

基于布尔逻辑运算的地铁直流牵引供电系统 直流母线过流保护方案研究*

刘禹兴¹ 郑淳淳¹ 赖沛鑫² 谢金莲² 谢悦海² 刘雅杰²

(1. 广州地铁集团有限公司, 511430, 广州; 2. 广州市扬新技术研究有限责任公司, 510460, 广州)

摘 要 [目的]为实现地铁直流牵引供电系统直流母线过流保护的精准判断,提升该系统故障跳闸的选择性,在不增加设备及电流采样回路的基础上,需对直流母线过流保护方案进行研究。[方法]对地铁直流牵引供电系统在不同运行状态下与直流母线连接的各回路的电流方向及保护动作情况进行分析,利用布尔逻辑运算提炼整理出母线过流保护的逻辑判断依据。对基于 GOOSE(面向通用对象的变电站事件)信息交互的工程实施方案,进行了直流母线过流保护逻辑节点的扩展。搭建基于 HSR(高可用性无缝冗余)的环形网络结构测试平台,对直流牵引供电系统在正常运行、母线故障、直流进线上端故障及直流馈线故障等4种情况进行模拟分析。[结果及结论]设计的通过检测直流母线上进出线的正向过流保护动作情况来判断母线故障的方案,可以满足保护动作的可靠性与快速性要求,是一种集低成本、高可靠、实施简单等优点于一体的直流母线保护方案。该方案能实现母线故障的可靠跳闸,满足保护装置对选择性和速动性的要求。

关键词 地铁; 直流牵引供电系统; 直流母线过流保护方案; 布尔逻辑运算

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.20245670

DC Bus Overcurrent Protection Scheme in Metro DC Traction Power Supply System Based on Boolean Logic Calculation

LIU Yuxing¹, ZHENG Chunchun¹, LAI Peixin², XIE Jinlian², XIE Yuehai², LIU Yajie²

(1. Guangzhou Metro Group Co., Ltd., 511430, Guangzhou, China; 2. Guangzhou Yangxin Technology Research Co., Ltd., 510460, Guangzhou, China)

Abstract [Objective] To enable accurate determination of DC (direct current) bus overcurrent protection in metro DC traction power supply system and enhance the selectivity of fault tripping in the system, the research on a suitable DC bus overcurrent protection scheme is required without increasing

equipment or current sampling circuits. [Method] The current direction and protective operation status of various circuits connected to the DC bus are analyzed under various operating conditions of metro DC traction power supply system. Boolean logic calculations are used to extract and refine the logical basis for bus overcurrent protection. An engineering implementation scheme based on GOOSE (generic object-oriented substation event) information exchange is proposed, with an extension of the logical nodes for DC bus overcurrent protection. A circular network test platform based on HSR (high-availability seamless redundancy) is constructed to simulate and analyze the following four scenarios of DC power supply system: normal operation, bus fault, upstream fault on the DC incoming line, and DC feeder fault. [Result & Conclusion] The proposed scheme could determine bus faults by detecting forward overcurrent protection actions on incoming and outgoing lines of the DC bus. It meets the requirements for protection reliability and speed, offering a DC bus protection solution that integrates low cost, high reliability, and simple implementation. The scheme ensures reliable tripping for bus faults and satisfies the selectivity and rapid response requirements of protection devices.

Key words metro; DC traction power supply system; DC bus overcurrent protection scheme; Boolean logic operation

直流牵引供电系统是地铁列车所需的重要电源,其安全可靠运行对于地铁列车正常运行至关重要。然而,在运行过程中,该系统可能会产生各种故障和不正常运行状态,这不仅威胁到电气设备的安全,也会对人身安全造成风险。短路故障是一种最危险的故障类型,需要配置相应的保护功能才能确保系统的安全可靠运行^[1]。目前,直流牵引供电系统一般配置逆流保护、大电流脱扣保护、电流上升率、电流增量保护、低电压保护、框架电流保护等保护功能^[2-8],以实现直流进线、直流馈线和负极

