

# 基于逆变型能量回馈系统的地铁保护 配置方案设计研究

陈国

(中铁第四勘察设计院集团有限公司,湖北 武汉 430063)

**摘要:**随着逆变型能量回馈系统在地铁领域的推广,其反馈的电能对地铁供电网络安全稳定性的影响亟待解决。首先建立了逆变回馈系统的仿真模型,然后介绍了地铁供电系统保护配置方案。根据逆变回馈模型能够抑制直流牵引网电压和电流的抬升以及逆变回馈瞬时最大功率的仿真结果,对既有地铁交直流系统保护配置方案进行改进,从而保障地铁供电网络的安全性与可靠性。

**关键词:**逆变型;能量回馈系统;地铁安全;保护配置方案

**中图分类号:**TM464

**文献标识码:**A

**DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed21892

## Design and Research of Metro Protection Configuration Scheme Based on Inverter Energy Feedback System

CHEN Guo

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China)

**Abstract:** With the popularization of the energy feedback system in the field of metro, the impact of the feedback electric energy on the safety and stability of the subway power supply network needs to be solved urgently. The simulation model of the inverter feedback system was established firstly, and then the protection configuration scheme of the subway power supply system were introduced. According to the simulation results of the inverter feedback model that could suppress the rise of the voltage and current of the DC traction network and the instantaneous maximum power of the inverter feedback, the protection configuration scheme of the existing subway AC and DC system was improved to ensure the safety and reliability of the subway power supply network.

**Key words:** inverter type; energy feedback system; subway safety; protection configuration scheme

随着城市轨道交通建设的迅速发展,地铁运营已然由少数几条线路转向成网运行。随着城市轨道交通需求的不断增大,地铁站间距离不断缩小,行车密度不断增大,地铁车辆需要不断在牵引启动和减速制动工况之间切换,这样的运行特点使得机车既会消耗大量的牵引电能,又会在制动过程中产生大量的制动能量回馈。对于地铁车辆运行在减速制动工况下产生的再生制动能量,如果不能及时被车载制动电阻或同时运行的其他列车吸收时,会对直流母线电压的稳定产生冲击。因此,如何对地铁车辆再生制动能量加以有效利用成为国内外研究的重点。

当前,日本、欧美等地区研究较早,已有再生制动装置成功运用的经验<sup>[1]</sup>。而国内已建设的地

铁线路中,采用的再生制动回馈装置主要有三类:储能设备型、电阻耗能型和逆变回馈型。其中,储能设备型装置主要分为飞轮储能型和电容储能型两种,当地铁车辆处于启动牵引或制动工况时,可利用安装在车站的储能设备型装置对能量进行相应的吸收或释放,从而有效改善牵引网直流电压质量<sup>[2]</sup>,但这两种储能设备型装置目前应用程度较低,尚未有成熟的国内厂家可以生产制造。电阻耗能型装置依靠IGBT与制动电阻共同作用,将制动产生的电能转化为热能<sup>[3]</sup>,它在国内的早期地铁线路中应用较为广泛,但由于电阻耗能型装置在工作过程中会产生大量的热,在造成资源浪费的同时还给隧道内通风排热系统造成负担,并存在装置使用寿命短等隐

患。逆变回馈型装置主要由开关柜、三相变频器柜、隔离变压器组成,一旦牵引网电压超过逆变器控制回路设定阈值,回馈型装置便即刻投入系统,并将直流电网中电流逆变为50 Hz交流电,并反馈到中压交流电网中,从而实现稳定直流母线电压<sup>[4]</sup>。

综上,基于再生制动逆变型能量回馈的方案凭借其具有能量双向流动的优势得到了业内广泛的推崇,该方案可将地铁车辆制动产生的能量进行回收再利用,有效解决了制动能量浪费且减轻了通风空调对隧道内温升排放的负担<sup>[5]</sup>。但是,随着逆变型能量回馈系统并入供电网络,能量的反向输送对既有供电网络产生了新的影响,例如反馈的能量会造成供电网络电压的抬升,从而威胁到供电网络的安全可靠性。逆变型能量回馈系统的广泛应用实际上也对供电系统的保护配置方案提出了新的要求<sup>[6-7]</sup>,所以合理地设计逆变型能量回馈系统的地铁保护配置方案很有必要。

