

# 高速铁路牵引供电系统谐波谐振抑制方案研究

张 文 仁

(中铁第一勘察设计院集团 兰州铁道设计院有限公司,兰州 730000)

**摘 要:**由于牵引供电系统对谐振频率附近的谐波有放大作用,且输入系统的谐波与系统谐振频率越近,系统对谐波的放大作用越大.若通过合理优化牵引供电系统结构,使系统谐振频率避开输入系统的谐波频率范围,则能有效抑制谐波谐振,进而达到降低系统谐波含有率的目的.基于该思路,本文建立了牵引供电系统数学模型,利用模态分析理论研究牵引供电系统主要组成元件的谐振灵敏度,并通过实例计算,证明优化牵引供电系统结构后,牵引供电系统谐波含有率明显降低,可达到抑制系统谐波含有率的目的.

**关键词:**牵引供电系统;谐波谐振;模态理论;谐振灵敏度;谐波抑制

**中图分类号:**U223.6      **文献标志码:**A

## Research on harmonic resonance suppression scheme of traction power supply system for high speed railway

ZHANG Wenren

(China Railway First Survey and Design Institute of Lanzhou Railway Design Institute Co.,  
Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The traction power supply system amplifies the harmonic in the vicinity of the resonance frequency. Therefore, with the harmonic frequency approaching the system resonant frequency, the amplification of the system improves accordingly. If the structure of the traction power supply system is optimized reasonably, the harmonic frequency of the system can be set out of the range of the input system. By so doing the harmonic resonance can be effectively suppressed, thus reducing the harmonic percentaes of the system. The mathematical model of traction power supply system is established based on this idea. Then resonance sensitivity, tested from the main components of the traction power supply system, is studied through modal analysis theory. Through examples, this paper prove that harmonic ratio in traction power supply system decrease significantly after the optimization of the power supply system structure, which achieve the purpose of suppressing system harmonic.

**Keywords:** traction power supply system; harmonic resonance; modal theory; resonance sensitivity; harmonic suppression

收稿日期:2017-05-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51178026)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(51178026)

第一作者:张文仁(1964—),男,甘肃兰州人,高级工程师.研究方向为铁路电气化.email:Zhang\_Wen\_Ren@126.com.

引用格式:张文仁.高速铁路牵引供电系统谐波谐振抑制方案研究[J].北京交通大学学报,2017,41(5):106—113.  
ZHANG Wenren. Research on harmonic resonance suppression scheme of traction power supply system for high speed railway [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(5): 106—113. (in Chinese)

为满足高速铁路的发展需求,交-直-交型电力机车由于牵引功率大、功率因数高等优点,得到大量应用.然而交-直-交型电力机车也带来了新的问题:牵引供电系统高次谐波谐振后,系统内高次谐波含量增大<sup>[1,2]</sup>,当机车注入的某些次谐波使系统参数满足一定条件时,便会激励系统产生谐波谐振,不仅占用系统有效容量,还致使牵引供电系统设备误动作,甚至损坏.交-直-交型电力机车低次谐波含量降低,但所含谐波频带变宽<sup>[1,3]</sup>.高次谐波已成为国内外研究者主要关注的问题之一.

目前,针对该问题,国内外研究主要集中于以下两个方法:1)通过优化交-直-交型电力机车四象限变流器的结构参数,降低机车谐波输出,达到净化牵引供电系统的目的.2)通过增加滤波设备,对牵引供电系统谐波进行治理,进而降低牵引供电系统谐波含有率.

文献[1-4]从机车结构、控制原理出发,研究了机车在工况转变、功率变化等情况下的谐波输出特性,指出机车输出谐波的频率范围由结构及控制原理决定,运行条件的变化只影响机车输出谐波含量的大小.文献[5]利用实测数据,采用概率统计原理研究机车输出谐波特性.文献[6-7]通过建立牵引供电系统的谐波模型,利用频谱分析法研究牵引供电系统的谐波谐振特性,认为牵引供电系统固有谐振频率由自身结构参数决定,机车的移动对牵引供电系统的谐波谐振频率的影响较小.文献[8]分析研究了牵引供电系统对各次谐波的放大倍数,指出:牵引供电系统对系统固有谐振频率附近的谐波有明显的放大作用,而对其他次谐波的放大作用十分有限.

根据以上研究,可知电力机车输入牵引供电系统的谐波频段主要由机车自身结构确定,同时牵引供电系统固有谐振频率也主要由自身结构决定.因

列写牵引网节点电压方程为

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Z_1^{-1} + Y_1) & -Z_1^{-1} & 0 & \cdots & 0 \\ -Z_1^{-1} & (Z_1^{-1} + Y_2 + Z_2^{-1}) & -Z_2^{-1} & \cdots & 0 \\ 0 & -Z_2^{-1} & (Z_2^{-1} + Y_3 + Z_3^{-1}) & \cdots & -Z_3^{-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & -Z_{i-1}^{-1} & (Z_{i-1}^{-1} + Y_i + Z_i^{-1}) & -Z_i^{-1} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & -Z_{N-1}^{-1} & (Z_{N-1}^{-1} + Y_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_i \\ \vdots \\ U_N \end{bmatrix}$$

假设供电臂上机车位于切面  $i$  处,则式(1)中除  $I_i \neq 0$  外,其余节点电流为 0,因此,若已知机车的谐波电流  $I_i$  特性,根据式(1)可求所有节点的谐波电压,进而可知牵引供电系统各支路谐波电流分布.