* 广州市扬新技术研究有限责任公司科研项目(Y270YF24073)

柜的保护。该系统未配备专用的母线保护装置,母线故障通过直流进线的大电流脱扣保护来切除。然而,当直流馈线出现短路故障时,同样可能触发直流进线大电流脱扣保护动作,导致停电范围扩大,不满足保护装置对选择性的要求。

随着轨道交通行业的兴起,行业内对于直流牵引母线的保护也进行了深入的研究。文献[9]采用直流母线差流的方式来实现母线故障的精准判断与快速跳闸,该方式可以很好地区别区内故障与区外故障,但需配置一套专门的母线保护装置,并对母线上所有的支路电流进行同步采样,存在施工复杂且成本高的问题。文献[10]提出设定专用装置采集比较各支路的差流值来判断母线故障,可以有效区分区内故障与区外故障,但需单独配置设备以及敷设采样、联跳回路,安装和维护成本较高。

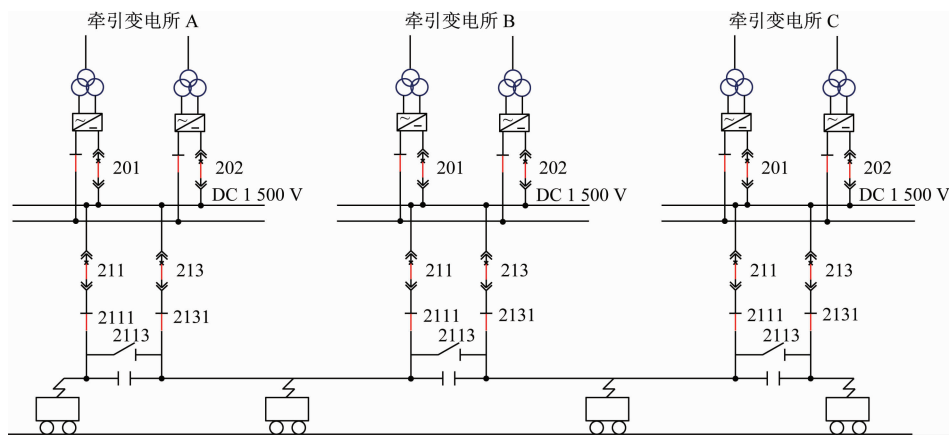
35 kV 及以下电压等级配网的母线保护通常采用过流继电器原理,并与馈线保护配合,此类保护称为简易母线保护^[11]。本文基于直流牵引供电系统的运行电流特征,结合简易母差的原理,提出了一种基于布尔逻辑运算的地铁直流牵引供电系统

母线过流保护实现方案,通过识别同一母线上直流进、馈线的保护装置是否启动过流保护来判别故障。该方案可以在不增加母线保护装置,也不需采集各支路电流的情况下,实现直流母线过流保护的精准判断。

1 直流牵引供电系统运行方式及其故障电流特征

直流牵引供电系统的运行方式一般分为单边供电方式、双边供电方式和大双边供电方式 3 种^[12]。在正线的首、末端站点通常采用单边供电方式,中间站点采用双边供电方式。

在图 1 所示的牵引变电所 A、B、C 中,牵引变电所 C 向线路末端供电分区馈电时采用单边供电方式,牵引变电所 A、B 的供电分区采用双边供电方式,由牵引变电所 A 的 213 馈线回路与牵引变电所 B 的 211 馈线回路为同一供电分区馈电。当牵引变电所 B 退出运行,则通过该牵引变电所越区隔离开关 2113 实现牵引变电所 A、C 越区给 AB、BC 区间供电,从而构成大双边供电。



注:201、202 为牵引变电所的直流进线回路;211、213 为牵引变电所的直流馈线回路;2111、2131 为上网隔离开关编号;2113 为越区隔离开关编号。