本文首先对典型逆变回馈系统基本原理进行分析,并在此基础上建立了逆变回馈系统的仿真模型,根据牵引网电压的仿真结果改进了既有地铁交直流系统保护配置方案,并且确立了新方案下继电保护的边界,增加了逆变器保护装置,从而保障地铁供电网络的安全与可靠,有效解决了能量的反向输送对既有供电网络的影响。

### 1 逆变回馈系统的基本原理

逆变回馈系统采用能量回馈方式,通过控制大功率逆变器的工作状态,将直流牵引网上的再生制动能量逆变反馈到交流电网中<sup>[8-9]</sup>。该系统包括隔离开关、回馈变流器、隔离变压器等功能部件,其中作为核心功能部件的回馈变流器由电力电子器件IGBT、控制电路与滤波器等构成<sup>[10]</sup>。机车再生制动时可通过逆变回馈系统将多余电能传递给交流侧的电网中,从而确保整个供电系统的稳定运行。

实现再生制动电能回馈至交流供电网络的主要思路是根据直流牵引网电压、电流等状态量的变化,利用回馈装置的控制系统判定列车是否处于制动工况,当车辆制动返送的电能导致直流侧牵引网压超过阈值时,立刻向供电系统中投入再生电能回馈装置,从而将列车再生制动电能转化为系统中压工频交流电供给本站或相邻车站

的用电负荷<sup>[11]</sup>。

典型逆变型能量回馈系统接线图如图1所示。当检测装置监测到DC 1 500 V母线电压大于设定阈值时,将逆变回馈装置投入系统,机车产生的再生电流通过图1中虚线路径回馈至中压交流电网,最终达到母线电压、电流相对稳定和回收能量的目的。

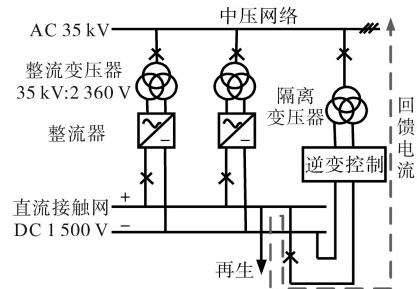


图1 典型逆变型能量回馈系统接线图

Fig.1 Diagram of typical inverse energy feedback system

## 2 牵引及逆变回馈系统建模及仿真分析

### 2.1 逆变回馈系统建模

现有的地铁牵引供电系统中,牵引网电压在地铁列车制动情况下很容易迅速升高,甚至有可能超过牵引网网压允许波动的范围,这给城市轨道交通带来了很大的安全隐患。再生制动能量回馈系统中的核心部分为大功率逆变器,本文采用三相电压型PWM逆变器<sup>[12]</sup>,将地铁机车再生制动时产生的电能经PWM变流器逆变回到交流电网,供其它负载使用。该能量回馈系统不仅能够保持直流牵引网电压的稳定,还能同时解决电能的浪费以及隧道内通风散热等问题。

逆变回馈系统装置的组成模块如图2所示,该系统主要分为主电路和控制电路两部分,其中主电路的主要组成部分为回馈变流器、逆变器驱动模块、LCL滤波器和隔离变压器,控制电路采用SVPWM脉冲生成策略。

