

地铁能量回馈系统充电回路的优化方案

黄志高¹, 刘洪德², 连建阳², 李晓飞³, 杜海源³

(1. 国网江苏省电力公司, 江苏 南京 210024;

2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;

3. 石家庄轨道交通有限责任公司, 河北 石家庄 050000)

摘要: 地铁能量回馈系统可以将地铁列车的能量回馈到电网中, 达到节能和稳定直流电压的目的。而充电回路的设计不仅关系到能馈装置的安全运行而且影响并网后对电网系统的冲击。分析了地铁能馈系统的工作原理, 并给出交流充电和直流充电2种设计方案和充电流程, 最后通过搭建1.2 MW背靠背的能馈系统试验平台, 进行了充电和并网试验。试验结果表明, 直流充电方案不仅能满足能馈系统的并网需求而且操作流程简单可靠, 是理想的充电方案。

关键词: 能量回馈; 充电回路; 软并网

中图分类号: U231.8

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)01-0095-03

地铁制动时产生的电能可高达牵引电能的40%, 会造成直流电网电压的升高, 传统的投入电阻方案造成能源的巨大浪费, 逆变型地铁再生能馈装置成为主流解决方案^[1,2]。充电回路的设计不仅关系到能馈装置的安全运行, 而且影响并网后对电网系统的冲击。文献[3-5]介绍了逆变型地铁再生能馈装置的拓扑、原理及挂网数据。文献[6]介绍了能馈装置的交流充电回路和交流侧软并网策略, 然而对直流侧并网并无分析。本文分析了地铁能馈系统的工作原理, 并给出交流充电和直流充电2种设计方案和充电流程, 最后通过搭建1.2 MW背靠背的能馈系统试验平台, 进行了充电和并网试验。

1 地铁能馈系统的原理

能馈装置的拓扑和控制策略如图1所示, 能馈装置由LCL滤波器和三相半桥PWM整流器组成。能馈装置采用基于同步坐标系的双闭环控制, 实现了有功和无功的独立解耦, 外环直流电压环的作用主要是控制逆变器直流侧电压, 而内环的作用主要是按直流电压外环输出的电流指令进行电流控制^[7-9]。

2 软并网控制策略及仿真分析

能馈装置主电路结构图如图2所示, 由于逆变器的直流电容和滤波器的滤波电容的存在, 如果没有相关充电回路而直接合开关, 会造成很大的电容冲击电流, 该电流可能会经过绝缘栅双极晶体管(IGBT), 对能馈装置和系统都不利。

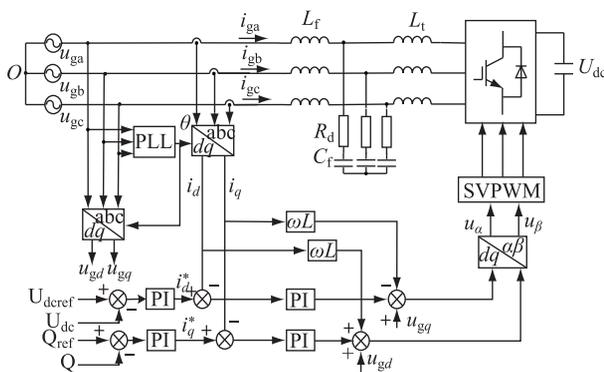


图1 能馈系统的控制策略

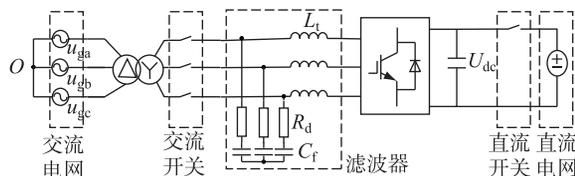


图2 能馈装置主电路拓扑

2.1 软并网控制策略

交流软并网控制策略如图3所示, U_{ac_d} , U_{qb_d} 表示网侧、桥臂侧电压 d 轴分量, U_{ac_q} , U_{qb_q} 表示网侧、桥臂侧电压 q 轴分量。以电网电压为控制目标调节桥臂电压达到软并网的目的。