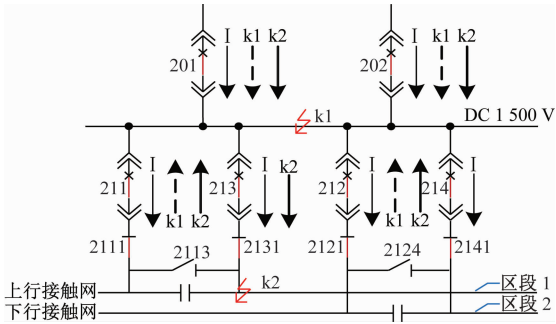
图 1 直流牵引供电系统供电方式

Fig. 1 Power supply modes of DC traction power supply system

直流母线是直流牵引的核心组成部分之一,连接着直流进线开关与馈线开关,起着牵引动力汇集与分配的作用。正常运行时,各个车站的直流馈线开关处于闭合位置,各车站的直流母线充当一条连通的长母线。因此,由于列车运行状态的变化,负荷电流呈现动态波动,导致故障分析的复杂度大幅增加。下文对单边供电与双边供电的正常运行情况,以及系统不同位置故障时的电流大小及方向特

征进行分析。

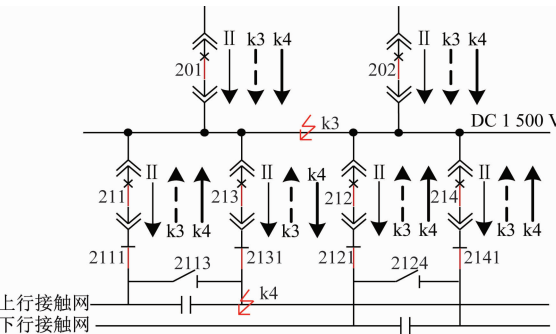
按照正常负荷的电流方向,设定进线开关流入母线的电流为正方向,直流馈线开关流出母线的电流为正方向,则单边供电与双边供电运行方式下的电流方向示意图见图 2 和图 3。两种供电运行方式下正常运行及不同位置故障时的电流方向和过流启动,见表 1 和表 2。



注:212、214 为牵引变电所的直流馈线回路;2121、2141 为上网隔离开关编号;2124 为越区隔开关编号;I 为单边供电方式下正常运行时的电流方向;k1、k2 分别为单边供电方式下直流母线故障与直流馈线故障时的电流方向。

图 2 单边供电方式电流方向示意图

Fig. 2 Diagram of unilateral power supply mode current flow direction



注:II 为双边供电方式下正常运行时的电流方向;k3、k4 分别为双边供电方式下直流母线故障与直流馈线故障时的电流方向。

图 3 双边供电方式电流方向示意图

Fig. 3 Diagram of bilateral power supply mode current flow direction

由于正常运行时,随着列车的运行位置不同,其负荷电流存在不同站相互支援的情况,导致负荷电流方向发生变化。为精确区分母线故障,需将不同保护间隔下的电流方向与过流启动两个状态信息相结合。

以上问题可以转化为布尔代数中的逻辑运算问题。假设有 n 个对象,每个对象有两个参数 A 和 B ,其取值均为 0 或 1。将每个对象参数看作 1 个布尔变量,即 A 和 B 的取值分别对应 true 和 false。将每个对象的状态表示为 1 个长度为 2 的布尔向量。设第 i 个对象的状态为 $S_i = [A_i \ B_i]$,则可以将所有对象的状态表示为 1 个 n 行 2 列的矩阵。

假设 201、202、211、212、213、214 分别为 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 、 S_6 ,母线发生故障为 P ,则 P 可以表示为:

$$P = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 & A_4 & A_5 & A_6 \\ B_1 & B_2 & B_3 & B_4 & B_5 & B_6 \end{bmatrix}^T$$

表 1 单边供电方式下的电流方向和过流启动

Tab.1 Current direction and overcurrent start-up under unilateral power supply mode