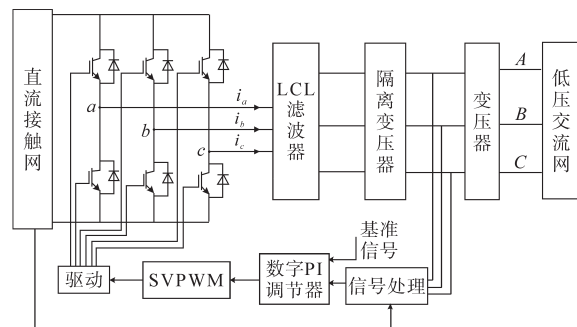


图2 逆变回馈装置示意图

Fig.2 Schematic of inverter feedback device

图3为逆变回馈系统的主电路仿真模型,其中, $U_{dc}$ 为直流侧电压,其主要参数如表1所示。

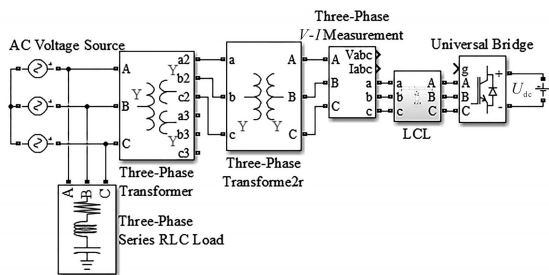


图3 地铁逆变回馈系统主电路模型

Fig.3 Main circuit model of subway inverter feedback system

表1 主要仿真参数

Tab.1 Main simulation parameters

LCL滤波器		隔离变压器	
逆变器侧电感 $L_1$	0.65 mH	容量	1 050 kV·A
隔离变压器侧电感 $L_g$	0.15 mH	变比	1 180 V/35 kV
电容	300 $\mu$ F	漏抗	0.046 $\Omega$
阻尼电阻	1 $\Omega$	漏感	0.146 mH

逆变回馈系统控制电路采用SVPWM矢量控制方法,电压和电流采用双环PI控制方式(电压外环和电流内环),非工作状态下,传感器对直流牵引网电压进行实时检测,当传感器检测到电压超过设定阈值(1 680 V)时,电压信号将触发逆变器工作,对直流牵引网电压进行调节<sup>[13]</sup>。当传感器检测到电压低于阈值后,传感器信号消失,逆变回馈装置停止运行,等待下一次电压信号的来临。逆变回馈系统的控制电路仿真模型如图4所示。

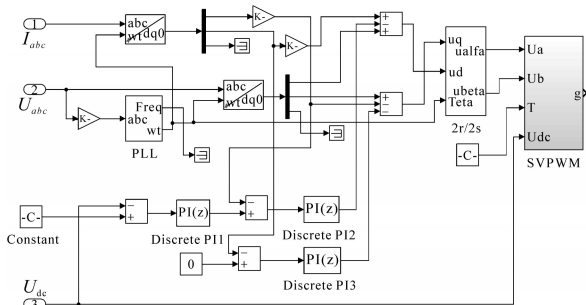


图4 地铁逆变回馈系统控制电路模型

Fig.4 Control circuit model of subway inverter feedback system

## 2.2 牵引供电系统建模

为了简化建模过程,对机车和牵引变电站进行简化处理,将机车用受控源进行替换,将牵引变电站利用24脉波整流模块进行替换<sup>[3]</sup>。由于是直流供电,牵引网和钢轨利用电阻代替。牵引供电系统在Simulink中的等效仿真模型如图5所示。其中 $R_w$ 为接触网等效电阻, $R$ 为钢轨等效电

阻, $R_g$ 为过渡电阻, $R_d$ 为大地等效电阻。

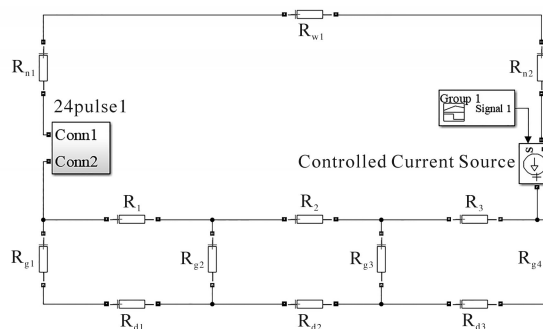


图5 牵引供电系统等效仿真模型

Fig.5 Equivalent simulation model of traction power supply system

## 2.3 仿真分析

为模拟地铁动车组制动时的状态,仿真中做如下假设:1)地铁动车组在制动过程中以恒定加速度减速;2)一个供电区间内只有一辆机车运行。

仿真时设定最大速度为45 km/h,对应转速1 800 r/min。逆变回馈系统投入前后直流牵引网网压波形如图6所示,直流牵引网电流波形如图7所示。其中, $U_{d1}/I_{d1}$ 和 $U_{d2}/I_{d2}$ 分别为逆变回馈装置投入前后直流牵引网的电压/电流波形。

