

# 城市轨道交通直流牵引供电系统接入 对电网电能质量影响的分析

魏铭池<sup>1</sup>, 魏巍<sup>2</sup>, 刘畅<sup>2</sup>, 徐琳<sup>2</sup>

(1.西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2.国网四川省  
电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:**文中首先建立了城市轨道交通直流牵引供电系统接入电网的仿真模型;然后,阐述了电能质量评估指标,提出了结合城轨机车工况、数量组合两个维度的仿真场景设置方案;最后,以成都市轨道交通为例,仿真分析了接入点的电压偏差、谐波电压和谐波电流。

**关键词:**城市轨道交通;牵引供电系统;电网;电能质量

中图分类号:TM 711 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)02-0061-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220212

## Analysis on Integration Effect of DC Traction Power Supply System for Urban Rail Transit on Grid Power Quality

WEI Mingchi<sup>1</sup>, WEI Wei<sup>2</sup>, LIU Chang<sup>2</sup>, XU Lin<sup>2</sup>

(1. School of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;  
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** The simulation model of DC traction power supply system for urban rail transit connected to power grid is established. And then the evaluation index of power quality is expounded, and a simulation scenario setting scheme is proposed based on two dimensions of urban rail locomotive working condition and quantity combination. At last, taking Chengdu rail transit for example, the voltage deviation, harmonic voltage and harmonic current of access point are simulated and analyzed.

**Key words:** urban rail transit; traction power supply system; power grid; power quality

## 0 引言

近年来,随着城市轨道交通的飞速发展,城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量的影响越来越引人关注<sup>[1-4]</sup>。城市轨道交通负荷具有冲击性和非线性,其接入电网后将会对电网的电能质量造成严重的负面影响<sup>[5-7]</sup>。因此,对城市轨道交通直流牵引供电系统接入电网引起的电能质量问题展开全面分析和详细建模评估有助于将技术监督关口前移,及时发现相应风险,从而维护电网的安全稳定运行。

国内学者已逐步开展对城市轨道交通直流牵引供电系统接入电网引起的电能质量问题的研究工作。目前,国内对城市轨道交通直流牵引供电系统

接入电网的研究大多集中于24脉波整流机组<sup>[8-10]</sup>与城轨机车负荷特性<sup>[11-12]</sup>,并评估牵引供电系统带单辆城轨机车时对电网电能质量的影响<sup>[13-14]</sup>。

在实际生活中,城轨机车有不同工况、不同数量组合的可能性,但是大部分文献<sup>[11-14]</sup>仅研究了牵引供电系统带单辆城轨机车时对电网电能质量的影响,没有进行全面分析。

对此,基于Matlab/Simulink平台,首先,建立了城市轨道交通直流牵引供电系统接入电网的仿真模型,主要包括24脉波整流机组、牵引网、中压电缆、城轨机车;然后,提出结合城轨机车工况、数量组合两个维度的仿真场景设置方案;最后,以成都市轨道交通为例,仿真分析了接入点的电压偏差、谐波电压和谐波电流。

# 1 城市轨道交通直流牵引供电系统接入电网仿真模型搭建

城市轨道交通直流牵引供电系统由 110 kV 电网接入,经主变电所降压为 35 kV 电压等级后,向牵引变电所输送电能。牵引变电所再次降压,然后整流为 1500 V 直流电传输至接触网,为城轨机车供电,最后经钢轨回流。主变电所向牵引变电所供电的接线形式为双边集中供电形式,通过牵引变电所的输电线路都经过中压母线(35 kV)连接,增加了供电可靠性。图 1 为城市轨道交通直流牵引供电系统示意图。

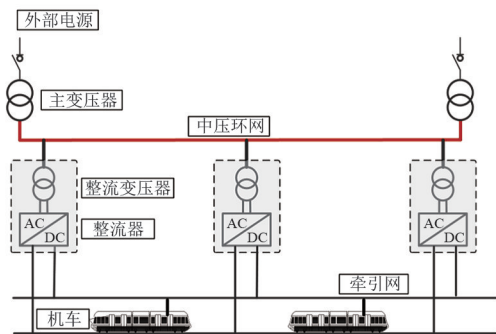


图 1 城市轨道交通直流牵引供电系统

基于 Matlab/Simulink 平台建立了城市轨道交通直流牵引供电系统接入电网的仿真模型,下面介绍此模型中最主要的 4 个部分:24 脉波整流机组、牵引网、中压电缆、城轨机车。

