

弱供电网下的牵引网侧谐波抑制及测试研究

曾凡飞，杨其林，孔宴伟，尚付磊，林显琦

(中车青岛四方车辆研究所有限公司，山东 青岛 266000)

摘要：以马来西亚吉隆坡机场快铁为应用背景，分析弱牵引网供电下的牵引网侧谐波抑制措施和网侧谐波测试分析方法。通过优化动车组网侧四象限整流器的开关器件选型、提高开关频率和优化电流环控制策略等手段提升动车组网侧性能，以匹配弱供电能力的牵引供电网。在牵引变电所采集不同列车运用工况下的网侧电压和网侧电流数据，利用 MATLAB 的 M 语言进行网侧数据的离线计算和谐波分析。测试对比原西门子车和自主化新车在同一供电网下的网侧谐波，数据表明新车加入后的网侧电压和网侧电流总谐波畸变率（THD）均小于原车工况。研究内容对弱供电网下的牵引网侧谐波抑制和网侧谐波测试研究具有指导意义。

关键词：弱供电网；四象限整流器；谐波抑制；谐波测试

Research on harmonic suppression and test of traction network with weak power supply

ZENG Fanfei, YANG Qilin, KONG Yanwei, SHANG Fulei, LIN Xianqi

(CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co.,Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: Taking Kuala Lumpur airport express railway in Malaysia as the application background, the network harmonic suppression and harmonic test methods under weak traction network power supply is analyzed. In order to match the weak traction network, improve the performance of the EMU by optimizing the switching device selection of the four quadrant rectifier, increasing the switching frequency, optimizing the current loop control strategy and other means. The network voltage and current data under different train operation conditions are collected in the traction substation, and the off-line calculation and harmonic analysis of the data are carried out by using the M language of MATLAB. Test and compare the network side harmonics of the original Siemens car and the autonomous new car under the same power supply network. The data shows that after the new car is added the total harmonic distortion rate (THD) of network voltage and current is less than that of the original car. This research has guiding significance for the research of traction network harmonic suppression and harmonic test under weak power supply network.

Key words: weak traction network; four quadrant rectifier; harmonic suppression; harmonic test

0 引言

随着我国高速铁路和动车组技术的不断发展，动车组与牵引供电网的匹配问题也引起了越来越多的关注。动车组与牵引供电网不匹配可

能导致牵引供电网电压波形畸变，影响正常的铁路牵引供电，严重情况下会导致车网发生耦合振荡。车网耦合振荡在车辆侧可能造成车载避雷器烧毁、列车高压系统封锁，在牵引供电侧可能导

致牵引变电所保护动作, 牵引网供电中断。

动车组需要与不同特性的牵引供电网匹配运行, 对弱供电网下的牵引网侧谐波抑制及测试评估尤为重要。运用仿真和测试的方法可以研究牵引供电网络的自身稳定特性, 同时可以为车网不匹配问题提供解决思路。文献[1]通过阻抗比判据和Bode图分析了牵引网电压的低频振荡现象, 并提出了通过优化控制参数来抑制车网低频振荡的方法。动车组网侧四象限整流器的拓扑设计和控制技术与网侧谐波水平密切相关。文献[2]建立了脉冲整流器主电路及网侧电流谐波的数学模型, 并通过仿真手段研究了高速动车组注入电网电流的谐波特性。文献[3]建立了车网系统模型, 对牵引网压的高频和低频振荡现象进行了分析, 并提出一种基于滑膜和无源控制的混合控制方法。文献[4]为提升网侧整流器的性能提出了双频单相整流器方案, 并分析说明了其拓扑结构和工作原理。文献[5-7]对四象限整流器的电流内环控制策略进行了研究与分析, 提出并验证了各自内环控制器的有效性。以上研究未涉及针对弱供电网工况的系统软硬件综合设计和谐波对比测试分析。

本文以吉隆坡机场快铁市域动车组自主化替代项目为例, 针对牵引网供电能力较弱的情况优化动车组网侧四象限整流器的软硬件设计, 并通过在牵引变电所对网侧电压电流谐波进行采集分析来验证自主化动车组与牵引供电网的匹配性。