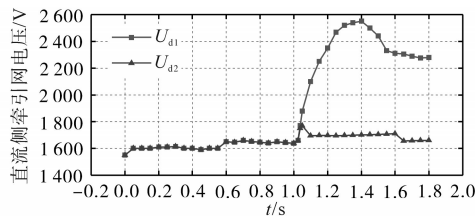


图6 逆变回馈装置工作前后牵引网电压波形对比

Fig.6 Comparison diagram of traction network voltage waveforms before and after operation of inverter feedback device

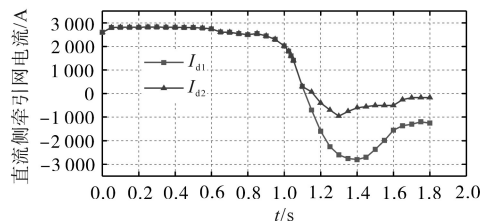


图7 逆变回馈装置工作前后牵引网电流波形对比

Fig.7 Comparison diagram of traction network current waveforms before and after operation of inverter feedback device

由图6可以看出, $t=1.0$  s时,地铁车辆开始进入制动工况,此时电动机转变为发电机状态,为地铁车辆的制动提供制动力矩,并将多余的电能返送至牵引网,这导致牵引网压迅速抬升,其中 $U_{d1}$ 峰值攀升至2 550 V附近,然后逐渐稳定在2 300 V附近。由于仿真中没有接入其他机车负载,此时多余的能量不能消耗或吸收。但在投入

逆变回馈装置后,当牵引网电压  $U_{d2}$  迅速升高并超过 1 680 V 的阈值时,电压传感器检测到直流牵引网电压变化,触发逆变回馈装置进入逆变工作状态,立即将直流侧的能量回馈到高压交流电网中,成功降低网压  $U_{d2}$ ,并可稳定在阈值 1 680 V 附近。与此同时,由图 7 可看出,投入逆变回馈装置后也可有效降低直流侧牵引网的回流电流  $I_{d2}$ ,从而保证直流牵引网的安全及稳定性。

### 3 交直流侧保护配置方案及影响分析

目前国内现有地铁牵引供电系统主要采用直流牵引供电系统,由交流侧和直流侧组成,其中交流侧主要元件为牵引变压器(traction transformer)及整流器(rectifier),直流侧主要包含馈线回路。而现有地铁牵引供电系统的继电保护配置方案存在着“拒动”和“误动”的潜在风险,因此,如何对现有的继电保护配置方案进行改进成为国内外学者的关注重点。本节以地铁直流牵引供电系统为研究对象,对交、直流侧保护配置方案进行分析。

#### 3.1 交流侧保护配置方案及影响分析

根据目前典型的地铁继电保护装置的特点,交流侧牵引网主要选用的保护装置为电流速断保护和过电流保护,其保护装置均不具备判别电流方向的功能,交流侧保护配置方案如图 8 所示。

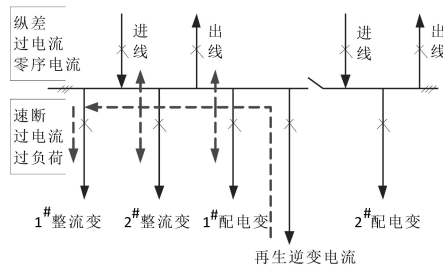


图8 典型交流侧保护配置方案

Fig.8 Typical protection configuration scheme of AC-side

当逆变回馈的能量达到一定的量级,会造成整个地铁中压系统潮流的剧烈变化,严重影响地铁供电交流侧保护装置的可靠运行。根据现场实测数据显示,再生制动回馈的电能具有间歇性强、瞬时功率大的特点,一旦牵引变压器容量达到 4 MV·A,变压器空载合闸产生的励磁涌流难免造成交流侧保护装置误动,影响牵引供电系统的正常供电<sup>[14]</sup>。因此,当逆变回馈装置并入中压系统后,需要对逆变回馈瞬时最大功率、间隔时间等因素综合分析,分析是否存在引发交流系统

保护误动的风险。

#### 3.2 直流侧保护配置方案及影响分析

现有的地铁直流保护配置方案有大电流脱扣保护、电流增量( $\Delta I$ )保护、热力过负荷保护等多种保护方式<sup>[14]</sup>,直流侧保护配置方案如图 9 所示。

