

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.02.017

基于负荷开关的市域铁路中压环网快速保护与故障隔离方法

章楚添

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

摘要: 传统定时限过流保护在基于负荷开关的市域铁路中压环网中, 因逐级整定而导致速动性不足, 针对此问题, 提出一种基于差动电流的快速保护方法。该方法利用差动电流的故障特征定位故障区段, 并通过 GOOSE 网络将故障信息上传至主变电站, 由主变电站控制变配电所出线断路器跳闸, 实现快速保护。同时监测变配电所出线电流, 当变配电所出线电流下降至阈值时, 通过 GOOSE 网络发送指令, 控制故障区段两侧负荷开关跳闸, 完成故障隔离。故障隔离后控制变配电所出线断路器和开环点合闸, 恢复健全区域供电。仿真结果表明, 在不同故障类型、位置和过渡电阻情况下, 均能实现保护快速动作和故障有效隔离, 显著提高保护速动性, 为基于负荷开关的市域铁路中压环网的安全稳定运行提供可靠保障。

关键词: 市域铁路; 中压环网; 负荷开关; 保护方法; 故障隔离

中图分类号: U223

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)02-0135-11

Fast Protection and Fault Isolation Method for Load-Switch-Based Medium-Voltage Ring Networks in Urban Regional Railways

ZHANG Chutian

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063)

Abstract: To address the problem of insufficient operating speed caused by step-by-step setting coordination in traditional definite-time overcurrent protection for load-switch-based medium-voltage ring networks in urban regional railways, this paper proposes a fast protection method based on differential current. The fault section is identified using the fault characteristics of differential current, and the fault information is transmitted to the master station via the GOOSE network. The master station then controls the tripping of the outgoing circuit breaker at the substation to achieve rapid fault clearance. At the same time, the outgoing current of the substation is monitored. When the outgoing current drops below the preset threshold, a command is sent via the GOOSE network to control the tripping of the load switches on both sides of the fault section, completing the fault isolation. After fault isolation, the circuit breaker at the substation outgoing line and normally open point are closed to restore power supply to the healthy area. Simulation results show that under different fault types, locations, and transition resistances, the proposed method can achieve rapid protection operation and effective fault isolation, significantly improving protection speed and providing a reliable guarantee for the safe and stable operation of the load-switch-based medium-voltage ring network in urban regional railway systems based on load switches.

Keywords: urban regional railway; medium-voltage ring network; load switch; protection method; fault isolation

收稿日期: 2025-05-15 修回日期: 2026-01-08

作者简介: 章楚添, 男, 博士, 高级工程师, 从事铁路电力设计研究, 3315448618@qq.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFB2606300)

引用格式: 章楚添. 基于负荷开关的市域铁路中压环网快速保护与故障隔离方法[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(2): 135–145.

Zhang Chutian. Fast protection and fault isolation method for load-switch-based medium-voltage ring networks in urban regional railways[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(2): 135–145.

随着城市化进程的加快和交通运输需求的增长,市域铁路作为高效、绿色的交通方式,在提升通行效率、缓解交通压力、促进区域经济协同发展方面发挥关键作用^[1-4]。中压环网作为市域铁路供电系统的核心,其供电可靠性和安全性对于保证列车的正常运行至关重要^[5-8]。随着市域铁路中压环网安全可靠运行需求的提升,对其进行保护的重要性日益凸显。

传统中压环网多采用断路器作为开断元件,然而随着制造工艺的不断成熟,负荷开关因体积小、成本低、维护简便等优势,逐渐成为一种替代断路器的新选择。近年来,负荷开关代替断路器已应用实际工程,如鞍山有轨电车千山线采用负荷开关替代断路器,沿线各降压所采用 SF6 负荷开关作为环网开关,显著提高了经济效益^[9]。

目前,中压环网仍沿用传统配电网保护方法,采用定时限过流保护,然而其按时间逐级整定配合的方式存在明显缺陷:当故障越靠近电源时,短路电流越大,但过电流保护切除故障的时限反而越长^[10],导致过流保护速动性差。

针对这一问题,学者们主要从两方面入手进行优化。一方面是改进保护原理,如文献[11]在配电网中为每个节点配置过流保护和低电压保护,基于故障线路一端断路器跳闸后另一端断路器所感知的工频电气量变化情况来加速保护动作,这种方法虽然提高了保护动作速度、缩短了故障切除时间,但需要额外增加低电压保护设备,投资成本升高,不符合改用负荷开关的初衷。文献[12]基于对侧断路器开断过程中产生的二次振荡波极性特征来加快本侧断路器动作速度,以提升保护速动性。文献[13]则利用单端故障测距结果来加快电力贯通线路中段保护动作速度,以解决铁路电力贯通线中过流保护故障切除时间过长的问题,然而,保护效果受测距结果精度的影响较大。另一方

面是从通信上入手,随着通信技术的快速发展,尤其是光纤通信和数字通信技术的广泛应用,保护装置之间进行大量状态信息实时交互成为可能。如文献[14]在地铁供电系统中将比相差动保护与比率差动保护相结合,构成双光纤差动,增强了保护的可靠性。文献[15]在地铁供电系统中采用数字电流选跳保护方法,通过专用光纤通信线路实现保护装置之间的信息交互,进一步根据电流阈值和逻辑判断快速定位故障点,所提方法无需时间配合,显著提高了继电保护的速动性。然而,上述从通信入手改善保护性能的研究多适用于基于断路器的供电系统,难以直接应用于基于负荷开关的市域铁路中压环网系统。

因此,本文针对基于负荷开关的市域铁路中压环网传统过流保护速动性差的问题,通过研究市域铁路供电系统的结构特点和供电特性,提出一种基于差动电流的快速保护方法。该方法利用差动电流实现故障区段判别,并借助 GOOSE 网络实现保护动作的远程联动控制。通过主站协调控制出线断路器和贯通线负荷开关,实现故障区域的快速隔离与非故障区域快速供电恢复。基于电磁暂态仿真软件(power systems computer aided design, PSCAD)的仿真结果表明,该保护方法在不同故障位置、类型和过渡电阻下,均能快速保护线路,提高保护方法的速动性,为基于负荷开关的中压环网故障处理提供一种高效、可实施的技术路径,具有良好的应用前景。

1 基于负荷开关的市域铁路中压环网

1.1 市域铁路中压环网拓扑

负荷开关和断路器在故障处理过程中各有利弊,综合二者的优点,在变配电所出线、箱变出线和开环点采用断路器,贯通线其他位置采用负荷开关,基于负荷开关的市域铁路中压环网典型拓扑如图1所示。图1中