1 动车组与牵引供电网的匹配

1.1 线路牵引供电介绍

单相25 kV牵引供电制式主要包括直接供电方式(T-R)、带负馈线的直接供电方式(T-R-NF)、吸流变压器供电方式(BT)和自耦变压器供电方式(AT)等。吉隆坡机场快铁供电全长约58 km, 采用T-R-NF供电方式, 变电所由两台变压器冗余供电, 单台变压器额定功率为30 MV·A。T-R-NF供电方式下的传输线路分布图如图1所示。其上下行传输线路由加强线、承力索、接触线、负馈线和钢轨组成。

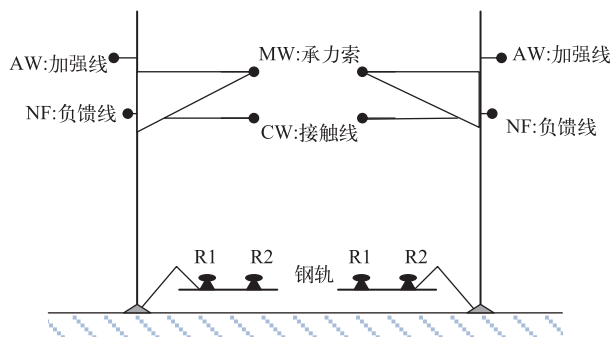


图1 T-R-NF 供电方式下的传输线路图

Fig. 1 Distribution of transmission lines in T-R-NF pattern

国内新建的客运专线多采用AT供电方式, 其自耦变压器提高了牵引网供电电压, 使供电臂的长度得以增加, 增强了牵引网的供电能力。相对而言, 吉隆坡机场快铁的供电制式老旧, 供电系统容量较小, 供电能力弱。

1.2 动车组四象限整流器工作原理

牵引传动系统中的四象限整流器负责动车组与牵引供电网的能量传递和转换, 其工作性能与牵引供电网侧谐波和稳定性密切相关。本文所述四象限整流器均采用单相两电平脉冲整流器拓扑, 其主电路结构如图2所示。图2中, L_s 为交流侧电感(即牵引变压器二次绕组漏电感); C_{dc} 为直流侧支撑电容; $S_1 \sim S_4$ 为组成桥臂的开关器件; u_s 为电源电压(即牵引变压器二次绕组电压); i_s 为整流器交流电流; u_r 为整流桥交流电压; u_{dc} 和 i_{dc} 分别为直流输出电压和直流输出电流; i_o 为负载电流。

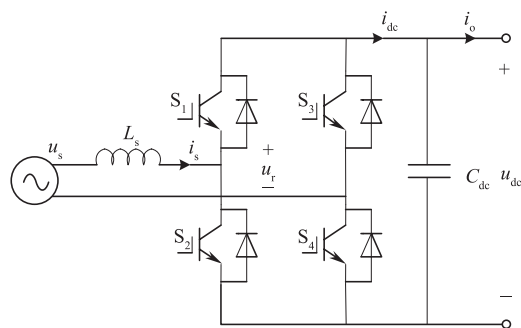


图2 单相两电平脉冲整流器主电路结构图

Fig. 2 Main circuit structure of single-phase two_level PWM rectifier

四象限整流控制通常采用电压外环控制加电

流内环控制的双闭环控制策略。电压环控制采用比例积分 (PI) 控制器, 电流环控制可采用瞬态电流控制、DQ解耦控制或比例谐振 (PR) 控制等。四象限整流器的基本控制原理如图3所示。

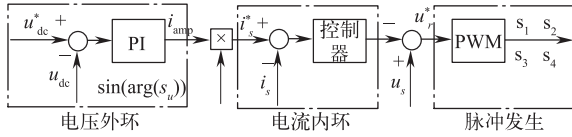


图3 四象限整流器基本控制原理

Fig. 3 Basic control principle of four quadrant rectifier

电压外环对直流母线电压 u_{dc} 进行闭环控制, 将其与目标值 u_{dc}^* 的误差进行PI控制器调节, 得到交流电流目标幅值 i_{amp} 。对交流电源电压 u_s 锁相得到其相位信号 $\sin(\arg(u_s))$ 。上述电流目标幅值和相位信号相乘得到交流电流的目标值 i_s^* , 作为电流内环的目标。

2 牵引网侧谐波抑制措施

为了更好地匹配牵引供电网, 使自主化新车加入运营后对牵引供电网的谐波注入影响不高于原西门子车运营工况, 主要从四象限整流器的硬件性能设计和控制软件设计两方面进行优化。

