

基于阻波高通滤波器的高速铁路谐振抑制方案

赵元哲, 李群湛, 周福林

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 高速铁路系统中交直交机车产生的高次谐波可能会引发牵引网谐振和谐波电流放大, 严重影响高速机车的安全稳定运行。分析了牵引网谐振的引发机制, 针对高速铁路系统提出一种可滤除高次谐波和抑制谐波的新型阻波高通滤波器。该阻波高通滤波器由电容器和电抗器并联后, 再与电阻串联构成。在工频下, 该阻波高通滤波器为开路状态, 阻止工频电流流过; 在高频下, 该阻波高通滤波器呈现低阻抗, 具有高通性。试验结果表明, 所提高通滤波器在工频下具有极高阻抗; 在高频下呈现低阻抗, 可滤除高次谐波, 抑制牵引网谐振。

关键词: 电气化铁路; 牵引; 牵引供电系统; 谐波分析; 谐波抑制; 阻波高通滤波器; 电力滤波器

中图分类号: U 224.2

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.04.021

0 引言

近年来, 我国高速铁路高速发展, 基于 IGBT、IGCT 等全控型器件的交流机车以其启动快、牵引负荷大、功率因数高、谐波含量低等优势在高速铁路得到广泛应用^[1]。交流机车中 3 次和 5 次等低次谐波的含量有所下降, 但高频的开关频率附近的高次谐波含量有所增加^[2-5]。由于牵引网的分布电容、电感与变压器阻抗、电网系统阻抗组成一个无源线性网络, 具有多个自然谐振频率, 当交流机车向该网络注入的谐波频率等于系统的自然谐振频率或两者接近时, 将激励该网络产生谐振或谐波放大^[6]。高次谐波谐振会造成高速铁路系统中谐波激增, 产生谐波过电流、过电压等现象, 危害系统的供电设备、电力机车的安全可靠运行, 这些现象在高速铁路系统中均有不同程度的存在, 造成了并联补偿电容、用电设备的烧损, 在混跑线路中也会造成直流机车上的阻容吸收回路、高压电压互感器等设备的损坏。

针对牵引网谐振和谐波放大现象已有一些研究。文献[7-8]通过建立牵引网多导体传输模型, 分析了谐波电流在牵引网的传输特性; 文献[9-10]利用模态法分析了简单牵引网络发生谐波谐振的条件; 文献[11-12]则分析了影响高次谐波谐振和谐波放大的关键敏感参数。上述文献虽从数学和仿真的角度分析了谐振发生规律, 但都未提出治理高次谐波和抑制牵引网谐振的有效措施。文献[13]虽然提出一种二阶高通滤波器治理方案, 但其在工频下会产生较大的无功电流, 由于交直交机车的功率因数接近 1, 无功需求低, 因此该方案不适用于高速铁路系统。

收稿日期: 2014-08-23; 修回日期: 2015-02-24

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (268-2014RC07); 中国铁路总公司科技研究开发计划重大课题 (2014J009-B)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2682014RC07) and the Technology Research and Development Program of China Railway Corporation (2014J009-B)

本文提出一种可有效抑制高次谐波谐振和谐波电流放大, 并适用于高速铁路系统的新型阻波高通滤波器方案。

1 牵引网谐振分析

高速铁路牵引供电系统是一个无源多端口网络, 主要由牵引网、AT 所、牵引变电所及机车构成。机车在牵引网运行时, 从机车往供电系统方向看, 牵引网和牵引变电所可以看成一端口网络, 等效电路如图 1 所示。图中, 牵引网长度为 l ; 机车离牵引变电所的距离为 x ; Z_x 为从机车方向看去的牵引供电系统等效阻抗; Z_1 为机车左侧等效牵引网阻抗, Z_2 为机车右侧等效牵引网阻抗; Z_s 为变电所变压器及系统侧折算到牵引网侧的阻抗; I_x 为机车与牵引网距离为 x 时, 机车的谐波电流传输到变电所出口处的电流; I_T 为机车电流, I_1 为机车电流中流向牵引变电所的机车电流, I_2 为流向分区所的机车电流。