此,本文研究了牵引供电系统主要组成元件对系统谐振频率的贡献(谐振灵敏度),通过优化结构调整牵引供电系统谐振频率,使系统谐振频率与系统中含量较高的谐波频带避免重叠,限制谐波谐振现象的发生,有效降低牵引供电系统谐波含有率.

## 1 牵引供电系统结构及机车等值模型

### 1.1 牵引供电系统结构的等值电路

牵引供电系统主要由牵引变电所和接触网及钢轨组成,其中接触网的网络拓扑结构如图 1 所示链式网络<sup>[9]</sup>.图中串联元件主要为接触网等值阻抗,并联元件主要为并联设备等值阻抗组成,考虑机车为牵引供电系统谐波源,故以机车所在位置对牵引供电系统做切面,机车在切面处向牵引供电系统注入谐波电流  $I_N$ ,系统切面处若无并联元件,可认为并联元件  $Y=0$ .

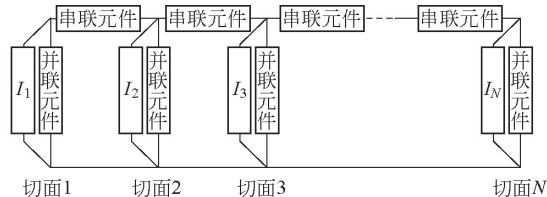


图 1 链式网络

Fig.1 Chain network

根据平行多导体传输线理论<sup>[10]</sup>,图 1 所示链式网络可用图 2 所示的  $\pi$  型网络等值电路表示.

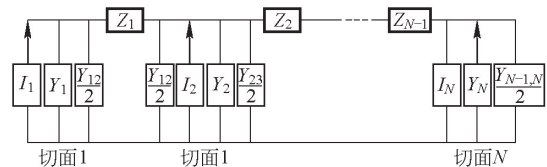


图 2  $\pi$  型网络等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of  $\pi$  model

### 1.2 机车等值谐波模型

根据文献[1],交-直-交型电力机车谐波输出频率由四象限变流器决定,而四象限变流器输出谐波频率由其开关频率决定.考虑机车与牵引网的耦合

关系,机车负载可等值为图 3 所示电路.

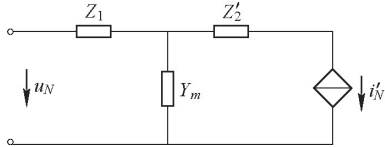


图 3 机车等值支路  
Fig.3 Locomotive equivalent circuit

图 3 中:  $Z_1$ 、 $Z'_2$ 、 $Y_m$  为机车车载变压器归算至高压侧的等值电路;  $i'_N$  为机车取电流特性值,由机车功率及四象限变流器共同决定.

2 牵引供电系统的谐振灵敏度分析

2.1 模态理论简述

根据式(1),系统节点导纳矩阵特征值出现极小值时,系统节点电压出现极大值,即系统发生谐振现象.此时极小的谐波电流能引起很高的谐振过电压.根据这一特点,对系统节点导纳矩阵进行解耦,分析特征值与对应的特征向量可分析系统的稳定性<sup>[10-12]</sup>.

令系统  $h$  次谐波下对应的系统节点导纳矩阵为  $Y_h$ , 对节点导纳矩阵  $Y_h$  做特征值分解有

$$Y_h = L_h \Lambda_h T_h \tag{2}$$

$$Y = \begin{bmatrix} (Z_1^{-1} + Y_1) & -Z_1^{-1} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -Z_1^{-1} & (Z_1^{-1} + Y_2 + Z_2^{-1}) & -Z_2^{-1} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -Z_2^{-1} & (Z_2^{-1} + Y_3 + Z_3^{-1}) & -Z_3^{-1} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & -Z_{i-1}^{-1} & (Z_{i-1}^{-1} + Y_i + Z_i^{-1}) & -Z_i^{-1} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & -Z_{N-1}^{-1} & (Z_{N-1}^{-1} + Y_N) \end{bmatrix} \tag{5}$$

式(5)中,主对角线元素  $Z_{i-1}^{-1} + Y_i + Z_i^{-1}$  中,  $Y_i$  表示节点  $i$  对地导纳,而  $Z_{i-1}^{-1}$ ,  $Z_i^{-1}$  表示与节点  $i$  相连的串联元件导纳.

