

适用于多种供电方式的节点联锁保护方法

李 钢¹ 胡荣远² 周劭亮¹ 刘 辉¹ 张 琮¹ 沈宇龙¹ 纪浩然¹ 殷照华¹

(1. 南京南瑞集团公司, 210061, 南京; 2. 国核电力规划设计研究院有限公司, 100095, 北京//第一作者, 正高级工程师)

摘 要 目的: 为了解决多电源供电系统目前存在的多个继电保护问题, 需对适用于多种供电方式的节点联锁保护方法进行分析研究。方法: 阐述了目前城市轨道交通供电系统继电保护存在的问题, 提出了节点联锁保护方法。用节点来界定相邻保护, 规定各种保护的正当方向指向, 通过正反方向判定, 确定电流顺向和逆向指向。着重研究了逆向闭锁式保护、允许式保护、逆向失灵保护的发信判据和动作判据。结果及结论: 结合应用举例证明了基于该方法的允许式保护和逆向闭锁式保护有效克服了传统无方向闭锁式保护在多电源系统可能的拒动问题, 且允许式保护的動作时限比传统无方向闭锁式保护允許的動作时限短。即使线路之间光纤纵差保护没有工作或没有配置, 该方法仍然能够对各种供电方式下的故障提供完备的保护。

关键词 城市轨道交通; 供电方式; 节点联锁; 继电保护; 相邻保护

中图分类号 U231.8

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.11.037

Node Interlocking Protection Suitable for Various Power Supply Modes

LI Gang, HU Rongyuan, ZHOU Shaoliang, LIU Hui, ZHANG Qiong, SHEN Yulong, JI Haoran, YIN Zhaohua

Abstract Objective: In order to solve the multiple relay protection problems in multi-power supply systems, it is necessary to analyze and study the node interlocking protection methods applicable to various power supply modes. Method: Problems existing in the relay protection of urban rail transit power supply system are elaborated, and the node interlocking protection method is proposed. The adjacent protection is defined by the node, and the positive direction of various protections is specified. The current forward and reverse directions are determined through positive and reverse direction judgement. The signaling criteria and action criteria for reverse blocking protection, permissive protection, and reverse failure protection are mainly studied. Result & Conclusion: Combining application examples, the effectiveness of permissive protection and reverse blocking protection based on this method is

proven in overcoming the possible refusal tripping problem of traditional non directional blocking protection in multi-power systems, and the action time delay of permissive protection can be shorter than that of traditional non directional blocking protection, even if the fiber optic differential protections between lines is not working or configured. This method can still provide complete protection against faults in various power supply modes.

Key words urban rail transit; power supply method; node interlocking; relay protection; adjacent protection

First-author's address Nanjing NARI Group Co., 210061, Nanjing, China

1 供电系统继电保护存在的问题

城市轨道交通交流中压环网供电系统中, 常在两个车站间设置光纤纵差作为主保护, 并按阶梯式原则设置定时限过流保护作为后备保护。主保护和后备保护结合, 构成完备的保护。由于城市轨道交通供电主变电所有最大允许时限的要求, 若按阶梯式原则设置定时限过流保护, 保护级数太多, 难以保证满足主变电所允许时限的要求。此外, 环网通常采用双电源供电, 当供电从日常工作电源改为备用电源供电时, 靠近日常工作电源点的動作时限较长, 远离日常工作电源点動作时限较短的阶梯式動作时限要颠倒过来, 这并不易实现。

为此, 继电保护厂家采取了一些措施, 典型的措施是通过相互发送无方向的闭锁信号, 以防止过电流保护误动作。相互发送无方向信号时, 大多采用电缆传递接点方式^[1], 但该方式需考虑电缆线松脱或断裂、控制接点开合的继电器故障等问题, 这些问题可能会造成保护装置无法收到闭锁信号。

无方向闭锁信号也可通过如 GOOSE (面向通用对象的变电站事件) 等通信方式予以发送^[2-7]。其信号发送判据为: 电流超过 GOOSE 无方向闭锁式发信定值时, 发送无方向闭锁信号给相邻保护;