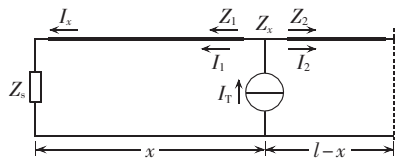


图 1 牵引网等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of traction network

牵引网可采用 π 型等效电路对机车两侧的牵引网进行等效^[10], 牵引网等效电路如图 2 所示。

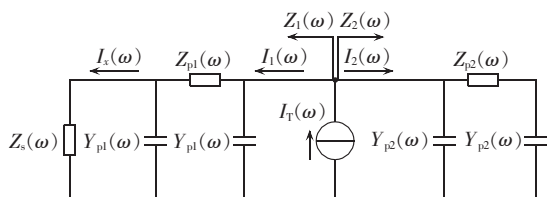


图 2 牵引网 π 型等效电路

Fig.2 π -type equivalent circuit of traction network

根据 π 型等效电路计算公式得到各部分的表达式为:

$$\begin{cases} Z_{p1}(\omega) = Z_0(\omega) \sinh[\gamma(\omega)x] \\ Y_{p1}(\omega) = \frac{1}{Z_0(\omega)} \tanh[\gamma(\omega)x/2] \\ Z_{p2}(\omega) = Z_0(\omega) \sinh[\gamma(\omega)(l-x)] \\ Y_{p2}(\omega) = \frac{1}{Z_0(\omega)} \tanh[\gamma(\omega)(l-x)/2] \end{cases} \quad (1)$$

$$Z_0(\omega) = \sqrt{(R+j\omega L)/(j\omega C)}$$

$$\gamma(\omega) = \sqrt{j\omega C(R+j\omega L)}$$

其中, $Z_0(\omega)$ 和 $\gamma(\omega)$ 分别为线路特性阻抗和传播系数; R 、 L 、 C 分别为线路单位长度的电阻、电感、电容; ω 为谐波频率。

从机车处看入, 两侧的等效阻抗分别为:

$$Z_1(\omega) = \left[\frac{1}{Y_{p1}(\omega)} // Z_s(\omega) + Z_{p1}(\omega) \right] // \frac{1}{Y_{p1}(\omega)} \quad (2)$$

$$Z_2(\omega) = \left[Z_{p2}(\omega) + \frac{1}{Y_{p2}(\omega)} \right] // \frac{1}{Y_{p2}(\omega)} \quad (3)$$

由式(2)和(3)可以得到系统的等效阻抗为:

$$Z_x(\omega) = Z_1(\omega) // Z_2(\omega) = \{ Z_0(\omega) \cosh[\gamma(\omega)(l-x)] \times \{ Z_s(\omega) \cosh[\gamma(\omega)x] + Z_0(\omega) \sinh[\gamma(\omega)x] \} \} \div \{ Z_s(\omega) \sinh[\gamma(\omega)l] + Z_0(\omega) \cosh[\gamma(\omega)l] \} \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 在某一频率 ω_r 下, 可以使得 $Z_s(\omega_r) \sinh[\gamma(\omega_r)l] + Z_0(\omega_r) \cosh[\gamma(\omega_r)l] = 0$, 则牵引网等效阻抗 $Z_x(\omega_r) \rightarrow \infty$, ω_r 为牵引网的自然谐振频率, 其与系统参数 Z_0 、 γ 、 l 、 Z_s 有关, 与机车位置 x 无关, 但机车位置 x 变化影响着 $Z_x(\omega_r)$ 的大小; 由 $U(\omega_r) = Z_x(\omega_r)I_T(\omega_r)$ 可以得到, 此时注入谐波电流将造成很大的电压。