由于导纳  $Y_i$  总可用电导  $G_i$  和电纳  $B_i$  写为:  $Y_i = G_i + jB_i$

则对于第  $k$  个特征值  $\lambda_k$  有灵敏度  $S_{ii}$

$$S_{ii} = \frac{\partial \lambda_k}{\partial y_i} = t_k \frac{\partial Y}{\partial y_i} l_k = t_k \frac{\partial Y}{\partial Y_{ii}} \frac{\partial Y_{ii}}{\partial y_i} l_k = t_k \frac{\partial Y}{\partial Y_{ii}} l_k \tag{6}$$

式中  $Y_{ii} = Z_{i-1}^{-1} + Y_i + Z_i^{-1}$

由于  $\lambda_k$ 、 $y_i$ 、 $S_{ii}$  均为复数,不利于对比,故改写为

$$\begin{cases} y_i = G + jB \\ S_{ii} = S_r + jS_i, \\ \lambda_k = \lambda_r + j\lambda_i \end{cases}$$

并令:  $F = |\lambda_k|^2$ , 则系统某支路导纳  $B$  有增量

式中:  $\Lambda_h = \text{diag}(\lambda_1, \cdots, \lambda_k, \cdots)$  为特征值对角矩阵;  $L_h = [l_1 \cdots l_k \cdots]$  为左特征向量矩阵;  $T_h = [t_1 \cdots t_k \cdots]^T$  为右特征向量矩阵,且  $L_h = T_h^{-1}$ , 为便于分析,忽略下标  $h$ .

$\Lambda$  中最小的特征值最易引起系统谐振,故将此特征值称为关键模态,与之对应的左、右特征向量称为关键左、右特征向量.若系统组成部分参数  $\alpha$  有一增量  $\Delta\alpha$  时,最小特征值的增量  $\Delta\lambda$  的大小可表征参数对系统谐波谐振的影响.因此,定义系统元件参数的谐振灵敏度  $S$  为

$$S|_{\alpha} = \frac{\partial \lambda}{\partial \alpha} \tag{3}$$

由此关键模态  $k$  时,导纳矩阵  $Y$  的元素  $Y_{ij}$  的灵敏度  $S_{ij}$  为

$$S_{ij} = \frac{\partial \lambda}{\partial Y_{ij}} = t_i \frac{\partial Y}{\partial Y_{ij}} l_j = t_i l_j \tag{4}$$

式中:  $l_j$  为系统对应的左特征向量的第  $j$  列元素;  $t_i$  为对应的右特征向量的第  $i$  行元素.

2.2 牵引供电系统节点导纳矩阵的谐振灵敏度

根据式(1),牵引供电系统节点导纳矩阵为

$\Delta B$  时,由式(6)有

$$\Delta F = |\lambda + \Delta\lambda|^2 - |\lambda|^2 = 2(S_r \lambda_i - S_i \lambda_r) \Delta B + (S_r^2 + S_i^2)(\Delta B)^2 \tag{7}$$

若  $\Delta B \rightarrow 0$  则有

$$\frac{\partial F}{\partial B} = 2(S_r \lambda_i - S_i \lambda_r) \tag{8}$$

同理可得

$$\frac{\partial F}{\partial G} = 2(S_r \lambda_r + S_i \lambda_i) \tag{9}$$

结合式(6~9)有支路对地导纳的谐振灵敏度

$$\begin{cases} \frac{\partial |\lambda_k|}{\partial G} = \frac{d|\lambda_k|}{dF} \frac{\partial F}{\partial G} = \frac{S_r \lambda_r + S_i \lambda_i}{\sqrt{\lambda_r^2 + \lambda_i^2}} \\ \frac{\partial |\lambda_k|}{\partial B} = \frac{d|\lambda_k|}{dF} \frac{\partial F}{\partial B} = \frac{S_r \lambda_i - S_i \lambda_r}{\sqrt{\lambda_r^2 + \lambda_i^2}} \end{cases} \tag{10}$$

由于非主对角线元素矩阵  $y_{se} = -Z_i^{-1}$ , 故

$$\frac{\partial |\lambda_k|}{\partial y_{se}} = S_{i,i} + S_{i+1,i+1} - S_{i,i+1} - S_{i+1,i} \quad (11)$$

若供电臂长度为  $l$  的牵引网阻抗矩阵为

$$\mathbf{Z}_l = \mathbf{R} + \mathbf{jX} \quad (12)$$

则有

$$\mathbf{Z}_l^{-1} = (\mathbf{R} - \mathbf{jX}) (\mathbf{R}^2 + \mathbf{X}^2 + \mathbf{jXR} - \mathbf{jRX})^{-1} \quad (13)$$

由于  $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{X}$  均为对称矩阵,因此有

$$\begin{cases} \mathbf{G} = \mathbf{R} (\mathbf{R}^2 + \mathbf{X}^2)^{-1} \\ \mathbf{B} = -\mathbf{X} (\mathbf{R}^2 + \mathbf{X}^2)^{-1} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)分别对  $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{X}$  求偏导数有