回路编号	项目	正常运行	k1 故障	k2 故障
201	电流方向	+	+	+
	过流启动	0	1	1
202	电流方向	+	+	+
	过流启动	0	1	1
211	电流方向	+	-	-
	过流启动	0	0	0
212	电流方向	+	-	-
	过流启动	0	0	0
213	电流方向	+		+
	过流启动	0	0	1
214	电流方向	+		
	过流启动	0	0	0

注:“+”表示电流方向为正方向;“-”表示电流方向为反方向;“0”代表过流保护未启动;“1”代表过流保护启动;表 2 同。

表 2 双边供电方式下的电流方向和过流启动

Tab.2 Current direction and overcurrent start-up under bilateral power supply mode

回路编号	项目	正常运行	k3 故障	k4 故障
201	电流方向	+	+	+
	过流启动	0	1	1
202	电流方向	+	+	+
	过流启动	0	1	1
211	电流方向	+	-	-
	过流启动	0	0	0
212	电流方向	+	-	-
	过流启动	0	0	0
213	电流方向	+	-	+
	过流启动	0	0	1
214	电流方向	+	-	-
	过流启动	0	0	0

由表 1 和表 2 可知,当 $S_1 = [1 \ 1]$, $S_2 = [1 \ 1]$, $S_3 = [0 \ 0]$, $S_4 = [0 \ 0]$, $S_5 = [0 \ 0]$, $S_6 = [0 \ 0]$ 时,命题为真。

则直流牵引母线故障的特征可表述为:直流进线均发生正向过流保护动作,且所有馈线回路未发生正向过流保护动作。

大双边供电方式与双边供电方式的供电结构一致,仅在供电区间长度上有所不同。在直流牵引

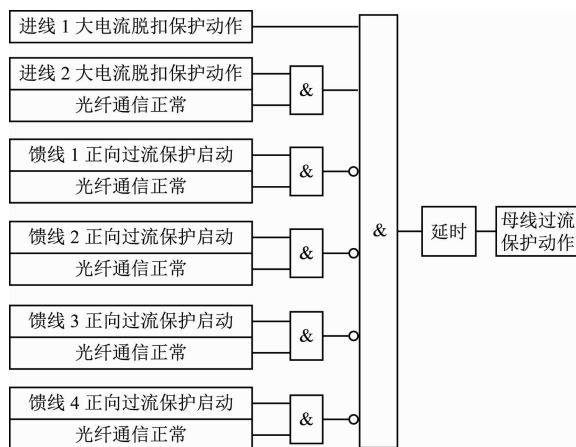
供电系统正常运行、母线和馈线故障的情况下,负荷电流与故障电流的流向与双边供电方式一致,此处不再重复阐述。

2 直流母线过流保护方案

2.1 直流母线过流保护方案原理

基于以上分析,可以通过检测直流进线和直流馈线的正向过流保护动作情况来判断故障类型。以常规的直流牵引供电系统为例,当直流进线 201、202 发生正向过流保护动作,同时直流馈线 211、212、213、214 均未发生正向过流保护启动时,判断该故障为母线故障^[13],母线保护动作;当直流进线 201、202 发生正向过流保护动作,同时任一直流馈线 211、212、213、214 发生正向过流保护启动时,判断该故障为馈线故障,需要闭锁母线保护。采用布尔逻辑运算可将 P 表示为: $P = S_1 \cap S_2 \cap (\neg S_3) \cap (\neg S_4) \cap (\neg S_5) \cap (\neg S_6)$ 。当 $S_1 = [1 \ 1]$, $S_2 = [1 \ 1]$, $S_3 = [0 \ 0]$, $S_4 = [0 \ 0]$, $S_5 = [0 \ 0]$, $S_6 = [0 \ 0]$ 同时满足时,命题为真。

直流进线配置的大电流脱扣保护为正向过流保护,可采用大电流脱扣保护作为回路发生正向过流保护动作的依据。鉴于现有微机保护装置的强大处理功能,本方案将直流母线过流保护功能设置在既有的进线保护装置中。直流母线过流保护动作逻辑见图 4。



