

地铁变电所 0.4 kV 开关柜接地故障保护方案

周文卫

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉)

摘要 **[目的]** 单相接地故障占配电线路总故障次数的 80% 以上, 且绝大多数相间故障均由单相接地故障发展而来。在地铁配电系统中, 若 0.4 kV 开关柜无法及时切除单相接地故障, 可能导致人员触电风险增加, 同时接地点产生的电弧和电火花可能进一步引发火灾和爆炸等严重危险。因此, 有必要对 0.4 kV 开关柜的单相接地故障保护进行深入分析, 并合理设置保护措施。**[方法]** 结合地铁特点和相关规范手册要求, 提出 0.4 kV 主母排和 0.4 kV 配电线路的单相接地故障保护配置、整定原则、灵敏系数校核和时序配合要求。明确 0.4 kV 进线柜接地故障保护设置方案; 明确典型 0.4 kV 馈线的短延时整定电流值; 对于过流保护兼作 0.4 kV 馈线接地故障保护的最大电缆长度进行简化计算; 对典型接地故障保护原理和整定原则进行分析。**[结果及结论]** 针对地铁系统的特点, 提出了以下保护方案: 利用 35 kV 高压侧的过流保护兼作 0.4 kV 主母排的单相接地故障保护; 对于 0.4 kV 进线单相接地故障保护, 建议动作于报警模式; 在 0.4 kV 馈线回路中, 优先采用过流保护作做单相接地故障保护, 当不满足兼作要求时, 推荐设置零序过流型接地故障保护。

关键词 地铁; 变电所; 0.4 kV 开关柜; 单相接地故障; 保护方案

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.03.024

Grounding Fault Protection Scheme for 0.4 kV Switchgear in Metro Substations

ZHOU Wenwei

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

Abstract **[Objective]** Single-phase grounding faults account for over 80% of the total distribution line faults, with most inter-phase faults originating from single-phase grounding faults. In metro power distribution systems, failure to promptly isolate single-phase grounding faults in 0.4 kV switchgear may increase the risk of electric shock to personnel and lead to arcs and sparks at the fault site, potentially causing fires and explosions. Therefore, it is essential to thoroughly analyze single-phase grounding fault protection for 0.4 kV switchgear and establish appropriate protective measures. **[Method]** Based on

the characteristics of metro systems and relevant regulatory guidelines, requirements of single-phase grounding fault protection configurations, principle setting, sensitivity coefficient check, and time sequence coordination for 0.4 kV main busbar and 0.4 kV distribution lines are proposed. The protection scheme for grounding faults in 0.4 kV incoming panels is clarified. The typical short-time delay settings for 0.4 kV feeder circuits are clarified. Simplified calculations are performed to determine the maximum cable length for using overcurrent protection as dual-purpose grounding fault protection for 0.4 kV feeders. Principles for grounding fault protection principles and setting criteria are analyzed. **[Result & Conclusion]** Based on the characteristics of metro systems, the following protection schemes are proposed: using overcurrent protection on the 35 kV high-voltage side to serve as single-phase grounding fault protection for the 0.4 kV main busbar; for single-phase grounding fault protection in 0.4 kV incoming circuits, it is recommended to operate in alarm mode; in the 0.4 kV feeder circuits, prioritize using overcurrent protection as dual-purpose grounding fault protection, and if dual-purpose requirements are not met, zero-sequence overcurrent grounding fault protection is recommended.

Key words metro; substation; 0.4 kV switchgear; single-phase grounding fault; protection scheme

据统计, 单相接地故障在配电线路总故障次数中占比超过 80%, 且多数相间故障是由单相接地故障演变而来。因此, 单相接地故障保护对于配电系统的安全运行具有至关重要的作用^[1]。地铁 0.4 kV 供电系统普遍采用 TN(保护接零)系统, 配置了长延时、短延时及瞬动等短路保护措施, 以切断故障线路。然而, 在处理单相接地故障时, 由于短路回路中可能存在非金属部分, 导致接地故障引起的短路回路阻抗具有不确定性, 进而使得短路电流变化较大。这种特性使得单相接地故障保护的设置容易被忽视, 具体表现为未设置单相接地保护或设置不合理。实际上, 苏州、福州、厦门等地的地铁系统已相继发生 0.4 kV 馈线侧单相接地故障引发

