐波放大, 而在串联谐振频率处的谐波并未发生谐波放大现象。可见, 谐波电流的放大主要是和并联谐振相关。

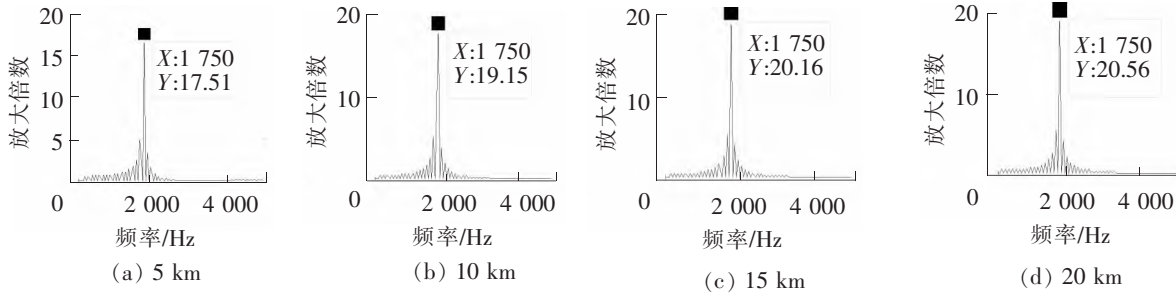


图 3 机车不同位置时馈线电流谐波放大情况

2.2 机车处看去的牵引网阻抗和谐波电流放大分析

牵引网是一个 RLC 分布的多导体传输系统,图 4 的谐波传输等效电路图可用于分析机车处看进去的等效牵引网阻抗和牵引网上谐波电流传输时的谐波放大情况^[4]。

机车处向牵引变电所方向看去和向分区所方向看去的阻抗分别为 Z_1 、 Z_2 ,对机车处的谐波电流源来说,整个牵引网的等效阻抗为 Z_1 、 Z_2 并联,即

$$Z_p = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{Z_0 \cosh \gamma L_2 (Z_{ss} \cosh \gamma L_1 + Z_0 \sinh \gamma L_1)}{Z_{ss} \sinh \gamma L + Z_0 \cosh \gamma L} \quad (1)$$

定义在距离机车 x 处的牵引网谐波电流放大倍数为

$$K_x = \frac{I_x}{I_1} = \frac{\cosh \gamma L_2 [Z_{ss} \sinh \gamma (L_1 - x) + Z_0 \cosh \gamma (L_1 - x)]}{Z_{ss} \sinh \gamma L + Z_0 \cosh \gamma L} \quad (2)$$

式中, $Z_0 = \sqrt{z/y}$ 为特征阻抗, $\gamma = \sqrt{zy}$ 为传播函数, z 为单位长度线路串联阻抗, y 为单位长度线路并联导纳; Z_{ss} 为包括电源电抗和牵引变压器电抗的等效系统阻抗; I_x 为距离机车 x 处的牵引网电流; I_1 、 I_2 分别为流向牵引所(SS)和分区所(SP)方向的机车电流; I_h 为机车电流; L_1 、 L_2 、 L 分别为机车到变电所,分区所距离和牵引网长度, km。

并联谐振发生时牵引网阻抗 Z_p 取得极大值,即并联谐振发生的条件为式(1)分母为 0 或接近 0,谐波电流放大倍数取得最大放大倍数 K_x 的条件是式(2)分母为 0 或接近 0,二者是一致的,即 $Z_{ss} \sinh \gamma L + Z_0 \cosh \gamma L = 0$,同样也可说明谐波电流的放大主要是和并联谐振有关。并联谐振条件: $Z_{ss} = j\omega L_{ss}$, $Z_{ss} \sinh \gamma L + Z_0 \cosh \gamma L = 0$,简化条件 $\gamma L \ll 1$, $\tanh \gamma L \approx \gamma L$,可解得谐振频率

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{ss} C}} \quad (3)$$

由式(3)可知,牵引供电系统的并联谐振可以近似看成是系统的等效串联电感与整个牵引网的分布电容构成。由式(2)可以看出机车注入谐波电流在牵引网上的谐波放大特性主要受机车位置、牵引网长度 L 、系统阻抗 Z_{ss} 、牵引网分布参数等的影响。下面将具体仿真分析相关外部条件变化时,牵引网阻抗频率特性及谐波电流放大规律。