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{R}} = (\mathbf{X}^2 - \mathbf{R}^2) ((\mathbf{R}^2 + \mathbf{X}^2)^{-1})^2 \\ \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{X}} = -2\mathbf{RX} ((\mathbf{R}^2 + \mathbf{X}^2)^{-1})^2 \\ \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \mathbf{R}} = 2\mathbf{XR} ((\mathbf{R}^2 + \mathbf{X}^2)^{-1})^2 \\ \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \mathbf{X}} = (\mathbf{X}^2 - \mathbf{R}^2) ((\mathbf{R}^2 + \mathbf{X}^2)^{-1})^2 \end{cases} \quad (15)$$

$$\text{令: } \frac{\partial |\lambda_k|}{\partial G} = \mu, \frac{\partial |\lambda_k|}{\partial B} = \gamma.$$

因此有线路阻抗的谐振灵敏度

$$\begin{cases} \frac{\partial |\lambda_k|}{\partial R} = (\mu (X^2 - R^2) + 2\gamma XR) ((X^2 + R^2)^{-1})^2 \\ \frac{\partial |\lambda_k|}{\partial X} = (\gamma (X^2 - R^2) - 2\mu RX) ((X^2 + R^2)^{-1})^2 \end{cases} \quad (16)$$

由于导纳元件与阻抗元件量纲、数值均不相同,对比困难,故定义归一化灵敏度有

$$\left. \frac{\partial |\lambda_k|}{\partial \alpha} \right|_{\text{norm}} = \frac{\frac{\partial |\lambda_k|}{\partial \alpha}}{\frac{|\lambda_k|}{\alpha}} = \frac{\partial |\lambda_k|}{\partial \alpha} \frac{\alpha}{|\lambda_k|} \quad (17)$$

归一化灵敏度,反映了元件参数与节点导纳矩阵特征值的相对变化,故可作为系统元件参数对系统谐振频率影响的评价标准。

### 2.3 牵引供电系统组成元件的归一化灵敏度

以某客运专线其中一个供电臂为例,该供电臂的等值电路图如图 4 所示,图中  $L_1 = 11.12$  km,为第 1 个 AT 段长度,  $L_2 = 10.63$  km,为第 2 个 AT 段长度,  $U = 55$  kV,为两台 220/27.5 kV 的单相变压器组成 V/X 接线的牵引变压器,牵引变压器容量为 35 MVA,短路电压百分比为 10.5;220 kV 电源线路长度为 5 km。

由于系统发生谐振时,对应频率下的节点导纳矩阵特征值出现极小值,为直观观察,定义模态阻抗

为对应节点导纳矩阵特征值的倒数,对图 4 所示供电臂利用模态理论求解模态阻抗值,其结果如图 5 所示。

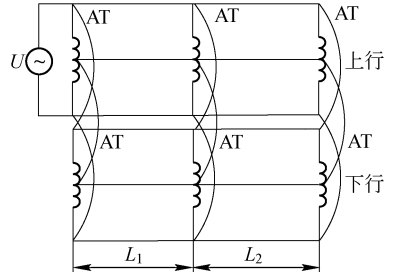


图 4 等值电路图

Fig.4 Equivalent circuit diagram

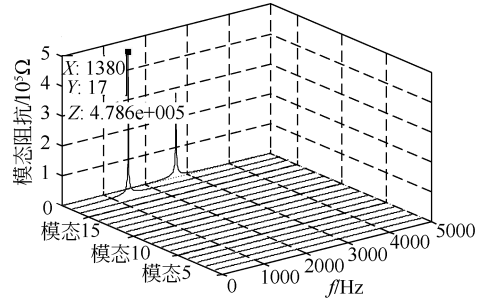


图 5 模态结果

Fig.5 Modal analysis results

从图 5 中可看出,模态 17 为关键模态的谐振频率为 1 380 Hz.在该模态下,对牵引供电系统组成元件进行灵敏度分析,图 6 为该供电臂并联阻抗元件的谐振灵敏度及归一化谐振灵敏度。

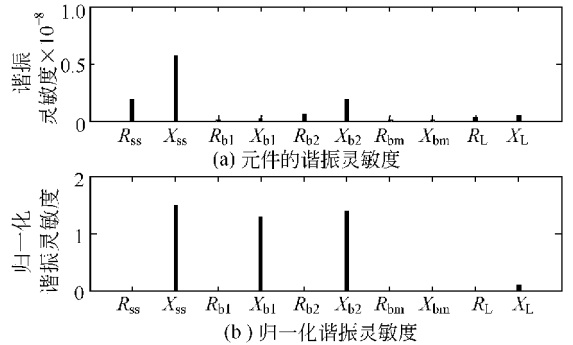


图 6 并联元件的归一化谐振灵敏度

Fig.6 Resonance sensitivity of parallel elements

图 6 中:  $R_{ss} + \mathbf{jX}_{ss}$  为电源等值阻抗;  $R_{b1} + \mathbf{jX}_{b1}$  为牵引变压器高压绕组等值阻抗;  $R_{b2} + \mathbf{jX}_{b2}$  为牵引变压器低压绕组等值阻抗;  $R_{bm} + \mathbf{jX}_{bm}$  为牵引变压器励磁阻抗;  $R_L + \mathbf{jX}_L$  为机车等值支路阻抗。

