

# 数字电流选跳在地铁中压环网供电保护的应用

张目然

(广州地铁集团有限公司, 510030, 广州)

**摘 要** [目的] 相较于传统的中压环网供电系统保护机制, 数字电流选跳保护展现出了更好的速动性和选择性。然而, 在选跳保护技术赋予保护范围无限扩展潜力的同时, 电缆电容电流所产生的影响却日益凸显, 成为不可忽视的因素。因此, 需对地铁供电系统中压环网大分区下的数字电流选跳保护及整定设计进行深入研究。[方法] 鉴于我国众多城市地铁供电系统已广泛采用数字电流选跳保护方案, 选取广州地铁具体保护跳闸案例, 通过对保护装置所记录的波形数据进行详细分析, 进一步剖析故障区内与区外跳闸的根本原因。[结果及结论] 故障区内的录波数据呈现出典型的单相接地故障特征, 这与实际的电缆故障情况相吻合。而在故障区外, 电流波形的畸变则显示是由电压的突变引起。由于地铁 33 kV 环网的三相负载基本保持平衡, 且在 C 相失压时, A、B 相电压虽然会经历短暂的畸变(持续时间约为 3 个周波), 但此时间段内负载电流的变化可忽略不计。因此, 三相电流的畸变主要由电缆的电容电流导致, 针对此情况, 数字电流选跳保护的整定设计原则应适时进行完善。

**关键词** 地铁; 中压 33 kV 环网; 数字电流选跳

**中图分类号** U231+.8

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.10.048

## Application of Digital Current Selective Tripping Protection in Subway Medium Voltage Ring Network Power Supply

ZHANG Muran

(Guangzhou Metro Group Co., Ltd., 510030, Guangzhou, China)

**Abstract** [Objective] Compared with traditional protection mechanism of medium-voltage ring network in power supply system, digital current selective tripping protection has quicker motion performance and better selectivity. However, while providing the possibility of infinite extension of protection range by selective tripping, the impact of cable capacitance current gets prominent and becomes a factor that cannot be ignored. Therefore, it is necessary to conduct in-depth research on digital current selective tripping protection and its setting design under the large partition of medium voltage network in subway power supply system. [Method] In view of the fact that digital current selective tripping protection is widely adopt-

ed by many urban rail power supply systems in China, a specific protection tripping case of Guangzhou Metro is selected to analyze in detail the waveform data recorded by the protection device, and further analyze the root causes of tripping phenomena in and out the fault zone. [Result & Conclusion] The wave recording data in the fault zone exhibits typical single-phase grounding fault characteristics, which is consistent with the actual cable fault situation. However, outside the fault zone, the distortion of the current waveform is shown to be caused by the sudden change of voltage. Due to the basic balance of the three-phase load in subway 33 kV ring network, and in the case of phase C voltage loss, although the voltage of phases A and B experiences a brief distortion (about 3 cycles), the change in load current during this period can be ignored. Therefore, the distortion of the three-phase current is mainly caused by the capacitance current of the cable. In view of this situation, the setting design principle of the digital current selective tripping protection should be improved in a timely manner.

**Key words** subway; medium voltage 33kV ring network; digital current selective tripping

传统的中压环网供电保护装置一般由光纤线路差动(主保护)和后备过流保护构成, 随着供电分区的加大, 其在选择性和速动性方面的局限性愈加明显。数字电流选跳保护利用通信方式实现保护装置间的逻辑闭锁, 对故障进行选择 and 切除<sup>[1-2]</sup>, 其不受上级电网跳闸时限限制, 能较好地弥补传统供电保护方案的不足。继广州地铁 6 号线采用数字电流选跳保护方案后, 我国在建和新建的北京、长沙、苏州、宁波等城市地铁供电系统也相继采用了该方案<sup>[3]</sup>。

目前, 关于传统中压环网供电系统保护和数字电流选跳保护的研究有很多; 文献[3]提出在地铁供电系统中应用电流选跳保护的优化建议; 文献[4]对广州地铁 1、2 号线不同接线方式的优缺点和设计思路进行了比较; 文献[5]介绍了地铁 35 kV

交流供电系统线路电流选跳保护的基本原理;文献[6]基于实际运行案例总结了电流选跳保护特性。

本文基于广州地铁的应用实例,在 4 个环网开关同时跳闸时,基于 4 个环网开关处零序电流选跳装置的录波,分析了采用零序电流选跳保护时,跳闸超出了应保护范围的原因。