2.1 关键硬件性能设计提升

线路原车为西门子的ET425M型电力动车组, 其四象限整流器采用门极可关断晶闸管 (GTO) 作为上述组成桥臂的开关器件。自主化新车选用3 300 V/1 500 A等级的绝缘栅双极性晶体管 (IGBT) 替代GTO, 降低了开关器件的损耗, 在相同的变流器散热条件下可以提高四象限整流器的开关频率, 由原350 Hz提升至500 Hz。根据两电平四象限整流器的脉冲调制原理, 通过双边傅里叶级数法计算得到整流桥交流电压 u_r 的表达式为

$$u_r(t) = Mu_{dc} \cos(\omega_m t + \beta) + \sum_{m=2,4,\dots} \sum_{n=\pm 1, \pm 3, \dots} \left\{ \frac{4u_{dc}}{m\pi} J_n\left(\frac{mM\pi}{2}\right) \cos\frac{m\pi}{2} \sin\frac{n\pi}{2} \times \cos(n\omega_m t + m\omega_c t + n\beta + m\alpha) \right\} \quad (1)$$

式中, M 为调制度; ω_m 、 ω_c 分别为调制波和载波的角频率; J_n 为 n 阶贝塞尔函数; β 、 α 分别为调

制波和载波的相位。

由式 (1) 可知, 四象限整流器引入网侧的谐波主要频次在 $(n\omega_m + m\omega_c)$ 次, 其中 $n = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$; $m = 2, 4, 6, \dots$ 。可见, 网侧谐波主要分布在载波频率的偶数倍附近, 且随着开关频率升高, 开关的纹波变小, 提高四象限整流器的开关器件频率可有效抑制牵引网侧谐波。

2.2 四象限整流器控制软件设计

对于四象限整流器的软件控制策略, 电流环控制器实现对交流电流的快速稳定跟踪, 是软件控制优劣的关键。由于电流指令值 i^* 是以电网电压频率变化的交流量, PI调节器无法实现对交流量的无静差跟踪, 因此引入准比例-谐振 (准PR) 调节器作为电流环的控制器。准PR控制器传递函数为

$$G_{\text{准PR}}(s) = K_P + K_R \times \frac{2\omega_j s}{s^2 + 2\omega_j s + \omega_0^2} \quad (2)$$

式中, K_P 为比例系数; K_R 为谐振系数; ω_j 为带宽参数; ω_0 为谐振频率, 将其设置为电网电压频率 $\omega_0 = 2\pi \times 50 \text{ rad/s}$ 。

准PR控制器不仅能实现对交流电流指令的无静差跟踪, 还可以提高四象限整流器的控制稳定性, 避免发生车网耦合振荡。采用准PR控制器的四象限整流器控制策略流程如图4所示。

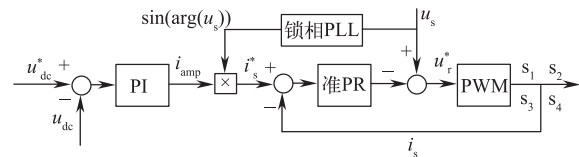


图4 准比例谐振控制流程图

Fig. 4 Flow chart of quasi proportional resonance control

3 牵引网侧谐波测试对比分析

3.1 仿真分析

利用MATLAB/Simulink搭建自主化新车四象限整流器的仿真模型。四象限整流器由两路单相两电平脉冲整流器组成, 两路直流输出侧并联。设定 u_s 有效值为AC 950 V, $L_s = 1.83 \text{ mH}$, $C_{dc} = 20.0 \text{ mF}$, 额定功率为1 360 kW, $S_1 \sim S_4$ 选

用IGBT模块, 开关频率为 $f_s=500$ Hz。

直流侧输出电压目标值 u_{dc}^* 设定为1 800 V, 分别在空载和带额定功率阻性负载情况下进行仿真, 试验波形如图5所示。 i_{s1} 、 i_{s2} 分别表示两路整流器的交流电流, u_{r1} 为一路整流桥的交流电压。