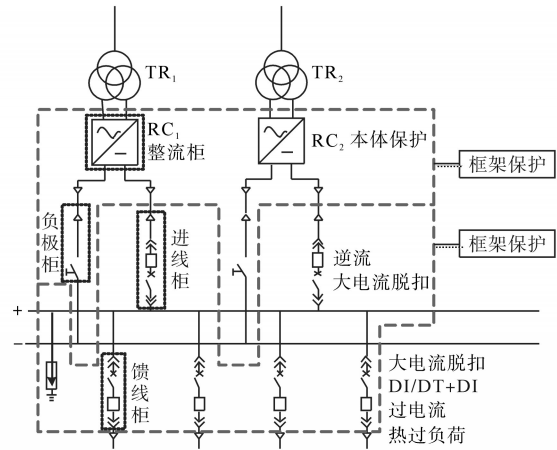


图9 典型直流侧保护配置方案

Fig.9 Typical protection configuration scheme of DC-side

由于逆变回馈装置中主要通过采集直流母线电压的大小来判断车辆是否进入制动工况以及是否启动逆变回馈装置,在直流系统这一侧逆变回路的馈线与其它馈线回路相对独立,且整流器目前并不具备逆变反向输送的功能,因此逆变回馈对直流系统既有保护配置影响不大。考虑到逆变回馈装置的并柜(开关柜并行连接方式)安装策略,故需对直流系统的框架保护重新布置,降低由于逆变装置出现的框架故障导致直流牵引系统退出运行的风险。

由于地铁直流侧保护配置方案的配合状态互不影响,高效的保护配合机制相对匮乏。因此在牵引供电线路末端发生短路故障时,短路电流大小与机车启动电流相近,容易导致地铁继电保护系统拒动;而当牵引供电系统发生振荡时,容易导致地铁继电保护系统误动<sup>[12,15-16]</sup>。

### 4 能量返送下的保护配置方案改进

能量的反向输送对既有供电网络产生了新的影响,对供电系统的保护配置方案提出了新的要求。本节主要对既有地铁交直流系统保护配置方案进行改进。

根据某地铁线路仿真计算的结果,再生逆变回馈能量波形如图 10 所示,车辆制动产生的瞬时最大功率约 4 MW,因此折算到 35 kV 中压侧,每相电流约 64 A。35 kV 交流系统设置的保护参数

为:相CT变比为400:1;相电流整定值为1.25 A<sup>[17]</sup>。因此,车辆制动在每相二次侧产生的电流约为 $64/400=0.16$  A,远小于整定值1.25 A。因此,逆变回馈电流数量级不会对交流侧电流保护发生影响,从而导致保护装置误动。

但直流系统需根据再生逆变装置并柜特点,对既有的框架电流保护范围进行调整。即:

1)1#框架电流元件保护范围为整流器柜与负极柜,电流元件的跳闸范围为交直流侧断路器;

2)2#框架电流元件保护范围为进线柜与馈线柜(包括再生逆变的馈线柜),电流元件跳闸范围为直流侧所有断路器并且联跳交流侧断路器;