其动作判据为:电流超过 GOOSE 无方向闭锁式跳闸电流定值时,若未收到母线侧和线路侧其他相邻保护发送的任何 GOOSE 无方向闭锁信号,则 GOOSE 无方向闭锁式电流保护经延时后跳闸,切除故障。之所以需要闭锁信号,是为了在发生下级保护区域内的故障时,防止在下级保护动作切除之前上级保护越级误动。该方法存在以下两个问题:一是闭锁式保护没有收到相邻保护闭锁信号,可能是相邻保护程序发生问题,或存在硬件问题、交换机问题、连线/网线问题等,此时不能因没有收到闭锁信号而贸然采取跳闸措施,以避免越级跳闸造成误动,因此,闭锁式保护跳闸的时限通常设得较长,进而导致不能快速切除故障。辐射状单电源供电系统也存在此问题。二是如果采用多电源系统,保护可能会出现拒动。这是由于无方向闭锁保护信号具有无方向性的特点,这导致其不仅能向上级保护发送闭锁信号,也能向下级保护发送错误的闭锁信号,进而导致下级保护拒动。

在城市轨道交通实际的供电系统中,往往存在着多种多电源情况:为了不影响运营,城市轨道交通线路可能会采取不停电倒闸的工作方式,即短时长合上环网中的分段断路器及联络断路器,这会导致出现短时间内双电源同时供电的情况。

为了节能环保,越来越多的城市轨道交通线路采用了能量回馈装置和储能装置,即当列车刹车时,列车的动能转化为电能,并向中压环网回馈供电或储能;当列车起动时,该储能装置可输出电能。由于同一条线路上有多列电客车在运行,可视为城市轨道交通系统中动态地出现了多个电源。

在分布式发电和储能领域中,也存在类似的问题:风机在启动过程中呈负荷特性,在正常工作时呈电源特性,二者电流方向相反。同样地,储能充电时呈负荷特性,在放电时呈电源特性,二者电流方向相反。所以,新能源发电和储能也存在多电源点及电源点动态变化的情况。

区域供电系统(包括居住区和工厂等)的环网供电方式也存在与城市轨道交通中压供电系统相似的问题。

文献[8]对智能变电站简易母线保护进行了探讨,但该文以母线单元模块作为最小单元来组合实际系统,模块组合不太方便;该文假设电源潮流方向固定,不适用于原馈出线变为电源接入的情况。因此,该类论文仅限于母线保护,适用性不够广泛。

对于上述闭锁式保护问题和多电源问题,目前并没有系统性的解决方法,这给继电保护的功能设计和定值设定带来了新的挑战。为解决上述问题,本文提出一种适用于多种供电方式的节点联锁保护方法。

2 方法概述

该方法以节点为核心,适用于各种保护装置。这里的节点是指在电网一次系统中电气直接联系的点。节点包括分段左侧母线、分段右侧母线、无分段的母线及线路,其中,线路包括一根输电线路或 T 接线路。将与节点直接相连的断路器对应的保护装置简称为该节点的保护。直接连接到同一个节点的保护互为相邻保护。每个保护最多可相连两个节点。与节点间有时断开、有时闭合的断路器对应的保护,也属于该节点的保护范畴。

城市轨道交通交流中压供电系统如图 1 所示。图 1 中:有三个电源(电源 1、电源 2 及电源 3);A、B、C、E 均为车站;DL1(A1)为断路器(同时表示负责分合此断路器的保护装置),其中 DL 后面的 1 是断路器的编号,(A1)表示与 A 站的 1 号母线(以下简称“A 站 1 母”)相连,其余断路器的含义类似;LAB1 表示 A 站 1 母与 B 站 1 母直接相连的输电线路,其余线路的含义类似;k1 表示在 LBC1 输电线路上的可能的故障点,k2、k3 及 k4 的含义类似。

由图 1 可知:B 站 1 母为 1 个节点,包含的相邻保护分别为 DL1(B1)、DL2(B1)、DL3(B)及 DL4(B1);B 站 2 母为另外 1 个节点,包含的相邻保护分别为 DL1(B2)、DL2(B2)及 DL3(B)。其余相邻保护类似。

3 方法判据

在继电保护装置中设置节点联锁保护,包括无方向闭锁式保护、逆向闭锁式保护、允许式保护、无方向失灵保护、逆向失灵保护及联跳等方式,每种保护均包含联锁保护发信判据和动作判据两个部分。无方向闭锁式保护、无方向失灵保护及联跳的发信判据和动作判据均为传统方式,本文不再赘述。

1) 逆向闭锁式保护的发信判据为:最大相电流或零序电流大于闭锁式发信定值时,发送逆向闭锁信号给最大相电流或零序电流逆向指向的母线侧/线路侧。其动作判据为:当最大相电流或零序电流大于逆向闭锁式跳闸电流定值,且未收到电流顺