3 阻抗频率特性及谐波电流放大仿真

3.1 机车在牵引网不同位置处阻抗频率特性和谐波放大仿真

图 2 已给出机车不同位置时阻抗模值和相位-频率曲线。系统的第一个并联谐振点位置固定在 1 740 Hz,不随机车位置的变化而改变,但是并联谐振点对应的阻抗值各有变化;第一个串联谐振点则随着机车位置的改变而各有变化。

为探究机车在不同位置处第一个并联谐振阻抗值的变化规律和第一个串联谐振点频率的变化规律,

将并联谐振点对应阻抗值和串联谐振点频率值进行统计,结果见图 5、图 6。

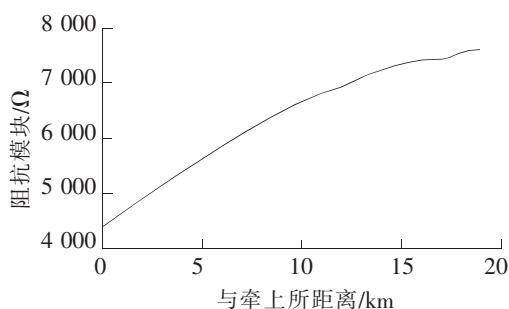


图 5 机车不同位置并联谐振点对应阻抗值

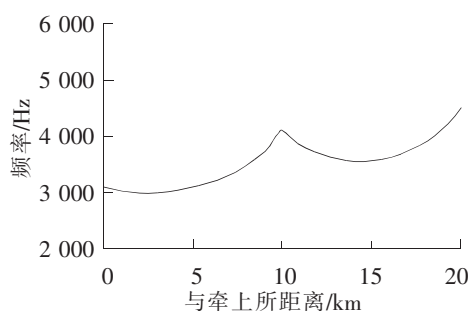


图 6 机车不同位置串联谐振点频率

对于机车在不同位置时的阻频特性,可总结以下规律:(1)由图 2、图 5 知,机车位置变化不改变牵引网第一个并联谐振频率,相应阻抗模值随着机车与牵引所的距离增加而增加,且越往后增速越慢。(2)随着机车与牵引所距离增加,第一个串联谐振频率总是在一个 AT 段内先减少,后增加,在每个 AT 段位置处达到极大值,呈“波浪”型。

图 7 给出了 AT 段分别取 8 km、10 km、12 km 3 种情况下,机车不同位置处串联谐振频率的统计情况。进一步验证第一个串联谐振频率的变化是以 AT 段长为单位的“波浪”型的结论。

由 2.1 分析,谐波电流放大与并联谐振点相关。图 8 给出了谐振频率(1 750 Hz)的谐波放大倍数随位置变化的曲线。对比图 8 和图 5 可见,二者趋势是一致的,均是越远离牵引所,放大倍数或阻抗模值越大。因此,阻抗模值-频率曲线中第一个并联谐振点对应的阻抗模值的大小,反应了系统在此谐振频率下的谐波电流放大程度。

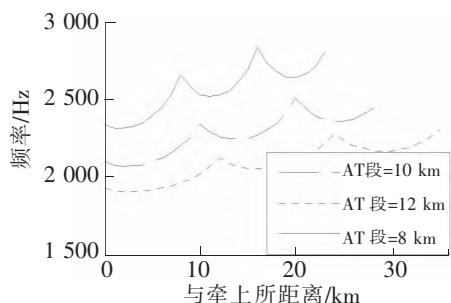


图 7 牵引网不同 AT 间隔机车不同位置时串联谐振频率

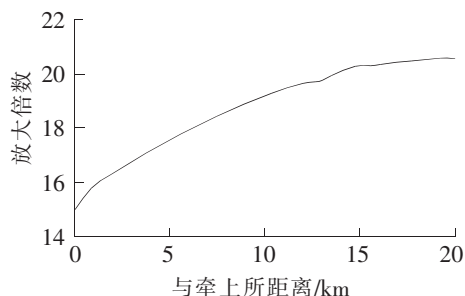
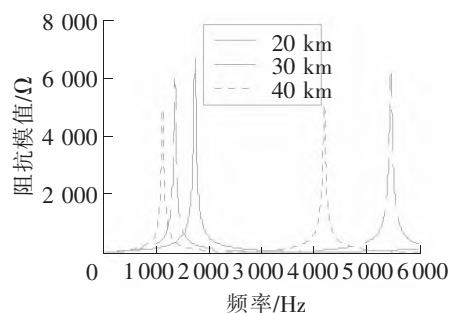


