

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.202119

10 kV 大容量配电变压器差动保护配置应用研究

俞斌^{1,2}, 胡卓然¹, 李黎², 邹赫³, 黄晓明¹, 王志学¹

(1. 国网武汉供电公司, 湖北 武汉 430000; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430000;
3. 中国电力技术装备有限公司, 北京 100052)

摘要: 差动保护常作为变电站中大型变压器的主保护, 在 10 kV 配电变压器上应用案例较少。介绍了一起 10 kV 配电室中 2 500 kVA 大容量配电变压器的接地故障起火案例, 分析了故障原因。利用仿真软件, 对可能出现的低压侧短路故障进行仿真, 探讨了不同情况下的中低压保护动作情况。结合故障分析, 对该案例中 10 kV 配电变压器差动保护配置的必要性进行研究, 结果显示配变差动保护可有效解决中低压保护整定配合定值与时延级差难以配合的问题, 可灵敏监测低压侧接地故障下的保护“盲区”数据。针对性地设计了中低压二次系统改造方案, 以差动保护配置为核心, 完成智能综合监控系统建设。应用效果显示差动保护满足 10 kV 大容量配变极高的供电可靠性要求。

关键词: 差动保护; 智能配电室; 配电变压器; 开关分级保护; 高可靠性

Differential protection configuration of a 10 kV large capacity distribution transformer

YU Bin^{1,2}, HU Zhuoran¹, LI Li², ZOU He³, HUANG Xiaoming¹, WANG Zhixue¹

(1. State Grid Wuhan Power Supply Company, Wuhan 430000, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430000, China; 3. China Electric Power Equipment and Technology Co., Ltd., Beijing 100052, China)

Abstract: Differential protection is often used as the main protection of large transformers in substations, but there are few cases where it is applied to 10 kV distribution transformers. A fire in a 2500 kVA large-capacity distribution transformer in a 10 kV distribution room is introduced, and the cause of the fault is analyzed. A possible short-circuit fault in the low voltage side is simulated by the software, and the action of the low and medium voltage protection under different conditions is discussed. Combined with the fault analysis results, the need for differential protection of a 10 kV distribution transformer in this case is studied. The results show that the differential protection can effectively solve the problem of the difficulty of the coordination between the setting value and the time delay range of the medium-low voltage protection, and at the same time, it can sensitively monitor the protection "blind zone" data under the grounding fault of the low-voltage side. The transformation scheme of the secondary system is designed, and the construction of an intelligent integrated monitoring system is completed with differential protection configuration as the core. The results show that differential protection can meet the extremely high supply reliability requirements of a 10 kV large-capacity distribution transformer.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51777082).

Key words: differential protection; smart distribution station; distribution transformer; switch classification protection; high reliability

0 引言

变压器差动保护具备快速性以及对于变压器区外、区内故障的选择性, 在 220 kV 及以上电压等级

的主变压器上得到广泛应用^[1]。在 10 kV 配电线路上, 通常采用二段式线路保护(分别是速断、过流保护)作为配电线路及设备的主备保护。线路保护对变压器有一定的保护作用, 但其选择性、灵敏性以及可靠性均不足以满足部分重要用户极高的供电可靠性要求^[2-4]。当前, 在配网运行中, 配电变压器一般

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777082)

不设置单独的差动保护装置^[5-7]。一是由于配电变压器容量小,通常在1 000 kVA以下,不会引起较大的短路电流;二是常规的配电变压器内部故障可由线路保护满足故障切除需求。在武汉市武昌区某10 kV配电室内,采用了2台2 500 kVA容量的配电变压器作为某重要负荷的主电源,其中一台主变出现低压侧母排出口对地间隙放电故障,而中低压保护装置均未能检测到故障,导致低压母排绝缘悬挂支架起火,引发用户全停事件。对于此类配变容量大、供电负荷重要等级高、对供电可靠性有极高要求的场所,原有的线路保护无法满足可靠性的要求,因此需要在此类大容量、供电可靠性要求高的配电变压器增加变压器主保护,以满足供电要求。

本文深入分析本次故障原因,并对配变低压侧出口至低压进线总断路器范围内各类短路故障情况进行分析。对10 kV配电变压器使用差动保护的必要性和可行性进行分析,完成保护定值整定计算。结果显示,差动保护可有效提升中低压保护配置的选择性,提升保护的可靠性和灵敏性。自2020年12月5日该配电室智能监控系统建设改造完工至今,配电室未发生故障,差动保护等系统运行平稳,实现“零闪”供电,经济效益、管理效益、安全效益有力提升,现场应用实例验证了该方法的有效性。