## 1 地铁中压环网供电系统

我国地铁供电系统主要有 110 kV(或 66 kV)/35 kV 集中供电和 10 kV 分散供电两种方式,以集中供电方式较为普遍。

### 1.1 中压环网供电系统构成

广州地铁采用 110 kV/33 kV 的两级电压集中供电方式,即在线路的适中站位,根据总容量要求设主变电所,将城市电网提供的 110 kV 电压降压为 33 kV,并在沿线结合牵引变电所、降压变电所进线形成中压 33 kV 环网;由环网供电沿线设置的牵引变电所经降压整流为直流电,从而对电动列车供电;各车站机电设备则由降压变电所提供 220 V/380 V 电源。

一条线路设置 2 个或以上主变电所,每个主变电所均从城市电网引入两路 110 kV 电源,同时考虑主变电所在线路间的共用。110 kV 侧采用内桥或线路变压器组接线,33 kV 侧采用单母线分段接线,根据车站变电所的数量及站间距进行分区供电。以往 33 kV 环网多采用小分区的接线方式(见图 1),其故障范围影响较小,但电缆及断路器等设备较多,投资及运维工作量较大;采用大分区后,分区内变电所数量由三四个增加至 6 个以上<sup>[2]</sup>,如图 2 所示。

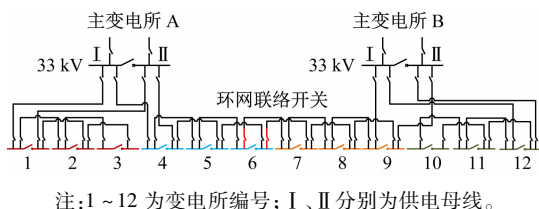


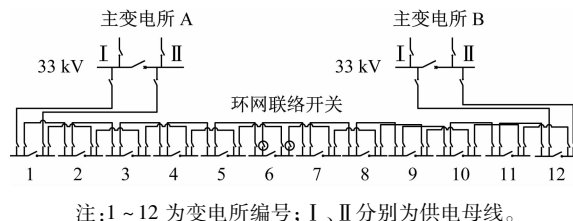
图 1 小分区环网供电结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ring network power supply structure for small partition

### 1.2 传统中压环网供电系统保护配置

传统的中压环网保护配置一般以光纤线路差动为主保护,定时限过流和零序过流作为后备保护。

光纤线路差动的灵敏性和选择性较好,但是保



注:1~12 为变电所编号;I、II 分别为供电母线。

图 2 大分区环网供电结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ring network power supply structure for large partition

护范围仅限于线路两端电流互感器区域内。定时限过流和零序过流保护通过电流阈值和时间极差进行匹配,受上级电力系统跳闸时限及断路器固有动作时间的限制,无法实现精细化的时间极差配合,往往会出现二三个开关采用同一定值的情况,选择性不佳,且容易导致故障影响范围的扩大;由于保护跳闸时限一般按照从近电源端逐渐递减的原则整定,即近电源点最大,距离电源点越远时间越短,提高了选择性的同时牺牲了保护的灵敏性;此外,在供电运行方式发生调整时,需重新考虑过流保护的电流和时间整定,为现场运行管理带来不便。

## 2 数字电流选跳保护

数字电流选跳保护充分借助通信技术,利用光纤传递故障信息,综合电流阈值和逻辑判断来确定故障点,其不需时间配合,从而确保了继电保护的速动性和选择性;同时,不受变电所数量限制,极大程度地满足了环网大分区的供电需求。

### 2.1 保护原理

数字电流保护是在传统过流保护的基础上发展而来,其基本原理是根据供电沿线各开关是否流过故障电流来判断故障区域,即当环网线路发生单一故障时,则故障区段位于从电源侧沿供电方向最后一个流过故障电流的开关和第一个未流经故障电流之间的区段。

图 3 为故障区域判断示意图。当环网故障点出现在 A 点时,沿电流方向,DL1(断路器编号,余下同)至 DL3 均流过故障电流,而 DL4 和 DL5 未流过故障电流。经过网络通信,确定 DL3 是最后一个流过故障电流的开关,DL4 是第一个未流过故障电流的开关,则判断故障发生在 DL3 和 DL4 之间。DL3 与 DL4 同时跳闸,以切断故障点。数字电流选跳逻辑见图 4。