注:&为逻辑与。

图 4 直流母线过流保护动作逻辑

Fig. 4 DC bus overcurrent protection action logic

直流母线过流保护功能的实现涉及多台装置进行信息交互。基于 IEC 61850 系列标准的 GOOSE(面向通用对象的变电站事件)光纤通信技

术可实现保护装置间的快速信息交互^[14],相较于传统的电缆硬接线,具有灵活、功能强大、经济、可视化等优点,推荐采用 GOOSE 通信方式完成保护装置间的快速信息交互。另外,为解决由于 GOOSE 通信故障而引起的保护误动问题,本方案在保护逻辑中增加了装置间光纤通信状态信息的监测。

在实际工程中,对直流进线 1 和进线 2 都配置了直流母线保护功能。以直流进线 1 配置的直流母线保护功能为例,各装置的运行情况如下:

在直流系统中,各回路保护装置通过方向过流元件来判断本回路的保护动作情况,并通过间隔层 GOOSE 网络共享信息。进线 2 以 GOOSE 通信方式将大电流脱扣动作的信号共享给进线 1,馈线 1、馈线 2、馈线 3、馈线 4 也以同样的方式将正向过流启动的信号共享给进线 1。进线 1 通过逻辑判断和控制指令的输出,实现母线过流保护的动作或闭锁。当判定条件满足时,经过一定延时后,输出母线过电流保护动作指令;当判定条件不满足时,可实现保护装置间的可靠闭锁。

直流母线过流保护包含了直流进线间隔和其他间隔的保护动作信息,为了满足信息交互的需求,需要构建直流母线过流保护的逻辑节点。

2.2 直流母线过流保护建模

直流母线过流保护包含了连接在同一母线上的直流进出线的正向过流保护启动和装置通信状态信息。DL/T 860.5—2006 定义了 PDOC(交流方向过电流保护)逻辑节点,直流母线过流保护可引用 PDOC 逻辑节点进行建模。在 DL/T 860.74—2014 中, PDOC 逻辑节点引用 PTOC(交流定时限过流保护)逻辑节点进行建模,PTOC 逻辑节点定义了本间隔的状态信息及定值信息,不包括本间隔外的正向保护动作信息和装置通信状态信息。基于 PTOC 逻辑节点,通过扩展其他间隔的正向保护动作数据对象和装置通信状态信息数据对象,可构建 PDBOC(直流母线过流保护)逻辑节点。

基于母线过流保护逻辑图进行数据对象的扩展,新增如下数据对象:5 路正向过流保护启动状态、5 路链路通信状态。正向过流保护启动状态的数据对象名分别为 FwdOCStu1(正向过流保护启动状态 1)、FwdOCStu2(正向过流保护启动状态 2)、FwdOCStu3(正向过流保护启动状态 3)、FwdOCStu4(正向过流保护启动状态 4)、FwdOCStu5(正向过流保护启动状态 5),链路通信状态的属性名分别为

ComStu1(链路通信状态 1)、ComStu2(链路通信状态 2)、ComStu3(链路通信状态 3)、ComStu4(链路通信状态 4)、ComStu5(链路通信状态 5)。其中正向过流保护启动状态是由同一母线上其他回路的保护装置传输而来的(对应进线 2、馈线 1、馈线 2、馈线 3、馈线 4),其他回路的保护装置利用现有模型的信息进行转发,不需新增逻辑节点。链路通信状态则由本间隔保护装置自行判断获得,根据本装置在 10 ms 内是否接收到接收装置的 GOOSE 信息来判断。本次新增数据对象均为状态信息,根据 DL/T 860.73—2013 中的 CDC(公共数据类)选择 SPS(单点状态信息)作为新增数据对象的属性类别^[15]。直流母线过电流保护逻辑节点类数据如表 3 所示。

