

交直和交直交机车混跑线路谐波治理技术

张志春¹, 毛远斌², 谭剑中³

(1. 中国神华神朔铁路分公司, 陕西 榆林 719300; 2. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412000; 3. 国家电网湖南省电力公司 株洲供电分公司, 湖南 株洲 412011)

摘要: 神朔电气化铁路是我国重要的“西煤东送”大动脉, 有大量的交直机车和交直交机车混跑。因此, 牵引网中同时存在大量的高、低次宽频谱谐波, 对供电品质造成不利影响。针对该问题, 建立了车网一体等效电路模型, 分析了牵引网的谐波特性, 提出了一种新型注入式混合补偿方法, 并对其补偿原理、谐波电流检测和控制算法进行了详细阐述。仿真结果表明: 该混合补偿方法可实现对宽频谱谐波的综合治理, 大大减少有源补偿容量, 性价比高。

关键词: 宽频谱谐波; 牵引网; 高次谐波; 混合型滤波器

中图分类号: U223.6⁺3; U223.5

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.02.007

Harmonic Control Technology of the Joint Line of DC and AC Locomotive

ZHANG Zhichun¹, MAO Yuanbin², TAN Jianzhong³

(1. China Shenhua Shenshuo Railway Branch, Yulin, Shaanxi 719300, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou, Hunan 412000, China;

3. State Grid Zhuzhou Power Supply Company, Zhuzhou, Hunan 412011, China)

Abstract: In China, Shenshuo electrified railway is one of the most important main artery that the western coal is transported to the east, where DC locomotives and AC locomotives are running at the same time. Thus, there are so abundant high and low frequency wide spectrum harmonics that have an adverse impact on power supply quality in this line. According to this situation, the equivalent circuit model of vehicle network was established, and harmonic characteristic on traction network was analyzed. A new type of injection hybrid compensation method was put forward, which was introduced from its compensation principle, harmonic current detection and control algorithm. The simulation results showed that this method could realize comprehensive treatment of the wide spectrum of harmonic, and obviously reduce active compensation capacity with high cost performance.

Keywords: wide spectrum harmonics; traction net; higher harmonic; hybrid filter

0 引言

近年来, 随着电力机车技术的快速发展, 神朔铁路引入大量的和谐号交直交型大功率电力机车用于铁路运输^[1], 使该线路存在交直型机车和交直交型机车混跑情况。电力机车网侧变流器有三电平和二电平2种结构, 其网侧输入的谐波电流中, 低次谐波电流含量低, 但由于其较高的开关频率, 随之产生了高频谐

波电流分量^[2-5]。交直交型大功率电力机车自投入运行以来引发了多次谐振事件, 造成了交直机车RC烧损、谐波电流放大甚至出现谐振过电压^[6], 严重影响了线路的正常运行。本文提出一种基于无源滤波和有源滤波相结合的混合型滤波技术, 并在Matlab/Simulink中仿真验证了该方案的有效性。

1 牵引网谐波特性

1.1 混跑线路牵引供电系统谐波分布

神朔铁路存在交直机车与交直交机车混跑情况,

在同一线路上有交直机车和交直交机车运行，也有多台机车同时运行，运行情况复杂。牵引变电所变压器的一次侧电流就是各种机车电流叠加的结果，每台机车都是一个谐波源，2 种机车混跑线路总电流中有交直机车产生的低次谐波，也有交直交机车产生的高次谐波，谐波频谱分布比较丰富。表 1 是交直机车在 2 000 kW 稳定运行，而交直交机车功率分别在 1 200 kW、2 400 kW、3 600 kW 和 4 800 kW 时的电流谐波含量。从表 1 可知，当交直机车稳定运行，交直交机车功率持续增加时，电流的谐波含量逐渐变小。

表 1 交直机车和交直交机车同时运行时总电流畸变率

交直交机车功率 /kW	1 200	2 400	3 600	4 800
总电流畸变率 THD/%	22.26	17.38	14.30	11.56

表 2 是交直机车在 1 900 kW 稳定运行，交直交机车处于再生制动工况时电流基波幅值、THD 含量以及 3 次谐波含量。

表 2 交直机车稳定运行、交直交机车再生制动
总电流基波、THD 及 3 次谐波值

项目	不同制动功率下的参数值					
	1 000 kW	1 300 kW	2 000 kW	3 000 kW	4 000 kW	4 800 kW
基波幅值 /A	93.7	81.1	57.5	65.1	107.3	148.2
THD/%	42.1	50.6	71.8	67.1	40.8	30.3
3 次谐波电流/A	30.6	31.9	32.0	34.7	33.9	34.8

