

牵引变电所所用变压器高次谐波治理装置运行效果评价

王小坤

(中国铁建电气化局集团有限公司, 四川 成都 610000)

摘要: 当牵引变电所就地取用牵引网电压作为低压380 V系统电源时, 牵引网的高次谐波会通过所用变压器渗透至低压侧。为了抑制三相电压的高次谐波分量, 提高低压侧三相电压电能质量, 在某路局变电所安装了高通滤波器。通过实测数据, 采用电压总谐波畸变率和第 h 次谐波含有率两个指标对滤波器投入前后的谐波进行了对比分析。分析结果表明, 高通滤波器能有效地抑制高次谐波分量, 使三相电压的总谐波畸变率和第 h 次谐波含有率均满足国标要求, 达到了治理效果。

关键词: 高次谐波; 高通滤波器; 总谐波畸变率; 谐波含有率

Effect evaluation of high order harmonic control device in low voltage power supply system of traction substation

WANG Xiaokun

(China Railway Construction electrification Bureau Group Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: When the traction network voltage is selected locally as the power source of low-voltage 380 V system in the traction substation, the high-order harmonics of the traction network voltage will penetrate to the low-voltage power supply system through the substation transformer. In order to suppress the high-order harmonic component of three-phase voltage and improve the power quality of three-phase voltage, a wave-trap high-pass filter is installed in a substation. Based on the measured data, the total harmonic distortion and the h -th harmonic ratio are used to analyze the harmonics before and after the filter is put into operation. The analysis results show that the wave-trap high-pass filter can effectively suppress the high-order harmonic components, so that the total harmonic distortion and the h -th harmonic ratio of the three-phase voltage meet the requirements of the national standard, and the harmonic control effect is achieved.

Key words: high-order harmonics; wave-trap high-pass filter; total harmonic distortion; harmonic ratio

0 引言

当前电气化铁路广泛采用电力牵引, 其中交直型机车所产生的谐波电流主要集中在3、5、7、9和11次等低频段, 而交直交型机车由于采用PWM整流, 其产生的谐波电流低频段大幅度降低, 主要集中在开关频率附近的高频段。因

此, 交直型机车和交直交型机车或动车组(后文统称机车)混跑, 使机车注入线路上的谐波电流具有宽频特性, 极易引发牵引网谐振, 产生谐振过电压^[1]。目前铁路变电所所用电一般是采用双电源: 其一是通过10 kV贯通线, 利用10 kV/0.38 kV三相变压器降压为变电所提供三

相电能；其二是利用27.5 kV/0.4 kV两相—三相变压器（逆YNd 11或逆Scott变压器）直接从牵引网降压取电。对于第二种方式，牵引网的谐波电压可以通过所用变压器渗透至变电所低压侧^[2]。有文献研究表明，谐波在向低压渗透时还会发生谐波放大现象^[3]。因此，所用电三相电压电能质量极易受牵引网电压电能质量的影响。铁路部门多次反映电磁炉、手机充电器、灯和电池充电机等变电所低压设备烧损事故，严重影响了变电所的正常运维工作。

目前，针对变电所的谐波问题，可以归结为两大类：一种是从牵引网源头治理，在高压侧加装调谐滤波器和高通滤波器，减少机车向牵引网注入的谐波电流，同时还能改变牵引网结构，使谐振点偏移，破坏谐振条件^[4-5]；另一种是在在低压侧加装阻波高通滤波器（High-Pass Filter, HPF）或者二阶高通滤波器等无源滤波器，利用谐波电流在低压系统等效阻抗上产生的谐波压降来降低低压侧三相电压的谐波含量^[6]。第一种方案能从根本上治理谐波，但是由于高压设备成本偏高，需要大量电容器进行串并联，可靠性也偏低。第二种方案是从低压侧直接治理，成本大幅度降低，可靠性提高，目前在铁路变电所有了初步的应用。本文针对第二种方案，在安装了HPF的某铁路变电所进行了设备运行测试，依据GB/T 14549—1993《电能质量公用电网谐波》的限值对滤波器运行效果进行了评价。实际测试数据表明，HPF能有效地抑制高次谐波，改善变电所低压侧电能质量。

1 滤波原理分析

图1为电气化铁路高中低压供电系统示意图，牵引变压器（V/v变压器）把电力系统三相电压转换成相位差为60°的两相电压（27.5 kV）供电力机车使用。所用降压变压器（逆YNd 11）就地利用牵引网的两相电压，转换为低压三相电（400 V），为所内负荷提供电能。在这种结构下，牵引网上的谐波会通过所用变压器渗透到低压侧，造成低压系统谐波偏高，