1 故障分析

1.1 10 kV 配电室运行方式

如图1所示,该配电室由10 kV进线I、进线II、进线III三回线路供电,其中:I段母线电源为10 kV进线I,由中压柜01柜送入,通过05柜送至1#配电变压器(以下简称1#主变);II段母线电源为10 kV进线II,由中压柜02柜送入,通过08柜送至供2#配电变压器(以下简称2#主变);10 kV进线III为II段母线热备电源,送至中压柜04柜(断路器断开)。10 kV进线I和II为两个110 kV变电站10 kV馈线直接引至开闭所两段母线,接线方式为单母分

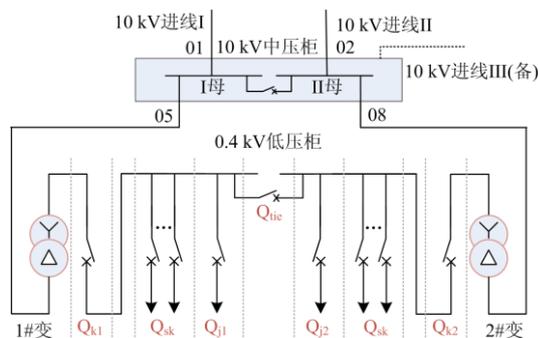


图1 配电室运行方式图

Fig. 1 Operation method diagram of distribution station

段运行,母联断路器处于常分状态,10 kV中压柜其余间隔均为备用间隔,断路器均已断开。

1#主变和2#主变为SCB11-2500/10型配电变压器,接线组别为Dyn11型。配电室0.4 kV低压线路为单母分段运行,1#主变和2#主变分别送至低压侧两段母线,并设置低压备自投,正常方式下母联开关 Q_{tie} 断开。

1.2 中低压保护配置

在10 kV侧,变电站内馈线断路器为10 kV线路第一级保护,投入速断、过流两段保护,定值、时延设置一致。10 kV中压柜01柜、02柜断路器所有保护压板退出。05柜、08柜上配置WGB-871型二次保护装置,均投入速断、过流两段保护,且定值、时延设置一致。

在0.4 kV侧,低压进线侧配置micrologic 6.0E型框架式断路器 Q_{k1} 和 Q_{k2} ,投入长延时、短延时、瞬时及接地保护。低压侧出线侧,通过micrologic 5.0E型框架式断路器 Q_{j1} 和 Q_{j2} 送至用户大楼地下配电室,通过40组NSX TMD 250H型塑壳断路器,送至用户侧各类型负荷。上述中低压保护装置的定值与时延如表1所示。

表1 10 kV 配电室保护配置情况

Table 1 10 kV power distribution protection configuration

保护位置	保护类型	定值/A (一次值)	时延/s
变电站内10 kV 馈线断路器	限时速断 过流	5 160 900	0.15 1
10 kV侧05、 08柜断路器	速断	1 080	0
	过流	198	0.4
0.4 kV侧 Q_{k1} 、 Q_{k2} 进线框架断路器	长延时	5 000	反时限
	短延时	50 000	0.4
	瞬时	75 000	0.02
0.4 kV侧 Q_{j1} 、 Q_{j2} 出线框架断路器	接地	1 200	0.4
	长延时	3 200	反时限
0.4 kV侧 Q_{sk} 出 线塑壳断路器	短延时	32 000	0.4
	瞬时	48 000	0.02
0.4 kV侧 Q_{sk} 出 线塑壳断路器	过负荷	150~400 A	150~400 A
	瞬时	10倍 I_n	10倍 I_n

1.3 故障过程

在某次正常运行状态下,因低压备自投定值设置偏高,发生疑似10 kV母线电压波动导致的误动作,2#主变进线断路器 Q_{k2} 断开,低压母联开关 Q_{tie} 合上,由1#主变带2#主变下侧全部负荷,转带后测量1#主变低压运行电流为2 700 A左右,负载率约为74.8%。在负荷转带之后,经过约2 h运行时间,1#主变低压出线母排、位于低压进线断路器 Q_{k1} 电

气位置前侧处发生起火，现场产生大量浓烟。事后检查发现，燃烧起火的配件为低压母线悬挂支架。

由图 2 所示现场照片推测，配电室 1#主变在本次故障过程中，因低压 B、C 两相母排重量较大，加上干式变压器长期震动的因素，导致母排悬挂支架下方承力处压垮，母排下侧对悬挂支架内部横向金属螺杆放电。通过放电烧蚀痕迹、母排上烧蚀产生的半圆形缺口以及母排支架金属螺杆的完整性可以判断，该放电为经空气介质的间隙性电弧放电，放电电流不大。可以推断，起火故障发生前期，低压侧 B、C 两相通过空气间隙对支架中的金属螺杆放电，并通过金属螺杆与变压器金属仓上壳对低压零线短路，产生的放电电弧导致接触点温度超过母线悬挂支架和低压母排绝缘套管绝缘材料燃点，直接引起了本次起火事件的发生。