3 基于高可用性无缝冗余环形网络结构的组建与配置

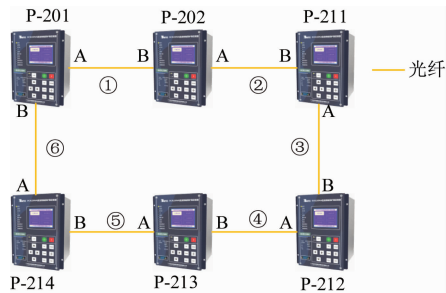
IEC 61850 系列标准将变电站自动化系统的功能体系划分为站控层、间隔层、过程层三个层次分明的逻辑架构^[16],通过分层分布式设计实现控制、保护、测量等功能的高效协同与标准化交互。直流母线过流保护方案主要涉及间隔层网络,保护装置利用间隔层网络实现母线过流保护的跳闸与闭锁信号交互。基于通信网络的信息交互方案,通信网络的可靠性对保护功能的影响较大,为增加系统的可靠性,需进行冗余配置。间隔层网络冗余组网模式主要有双星型网络、基于交换机的环形网络、HSR(高可用性无缝冗余)环形网络等 3 种结构。直流牵引供电系统的开关柜均安装在同一个配电室,从接线便捷性与经济性考虑,本方案采用基于 HSR 的环形网络结构来提高通信系统的可靠性^[17]。每个直流回路配置 1 台保护装置,完成本间隔信号的遥测信息采集与保护动作信号输出,各间隔的保护装置的两个光口通过光纤以手拉手的方式组成 1 个环形网络,搭建光纤网络结构,实现装置间的信息传输。

基于 HSR 的环形网络系统正常运行时,HSR 环形网络内的保护装置的两个端口同时发送、接收、转发数据。间隔层组网结构图如图 5 所示。图 5 中,P-201 保护装置可通过 ①→②→③→④→⑤→⑥ 和 ⑥→⑤→④→③→②→① 两条路径进行报文的传输。当网络出现单一断点时,报文可从另一方向传输,确保了数据传输的可靠性。

表 3 直流母线过电流保护逻辑节点类数据
Tab.3 Class data of DC bus overcurrent protection logic nodes

项目	数据对象名	属性	说明	M/O
公用节点信息	Mod	INC	模式	M
	Beh	INS	性能	M
	Health	INS	健康状态	M
	NamPlt	LPL	铭牌	M
状态信息	Str	ACD	启动	M
	Op	ACT	动作	M
	TmASt	CSD	活动曲线特征	O
	FwdOCStu1	SPS	正向过流保护启动状态 1	M
	ComStu1	SPS	链路通信状态 1	M
	FwdOCStu2	SPS	正向过流保护启动状态 2	M
	ComStu2	SPS	链路通信状态 2	M
	FwdOCStu3	SPS	正向过流保护启动状态 3	M
	ComStu3	SPS	链路通信状态 3	M
	FwdOCStu4	SPS	正向过流保护启动状态 4	M
定值	ComStu4	SPS	链路通信状态 4	M
	FwdOCStu5	SPS	正向过流保护启动状态 5	M
	ComStu5	SPS	链路通信状态 5	M
	TmACrv	定值曲线	动作曲线类型	O
	StrVal	ASG	启动值	M
	TmMult	ASG	时间标度倍率	O
	MinOpTmms	ING	最小动作时间	O
	MaxOpTmms	ING	最大动作时间	O
	OpDlTmms	ING	动作延时	M
	TypRsCrv	ING	返回曲线类型	O
	RsDlTmms	ING	复位延时	O
	DirMod	ING	方向模式	M

注:INC 为可控的整数状态;INS 为整数状态;LPL 为逻辑节点铭牌;ACD 为方向保护激活信息;ACT 为保护激活信息;CSD 为曲线形状描述;ASG 为模拟定值;ING 为整数状态定值。M 为强制属性;O 为可选属性。