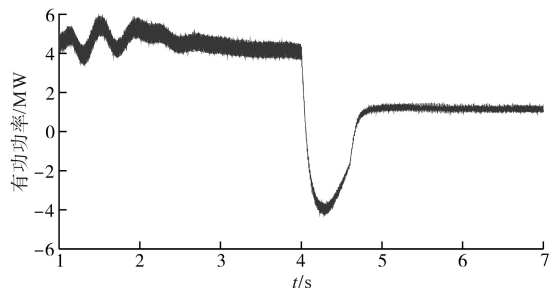


图10 某地铁站再生逆变回馈能量波形

Fig.10 Feedback energy waveform on a subway Station

3)增加3#框架,电流元件保护范围为再生功率柜与控制柜,电流元件跳闸范围为再生装置的交直流侧断路器,如图11所示。

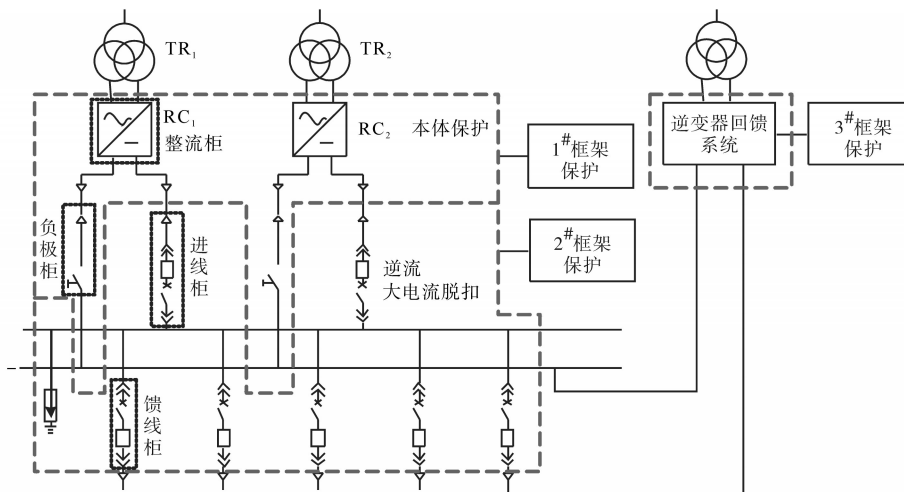


图11 框架电流保护范围划分

Fig.11 Frame current protection range

## 5 结论

本文首先分析了逆变回馈系统的原理及建立了逆变回馈系统的Matlab/Simulink仿真模型,并对既有地铁交直流系统保护配置方案进行改进,重新划分了继电保护范围,增加了逆变器保护装置,提出了一种基于逆变型能量回馈系统的地铁保护配置方案,从而保障地铁供电网络的安全与可靠。本文主要得出了以下结论:

1)逆变回馈装置监测到网压变化能快速地将直流牵引网上的能量逆变到中压环网,电压下降,使其稳定在某个阈值,最终达到母线电压、电流相对稳定和回收能量的目的。

2)逆变回馈系统并入地铁中压系统后对交流侧中压保护配置方案不会产生影响。

3)直流侧保护配置方案应根据逆变回馈系

统的拼柜特点对框架保护的电流元件进行重新划分,降低逆变回馈系统框架故障对直流牵引系统的影响。

### 参考文献

- [1] New York Metropolitan Transportation Council. 2010—2035 NYMTC region transportation plan[R]. New York, 2009: 1-47.
- [2] 冯晶晶,许爱国,谢少军,等.模块化再生制动能量利用系统及其控制策略[J]. 电力电子技术, 2009, 43(12): 25-27.
- [3] 李艳. 轨道交通逆变回馈装置的应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [4] Henning P H, Fuchs H D, Roux A D L, et al. A 1.5 MW seven-cell series-stacked converter as an active power filter and regeneration converter for a DC traction substation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2230-2236.
- [5] 孔玮. 城市轨道交通直流牵引系统故障分析及若干问题的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2005.

(下转第39页)

制,变换器从动态开始到结束只有5 ms,且电压跌落60 V后回升过程中无超调,驱动也由低占空比小增益逐步过渡到低频高增益,中间过程无任何异常,验证了复合控制的有效性和可行性。

## 4 结论

本文提出了一种复合控制策略以实现全桥LLC变换器全负载范围的稳定电压输出。此种控制策略混合了有限双极性PWM控制与PFM控制模式,轻载时采用有限双极性PWM控制模式,可以有效改善LLC谐振变换器的高频增益特性,使得输出纹波大大减小;输出功率较大时采用PFM控制模式,两种控制方式相结合并随着输出功率变化无缝切换,使得变换器在轻载至满载范围内皆能够保持变换器的输出电压稳定性和高性能。搭建了全桥LLC变换器的实验样机,通过样机实验验证了所述方法的有效性与分析的正确性。