## 1.1 24 脉波整流机组

当前中国城市轨道交通直流牵引供电系统大多采用 24 脉波整流机组<sup>[8-10]</sup>。

图 2 为 24 脉波整流机组主电路原理图。24 脉波整流机组由 2 台等容量的 12 脉波整流机组构成。每台 12 脉波整流机组 DC 侧绕组依次为 Y 和  $\Delta$  接法,从而形成相位差为  $30^\circ$  的线电压;AC 侧是延边三角形接线,依次移相  $\pm 7.5^\circ$ ,以此构成的 2 台等容量

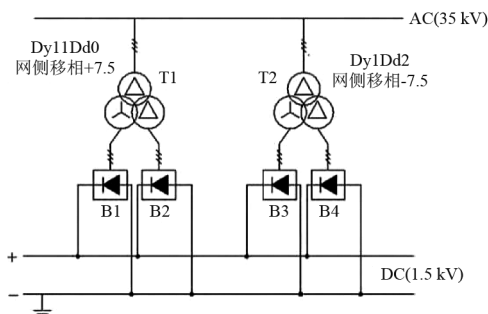


图 2 24 脉波整流机组主电路原理

变压器的 4 套 DC 侧绕组的线电压相位互差  $15^\circ$ ,依次全波整流之后,并联运行于 DC 侧,最终输出 24 脉动直流电。

由图 2 搭建的 24 脉波整流机组仿真模型如图 3 所示。

利用 2 台移相变压器依次移相  $\pm 7.5^\circ$  之后分别接入 2 台三相三绕组变压器,接线方式为 D11-Y/D11-D11,每台变压器连接 2 个 6 脉波桥式整流器,从而并联形成 12 脉波整流机组,2 台 12 脉波整流机组并联形成 24 脉波整流机组。

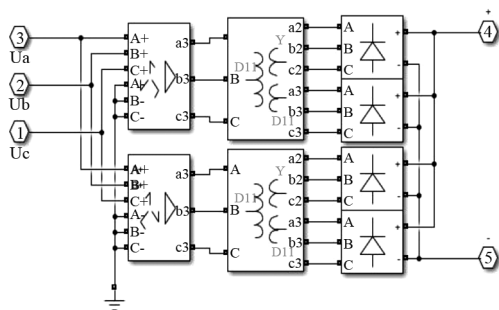


图 3 24 脉波整流机组仿真模型

## 1.2 牵引网

牵引网是城市轨道交通直流牵引供电系统向城轨机车输送电能的直接环节,它由馈电线、接触网、钢轨以及回流线组成<sup>[14-15]</sup>。

牵引网等值电路如图 4 所示,牵引网仿真模型如图 5 所示,牵引网参数如表 1 所示。

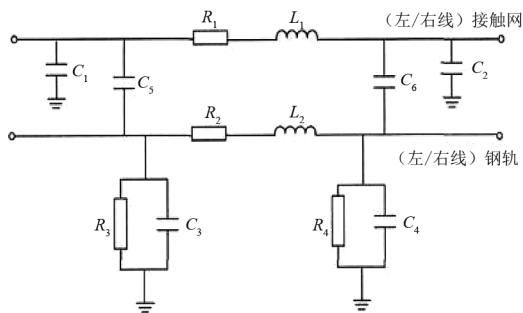


图 4 牵引网等值电路

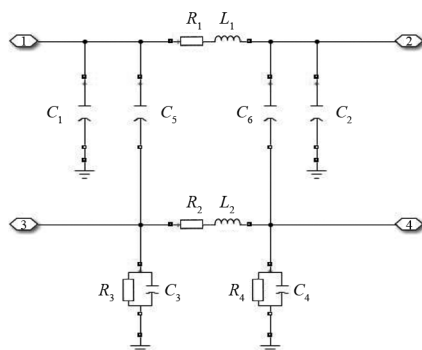


图 5 牵引网仿真模型

表 1 牵引网参数

类型	参数
接触网电阻 $R_1/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.02
钢轨并联电阻 $R_2/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.019
钢轨并联过渡电阻 $R_3, R_4/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	3.00
接触网电感 $L_1/(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	1.07
钢轨并联电感 $L_2/(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	0.65
接触网对地电容 $C_1, C_2/(\text{nF} \cdot \text{km}^{-1})$	6.02
钢轨对地电容 $C_3, C_4/(\text{nF} \cdot \text{km}^{-1})$	26.5
接触网对钢轨电容 $C_1, C_2/(\text{nF} \cdot \text{km}^{-1})$	7.07