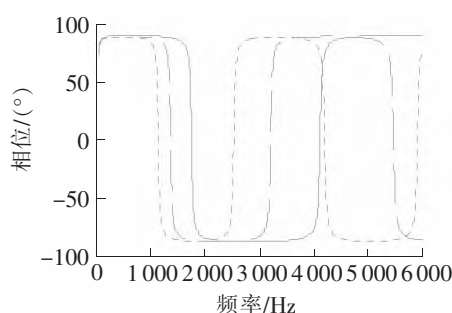
图 8 机车位置改变时馈线电流谐波放大倍数

3.2 不同牵引网长度的阻抗频率特性和谐波放大仿真

使用仿真模型,运行方式为末端并联方式,AT 漏抗 0.45 Ω,牵引网长度分别为 20 km、30 km、40 km,在末端对其进行频率扫描,阻抗模值和相位-频率曲线见图 9。



(a) 阻抗模值-频率曲线



(b) 相位-频率曲线

图 9 不同牵引网长度阻抗和相位-频率曲线

由图 9 可知,系统的串联谐振和并联谐振是交替发生的;牵引网长 20 km、30 km、40 km 时第一次并联谐振分别发生在 1 740 Hz、1 350 Hz 和 1 124 Hz,随着牵引网长度的增加,谐振频率向低频方向移动,由式(3)知,牵引网长度越长,分布电容越大,谐振频率越低;各自并联谐振点对应阻抗模值减小。统计图 9(b)中不同牵引网长度时的相位过零点个数,在 0~6 000 Hz 范围内,牵引网长度 20 km、30 km、40 km 时串、并联谐振点总个数分别为 2 个、3 个、4 个,随着牵引网增长,谐振点的个数也随之增多。

机车固定在牵引网末端,向牵引网系统注入谐波电流,不同牵引网长度时的馈线电流谐波放大情况见图 10。3 种牵引网长度下,馈线电流在 1 750 Hz、1 350 Hz、1 150 Hz 有最大谐波放大倍数,分别为 20.56、19.42 和 11.27 倍,随着牵引网长度增长,并联谐振点向低频移动,且谐波放大程度减弱,这与阻频特性曲线中各自并联谐振点对应阻抗模值减小趋势一致。

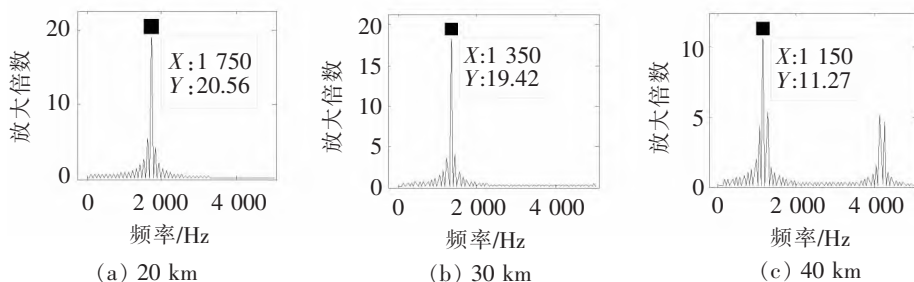


图 10 不同长度牵引网馈线电流谐波放大情况

3.3 外部电源短路容量改变时的阻抗频率特性和谐波放大仿真

使用仿真模型,牵引网 20 km,运行方式末端并联方式,忽略 AT 漏抗。我国电气化铁路沿线外部电源状况本身存在差异性且外部电源运行工况存在时变性,有必要对外部电源状况改变对谐振点和谐波放大情况的影响进行分析。短路容量表征着外部电源的供电能力。针对外部电源短路容量为 500 MVA、1 500 MVA 和 2 000 MVA 3 种情况下的仿真模型,在末端对其进行频率扫描,得到的阻抗和相位-频率曲线见图 11。