对表 2 所列相关数据分析可知：当交直机车稳定运行，交直交机车处于再生制动工况时，电流总谐波含量很高，并且再生制动功率越接近交直机车的功率，谐波比例就越大；基波电流减小说明交直交机车再生制动产生的能量被交直机车利用；从 3 次谐波数据可以得出电流 THD 增加时，由于 2 种电力机车基波电流互相抵消，使得谐波含量增加，而谐波的绝对值并没有增加。

图 1 和图 2 所示分别为某线路交直机车和交直交机车混跑线路的谐波分布测试情况。从实际的测试数据可见，该线路同时存在大量的高、低次宽频谱谐波，对供电品质造成系列不利影响，严重时高次谐波将导致直流机车 RC 损坏。

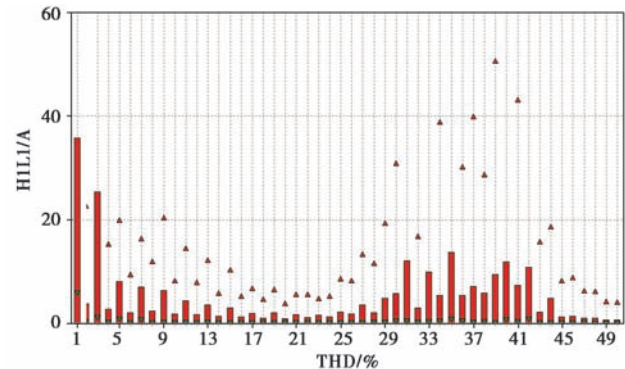


图 1 交直和交直交机车混跑网侧电流谐波分布图

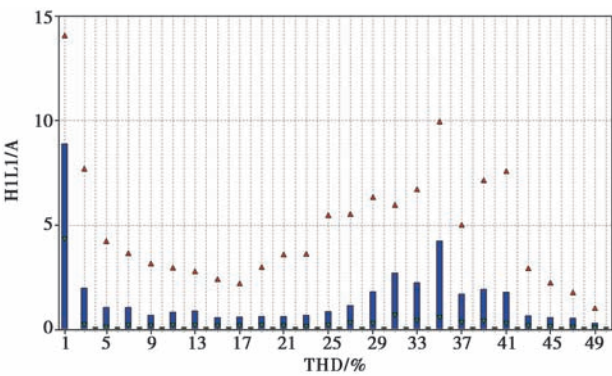


图 2 交直和交直交机车混跑网侧电压谐波分布图

1.2 牵引供电系统等效电路

牵引供电系统的等效电路如图 3 所示。

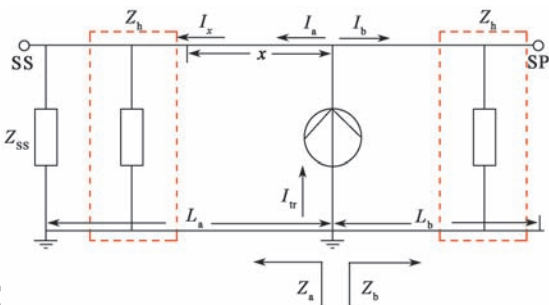


图 3 牵引供电系统的等效示意图

图中 Z_{ss} 为牵引变电所及系统归算到变压器二次侧的阻抗； Z_h 为滤波器的等值阻抗； Z_a 为从机车向牵引变电所方向看去的牵引网阻抗； Z_b 为从机车向分区所方向看去的牵引网阻抗； I_a 为流向牵引变电所方向的电流； I_b 为流向分区所方向的电流； I_x 为距机车 x 位置处的电流（牵引变电所方向）； L_a 为机车距离牵引变电所的距离， L_b 为机车距离分区所的距离，牵引网长 $L_e=L_a+L_b$ 。将输电线路用 π 型等效电路表示其等效电路如图 4 所示。