从图 6(a)中可看出:电源内阻抗及牵引变压器绕组等值阻抗的谐振灵敏度约  $0.6 \times 10^{-8}$ ,由式(10)谐振灵敏度定义元件参数变化时,系统谐振频率的变化率为  $0.6 \times 10^{-8}$ ,由于该数据量纲较小,为便于

和其他牵引供电系统组成元件的谐振灵敏度对比分析,图 6(b)给出系统并联元件的归一化灵敏度,最大值约为 2,即电源内阻抗及牵引变压器对系统谐波谐振具有较大的影响。

由于归一化谐振灵敏度更为清晰的反应系统元件参数变化对系统谐振频率变化的影响,故后文中直接采用归一化灵敏度分析.图 7 为自耦变压器的归一化灵敏度。

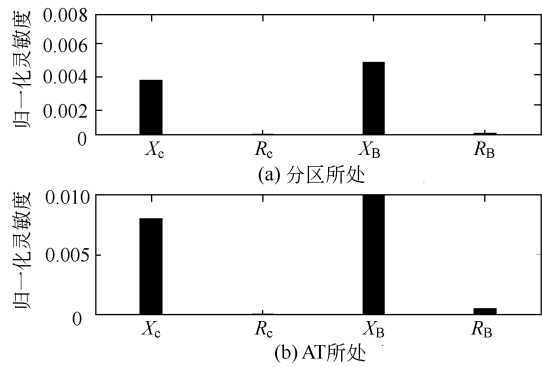


图 7 自耦变压器的归一化灵敏度

Fig.7 Normalized sensitivity of autotransformer

从图 7 中,  $R_c + jX_c$  表示自耦变压器串联绕组等值阻抗,  $R_b + jX_b$  表示自耦变压器公共绕组等值阻抗.从图中可看出,自耦变压器参数的归一化灵敏度远小于 1,即自耦变压器参数对系统谐波谐振的影响较小。

图 8 为牵引网线路分布电容的归一化灵敏度。

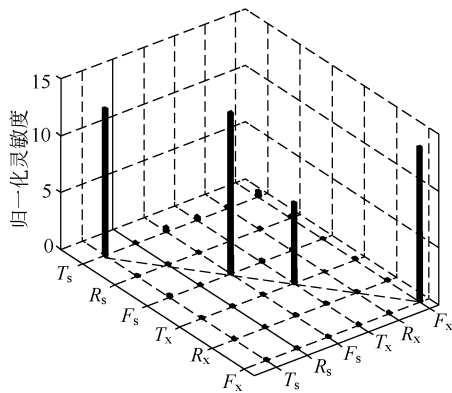


图 8 线路分布电容的归一化灵敏度

Fig.8 Normalized sensitivity of line capacitance

图 8 中,  $T_s$ 、 $R_s$ 、 $F_s$  分别为上行接触网回路、回流回路及正馈线回路;  $T_x$ 、 $R_x$ 、 $F_x$  分别为下行接触网回路、回流回路及正馈线回路.图 8 中,主对角线表示上述各回路对地电容的归一化灵敏度,其余元素代表各回路之间分布电容的归一化灵敏度.从图 8 中可看出:分布电容归一化灵敏度最大值约 13,即:线路分布电容对系统谐波谐振的影响较大,其中线路对地分布电容对谐振的影响最大。