影响负荷的正常使用。因此，在所用变压器二次母线上并联三个星接的Y形滤波器F₁、F₂和F₃，抑制谐波电压，改善电能质量。

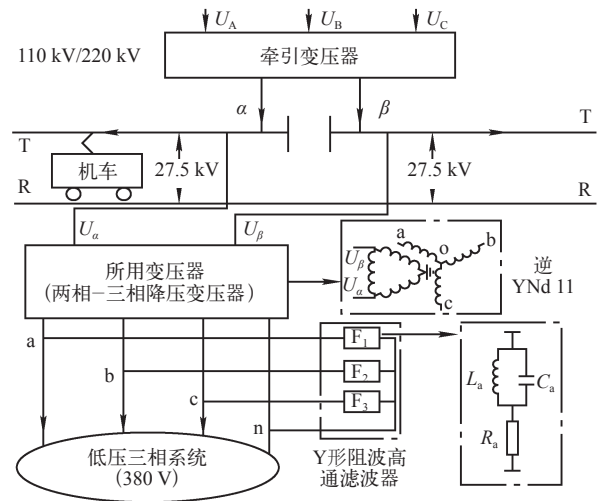


图1 铁路高中低压供电系统示意图

Fig. 1 The topology of the high-medium-low power distribution system in electrified railway

图1中，HPF单模块由电容器C_a和电抗器L_a并联，然后再与电阻器R_a串联构成，HPF的谐波阻抗为

$$\begin{aligned} Z_F(\omega) &= \frac{X_L(\omega)X_C(\omega)}{X_L(\omega)+X_C(\omega)}+R_a \\ &= \frac{j\omega L_a}{1-\omega^2 L_a C_a}+R_a \end{aligned} \tag{1}$$

由式（1）可知，选择合适的电抗、电容参数，使得在工频 ω_n 时， $1-\omega_n^2 L_a C_a=0$ ，则 $Z_F(\omega) \rightarrow \infty$ ，可认为HPF是开路状态，无工频电流流过，对外不交换无功功率，具有阻波性；随着 ω 的增大， $Z_F(\omega)$ 迅速减小，在高频下呈现低阻抗，为高次谐波电流提供了流通路径，具有高通性。其阻抗频率特性曲线如图2所示。

HPF为高次谐波电流提供了流通路径，而高次谐波电流会在所用变压器的等效漏抗上产生谐波压降，因此能减少后级负荷所承受的谐波电压，达到治理谐波的目的。

2 评价标准和测试方法

2.1 评价标准

HPF旨在治理变电所低压系统的三相电压

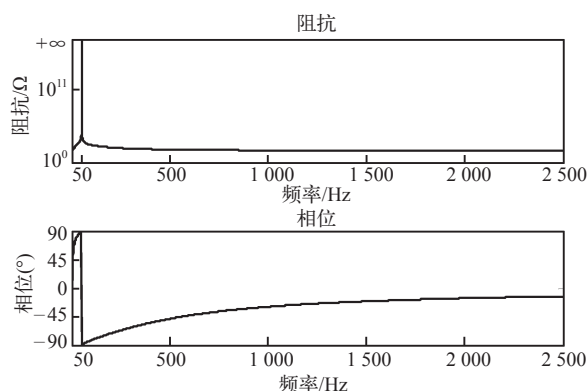


图2 阻波高通滤波器阻频特性曲线图

Fig. 2 The impedance-frequency curve of the HPF

谐波问题，因此只对谐波这个电能质量问题进行分析。本文选取电压总谐波畸变率（Total Harmonic Distortion, THD）和电压谐波含有率（Harmonic Ratio, HR）两个指标对投入HPF前后的电能质量进行评估。

(1) 电压总谐波畸变率 THD_u

电压总谐波畸变率即为周期性交流电压中谐波含量的方均根值与基波分量的方均根值之比（用百分数表示），计算式如下

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_h)^2}}{U_1} \quad (2)$$

式中， U_h 为第 h 次谐波电压； THD_u 能够反映谐波的整体大小，根据标准GB/T 14549—1993《电能质量公用电网谐波》的规定，变电所低压380 V系统的限值为5%。

