

DOI: 10.7667/PSPC161150

基于阻抗分压原理的牵引网谐波谐振研究

王娟, 刘明光

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 为了研究牵引网谐波谐振特性, 建立了基于戴维南谐波电压源模型的牵引供电系统车网互联谐波电路模型, 采用阻抗分压原理分析了牵引网谐振过电压的产生机理。利用 Matlab/Simulink 仿真软件研究了牵引网谐波谐振特性及谐振过电压现象。仿真结果表明: 当机车变流器交流侧电压谐波含量较大的频率与牵引网谐振点频率重合时, 将导致车顶网压谐波含量较大而造成牵引网谐振过电压的出现, 通过改变机车变流器斩波频率或供电臂长度可以抑制牵引网谐振过电压。

关键词: 谐波谐振; 牵引网; 斩波频率; 谐波含量; 过电压

Study on harmonic resonance of traction network based on the principle of impedance voltage divider

WANG Juan, LIU Mingguang

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to research the harmonic resonance characteristics of the traction network, an equivalent harmonic circuit model of train-catenary integrated system is established based on the Thevenin harmonic voltage source model, and the mechanism of the traction network resonance over-voltage is analyzed based on the principle of the impedance voltage divider. The simulation study of the harmonic resonance characteristics of the traction network and the phenomenon of the traction network resonance over-voltage is made based on Matlab/Simulink. The simulation results show that the content of the roof grid voltage harmonics is very large when the frequency of greater content of the locomotive converter AC side voltage harmonic coincides with the frequency of the traction network resonance point, which cause the traction network resonance over-voltage, and the traction network resonance over-voltage can be suppressed by changing the carrier frequency of the locomotive converter and the length of the power arm.

This work is supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2015JBM085).

Key words: harmonic resonance; traction network; carrier frequency; harmonic content; over-voltage

0 引言

目前交直交型机车(包含动车组)在我国得到了广泛应用。交直交型机车采用晶闸管相控整流技术及脉宽调制(PWM)技术, 虽然有效减少了低次谐波的含量, 但是高次谐波含量增大且谐波频谱变宽, 在 10 kHz 附近都存在可测谐波^[1], 使得牵引网谐振过电压问题更加严重。例如: 沈阳铁路局管辖内的多处变电所曾因谐振过电压造成电容器熔丝熔断、接触网上玻璃钢绝缘子发生炸裂等事故^[2]; 京沪高速铁路的联调联试试验中也因谐振过电压造成车载

避雷器爆裂^[3]。

目前, 针对牵引网谐波谐振问题, 国内外学者已经展开了一系列的研究。文献[3-5]利用模态分析法从牵引网阻抗幅值的角度来评估牵引网发生谐振的谐波次数及位置。文献[6-7]基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建了电力机车—牵引网—电网仿真模型, 研究了牵引网谐波传输特性。文献[8]提出通过判断谐波电压的增益来辨识牵引网的谐振频率及谐振的危害度。文献[9]从牵引网与牵引负荷匹配角度研究了牵引网谐波谐振问题及对供电电能的影响。总的来说, 上述文献都未对影响谐波电压大小的因素进行探讨, 采用的诺顿谐波电流源模型忽略了牵引网阻抗对谐波电流的影响, 同时研究的谐波频谱范围太小, 研究结果不全面。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2015JBM085)

本文通过对交直交型机车的谐波特性和牵引网阻频特性的分析搭建了基于戴维南谐波电压源模型的牵引供电系统车网互联谐波电路模型，并基于阻抗分压原理分析了牵引网谐振过电压产生的原因；然后基于 Matlab/Simulink 仿真平台搭建了牵引供电系统车网互联仿真模型，并在此仿真模型上仿真了机车变流器交流侧谐波电压及牵引网阻频特性，并从谐波含量的角度仿真分析了影响谐波电压大小的因素；最后针对仿真结果提出了抑制谐振过电压措施。本文研究有助于弄清牵引网谐振过电压是如何产生这一复杂问题，并对实际治理谐振过电压有极大的参考价值。