0.4 kV 进线越级跳闸的情况,这降低了供电系统的可靠性^[2]。此外,单相接地故障产生的电流较小,若 0.4 kV 开关柜无法及时切除故障,人员接触带电设备外壳时易发生触电事故,同时接地点产生的电弧和电火花还可能引发火灾和爆炸等危险^[3]。

因此,在地铁工程设计中,有必要对 0.4 kV 开关柜的单相接地故障保护进行深入分析,并合理设置有效的保护措施。

1 0.4 kV 主母排接地故障保护

根据 GB/T 50062—2008《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》的规定,配电变压器低压侧单相接地保护的设置需考虑绕组接线方式及中性点接地方式等因素。在此情境下,可优先考虑利用高压侧过电流保护作为接地故障保护,但需确保满足灵敏系数的要求;另一种选择是在低压侧中性线上增设零序电流保护。本文将高压侧定时限过流保护兼作 0.4 kV 主母排接地故障保护为例进行深入探讨。

1.1 高压侧定时限过流保护整定

地铁配电变压器通常采用 D,yn11 接线方式,其 35 kV 馈线的过电流保护装置动作电流需大于可能出现的最大过负荷电流,动作时限一般设定为 0.6 s^[4-5]。过电流保护装置的二次动作电流 $I_{op.k}$ 计算式为^[6]:

$$I_{op.k} \geq K_{rel} K_{con} \cdot \frac{K_{ol} I_{1rT}}{K_r n_{TA}} \quad (1)$$

式中:

K_{rel} ——可靠系数,用于过电流保护时取 1.2;

K_{con} ——电流互感器接线系数,接于相电流时取 1,接于相电流差时取 $\sqrt{3}$;

K_{ol} ——过负荷系数,地铁配电变压器可取 2 ~ 3^[4,7];

I_{1rT} ——配电变压器高压侧额定电流;

K_r ——继电器返回系数,取 0.9;

n_{TA} ——电流互感器变比。

利用高压侧过电流保护兼作低压侧单相接地保护时,灵敏系数 K_{sen} 应满足^[6]:

$$K_{sen} = \frac{I_{2kl.min}}{I_{op.k}} \geq 1.3 \quad (2)$$

式中:

$I_{2kl.min}$ ——最小运行方式下变压器低压侧母干线末端单相接地短路时,流过高压侧(保护安装处)的稳态电流(折算至电流互感器二次侧)。

1.2 灵敏系数校验

以地铁中常用的 35 kV/0.4 kV 配电变压器为例,变压器相保阻抗取自文献[6]表 4.6-1 中的 SCB11 型环氧树脂浇筑干式变压器数据,配电变压器高压侧系统和低压母线的相保阻抗分别取自文献[8]中的表 4-21 和表 4-24。D,yn11 接线变压器高压侧及电流继电器中的短路电流分布数据取自文献[6]中的表 7.2-9。通过计算,得到配电变压器低压母排末端发生单相接地短路时的短路电流,以及 35 kV 高压侧过流保护兼作该单相短路保护的灵敏系数。高压侧定时限过电流保护兼作低压侧单相接地保护的灵敏系数校验如表 1 所示。

在 D,yn11 接线变压器应用于普通民用建筑配电系统中,采用高压侧过电流保护同时作为低压侧

表 1 高压侧定时限过电流保护兼作低压侧单相接地保护的灵敏系数校验

Tab.1 Verification of sensitivity coefficient of fixed time overcurrent protection at high-voltage side as single-phase grounding protection at low-voltage side

变压器容量/(kVA)	变压器阻抗电压/%	低压铜母排			系统短路容量/(MVA)	高压侧流互变比	$I_{2kl.min}/$ kA	$I_{op.k}/$ A	K_{sen}
		相排截面/ mm ²	PE 排截面/ mm ²	长度/m					
250	6	50 × 5	50 × 5	6	100	100/1	5.36	0.16	2.1
500	6	80 × 8	50 × 5	6	100	100/1	9.91	0.33	2.0
800	6	100 × 10	80 × 8	10	100	100/1	13.23	0.53	1.7
1 250	6	2 × 100 × 10	80 × 8	15	100	100/1	15.34	0.82/0.69	1.2/1.5
1 600	6	2 × 125 × 10	80 × 10	15	100	100/1	17.94	1.06/0.70	1.1/1.7
2 000	6	3 × 125 × 10	100 × 10	15	100	100/1	20.69	1.32/0.88	1.0/1.6