(2) 第 h 次谐波电压含有率 HRU_h

第 h 次谐波电压含有率即为周期性交流电压中含有的第 h 次谐波分量的方均根值与基波分量的方均根值之比（用百分数表示），计算式如下

$$HRU_h = \frac{U_h}{U_1} \quad (3)$$

式中， HRU_h 能够反映电压中各次谐波分量的分布情况，展现主要的谐波频带，能反映时域波形的特征。根据标准GB/T 14549—1993《电能质量公用电网谐波》的规定，变电所低压380 V系统中偶数次谐波电压含有率限值为2%；奇数次谐波电压含有率限值为4%。

2.2 测试方法

对安装了HPF的某牵引变电所低压系统进行测试，测试采用Fluke 435电能质量分析仪进行数据采集，采用过程记录方式，数据记录间隔为3 s。在投入和未投入HPF时各选取一段时间进行记录，记录有机车通过时的电压数据。

3 实测数据分析

3.1 电压总谐波畸变率指标分析

图3为未投入HPF有车通过时截取的某一个时刻的三相电压波形。可以看到，三相电压波形畸变较严重，还有较高的高次谐波分量，最大峰值达到340 V。

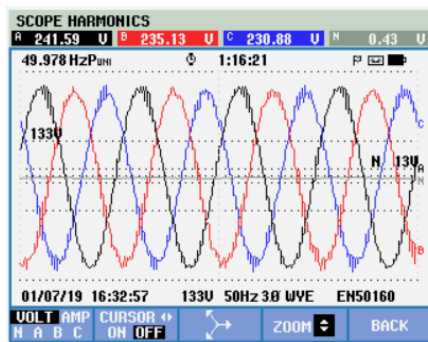


图3 未投入HPF有车时三相电压波形

Fig. 3 Waveforms of the three-phase voltage without HPF

图4为未投入HPF时有车时段的三相电压THD趋势曲线。可以看出，三相电压大部分时间THD均超过了国标限值5%，最大值达到了16%，谐波畸变非常严重。表明机车造成的牵引网谐波电压通过所用变压器渗透到了低压380 V系统。