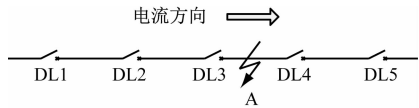
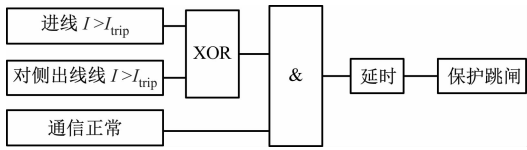


图 3 故障区域判断示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fault area judgment



注： $I$  为实际电流； $I_{trip}$  为保护启动电流；XOR 为异或逻辑；& 为与逻辑。

图 4 数字电流选跳逻辑图

Fig. 4 Logic diagram of digital current selective tripping protection

2.2 保护配置

广州地铁 6、7、14、21 号线，以及在建线路的中压环网进出线主要采用差动保护作为主保护，以过流选跳、零序电流选跳及传统过流保护作为后备保护的技术方案；母线以过流选跳作为主保护，传统过流保护作为后备保护。

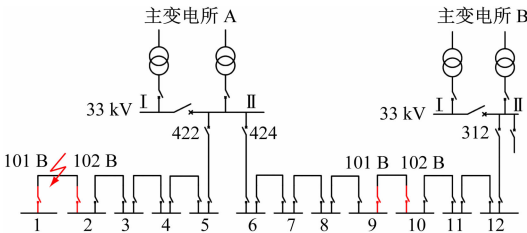
过流选跳的电流阈值一般按照躲过最大负荷整定；零序电流选跳则应能够躲过保护区内最大不平衡电流。

3 案例分析

2019 年 3 月，某地铁线路分属 2 个供电区的 4 个中压环网开关同时跳闸，其中供电区一的两开关为差动保护和零序电流选跳保护跳闸，供电区二的两开关为零序电流选跳保护跳闸。后经检查发现：供电区一内的 33kV II 段 C 相环网电缆对地短路，供电区二内无故障，跳闸范围超过应保护区段。

3.1 运行方式

本案例相关中压环网供电分区如图 5 所示。



注：图中 422、424、312、101B、102B 为开关编号。

图 5 本案例相关中压环网供电分区示意图

Fig. 5 Schematic diagram of medium voltage ring network power supply zoning related to this case

受建设工期影响，故障发生时主变电所 B 的 II 段主变压器尚未投用。因此，变电所 1 ~ 5（即供电区一）的 II 段环网由主变电所 A 供电；变电所 6 ~ 12（即供电区二）的 II 段环网亦由主变电所 A 供电（主变电所 B 的 II 段 33 kV 由变电所 12 反向供电）。另变电所 1 ~ 4 尚处于调试阶段，未投入运营。

3.2 保护响应

变电所 1 ~ 12 的进、出线及 2 个主变电所出线开关（见图 5）均设置差动主保护，整定值相同；过流选跳整定值为 1 000 A，零序电流选跳整定值为 76 A。

变电所 1 的 101B 和变电所 2 的 102B 开关差动保护动作出口；变电所 2 ~ 9 的进、出线开关及主变电所 A 的馈线开关 422、424 零序电流选跳达到保护定值，保护启动；变电所 1、10 ~ 12 的进、出线开关零序电流选跳未达到保护定值，保护未启动，保护响应汇总见表 1。

表 1 保护响应汇总

Tab. 1 Protection response summary

变电所名称	差动	零序过流选跳	跳闸
变电所 1	出口	未启动	101B
变电所 2	出口	启动	102B
变电所 3 ~ 8	未启动	启动	
变电所 9	未启动	启动	101B
变电所 10	未启动	未启动	102B
变电所 11 ~ 12	未启动	未启动	
422 开关	未启动	启动	
424 开关	未启动	启动	
312 开关	未启动	未启动	

各区段相关开关保护装置通信正常，选跳保护装置跳闸出口符合逻辑（见图 4）。但故障发生在变电所 1 至变电所 2 之间，变电所 9 和 10 的跳闸超出了应保护范围。

3.3 原因分析

变电所 2 的 102B 零序电流选跳装置保护录波如图 6 所示。由图 6 可知：横坐标为时间，由上至下分别是 A、B、C 相电流，零序电流，A、B、C 相电压以及总保护出口和零序选跳出口波形；跳闸前三相电流均小于 10 A；时刻 1 时，C 相和零序电流突增，均超过 500 A（保护装置检测 C 相和零序电流最大值分别为 577 A、567 A）；C 相电压为零；A、B 相电压升至线电压。