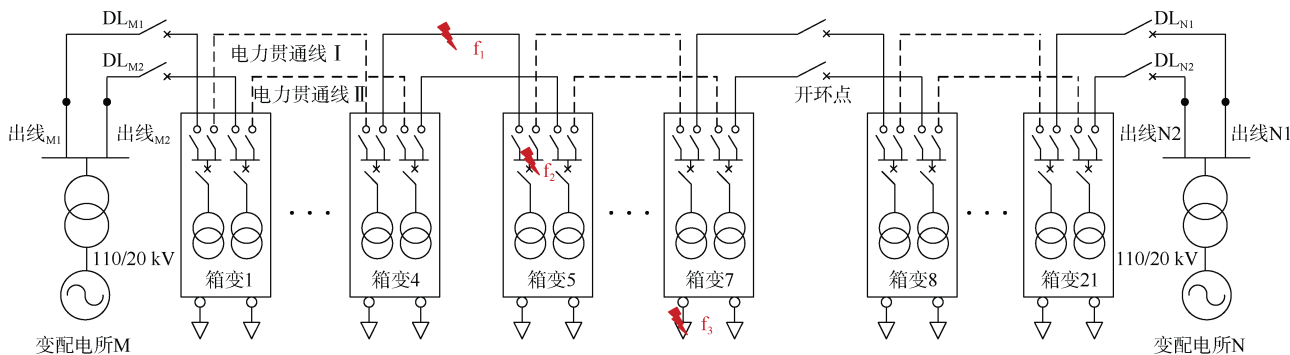


图1 基于负荷开关的市域铁路中压环网典型拓扑

Figure 1 Typical topology of a load-switch-based medium-voltage ring network in an urban regional railway

主要由变配电所、电力贯通线、箱变、变配电所出线断路器、箱变出线断路器、贯通线负荷开关和开环断路器^[16-17]等部分构成。对基于负荷开关的市域铁路中压环网,若检测到故障,则利用出线断路器断开电源,再断开负荷开关隔离故障,故障隔离后闭合出线断路器快速恢复供电。根据故障清除过程可以看出,故障的检测速度是进行快速故障隔离的关键。

1.2 故障特性分析

由于中压环网一般采用双环网结构,且两条电力贯通线结构对称,本文以一条贯通线为例进行故障特性分析。在实际中压环网中,单相接地故障是最常见的故障类型,而相间短路故障虽发生率较低,但会导致故障电流剧增,严重威胁系统稳定运行,因此以单相接地和相间短路故障为例,开展相关分析。

当图 1 中第 5 段电力贯通线上 f_1 位置发生 A 相金属性接地故障时,其变配电所出线电流 I_{out}^{M1} 如图 2 所示;故障电力贯通线两端电流及差动电流如图 3 所示,其中, I_{L1}^5 和 I_{L2}^5 分别为第 5 段电力贯通线两端电流, I_{Ld}^5 为该电力贯通线差动电流。

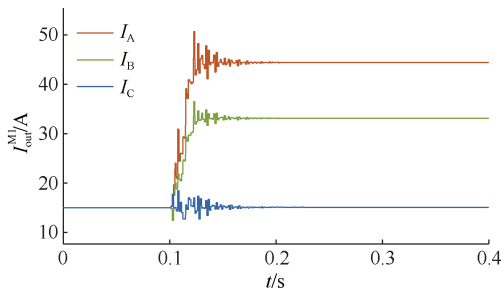


图 2 贯通线单相接地故障变配电所出线电流

Figure 2 Substation feeder outgoing current during a single-phase-to-ground fault on the power transmission line

由图 2 可知,故障发生后,变配电所出线故障相的电流在短时间内呈现急剧上升,其幅值可达正常负荷电流的 3 倍。由图 3 可知,该电力贯通线两端电流区别明显,其中左端 C 相电流基本保持额定值不变, A 相电流迅速增大,稳态值为 C 相电流的 4.5 倍;而另一侧则是 B 相电流最大,稳态值为额定值的 2 倍;此外, C 相电流减小至 5 A, A 相电流增加至 14 A。两端 A 相电流的差值从零迅速攀升,并在短时间内达到峰值 55 A,可以利用故障电流差值这一显著故障特征快速识别故障区段。

当图 1 中第 5 段电力贯通线上 f_1 位置发生 AB 相间金属性短路故障时,其变配电所出线电流 I_{out}^{M1} 如

图 4 所示;故障电力贯通线两端电流及差动电流如图 5 所示。

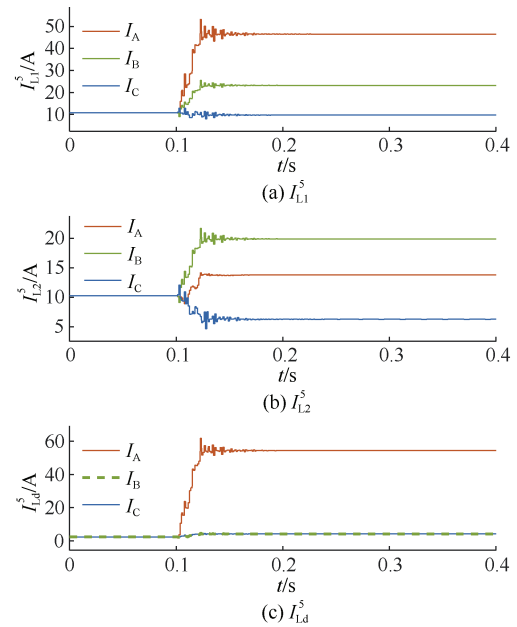


图 3 贯通线单相接地故障两端电流及差动电流

Figure 3 Currents at both ends and differential current during a single-phase-to-ground fault on the power transmission line

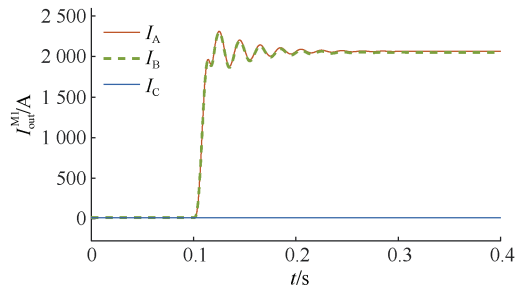


图 4 贯通线相间短路故障变配电所出线电流

Figure 4 Substation feeder outgoing current during a phase-to-phase short circuit on the power transmission line

由图 4 可知,故障发生后,变配电所出线故障相的电流在短时间内急剧上升,其幅值甚至达到正常负荷电流的 100 倍左右。由图 5 可知,该电力贯通线两端电流具有明显差别,两端 C 相电流基本保持额定值不变,但左端 AB 两相电流迅速增大,故障后电流稳态值为额定值的 200 倍左右;而另一侧 AB 两相电流迅速减小,故障后电流稳态值为额定值的一半。两端 A 相(或 B 相)电流差值从零迅速攀升,并在短时间内电流峰值达到 2 040 A,同样可以基于故障电流差值这一显著故障特征快速识别故障区段。

当图 1 中第 5 个箱变母线 f_2 位置发生 A 相金属性

接地故障时, 其变配电所出线电流 $I_{\text{out}}^{\text{M}}$ 如图 6 所示; 箱变母线的进出线电流及差动电流如图 7 所示, 其中, I_{B1}^5 和 I_{B2}^5 分别为第 5 个箱变母线的两条进线电流, I_{B3}^5 为该箱变母线流向变压器的出线电流, I_{Bd}^5 为 I_{B1}^5 、 I_{B2}^5 和 I_{B3}^5 的相量之和, 表示该箱变母线的差动电流。