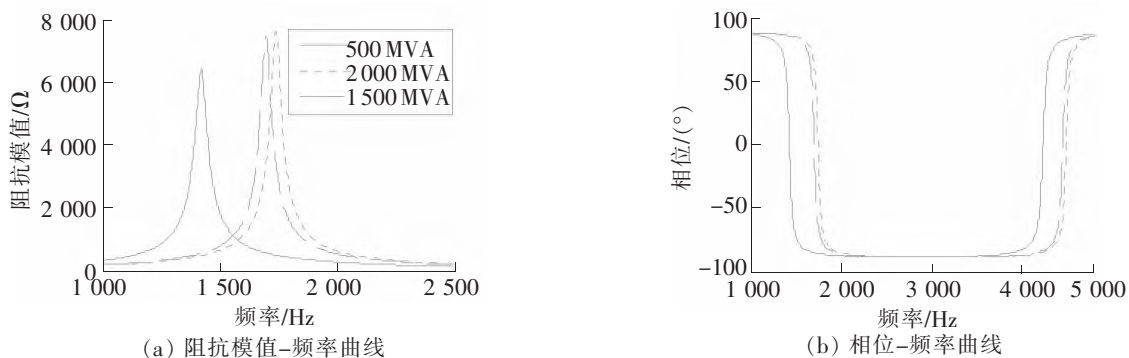


图 11 短路容量不同时阻抗和相位-频率曲线

由图 11 可知,500 MVA、1 500 MVA 和 2 000 MVA 3 种情况下,短路容量越大,谐振频率越高。由式(3)可知,牵引供电系统的并联谐振可以近似看成是系统的等效串联电感与整个牵引网的分布电容构成。系统短路容量越大,系统等效电抗越小,谐振频率就越高。

机车固在牵引网末端,向牵引网系统注入谐波电流,馈线电流的谐波电流放大情况见图 12。500 MVA、1 500 MVA 和 2 000 MVA 3 种短路容量下,馈线电流有最大谐波放大倍数的频率分别为 1 450 Hz、1 650 Hz、1 750 Hz,最大放大倍数分别为 9.782、9.926 和 20.56 倍,与图 11(a)中阻频特性曲线中各自并联谐振点对应阻抗模值增加趋势是一致的。