1.3 中压电缆

城市轨道交通直流牵引供电系统中压网络电缆线路(35 kV)等值电路如图 6 所示。

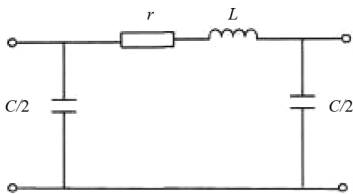


图 6 中压电缆等值电路

由于中压电缆表面有屏蔽层,相间电容可忽略,因此直接组合 3 个“PI Section Line”模块对三相中压电缆建模,如图 7 所示。中压电缆参数取值如表 2 所示。

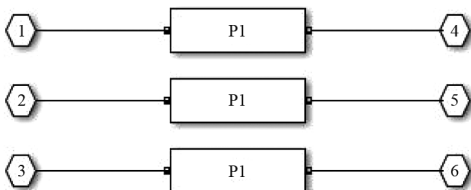


图 7 中压电缆仿真模型

表 2 中压电缆参数

类型	参数
电阻 $r/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.075
电感 $L/(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	0.39
电容 $C/(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	0.18

1.4 城轨机车

城轨机车是城市轨道交通直流牵引供电系统的主要负荷,也是功率的主要消耗源,因此仿真建模时需对城轨机车的功率特性进行充分的体现。

1)当城轨机车运行于启动工况、额定工况、中功率工况、低功率工况时,采用负荷表征城轨机车功率特性,利用 Matlab/Simulink 平台的“Series RLC Load”元件可实现依据实际工况设置城轨机车的功率参数,如图 8 所示。

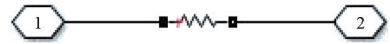


图 8 城轨机车仿真模型(负荷表征功率特性)

2)当城轨机车运行于制动工况时,城轨机车上的牵引电机处于发电机状态,将城轨机车的动能转换成电能反向流至直流牵引网。由于禁止直流牵引网上的电能通过 DC/AC 变换返回交流电网,再生电能除部分被其他处于牵引工况的车辆吸收利用外,还有一部分剩余再生电能会导致网压升高。此时,城轨机车按电流源建立模型,利用 Matlab/Simulink 的“controlled current source”模块建立模型,如图 9 所示。

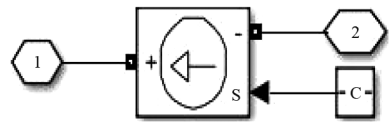


图 9 城轨机车仿真模型(制动工况)

2 电能质量评估指标

城市轨道交通负荷具有非线性和冲击性,其接入会给电网带来电压偏差、谐波等电能质量问题。下面对城市轨道交通直流牵引供电系统接入点处的电压偏差、电压总畸变率、特征次谐波电压含有率、特征次谐波电流含量等电能质量指标进行全面详细的分析评估。

2.1 电压偏差

电力系统中的用电负荷时时刻刻都在发生变化,其有功功率与无功功率一直是动态平衡的状态,电压也在不断变动,实际电压对标准电压偏差的百分比即为电压偏差。电压偏差超出国家标准限值后会恶化电气设备的工作效能,降低使用寿命,甚至损坏<sup>[16]</sup>。因此,对城市轨道交通直流牵引供电系统接入点的电压偏差进行全面详细的分析评估。

GB/T 12325—2008《电能质量 供电电压偏差》规定,35 kV 及以上供电电压正、负偏差绝对值之和不超过标称电压的 10%<sup>[17]</sup>。城市轨道交通直流牵引供电系统接入点的标称电压值为 110 kV,其供电电压正、负偏差绝对值之和不应超过 11 kV。

2.2 谐波

整流机组既是城市轨道交通直流牵引供电系统的重要设备,也是谐波的主要来源。目前,中国城市轨道交通直流牵引供电系统普遍采用的 24 脉波整

流机组会向电网注入  $24k\pm 1$  ( $k=1, 2, 3, \dots$ ) 次谐波, 以 23 次、25 次为主。谐波会导致电压与电流波形发生畸变, 会对电气设备产生负面影响<sup>[18]</sup>。

为了及时发现潜在的谐波超标风险, 需对城市轨道交通直流牵引供电系统接入点的电压总谐波畸变率、特征次谐波电压含有率、特征次谐波电流含量进行全面详细的分析评估。

### 2.2.1 谐波电压

GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》规定: 电网标称电压为 110 kV 时, 电压总谐波畸变率限值为 2.0%, 奇次谐波电压含有率限值为 1.6%, 偶次谐波电压含有率限值为 0.8%<sup>[19]</sup>。

