

考虑再生能馈装置的城市轨道交通整流器 过电压抑制方案

朱纪法¹ 张海申² 易韵岚³

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司, 315101, 宁波; 2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉;
3. 株洲中车时代电气股份有限公司, 412001, 株洲//第一作者, 工程师)

摘 要 城市轨道交通增设再生制动能量回馈装置后, 不可避免地会向牵引供电系统中注入谐波。若参数选取不合适, 则可能导致原整流器电阻电容过电压抑制回路的电阻温升达到极限值甚至烧毁, 从而影响列车运行的安全。从理论分析及试验验证两方面对再生能馈装置接入后的整流器电阻电容过电压抑制回路参数选择进行了研究。研究结果表明: 该回路采用 Δ 型接线方式、降低吸收电容、提高吸收电阻阻值, 能有效降低吸收电阻的温升, 提高安全可靠。

关键词 城市轨道交通; 过电压抑制; 再生制动; 谐波

中图分类号 U264.3⁺71; U260.359

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.08.048

Over-voltage Suppression Scheme for Urban Rail Transit Rectifier with Regenerative Braking Energy Feedback Device

ZHU Jifa, ZHANG Haishen, YI Yunlan

Abstract After the regenerative braking energy feedback device being added to urban rail transit rectifier unit, harmonics will be injected into the traction power system. If the parameter selection is not appropriate, the resistance temperature of the former rectifier RC (resistor-capacitance circuit) over-voltage suppression may reach the limit value or even burn down, directly affecting the stability of train operation. The selection of rectifier RC loop parameters after the connection with regenerative braking energy feedback device is studied by means of theoretical analysis and experimental verification. The result shows that the rectifier RC could effectively reduce the temperature rise of absorption resistance, improve the safety and reliability of the system due to the adoption of Δ type connection mode, the reduction of absorption capacitance and the increase of absorption resistance value.

Key words urban rail transit; over-voltage suppression; regenerative braking; harmonic wave

First-author's address Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315101, Ningbo, China

为了减少谐波电流对电网的污染, 城市轨道交通牵引变电所普遍设置 2 套整流机组, 并联接于同一段 35 kV 母线上。单套整流机组采用三相桥式 12 脉波整流方式, 两套整流机组并联运行可构成等效 24 脉波整流。

整流器本体的过电压保护包括交流侧过电压保护、直流侧过电压保护及二极管换向过电压保护。交流侧过电压保护, 可限制牵引变压器在分闸或合闸时产生的操作过电压, 其通过在整流器交流侧设 RC (电阻-电容) 过电压抑制回路 (以下简为“RC 回路”) 来实现。直流侧过电压防护, 可限制因保护二极管快速熔断器的熔断及直流馈出高速断路器的分闸等产生的过电压, 其通过在整流器直流侧接入阻容和压敏电阻保护装置进行限压保护。二极管换向过电压保护, 可限制二极管换向由牵引变压器漏感产生的过电压作用于关断二极管上, 一般须在整流桥臂并联接入阻容保护装置。

随着人与自然和谐发展理念的深入推广, 人们在节能减排、环境保护方面的意识逐步增强, 对列车再生制动过程中所产生的电能进行再利用越来越受到人们的重视^[1-2]。图 1 为某工程再生制动能量回馈装置 (以下简为“再生能馈装置”) 接入城市轨道交通供电系统整流机组的方案。此装置接入后, 对现有整流器交流侧 RC 回路产生的影响, 以及 RC 回路参数的选取, 将直接影响城市轨道交通供电系统的安全运行。