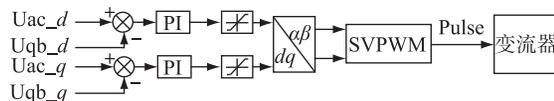


图3 交流软并网控制策略

2.2 软并网仿真分析

由图4、图5可知, 采用软并网策略后, 系统950 V侧冲击电流最大值由1200 A降低到150 A, 系统电压过渡平稳。

表 1 主电路参数

参数名	参数值
电感/mH	7
直流电容/mF	4
滤波电容(星接)/ μ F	300
阻尼电阻/m Ω	1
变压器容量/MW	2
变压器变比/(kV · kV ⁻¹)	35 /0.95
短路阻抗/%	6

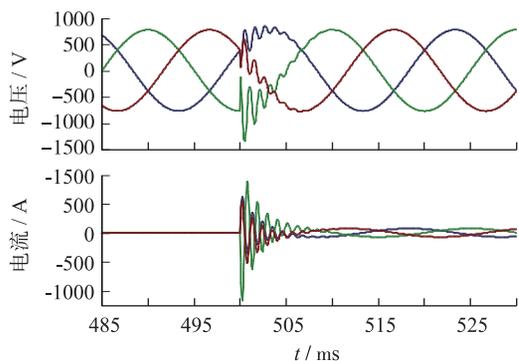


图 4 未用软并网策略时并网波形

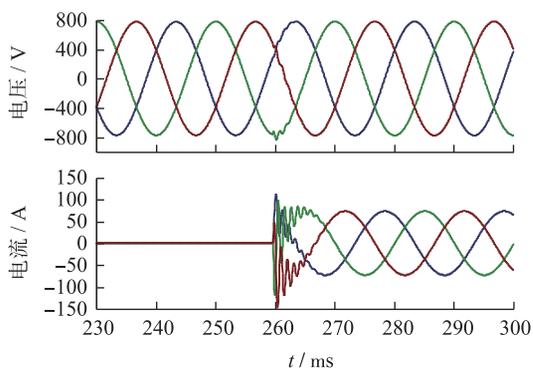


图 5 用软并网策略时的并网波形

3 地铁能馈系统充电回路的设计

3.1 地铁能馈系统交流充电回路

地铁能馈装置交流充电回路如图 6、7 所示,图中 S1 为交流开关,S2 为交流充电接触器,S3 为直流开关。图 6 中 R 如果选取过大,R 上压降较大,合 S2 时有较大冲击电流,如果 R 选取较小,电容充电电流较大,R 上功率较大,阻值较难选择。另外合 S1 后,R、L_t、R_d 和 C_f 形成回路,R 的功率较大,如果 S2 不能及时合上,R 发热严重,有较大风险。图 7 中采用外加二极管整流桥给电容充电,R 在直流侧可以减小电阻的功率及数量,合上 S2 后,电容充电电流会逐渐减小到 0,相对于图 6 是比较合适的充电回路。

地铁能馈装置交流充电流程如图 8 所示,合 S2 后,交流电源通过二极管不控整流桥和电阻对逆变

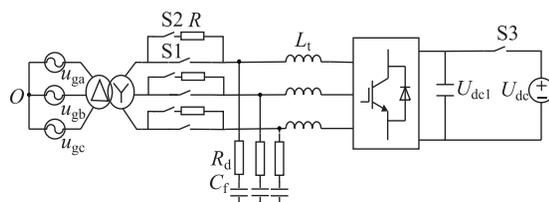


图 6 交流充电回路 1

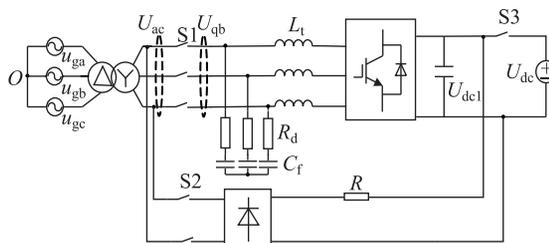


图 7 交流充电回路 2

器电容进行充电,逆变器电容电压大于 0.9 倍交流线电压峰值表示逆变器电容充电结束,然后进行交流软并网,桥臂电压与电网电压差值小于 0.1 p.u. 表示软并网结束,合 S1,由于交流充电的 U_{dc1} 较低,直接合 S3 仍有较大的电容冲击电流,所以以 U_{dc} 为控制目标解锁逆变器,待逆变器电容电压与直流电压电压一致时合 S3,交流充电结束。在此过程中有任一不满足条件,交流充电失败跳闸。