根据电流关系可得, 流向变电所方向的机车电流 $I_1(\omega)$ 为:

$$I_1(\omega) = I_T(\omega) \frac{Z_2(\omega)}{Z_1(\omega) + Z_2(\omega)} = I_T(\omega) \times \{ \{ Z_s(\omega) \cosh[\gamma(\omega)x] + Z_0(\omega) \sinh[\gamma(\omega)x] \} \times \cosh[\gamma(\omega)(l-x)] \} / \{ Z_s(\omega) \sinh[\gamma(\omega)l] + Z_0(\omega) \cosh[\gamma(\omega)l] \} \} \quad (5)$$

当 $I_1(\omega)$ 沿牵引网传输到变电所出口处时电流 $I_x(\omega)$ 为:

$$I_x(\omega) = I_1(\omega) \frac{Z_0(\omega) \cosh[\gamma(\omega)(l-x)]}{Z_s(\omega) \sinh[\gamma(\omega)l] + Z_0(\omega) \cosh[\gamma(\omega)l]} \quad (6)$$

比较 $I_x(\omega)$ 和 $I_1(\omega)$ 知, 机车产生的谐波电流经牵引网传输后会出现一定的放大现象, 当机车向牵引网注入的谐波频率 ω 等于或接近牵引网谐振频率 ω_r 时, $Z_s(\omega_r) \sinh[\gamma(\omega_r)l] + Z_0(\omega_r) \cosh[\gamma(\omega_r)l] \rightarrow 0$, 引发牵引网谐振和相应频率的谐波发生严重放大现象。

2 牵引网谐振抑制方案

为了避免牵引网谐振和谐波电流放大, 可通过滤

除机车产生的高次谐波和改变牵引网的谐振频率以避免机车的谐波电流方式实现, 最为有效的方案为在牵引供电系统中安装高通滤波器, 滤除高次谐波, 改变阻抗频率特性, 实现高次谐波谐振治理。但既有的 1、2、3 阶高通滤波器在工频下均发出较大的无功电流, 不适用于高速铁路系统中, 因此提出了一种适用于高速铁路系统的新型阻波高通滤波器。

2.1 阻波高通滤波器工作原理

新型阻波高通滤波器由电容器和电抗器并联后, 再与电阻串联构成, 如图 3 所示^[14]。

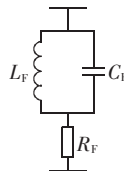


图 3 阻波高通滤波器结构

Fig.3 Structure of proposed wave-trap HPF

阻波高通滤波器的阻抗为:

$$Z_F(\omega) = \frac{X_L(\omega)X_C(\omega)}{X_L(\omega) + X_C(\omega)} + R_F(\omega) = \frac{j\omega L_F}{1 - \omega^2 L_F C_F} + R_F(\omega) \quad (7)$$

其中, L_F 、 C_F 分别为电抗器电感值、电容器组电容值; R_F 为阻尼电阻的电阻值。

阻波高通滤波器的工作原理为: 在工频 ω_N 下, 电容器与电抗器发生并联谐振, 即 $\omega_N L_F = 1/(\omega_N C_F)$, $1 - \omega_N^2 C_F = 0$, 则 $Z_F(\omega_N) \rightarrow \infty$, 因此在工频电压下, 可认为阻波高通滤波是开路状态, 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, 为高次谐波提供通路, 具有高通性。

2.2 阻波高通滤波器滤波分析

阻波高通滤波器一般放置于牵引变电所出口处, 与牵引网并联, 结合图 1, 构建并联阻波高通滤波器的牵引网等效电路, 如图 4 所示。

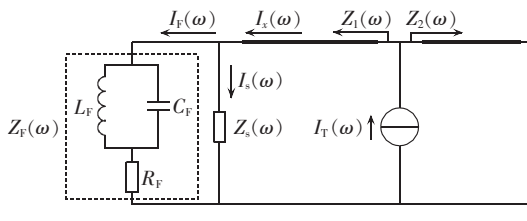


图 4 并联阻波高通滤波器的牵引网等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of traction network with parallel wave-trap HPF

根据图 4 中的电流分配关系得到流过阻波高通滤波器的电流 $I_F(\omega)$ 为:

$$I_F(\omega) = \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_F(\omega)} I_x(\omega) = \frac{j\omega L_s}{j\omega L_F / (1 - \omega^2 L_F C_F) + R_F(\omega) + j\omega L_s} I_x(\omega) \quad (8)$$

