

# 西安北环线牵引供电系统谐波测试与分析

刘明晓<sup>1</sup>, 王旭光<sup>2</sup>

(1. 西安铁路职业技术学院 电气工程学院, 西安 710016;  
2. 西安航天自动化股份有限公司, 西安 710065)

**摘要:** 随着我国电气化铁路的飞速发展, 交直交型电力机车普遍被运用的同时, 由其产生的谐波问题对电网的影响也日益凸显; 为更好地研究分析牵引供电系统谐波特性规律, 对西安北环线牵引供电系统某供电区段的牵引变电所和分区所主要电气量参数进行了同步测量, 并在测试数据一时间段内选取了多个典型时刻; 通过对典型时刻数据的分析, 结果表明该供电区段的谐波特性呈现一定规律, 并对其抑制方式提供了合理建议。

**关键词:** 电气化铁路; 谐波; 测试; 典型时刻; 数据分析

## Harmonic Test and Analysis of Traction Power Supply System of Xi'an North Loop Line

Liu Mingxiao<sup>1</sup>, Wang Xuguang<sup>2</sup>

(1. Xi'an Railway Vocational & Technical Institute, Xi'an 710016, China;  
2. Xi'an Aerospace Automation Co., LTD., Xi'an 710065, China)

**Abstract:** With the rapid development of electric railway in China, AC-DC-AC electric locomotives are widely used at the same time, the resulting harmonic problems on the power grid has become increasingly prominent. In order to study the harmonic characteristics of the traction power supply system better, the main electrical quantity parameters of the traction substation and the partition in a power supply section of the Xi'an North Loop Line traction power supply system are measured synchronously, and a number of typical moments are selected in the test data for a period of time. Through the data analysis of the typical moment, the results demonstrate that the harmonic characteristics of the power supply section show a certain law, and some reasonable suggestions are provided for its suppression.

**Keywords:** electric railway; harmonic; test; typical moment; data analysis

## 0 引言

随着我国电气化铁路建设的高速发展, 全国主要干线铁路的电气化覆盖程度也日趋完善, 电气化铁路尤其是交直交型电力机车作为电力系统的重要负荷广泛分布于电网中<sup>[1]</sup>。由于交直交型电力机车变流电路中含有的大量非线性电力电子器件及其复杂的运行状况使得其所产生的谐波与电网其他负荷相比有着较大的区别, 这些谐波的渗入将对电网造成以下几方面的危害: 1) 流入旋转电机中的谐波电流会增加电机定子绕组的有功功率损耗, 同时谐波电流还可能通过旋转磁场在电机的铁芯以及绕组中产生感应电流进而产生附加的功率损耗。另外谐波电流长时间流入旋转电机会引起电机振动甚至会损坏电机; 2) 流入到电力变压器中不同频次的谐波电流会引起变压器的绕组产生附加损耗, 同时还会引起变压器的硅钢片绕组、外壳以及一些附加元器件发热甚至出现局部过热现象; 3) 流入电力系统中的谐波可能引起电力系统谐波放大甚至发生谐波谐振

现象, 进而会增加电力系统的网损并降低电力线路的输送能力; 4) 谐波注入电力系统中不仅会污染电能质量同时还会危害到电力用户, 使用户支付大于实际使用的电费; 5) 交直交型电力机车在逐步取代交直型电力机车时低频次谐波明显降低, 但同时由于交直交型电力机车的调制问题又增加了频谱。使得牵引供电系统在运行过程中出现了一些诸如谐振过电压等新问题, 这些新问题还威胁着牵引供电系统的可靠运行以及工作人员的安全问题。因此, 探究其对电网所产生的影响受到越来越多的关注<sup>[2-4]</sup>。为此开展对电气化铁路牵引供电系统谐波的过程仿真与频谱分析尤为必要, 可从统计的角度分析计算其在运行状态下产生的谐波情况<sup>[5-7]</sup>, 也对谐波抑制方式或控制方案的提出具有一定的借鉴与参考意义<sup>[8-9]</sup>。