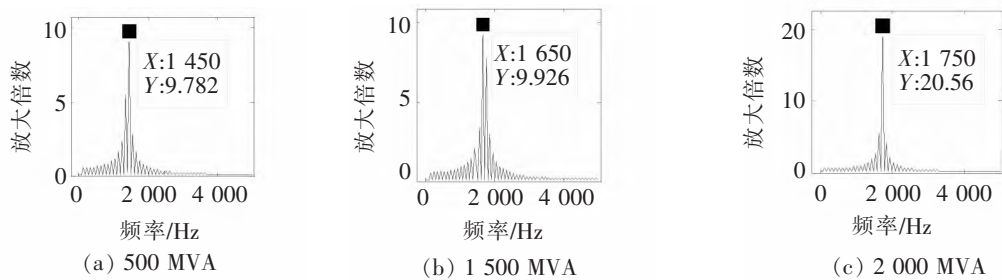


图 12 短路容量不同时馈线电流谐波放大情况

4 结语

本文通过理论推导以及仿真分析了外部因素改变时 AT 牵引供电系统阻抗频率特性和谐波电流放大规律, 利于根据牵引网谐波谐振规律有针对性地研究抑制策略, 减少谐振产生的危害。由仿真分析可得到以下结论: 谐波电流的放大主要是和并联谐振相关, 串联谐振频率处的谐波对牵引网电流升高无明显影响。牵引网第一个并联谐振点对应的阻抗模值的大小表征着此谐振频率在牵引网中谐波电流放大的强弱程度。文献[5,9]限于采样次数, 得出离牵引变电所越远, 串联谐振频率越向高频移动的结论值得商榷, 本文对每 1 km 处扫频获得的第一次串联谐振频率进行统计发现, 机车位置改变时, 牵引网第一个并联谐振点位置固定, 相应阻抗值和谐波电流放大倍数随着机车与牵引所的距离增加而增加, 且越往后增速越慢, 随着机车与牵引所距离增加, 第一个串联谐振点频率总是在一个 AT 段内先减少, 后增加, 在每个 AT 段位置处达到极大值, 呈“波浪”型。随着牵引网长度的增加, 谐振点的个数也随之增多, 谐振频率向低频方向移动, 且各自谐振点对应阻抗模值减小, 馈线电流谐波放大倍数减小。外部电源短路容量越大, 电源电抗越小, 谐振点越往高频移动, 且第一个并联谐振点对应的阻抗模值增大, 馈线电流谐波放大倍数增大。

参 考 文 献

- [1] 杨少兵, 吴命利. 基于实测数据的高速动车组谐波分布特性与概率模型研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(3): 33-38.
- [2] 蒋锐. 达成线高速列车引发的电容等设备故障解析与治理策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [3] 王硕禾, 许继勇, 蔡清亮, 等. 基于 LabVIEW 的牵引供电电能质量检测与分析装置研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2011, 24(2): 94-98.
- [4] 何正友, 胡海涛. 高速铁路牵引供电系统谐波及其传输特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 56.
- [5] 刘宇航. 牵引网谐振规律研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [6] George J. wakileh. 电力系统谐波-基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 徐政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [7] 李群湛. 电气化铁道综合补偿技术及其应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1993.
- [8] 于坤山, 周胜军, 王同勋, 等. 电气化铁路供电与电能质量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [9] 何焱. 高速铁路车网谐波特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.

(下转第 88 页)

Research of the Correlation Between Dynamic and Static Track Quality Index After Fine Adjustment

Qiu Junxing¹, Xu Yude¹, Shen Jianfeng¹, Mao Xiaojun²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Scientific Research Institute of Shanghai Railway Bureau, Shanghai 200071, China)

Abstract: After the track achieves the static acceptance standard, it's the stage of dynamic combined test, which has heavy tasks and time is limited. To reduce the workload, it is desirable to predict dynamic TQI through static TQI. By introducing the ratio of dynamic TQI and static TQI analyzing the relation between them analyzing whether dynamic detection speed and line type have influence to the ratio, dynamic TQI is predicted base on the confidence interval of the ratio. The result shows that, dynamic TQI is 1.0~1.5 times larger than static TQI, and the ratio between dynamic TQI and static TQI has positive correlation with dynamic detection speed, but has no correlation with line type. The data of Hangzhou-Changsha high speed railway shows that, for railway designed speed of 300~350 km/h, it is needed to control static TQI of whole line under 2.65 mm to ensure dynamic acceptance up to standard, and the reliability up to 95%. The data of Nanjing-Anqing high speed railway shows that, for railway designed speed of 200~250 km/h, it is needed to control static TQI of whole line under 4.60 mm to ensure dynamic acceptance up to standard, and the reliability up to 95%.

Key words: ballastless track; track quality index; confidence interval; correlation

(上接第 82 页)

Research on Impedance Frequency Characteristics and Harmonic Current Amplification of AT Power Supply System

Zhang Pei, Huang Yanquan, Lu Siwei

(College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: For the study of the harmonic resonance problems of electrical matching between harmonic current injection of high-speed train and the AT power supply system, the theories of multi-conductor transmission line and classical Carson are used to establish the multi-conductor equivalent model of traction power network. Based on a simulation model is built in Matlab/Simulink, the impedance-frequency characteristics and harmonic current amplification under four conditions are analyzed in this paper, which include different locomotive positions, different lengths of traction lines and different short circuit capacity of external power supply. The correlation between the impedance frequency characteristic and harmonic current amplification are discussed, and the regularity of harmonic resonance of AT Power supply system is revealed, which provides reference for the study of harmonic resonance in the AT Power supply system.

Key words: AT Power supply system; harmonic resonance; impedance-frequency characteristics; harmonic current amplification