1 牵引网谐振过电压产生机理分析

1.1 交直交型机车谐波特性及等效模型

交直交型机车采用四象限 PWM 变流器。CRH1、CRH3 和 CRH5 型动车组均采用两电平四象限变流器，且 PWM 算法中开关切换会引起变流器交流侧电压中含有高次谐波。

两电平四象限变流器交流侧的电压表达式如式(1)所示^[10]。

$$u = MU_d \cos(\omega_m t + \beta) + \sum_{m=2,4,\dots} \sum_{n=\pm 1, \pm 3, \dots} \frac{4U_d}{m\pi} J_n\left(\frac{mM\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{m}{2}\pi\right) \cdot \sin\left(\frac{n}{2}\pi\right) \cos(n\omega_m t + m\omega_c t + n\beta + m\alpha) \quad (1)$$

式中： M 为调制波幅值； U_d 为变流器直流侧电压峰值； ω_m 为调制波角频率； β 为调制波初相角； ω_c 为斩波角频率； α 为斩波初相角； J_n 为 n 阶贝塞尔函数。

由式(1)可知：变流器交流侧电压不仅包含基波成分，还包含谐波成分，且谐波电压频率主要分布在 $m f_c + n f_m$ 附近 ($m=2, 4, \dots$ ； $n=\pm 1, \pm 3, \dots$ ； f_c 为斩波频率； f_m 为调制波频率)，即偶数倍斩波频率附近。

变流器交流侧谐波电压主要与机车的调制方式及参数有关，与牵引网参数关系不大^[3]，故可将交直交型机车等效为戴维南谐波电压源，如图 1 所示。

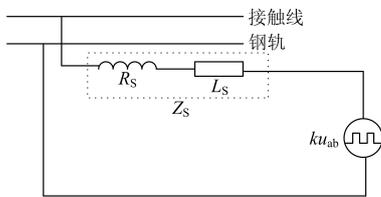


图 1 交直交型机车等效谐波电压源

Fig. 1 Equivalent harmonic voltage source of AC-DC-AC trains

图 1 中： L_s 、 R_s 分别为机车车载变压器原边等效电感和电阻，共同构成机车阻抗 Z_s ； u_{ab} 为机车变流器交流侧谐波电压； k 为机车车载变压器变比。

1.2 牵引网阻频特性及等效模型

牵引网电路是一个由电阻、电感及电容构成的复杂串并联电路，在进行理论分析时普遍采用如图 2 所示的等效电路模型。

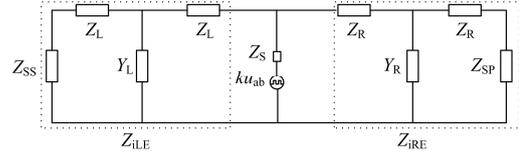


图 2 牵引网等效谐波电路模型

Fig. 2 Equivalent harmonic circuit model of a traction network

图 2 中： Z_{ss} 为电网到牵引变电所线路及牵引变压器等效到牵引网侧的阻抗； Z_{sp} 为分区所阻抗； Z_{ile} 、 Z_{ire} 分别为左、右侧牵引网阻抗； Z_L 、 Z_R 与 Y_L 、 Y_R 分别为左、右侧牵引网等效阻抗与导纳； Z_s 为机车阻抗； $k u_{ab}$ 为机车谐波电压。

从机车端看去，牵引网阻抗为^[8]

$$Z_i = Z_{ile} // Z_{ire} = \frac{Z_c (Z_{ss} \text{ch}\gamma l_1 + Z_c \text{sh}\gamma l_1) (Z_{sp} \text{ch}\gamma l_2 + Z_c \text{sh}\gamma l_2)}{(Z_{ss} Z_{sp} + Z_c^2) \text{sh}\gamma l + (Z_{ss} Z_c + Z_{sp} Z_c) \text{ch}\gamma l} \quad (2)$$