注:表中数值“/”前, $I_{op.k}$ 的整定均取 $K_{ol} = 3$;“/”后, $I_{op.k}$ 的整定中,1 250 kVA 配电变压器取 $K_{ol} = 2.5$,1 600 kVA 和 2 000 kVA 配电变压器取 $K_{ol} = 2$ 。

单相接地保护时,变压器的灵敏系数通常能够满足规定要求^[9]。然而,地铁配电系统负荷特性显著,存在较大的短时冲击过负荷电流,因此不能直接将民用建筑的工程经验简单应用于地铁配电系统。

在地铁配电系统中,考虑到变压器励磁涌流短时冲击的影响,当车站隧道风机和排热风机启动时,对于大容量配电变压器的影响相对较小。在进行高压侧过电流保护的整定时,需适当降低变压器过负荷系数 K_{ol} 的取值,具体调整可参考表 1 的注释。在此前提下,采用高压侧过电流保护同时作为低压侧单相接地保护时,其灵敏系数 $K_{sen} \geq 1.3$ 仍然能够满足要求。因此,该保护方式在地铁配电系统中的应用一般是可行的。

1.3 高压侧定时限过流与 0.4 kV 进线过流的配合

0.4 kV 进线定时限过流脱扣器的整定电流 I_{set2} ,应躲过短时间出现的负荷尖峰电流^[6],即:

$$I_{set2} \geq K_{set2} (I_{stM1} + I_{C(n-1)}) \quad (3)$$

式中:

K_{set2} ——可靠系数,取 1.2;

I_{stM1} ——最大 1 台/多台电动机的起动电流;

$I_{C(n-1)}$ ——除最大起动电流的 1 台/多台电动机之外的计算负荷电流。

为满足高低压侧过流保护的配合,应满足:

$$\begin{aligned} I_{QF1.op} &\geq K_{rel} I_{QF2.set2} \\ t_{QF1.op} &= t_{QF2.set2} + \Delta t \end{aligned} \quad (4)$$

式中:

$I_{QF1.op}$ ——高压侧过流整定值,见式(1);

$I_{QF2.set2}$ ——0.4 kV 进线的过流整定值,见式(3),应折算至高压侧;

K_{rel} ——配合系数,取 1.2;

$t_{QF1.op}$ ——高压侧过流整定时间,取 0.4 ~ 0.6 s;

$t_{QF2.set2}$ ——0.4 kV 进线的过流整定时间,取 0.4 s;

Δt ——时间级差,取 0 ~ 0.2 s,具体根据电网允许的过流时限进行配合。

对于典型地下车站,配电变压器负荷尖峰发生在 1 台配电变压器退出运行,由另 1 台配电变压器承担全站所有一、二级负荷,同时 2 台隧道风机启动时。 I_{stM1} 可取 2 台隧道风机的起动电流, $I_{C(n-1)}$ 可取变压器额定电流与 2 台隧道风机额定电流之差。隧道风机功率一般为 90 ~ 110 kW,采用软启动,启动电流为 3.5 倍额定电流。对于典型高架车站可类

似分析。

以地铁常用的各容量 35 kV/0.4 kV 配电变压器为例,高压侧定时限过流与 0.4 kV 进线过流的配合见表 2。

表 2 高低压侧过流配合校核

Tab. 2 Overcurrent coordination check at high and low voltage sides

容量/ (kVA)	35 kV 侧 $I_{QF1.op}/A$	0.4 kV 侧 $I_{QF2.set1}/A$	0.4 kV 侧 $I_{QF2.set2}/A$	$\frac{I_{QF2.set2}}{I_{QF2.set1}}$	K_{rel}
250	16	500	823	1.65	1.70
500	33	1 000	1 386	1.39	2.08
800	53	1 600	2 338	1.46	1.98
1 250	69	2 500	3 118	1.25	1.94
1 600	70	3 200	3 724	1.16	1.64
2 000	88	4 000	4 417	1.10	1.74