图5为投入HPF有车时截取的某个时刻的三相电压波形。由此可见，投入HPF后，三相波形毛刺减少，变得平滑，从时域波形上可看出HPF对高次谐波的滤波效果很明显。

图6为投入HPF时有车时段的三相电压THD趋势曲线。由图6可知，三相电压的THD大幅度下降，大部分时间均保持在国标5%以下，在3%附近波动。

下表从统计角度给出了投入和未投入HPF两

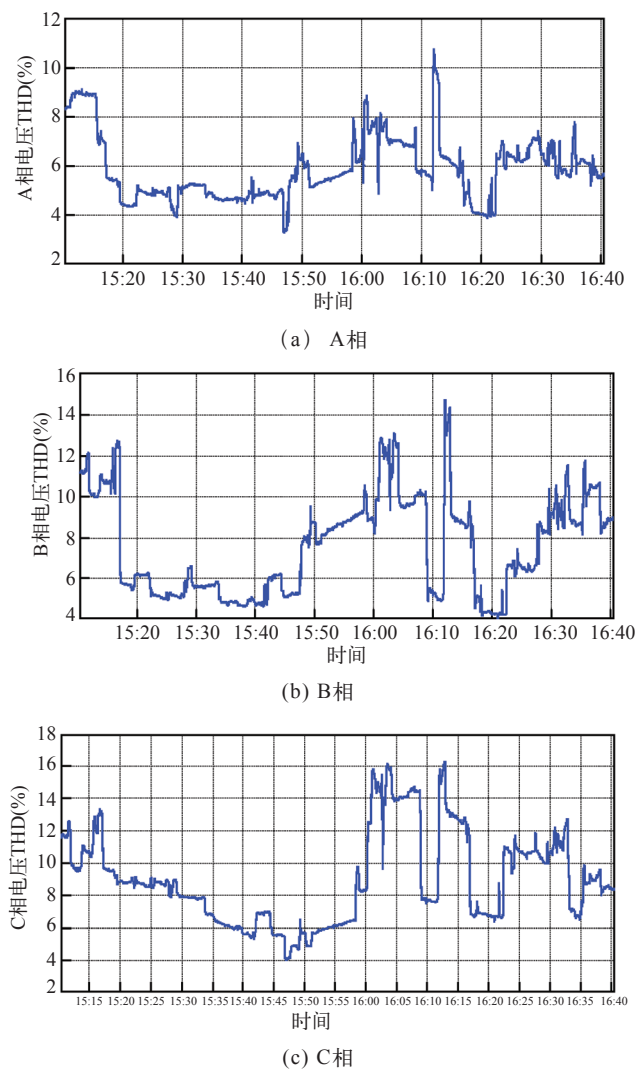


图 4 380 V 侧未投入 HPF 有车时段电压总谐波畸变率趋势曲线

Fig. 4 The voltage THD of 380 V without HPF when loaded

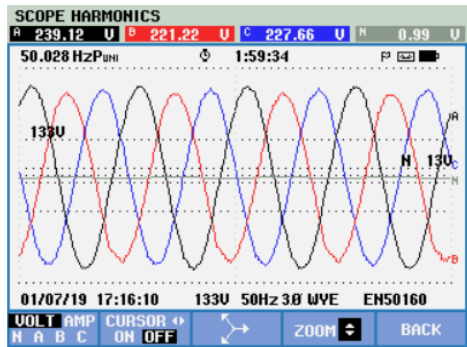


图 5 投入 HPF 有车时三相电压波形

Fig. 5 Waveforms of the three-phase voltage with HPF

个时间段各自的THD最大值和95%概率最大值。从95%概率大值可以看出，投入HPF后，三相电

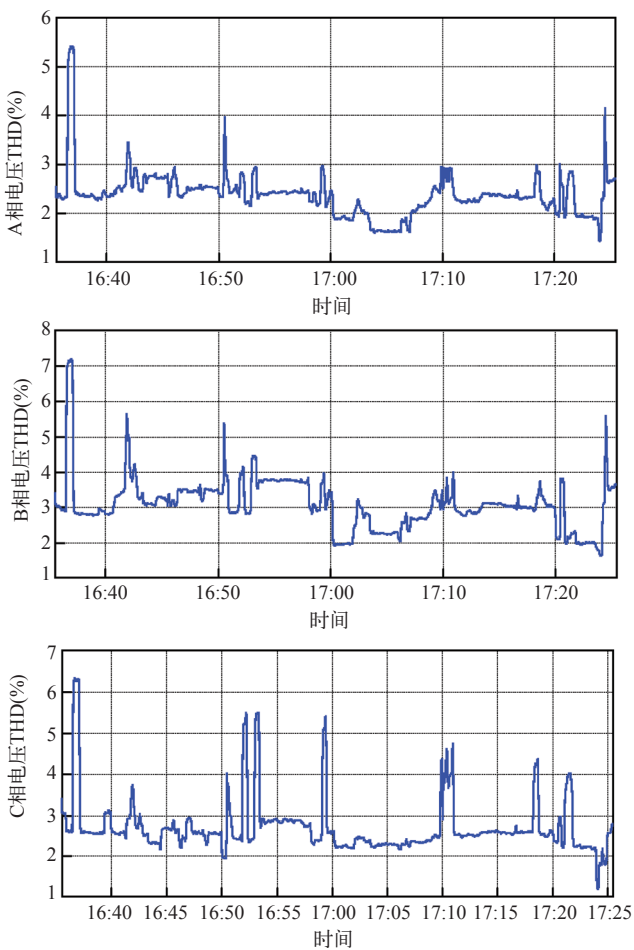


图 6 380 V 侧投入 HPF 有车时段电压总谐波畸变率趋势曲线

Fig. 6 The voltage THD of 380 V with HPF when loaded

压的THD大幅度下降，A、B和C相均低于国标5%限值。

表 三相电压的 THD

Tab. THD of three phase voltage

	HPF状态	THD最大值(%)	THD95%概率大值(%)
A 相	未投入	10.76	8.86
	投入	5.91	3.29
B 相	未投入	14.71	11.79
	投入	9.10	4.73
C 相	未投入	16.26	14.39
	投入	8.31	4.89

3.2 第h次谐波电压含有率指标分析

图7为HPF投入前后的各次谐波含有率柱状图。谐波主要分布在15~21次和31~43次，以奇次谐波为主。投入HPF前，19、21、35和37次高频段谐波含有率均大于4%的国标限值，而偶数次谐波含有率均低于2%的国标限值。投入HPF