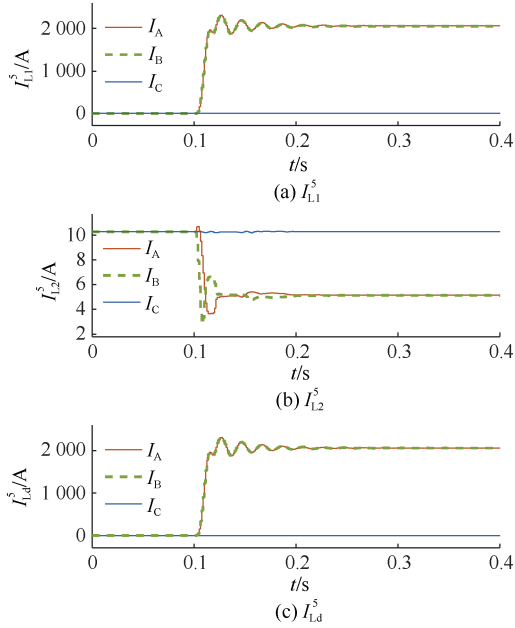


图 5 贯通线相间短路故障两端电流及差动电流

Figure 5 Currents at both ends and differential current during a phase-to-phase short circuit on the power transmission line

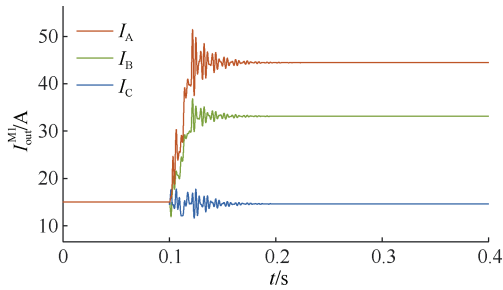


图 6 箱变母线单相接地故障变配电所出线电流

Figure 6 Substation feeder outgoing current during a single-phase-to-ground fault on a unit transformer busbar

由图 6 可知, 故障发生后, 变配电所出线故障相电流在短时间内急剧上升, 其幅值可达正常负荷电流的 3 倍。由图 7 可知, 该箱变母线进出线电流区别明显, 其中左端进线 C 相电流减小至 4.5 A, A 相电流迅速增大, 稳态值为额定值的 4.5 倍; 右端进线 B 相电流最大, 稳态值为额定值的 2 倍, C 相电流减小至 5 A, 而箱变出线三相电流均略微增加, 与额定值差距

不大。箱变母线的进出线 A 相电流的差值从零迅速攀升, 并在短时间内达到峰值 55 A, 可以利用故障电流差值这一显著故障特征快速识别故障区段。

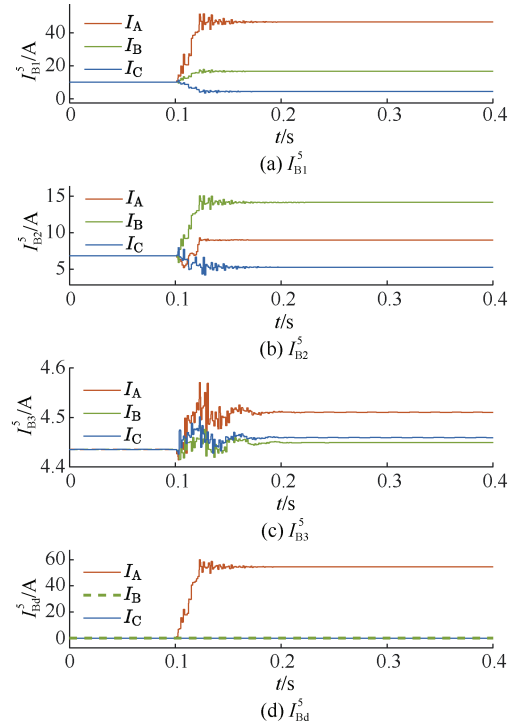


图 7 箱变母线单相接地故障进出线及差动电流

Figure 7 Incoming and outgoing currents and differential current during a single-phase-to-ground fault on a unit transformer busbar

2 基于差动电流的快速保护与故障隔离方法

2.1 快速保护原理

2.1.1 电力贯通线保护

由 1.2 节分析可知, 当电力贯通线发生故障时, 变配电所出线电流迅速增大, 金属性故障时可达额定电流的 3 倍, 被保护电力贯通线差动电流迅速增大至 55 A, 故障特征比较明显。

由于负荷开关不具有分断故障电流的能力, 基于负荷开关的中压环网故障时需要与变配电所出线断路器进行配合, 变配电所出线断路器先跳闸, 故障区段两端最近的负荷开关再跳闸, 基于此结合变配电所出线电流和贯通线差流设置电力贯通线保护判据, 如式(1)所示:

$$\begin{cases} I_{\text{out}}^{ij} > I_{\text{set_c}}^{ij}, i = \text{M, N, O} \cdots; j = 1, 2, 3 \cdots \\ I_{\text{Ld}}^x > I_{\text{set_Ld}}^x, x = 1, 2, 3 \cdots \end{cases} \quad (1)$$

式中, I_{out}^{ij} 为变配电所 i 的第 j 条出线的测量电流; I_{Ld}^x

为第 x 段电力贯通线差动电流, 其表达式为

$$I_{Ld}^x = |I_{L1}^x + I_{L2}^x| \quad (2)$$

式中, I_{L1}^x 和 I_{L2}^x 分别为被保护电力贯通线左端和右端两端测点采集的电流相量^[18]; 为保证在正常运行情况下保护不动作, 保护阈值 $I_{set_c}^{ij}$ 按躲过该条出线最大负荷电流整定, $I_{set_c}^{ij}$ 的表达式为

$$I_{set_c}^{ij} = \frac{K_{rel} K_{Ms}}{K_{re}} I_{out_max}^{ij} \quad (3)$$

式中, $I_{out_max}^{ij}$ 为变配电所 i 的第 j 条出线的最大负荷电流; K_{rel} 为可靠系数, 取值范围为 1.25~1.5^[19], 本文取 1.25; K_{Ms} 为自启动系数, 其取值大于 1, 本文取 1.05; K_{re} 为返回系数, 本文取 0.85^[20]。保护阈值 $I_{set_Ld}^x$ 按躲过正常运行情况下的最大不平衡电流整定, 一般不小于 0.1 倍的额定电流, 本文取值为 0.5 倍额定电流。

当第 x 段电力贯通线差动电流 I_{Ld}^x 超过预设的差动阈值 $I_{set_Ld}^x$, 且其变配电所出线电流 I_{out}^{ij} 超过预设的过流阈值 $I_{set_c}^{ij}$ 时, 判定该电力贯通线发生故障, 并通过 GOOSE 网络向主站发送故障信号。主变电站接收到故障信号后, 保护动作, 控制变配电所出线断路器跳闸, 切断故障电流, 然后断开电力贯通线故障线路两端的负荷开关。