## 1 测试背景

本文对西安北环线牵引供电系统某供电区段进行了相关测试分析, 测试数据分析时间段的列车实际运行图如图 1 所示。分析过程中所需测试电气量包括 A 牵引变电所母线电压和馈线电流及 B 分区所电压, 测试方式为 A 牵引变电所与 B 分区所进行同步测量。

以变电站(所)运行过程中每天 0 时至 24 时监测记录作为过程监测周期。变电站 16 路模拟信号录波, 每路信号最大采样频率为 50 kHz/s(连续流盘模式)和 50 MHz/s(暂态记

收稿日期: 2017-10-12; 修回日期: 2017-11-09。

基金项目: 西安铁路职业技术学院 2017 年度立项课题 (XTZY17J06)。

作者简介: 刘明晓(1987-), 女, 河南焦作人, 硕士, 助教, 主要从事铁道供电方向的研究。

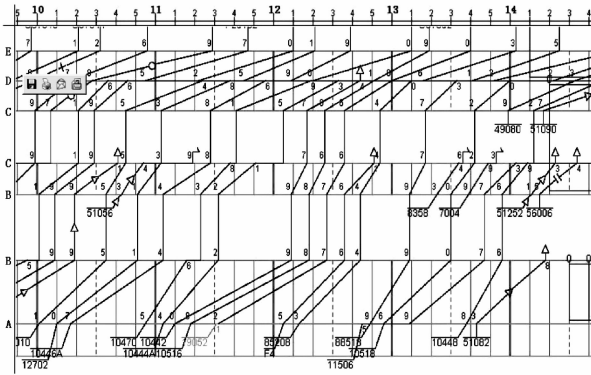


图 1 当日测试时间段列车实际运行图

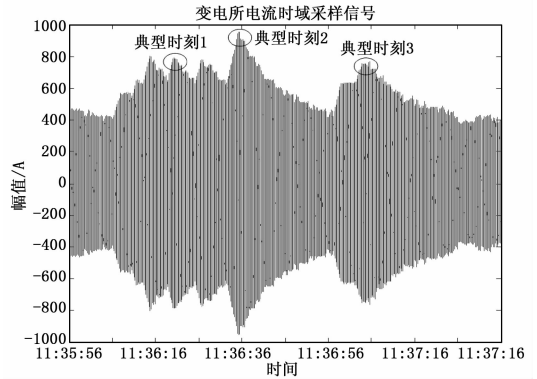


图 2 典型时间段内变电所馈线电流时域波形

录模式), 采样数据流直接存储在笔记本电脑硬盘, 并配以完备的波形分析及统计软件。

根据牵引变电所及分区所的电压和电流实测数据得出时域波形, 并在此基础上采用快速傅里叶分解的方法得出各级次谐波以及各次谐波的含有率。牵引供电系统谐波的分析可分如下 3 个步骤进行: 1) 采用多通道同步数据采集系统对西安北环线牵引变电所牵引母线的电压电流以及分区所的电压进行实时数据采集, 并以每天 0 时到 24 时作为检测过程对变电所的电压电流以及分区所的电压进行监测并记录, 进而绘制时域图。

2) 选取牵引变电所的 3 个典型时刻的电压及电流值, 并且前后各取 25 个采用周期进行快速傅里叶分解, 分解后将会得到牵引变电所母线电压、馈线电流以及分区所电压的谐波频次及其对应的谐波含有率。3) 对西安北环线牵引变电所母线电流及电压、分区所电压上的谐波进行分析, 并给出有效的改善措施。

## 2 测试数据分析

### 2.1 典型时间段选取

本次测试期间, 测试系统实际采样频率为 10 kHz/s。选取了测试当日 11 点 30 分 56 秒至 13 点 00 分 09 秒, 共计 53 530 000 个采样数据点。并进一步对测试数据选取多个典型时刻, 前后各取 25 个采样周期, 共计 50 个周期, 利用 MATLAB 编程进行快速傅里叶分解分析<sup>[10]</sup>。其中牵引变电所馈线电流时域波形如图 2 所示, 牵引变电所母线电压时域波形如图 3 所示, 分区所电压时域波形如图 4 所示。