### 2.2.2 谐波电流

GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》规定: 标准电压为 110 kV, 基准短路容量为 750 MVA 时, 23 次谐波电流允许值为 2.1 A, 25 次谐波电流允许值为 1.9 A<sup>[19]</sup>。这里 110 kV 三相电源短路容量取值为 1000 MVA, 由式(1)可求得谐波电流允许值。

$$I_h = \frac{S_{k1}}{S_{k2}} I_{hp} \quad (1)$$

式中:  $I_h$  为短路容量为  $S_{k1}$  时的第  $h$  次谐波电流允许值;  $S_{k1}$  为公共连接点的最小短路容量, MVA;  $S_{k2}$  为基准短路容量, MVA;  $I_{hp}$  为短路容量为基准短路容量时的第  $h$  次谐波电流允许值, A。

由式(1)求得的 23 次谐波电流允许值为 2.8 A, 25 次谐波电流允许值为 2.53 A。

## 3 仿真场景设置

由于目前大部分文献<sup>[11-14]</sup>只对城市轨道交通直流牵引供电系统带单辆城轨机车进行仿真建模,

但在实际生活中, 城轨机车有不同工况、不同数量组合的可能性。因此, 以成都市轨道交通为例, 设置了不同的仿真场景, 较为全面地分析城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网的电能质量影响。

1) 城轨机车工况。典型工况包含以下 5 种: 启动工况、高功率工况、中功率工况、低功率工况和制动工况。城轨机车运行时额定工况定义为高功率工况, 启动工况的功率约为 1.5 倍额定功率, 城轨机车在制动时向系统倒送功率, 倒送功率值约为 0.5 倍额定功率。由于城轨机车的功率越高, 其对电网电能质量影响越大, 因此取启动工况、额定工况、制动工况进行仿真建模分析。

2) 城轨机车数量组合。实际运行时, 存在高峰期城轨机车紧密运行及非高峰期城轨机车松散运行两种情况。非高峰期城轨机车松散运行时, 每个牵引站均带一辆城轨机车, 或是两相邻牵引站间均带一辆城轨机车。高峰期城轨机车紧密运行时, 除每个牵引站均带一辆城轨机车以外, 两相邻牵引站间均带一辆城轨机车。

3) 城轨机车车型。所研究的城轨机车车型为成都市轨道交通 1 号线车辆。由文献[15, 20]可知成都市轨道交通 1 号线车辆采用 B 型车, 4 动 2 拖 (4M2T), 6 辆固定编组, 列车最高速度 80 km/h, 供电电压为 DC 1500 V, 额定功率为 2880 kW, 启动功率为 4320 kW, 制动倒送功率为 1440 kW。

取成都市轨道交通 4 个典型场景进行仿真建模分析, 基于 Matlab/Simulink 搭建的非高峰期城轨机车松散运行仿真模型与高峰期城轨机车紧密运行仿真模型分别如图 10、图 11 所示。