2.1.2 箱变母线保护

由 1.2 节分析可知, 当电力贯通线发生故障时, 变配电所出线电流迅速增大, 金属性故障时可达额定电流的 3 倍, 被保护箱变母线差动电流迅速增大至 55 A, 故障特征比较明显, 基于此给出箱变母线故障的保护判据如式(4)所示:

$$\begin{cases} I_{out}^{ij} > I_{set_c}^{ij}, i = M, N, O \cdots; j = 1, 2, 3 \cdots \\ I_{Bd}^y > I_{set_Bd}^y, y = 1, 2, 3 \cdots \end{cases} \quad (4)$$

式中, I_{Bd}^y 为第 y 个箱变母线差动电流, 其表达式为

$$I_{Bd}^y = |I_{B1}^y + I_{B2}^y + I_{B3}^y| \quad (5)$$

式中, I_{B1}^y 和 I_{B2}^y 分别为被保护箱变母线的两条进线测点采集的电流相量; I_{B3}^y 为该箱变母线与变压器相连的箱变出线测点采集的电流相量。其保护阈值整定方式与电力贯通线保护类似, 不再赘述。

当第 y 个箱变母线差动电流 I_{Bd}^y 超过预设的差动阈值 $I_{set_Bd}^y$, 且为其供电的变配电所出线电流 I_{out}^{ij} 超过

预设的过流阈值 $I_{set_c}^{ij}$ 时, 判定该箱变母线发生故障, 并通过 GOOSE 网络向主变电站发送故障信号。主变电站接收到故障信号后, 保护动作, 控制变配电所出线断路器跳闸, 切断故障电流, 然后断开故障箱变母线的负荷开关。

2.1.3 箱变出线保护

由于保留了箱变出线断路器具有故障电流的分断能力, 当箱变 7 出线发生故障 f_3 时, 箱变出线电流故障增大, 故障特征明显, 基于此为其配置过流保护, 箱变出线保护的判据如下:

$$I_{B3}^y > I_{set_f}^y \quad (6)$$

式中, I_{B3}^y 为箱变母线与变压器相连的箱变出线测点的测量电流; $I_{set_f}^y$ 为保护阈值, 其整定方式与变配电所出线相同, 不再赘述。

当第 y 个箱变出线断路器电流 I_{B3}^y 超过预设的过流阈值 $I_{set_f}^y$ 时, 判定该箱变出线故障, 箱变出线断路器立即跳闸, 以切断故障电流, 同时完成故障隔离。

考虑市域铁路高峰/平峰负荷的波动特性, 本文方法通过对 K_{rel} 、 K_{Ms} 等参数采取较为保守的取值(1.25、1.05), 以确保平峰时段阈值不发生误动作、高峰时段不遗漏故障。在实际工程中, 若负荷波动差异较大, 可在既有阈值整定逻辑基础上, 引入实时负荷电流反馈, 实现阈值的动态自适应调整, 从而进一步提升保护性能。

2.2 故障信息通信方法

为实现中压环网的快速故障保护, 本文采用 GOOSE 网络进行故障信息的传输和交互, GOOSE 网络是基于 IEC 61850 标准的一种高速、可靠的通信机制。该机制允许装置之间通过以太网直接交换关键控制信息, 具备低延时、高实时性和发布-订阅式通信等特性, 能够满足毫秒级的保护动作响应要求。在基于负荷开关的市域铁路中压环网中, 利用 GOOSE 网络高优先级数据报文的广播机制, 可实现电流异常信息与故障区段信息的快速共享以及跳闸指令的迅速下发, 从而实现故障的快速识别与隔离。

本文在变配电所出线配置过流保护, 以快速响应电流异常; 针对箱变母线, 同步采集各进出线电流并求和, 以生成差动电流 I_{Bd} ; 针对电力贯通线, 则通过 GOOSE 网络将相邻箱变电流与本地电流实时叠加, 以生成差动电流 I_{Ld} , 从而准确识别故障区段; 依托 GOOSE 网络将故障区段信息传输至主变电站, 控制变配电所

出线断路器分合闸、负荷开关断开、开环点闭合, 实现故障快速隔离。

2.3 故障隔离方法

当变配电所出线断路器跳闸后, 线路将失电, 电流迅速降为零。因此, 可以通过检测变配电所出线电流判断该断路器是否已经跳闸成功, 断路器跳闸成功后, 通过 GOOSE 给故障区间两端负荷开关发送跳闸指令, 负荷开关跳闸判据如下:

$$\begin{cases} T_{\text{FLAG}} = 1 \\ I_{\text{out}}^{ij} < \varepsilon^{ij} \end{cases} \quad (7)$$

式中, T_{FLAG} 为变配电所出线断路器跳闸指令; ε^{ij} 为变配电 i 的第 j 条出线负荷开关的跳闸阈值, 按照该条出线的最大负荷电流 $I_{\text{out_max}}^{ij}$ 进行整定, 通常 ε^{ij} 远小于 $I_{\text{out_max}}^{ij}$ 以确保断路器跳闸后出线电流降至接近零的水平。 ε^{ij} 的表达式为:

$$\varepsilon^{ij} = K_s I_{\text{out_max}}^{ij} \quad (8)$$

式中, K_s 为相对于最大负荷电流 $I_{\text{out_max}}^{ij}$ 的比例系数, 考虑线路电容^[21]、电感等特性, 可能会存在一定的残余电流, 同时考虑采集装置的测量精度环境噪声等因素, 取值范围定为 0.05~0.1, 本文取 0.05。

负荷开关跳闸后实现故障区段切除, 进而通过 GOOSE 网络向箱变出线断路器与开环点发送合闸指令, 实现健全区域供电恢复。

2.4 方法流程

该方法的流程如图 8 所示。本文所提快速保护与故障隔离的主要步骤如下:

- 1) 在系统正常运行时, 保护装置对线路电流进行实时数据采样。
- 2) 对于箱变出线, 若箱变出线电流超过阈值, 则认为箱变出线发生故障, 箱变出线断路器立即跳闸, 故障切除。
- 3) 对于电力贯通线和箱变母线, 若同时满足过流判据和差动判据条件, 则认为被保护区段发生故障, 立即通过 GOOSE 网络向主站发送故障信号。
- 4) 主变电站接收到故障信号后, 立即发送命令控制线路首端的变配电所出线断路器跳闸, 以切断故障电流。
- 5) 系统检测到变配电所出线电流下降至预设阈值以下时, 确认断路器已成功跳闸, 随后发送命令控制故障区段的负荷开关跳闸, 以实现故障区段隔离。