式中： l_1 为牵引变电所到机车的距离； l_2 为机车到分区所的距离； Z_c 为线路特征阻抗； γ 为线路传播系数。

牵引网发生并联谐振的条件为 $\text{Im}[Y_i(j\omega_0)] = 0$ ，即式(2)的分母为 0。

$$(Z_{ss} Z_{sp} + Z_c^2) \text{sh}\gamma l + (Z_{ss} Z_c + Z_{sp} Z_c) \text{ch}\gamma l = 0 \quad (3)$$

高频条件下，牵引网中的电阻值可忽略不计。

求解式(3)可得牵引网发生并联谐振时的频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_{ss} + L_{sp}}{l C L_{ss} L_{sp}} + \frac{L}{C L_{ss} L_{sp}}} \quad (4)$$

式中： l 为供电臂的长度； L_{ss} 、 L_{sp} 分别为对应 Z_{ss} 、 Z_{sp} 的电感值； L 、 C 分别为对应 Z 、 Y 的电感、电容值 (Z 、 Y 分别为单位牵引网传输线等效阻抗和导纳)。

由式(2)和式(4)可知：牵引网的阻频特性仅与牵引网自身的结构参数及供电臂长度有关，与机车无关；发生并联谐振时牵引网的阻抗幅值呈极大值。

1.3 谐振过电压产生机理

根据上述分析，可用阻抗分析法来研究谐振过电压的产生机理。牵引供电系统车网互联谐波电路模型可简化为图 3。

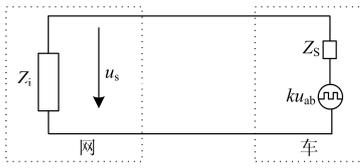


图3 牵引供电系统车网互联谐波电路模型

Fig. 3 Equivalent harmonic circuit model of train-catenary integrated system

根据阻抗分压原理, 车顶网压中的谐波成分为

$$u_s = \frac{Z_i}{Z_s + Z_i} k u_{ab} \quad (5)$$

由式(5)知, 影响车顶网压谐波大小的因素有两个: 一是机车变流器交流侧谐波电压大小; 二是牵引网谐波阻抗大小。即当机车变流器交流侧谐波电压含量较高且牵引网谐波阻抗远大于机车谐波阻抗时车顶网压谐波含量较高。

由上述分析知车顶网压中含有谐波成分, 当含量较高的谐波电压叠加到基波电压上将造成电压幅值升高, 严重时将导致过电压的出现。

2 牵引网谐振过电压仿真分析

2.1 仿真模型及参数

以国内某全并联 AT 供电方式下的牵引供电系统为例进行仿真分析, 其某一供电臂模型如图4所示。其中: 外部电源电压等级为 220 kV; 牵引变压器采用 V/x 接线方式; 牵引网采用复线 AT 全并联供电方式; 机车为交直交型; 仿真软件为 Matlab/Simulink。各单元模块的具体搭建方法参考文献[11-14]。

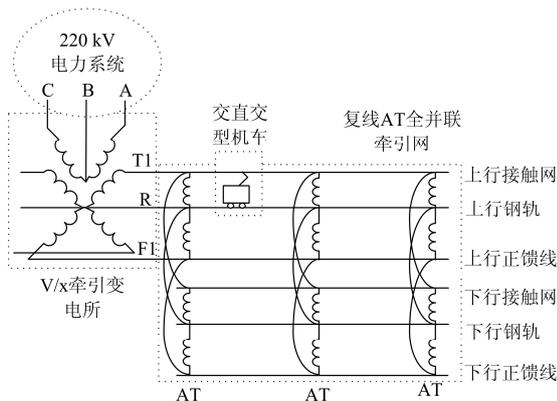


图4 某供电臂模型

Fig. 4 Model of a power arm

各单元模块参数设置为: 外部电源短路容量为 5 GVA, 额定电压为 220 kV; 牵引变压器额定容量

为 31.5+31.5 MVA, 变比为 220 kV/27.5 kV, 阻抗电压为 15.27%; 自耦变压器额定容量为 6300 kV, 变比为 55 kV/27.5 kV, 漏阻抗为 0.043 75+j3.14 Ω; 机车变压器变比为 25 kV /1770 V, 直流环节电压为 3600 V, 负载阻抗为 7.4 Ω; 接触线型号为 CTM120, 承力索型号为 LGJ150, 正馈线型号为 LBJLJ240/30, 保护线型号为 LBJLJ120/35, 钢轨型号为 P50, 轨距为 1510 mm。