1 整流器 RC 回路

1.1 整流器电压与电流的谐波分布特征

整流机组单台整流器由 2 个三相六脉冲全波整流桥组成。其中, 1 个整流桥接至牵引变压器阀侧星型绕组, 另 1 个整流桥接至牵引变压器阀侧三角

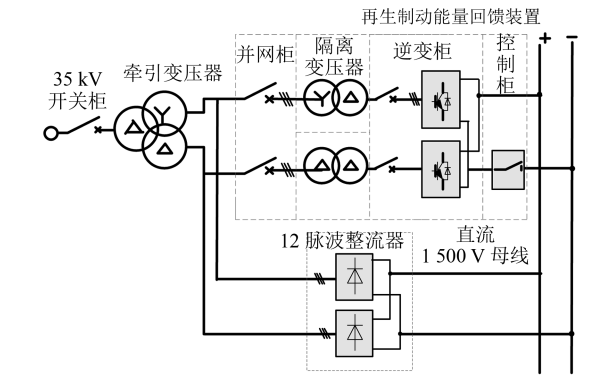


图 1 并联再生能馈装置后的整流机组示意图

形绕组。整流谐波有特征谐波和非特征谐波之分。根据傅里叶级数分析计算,整流装置产生的特征谐波次数由整流相数决定:

$$h = kp \pm 1 \tag{1}$$

式中:

- h ——特征谐波次数;
- p ——整流相数,即脉波数;
- k ——系数,为正整数,取 1,2,3,...

实际上,由于存在三相系统出现的交流电压不对称、延迟角不对称、三相阻抗不相等、直流侧平均电流不恒定等诸多非理想因素,整流机组将不可避免地产生非特征次数的谐波。大量统计表明,整流器产生的谐波电流相对基波电流标么值见表 1^[3-5]。

表 1 整流电路谐波含量统计表

h	谐波电流相对基波电流的标么值			
	$P=6$	$P=12$	$P=18$	$P=24$
5	0.175	0.026	0.026	0.026
7	0.110	0.016	0.016	0.016
11	0.045	0.045	0.007	0.007
13	0.029	0.029	0.004	0.004
17	0.015	0.002	0.015	0.002
19	0.010	0.001	0.010	0.001
23	0.009	0.009	0.001	0.009
25	0.008	0.008	0.001	0.008

综上,6 脉波整流器电压、电流谐波主要分布在 5、7、11、13、17、19、23、25、29、31、35、37、41、43、47、49 次谐波上,且分布呈现逐渐减低的趋势,低次谐波含量高,其他次谐波含量均极少。

1.2 RC 回路参数的选取

6 脉波整流器交流侧 RC 回路根据整流器自身产生的谐波含量进行针对设计,吸收频段多集中在低频区。图 2 为 Y 型与 Δ 型接线方式下的阻容吸收回路原理图,文献[6]提供的整流器交流侧浪涌过电压抑制用 RC 回路计算式如下。

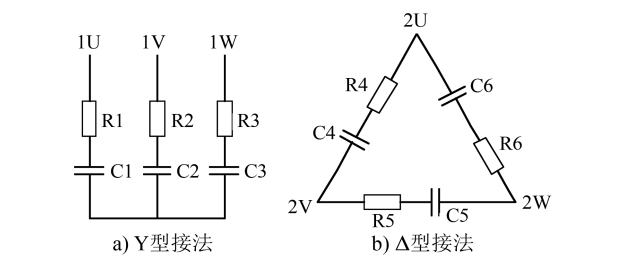


图 2 整流器阻容吸收回路原理图

过电压保护电容:

$$C_a = 17\,320 \frac{\xi I_V}{f U_{V0}} \tag{2}$$

过电压保护电阻:

$$R_a = 0.17 \frac{U_{V0}}{\xi I_V} \tag{3}$$

过电压保护电阻功率:

$$P_{R_a} = (0.25 \xi I_v)^2 R_a \tag{4}$$

式中:

- I_V ——阀侧线电流,A;
- U_{V0} ——阀侧线电压,V;
- ξ ——变压器励磁电流对额定电流标么值;
- f ——电源频率,Hz。

文献[6]提到 ξ 一般为 0.02~0.05;参照 GB/T 10228—2015《干式电力变压器技术参数和要求》,结合目前的变压器工艺生产水平,牵引变压器空载电流 ξ 可取 0.5%;综合考虑各种附加因素及裕量后, ξ 取 0.01。当整流机组容量为 2 500 kVA,且不考虑再生能馈装置的接入时,依据式(2)~(4)可计算出 $C_a=1.8\,\mu\text{F}$, $R_a=33\,\Omega$,功率损耗 $P_{R_a}=77\,\text{W}$ 。

以上核算是基于 RC 回路采用 Y 型连接的,如采用 Δ 型连接,则 $C_a=0.6\,\mu\text{F}$, $R_a=98\,\Omega$ 。

1.3 再生能馈装置谐波电压的影响分析

再生能馈装置接入后,RC 回路除吸收原 6 脉波整流支路产生的谐波电压外,尚需吸收再生能馈装置回馈支路产生的电压电流谐波分量。这就要求原有整流器 RC 回路电阻的发热功率应大于 2 个支路的谐波输入之和。

图 1 所示再生能馈装置单重能馈支路的载波频率为 1 050 Hz,单周期内存在 21 个波头,逆变柜交流侧产生的电压谐波主要分布在 35、37、41、43 等较高谐波次数上,其他谐波次数分布虽较少,却分布较广。由于能馈支路的加入,RC 回路在牵引整流及逆变回馈时均处于工作状态;由于再生能馈装置产生的谐波多集中在高频段,整流器 RC 回路中的

电容如同通路;增加的高频电压谐波作用在吸收电阻上,单次电压谐波峰值较高,电阻的瞬时功率增大,势必增加电阻温升。因此,再生能馈装置并入后,需适度降低电容,并增大吸收电阻的额定功率。

2 试验验证

2.1 试验 RC 回路

以地面牵引变电所工作回路为样本,在实验室搭建完整的再生能馈装置整流器试验 RC 回路,进行大功率带电试验,以模拟不同工况并测试电阻温升情况。试验 RC 回路主电路如图 3 所示。以陪试机模拟列车运行工况:在列车制动时,陪试机作为功率输出源,再生能馈装置作为逆变回馈支路工作;在列车牵引时,整流机组作为牵引功率输出源,陪试机作为逆变回馈支路工作,此时的再生能馈装置处于脉冲封锁状态,停止工作。

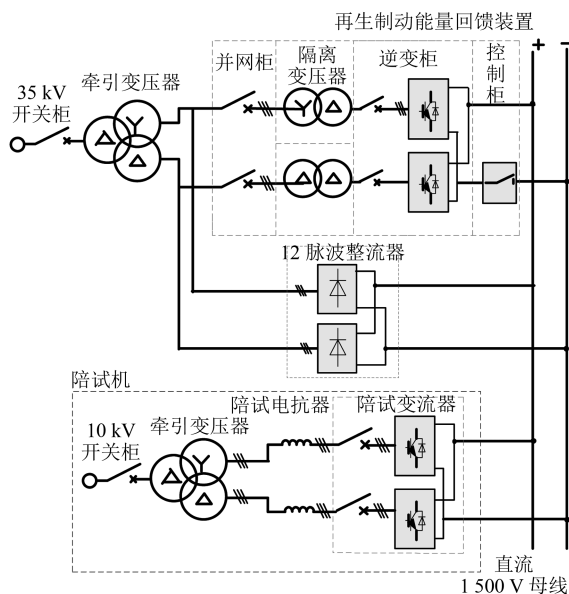


图3 试验 RC 回路主电路图

由于再生能馈装置的工作状况复杂,且与行车对数及线路状况等息息相关,故试验仅需模拟最恶劣工况。将高峰时段(30对车/h)、满载运行工况作为最恶劣工况,采用 FLUKE 红外测温仪实时测量试验 RC 回路中电容与电阻的温度。试验运行过程如图 4 所示,模拟工况的列车运行间隔为 2 min,其中,整流功率 $P_1 = 1$ MW,逆变功率 $P_2 = 2$ MW。在 t_1 至 t_2 段,时长为 60 s,试验回路处于整流状态;在 t_2 至 t_3 段,时长为 15 s,试验回路处于空载状态;在 t_3 至 t_4 段,时长为 30 s,试验回路处于逆变回馈状态; t_4 结束 15 s 后,试验回路重复上述循环。