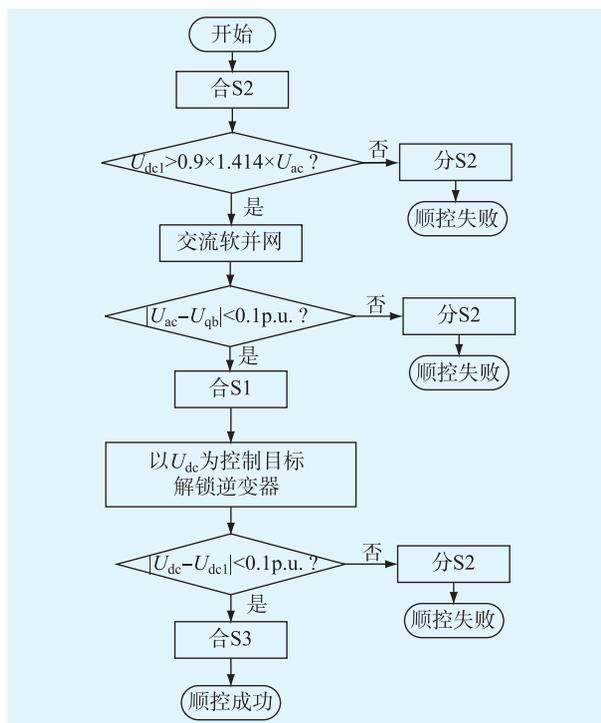


图 8 交流充电流程

3.2 地铁能馈系统直流充电回路

地铁能馈装置直流充电回路如图 9 所示,图中 S1 为交流开关,S2 为直流充电接触器,S3 为直流开关。地铁能馈装置直流充电流程如图 10 所示,合

S2后,直流电网通过电阻对逆变器电容进行充电,若逆变器电容电压大于0.9倍直流电网电压,表示充电完成,合S3,然后进行交流软并网,待桥臂电压和交流电网电压一致时合S1,直流充电结束。在此过程中有任一不满足条件,直流充电失败跳闸。

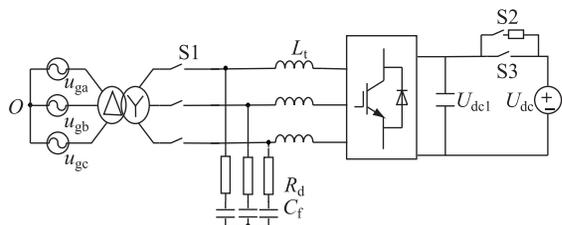


图9 直流充电回路

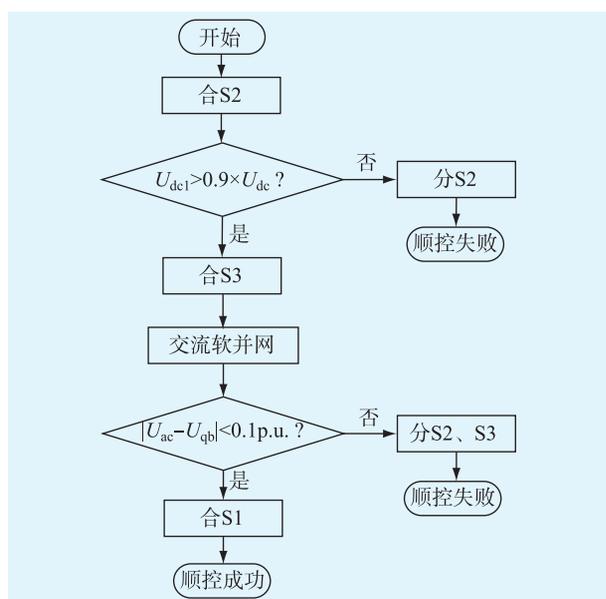


图10 直流充电流程

4 实验验证

地铁能馈试验平台构成的总体拓扑如图11所示,由2台三相半桥逆变器S1、S2和1个三绕组变压器组成,2台逆变器的直流母线并联,交流输出与变压器的两组副边绕组连接^[10]。