2.2 机车变流器交流侧电压谐波特性仿真结果

除变流器斩波频率外, 仿真设置机车的其他仿真条件都相同, 机车供电电源为理想电压源, 当机车变流器斩波频率分别为 450 Hz 和 775 Hz 时机车变流器交流侧电压谐波频谱如图5所示。

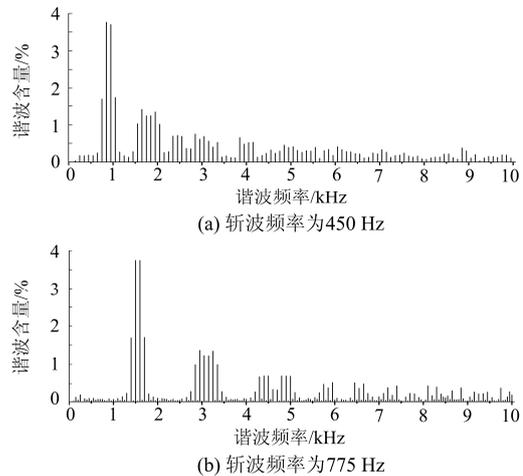


图5 机车变流器交流侧电压谐波频谱

Fig. 5 Harmonic spectrum of the AC side voltage of the locomotive converter

由图5可以看出: 1) 机车变流器交流侧电压谐波在偶数倍斩波频率附近含量较高, 且随着倍数的增加谐波含量逐渐减小; 2) 机车变流器交流侧电压谐波含量较高的值主要分布在 2、4 倍斩波频率附近。如斩波频率为 450 Hz 时, 机车变流器交流侧电压谐波在 750~1050 Hz、1550~2050 Hz 范围内含量超过 1%; 斩波频率为 775 Hz 时, 机车变流器交流侧电压谐波在 1400~1700 Hz、2850~3350 Hz 范围内含量超过 1%。

2.3 牵引网阻频特性仿真结果

仿真设置供电臂长度为 30 km, 牵引网不同位置处的谐波阻抗幅值如图6所示。由图6可以看出: 牵引网不同位置处谐振点相同, 但同一谐振点不同位置处牵引网阻抗幅值不同。此供电臂牵引网谐振点处的频率为 1600 Hz、5250 Hz、5600 Hz、8450 Hz。

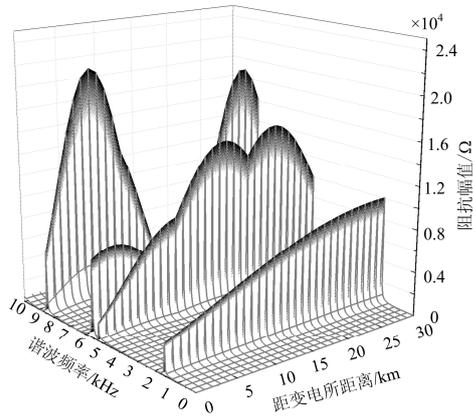


图 6 牵引网谐波阻抗幅值

Fig. 6 Impedance magnitude of the traction network

2.4 机车变流器交流侧谐波电压的影响

仿真设置供电臂长 30 km，机车位于距变电所 30 km 处，只改变机车变流器斩波频率其他仿真条件不变时，车顶网压中的谐波频谱如图 7 所示。其中设置的斩波频率分别为 450 Hz 和 775 Hz。