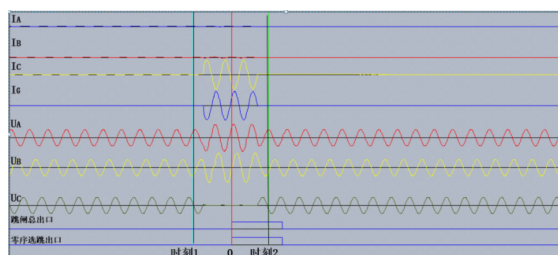


图6 变电所2的102B零序电流选跳装置保护录波截图

Fig. 6 Screenshot of protection recording for Substation 2  
102B zero sequence current selective tripping device

变电所1的101B零序电流选跳装置保护录波如图7所示(由于装置设置问题,仅记录三相及零序电流波形),时刻1前,三相电流比较均衡,且小于10A;时刻1时,C相电流突降为零,A、B相电流增加,零序电流突增。

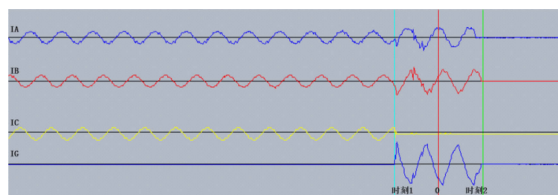


图7 变电所1的101B零序电流选跳装置保护录波截图

Fig. 7 Screenshot of protection recording for Substation 1  
101B zero sequence current selective tripping device

变电所9的101B和变电所10的102B零序电流选跳装置保护录波截图如图8、图9所示,两开关在故障前后的电压和电流波形极为相似。C相电压在时刻1时突降为零后,A、B相电压上升为线电压,三相电流波形均发生畸变,但三相电流幅值相差不大,均为40A左右;零序电流明显增大。

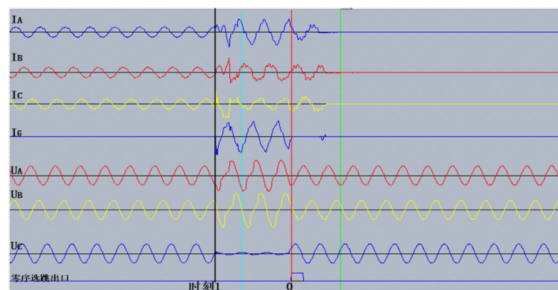


图8 变电所9的101B零序电流选跳装置保护录波截图

Fig. 8 Screenshot of protection recording for Substation 9  
101B zero sequence current selective tripping device

保护装置检测到变电所9的101B最大零序电流为77.96A,已达到出口整定值(76.00A);变电

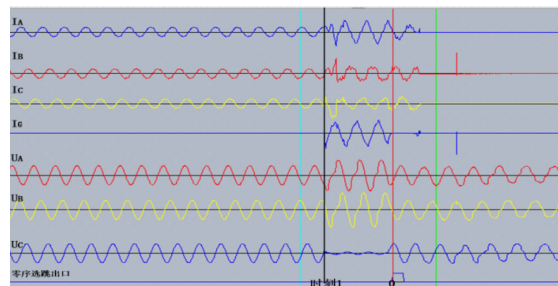


图9 变电所10的102B零序电流选跳装置保护录波截图

Fig. 9 Screenshot of protection recording for Substation 10  
102B zero sequence current selective tripping device

所10的102B最大零序电流为65.50A,未达到出口整定值(76.00A),双方通信确认符合选跳逻辑,开关跳闸。

变电所1的101B和变电所2的102B录波呈现了典型的单相接地故障特征,与实际的电缆故障情况吻合。

变电所9的101B和变电所10的102B的电流畸变则明显是由电压的突变造成。因地铁33kV环网的三相负载基本平衡,且C相失压,A、B相电压畸变时间极短(约3个周波),可以忽略负载电流的变化,则电流的畸变主要由电缆的电容电流引起。

#### 4 非故障段零序电流计算及整定优化

城市轨道交通中压环网采用电缆供电,单相接地短路时,接地相电压为0,其余两相电压为相对接地相的电压,均升高为正常时的 $\sqrt{3}$ 倍。接地相无电容电流,其余两相的电容电流也均升高到正常时的 $\sqrt{3}$ 倍。由于三相电容电流不平衡,会产生零序电流,零序电流为其余两相电容电流的向量和,两相电容电流相位差为 $60^\circ$ ,以C相接地为例,合成的零序电流为 $I_0 = \sqrt{3}I'_a = \sqrt{3}I'_b = 3I_a = 3I_b^{[7]}$  ( $I'_b$ 为接地后A相电缆电容电流, $I'_b$ 为接地后B相电缆电容电流, $I_a$ 为正常时A相电缆电容电流, $I_b$ 为正常时B相电缆线路电容电流)。也就是说,单相接地短路时因电容电流引起的零序电流为正常电容电流的3倍。中压环网中几乎没有负荷不平衡电流流过,零序电流主要决定于电缆的电容电流。