注:①500 kVA 为典型高架车站使用的变压器容量,最大 1 台电梯/水泵取 50 kW;② $I_{QF2.set1}$ 为 QF2 的长延时整定值。

根据表 2 计算结果,对于典型地下/高架车站/区间风井配电变压器,0.4 kV 进线过流在满足负荷侧过流需求的前提下,可以满足于高压侧的配合要求。

1.4 0.4 kV 进线柜接地故障保护设置

1) 在 0.4 kV 主母排单相接地故障可通过高压侧过流保护与 0.4 kV 进线柜过流保护共同实现有效防护的情况下,无需为 0.4 kV 进线柜额外配置专门的接地故障保护。

2) 若将 0.4 kV 开关柜的接地故障保护作为所有 0.4 kV 馈线回路的主要接地故障保护手段,可能会面临部分馈线回路保护灵敏性不足的问题,并存在因单个馈线回路发生单相接地故障而导致配电变压器所有馈线回路断电的风险。

3) 为规避单个馈线回路单相接地故障引发配电变压器整体馈线回路失电的风险,建议将 0.4 kV 进线柜接地故障保护设置为报警模式。在选择单相接地故障保护类型时,鉴于剩余电流型保护过于敏感,而 0.4 kV 进线柜作为配电干线的主要开关,推荐使用零序过流型保护,其整定原则见第 3 节。

2 过流保护兼作 0.4 kV 馈线接地故障保护

0.4 kV 馈线断路器通常配备电子脱扣器,配置包括长延时、短延时及瞬动保护在内的多种保护功能;而部分馈线断路器则采用电磁式脱扣器,仅配置长延时与瞬动保护。对于 0.4 kV 馈线的接地故

障,首要考虑利用过流保护(涵盖瞬动与短延时功能)进行兼顾处理。然而,当0.4 kV 馈线长度较大时,由于线路末端短路电流可能无法满足灵敏度要求,因此需要单独配置接地故障保护。鉴于此,过流保护的整定计算与最大保护长度的确定显得尤为重要。

2.1 过电流保护和瞬动保护的整定及配合

0.4 kV 馈线断路器的长延时整定值 I_{set1} 应满足^[6]:

$$I_C \leq I_{\text{set1}} \leq I_Z \quad (5)$$

式中:

I_C ——馈线回路计算电流;

I_Z ——馈线电缆允许持续载流量。

由于配电箱馈出线中一般有备用断路器,建议0.4 kV 馈线断路器长延时整定适当留有裕度。

带电机负荷的0.4 kV 馈线断路器的短延时整定值 I_{set2} 见式(3),照明及无电机馈线断路器的短延时整定可参照式(3)。

带电机负荷的0.4 kV 馈线断路器的瞬动整定值 I_{set3} 应满足^[6]:

$$I_{\text{set3}} \geq K_{\text{set3}} (I_{\text{stm}} + I_{C(n-1)}) \quad (6)$$

式中:

K_{set3} ——可靠系数,取1.2;

I_{stm} ——最大1台/多台电动机的全起动电流,可取其为起动电流的2.0~2.5倍;

$I_{C(n-1)}$ ——除最大起动电流的1台/多台电动机之外的计算负荷电流。

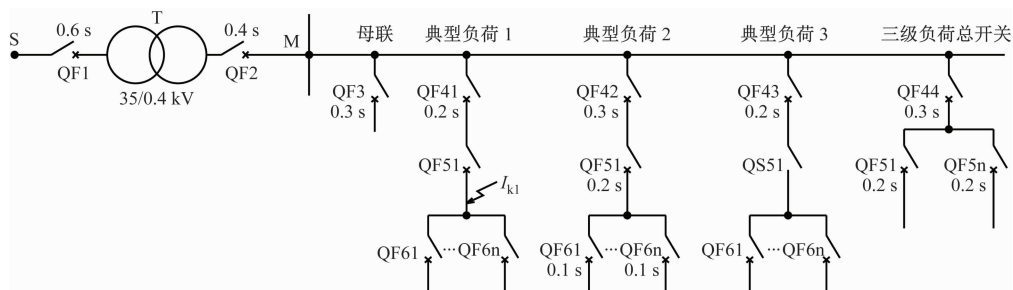
照明负荷的0.4 kV 馈线断路器的瞬动整定值 I_{set3} 应满足^[6]:

$$I_{\text{set3}} \geq K_{\text{rel3}} I_C \quad (7)$$

式中:

K_{rel3} ——可靠系数,对卤钨灯和LED灯取10~12,对荧光灯、高压钠灯、金属卤化物灯取3~5。

为保证断路器上下级之间的选择性,各级断路器短延时过电流保护时间配合见下图1。



注:QF1—35 kV 断路器;QF2—0.4 kV 断路器;余类同。

图1 地铁配电系统短延时过电流保护时间配合示意图

Fig. 1 Diagram of short-time delay overcurrent protection timing coordination of metro power distribution system

0.4 kV 馈线断路器采用限流型设计,其与配电箱进出线之间的上下级瞬动保护选择性通过时间选择性和自然选择性两种方式来实现。为确保上下级短延时保护的选择性,需满足以下条件:

$$I_{QF4.set2} \geq K_{\text{rel}} I_{QF5.set2} \quad (8)$$

式中:

$I_{QF4.set2}$ ——0.4 kV 馈线断路器短延时整定值;

$I_{QF5.set2}$ ——配电箱进线短延时整定值,当配电箱进线非断路器时,可取配电箱最大馈线的短延时整定值;

K_{rel} ——可靠系数,取1.2。

以某地铁工程为例,0.4 kV 配电回路短延时保护整定值推荐如表3所示。

表3 地铁典型配电回路短延时整定电流值推荐表

Tab.3 Recommended short-time delay setting current values of for typical metro distribution circuits

负荷名称	短延时整定	适用范围
冷水机组	$4I_{\text{set1}}$	
三级负荷总开关	$2I_{\text{set1}}$	冷水机组未设置在三级负荷母线
环控一级负荷	$(3 \sim 4)I_{\text{set1}}$	
环控二、三级负荷,风机,电扶梯,水泵等电机回路	$5I_{\text{set1}}$ $(3 \sim 4)I_{\text{set1}}$ $2I_{\text{set1}}$	1台电机占主导的配电回路 2~3台电机占主导的配电回路 除以上情况外的综合负荷
其他负荷	$2I_{\text{set1}}$	综合负荷

2.2 过流兼作0.4 kV 馈线接地故障保护的最大长度计算

以图1为例,0.4 kV 馈线断路器过流(含瞬动)

兼作配电线路单相接地故障保护时,配电线路末端单相接地短路电流 I_{k1} 应满足^[6]:

$$I_{k1} \geq 1.3I_{QF41.set2} \text{ 或 } I_{k1} \geq 1.3I_{QF41.set3} \quad (9)$$

当 0.4 kV 馈线断路器设置短延时过流保护和瞬动保护时采用前者;仅设置瞬动保护时采用后者。后续为计算方便,统一按短延时过流考虑。

TN 系统发生接地故障时,最小接地故障电流 I_{k1} 的精确计算见文献[8]中的式(4-55),但是计算量巨大;工程设计中可采用以下公式近似估算^[6]:

$$I_{k1} = \frac{(0.8 \sim 1)U_0 S}{1.5\rho(1+m)L} K_1 K_2$$

$$K_2 = \frac{4(n-1)}{n} \quad (10)$$

式中:

I_{k1} ——最小接地故障电流,单位 A;

U_0 ——相对地标称电压,取 220 V;

S ——相导体截面积,单位 mm^2 ;

K_1 ——电缆电抗校正系数,当 $S \leq 95 \text{ mm}^2$ 时取 1,当 S 为 120 ~ 150 mm^2 时取 0.96,当 $S \geq 185 \text{ mm}^2$ 时取 0.92;

K_2 ——每相采用多根导体并联时的校正系数;

n ——每相并联的导体根数;

ρ ——20 °C 时导体电阻率,对于铜导体取 $0.0184 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$;

L ——电缆长度,单位 m;

m ——材料相同时,每相导体与 PE 导体截面积之比。

结合式(9)和式(10),考虑工程计算中的误差和裕度,过流兼作 0.4 kV 馈线接地故障保护的最大长度 L_{\max} 为:

$$L_{\max} = \frac{0.8U_0 S}{1.5\rho(1+m) \times 1.3I_{\text{set2}}} K_1 K_2 \quad (11)$$