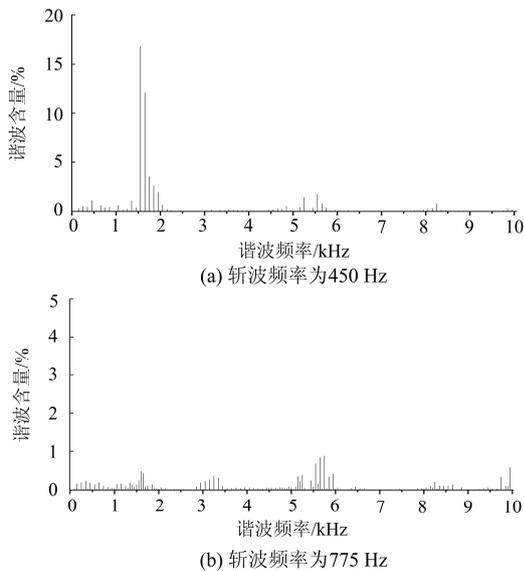


图 7 车顶网压谐波频谱

Fig. 7 Harmonic spectrum of roof grid voltage

由图 7 可以看出：1) 在两种斩波频率下车顶网压谐波都在 1500~1800 Hz、5100~6000 Hz、8200~8500 Hz 范围内含量较明显，根据 2.3 节知牵引网谐振点在这些频率范围内，说明车顶网压谐波在谐振点处含量较大；2) 斩波频率为 450 Hz 时，车顶网压谐波在 1550~1650 Hz 频率范围内含量最大，超过了 10%；斩波频率为 775 Hz 时，车顶网压谐波在所有谐振点处的含量都较小，未超过 1%。根据 2.2 节知斩波频率为 450 Hz 时，在频率为 1600 Hz

的谐振点附近机车变流器交流侧电压谐波含量较高，斩波频率为 775 Hz 时，在谐振点附近的机车变流器交流侧电压谐波含量都较小，说明当机车变流器交流侧电压谐波含量较大的频率与牵引网谐振点频率重合时此频率处的车顶网压谐波含量较大。

机车变流器斩波频率分别为 450 Hz 和 775 Hz 时车顶网压波形如图 8 所示。

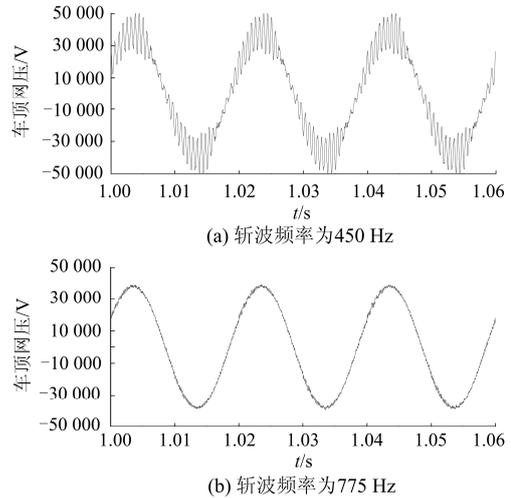


图 8 车顶网压波形

Fig. 8 Waveform of roof grid voltage

由图 8 可以看出：斩波频率为 450 Hz 时车顶网压峰值为 50.3 kV，是牵引网最高允许电压峰值 (41 kV) 的 1.23 倍，波形中谐波含量较大；斩波频率为 775 Hz 时车顶网压峰值为 39.8 kV，在牵引网允许电压范围内，波形中谐波含量较小。

根据上述分析可知：当车顶网压谐波含量较大时将导致牵引网谐振过电压的产生。当机车变流器交流侧电压谐波含量较大的频率与牵引网谐振点频率重合时将导致车顶网压谐波含量较大。

2.5 牵引网阻抗幅值的影响

由 2.4 节知机车变流器斩波频率为 450 Hz 时车顶网压谐波在频率为 1600 Hz 的谐振点附近含量最大。由 2.3 节知在牵引网不同位置处此频率都为牵引网谐振点。仿真设置机车分别位于距变电所 0 km、10 km、20 km、30 km 处时在此谐振点牵引网阻抗幅值、车顶网压谐波含量及车顶网压峰值的变化如表 1 所示。