### 2.2 典型时刻数据分析

#### 2.2.1 典型时刻 1 数据分析

1) 对典型时刻 1 牵引变电所馈线电流时域波形选取 10 个周波进行分析计算, 得该区段电流最大峰值 768.013 0 A。并提取牵引变电所馈线电流录波数据最大值前后各 25 个周期, 共计 10 000 个点做快速傅里叶分解。

对牵引变电所馈线电流进行快速傅里叶分解, 得电流畸变率 4.117 4%, 基波幅值有效值 527.40 A, 频谱特性如图 5 所示 (50 次以内)。

由图 5 牵引变电所馈线电流频谱分布图可以得出谐波电流频次在 50 次以内的谐波频次及各谐波对应的含有率情况。3 次谐波、5 次谐波、7 次谐波、17 次谐波、19 次谐波、21 次

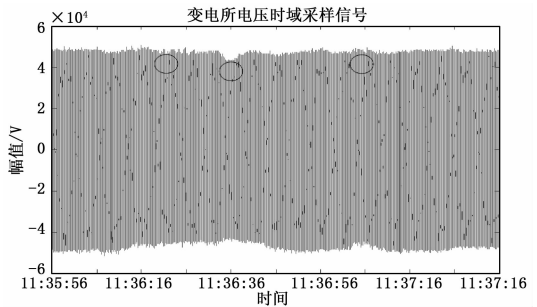


图 3 典型时间段内变电所母线电压时域波形

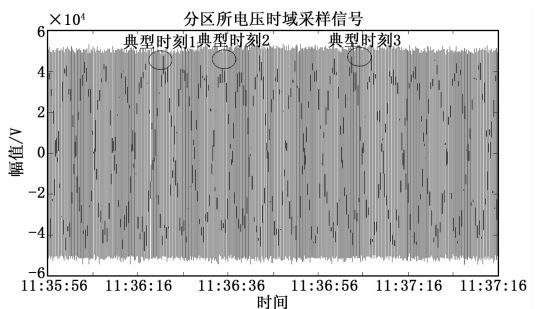


图 4 典型时间段内分区所电压时域波形

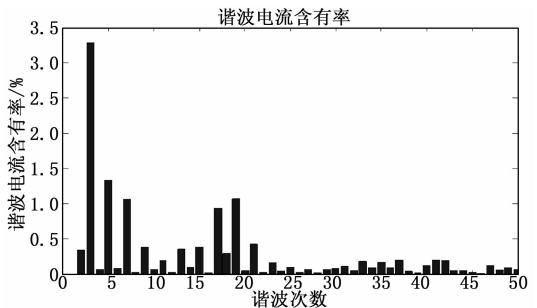


图 5 变电所馈线电流频谱分布

谐波、23 次谐波的谐波电流含有率分别为: 3.29%、1.339 9%、1.059 2%、0.933 3%、1.072 0%、0.420 4%、0.156 3%。并由牵引变电所馈线电流的频谱分布可以看出, 牵引变电所馈线电流在典型时刻 1 这一区段内 3~11 次, 15~23 次谐波含量比较突出。

2) 对典型时刻 1 牵引变电所母线电压时域波形选取 10 个

周波进行分析计算,得该区段电压最大峰值 49.48 kV。并提取牵引变电所母线电压录波数据最大值前后各 25 个周期,共计 10 000 个点做快速傅里叶分解。

对变电所母线电压进行快速傅里叶分解,得电压畸变率 12.190 9%,基波幅值有效值 27 650.61 V,频谱特性如图 6 所示(50 次以内)。

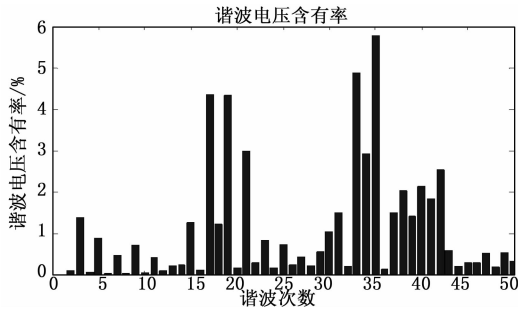


图 6 变电所母线电压频谱分布

由图 6 牵引变电所母线电压频谱分布图可以得出牵引变电所母线电压在 50 次以内的谐波频次及与之对应的含有率。15 次谐波、17 次谐波、19 次谐波、21 次谐波、31 次谐波、33 次谐波、35 次谐波、37 次谐波对应的牵引变电所母线电压谐波含有率分别为: 1.257 2%、4.363 8%、4.342 0%、2.986 5%、1.504 9%、4.882 6%、5.778 8%、1.500 0%，并由频谱分布可以看出,牵引变电所母线电压在这一区段内 15~21 次,31~37 次谐波含量比较突出。