注:P-201、P-202、P-211、P-212、P-213、P-214 为保护装置的编号;A、B 表示保护装置两个 GOOSE 通信接口。

图 5 间隔层组网结构图

Fig.5 Diagram of inter-layer unit network structure

4 测试验证

按照图 5 的组网结构搭建测试平台,采用直流继电保护测试仪为保护装置加遥测量的方式来模拟故障,分别验证测试平台正常运行、d1 点母线故障、d2 点进线上端故障及 d3 点馈线故障等 4 种情况,以及通信网络发生单点故障、双点故障情况下保护动作的情况。其中:直流进线大电流脱扣的一次定值为 8 000 A,直流进线逆流保护的一次定值为 500 A,直流馈线正向电流保护的一次定值为 5 000 A,母线过流保护延时定值为 20 ms。故障电流按定值的 1.20 倍进行测试,正常电流按定值的 0.85 倍进行测试。故障测试示意图见图 6。

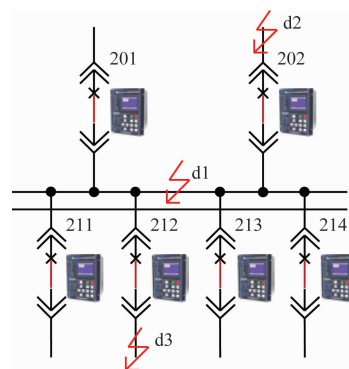


图 6 故障测试示意图

Fig. 6 Diagram of fault test

直流母线保护动作情况如表 4 所示。

表 4 直流母线保护动作情况

Tab.4 Protection action of DC bus

项目	不同编号回路下的电流/A						动作情况	动作时间/ms
	201 回路	202 回路	211 回路	212 回路	212 回路	214 回路		
正常运行	6 800	6 800	4 250	4 250	4 250	4 250	不动作	
d1 点母线故障	9 600	9 600	0	0	0	0	动作	25.0
d2 点进线上端故障故障	9 600	-600	0	0	0	0	不动作	
d3 点馈线故障	9 600	9 600	0	7 200	0	0	不动作	
d1 点母线故障,①断开	9 600	9 600	0	0	0	0	动作	25.7
d1 点母线故障,③断开	9 600	9 600	0	0	0	0	动作	26.0
d1 点母线故障,⑤断开	9 600	9 600	0	0	0	0	动作	26.5
d1 点母线故障,①③断开	9 600	9 600	0	0	0	0	不动作	

由表 4 可见:仅当两路直流进线的正向过流保护动作,且直流馈线任一回路正向过流不动作的情况下,直流母线过流保护动作。本方案能实现母线故障的可靠跳闸,满足保护装置对选择性和速动性的要求。

5 结语

本文设计了通过检测直流母线上进出线的正向过流保护动作情况,来判断母线故障的方案。该方案可以在不增加独立母线设备及单独电流采样回路的条件下,通过 GOOSE 通信完成母线过流动作的逻辑判断。其保护的可靠性与速动性都能满足现场需求,是一种集低成本、高可靠、实施简单等优点于一体的直流母线保护方案。

参考文献

[1] 陈丽华,李学武.城市轨道交通供电系统继电保护[M].北

京:科学出版社,2014.

CHEN Lihua, LI Xuewu. Relay protection of urban rail transit power supply system[M]. Beijing: Science Press, 2014.

[2] 姜鑫伟.佛山地铁3号线直流馈线保护优化分析[J].内蒙古科技与经济,2024(22):132.

JIANG Xinwei. Analysis of Foshan Metro Line 3 DC feeder line protection optimization [J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2024 (22):132.

[3] 廖南杰.新型地铁牵引供电系统直流馈线保护研究[D].北京:北京交通大学,2024.

LIAO Nanjie. Research on DC feeder protection for new type metro traction power supply system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2024.

[4] 杨圣西,陈俊亦,秦嘉琪.直流系统框架保护技术在地铁工程中的应用[J].集成电路应用,2024,41(4):306.

YANG Shengxi, CHEN Junyi, QIN Jiaqi. Application of DC system framework protection technology in subway engineering[J]. Application of IC, 2024,41(4):306.

[5] 苏春明.城市轨道交通牵引供电交直流系统继电保护浅析[J].交通科技与管理,2024,5(4):21.