由式(11)可以看出,过流整定值对于过流兼作接地故障保护的最大保护长度非常关键。

3 剩余过流型和零序过流型接地故障保护

当 0.4 kV 馈线断路器的过流保护兼作配电线路单相接地故障保护且超出最大允许配电线路长度时,须为 0.4 kV 馈线断路器额外配置接地故障保护。单相接地故障保护主要分为剩余电流型(亦称漏电保护型)与零序过流型(亦称三相不平衡电流保护)两种。

3.1 剩余电流型接地故障保护

剩余电流型接地故障保护通过检测 ABCN(相

线和中性线)各相电流的矢量和来运作,适用于 TT(保护接地系统)与 TN-S(接零保护系统)系统。然而,对于相线与 N 线间的短路故障,该保护机制无法进行有效检测。

关于剩余电流型接地故障保护的整定值,小容量塑壳断路器通常设定为 30 mA ~ 10 A,而大容量框架断路器则设定为 0.5 ~ 30.0 A;时间整定值的范围则介于 60 ~ 800 ms 之间。 I_{set4} 应满足:

$$I_{\text{set4}} \geq (2.5 \sim 4.0)I_{\text{PE}} \quad (12)$$

式中:

I_{PE} ——正常运行时线路和设备的泄漏电流。

当地铁车站电气火灾监控系统的探测器采用剩余电流式时,其测量原理与剩余电流型接地故障保护相同,但电气火灾监控系统的报警电流阈值通常设定在 500 mA 以下。然而,由于 N 极开关选型不当(例如,双电源回路错误地选用 3 极开关、弱电系统静态转换开关同样错误地选用 3 极开关,以及末端双电源切换箱内 N 排短接)以及施工安装过程中的不规范操作(如 N 线穿互感器时未与相线同步穿过、N 线穿反、N 线重复接地、末端设备 N 线接错、PE 线与 N 线混接、施工不当导致线缆破损等),这些现象普遍导致了电气火灾监控系统误报警,且难以有效整治^[10]。

电气火灾监控系统的误报警现象同样适用于剩余过流型接地故障保护。在地铁变电所中,0.4 kV 馈出线作为配电干线,若末端设备的接线存在错误,均可能引发剩余过流型接地故障保护的误动作。

3.2 零序过流型接地故障保护

零序过流型接地故障保护通过检测 ABC 三相电流的矢量和(即三相不平衡电流)来运作,适用于 TN-C、TN-S 和 TN-C-S 系统,但不适用于谐波电流较大的配电线路和单相配电线路在正常运行时的保护。该保护原理对于 N 线与地之间的短路故障无法提供有效保护,存在人体接触外壳时触电的风险。然而,这一风险可以通过采取外壳等电位连接措施来加以解决。

零序过流型接地故障保护整定值 I_{set0} 范围一般为 $0.2I_n \sim 1I_n$ (I_n 为断路器额定电流),时间整定值范围为 0.1 ~ 0.4 s, I_{set0} 应满足:

$$I_{\text{set0}} \geq 2I_N$$

$$I_{k1} \geq 1.3I_{\text{set0}} \quad (13)$$

式中:

I_N ——配电线路三相不平衡电流;

I_{k1} ——配电线路末端单相接地故障电流。

地铁变电所0.4 kV 馈出线作为配电干线,正常运行时三相不平衡电流通常不超过计算电流 I_C 的20%~25%,因此零序过流型接地故障保护 I_{set0} 在满足灵敏性的前提下,宜整定为50%~60% I_{set1} 。

由于剩余电流型和零序过流型接地故障保护的整定值均显著小于短延时过电流保护的整定值,因此这两种接地故障保护原理均能满足地铁配电回路的功能需求。从理论层面分析,剩余电流型接地故障保护在动作灵敏性和使用安全性方面均优于零序过流型,且IEC标准已不再将零序过流型纳入考虑范围。然而,剩余电流型接地故障保护对施工的要求极为严格。鉴于我国当前的技术水平、经济状况和设计惯例,建议优先采用零序过流型接地故障保护;待施工技术水平得到普遍提升后,再考虑采用剩余电流型接地故障保护。