图12为试验平台交流软并网的电网电压和桥臂电压波形,由图中可知桥臂电压 U_a 以斜坡上升,幅值和相位与网侧压 U_a 一致时进行并网。由图13知,并网时电网电压过渡平稳,桥臂电流冲击较小,最大瞬时值只有250 A。

5 结束语

地铁能量回馈系统使地铁制动能量的利用率大幅提高。本文介绍了能馈系统交流直流两种充电方案,两种方案的都能抑制并网电流冲击,实现能馈系统平滑并网。常规的交流充电回路操作复

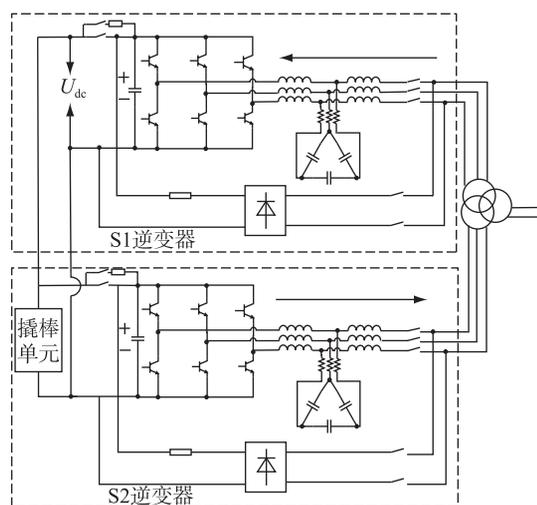


图11 试验平台总体拓扑

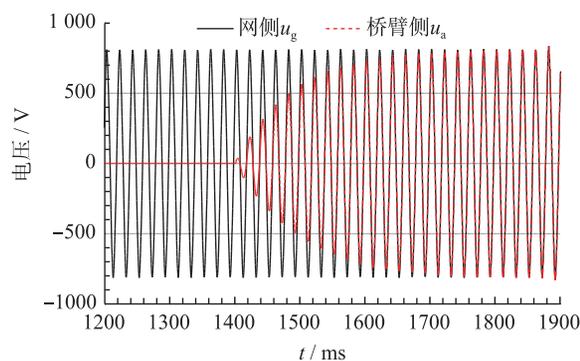


图12 并网时电网电压和桥臂电压波形

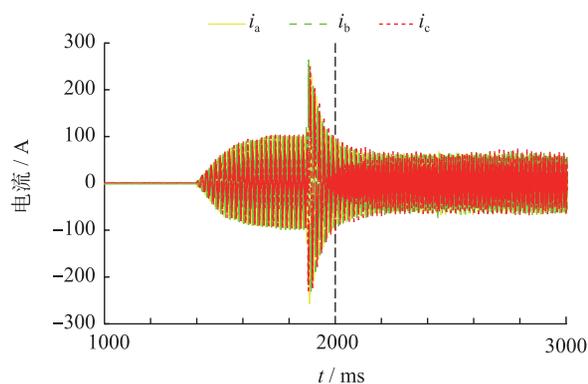


图13 并网时桥臂电流波形

杂,用的元器件较多,直流充电回路操作流程简单可靠,充电回路仅需电阻和充电接触器,成本较低,是理想的充电方案。

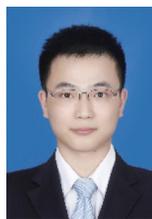
参考文献:

- [1] 夏景辉,郑宁,左广杰. 地铁车辆逆变型再生制动能量回馈方案与装置的研究[J]. 城市轨道交通研究, 2013, 14(6):42-45.
- [2] 庞艳凤,袁月赛. 地铁再生能量利用方案比较[J]. 机车电传动, 2014(1):77-83.
- [3] 牛化鹏,张海龙,桑福环,等. 地铁列车模块化再生制动能量回馈逆变器的研制[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 16(6):87-89.

(下转第105页)

- [9] 余益斌. 环氧树脂建筑结构胶的耐热性研究[D]. 湖南大学,2012.
- [10] 曾 剑, 罗 炎, 杜 涛, 等. 聚酯增韧环氧树脂的耐热性研究[J]. 热固性树脂, 2010, 25(4): 12-16.
- [11] 杜志明, 范军政. 安全裕度研究与应用进展[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(6): 6-10.
- [12] 张胜佳, 刘松杭, 王二国. 环氧树脂增韧的研究进展[J]. 宁波化工, 2015(1): 1-6.
- [13] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 40-41.