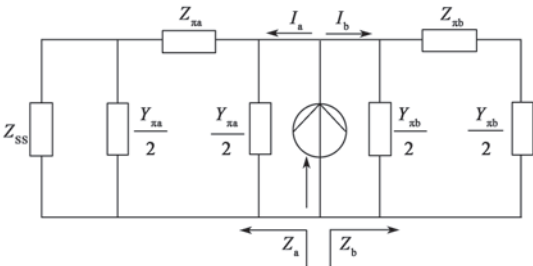


图 4 牵引供电系统 π 型等效电路示意图

采用相模变换法，将线路之间的耦合关系去除，根据基尔霍夫电压、电流定律（KVL 和 KCL）求解得

$$Z_{\pi} = Z_c(f) \sinh(\gamma(f)L_e)$$

(1)

$$\frac{Y_{\pi}}{2} = \frac{\cosh(\gamma(f)L_e)-1}{Z_c(f) \sinh(\gamma(f)L_e)} = \frac{1}{Z_c(f)} \tanh\left(\frac{\gamma(f)L_e}{2}\right)$$

(2)

式中：

$$\cosh[\gamma(f)x] = (e^{\gamma(f)x} + e^{-\gamma(f)x})/2$$

(3)

$$\sinh[\gamma(f)x] = \left(e^{\gamma(f)x} - e^{-\gamma(f)x} \right) / 2 \quad (4)$$

$Z_c(f)$ 为输电线路的特征阻抗:

$$Z_c(f) = \sqrt{Z(f)/Y(f)} \quad (5)$$

$\gamma(f)$ 为输电线路的传播常数:

$$\gamma(f) = \sqrt{Z(f)Y(f)} \quad (6)$$

由等效电路可以定义距机车 x 位置处 (牵引变电所方向) 的谐波电流放大倍数 K_{mag} 为

$$K_{\text{mag}} = I_x / I_t = \frac{\left[Z_{\text{ss}}(f) \sinh(\gamma(f)(L_a - x)) + Z_c(f) \cosh(\gamma(f)(L_a - x)) \right]}{\left[Z_{\text{ss}}(f) \sinh(\gamma(f)L_e) + Z_c(f) \cosh(\gamma(f)L_e) \right] \left[\text{sech}(\gamma(f)L_0) \right]} \quad (7)$$

由式 (7) 可知牵引网的长度、机车位置和参数分布将影响谐波电流传输特性和谐振频率, 机车距离牵引变电所越近, 谐波电流放大越小。

2 传统谐波治理方法

2.1 无源滤波器法

无源滤波器 (Passive Power Filter, PPF) 法是目前使用最广泛和成熟的谐波抑制方式, 效率高、成本低、结构简单且维护方便, 但易与系统发生谐振, 放大谐波分量, 甚至出现过载烧毁滤波装置。

2.2 有源滤波器法

有源滤波器 (Active Power Filter, APF) 法可动态补偿各次谐波, 补偿性能好, 克服了传统无源滤波器的缺陷, 但造价比较高, 无法应用在高压大容量场合, 其系统构成图如图 5 所示。因此, 小容量 APF 与大容量 PPF 相结合的混合型有源滤波装置成为实际应用的必然选择。

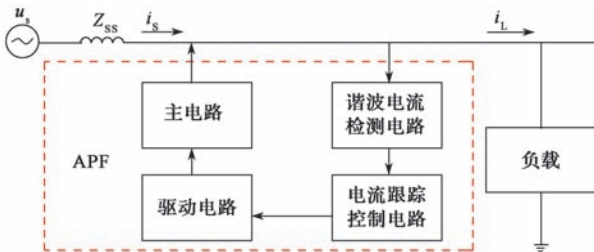


图 5 有源滤波器系统构成图

3 混合型滤波器法

在分析了牵引网的谐波特性以及比较了传统的滤波器的优缺点之后, 针对混合线路电压等级高、谐波的频率分布广以及存在功率因数低等问题, 提出了一种新型注入式混合补偿方法, 其主电路拓扑结构图如图 6 所示。