### 参考文献

- [1] 李浩昱,李振伟,赵雷,等. 宽输入LLC谐振变换器多电平控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 48-57.
  - [2] 雷志方,汪飞,高艳霞,等. 面向直流微网的双向DC-DC变换器研究现状和应用分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(22): 137-147.
  - [3] 石林,刘邦银,段善旭. 一种基于Burst-PWM混合控制的
- ~~~~~
- [6] F Du, J Yu, M X Li, *et al.* Modeling and simulation of metro DC traction system with different motor driven trains[C]//AP-PEEC2010, Chengdu, 2010.
  - [7] 龚孟荣. 地铁供电系统设计及仿真研究[D]. 成都:西南交通大学, 2013.
  - [8] 叶兰兰,邹凯,宋立. 城市轨道交通超级电容储能装置控制策略[J]. 都市快轨交通, 2017, 30(5): 118-122.
  - [9] 饶沛南. 大功率交流传动机车牵引逆变器的研究与开发[D]. 成都:西南交通大学, 2011.
  - [10] 韩啸,高强,寇佳宝,等. 负载换流逆变器驱动同步电机能量回馈的研究[J]. 电气传动, 2018, 48(1): 13-18.
  - [11] 叶飞. 基于地铁列车制动能量回馈装置的能量管理系统[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(3): 46-50.
  - [12] 钟春波,田联房,王孝洪,等. 基于PWM整流器的电梯能量

LLC谐振变换器宽电压范围输出策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(22): 4772-4780.

- [4] Beiranvand R, Rashidian B, Zolghadri M R, *et al.* A design procedure for optimizing the LLC resonant converter as a wide output range voltage source[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(8): 3749-3763.
- [5] Mishima T, Mizutani H, Nakaoka M. A sensitivity improved PFM LLC resonant full-bridge DC-DC converter with LC ant resonant circuitry[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1): 310-324.
- [6] Shang Ming, Wang Haoyu. A LLC type resonant converter based on PWM voltage quadrupler rectifier with wide output voltage[C]//2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, USA, 2017: 1720-1726.
- [7] 赵清林,刘会峰,袁精,等. 基于移相补偿的全桥LLC谐振变换器交错并联技术[J]. 电工技术学报, 2018, 33(12): 2777-2787.
- [8] 陶文栋,王玉斌,张丰一,等. 双向LLC谐振变换器的变频-移相控制方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(24): 5856-5863.
- [9] Ryu S H, Kim D H, Kim M J, *et al.* Adjustable frequency-duty-cycle hybrid control strategy for full-bridge series resonant converters in electric vehicle chargers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10): 5354-5362.
- [10] Kim B C, Park K B, Moon G W. Asymmetric PWM control scheme during hold-up time for LLC resonant converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(7): 2992-2997.

收稿日期:2020-09-01

修改稿日期:2020-11-11

(上接第33页)

- [6] F Du, J Yu, M X Li, *et al.* Modeling and simulation of metro DC traction system with different motor driven trains[C]//AP-PEEC2010, Chengdu, 2010.
- [7] 龚孟荣. 地铁供电系统设计及仿真研究[D]. 成都:西南交通大学, 2013.
- [8] 叶兰兰,邹凯,宋立. 城市轨道交通超级电容储能装置控制策略[J]. 都市快轨交通, 2017, 30(5): 118-122.
- [9] 饶沛南. 大功率交流传动机车牵引逆变器的研究与开发[D]. 成都:西南交通大学, 2011.
- [10] 韩啸,高强,寇佳宝,等. 负载换流逆变器驱动同步电机能量回馈的研究[J]. 电气传动, 2018, 48(1): 13-18.
- [11] 叶飞. 基于地铁列车制动能量回馈装置的能量管理系统[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(3): 46-50.
- [12] 钟春波,田联房,王孝洪,等. 基于PWM整流器的电梯能量

回馈系统的研究[J]. 电测与仪表, 2010, 47(10): 68-72.

- [13] 高博. 基于逆变回馈的地铁再生制动能量回收方案研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2018.
- [14] 申正超,潘育山,刘炜,等. 地铁供电系统继电保护整定研究[J]. 电工技术, 2019(19): 54-56.
- [15] 陈小立. 地铁供电系统的可靠性与安全性分析[J]. 自动化应用, 2018(6): 145-146.
- [16] 曾德容,何正友,于敏. 地铁牵引变电所可靠性分析[J]. 铁道学报, 2008, 30(4): 22-27.
- [17] 刘卓,王胜利. 地铁35kV交流供电系统电流选跳保护的探讨[J]. 现代城市轨道交通, 2011, 8(2): 43-44.

收稿日期:2020-05-11

修改稿日期:2020-06-23