4 结语

单相接地故障保护对于配电系统的安全运行至关重要,但在地铁0.4 kV 供电系统中,单相接地故障保护的设置往往被忽视。结合地铁的特点,本文提出了以下方案:35 kV 高压侧的过流保护同时作为0.4 kV 主母排的单相接地故障保护,0.4 kV 进线的单相接地故障保护由传统的跳闸方式优化为报警方式,0.4 kV 馈线回路则通过过流保护兼作单相接地故障保护,并给出了在此情况下允许的最大配电线路长度。当不满足兼作要求时,推荐使用零序过流型接地故障保护。该推荐方案在某地铁工程中得到了良好的应用。

随着运营年限的增加,配电线路的老化问题日益凸显,施工质量问题也逐渐暴露,这将进一步增加配电系统发生单相接地故障的风险。因此,建议在建和拟建工程在条件允许的情况下,考虑采用本文提出的单相接地故障保护设置方案。

参考文献

- [1] 贺家李,李永丽,董新洲,等. 电力系统继电保护原理[M]. 4版. 北京:中国电力出版社,2010:72.
HE Jiali, LI Yongli, DONG Xinzhou, et al. Principle of power system relay protection[M]. 4th ed. Beijing: China Electric Power Press, 2010: 72.
- [2] 周龙. 接地故障引起的某地铁站停电事故研究[J]. 工程技术研究, 2019, 4(8): 230.
ZHOU Long. Study on power failure accident of a subway station caused by grounding fault[J]. Engineering and Technological Research, 2019, 4(8): 230.
- [3] 盛龙,王志坚. 核电厂低压配电系统接地故障保护的设计与研究[J]. 电气应用, 2022, 41(11): 55.
SHENG Long, WANG Zhijian. Design and research of earth fault protection in low voltage distribution system of nuclear power plant[J]. Electrotechnical Application, 2022, 41(11): 55.
- [4] 王蛟,张刚. 城市轨道交通低压配电继电保护整定方法[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(8): 15.
WANG Jiao, ZHANG Gang. Methods for relay protection setting in low-voltage distribution transformer of urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(8): 15.
- [5] 郑晓庆. 城市轨道交通配电系统层级保护整定配置方法[J]. 天津理工大学学报, 2017, 33(2): 22.
ZHENG Xiaoping. Layered protection configuration method for urban rail transit power distribution system[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2017, 33(2): 22.
- [6] 中国航空规划设计研究总院有限公司组. 工业与民用供配电设计手册[M]. 4版. 北京:中国电力出版社, 2016: 513-661, 965.
China Aviation Planning and Design Institute (Group) Co., Ltd. Handbook of industrial and civil power supply and distribution design[M]. 4th ed. Beijing: China Electric Power Press, 2016: 513-661, 965.
- [7] 赵云云,王洪杰,申正超. 地铁配电变压器继电保护整定配合方案比选[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(1): 158.
ZHAO Yunyun, WANG Hongjie, SHEN Zhengchao. Comparison and selection of relay protection setting schemes of distribution transformer in subway power supply system[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(1): 158.
- [8] 中国航空规划设计研究总院公司. 工业与民用供配电设计手册[M]. 北京:中国电力出版社, 2016.
China Aviation Planning and Design Institute(Group) Co., Ltd. Industrial and civil power supply and distribution design manual[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [9] 杨旭东. 中压配电变压器低压侧单相接地保护浅析[J]. 建筑电气, 2009, 28(3): 17.
YANG Xudong. Preliminary discussion on low-voltage side single-phase earthing protection of medium-voltage distribution transformer[J]. Building Electricity, 2009, 28(3): 17.
- [10] 刘毅. 城市轨道交通电气火灾监控系统误报警分析及治理[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(5): 196.
LIU Yi. Analysis of electric fire monitoring system false alarm in urban rail transit and treatment[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(5): 196.

· 收稿日期:2023-02-24 修回日期:2023-12-27 出版日期:2025-03-10
Received:2023-02-24 Revised:2023-12-27 Published:2025-03-10
· 通信作者:周文卫,高级工程师,308562526@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