3.1 单调谐和高通滤波器法

本文设计的单调谐滤波器主要用于滤除 3、5 次等低次谐波。高通滤波器主电路结构和阻抗频率特性曲

线如图 7 所示, 高通滤波器中电抗器 L 和电阻器 R 并联后再与电容器 C 串联。

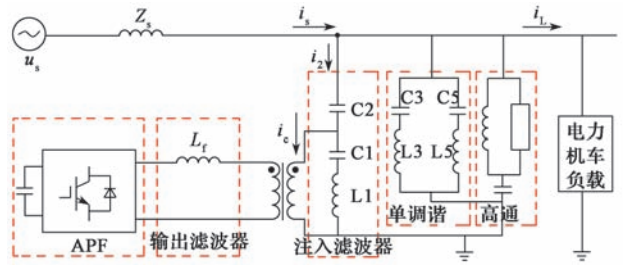
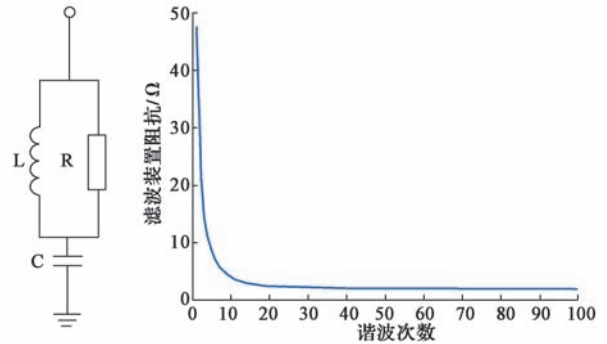


图 6 混合型滤波器主电路拓扑结构图



(a) 高通滤波器 (b) 特性曲线

图 7 高通滤波器及其特性曲线

二阶高通滤波器的阻抗频率特性是: 低于某一频率会呈现较大的阻抗, 而高于这一频率滤波器的阻抗便会迅速下降; 同时, 随着频率的增加, 滤波器的阻抗最终会稳定在某一个值附近。因此, 二阶高通滤波器可根据牵引变电所的容量、谐波状况及正常运行状态下滤波器基波功率的损耗进行设计参数选择。

3.2 注入滤波器、输出滤波器和 APF

注入滤波器由 L_1 、 C_1 和 C_2 构成, 拓扑结构如图 8 所示。

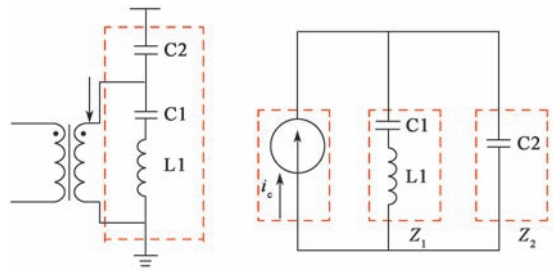


图 8 注入滤波器结构与等效电路图

L_1 、 C_1 和 C_2 共同承担了牵引网侧的电压, L_1 、 C_1 构成基于基波的串联谐振, 对基波呈低阻抗, 因此基本不承担基波电压, 故绝大部分电压由 C_2 承担, 这样可以减小 APF 的容量, C_2 还可以起到补偿无功作用。 L_1 、 C_1 构成基于基波的串联谐振, 在设计时尽量使其品质因数大, 保证好的选择性。当频率逐渐增加时, 对补偿谐波呈高阻抗, 满足 $Z_{2n} \ll Z_{1n}$, 使 APF 产生的谐波电流注入牵引网。输出滤波器由 L_f 组成主要用于消除变流器产生的高次谐波, 减少对耦合变压器的铁损耗, 耦合变压器主要起到电气隔离作用。

3.3 系统等效电路

建立等效电路图如图 9 所示, 运用叠加原理分别进行分析。 u_s 包括 u_{s1} 和 u_{sh} (u_{s1} 为基波电压, u_{sh} 为谐波电压), i_L 包括 i_{L1} 和 i_{Lh} (i_{L1} 为负载基波电流, i_{Lh} 为负载谐波电流)。令 APF 补偿的电流为 $i_{c^*} = \beta i_{Lh^*}$, 当 u_{s1} 和 i_{L1} 作用时, L1、C1 构成的基波串联谐振支路的阻抗接近零, 即 $i_{c^*} = 0$, 此时滤波器补偿无功。当 u_{sh} 单独作用时, 无负载谐波电流, 此时也有 $i_{c^*} = 0$, 但 L1、C1 组成的基波串联谐振电路对谐波呈现高阻抗, 此时有

$$i_{\text{sh}} = \frac{u_{\text{sh}} (Z_{1\text{h}} + Z_{2\text{h}} + Z_{\text{Fh}})}{Z_{\text{sh}} (Z_{1\text{h}} + Z_{2\text{h}} + Z_{\text{Fh}}) + (Z_{1\text{h}} + Z_{2\text{h}}) Z_{\text{Fh}}} \quad (8)$$