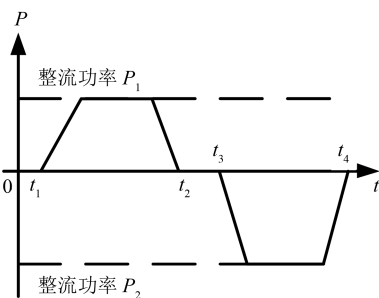


图4 再生能馈装置的试验运行过程示意图

2.2 对比分析

在试验 RC 回路运行过程中,针对不同的阻容吸收回路参数,拟定了 3 种测试工况:

测试工况 1:试验 RC 回路采用 Y 型接线方式,按常规模式设置电容、电阻参数。取 $C_a = 2.5 \mu\text{F}$, $R_a = 47 \Omega$,电阻功率 $P_{R_a} = 200$ W;

测试工况 2:考虑再生能馈装置高频谐波的影响,降低电容大小,并使试验 RC 回路改用 Δ 型接线方式,以增强过电压吸收能力。取 $C_a = 0.47 \mu\text{F}$, $R_a = 75 \Omega$,电阻功率 $P_{R_a} = 200$ W;

测试工况 3:考虑再生能馈装置高频谐波的影响,降低电容大小;试验 RC 回路采用 Δ 型接线;增大电阻阻值。取 $C_a = 0.47 \mu\text{F}$, $R_a = 150 \Omega$,电阻功率 $P_{R_a} = 200$ W。

测试在间歇峰值功率作用 2 h 下的 RC 回路的温升情况。测试发现,在整个运行过程中,电容的温度基本保持在 30°C ,而电阻的温度变化较大。对不同工况下的实测数据进行对比分析,截取电阻温升达到稳态后的数据,可得不同工况下 RC 回路电阻的温度与时间的关系,如图 5 所示。

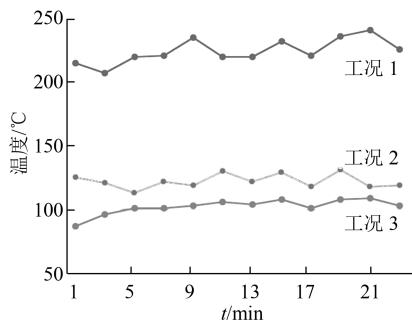


图5 环境温度为 30°C 时的 RC 回路电阻温度

1) 测试工况一:当再生能馈装置接入后,电阻最高温升超过 200 K,而电阻表面的最高温度允许值一般不超过 275°C ,工况 1 已接近临界值,有烧毁的危险。

(下转第 205 页)

态序号的确定。由于此方式基于“大四班”故有翻班特殊性,所以对于既有的四班二运转方式具有普遍意义。以上海轨道交通 12 号线进行试验,基于现场实际数据,通过实例对比分析可以看出该方案具有优越性,不仅对司机的工作效能更优化,还在公司的效益和管理上更具优势。

“混合班制”方案与“现有人员优化”方案进行对比,使得车队成员得到更为完整、有序的车队培训。当然,对于列车应急操作的培训必须做到持续、有效、持之以恒。对于业务薄弱人员、重点盯控人员也能进行持续有效的督促。当前研究还存在着部分不足,如饭圈人数是否能满足午间乘务的需要还需根据实际运营情况决定是否增设,且本文的研究主要针对乘务人员的轮转方案,未涉及到乘务人员与列车运行图的具体运行线进行任务配对,故需要进一步研究和探索。

参考文献

- [1] 李献忠,徐瑞华. 基于乘务广义费用的城市轨道交通排班[J]. 同济大学学报(自然科学版),2007(6): 750.