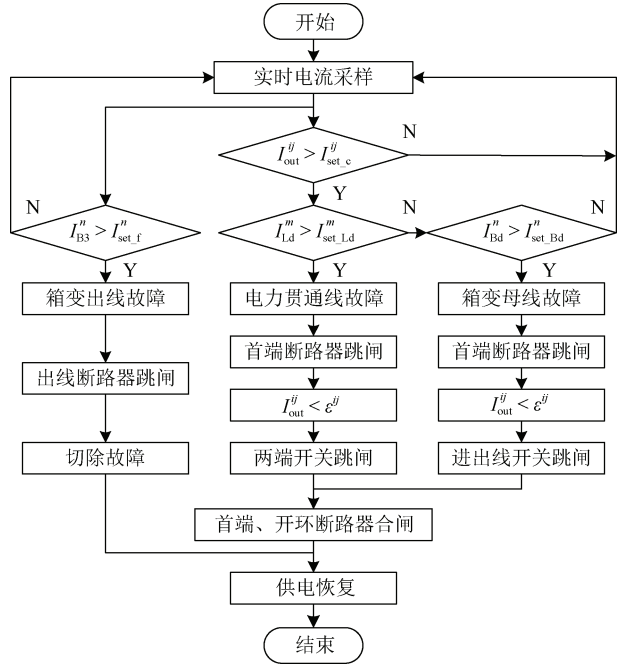


图 8 快速保护与故障隔离方法流程

Figure 8 Flowchart of the rapid protection and fault isolation method

6) 故障区段隔离成功后, 通过 GOOSE 网络向变配电所出线断路器与开环点发送合闸指令, 恢复供电, 确保市域铁路中压环网的正常运行。

该方法就地实现差动电流计算与故障判断, 仅将最终结果上送主变电站。该方法数据传输量小, 大幅减轻了通信压力和主变电站负担, 从而具备响应快、可靠性高、依赖度低的优点, 更符合市域铁路中压环网对快速保护与故障隔离的实际需求。

3 仿真验证

3.1 故障隔离方法验证

以温州市域铁路 S1 线两个 20 kV 变配电所之间的中压环网为例进行仿真验证, 拓扑如图 1 所示, 根据实际参数在 PSCAD 中搭建仿真模型。两变配电所额定电压为 20 kV, 容量为 10 MVA, 采样频率为 10 kHz。线路全长 28.2 km, 沿线共分布 21 座箱式变电站, 开环点位于箱变 7 与箱变 8 之间, 箱变接入位置如表 1 所示。变配电所出线 A1 的最大相负荷电流为 15.4 A, 则其过流判据阈值 $I_{\text{set_c}}^{\text{A1}}$ 为 23.2 A, 负荷开关跳闸阈值 ε^{ij} 为 0.98 A。箱变 3 出线最大负荷电流为 1.5 A, 则其保护判据阈值 $I_{\text{set_f}}^3$ 为 2.3 A。第 3 段电力贯通线的额定电流为 10.8 A, 则其保护的差动判据阈值 $I_{\text{set_Ld}}^3$ 为 5.4 A。第 5 个箱变母线的额定电流为 10.2 A, 则其保

护的差动判据阈值 $I_{\text{set_Bd}}^5$ 为 5.1 A。两变电所间通过电缆进行连接, 线路参数如表 2 所示。

表 1 箱变接入位置

Table 1 Connection locations of box-type substations

接电铁路里程	区段长度/km	接电铁路里程	区段长度/km
变配电所 A (DK17+900)	—	DK34+371	0
DK18+500	0.600	DK36+191	1.820
DK20+175	1.675	DK36+191	0
DK21+900	1.725	DK37+650	1.459
DK23+602	1.702	DK38+711	1.062
DK25+427	1.826	DK38+711	0
DK27+600	2.172	DK39+700	0.988
DK27+600	0	DK41+110	1.410
DK30+630	3.030	DK43+800	2.690
DK31+270	0.640	DK45+527	1.728
DK33+599	2.329	变配电所 B (DK46+100)	0.572
DK34+371	0.772		

表 2 线路参数

Table 2 Line parameters

相序	电阻/(Ω /km)	电抗/(mH/km)	电容/(μ F/km)
正序	0.099 1	0.583 9	0.166 5
零序	0.148 65	0.875 85	0.249 75

将故障点设置在第 3 段电力贯通线 midpoint 位置, 设置在 0.1 s 发生 C 相接地短路故障, 过渡电阻为 0.01 Ω , 变配电所出线电流如图 9 所示, 电力贯通线 3 差动电流如图 10 所示, 开关状态变化情况如图 11 所示。

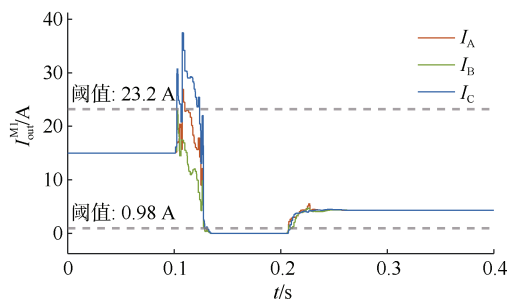


图 9 贯通线 3 单相接地故障变配电所出线电流
Figure 9 Substation feeder outgoing current during a single-phase-to-ground fault on power transmission line 3

如图 9 所示, 在 0.105 3 s, 变配电所出线断路器电流迅速上升, 电流峰值达到 38 A, 显著超过预设的过流阈值 23.2 A; 同时, 图 10 所示电力贯通线 3 的差动电流增至 40 A, 同样超过差动阈值 5.4 A。双重判据同时满足, 判定第 3 段电力贯通线发生故障, 保护动作, 随即通过 GOOSE 网络向变配电所出线断路器

发送跳闸指令, 变配电所出线断路器接收到跳闸指令进行跳闸操作。图 11 的断路器状态波形表明跳闸操作已成功执行。图 9 中系统在 0.128 8 s 检测到出线电流低于预设的阈值 0.98 A, 此时, GOOSE 网络向负荷开关发送跳闸指令。如图 11 所示, 电力贯通线 3 两端的负荷开关均在 0.128 8 s 进行可靠动作, 完成故障隔离。在 0.205 3 s, 变配电所出线断路器与开环断路器执行合闸操作, 成功恢复区域供电。

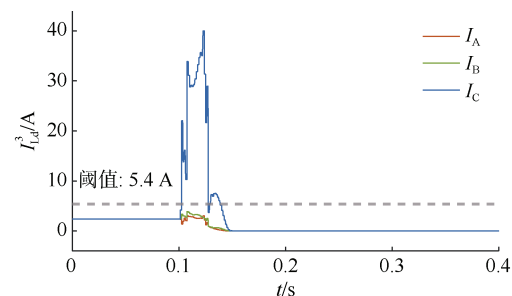


图 10 贯通线 3 单相接地故障差动电流
Figure 10 Differential current during a single-phase-to-ground fault on power transmission line 3

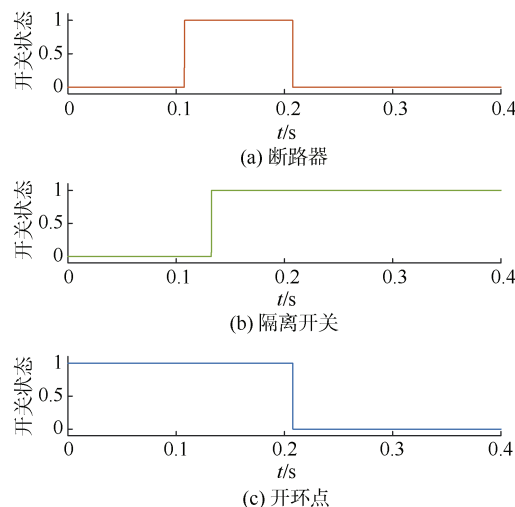


图 11 贯通线 3 单相接地故障开关状态变化情况
Figure 11 Switching status changes during a single-phase-to-ground fault on power transmission line 3