当 i_{Lh} 单独作用时, 有

$$\left. \begin{aligned} i_c &= \beta i_{Lh}^* \\ (i_{Lh}^* - i_{sh} - i_c) Z_{1h} &= i_{sh} Z_{sh} + (i_{sh} - i_{Lh}^*) Z_{2h} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

求得

$$i_{\text{sh}} = \frac{Z_{2\text{h}} - (\beta - 1)Z_{1\text{h}}}{Z_{1\text{h}} + Z_{2\text{h}} + Z_{\text{sh}}} i_{\text{Lh}} \quad (10)$$

由式(8)~式(10)可知,当 $\beta=1$, Z_1 远远大于 Z_2 时,系统相当于串入了阻抗,引导谐波流入无源支路。

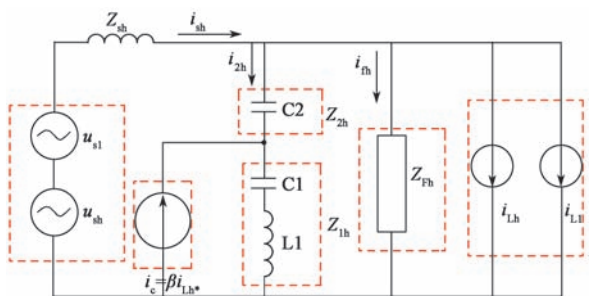


图 9 等效电路图

3.4 谐波检测电路

本文根据单相系统的特点,总结了三相系统基于瞬时无功功率的检测方法,将三相系统运用到单相系统。以下对其基本原理作简要分析,设电网电压和负载电流分别为

$$\left. \begin{aligned} u_s &= \sqrt{2}U \cos \omega t \\ i_L &= \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

将式(11)中 i_L 两边同乘 $\cos\omega t$ 或 $\sin\omega t$ 得

$$\left. \begin{aligned} i_L \cos \omega t &= \sqrt{2} \cos \omega t \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \\ i_L \sin \omega t &= \sqrt{2} \sin \omega t \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

由式(12)可知,等式右边含有直流分量 $(\sqrt{2}/2)I_1\cos\varphi_1$ 和 $(-\sqrt{2}/2)I_1\sin\varphi_1$,通过低通滤波器后仅保存这两项。将这2个直流分量分别扩大2倍再分别乘以 $\cos\omega t$ 、 $\sin\omega t$ 后利用三角变形整理后得到 i_L 的基波成分如下:

$$\sqrt{2} \cos \varphi_1 \cdot \cos \omega t - \sqrt{2} \sin \varphi_1 \cdot \sin \omega t = \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi_1) \quad (13)$$

用负载电流减去基波电流得到谐波电流。但由于低通滤波器的延迟作用,检测值与实际相比存在误差,动态响应速度慢。因此本文在此基础上进行了改进,增加了反馈环节,提高了系统的动态响应速度,仿真中的电路图如图 10 所示。

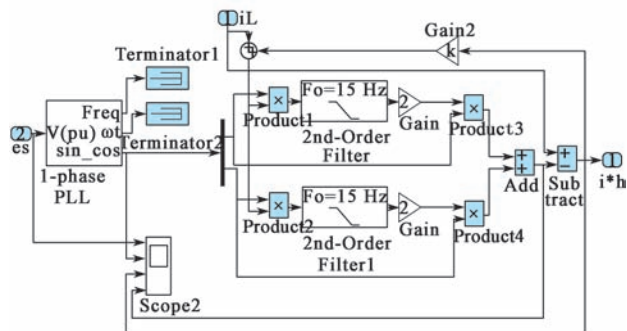


图 10 检测电路图

3.5 混合型滤波器仿真结果

用 Matlab/Simulink 系统进行仿真, 模拟交直和交直交机车谐波源, 其傅里叶分析如图 12 所示, 基本符合实际模型。仿真电路中的部分参数: 牵引网电压 $U_s=27.5\text{ kV}$, 线路长为 10 km ; 单调谐滤波器 $L_3=59.3\text{ mH}$, $C_3=1.9 \times 10^{-5}\text{ F}$, $R=1.117\ \Omega$; $L_5=33.8\text{ mH}$, $C_5=1.2 \times 10^{-5}\text{ F}$, $R=1.061\ \Omega$; $R_1=0.942\ \Omega$, $L_1=150\text{ mH}$, $C_1=6.762 \times 10^{-5}\text{ F}$ 。图 11 表示未投入混合型滤波器时检测到的牵引网电压、电流波形, 其中蓝色曲线为牵引网电压波形图, 红色曲线为牵引网电流波形图。