作者简介:



胡 鹏

胡 鹏(1989—),男,安徽安庆人,硕士研究生,从事电力设备结构力学分析和状态评价专业工作;

李成钢(1984—),男,浙江绍兴人,工程师,从事电力设备材料性能分析及状态评价专业工作;

陈大兵(1979—),男,湖北大悟人,高级工程师,从事电力设备检验检测及评估工作。

Cause Analysis and Countermeasure Study of Cracking Accident of Cable GIS Terminal Epoxy Casing

HU Peng, LI Chenggang, CHEN Dabing

(State Grid Laboratory of GIS Operation and Maintenance Technology

(State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute), Nanjing 211103, China)

Abstract: According to a cracking accident of an incoming cable GIS terminal epoxy casing in a substation main transformer, the macroscopic crack morphology, the material performance and the mechanical simulation of epoxy casing are analyzed in this paper. Thinking that the root cause of epoxy casing cracking is a large installation deviation of the connection conductor and the cable terminal. So that the groove of the epoxy casing flange is operating in a state of stress close to its material strength limit for a long time, and the safety margin is insufficient. Accordingly, replacement recommendations are presented to ensure that the installation deviation should not be greater than 0.5 mm.

Key words: epoxy casing; material performance; installation deviation; mechanical analysis; safety margin

(上接第 97 页)

- [4] 陈德胜. 城轨新型能馈式牵引供电集成技术研究及试验[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [5] 陈 勇,刘承志,郑 宁,等. 基于逆变回馈的地铁再生制动能量吸收的研究[J]. 城市轨道交通研究, 2011, 12(3): 36-39.
- [6] 李 洁,郑伊飞,郑月宾,等. 地铁再生制动能量回馈装置软并网技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 16(10): 89-92.
- [7] 刘国华,洪 丹,王 瑞,等. 双馈风机转子侧变流器不平衡控制策略[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(2): 5-9.
- [8] 许爱国,谢少军. 城市轨道交通牵引供电 PWM 变流器的研究[J]. 电力电子技术, 2009, 43(12): 7-9.
- [9] 王 军,江 平,杨海英. 城市轨道交通制动能量逆变回馈系统研究[J]. 城市轨道交通研究, 2007, 8(12): 23-27.

- [10] 王 宇,杨 浩,方太勋,等. 地铁再生电能回馈系统试验研究[J]. 电力电子技术, 2016, 50(6): 86-90.

作者简介:



黄志高

黄志高(1962—),男,江苏泗阳人,高级工程师,从事电力系统及自动化研究工作;

刘洪德(1986—),男,山东潍坊人,工程师,从事电子技术在电力系统中应用工作;

连建阳(1987—),男,福建泉州人,工程师,从事电子技术在电力系统中应用工作;

李晓飞(1983—)男,河北廊坊人,工程师,从事轨道交通供变电系统应用技术工作;

杜海源(1982—)男,河北井陘人,工程师,从事轨道交通供变电及自动化工作。

Optimization Scheme for Charging Circuit of the Subway Energy Feedback System

HUANG Zhigao¹, LIU Hongde², LIAN Jianyang², LI Xiaofei³, DU Haiyuan³

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China; 2. Nanjing Nari-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China; 3. Shijiazhuang Urban Rail Transit Co. Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: Subway energy feedback system can put the subway brake energy back to the power grid, to save energy and stabilize DC voltage. The design of the charging circuit is related to not only the secure operation of the energy feedback device, but also the impact on the power grid when the device is connected to the power grid. After analyzing the working principle of subway energy feedback system, AC charging and DC charging, the two design schemes are given with their charging process. Through building 1.2 MW back-to-back test platform system, the charging experiment and the grid connection experiment have been conducted. The results show that the DC charging scheme is the ideal charging scheme, not only because it meets the cut-in requirements of the subway energy feedback system, but also because its operation process is simple and reliable.

Key words: energy feedback; charging circuit; soft cut-in