同样将故障点设置在第 3 段电力贯通线 midpoint 位置, 设置在 0.1 s 发生 AB 相短路故障, 过渡电阻为 0.01 Ω , 变配电所出线电流如图 12 所示, 电力贯通线 3 的差动电流如图 13 所示, 开关状态变化情况如图 14 所示。

如图 12 所示, 在 0.106 5 s, 变配电所出线断路器电流迅速上升, 超过预设的过流阈值 23.2 A; 同时, 图 13 所示电力贯通线 3 的差动电流同样超过差动阈值 5.4 A。双重判据同时满足, 判定第 3 段电力贯通线发生故障, 保护动作, 随即通过 GOOSE 网络向变配电

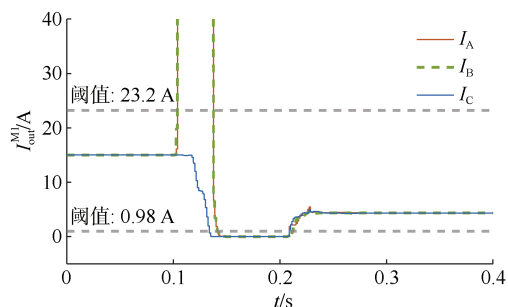


图12 贯通线3两相短路故障变配电所出线电流
Figure 12 Substation feeder outgoing current during a phase-to-phase short circuit on power transmission line 3

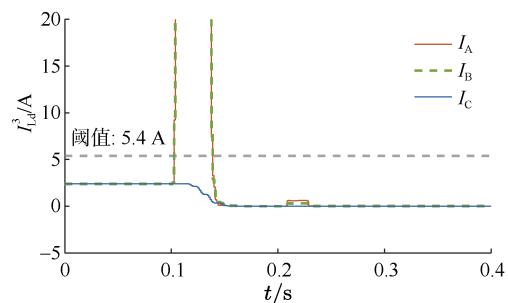


图13 贯通线3两相短路故障差动电流
Figure 13 Differential current during a phase-to-phase short circuit on power transmission line 3

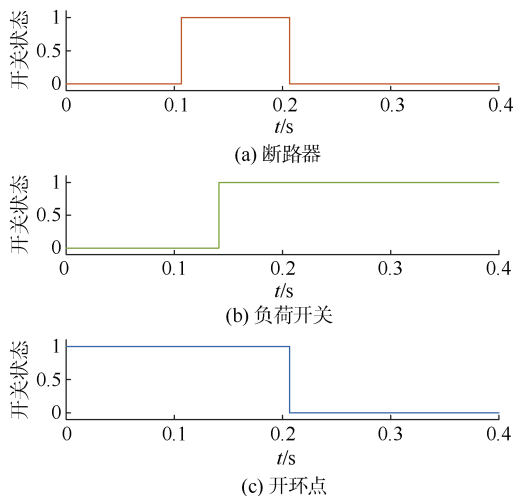


图14 贯通线3两相短路故障开关状态变化情况
Figure 14 Switching status changes during a phase-to-phase short circuit on power transmission line 3

所出线断路器发送跳闸指令,变配电所出线断路器接收到跳闸指令进行跳闸操作。图14的断路器状态波形表明跳闸操作已成功执行。图12系统在0.1412s检测到出线电流低于预设的阈值0.98A,此时,GOOSE网络向负荷开关发送跳闸指令。如图14所示,电力贯通线3两端的负荷开关均在0.1412s进行可靠动作,

完成故障隔离。在0.2066s,变配电所出线断路器与开环断路器执行合闸操作,成功恢复区域供电。

将故障点设置在箱变5母线上,设置在0.1s发生A相接地短路故障,过渡电阻为0.01Ω,变配电所出线电流如图15所示,箱变5母线的差动电流如图16所示,开关状态变化情况如图17所示。

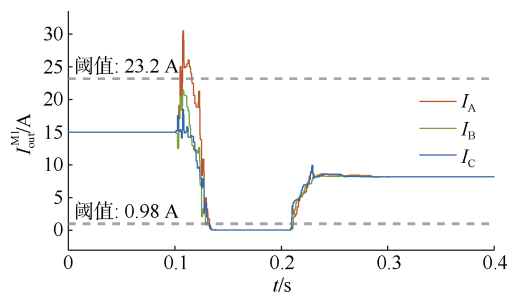


图15 箱变5母线单相接地故障变配电所出线电流
Figure 15 Substation feeder outgoing current during a single-phase-to-ground fault on busbar 5 of the unit transformer

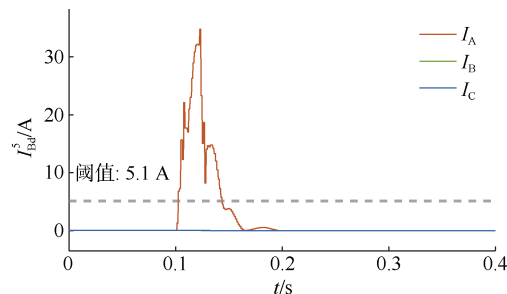


图16 箱变5母线单相接地故障差动电流
Figure 16 Differential current during a single-phase-to-ground fault on busbar 5 of the unit transformer

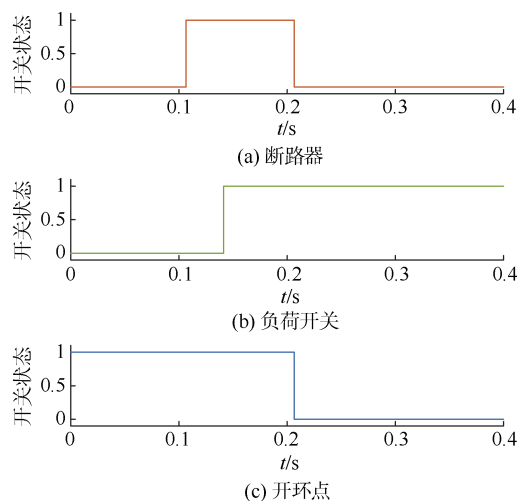


图17 箱变5母线单相接地故障开关状态变化情况
Figure 17 Switching status changes during a single-phase-to-ground fault on busbar 5 of the unit transformer

如图 15 所示,在 0.107 7 s,变配电所出线断路器电流迅速上升,电流峰值达到 31 A,显著超过预设的过流阈值 23.2 A;同时,图 16 所示箱变 5 母线的差动电流增至 36 A,同样超过差动阈值 5.1 A。双重判据同时满足,判定箱变 5 母线发生故障,保护动作,随即通过 GOOSE 网络向变配电所出线断路器发送跳闸指令,变配电所出线断路器接收到跳闸指令进行跳闸操作。图 17 的断路器状态波形表明跳闸操作已成功执行。图 15 中系统在 0.128 8 s 检测到出线电流低于预设的 0.98 A 阈值,此时,GOOSE 网络向负荷开关发送跳闸指令。如图 17 所示,箱变 5 母线进出线的负荷开关均在 0.132 5 s 进行可靠动作,完成故障隔离。在 0.207 7 s,变配电所与开环断路器执行合闸操作,成功恢复区域供电。