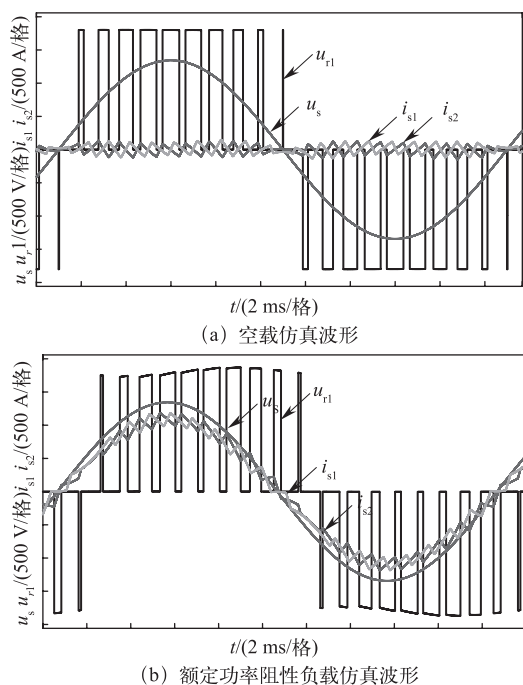


图5 仿真波形

Fig. 5 Simulation waveform

3.2 试验对比测试

在牵引变电所测试采集原车运营和新车加入运营两种工况的牵引网侧电压和电流数据。采用电压探头Tek P5200A和电流探头Tek TCP0030A分别测量网侧电压互感器TV和电流互感器TA进入数据采集与监视控制(SCADA)系统的二次侧绕组信号, 使用示波器记录相关数据。测试现场和探头布置如图6所示。

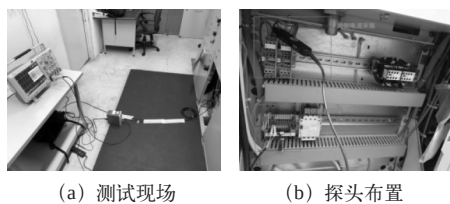
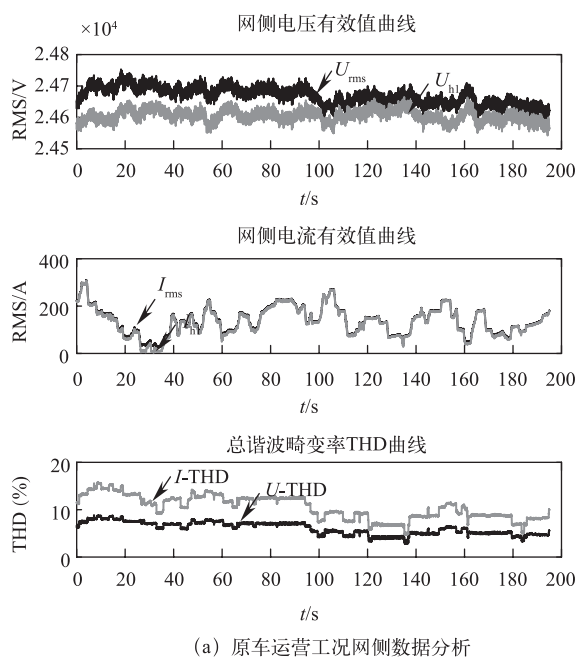
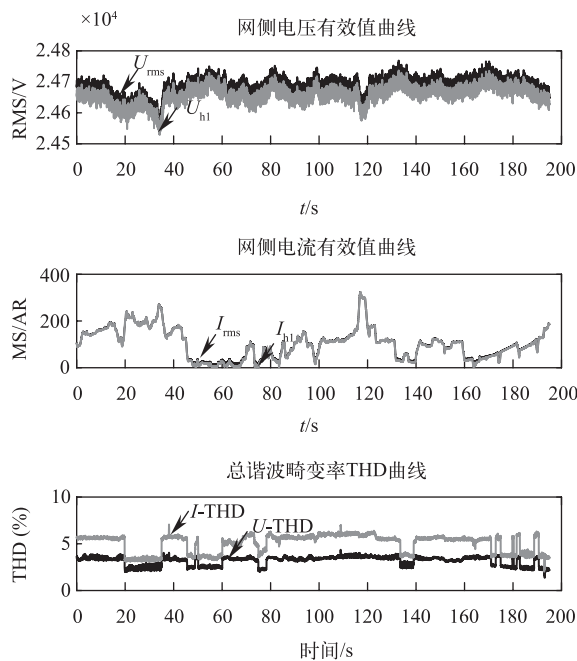
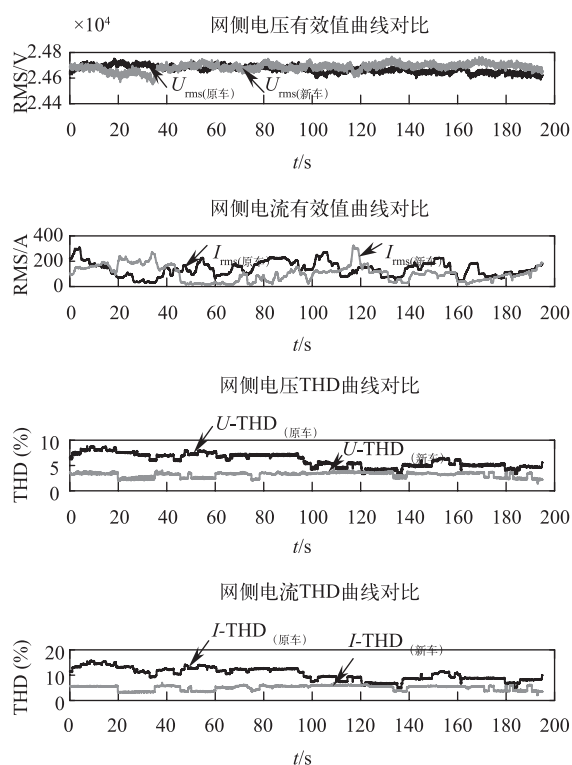