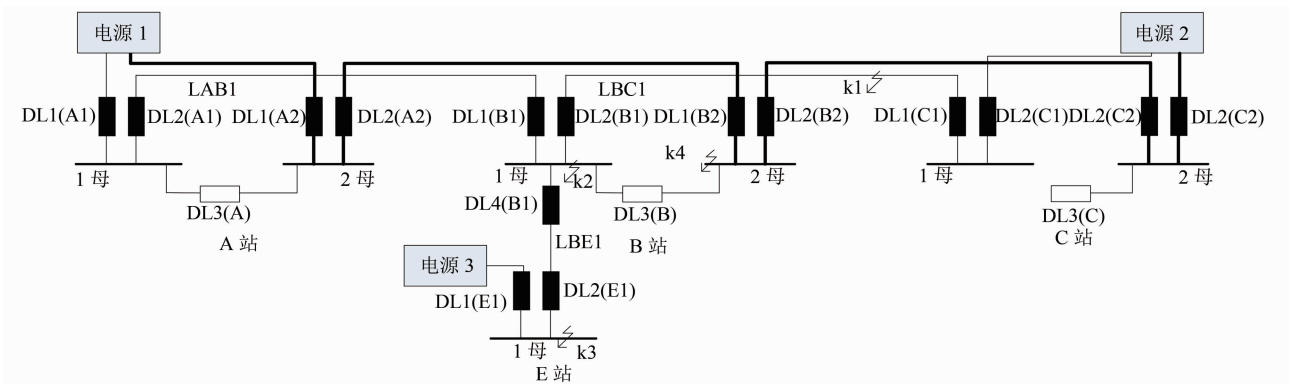


图 1 城市轨道交通交流中压供电系统图

Fig. 1 AC medium voltage power supply system diagram of urban rail transit

向指向的母线侧或线路侧任一相邻保护发送的逆
向闭锁信号时,在规定时延后跳闸。

2) 逆向失灵保护的发信判据为:最大相电流大
于无流门槛定值时,保护发出跳闸命令,经过发信
时延,发送逆向启动失灵信号给最大相电流逆向指
向的母线侧/线路侧。其动作判据为:当最大相电
流大于逆向失灵跳闸电流定值,且收到最大相电流
顺向指向的母线侧或线路侧任一相邻保护发送的
逆向启动失灵信号时,在规定时延后跳闸。

3) 允许式保护的发信判据有两个:一是当最大
相电流或零序电流大于顺向允许式发信电流定值
时,发送顺向允许信号给最大相电流或零序电流顺
向指向的母线侧/线路侧;二是当电流小于无流门
槛定值且收到任一相邻保护分相无方向闭锁信号
时,或在断路器处于合位、电压从额定电压变为
小于无压门槛定值时,发送无方向允许信号给所有
相邻保护。允许式保护的动作为:当最大相电
流或零序电流大于允许式跳闸电流定值,且收到电
流顺向指向的母线侧或线路侧所有相邻保护发送
的允许信号时,保护动作,切除故障。

4 技术路线

电流顺向指向和电流逆向指向是指将电流与
母线参考电压进行实时比较,判断出电流的流向,
将顺着电流流向方向称为电流顺向指向,将逆着电
流流向方向称为电流逆向指向。判别电流指向的
目的是让保护明确发送和接收联锁信号的方向,即
明确需要发送和接收联锁信号的对象,使得本文所
提方法能够适应短路电流方向不确定的情况。这
是本文所提方法的另一个技术核心。

本方法规定保护电流正方向指向线路侧,反方

向指向母线侧。对于分段或母联保护,则规定保护
电流正方向指向 1 母侧,反方向指向 2 母侧。当电
流判断为正方向时,电流顺向指向线路侧,电流逆
向指向母线侧;反之,当电流判断为反方向时,电流
顺向指向母线侧,电流逆向指向线路侧。

在保护中分别配置线路侧和母线侧的所有相
邻保护,该操作也可通过 GOOSE 的拉线完成。

平时在分位的断路器对应的保护,也参与保护
的联锁逻辑,以保证此保护对应的断路器合闸后的
联锁逻辑正确。如果保护退出运行,则将此保护置
于“检修位”,此时该保护不再参与相邻保护连锁信
号的判断。

相邻保护之间可通过 GOOSE 网、局域网、无线
网及硬接线传递接点信号等方式传递联锁信号;输
电线路两侧的保护则可通过光纤或载波等方式传
递联锁信号。

由于允许式保护、逆向闭锁式保护、无方向闭
锁式保护的安全性依次递减,因此,各保护整定的
动作时限应依次加长。这三种保护方式应相互配
合,构成完备的保护方案。

由于逆向失灵保护的安全性高于无方向失灵
保护,因此逆向失灵保护整定的动作时限可以短于
无方向失灵保护整定的动作时限。这两种保护方
式相互配合,以构成完备的失灵保护方案。