3) 对典型时刻 1 分区所电压时域波形选取 10 个周波进行分析计算,得该区段电压最大峰值 54.33 kV。并提取分区所电压录波数据最大值前后各 25 个周期,共计 10 000 个点做快速傅里叶分解。

对分区所电压进行快速傅里叶分解,得电压畸变率 3.1 225%,基波电压幅值有效值 27 884.04 V,频谱特性如图 7 所示(50 次以内)。

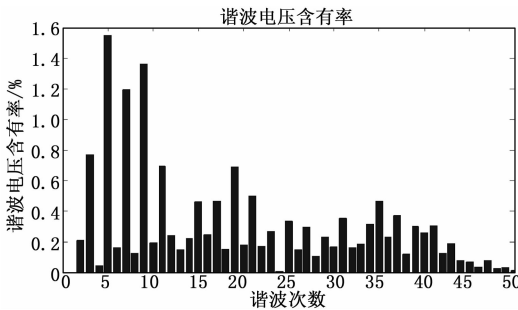


图 7 分区所电压频谱分布

由图 7 分区所电压频谱分布图可以得到分区所的谐波电压在 50 次以内的谐波频次以及与之相对应的谐波含有率。3 次谐波、5 次谐波、7 次谐波、9 次谐波、11 次谐波、15 次谐波、17 次谐波、19 次谐波的谐波电压含有率分别为: 0.760 4%、1.557 5%、1.200 4%、1.354 2%、0.698 0%、0.462 1%、0.470 9%、0.688 6%。并由分区所谐波电压频谱分布可以看出,分区所电压在典型时刻 1 这一区段内 3~11 次,15~21 次谐波含量比较突出。

### 2.2.2 典型时刻 2 数据分析

1) 对典型时刻 2 牵引变电所馈线电流时域波形选取 10 个周波进行分析计算,得该区段电流最大峰值 956 A。并提取牵引变电所馈线电流录波数据最大值前后各 25 个周期,共计 10 000 个点做快速傅里叶分解。

对牵引变电所馈线电流进行快速傅里叶分解,得总电流畸变率 3.557%,基波电流有效值 630 A,频谱特性如图 8 所示(50 次以内)。

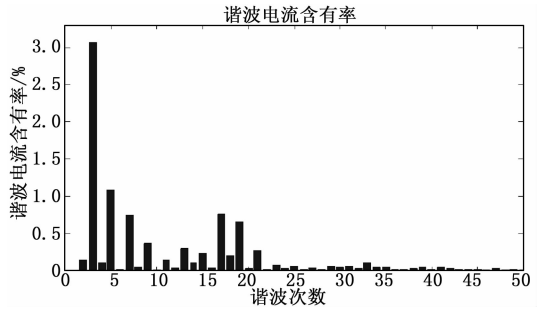


图 8 变电所馈线电流频谱分布

由图 8 牵引变电所馈线电流的频谱分布图可以得出牵引变电所 50 次以内的谐波电流频次及与之对应的谐波电流含有率。3 次谐波、5 次谐波、7 次谐波、9 次谐波、17 次谐波、19 次谐波、21 次谐波对应的馈线谐波电流含有率分布为: 3.069 2%、1.090 2%、0.747 6%、0.365 8%、0.752 7%、0.650 3%、0.266 6%。并由牵引变电所馈线电流频谱分布可以看出,牵引变电所馈线电流在典型时刻 2 这一区段内 3~9 次,17~21 次谐波含量比较突出。