其中, L_s 为公共电网系统侧折算到牵引网侧以及牵引变压器的等效电感。

由式(8)可以看出, ω 越高, 流向阻波高通滤波

器的谐波电流的比例就越高,滤波效果越明显。

当在牵引变电所并联了阻波高通滤波器后,变电所的等效阻抗变为:

$$Z'_s(\omega) = \frac{Z_s(\omega)Z_F(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_F(\omega)} < Z_s(\omega) \quad (9)$$

投入阻波高通滤波器后牵引变电所处的等效电感降低,在牵引网原有谐振频率 ω_r 下, $Z'_s(\omega_r) < Z_s(\omega_r)$,系统的谐振频率发生了改变,假设 ω'_r 为阻波高通滤波器投入后牵引网的谐振频率,则有:

$$Z'_s(\omega'_r) \sinh[\gamma(\omega'_r)l] + Z_0(\omega'_r) \cosh[\gamma(\omega'_r)l] = 0 \quad (10)$$

$$Z'_s(\omega'_r) = -Z_0(\omega'_r) / \tanh[\gamma(\omega'_r)l] < Z_s(\omega'_r) \quad (11)$$

由于等效阻抗 $Z'_s(\omega)$ 呈感性,随着频率的升高而增大,因此在式(11)成立的条件下可以得到 $\omega'_r > \omega_r$ 。由此可见,阻波高通滤波器投入后,不仅可以滤除高次谐波电流,还可增大牵引网的谐振频率,可避开电力机车谐波电流频率范围,避免牵引网谐振的发生。

2.3 在高速铁路 AT 供电系统中应用方案

阻波高通滤波器在 AT 供电方式下的实际应用方案如图 5 所示,2 组阻波高通滤波器位于牵引变电所处,分别接于牵引网的 T-R 和 F-R 线之间,可通过 T-R 线和 F-R 线进行滤波,形成较完备的滤波方案。

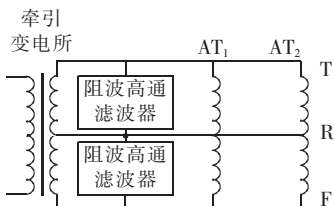


图 5 AT 供电方式下阻波高通滤波器滤波方案
Fig.5 Filtering scheme in AT power-supply mode

3 阻波高通滤波器特性仿真分析

在 MATLAB/Simulink 下搭建 AT 供电方式牵引供电系统的阻波高通滤波器仿真模型,如图 6 所示,仿真模型包括外部 220 kV 电源、牵引变压器、牵引网、AT 变压器、阻波高通滤波器与机车;系统短路容量为 3 000 MV·A,变压器容量为 50 MV·A,牵引网

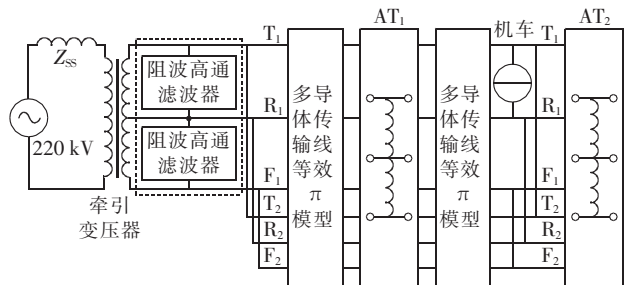


图 6 牵引供电系统仿真模型
Fig.6 Simulation model of traction power-supply system

由多导体传输线等效 π 模型进行精确建模^[15]; T_1 、 R_1 、 F_1 为上行线路, T_2 、 R_2 、 F_2 为下行线路。

3.1 滤波器参数设计

按照高速铁路 50 MV·A 额定负荷容量计算,电容器组容量选为 2400 kvar,电容器组采用 4 串 6 并方式,单个电容器额定电压和额定容量分别为 10.5 kV、100 kvar,电容值为 $C_F=4.33 \mu\text{F}$;电容器和电抗器在 50 Hz 下发生并联谐振,有 $|X_L| = |X_C| = 734 \Omega$,则电抗器参数为 $L_F = 1 / (\omega_N^2 C_F) = 2.34 \text{ H}$;综合考虑滤波效果和暂态特性,电阻器 $R_F=40 \Omega$ 。