将故障点设置在箱变 3 出线上,设置在 0.1 s 发生 A 相接地短路故障,过渡电阻为 0.01 Ω ,箱变 3 出线电流如图 18 所示,开关状态变化情况如图 19 所示。

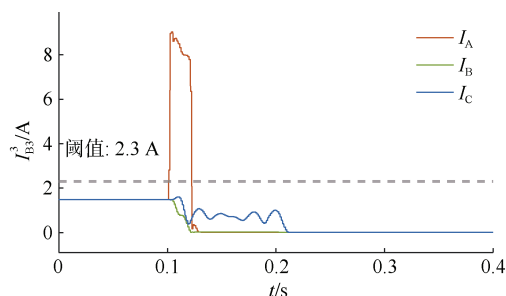


图 18 箱变 3 出线故障电流

Figure 18 Fault current of feeder 3 of the unit transformer

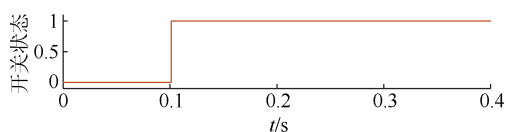


图 19 箱变 3 出线故障开关状态变化情况(断路器)

Figure 19 Switching status changes during a fault on feeder 3 of the unit transformer (circuit breaker)

由图 18 可知,在 0.101 2 s,箱变出线电流迅速上升,其峰值电流达到 9 A,显著超过预设的过流阈值 2.3 A,判定箱变 3 出线发生故障,保护动作,箱变出线断路器跳闸。图 19 的断路器状态波形证实该操作的成功执行,实现区域恢复供电。

为验证所提保护方法的有效性,在第 3 段电力贯通线上设置不同故障类型进行测试,包括单相接地故障、两相短路故障、两相短路接地故障、三相短路故障以及三相短路接地故障,所有故障的过渡电阻均设

置为 0.01 Ω ,不同故障类型的保护动作情况及故障隔离情况如表 3 所示,符号√表示判据满足或情况正确。

表 3 不同故障类型故障保护动作及故障隔离情况

Table 3 Fault protection actions and fault isolation situations under different fault types

		AG	AB	ABG	ABC	ABCG
变配电所 出线	过流阈值/A	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2
	故障电流/A	38	1 820	1 815	2 018	2 014
	满足判据	√	√	√	√	√
故障 贯通线	差动阈值/A	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
	差动电流/A	40	1 815	1 815	2 020	2 018
	满足判据	√	√	√	√	√
保护动作情况		√	√	√	√	√
故障隔离情况		√	√	√	√	√

由表 3 可知,本文提出的保护方法能够准确识别各种类型故障,并可靠实现断路器和负荷开关的正确跳闸和故障的有效隔离,充分证明了所提方法的可靠性和实用性。

为验证所提保护方法的有效性,在箱变 5 母线上 A 相发生不同过渡电阻的接地故障,具体包括 0、10、100、200、500、1 000 Ω 和弧光高阻故障,不同过渡电阻下保护动作及故障隔离情况如表 4 所示,符号√表示判据满足或情况正确。

表 4 不同过渡电阻保护动作及故障隔离情况

Table 4 The protection actions and fault isolation under different transition resistances

		0 Ω	10 Ω	100 Ω	200 Ω	500 Ω	1 000 Ω	弧光高阻
变配电所 出线	过流阈值/A	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2
	故障电流/A	31	39	38.6	39	37.2	35	28
	满足判据	√	√	√	√	√	√	√
故障 贯通线	差动阈值/A	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
	差动电流/A	35.6	48.3	35	33	42	38.5	19.4
	满足判据	√	√	√	√	√	√	√
保护动作情况		√	√	√	√	√	√	√
故障隔离情况		√	√	√	√	√	√	√

由表 4 可知,在不同过渡电阻情况下故障均能可靠识别,断路器和负荷开关能正确跳闸,能实现故障的有效隔离,充分证明了所提方法的可靠性和有效性。

3.2 典型保护方案对比分析

为进一步验证所提方法在保护速动性、通信性能及工程适用性方面的综合优势,选取光纤差动保护方案和数字电流选跳保护方案作为对比对象,从保护动作时间、故障隔离时间、通信延时、故障隔离成功率、适用架构及系统成本等方面进行量化对比分析^[22-25],结

果如表 5 所示。

表 5 典型保护方案量化对比分析
Table 5 Quantitative comparative analysis of typical protection schemes

对比指标	光纤差动保护方案	数字电流选跳保护方案	本文方法
保护动作时间/ms	53~70	70~100	56~75
故障隔离时间/ms	53~70	70~100	89~110
通信延时/ms	3~5	15~40	6~10
故障隔离成功率	高	高	高
适用架构	全断路器	全断路器	含负荷开关
架构成本	高	高	低

由表 5 可知，在保护动作时间方面，本文方法与光纤差动保护处于同一量级，虽慢 3~5 ms，但较数字电流选跳方案提速约 25 ms，该延时是在负荷开关架构下实现选择性保护所需的合理代价，兼顾了速动性与经济性。

在通信延时方面，受主变电站参与影响，本文方法较光纤差动保护略有增加(3~5 ms)，但明显低于依赖多轮逻辑交互的数字电流选跳保护(可减少 10~30 ms)，整体仍处于同一量级且稳定性较好。

在故障隔离可靠性方面，尽管引入通信与设备协同，但在“先跳闸、后隔离”的确定性时序下，系统故障隔离成功率仍可保持与传统方案相当。

在适用架构与工程成本方面，传统方案依赖全断路器配置、成本较高，而本文方法面向含负荷开关的中压环网结构，在保证保护性能的同时显著降低系统建设成本，工程经济性更优。

4 结语

1) 针对传统定时限过流保护速动性不足，而基于负荷开关的市域铁路中压环网对保护速动性要求高的问题，本文提出一种基于差动电流的快速保护方法。通过分析贯通线、箱变等不同故障位置的电流故障特征实现故障区段的准确定位，并结合 GOOSE 网络的实时通信能力与变配电所出线断路器快速切断能力，实现基于负荷开关的市域铁路中压环网快速保护。

2) 仿真结果表明，在不同故障位置、故障类型及过渡电阻条件下，该方法均能快速、准确地识别故障，可靠实现断路器和负荷开关的正确跳闸、故障的有效隔离以及供电的快速恢复，为基于负荷开关的中压环网系统提供了新的保护与故障隔离思路。

参考文献

[1] 王猛, 狄谨, 陈民武, 等. 市域铁路贯通运营城市地铁

关键技术研究[J]. 中国铁道科学, 2022, 43(6): 161-174.
Wang Meng, Di Jin, Chen Minwu, et al. Research on the key technology of through operation of suburban railway and urban metro[J]. China railway science, 2022, 43(6): 161-174.

[2] 蔡君君. 多网融合下市域铁路互联互通关键技术研究[J]. 铁道工程学报, 2024, 41(6): 93-97.

Cai Junjun. Research on the key technologies for interconnection and interoperation of suburban railway under multi-network integration[J]. Journal of railway engineering society, 2024, 41(6): 93-97.