2) 对典型时刻 2 牵引变电所母线电压时域波形选取 10 个周波进行分析计算,得该区段电压最大峰值 43.64 kV。并提取牵引变电所母线电压录波数据最大值前后各 25 个周期,共计 10 000 个点做快速傅里叶分解。

对牵引变电所母线电压进行快速傅里叶分解,电压畸变率 6.795 1%,基波幅值 27 164.96 V。频谱特性如图 9 所示(50 次以内)。

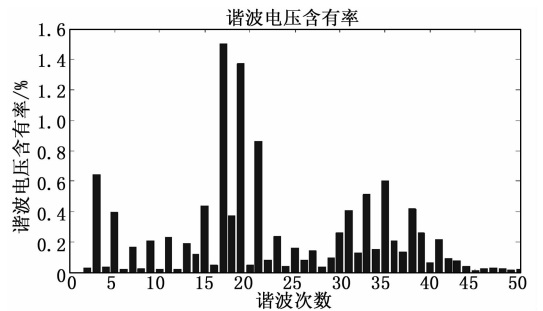


图 9 变电所母线电压频谱分布

由图 9 牵引变电所母线电压频谱分布图可以得出牵引变电所母线电压在 50 次以内的谐波频次及与之对应的含有率。3 次谐波、5 次谐波、7 次谐波、9 次谐波、15 次谐波、17 次谐波、19 次谐波、21 次谐波、31 次谐波、33 次谐波、35 次谐波的谐波电压含有率分布为: 1.608 5%、0.988 0%、0.415 6%、0.515 2%、1.088 9%、3.761 2%、3.439 2%、2.155

3%、1.030 3%、1.281 4%、1.507 8%。并由频谱分布可以看出, 牵引变电所母线电压在这一区段内 3~9 次, 15~21 次, 31~35 次谐波含量比较突出。

3) 对典型时刻 2 分区所母线电压时域波形选取 10 个周波进行分析计算, 得该区段电压最大峰值 52.99 kV。并提取分区所电压录波数据最大值前后各 25 个周期, 共计 10 000 个点做快速傅里叶分解。

对分区所电压进行快速傅里叶分解, 得畸变率 2.540 4%, 基波电压幅值有效值 27 973.19 V。频谱特性如图 10 所示 (50 次以内)。

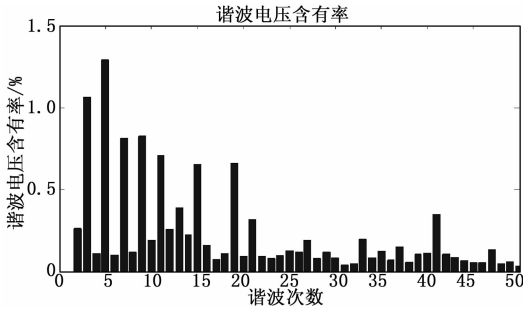


图 10 分区所电压频谱分布

由图 10 分区所电压频谱分布图可以得到分区所的谐波电压在 50 次以内的谐波频次以及与之相对应的谐波含有率。3 次谐波、5 次谐波、7 次谐波、9 次谐波、11 次谐波、15 次谐波、19 次谐波、21 次谐波的谐波电压含有率分别为: 1.062 2%、1.294 9%、0.813 7%、0.823 0%、0.705 2%、0.656 4%、0.656 0%、0.315 6%。并由分区所电压频谱分布可以看出, 分区所电压在典型时刻 2 这一区段内 3~9 次, 15~21 次谐波含量比较突出。

2.2.3 典型时刻 3 数据分析

1) 对典型时刻 3 牵引变电所馈线电流时域波形选取 10 个周波进行分析计算, 得该区段电流最大峰值 768.013 0 A。并提取牵引变电所馈线电流录波数据最大值前后各 25 个周期, 共计 10 000 个点做快速傅里叶分解。