3.2 阻波性

对阻波高通滤波器进行阻抗频率特性分析,得到阻抗频率曲线,如图 7 所示。

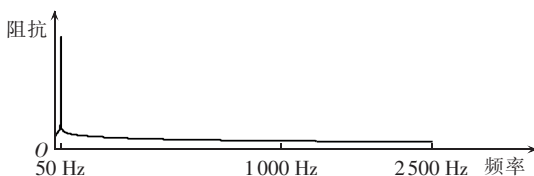


图 7 阻波高通滤波器阻抗频率特性
Fig.7 Impedance-frequency characteristic curve of proposed HPF

由图 7 可知:在 50 Hz 时,阻波高通滤波器对外呈现无穷大阻抗,将不会有基波电流流过滤波器,具有阻波性;滤波器在高频下呈现低阻抗,为高次谐波提供通路,具有高通性。

3.3 高通性

机车产生的谐波对外体现为谐波电流,因此机车模型采用统计谐波模型,利用电流源模型进行组合,模拟实际机车的谐波状况,机车的总谐波电流畸变率为 5.14%。

虽然系统的谐振频率与机车位置无关,但机车离变电所越远,其引起的最大次数的谐波放大倍数越大^[5],考虑最严重情况,将机车放置于线路末端,此时牵引变电所电流、电压分别如图 8 和图 9 所示,其

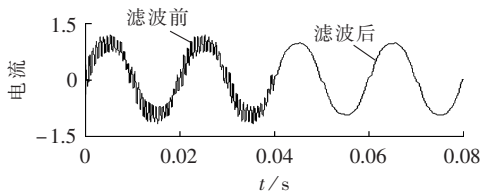


图 8 牵引变电所电流
Fig.8 Current of traction substation

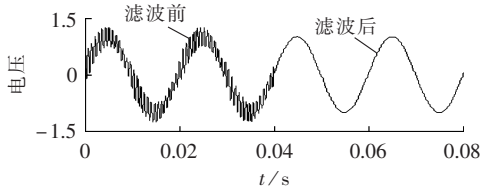


图 9 牵引变电所电压
Fig.9 Voltage of traction substation

中,阻波高通滤波器在 0.04 s 后投入;电流、电压均为标么值。

由图 8 和图 9 可知,在阻波高通滤波器投入之前,机车谐波电流会引发牵引网谐振,牵引变电所电流畸变率达到了 26.16%,分析机车各次谐波电流沿牵引网传输后的放大倍数,分析结果如图 10 所示。由图 10 可以看出,27 次谐波的放大现象最为明显,这说明牵引网的自然谐振频率在此处或附近;同时,谐振还会造成牵引变电所电压严重畸变,畸变率也达到 25.93%;当阻波高通滤波器投入后,牵引网谐振现象消失,电流畸变率由 26.16%降为 3.29%,小于机车电流畸变率 5.14%,电压畸变率由 25.93%降为 1.32%。

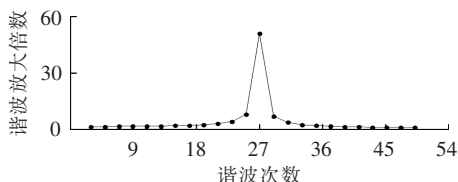


图 10 各次谐波电流放大倍数

Fig.10 Harmonic current amplification for different orders

分析机车各次谐波电流与阻波高通滤波器投入后牵引变电所各次谐波电流含有率,结果如图 11 所示。

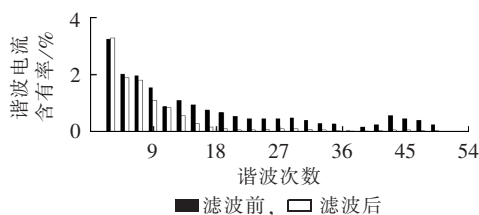


图 11 滤波前后机车各次谐波电流含有率

Fig.11 Harmonic current proportion for different orders before and after filtering