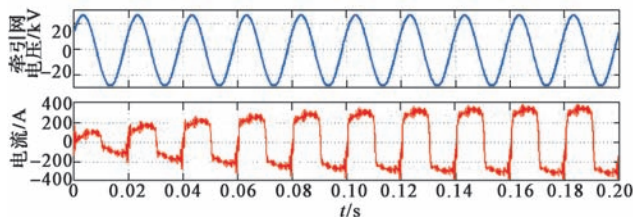


图 11 牵引网电压与网络中电流波形图

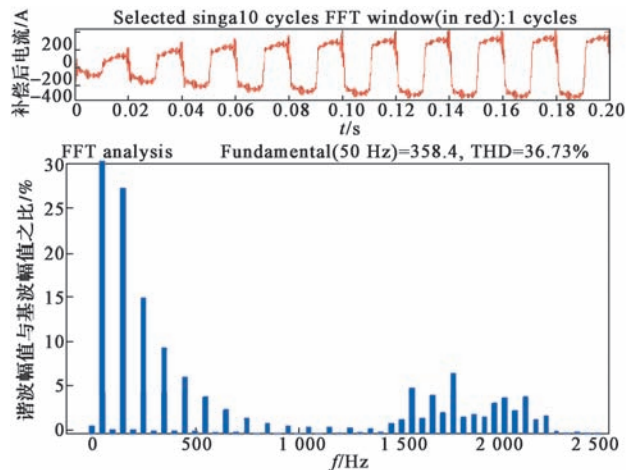


图 12 负载电流傅里叶分析图

图 13 所示蓝色波形图仅为投入单调谐滤波器 (3、5 次) 后牵引网电流波形图, 红色波形图为投入单调谐、

高通滤波器后牵引网电流波形图。

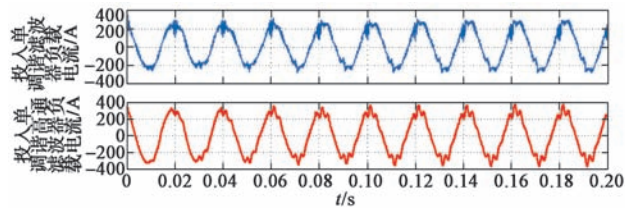


图 13 投入 PPF 后负载电流波形图

图 14 为投入单调谐、高通滤波器后负载电流傅里叶分析图, 表明无源滤波器 (PPF) 滤波效果较好。

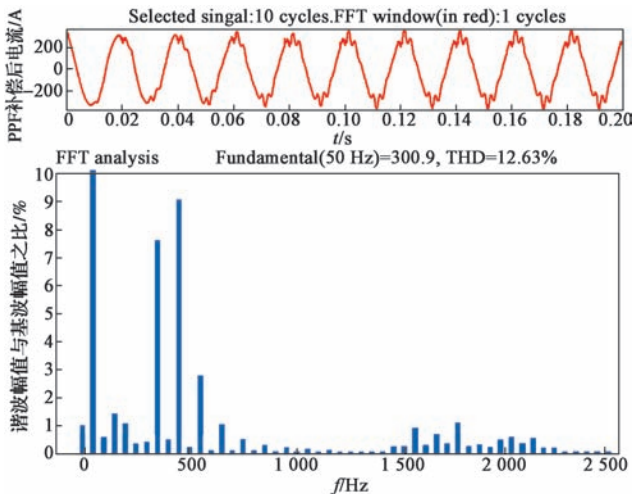


图 14 投入 PPF 后负载电流傅里叶分析图

图 15 表示补偿点牵引网电压和综合补偿 (采用无源滤波器和有源滤波器) 后牵引网电流波形图, 电流接近正弦波, 相位差小于 10° , 因此功率因数达到了 0.95 以上, 达到了预期补偿效果。