对变电所馈线电流进行快速傅里叶分解, 得电流畸变率 4.526 7%, 基波幅值有效值 495.25 A。频谱特性如图 11 所示 (50 次以内)。

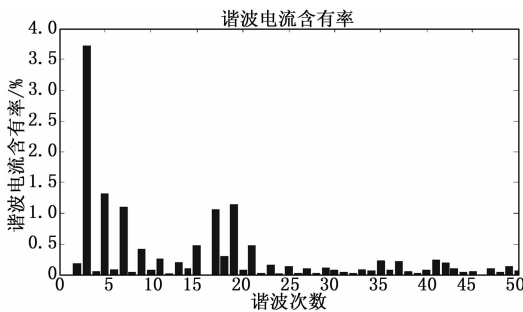


图 11 变电所馈线电流频谱分布

由图 11 牵引变电所馈线电流的频谱分布图可以得出牵引变电所 50 次以内的谐波电流频次及与之对应的谐波电流含有率。3 次谐波、5 次谐波、7 次谐波、9 次谐波、15 次谐波、

17 次谐波、19 次谐波、21 次谐波的谐波电流含有率分别为: 3.728 1%、1.311 4%、1.102 6%、0.410 5%、0.474 6%、1.054 4%、1.146 0%、0.468 1%。由牵引变电所馈线电流频谱分布图形可以看出, 牵引变电所馈线电流在典型时刻 2 这一区段内 3~11 次, 15~21 次谐波含量比较突出。

2) 对典型时刻 3 牵引变电所母线电压时域波形选取 10 个周波进行分析计算, 得该区段电压最大峰值 49.48 kV。并提取牵引变电所母线电压录波数据最大值前后各 25 个周期, 共计 10 000 个点做快速傅里叶分解。

对牵引变电所母线电压进行快速傅里叶分解, 得电压畸变率 12.081 5%, 基波幅值有效值 27 803.63V。频谱特性如图 12 所示 (50 次以内)。

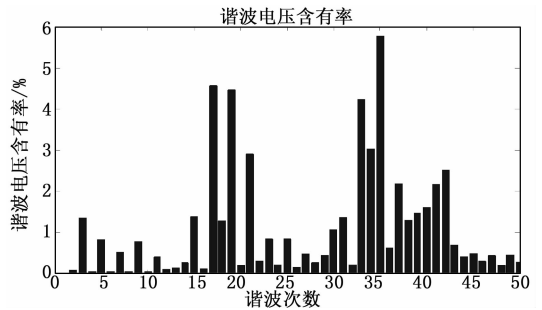


图 12 变电所母线电压频谱分布

由图 12 牵引变电所母线电压频谱分布图可以得出牵引变电所母线电压在 50 次以内的谐波频次及与之对应的含有率。3 次、5 次、7 次、9 次、15 次、17 次、19 次、21 次、23 次、25 次、33 次、35 次、37 次、39 次、41 次的谐波电压含有率分别为: 1.335 7%、0.808 1%、0.522 8%、0.754 6%、1.382 5%、4.572 9%、4.466 8%、2.902 8%、0.834 7%、0.840 4%、4.230 5%、5.777 5%、2.184 3%、1.471 4%、2.174 5%。并由牵引变电所母线电压频谱分布可以看出, 变电所母线电压在典型时刻 3 这一区段内 3~11 次, 15~25 次, 33~41 次谐波含量比较突出。

3) 对典型时刻 3 分区所电压时域波形选取 10 个周波进行分析计算, 得该区段电压最大峰值 54.33 kV。并提取分区所电压录波数据最大值前后各 25 个周期, 共计 10 000 个点做快速傅里叶分解。

对分区所电压进行快速傅里叶分解, 得畸变率 2.764 1%, 基波电压幅值 28 411.56 V。频谱特性如图 13 所示 (50 次以内)。

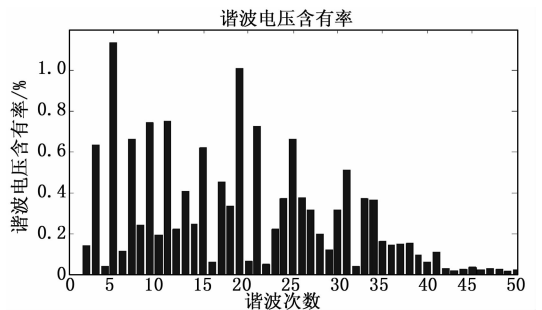


图 13 分区所电压频谱分布