图6 变电所测试图

Fig. 6 Substation test diagram

设置示波器采样率为100 k次/s, 单次存储200 s的网侧数据。利用MATLAB的M语言对数据进行FFT分析和谐波计算。分别在原车运营和新车加入运营两种工况的对应时间段, 计算出网侧电压有效值 U_{rms} 、网侧电压基波有效值 U_{h1} 、网侧电流有效值 I_{rms} 、网侧电流基波有效值 I_{h1} 、网侧电压总谐波畸变率 U -THD和网侧电流总谐波畸变率 I -THD, 对比如图7所示。



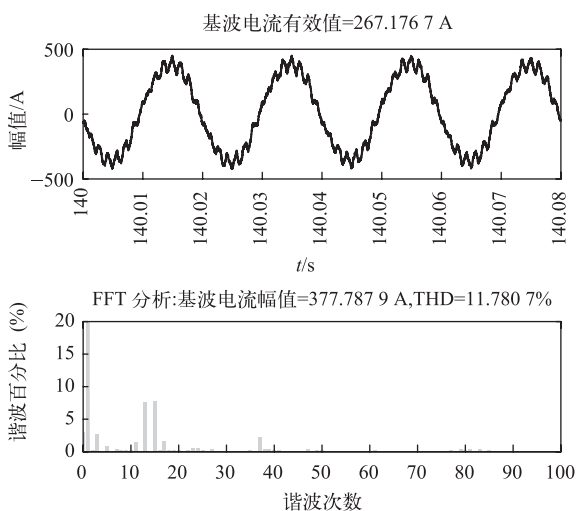


(c) 两种运营工况网侧数据对比分析

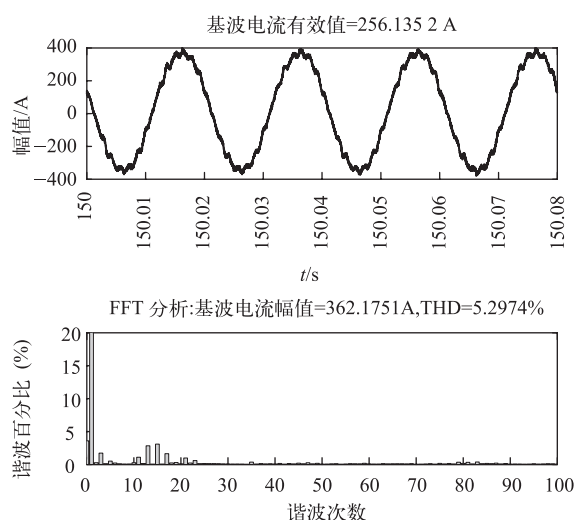
图7 不同工况网侧实测数据分析

Fig. 7 Analysis of measured network data under different working conditions

由图7可见, 线路网侧供电电压有效值在24.8 kV左右, 新车加入运营工况的网侧电压和网侧电流的THD曲线均明显在原车运营工况以下。对两种运营工况下对应时间点的牵引网侧电流数据进行FFT对比分析, 结果如图8所示。