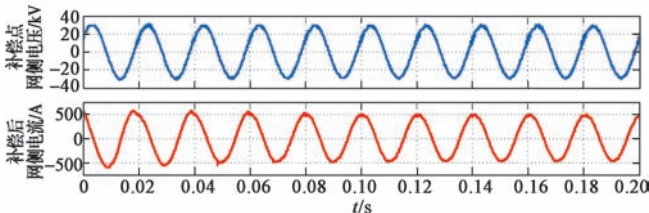


图 15 补偿电网侧电压和综合补偿后网侧电流波形图

图 16 是综合补偿后牵引网电流波形的傅里叶分析结果。

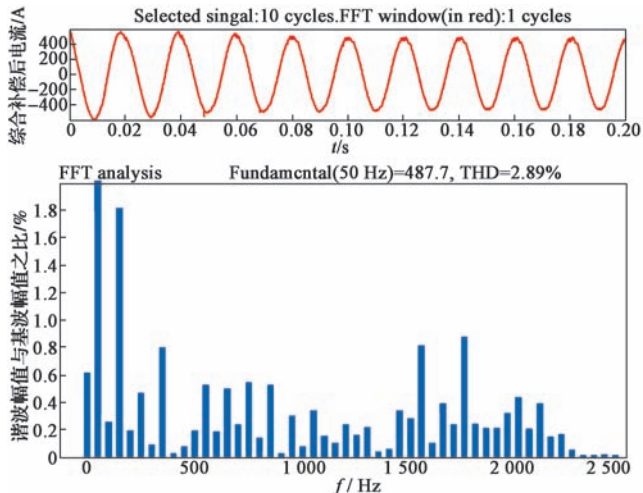


图 16 综合治理后网侧电流傅里叶分析图

PPF 和 APF 投入前网侧电流 $THD_i=36.73\%$, PPF 和 APF 投入后网侧电流总的 $THD_i=2.89\%$, 效果理想。由图 16 可知, 该方案有效解决了牵引网中同时存在大量的高、低次宽频谱谐波问题, 提高了牵引网供电质量。

由图 17 可知, APF 变流器基本不承受基波电压, 只承受谐波电压, 有效地降低了变流器的容量, 谐波补偿范围广, 可滤除 50 次以内谐波, 系统功率因数提高至 0.95 以上, 综合补偿效果显著。

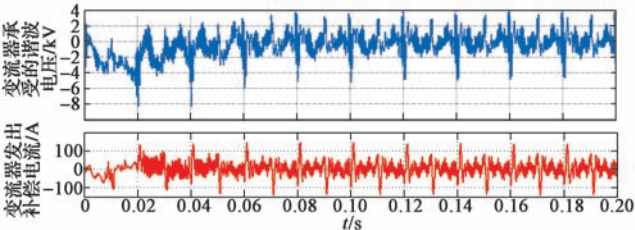


图 17 APF 承受谐波电压与发出的补偿电流图

4 结语

本文通过对神朔铁路交直型机车和交直交型机车混跑线路的谐波进行分析, 根据其特点提出了混合型谐波综合治理技术, 可以得出如下结论:

- ①交直和交直交机车产生的宽频谱谐波与牵引网的自然谐振频率相等时将引起牵引网谐振和牵引网电流的放大。
- ②采用基于有源和无源相结合的混合型谐波治理技术, 可以实现宽频谱谐波治理, 同时解决了牵引网的谐波和无功问题, 达到良好的治理效果。

参考文献:

[1] 李群湛, 连接三, 高仕斌. 高速铁路电气化工程 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2005.

[2] 崔恒斌, 冯晓云, 宋文胜. 高速列车高次谐波负荷建模方法 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 92-99.

[3] 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(6): 835-840.

[4] 李子哈, 周福林, 李亚楠. 牵引供电用和三相电力供电系统用二阶阻波高通滤波装置: CN202260456U [P]. 2012-05-30.

[5] 吴命利, 李群湛. 输电线谐波模型与算法研究 [J]. 铁道学报, 1995 (增刊 1): 105-112.

[6] 吴命利, 李群湛. 电力系统与牵引供电系统三相谐波模型 [J]. 铁道学报, 1999(1): 45-48.

[7] Liu J, Yang J, Wang Z. A new approach for single-phase harmonic current detecting and its application in a hybrid active power filter [J]. Electronic Society, 1999(2): 849-854.

作者简介: 张志春 (1970-), 男, 高级工程师, 主要从事铁路供电和运输管理工作。