由表 1 可以看出：1) 机车在牵引网不同位置处由于牵引网阻抗幅值不同，分压到牵引网阻抗上的谐波电压也不同，导致车顶网压幅值在牵引网不同位置处幅值不同；2) 牵引网阻抗幅值由 2898 Ω 提高到 10 099 Ω，增加了 3.48 倍，车顶网压谐波含量由

表 1 牵引网阻抗幅值的影响
Table 1 Influence of the impedance magnitude of the traction network

机车位置/km	阻抗值/ Ω	谐波含量/%	网压峰值/kV
0	2898	5.11	44.2
10	6170	10.39	47.1
20	8986	15.11	50.0
30	10 099	16.82	50.3

5.11%提高到 16.82%，增加了 3.29 倍，说明车顶网压谐波含量随牵引网阻抗幅值增大而增大；3) 车顶网压谐波含量越大，车顶网压幅值越高，说明减小车顶网压谐波可以抑制牵引网谐振过电压。

3 牵引网谐振过电压抑制措施

根据上文分析，防止过电压产生的关键点是使车顶网压谐波含量尽可能小。而车顶网压谐波含量受谐振点处牵引网阻抗幅值与机车变流器交流侧谐波电压含量影响，减小谐振点处牵引网阻抗幅值不容易实现，减小谐振点处机车变流器交流侧谐波电压含量较易实现，故可从以下两方面来抑制过电压。

1) 改变牵引网谐振点

通过改变牵引网谐振点，使机车变流器交流侧电压谐波含量较大的频率与牵引网谐振点频率不重合，可以减小车顶网压谐波含量。根据 1.2 节的分析知牵引网谐振点与供电臂长度及牵引网自身结构参数有关，故可采取改变外部电源短路容量、牵引变压器接线方式^[9]、供电臂长度等方式来改变牵引网谐振点。

当供电臂长度分别为 30 km 和 50 km 时，牵引网阻抗特性如图 9 所示。

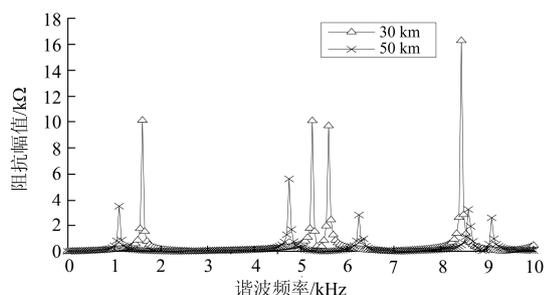


图 9 牵引网阻抗特性

Fig. 9 Resistance frequency characteristics of the traction network

由图 9 可以看出：供电臂长度不同时牵引网谐振点也不同，供电臂长 30 km 时谐振点频率为 1600 Hz、5250 Hz、5600 Hz、8450 Hz，供电臂长 50 km 时谐振点频率为 1100 Hz、4750 Hz、6250 Hz、

8600 Hz、9100 Hz。当机车变流器斩波频率为 450 Hz 时，由 2.2 节知机车变流器交流侧电压谐波在 750~1050 Hz、1550~2050 Hz 频率范围内含量较大，则在长 50 km 的供电臂牵引网谐振点频率处的机车变流器交流侧电压谐波含量都较小。仿真结果显示：供电臂长 30 km 时，车顶网压最大谐波含量为 16.8%，车顶网压峰值为 50.3 kV，供电臂长 50 km 时，车顶网压最大谐波含量为 2.1%，车顶网压峰值为 40.5 kV，说明增长供电臂有效抑制了牵引网谐振过电压。

2) 改变机车变流器交流侧谐波电压

改变机车变流器斩波频率可减小谐振点处机车变流器交流侧谐波电压含量。从 2.4 节可以看出：当机车变流器斩波频率为 450 Hz 时产生了过电压，斩波频率为 775 Hz 时没有过电压，故可通过改变机车变流器斩波频率使机车变流器交流侧电压谐波含量较大的频率与牵引网谐振点频率不重合，从而抑制牵引网谐振过电压。