该方法兼顾了速动性和选择性,在不增加额外
保护装置的情况下,不仅能快速、准确切除线路故
障,还能快速、准确切除母线故障。

可以把电流判据改为阻抗判据,即用无方向阻
抗定值代替电流定值,方向判断采用方向阻抗。由
于电流与阻抗为倒数关系,只需将上文的各判据中
的“大于”改为“小于”,判据仍然适用。

某些区域供电系统存在子站没有断路器、只有隔离刀闸的情况,该类子站发生故障时,可依靠主站断路器跳闸,再通过子站自主操作或主站遥控等方式断开故障区域的隔离刀闸。该类故障下,可以把本文所提方法放入子站智能装置中,由故障区域的子站进行判断,在故障电流消失后自主断开隔离刀闸;也可以把子站的跳闸决策发送给主站,由主站遥控断开故障区域的隔离刀闸。

分布式电源大多通过逆变器并网,逆变器外短路时,逆变器的限流控制策略使得分布式电源不能提供明显的短路电流。该情况下的电流不像典型的短路电流那么大,但仍有可能超过传统的无方向闭锁式 GOOSE 联锁保护的闭锁发信电流定值,进而导致线路侧无方向闭锁式 GOOSE 联锁保护被误闭锁,不能跳闸。本文所提方法有效规避了此问题,当电流大于闭锁式发信电流定值时,发送逆向闭锁信号。由于在分布式电源采用逆变器供电情况下,逆向闭锁信号发送给分布式电源侧,而不是发送给线路侧,即不闭锁线路侧的逆向闭锁式 GOOSE 联锁保护,使得此保护能够正确动作。同理,允许式保护也能正确动作。

5 应用举例

结合图 1 的城市轨道交通交流中压供电系统,对本文所提方法在多种供电方式下不同故障点的各种保护动作行为进行详细的分析和说明。图 1 中:电源 1 和电源 2 为城市轨道交通的供电电源,可视为区域供电电源;电源 3 为城市轨道交通能量回馈系统的电源,也可视为区域供电系统及分布式发电、储能系统的电源。

假设两个车站之间线路两端的光纤纵差保护没有工作或没有设置,电源 1、电源 2、电源 3 均正常运行,B 站 1 母中 k2 点发生故障(此故障为母线故障),分析该情况下各种保护的動作行为:

1) 传统的无方向闭锁式保护的動作情况。该保护方式下,DL2(B1)保护故障相电流大于无方向闭锁式跳闸电流定值,但由于收到了 DL1(C1)、DL1(B1)及 DL4(B1)保护发送的无方向闭锁信号,保护拒动。同理,DL1(B1)及 DL4(B1)保护也拒动。

2) 逆向闭锁式保护的動作情况。在该保护方式下,DL2(B1)保护故障相电流大于逆向闭锁式跳闸电流定值,但未收到 DL1(C1)、DL1(B1)、

DL4(B1)及 DL3(B)发送的逆向闭锁信号,该保护正确跳闸,并通过 B 站与 C 站之间的光纤联跳 DL1(C1)。同理,DL1(B1)及 DL4(B1)保护也正确跳闸。故障相电流大于逆向闭锁式跳闸电流定值的其他所有保护(DL1(A1)、DL2(A1)、DL1(C1)及 DL2(C1)),因收到电流顺向指向的至少 1 个相邻保护发送的逆向闭锁信号,保护不会误跳闸。

3) 允许式保护的動作情况。在该保护方式下,DL2(B1)保护故障相电流大于允许式跳闸电流的定值,收到了 DL1(C1)、DL1(B1)、DL4(B1)及 DL3(B)发送的允许信号,该保护正确跳闸,并通过 B 站与 C 站间的光纤联跳 C 站的 DL1(C1)。同理,DL1(B1)及 DL4(B1)保护也正确跳闸。故障相电流大于允许式跳闸电流定值的其他所有保护(DL1(A1)、DL2(A1)、DL1(C1)及 DL2(C1)),因没有收到电流顺向指向的至少 1 个相邻保护发送的允许信号,保护不会误跳闸。

单电源及双电源下的保护動作行为类似,本文不再赘述。

由此可见,传统的无方向闭锁式保护方法在多电源情况下会出现拒动现象。

线路 LBC1 中 k1 点发生线路故障、E 站 1 母中 k3 点发生馈出母线故障、B 站 2 母中 k4 点在分段 DL3(B)合闸状态发生母线故障等,联锁保护的動作行为与上文所述 k2 点的動作行为类似,本文不再赘述。