(a) 原车运营工况网侧电流FFT分析



(b) 新车加入运营工况网侧电流FFT分析

图8 两种运营工况网侧电流FFT分析

Fig. 8 FFT analysis of network current under different working conditions

由以上对比可知, 网侧电流谐波频次主要集中在11、13、15和17次, 对应时间点原车运营工况网侧电流THD为11.78%, 新车加入运营工况的THD为5.29%, 谐波电流注入水平明显降低。

取两个典型时间点的网侧数据进行分析, 比较原车和新车加入运营工况下 U_{rms} 、 $U\text{-THD}$ 、 I_{rms} 和 $I\text{-THD}$ 的最小值(min)、平均值(avg)和最大值(max)。相关结果汇总见下表。

表 典型时间网侧数据对比统计

Tab. 1 Comparison and statistics of typical time network data

项点名称		时间 1		时间 2	
		原车	新车	原车	新车
U_{rms}/kV	min	24.27	24.34	24.58	24.55
	avg	24.37	24.41	24.66	24.68
	max	24.45	24.48	24.75	24.76
$U\text{-THD}(\%)$	min	2.44	1.12	2.74	1.36
	avg	5.54	3.13	6.06	3.19
	max	8.84	4.73	8.87	4.36
I_{rms}/A	min	30.88	11.29	28.85	13.97
	avg	129.98	113.62	139.21	103.79
	max	277.33	265.76	309.98	323.19
$I\text{-THD}(\%)$	min	4.26	2.15	4.61	2.02
	avg	9.41	5.46	10.48	5.07
	max	13.95	8.57	15.75	7.06

由以上数据可知,在两个典型时间点原车工况的 U -THD平均值分别为5.54%和6.06%,新车加入工况的 U -THD平均值分别为3.13%和3.19%。在两个典型时间点原车工况的 I -THD平均值分别为9.41%和10.48%,新车加入工况的 I -THD平均值分别为5.46%和5.07%。新车加入运营后牵引网侧电压和电流THD的水平总体低于原车运营工况。

4 结束语

本文对弱供电网下的牵引网侧谐波抑制措施和网侧谐波测试对比方法进行研究。以马来西亚吉隆坡机场快铁自主化新车设计为例,介绍了线路牵引供电情况和动车组四象限整流器的工作原理。通过优化四象限整流器的开关器件、提高开关频率和采用准PR控制器的电流内环控制策略等手段提升动车组网侧性能。通过MATLAB/Simulink仿真和试验测试验证新车的网侧匹配性能,在牵引变电所测试网侧数据并采用M语言对数据进行FFT离线计算和谐波分析。数据表明该线路网侧电流谐波频次主要集中在11、13、15和17次,自主化新车加入运营后网侧电压典型THD值由5.80%左右降低为3.16%,网侧电流典型THD值由9.94%左右降低为5.26%,新车具有良好的车网匹配性。研究内容对弱供电网下的牵引网侧谐波抑制和网侧谐波测试具有借鉴意义。

参考文献

[1] 高永军,王力,张瑞峰.交直传动方式下的车网低频振荡研究[J].机车电传动,2021(1):121-125.

- [2] 周诗林,彭飞,伊建辉,等.高速动车组网侧电流谐波特性分析[J].铁道机车与动车,2021(增刊2):6-10,15.
- [3] 陈思彤.基于车载变流器控制的车-网系统牵引网压振荡抑制研究[D].兰州:兰州交通大学,2021.
- [4] 杜凯.弱电网下双频单相整流器控制方法研究[D].北京:北方工业大学,2021.
- [5] 孙远飞,沈培富.牵引四象限变流器的预测电流控制[J].电气自动化,2020,42(2):105-109.
- [6] 张馨予,张钢,钱江林,等.具有低次谐波抑制能力的PIR控制器设计[J].电工技术学报,2016,31(增刊2):19-27.
- [7] 高吉磊,张雅静,林飞,等.单相PWM整流器谐波电流抑制算法研究[J].中国电机工程学报,2010,30(21):32-39.
- [8] 刘建强,郑琼林,杨其林.高速列车牵引传动系统与牵引网谐振机理[J].电工技术学报,2013,28(4):221-227.
- [9] 李宗奎,刘明光,屈志坚,等.交直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.
- [10] 黄友聪,周凯,牟秋谷,等.高频谐波导致谐振过电压的分析与抑制[J].电力电子技术,2013,47(2):95-97.

作者简介

曾凡飞(1987—),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力电子与电力传动、牵引系统设计。
(收稿日期:2022-02-22)