图 9、图 10 为牵引网阻抗矩阵实部与虚部的归一化灵敏度。

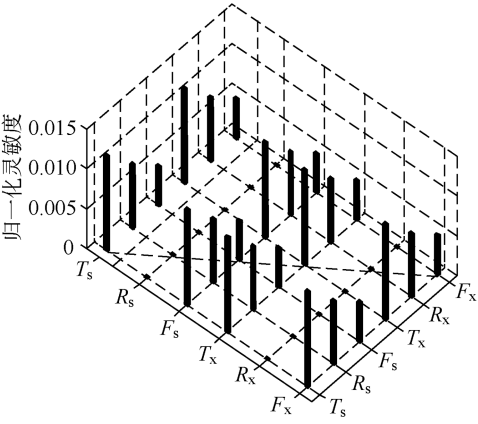


图 9 牵引网阻抗实部的归一化灵敏度

Fig.9 Normalized sensitivity of impedance real part in traction network

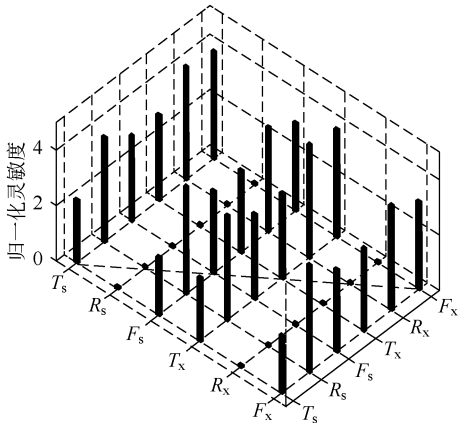


图 10 牵引网阻抗虚部的归一化灵敏度

Fig.10 Normalized sensitivity of impedance imaginary part in traction network

图 9、图 10 中主对角线表示回路自阻抗的归一化灵敏度,其余元素代表相应回路之间互阻抗的归一化灵敏度.由图 9 可看出牵引网阻抗实部的归一化灵敏度均不大于 0.015,对系统谐振影响较小,图 10 中可看出牵引网阻抗虚部的归一化灵敏度最大值约为 4,即牵引阻抗虚部对系统谐振影响较大。

图 6 至图 10 分别对牵引供电系统的电源阻抗、牵引变压器等值阻抗、自耦变压器等值阻抗、牵引网分布电容及牵引网阻抗等主要元件的归一化灵敏度进行分析计算.其中牵引变压器、牵引网分布电容及牵引网线路阻抗对牵引供电系统谐振频率的影响较大.因此,在满足基本技术需求的前提下,合理选择牵引变压器、优化电分相安装位置(改变牵引网分布电容及阻抗)能够有效控制牵引供电系统的谐振频率,限制谐波谐振,进而达到抑制牵引供电系统谐波含有率的目的。



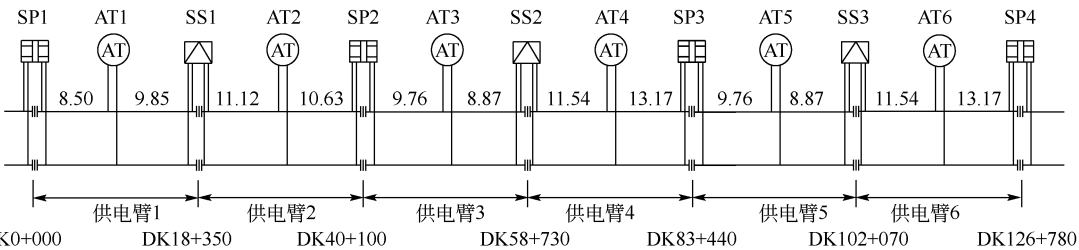
3 谐波含有率抑制措施

根据 2.3 节分析,牵引变压器等值阻抗、牵引网分布电容及阻抗对系统谐振频率的影响较大.在牵引变压器容量不变的前提下,改变短路电压百分比可调整牵引变压器等值阻抗.而牵引网分布电容及阻抗由牵引网结构及供电臂长度决定,因此调整供电臂长度,即调整电分相安装位置可改变牵引网分布电容及阻抗.

以某客运专线为例,其供电示意图如图 11 所示,各牵引变电所主要参数见表 1,该线路运行机车类型为 CRH2、CRH3 型机车.

表 1 牵引变电所主要参数

Tab.1 Main parameters of traction substation				
变电所	牵引变压器	容量/ MVA	额定 电压/kV	短路电压 百分比/%
SS1	1T	35	220/2×27.5	10.5
	2T	40	220/2×27.5	10.5
SS2	3T	40	220/2×27.5	10.5
	4T	40	220/2×27.5	10.5
SS3	5T	40	220/2×27.5	10.5
	6T	40	220/2×27.5	10.5



(注:图中 SS 表示牵引变电所,SP 表示分区所,AT 表示自耦变电所,数字表示对应各所编号,本图中所有距离单位 km 计)

图 11 全线供电示意图

Fig.11 Whole line power supply diagram

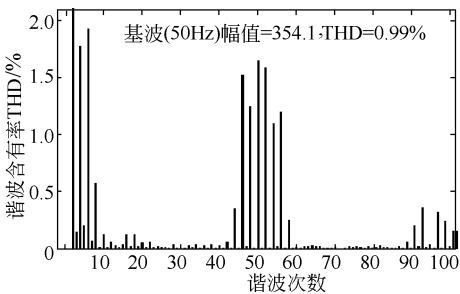


图 12 CRH2 型机车电流频谱分析

因此,该线牵引供电系统所含谐波主要集中于 3~11 次、21~31 次、及 43~55 次 3 个频段,对比表 3,知该线所有供电臂的谐振频率均在谐波含量较大的频带内,该线各供电臂均需进行优化设计.

供电臂 1,优化前谐振频率为 1 380 Hz(28 次),结合图 13、图 14 可知 CRH3 型机车该频段输出谐

根据式(1)、式(2)可得该客运专用线所有供电臂的谐振频率见表 2.