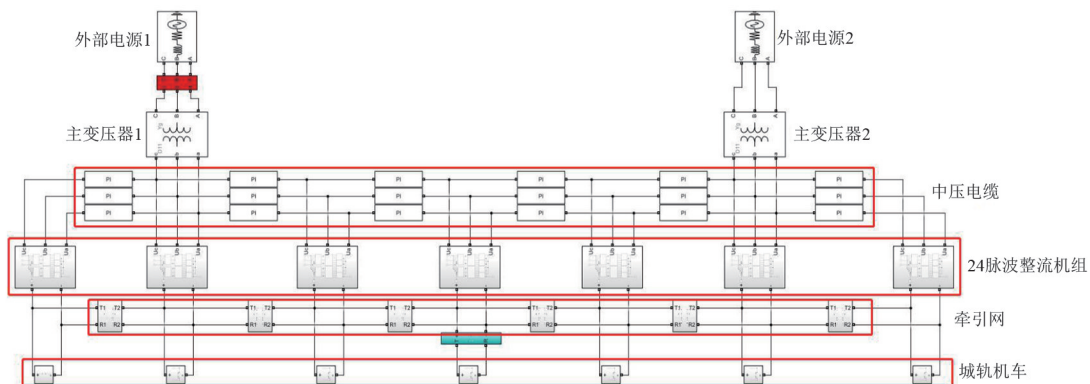


图 10 非高峰期城轨机车松散运行仿真模型



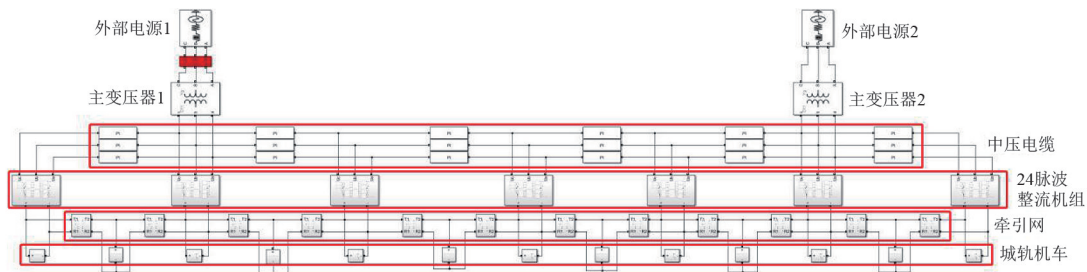


图 11 高峰期城轨机车紧密运行仿真模型

场景 1:非高峰期城轨机车松散运行,每个牵引站均带一辆处于启动工况的城轨机车。

场景 2:非高峰期城轨机车松散运行,两相邻牵引站间均带一辆处于额定工况的城轨机车。

场景 3:高峰期城轨机车紧密运行,每个牵引站均带一辆处于启动工况的城轨机车,且两相邻牵引站间均带一辆处于额定工况的城轨机车。

场景 4:高峰期城轨机车紧密运行,每个牵引站均带一辆处于制动工况的城轨机车,且两相邻牵引站间均带一辆处于额定工况的城轨机车。

总谐波畸变率、23 次谐波电压含有率、25 次谐波电压含有率均未超过国家标准限值,符合国家标准;2) 谐波电压含有率与城轨机车功率成正比,即城轨机车功率越大,谐波电压含有率越高;3) 仿真场景 3 的电压总谐波畸变率为 1.71%,25 次谐波电压含有率为 1.456%,十分逼近国家标准限值,倘若城轨机车功率继续增大、数量继续增加,存在谐波电压超标风险,需要对其进行治理。

表 4 不同仿真场景下接入点电压总谐波畸变率以及 23 次、25 次谐波电压含有率 单位:%

指标	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4	限值
总谐波畸变率	1.43	1.24	1.71	1.17	2.0
23 次谐波电压含有率	0.975 3	0.574 8	0.901 2	0.885 6	1.6
25 次谐波电压含有率	1.051 0	1.103 0	1.456 0	0.925 5	1.6

## 4 实例分析

### 4.1 电压偏差

不同仿真场景下,城市轨道交通直流牵引供电系统接入点电压偏差值如表 3 所示。

表 3 不同仿真场景下接入点电压偏差值

仿真场景	电压偏差/%
场景 1	-0.67
场景 2	-0.35
场景 3	-1.17
场景 4	-0.12

由表 3 可知:1) 当城轨机车处于启动工况、高功率工况时,城轨机车从电网吸收功率,导致接入点电压偏差为负,电压降低,且功率越大电压偏差越大;2) 当城轨机车处于制动工况时,城轨机车向电网倒送功率,导致接入点电压偏差值为正,电压升高;3) 不同仿真场景下接入点电压正负偏差绝对值之和均未超过标称电压的 10%,符合 GB/T 12325—2008《电能质量 供电电压偏差》国家标准。

### 4.2 谐波电压

不同仿真场景下,接入点电压总谐波畸变率以及 23 次、25 次谐波电压含有率如表 4 所示。

由表 4 可知:1) 不同仿真场景下接入点电压

### 4.3 谐波电流

不同仿真场景下,接入点 23 次、25 次谐波电流含量如表 5 所示。

表 5 不同仿真场景下接入点 23 次、25 次谐波电流含量

指标	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4	限值
23 次谐波电流/A	2.211	1.997	2.049	1.310	2.80
25 次谐波电流/A	2.192	1.920	3.045	2.312	2.53

由表 5 可知:1) 仿真场景 3 的 25 次谐波电流含量超出国家标准限值,需要对其采取相应的限制或治理措施;2) 其余仿真场景的 23 次、25 次谐波电流尚未超出国家标准限值,符合国家标准;3) 倘若城轨机车功率继续增大、数量继续增加,存在谐波电流超标的风险,需要对其进行治理。