由图 11 可以看出,阻波高通滤波器投入后,高次谐波电流放大现象消失,机车注入牵引网的高次谐波电流也得到有效滤除,谐波次数越高,滤波效果越好,验证了阻波高通滤波器的高通滤波功能。

利用 Simulink 中的阻抗频率测量模块^[16]对谐波电流注入点处,即线路末端 T_1 和 R_1 之间进行阻抗频率特性测量,分别得到阻波高通滤波器投入前与投入后牵引供电系统的阻抗频率特性曲线,如图 12 所示。

由图 12 看出,阻波高通滤波器投入前,系统的阻抗频率特性曲线中阻抗最大值处频率为 1345 Hz,其为系统的谐振频率,在滤波器投入后,牵引供电系统的谐振点向更高频率偏移,谐振频率为 5324 Hz,明显高于机车发出的谐波电流频率范围,破坏了谐振发生的条件,从而抑制了谐振。

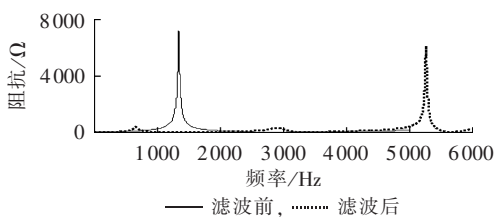


图 12 牵引供电系统阻抗频率曲线

Fig.12 Impedance-frequency curve of traction power-supply system

4 试验验证

搭建牵引供电系统和阻波高通滤波器构成的小型试验系统如图 13 所示,验证阻波高通滤波器特性。试验系统由主电源、调压器、阻波高通滤波器、单相全桥整流模块与负载(模拟电力机车负载)、示波器等构成,阻波高通滤波器并联于调压器二次侧。试验参数为:调压器二次侧电压为 60 V,电容器 $C=80\text{ }\mu\text{F}$,电抗器 $L=0.1267\text{ H}$,电阻器 $R=1\text{ }\Omega$, $|X_C|=|X_L|$ 。