表 2 各供电臂的谐振频率

Tab.2 Resonant frequency of the power supply arms

供电臂	谐振频率/Hz	谐振次数
1	1 380	28
2	1 423	28
3	1 663	29
4	1 130	23
5	1 410	28
6	1 190	24

从文献[1-2]知,CRH2 型机车运行时向牵引供电系统注入 3~11 次及 43~55 次两个频带内的奇次谐波,其典型网侧电流频谱分析如图 12 所示. CRH3 型机车运行时向牵引供电系统注入 3~11 次、21~31 次, 51~59 次 3 个频带内的奇次谐波,其典型网侧电流频谱分析如图 13 所示.图中 THD 为总谐波失真,其值为

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^H \left( \frac{n \text{ 次谐波有效值}}{\text{基波有效值}} \right)^2} \times 100\%.$$

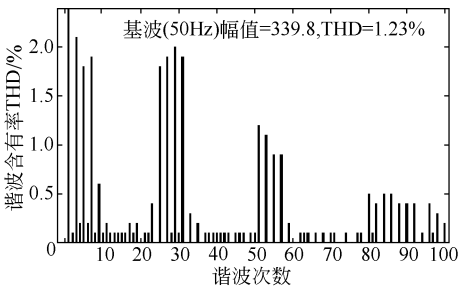


图 13 CRH3 型机车电流频谱分析

Fig.13 Locomotive spectrum analysis

of the current of CRH3

波含量较高,因此需调整本供电臂谐振频率,目标谐振频率为 1 700 Hz(35 次)附近.为此选择 SS1 所牵引变压器短路电压百分比为 7%时,该供电臂谐振频率为 1 605 Hz.图 14、图 15 分别为优化前、后牵引变电所对应母线电压的频谱分析.

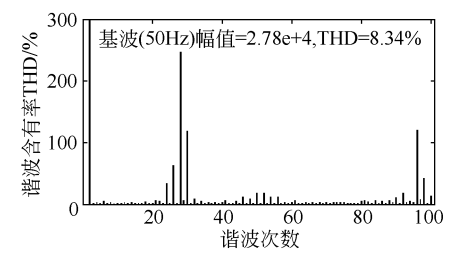


图 14 优化前供电臂 1 对应  
牵引变电所母线电压频谱分析

Fig.14 Voltage spectrum analysis of busbar in  
traction substation before optimization

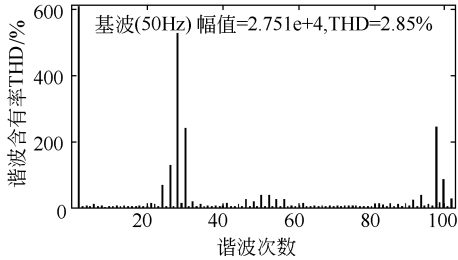


图 15 优化后供电臂 1 对应  
牵引变电所母线电压频谱分析

Fig.15 Voltage spectrum analysis of busbar in  
traction substation after optimization

对比图 14、图 15 可看出,优化后牵引变电所母线电压谐波含有率由 8.34%降低至 2.85%,谐波含有率明显降低.这是由于优化前,系统的谐振频率附近有大量谐波输入,系统对谐振频率附近的谐波放大,致使母线电压谐波含有率较高.优化后,调整系统的谐振频率至机车输入谐波较少的频段,其放大作用有限,故谐波含有率明显降低.

供电臂 2,优化前长度为 21.75 km,选择牵引变压器短路电压百分比为 7%后仍不能满足要求,因此考虑改移 SP2 处电分相位置,缩短供电臂 2 长度至 21.25 km.图 16、图 17 分别为优化前后牵引变电所母线电压的频谱分析.

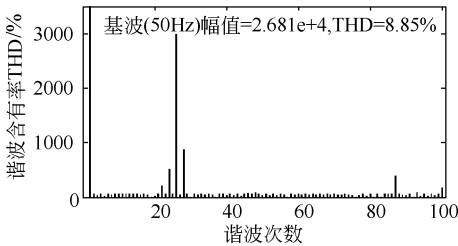


图 16 优化前供电臂 2 对应  
牵引变电所母线电压频谱分析

Fig.16 Voltage spectrum analysis of the busbar  
in traction substation with corresponding  
power supply arm 2 before optimization

对比图 16、图 17 可看出,优化后母线电压谐波

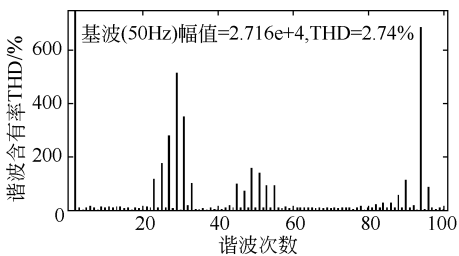


图 17 优化后供电臂 2 对应  
牵引变电所母线电压频谱分析

Fig.17 Voltage spectrum analysis of the busbar in traction  
substation with corresponding  
power supply arm 2 after optimization

含有率由 8.85%降低至 2.74%,谐波抑制效果明显.表 3 为所有供电臂采取的优化措施及优化前后对应牵引变电所母线电压的谐波含有率.

从表 3 中可看出,通过优化牵引供电系统的结构参数,使牵引供电系统的谐振频率落在系统谐波含量较高的频带外时,系统谐波畸变率明显降低,抑制效果显著.