- SU Chunming. Analysis of urban rail transit traction power supply AC/DC system relay protection[J]. The Technology and Management of Transportation System, 2024, 5(4): 21.
- [6] 郝峰. 地铁直流逆流保护误动作分析[J]. 电气化铁道, 2023, 34(增刊2): 159.
- HAO Feng. Analysis of maloperation in metro DC reverse current protection[J]. Electric Railway, 2023, 34(S2): 159.
- [7] 王开康. 基于光纤数字通信的直流双边联跳保护方案[J]. 都市快轨交通, 2011, 24(4): 105.
- WANG Kaikang. DC two mutual transfer tripping protection design based on optical fiber digital communication[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2011, 24(4): 105.
- [8] 冯剑冰, 郑淳淳, 谢金莲, 等. 基于 GOOSE(面向通用对象的变电站事件)通信技术的直流牵引供电系统跨所域网络化保护方案[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(8): 205.
- FENG Jianbing, ZHENG Chunchun, XIE Jinlian, et al. Cross-substation networking protection scheme for DC traction power supply system based on GOOSE communication technology[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(8): 205.
- [9] 胡俊. 轨道交通牵引供电系统直流母线保护的研究与设计[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- HU Jun. Research and design of rail traffic traction power supply system DC bus bar protection[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [10] 中铁电气化勘测设计研究院有限公司. 一种城市轨道交通牵引变电所直流母线保护系统: 21026075.9[P]. 2021-12-31.
- China Railway Electrification Survey, Design and Research Institute Co., Ltd. A DC bus protection system for urban rail transit traction substations: 21026075.9[P]. 2021-12-31.
- [11] 张超, 谭建成, 韦化. 基于 IEC 61850 的简易母线保护[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 79.
- ZHANG Chao, TAN Jiancheng, WEI Hua. Simple bus protection based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 79.
- [12] 王靖满, 黄书明. 城市轨道交通供电系统技术[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2011.
- WANG Jingman, HUANG Shuming. Power supply system technology of urban rail transit[M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2011.
- [13] 刘禹兴, 谢金莲, 邝灿桐. 直流牵引供电系统母线故障越区供电自愈方案研究[J]. 电工技术, 2023(24): 74.
- LIU Yuxing, XIE Jinlian, KUANG Cantong. Study on cross-area supply-based self-healing scheme for bus faults of DC traction power supply system[J]. Electric Engineering, 2023(24): 74.
- [14] 吴仕平, 王汉林, 吕良君. 基于 GOOSE 机制的城市轨道交通中压环网继电保护方案优化[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(11): 91.
- WU Shiping, WANG Hanlin, LYU Liangjun. Optimization of UMT medium-voltage ring network relay protection based on GOOSE mechanism[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(11): 91.
- [15] 赖沛鑫, 刘雅杰, 郑淳淳, 等. 基于 IEC 61850 的交流环网进出线数字通信过电流保护探讨[J]. 机电工程技术, 2022, 51(12): 309.
- LAI Peixin, LIU Yajie, ZHENG Chunchun, et al. Discussion on digital communication overcurrent protection of incoming and outgoing lines of AC ring network based on IEC 61850[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2022, 51(12): 309.
- [16] 何磊. IEC 61850 应用入门[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- HE Lei. Introduction to IEC 61850 application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [17] 刘雅杰, 谢金莲, 赖沛鑫, 等. 基于 HSR 的地铁供电系统跨站网络化保护方案[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(9): 252.
- LIU Yajie, XIE Jinlian, LAI Peixin, et al. Cross-station networking protection scheme for metro power supply system based on HSR[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(9): 252.
- 收稿日期: 2024-10-14 修回日期: 2024-12-09 出版日期: 2025-07-10
Received: 2024-10-14 Revised: 2024-12-09 Published: 2025-07-10
- 第一作者: 刘禹兴, 工程师, liuyuxing@gzmttr.com
通信作者: 谢金莲, 工程师, 1043813020@qq.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