以交流35kV单芯300mm<sup>2</sup>电缆为例,每公里电缆电容电流 $I_{c0}$ 为:

$$I_{c0} = 2\pi f U c_0 \quad (1)$$

式中:

$f$ ——线路频率;

$U$ ——电缆对地电压;

$c_0$ ——每公里电缆电容值,可取 208.61 nF/km。

计算得  $I_{c0} = 1.25$  A。

上述工程变电所 9 距供电末端电缆总长度为 21.26 km,变电所 10 距供电末端电缆总长度为 17.89 km,电缆截面面积为 300 mm<sup>2</sup>。故障时零序电流为正常时 3 倍,变电所 9 零序电流为 79.73 A,变电所 10 零序电流为 67.09 A。可以看出,计算得到的环网零序电流与实测值基本一致。

结合跳闸案例及计算结果,原零序电流选跳整定值 76 A 不满足非故障段的零序电流要求,因此在整定值计算时需考虑环网电容电流的影响。对于采用数字通信零序电流保护的线路,环网进、出线数字通信零序电流保护的整定需计算其在各种运行方式下的电容电流,全线统一取最大值的 3 倍乘以可靠系数。

## 5 结论

1) 传统的线路零序保护整定需躲过被保护线路末端接地短路时的最大零序电流,也可使用过流保护定值乘以经验系数获得。零序电流选跳保护工程实践的时间不长,其整定原则基本与传统零序保护一致。本案例说明当选跳保护提供了保护范围无限延伸的可能后,电缆电容电流带来的影响不容忽视,其整定设计原则应适时进行完善。

2) 关于电容电流的经典公式及经验值较多,不同取值势必影响最终核算结果;同时环网供电方式也较为灵活,尤其当供电形成网络,环网进行跨线路支援供电时,其保护配置及整定原则都值得进一步研究。

## 参考文献

- [1] 魏巍,严伟,沈全荣. 地铁数字电流保护技术的应用[J]. 都市快轨交通, 2014, 27(5): 60.  
WEI Wei, YAN Wei, SHEN Quanrong. Application of the digital

network over current relay for metro[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2014, 27(5): 60.

- [2] 贺家李,李永丽,董新洲,等. 电力系统继电保护原理[M]. 5 版. 北京: 中国电力出版社, 2018: 81.  
HE Jiali, LI Yongli, DONG Xinzhou. Principle of power system relay protection[M]. 5th ed. Beijing: China Electric Power Press, 2018: 81.
- [3] 刘晓辉,肖涛古,钟建恩. 数字通信过电流选跳保护在地铁大环网供电系统中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(6): 137.  
LIU Xiaohui, XIAO Taogu, ZHONG Jian'en. Application of selection trip protection of digital communication over-current in metro ring network power supply system[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(6): 137.
- [4] 张建根. 广州地铁供电系统 33 kV 环网接线方式的思考[J]. 城市轨道交通研究, 2006, 9(7): 1.  
ZHANG Jiagen. The 33 kV power supply network connection mode for Guangzhou metro[J]. Urban Mass Transit, 2006, 9(7): 1.
- [5] 余龙. 城市轨道交通中压环网继电保护方案的优化设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.  
YU Long. The optimization design of protection for medium-voltage ring network in urban mass transit[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [6] 黄树智. 城市轨道交通中压环网继电保护方式研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.  
HUANG Shuzhi. Study on medium voltage loop network relay protection mode of urban rail transit[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [7] 范巧莲,桑梓杰. 城市轨道交通小电阻接地供电系统零序保护问题探讨[J]. 电气化铁道, 2020, 31(增刊1): 114.  
FAN Qiaolian, SANG Zijie. Discussion on zero sequence protection of small resistance grounding power supply system in urban rail transit[J]. Electric Railway, 2020, 31(S1): 114.

· 收稿日期:2022-08-29 修回日期:2023-02-01 出版日期:2024-10-10

Received:2022-08-29 Revised:2023-02-01 Published:2024-10-10

· 通信作者:张目然,高级工程师,zhangmuran@gzmttr.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www. umt 1998. tongji. edu. cn