表 3 各供电臂的谐振频率

Tab.3 Resonance frequency of power supply arms

供电臂	优化措施	优化前谐波含有率/%	优化后谐波含有率/%	优化后系统谐振频率/ Hz
1	变压器短路电压百分比为 7%	8.34	2.85	605 (32 次)
2	变压器短路电压百分比为 7%, 同时缩短供电臂 2 长度 0.5 km	8.85	2.74	1 610 (32 次)
3	变压器短路电压百分比为 7%, 同时缩短供电臂 3 长度 0.8 km	7.81	3.69	1 595 (32 次)
4	供电臂 4 末端 安装补偿电容	8.44	2.21	1 010 (20 次)
5	变压器短路电压百分比 7%, 同时延长供电臂 5 长度 0.5 km	5.66	1.91	1 620 (32 次)
6	供电臂 6 末端 安装补偿电容	7.75	1.78	1 005 (20 次)

## 4 结论

1)牵引供电系统中各组成部分对系统谐振频率的灵敏度不同,其中牵引变压器的等值阻抗、线路的分布电容及等值阻抗归一化灵敏度大于 1,即对系统谐振频率的影响较大.

2)结合运行车辆的类型,通过合理选择牵引变压器的短路电压百分比、合理设置分相位置调整供电臂长度及增加电容补偿装置等方式,可使牵引供电系统的谐振频率在机车输出谐波含量较小的频段,达到有效抑制系统谐波含量的目的.

## 参考文献(References):

- [1] 冯晓云.电力牵引交流传动及其控制系统[M].成都:西南交通大学出版社,2009.  
FENG Xiaoyun.AC drive of electric traction and its control system[M].Chengdu:Southwest Jiaotong University Press,2009.(in Chinese)
- [2] 郭蕾,李群湛,刘炜,等.额定功率下高速机车谐波特性的仿真分析[J].西南交通大学学报,2009,44(6):835—840.  
GUO Lei, LI Qunzhan, LIU Wei, et al. Simulation analysis of dynamic characteristic of harmonics for high-speed locomotive running at rated power[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44 (6): 835 — 840. (in Chinese)
- [3] 盛彩飞.电力机车和动车组谐波电流的仿真研究[D].北京:北京交通大学,2009.  
SHENG Caifei.Electric locomotive and EMU harmonic current simulation research[D].Beijing:Beijing Jiaotong University,2009.(in Chinese)
- [4] 郭蕾,李群湛,刘炜,等.高速机车功率变化时的谐波特性分析[C]//2008年全国博士生学术论坛,2008:663—667.  
GUO Lei, LI Qunzhan, LIU Wei, et al. Harmonic characteristics analysis of high speed locomotive power[C]//2008 National Symposium on Doctoral, 2008:663—667. (in Chinese)
- [5] 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.  
YANG Shaobing, WU Mingli.Study on harmonic distribution characteristics and probability model of high speed EMU based on measured data[J]. Journal of the China Railway Society,2010, 32(3): 33—38.(in Chinese)
- [6] 何正友,胡海涛,方雷,等.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):55—62.  
HE Zhengyou, HU Haitao, FANG Lei, et al. Research on the harmonic in high-speed railway traction power supply system and its transmission characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31 (16): 55—62.(in Chinese)
- [7] 郎兵,吴命利.牵引网谐波模型及其仿真计算[J].电力系统自动化,2009,33(17):76—80.  
LANG Bing, WU Mingli. Harmonic model of traction network and its simulation[J]. Automation of Electric Power Systems ,2009, 33(17): 76—80. (in Chinese)
- [8] 史天玉.高速铁路谐波谐振抑制研究[D].成都:西南交通大学,2013.  
SHI Tianyu. Study on the inhibition of high speed railway harmonic resonance[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.(in Chinese)
- [9] 吴命利.电气化铁道牵引网的统一链式电路模型[J].中国电机工程学报,2010,30(28):52—58.  
WU Mingli.Uniform chain circuit model for traction networks of electric railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 52—58. (in Chinese)
- [10] 束洪春,戴新,陈学允,等.多导体传输线的端口参数及其应用[J].电工技术学报,1997,12(2):37—42.  
SHU Hongchun, DAI Xin, CHEN Xueyun, et al. Port's parameters and application of multiconductor transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1997, 12(2): 37—42. (in Chinese)
- [11] 胡海涛,何正友,钱澄浩,等.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.  
HU Haitao, HE Zhengyou, QIAN Chenghao, et al. Modal analysis based research on dynamic harmonic resonance of all-parallel autotransformer traction supply network[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 163—169. (in Chinese)
- [12] 徐文远,张大海.基于模态分析的谐波谐振评估方法[J].中国电机工程学报,2005,25(22):89—93.  
XU Wenyuan, ZHANG Dahai. A modal analysis method for harmonic resonance assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2005,25(22): 89—93. (in Chinese)