6 结语

本文用节点来统一各种保护之间的关系,以此来界定各个节点的相邻保护,进而建立统一的节点联锁保护方法。该方法规定了各种保护的正方向指向,通过正反方向的判定来确定电流顺向和逆向指向。在此基础上提出允许式保护和逆向闭锁式保护,这两种保护方式克服了传统的无方向闭锁式保护在多电源系统可能出现的拒动问题。允许式保护不存在闭锁式保护需要等待闭锁信号的问题,所以在收到故障电流顺向指向的其相连节点所有相邻保护主动发送的允许信号时,可以快速跳闸,所以允许式保护的動作时限可以设置小于闭锁式保护的動作时限。

采用该方法后,只需要对本站保护,以及本站进出线对端的保护相互进行联锁,不需要其他站保护参与联锁即可实现全电网的联锁保护,其实施和

维护的难度较低。如果线路之间光纤纵差保护没有工作或没有配置,也能够对各种供电方式下的故障提供完备的保护。

该方法适用于单电源、双电源及多电源等各种供电方式,也适用于电源点动态变化及多个供电方向的供电系统。该方法适用于各种保护装置,适用于辐射状供电系统和环网供电系统,适用于城市轨道交通供电系统及其能量回馈系统、分布式发电和储能系统、区域供电系统等多个应用场合。

参考文献

- [1] 李钢,祝炎富,陆亦飞,等. 相互闭锁反向过流继电器在地铁交流供电系统中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2007, 10(6): 39.
- LI Gang, ZHU Yanfu, LU Yifei, et al. Characteristic of inter-block reverse overcurrent relay and its application in subway AC power system[J]. Urban Mass Transit, 2007, 10(6): 39.
- [2] 何歆. 两种数字电流保护在重庆轨道交通的应用探析[J]. 电工技术, 2018(19): 125.
- HE Xin. Analysis of the application of two types of digital current protection in Chongqing rail transit[J]. Electric Engineering, 2018(19): 125.
- [3] 刘晓晖,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] 李景坤. 地铁中压环网数字通信过电流保护方案[J]. 都市快轨交通, 2014, 27(3): 104.
- LI Jingkun. Overcurrent protection scheme of metro medium voltage ring network[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2014, 27(3): 104.
- [5] 黄皓,余臻,游晔. 数字化变电站低压母线保护的 GOOSE 通信研究[J]. 华东电力, 2011, 39(2): 221.
- HUANG Hao, YU Zhen, YOU Ye. Research on GOOSE communication for low-voltage bus protection in digital substation[J]. East China Electric Power, 2011, 39(2): 221.
- [6] 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.
- [7] 陈杰明. 基于 GOOSE 的 10 kV 简易母线保护研究和应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 96.
- CHEN Jieming. 10 kV bus protection research and application based on GOOSE[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 96.
- [8] 丁杰,杨前生,吕航,等. 智能变电站简易母线保护[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 197.
- DING Jie, YANG Qiansheng, LYU Hang, et al. Simplified bus protection for smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 197.

(收稿日期:2021-04-29)

(上接第 197 页)

- XIN Zuoxian, PEI Fangqiong, MENG Ke. BIM+IoT helps digital transformation of metro station operation and maintenance management—taking Shanghai rail transit line 18 project as an example[J]. China Engineering Consulting, 2022(S1): 78.
- [6] 娄亭. 轨道交通车站机电设备智能运维系统研究与实践[J]. 交通世界, 2022(18): 57.
- LOU Ting. Research and practice on intelligent operation and maintenance system of electromechanical equipment in rail transit station[J]. Transportation World, 2022(18): 57.
- [7] 邓波,徐建军,高建,等. 城市轨道交通智能运维建设监测

内容分析[J]. 甘肃科技纵横, 2022, 51(3): 4.

- DENG Bo, XU Jianjun, GAO Jian, et al. Intelligent operation and maintenance of urban rail transit monitoring content analysis[J]. Scientific & Technical Information of Gansu, 2022, 51(3): 4.
- [8] 宋宗霞. 城市轨道交通机电云建设方案探讨[J]. 交通建设与管理, 2019(6): 80.
- SONG Zongxia. Discussion on the construction scheme of electromechanical cloud for urban rail transit[J]. Transport Construction & Management, 2019(6): 80.

(收稿日期:2023-02-23)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

<http://umt1998.tongji.edu.cn>