综上所述:1) 仿真场景 3 对电网风险最高。非高峰期乘客数量较少时,可以通过合理的城轨机车调度来消弭;高峰期乘客数量较多时,无法通过合理的城轨机车调度来消弭,需要采取相应的治理措施。2) 接入点的电压偏差、谐波电流以及谐波电压 3 个指标是城轨机车工况、城轨机车数量组合以及城轨机车

车型 3 个因素共同作用的结果。相对而言,城轨机车数量组合的影响最大,城轨机车工况次之。

## 5 结 论

基于 Matlab/Simulink 平台建立了城市轨道交通直流牵引供电系统接入电网的仿真模型,以成都市轨道交通为例,基于实际情况,考虑城轨机车工况、数量组合,设置了不同的仿真场景,分析评估了城市轨道交通直流牵引供电系统接入对电网电能质量的影响,结论如下:

1) 电压偏差:不同仿真场景下接入点的电压偏差值均在国家标准限值内,仿真场景 3 的电压偏差值最大,为-1.17%。

2) 谐波电压:不同仿真场景下接入点的谐波电压含量均在国家标准限值内,仿真场景 3 的谐波电压含量最高,且十分逼近国家标准限值,存在谐波电压含量超标风险。

3) 谐波电流:仿真场景 3 的 25 次谐波电流含量超出国家标准限值,需要对其采取相应的治理措施,其余仿真场景的谐波电流尚未超出国家标准限值。

### 参考文献

- [1] 文春雷,刘建军,詹宏,等.城市轻轨供电系统对公共电网电能质量的影响研究[J].电力建设,2011,32(8):5-10.
- [2] 胡斌,徐明清,陶骞.城市轨道交通对电网电能质量的影响[J].湖北电力,2012,36(4):4-5.
- [3] 李扬,胡文平,任建文.城市轨道交通牵引供电系统对电网的影响[J].河北电力技术,2013,32(5):36-37.
- [4] 王宇飞,徐琳.地铁牵引供电系统接入对电网电能质量影响分析[J].四川电力技术,2019,42(1):33-36.
- [5] 李建民,孙建设.城市轨道交通供电系统谐波分布研究[J].电测与仪表,2008,45(2):1-6.
- [6] 王俊,余建平.城市轨道交通供电主变电站接线模式分

析及其谐波影响的研究[J].华东电力,2009,37(12):2059-2063.

- [7] 金照盈.城市轨道交通供电系统谐波分析及对配网的影响研究[D].郑州:郑州大学,2014.
- [8] 李良威,李群湛,刘炜.24 脉波整流器外特性仿真及其在城市轨道交通中的应用[J].城市轨道交通研究,2007,10(10):52-55.
- [9] 董海燕,田铭兴,杜斌祥,等.地铁 24 脉波整流机组的仿真及谐波电流分析[J].电源技术,2011,35(5):593-594.
- [10] 全恒立,刘志刚,张钢,等.地铁 24 脉波整流器空载直流侧谐波特性分析[J].铁道学报,2012,34(3):28-33.
- [11] 唐飞龙.地铁车辆电传动系统的主电路仿真[J].电力机车与城轨车辆,2008,31(6):12-14.
- [12] 林文立.地铁动车牵引传动系统分析、建模及优化[D].北京:北京交通大学,2010.
- [13] 杜芳.地铁机车建模及直流牵引供电系统故障分析[D].北京:北京交通大学,2010.
- [14] 魏光耀.地铁牵引供电系统建模与仿真[D].成都:西南交通大学,2017.
- [15] 张俊婷.基于 MATLAB/Simulink 的城市轨道交通直流供电系统建模仿真[D].北京:北京交通大学,2017.
- [16] 林海雪.电能质量国家标准系列讲座 第 1 讲 供电电压偏差标准[J].建筑电气,2011,30(4):3-9.
- [17] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会.电能质量供电电压偏差:GB/T 12325—2008[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [18] 林海雪.电能质量国家标准系列讲座 第 3 讲 公用电网谐波标准[J].建筑电气,2011,30(6):3-8.
- [19] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会.电能质量 公用电网谐波:GB/T 14549—1993[S].北京:中国标准出版社,1994.
- [20] 陈英,陈燕.成都地铁 1 号线车辆电气牵引系统[J].铁道机车车辆,2009,29(5):52-55.

### 作者简介:

魏铭池(1996),男,硕士研究生,研究方向为牵引供电系统理论、电能质量评估。(收稿日期:2021-09-21)

欢迎投稿

欢迎订阅