4 结论

通过数学分析与建模仿真可以得到以下结论：

1) 当车顶网压谐波含量较大时将导致牵引网谐振过电压的出现，而车顶网压谐波大小受谐振点处牵引网阻抗幅值与机车变流器交流侧谐波电压大小影响。当机车变流器交流侧电压谐波含量较大的频率与牵引网谐振点频率重合时将导致车顶网压谐波含量较大。

2) 改变机车变流器斩波频率或改变供电臂长度可以使机车变流器交流侧电压谐波含量较大的频率与牵引网谐振点频率不重合，从而抑制牵引网谐振过电压。

参考文献

- [1] 张杨, 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. Modelling 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.
- [2] 李宗全, 刘明光, 屈志坚, 等. 交直交机车谐波特性及其诱发过电压的治理[J]. 铁道学报, 2015, 37(10): 26-34.
LI Zonglei, LIU Mingguang, QU Zhijian, et al. Harmonics characteristic of AC-DC-AC locomotive and the disposal of resonance overvoltage[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(10): 26-34.

- [3] 崔恒斌, 冯晓云, 林轩, 等. 车网耦合下高速铁路牵引网谐波谐振特性研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 54-64.
CUI Hengbin, FENG Xiaoyun, LIN Xuan, et al. Research on harmonic resonance characteristic of high-speed railway traction net considering coupling of trains and traction nets[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 54-64.
- [4] 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.
XU Zhiqiang, LI Bing, ZHOU Tianhua, et al. Harmonic resonance assessment of traction system with moving load based on model analysis[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 76-80.
- [5] 张民, 何正友, 高仕斌. 不同负荷模型下高速铁路牵引供电系统谐波谐振敏感度分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 21-28.
ZHANG Min, HE Zhengyou, GAO Shibin. Harmonic resonance modal sensitivity analysis for high-speed railway traction supply system considering different harmonic load models[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 21-28.
- [6] 李宏强, 王晓茹, 徐家俊. 车网耦合的牵引供电系统谐波仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 116-122.
LI Hongqiang, WANG Xiaoru, XU Jiajun. Harmonic simulation analysis of traction power supply system based on train-network coupling system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 116-122.
- [7] LEE H M, LEE C, JANG G, et al. 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] 崔恒斌, 冯晓云, 林轩, 等. 牵引网与交直交列车耦合系统谐波谐振特性仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2736-2745.
CUI Hengbin, FENG Xiaoyun, LIN Xuan, et al. Simulation study of the harmonic resonance characteristics of the coupling system with a traction network and AC-DC-AC trains[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2736-2745.
- [9] 韩旭东, 高仕斌, 王斌. 牵引供电方案设计中谐波谐振问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 142-147.
HAN Xudong, GAO Shibin, WANG Bin. Research on the harmonic resonance in the design of traction power supply scheme[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 142-147.
- [10] 于坤山, 周胜军, 王同勋, 等. 电气化铁路供电与电能质量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 58-66.
- [11] 付莉, 张桂南, 高仕斌. 高速铁路车网耦合系统网压振荡模态分析与对策[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 24-32.
FU Li, ZHANG Guinan, GAO Shibin. Model analysis and countermeasures on voltage low frequency oscillation of high-speed railway traction network and EMU coupling system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 24-32.
- [12] 杨其林. 牵引供电系统与高速列车牵引传动系统耦合振荡研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012: 7-42.
YANG Qilin. The coupled oscillation between catenary system and the traction drive system in high-speed train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012: 7-42.
- [13] 王旭光, 李群湛, 陈民武, 等. 高速铁路全并联 AT 牵引网状态测控方案与仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 128-133.
WANG Xuguang, LI Qunzhan, CHEN Minwu, et al. A scheme of state measure and control of all-parallel AT traction network for high-speed railway and simulation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 128-133.
- [14] 冯晓云. 电力牵引交流传动及其控制系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 268-273.

收稿日期: 2016-07-27; 修回日期: 2016-10-10

作者简介:

王娟(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电能质量; E-mail: 15121476@bjtu.edu.cn

刘明光(1959—), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为高铁供电系统、高电压技术、电气设备在线监测等。

(编辑 周金梅)