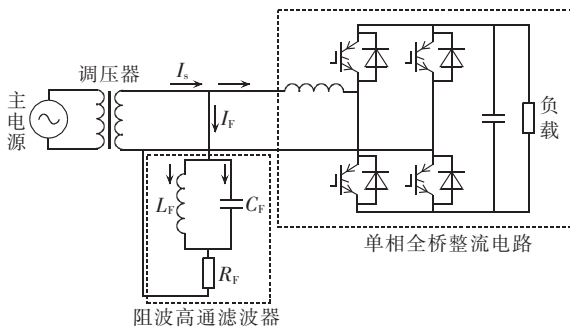


图 13 试验系统结构图

Fig.13 Structure of experiment system

阻波高通滤波器投入前后,试验系统输出电流如图 14 所示,滤波器电流如图 15 所示。

对滤波前后电流进行快速傅里叶变换(FFT)分析,得到各次谐波电流含有率,如图 16 所示。

由图 14—16 可知,滤波前,系统输出电流含有

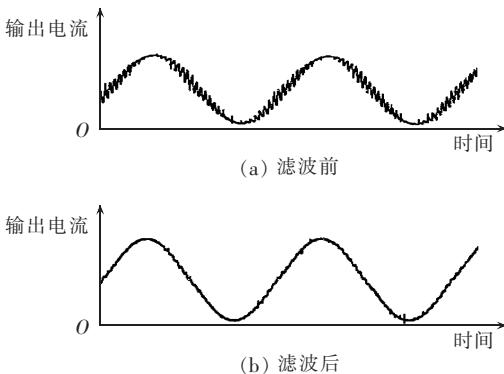


图 14 滤波前后试验系统输出电流

Fig.14 Output current of experiment system before and after filtering

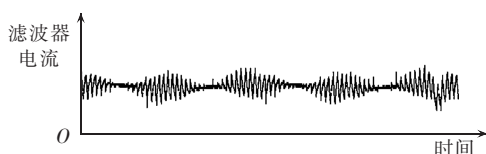


图15 阻波高通滤波器电流
Fig.15 Current of proposed HPF

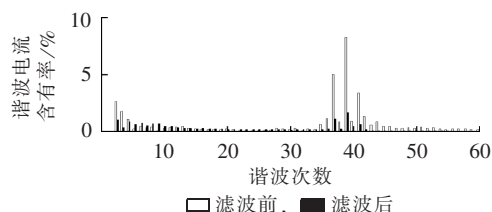


图16 滤波前后各次谐波电流含有率

Fig.16 Harmonic current proportion for different orders before and after filtering

大量高次谐波,总谐波畸变率为13.3%。阻波高通滤波器投入后,输出电流中的高次谐波含量明显下降,总谐波畸变率降为5.4%;流过阻波高通滤波器的电流主要为高次谐波电流,验证了其高通滤波特性,且不含工频分量,验证了其阻波性。

5 结论

通过数学分析、建模仿真和试验系统验证,可以得到以下结论。

a. 牵引网具有自然谐振频率,机车的高次谐波电流与牵引网自然谐振频率的耦合是造成牵引网谐振和高次谐波电流放大的主要原因。

b. 阻波高通滤波器在工频下呈现高阻抗,与系统不交换无功,不影响系统的功率因数,具有阻波性;能有效滤除高次谐波电流,具有高通性,其接入牵引网后可改变系统的阻抗频率特性,牵引网首次谐振频率向更高频段偏移,使牵引网谐振频率避开机车的高次谐波电流频率,从而抑制谐振,适用于高速铁路系统的高次谐波谐振抑制方案。

参考文献:

- [1] 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.
CUI Hengbin,FENG Xiaoyun,SONG Wensheng. Modeling of high-order harmonic load for high speed train[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(7):92-99.
- [2] 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.
- [3] 解绍锋,李群湛,赵丽平. 电气化铁道牵引负载谐波分布特征与概率模型研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(16):79-83.
XIE Shaofeng,LI Qunzhan,ZHAO Liping. Study on harmonic

distribution characteristic and probability model of traction load of electrified railway[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(16):79-83.

- [4] 赵闻蕾,孔莉,王娟娟,等. 基于MATLAB和小波变换的电力机车谐波电流分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):103-106.
ZHAO Wenlei,KONG Li,WANG Juanjuan,et al. Harmonic analysis based on MATLAB and wavelet transform for electrical locomotive[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(1):103-106.
- [5] 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.
- [6] 李群湛. 谐波影响分析与算法研究[J]. 铁道学报,1991(S1):59-69.
LI Qunzhan. On the calculation and effect of harmonics [J]. Journal of the China Railway Society,1991(S1):59-69.
- [7] LEE Hanmin,LEE Changmu,JANG Gilsoo. Harmonic analysis of the Korean high-speed railway using the eight-port representation model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(2):979-986.
- [8] 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.
- [9] 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 Wilsun,ZHANG Dahai. A modal analysis method for harmonic resonance assessment[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(22):89-93.
- [10] 徐志强,李冰,周田华,等. 基于模态分析的运动负荷牵引电网谐波谐振分析[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(19):76-80,121.
XU Zhiqiang,LI Bing,ZHOU Tianhua,et al. Harmonic resonance assessment of traction system with moving load based on modal analysis [J]. Power System Protection and Control,2010,38(19):76-80,121.
- [11] 冯金博. 高速铁路车网匹配研究[D]. 成都:西南交通大学,2011.
FENG Jinbo. Study of matching locomotive with traction network for high-speed railway[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2011.
- [12] 张扬,刘志刚. 基于电磁暂态分析的高速铁路牵引网谐波模型及谐波特性分析[J]. 电网技术,2011,35(5):70-75.
ZHANG Yang,LIU Zhigang. Modeling and characteristic analysis of harmonic in high-speed railway traction network based on PSCAD/EMTDC platform[J]. Power System Technology,2011,35(5):70-75.
- [13] 吴命利,黄足平,杨少兵,等. 牵引网高次谐波谐振及暂态过电压抑制装置:中国,200710120620[P]. 2008-03-19.
- [14] 李子哈,赵元哲,周福林,等. 高速电气化铁路新型阻波高通滤波器的研究[J]. 电气化铁道,2014(1):13-17.
LI Zihan,ZHAO Yuanzhe,ZHOU Fulin,et al. Study on wave-trap high-pass filter in high-speed electrified railway[J]. Electric