- [2] 刘德礼. 乘务派班及值乘方式的探讨[J]. 现代城市轨道交通,2009(1): 367.
- [3] 郑珍. 列生成算法在地铁乘务计划编制问题中的应用分析[J]. 物流技术,2011(11): 126.
- [4] 石俊刚,史宏杰,徐瑞华. 城市轨道交通乘务任务划分模型及算法研究[J]. 铁道学报,2014(5): 1.
- [5] 张增勇,毛保华,杜鹏,等. 基于惩罚费用的城市轨道交通乘务排班优化模型与算法[J]. 交通运输系统工程与信息,2014(2): 113.
- [6] 丰富. 城市轨道交通乘务排班计划优化方法研究[D]. 北京: 北京交通大学,2015.
- [7] 滕文光. 地铁乘务管理标准化研究与分析[C]//中国城市科学学会数字城市专业委员会轨道交通学组,天津轨道交通集团有限公司,中城科数(北京)智慧城市规划设计研究中心. 第四届全国智慧城市与轨道交通学术会议暨轨道交通学组年会论文集. 北京:中城科数(北京)智慧城市规划设计研究中心,2017.
- [8] 王哲. 新时期下关于地铁乘务管理工作的新思考[J]. 城市建设理论研究(电子版),2017(24): 179.
- [9] 苏韬. 城市轨道交通乘务组织的优化与运用[J]. 智能城市,2018(9): 106.

(收稿日期:2018-10-10)

(上接第 200 页)

2) 测试工况二: Δ 型接法的电阻值相当于 Y 型接法的 3 倍,电容值相当于 Y 型接法的 $1/3$ 。当选取较小的电容时,电阻的温升明显降低,其温升仅为 90 K 左右,在安全运行范围内。可见,采用 Δ 型接线方式、降低电容值能有效降低吸收电阻的温升。

3) 测试工况三:将电阻阻值增大后,电阻平均温升约 70 K,有轻微降低。这与电阻阻值增大后的吸收功率增加有关。

3 结语

回馈型再生制动能量利用装置可以有效实现对列车制动能量的高效利用,对城市轨道交通的节能具有举足轻重的意义。引入回馈至牵引变压器 1 180 V 侧的再生制动能量利用装置后,对现有整流机组 RC 回路参数的选取有重大影响。若参数选取不合适,则可能导致电阻温升接近临界值,从而影响 RC 回路运行的安全。本文从理论分析及试验

验证两方面对再生能馈装置接入后的整流器 RC 回路参数选择进行了研究。研究结果表明:RC 回路采用 Δ 型接线方式、降低吸收电容、提高吸收电阻阻值,能有效降低吸收电阻的温升,提高 RC 回路的安全性。

参考文献

- [1] 梁广深,黄隆飞. 地铁 B 型车牵引能耗与再生制动节能效果分析[J]. 城市轨道交通研究,2016(2): 27.
- [2] 张海申. 城市轨道交通再生制动能量回馈装置容量选择研究[J]. 现代城市轨道交通,2017(5): 7.
- [3] 于松伟,杨兴山,韩连祥,等. 城市轨道交通供电系统设计与应用[M]. 成都:西南交通大学出版社,2008.
- [4] 李建民,尹传贵. 城市轨道交通牵引供电系统谐波分析[J]. 城市轨道交通研究,2004(6): 46.
- [5] 袁伟,杨振宇,桂志兴,等. 地铁列车在不同工况下的网侧电流谐波分析[J]. 城市轨道交通研究,2016(7): 65.
- [6] 王兆安,张明勋. 电力电子设备设计 and 应用手册[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

(收稿日期:2018-10-10)