后, 高频段谐波含有率大幅度下降, 奇次谐波含有率和偶次谐波含有率均低于4%和2%的国标限值。但是在低频段, 诸如3、5、7、9和11次谐波反而增大, 且B、C相放大的程度高于A相, 这也是3.1节中B、C相电压THD 95%概率大值接近于5%, 高于A相的原因。在实际运行中发现, 造成所内负荷烧损的谐波主要是高次谐波, 低次谐波虽然使THD偏大, 但并不是威胁低压系统安全运行的主要原因。

4 结束语

针对牵引变电所低压380 V系统的谐波问题研制了HPF, 并安装运行于某铁路变电所。本文

介绍了滤波器的工作原理, 并从总谐波畸变率和各次谐波含有率两个指标对滤波器的实际运行效果进行了评估。实际测试结果表明: HPF能有效地抑制高次谐波, 使三相电压的总谐波畸变率和各次谐波含有率大幅度下降, 满足国标的限值要求。同时, 从投入HPF前后的各次谐波含有率对比中可以看出, 低次谐波存在放大现象, 使THD偏高, 对于滤波器参数的优化及进一步抑制低次谐波是下一步值得研究的问题。

参考文献

- [1] 赵元哲, 李群湛, 周福林, 等. 牵引网高次谐波对高低压三相系统的渗透特性[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(5): 961-969.
- [2] 周福林, 李琦琦, 杨瑞轩, 等. V/v接线牵引变压器高次谐波横向传递特性[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 290-299, 395.
- [3] 赵元哲, 李群湛, 周福林. 基于阻波高通滤波器的高速铁路谐振抑制方案[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 139-144.
- [4] HU H T, HE Z Y, GAO S B. Passive filter design for China high-speed railway with considering harmonic resonance and characteristic harmonics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 505-514.
- [5] 周福林, 朱鹏, 李显荣, 等. 电气化铁路低压配电系统高次谐波抑制技术[J]. 电气化铁道, 2018, 29(1): 1-4.
- [6] 赵元哲. 电气化铁路车网耦合系统异常电气过程与治理方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.

作者简介



王小坤

王小坤(1978—), 男, 学士, 研究方向为铁道电气化。
(收稿日期: 2020-08-04) **EA**

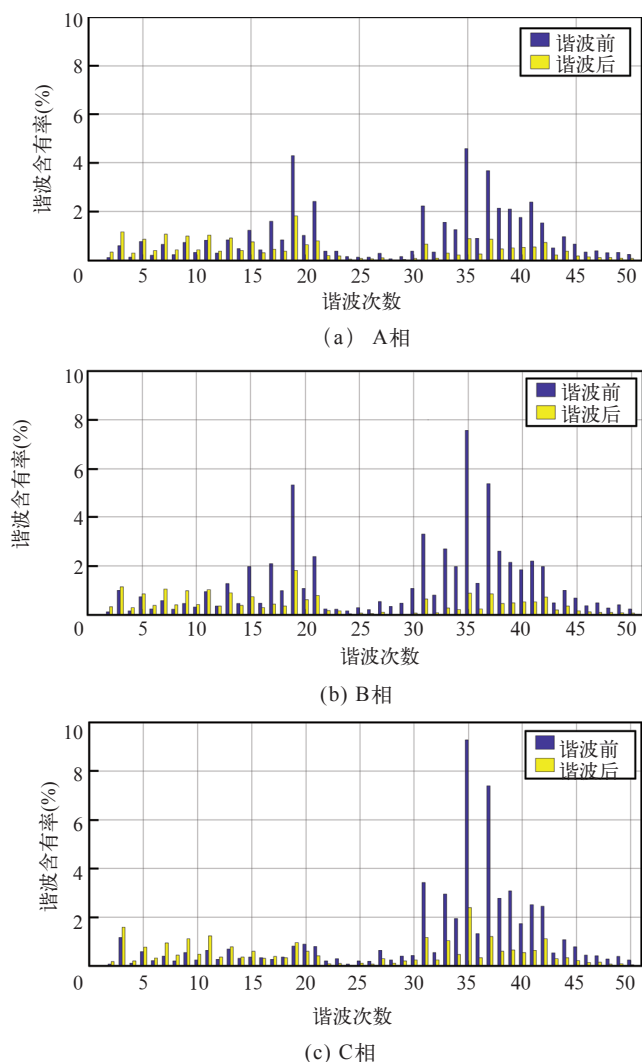


图7 三相电压各次谐波含有率对比图

Fig. 7 Comparison diagram between the each harmonic ratio of three-phase voltage