[3] 赵书毅, 姬燕男, 杨林, 等. 市域(郊)铁路与其他轨道交通融合模式及选择决策方法研究[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(4): 106-113.

Zhao Shuyi, Ji Yannan, Yang Lin, et al. Integration mode and selection decision-making method of suburban railway and other rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(4): 106-113.

[4] 张钊, 王伟, 石竹, 等. 市域(郊)铁路快慢车运行停站策略优化[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(1): 99-105.

Zhang Zhao, Wang Wei, Shi Zhu, et al. Optimization of stop strategy suitable for operation of express-local Train of suburban railway[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(1): 99-105.

[5] 新守杰, 管美玲, 李鲲鹏. 市域铁路双边供电系统的稳态潮流[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(6): 1231-1239.

Jin Shoujie, Guan Meiling, Li Kunpeng. Steady-state power flow in bilateral power supply system for suburban railways[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(6): 1231-1239.

[6] 符瑞, 姚建光, 李红军, 等. 基于负荷互补特性的中压配电网环网结构优化研究[J]. 供用电, 2023, 40(2): 39-44.

Fu Rui, Yao Jianguang, Li Hongjun, et al. Research on medium voltage ring network optimization considering load complementary characteristics[J]. Distribution & utilization, 2023, 40(2): 39-44.

[7] 喇先寿, 段纪鹏, 吴稀西. 城市核心区双环网供电可靠性提升措施[J]. 电工技术, 2024(增刊 2): 489-491.

La Xianshou, Duan Jipeng, Wu Xixi. Measures to improve the power supply reliability of the double-ring network in the urban core area[J]. Electric engineering, 2024(S2): 489-491.

[8] 杨志贤, 桂华, 陈庆红, 等. 城市轨道交通中压环网光纤比选保护方案[J]. 铁道机车车辆, 2023, 43(2): 156-161.

Yang Zhixian, Gui Hua, Chen Qinghong, et al. Medium voltage loop network protection scheme for urban rail transit based on optical fiber communication[J]. Railway locomotive & car, 2023, 43(2): 156-161.

[9] 潘天晟. 现代有轨电车中压环网供电方式的研究[J]. 电气技术, 2018, 19(8): 195-198.

- Pan Tiansheng. Research on power supply mode of medium voltage ring in modern tram[J]. Electrical engineering, 2018, 19(8): 195-198.
- [10] 郭志奇. 城市轨道交通中压环网供电系统母线保护配置方案的比较分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(3): 61-65.
- Guo Zhiqi. Comparative analysis of bus protection schemes for medium voltage ring network power supply system in urban rail transit[J]. Urban mass transit, 2020, 23(3): 61-65.
- [11] 张梅, 董新洲, 薄志谦, 等. 实用化的配电线路无通道保护方案[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12): 68-72.
- Zhang Mei, Dong Xinzhou, Bo Zhiqian, et al. Practical non-communication protection for distribution feeders[J]. automation of electric power systems, 2005, 29(12): 68-72.
- [12] 吴宇奇, 肖澍昱, 黎钊, 等. 基于二次振荡波过程的交流电网相继速动判据[J]. 电工技术学报, 2023, 38(24): 6695-6708.
- Wu Yuqi, Xiao Shuyu, Li Zhao, et al. The fast sequential action principle for AC power grid based on the secondary travelling waves processes[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2023, 38(24): 6695-6708.
- [13] 林晓鸿, 林圣, 温曼越, 等. 电气化铁路电力贯通线无通道保护方案[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 212-219.
- Lin Xiaohong, Lin Sheng, Wen Manyue, et al. Non-communication protection scheme for electric railroad power transmission line[J]. Electric power automation equipment, 2018, 38(9): 212-219.
- [14] 陈翼龙. 双光纤差动与动态加速保护在地铁中的应用[J]. 电气化铁道, 2022, 33(3): 75-79.
- Chen Yilong. Application of dual optical fiber differential and dynamic acceleration protection in subway[J]. Electric railway, 2022, 33(3): 75-79.
- [15] 张目然. 数字电流选跳在地铁中压环网供电保护的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(10): 269-273.
- Zhang Muran. Application of digital current selective tripping protection in subway medium voltage ring network power supply[J]. Urban mass transit, 2024, 27(10): 269-273.
- [16] 孙萍. 市域铁路区间桥隧过渡段箱式变电站布置方案比选研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(5): 100-104.
- Sun Ping. Research on comparative selection of box-type substation arrangement scheme for city railway interval bridge-tunnel transition segment[J]. Urban mass transit, 2023, 26(5): 100-104.
- [17] 蔡端阳. 同相供电技术在温州市域铁路S1线变电所出口电分相中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(6): 203-206.
- Cai Duanyang. Application of in-phase power supply technology in phase separation at the outlet of Wenzhou rail transit line S1 substation[J]. Urban mass transit, 2022, 25(6): 203-206.
- [18] 李响, 周成瀚, 邹贵彬, 等. 基于时域波形的有源配电网自适应电流差动保护[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(14): 181-189.
- Li Xiang, Zhou Chenghan, Zou Guibin, et al. Time-domain waveform based adaptive current differential protection for active distribution networks[J]. Automation of electric power systems, 2025, 49(14): 181-189.
- [19] 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): 104-107.
- Li Jingkun. Overcurrent protection scheme of metro medium voltage ring network[J]. Urban rapid rail transit, 2014, 27(3): 104-107.
- [20] 武岳, 范开俊, 徐丙垠, 等. 计及拓扑结构变化的分布式自适应电流保护方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(2): 50-56.
- Wu Yue, Fan Kaijun, Xu Bingyin, et al. Distributed self-adaptive current protection method considering topological changes[J]. Electric power automation equipment, 2024, 44(2): 50-56.
- [21] 李万岭, 夏丽静, 李江华, 等. 新型配电自动化系统研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(11): 96-102.
- Li Wanling, Xia Lijing, Li Jianghua, et al. Research of new distribution automation system[J]. Smart power, 2017, 45(11): 96-102.
- [22] 赵勤, 王军平, 曹捷. GOOSE全面智能电流选跳在城轨供电系统中的应用[J]. 都市快轨交通, 2016, 29(3): 98-102.
- Zhao Qin, Wang Junping, Cao Jie. Application of GOOSE comprehensive intelligent current selective tripping solution in urban rail transit power supply system[J]. Urban rapid rail transit, 2016, 29(3): 98-102.
- [23] 王军平, 赵勤, 曹捷. 宁波轨道交通GOOSE全面智能电流选跳方案验证[J]. 都市快轨交通, 2016, 29(4): 111-115.
- Wang Junping, Zhao Qin, Cao Jie. Validation of GOOSE comprehensive intelligent current selective trip solution in Ningbo metro[J]. Urban rapid rail transit, 2016, 29(4): 111-115.
- [24] 熊德智. 智能电能表负荷开关建模与优化设计方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- Xiong Dezhi. Research on modeling and optimization design method of smart meter load switch[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [25] 李艺可. 基于改进堆叠降噪自编码器的智能电能表失效率预测方法[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- Li Yike. Failure rate prediction method of smart meter based on improved stacked denoising autoencoder[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.

(编辑: 王艳菊)