Railway, 2014(1):13-17.

- [15] 李娟,薛永端,徐丙垠,等. 单相均匀传输线暂态模型参数计算[J]. 电网技术, 2013, 37(4):437-441.

LI Juan, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. A method to calculate parameters of transient model for single-phase uniform transmission line[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 437-441.

- [16] 韩旭东,王斌,高仕斌,等. 基于车网耦合的高速铁路 AT 供电系统谐振特性[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4):582-589.

HAN Xudong, WANG Bin, GAO Shibin, et al. Harmonic resonance of AT power supply system of high speed railway based on train-network coupling[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(4):582-589.

作者简介:



赵元哲

赵元哲(1987—),男,山东聊城人,博士研究生,从事牵引供电系统电能质量、谐波谐振与抑制技术、车网耦合等方面的研究(E-mail: yuanyhezhaoy@gmail.com);

李群湛(1957—),男,河北元氏人,教授,博士研究生导师,从事牵引供电系统电能质量、同相供电等方面的研究;

周福林(1982—),男,四川广安人,讲师,博士,从事电能质量分析与控制、牵引供电系统分析方面的教学与研究工作。

Resonance suppression based on wave-trap high-pass filter for high-speed railway

ZHAO Yuanzhe, LI Qunzhan, ZHOU Fulin

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

Abstract: The high-frequency harmonic currents generated by the AC-DC-AC locomotives of high-speed railway system may induce the traction network resonance and harmonic current enlargement, seriously affecting its safe and reliable operation. The resonance occurrence mechanism is analyzed and a kind of wave-trap HPF(High-Pass Filter) is proposed to filter the high-frequency harmonic currents and suppress the resonance for high-speed railway system. It consists of a capacitor, a reactor and a resistor, in which, the capacitor and the reactor are connected to each other in parallel, and then to the resistor in series. It functions as an open circuit to hold back the power-frequency current while as a low impedance to allow the high-frequency current to easily pass. The simulative and experimental results show that, the proposed wave-trap functions as a high impedance, while with low impedance at high-frequency, it can filter the high-frequency harmonic currents and suppress traction network resonance.

Key words: electrical railway; electric traction; traction power system; harmonic analysis; harmonic suppression; wave-trap high-pass filter; resonance suppression; electric filters

(上接第 138 页 continued from page 138)

Power grid security risk assessment considering comprehensive element importance index

LIU Peiqing, LI Huaqiang, ZHAO Yang, ZENG Ke

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: From the systematologic point of view, a method of power grid security risk assessment based on the integrated element importance index is proposed, which comprehensively considers the structural, conditional and social attributes of element. An integrated element importance model based on the structural importance factor model and status sensitivity factor model of element is built, which overcomes the shortage of traditional risk assessment method in characterizing the importance of different elements. A model considering the structure and condition of power grid is built to characterize the proportionality of power flow distribution and the severity of load loss, and to improve the risk assessment index system of power grid security. Simulative results show that, compared with the traditional methods, the proposed method ranks the power grid $N-1$ contingency risk more reasonably and recognizes the $N-k$ contingency series grading risk more precisely.

Key words: complex network; structural importance factor; state sensitivity factor; risk assessment; $N-k$ contingency; security; failure analysis