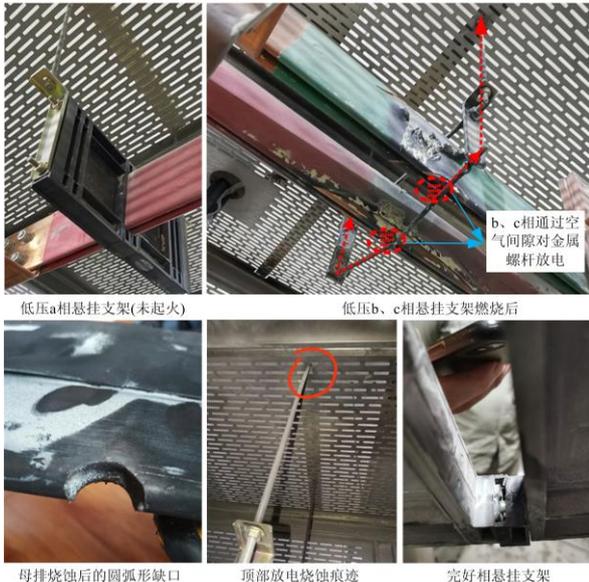


图 2 1#变压器低压母线(B、C相)悬挂支架放电痕迹

Fig. 2 1# transformer low-voltage bus suspension bracket discharge traces

此外，悬吊支架与母排框穿心螺杆在 B、C 两相四周形成封闭金属回路，且为导磁金属，环路内通过电流矢量和不为零，将形成感应涡流并释放一定热量，涡流将产生加剧悬吊支架及穿心螺杆发热的不利因素，也是最终导致母线悬挂支架起火的一大原因。

1.4 仿真分析

结合变电站母线系统阻抗、10 kV 电缆、变压器阻抗等参数，在 PSCAD 软件中建立如图 3 所示的故障仿真模型，其中： E_s 为变电站 10 kV 母线； Z_s 为配电室 10 kV 进线到变压器高压侧绕组的电缆线路阻抗；T 为配电室主变，变比取 10/0.4，联结

组别为 Dyn11，低压侧中性点接地； Z_L 为负载电阻，结合故障前电流与功率因数数据，取该值为 0.084Ω ；f 为故障发生地点。故障发生时间设置为仿真开始后 30 ms，故障类型设置为 B、C 两相接地短路，接地电阻分别设置为 0.000Ω 、 0.01Ω 、 0.5Ω 来模拟金属性接地、经不同阻值大小的低阻接地故障。仿真得到变压器中、低压侧线电流变化如图 4 所示。

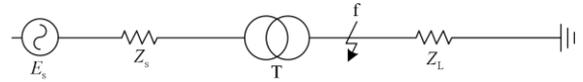


图 3 变压器低压母线故障仿真模型

Fig. 3 Simulation model of transformer low-voltage bus fault

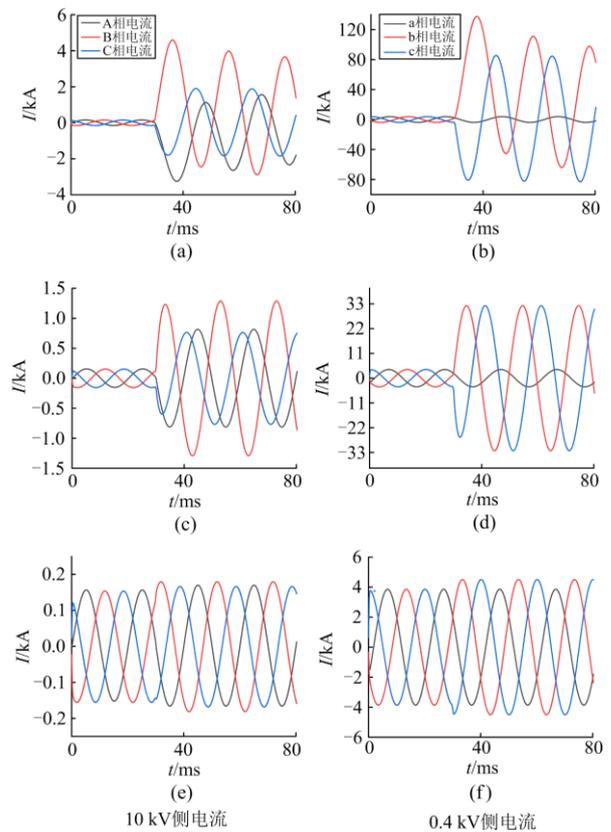


图 4 变压器低压侧 B、C 相接地情况下中、低压侧电流波形
Fig. 4 High and low voltage current waveforms under the metallic grounding of phase B and C in transformer low voltage side

图 4 中给出变压器低压侧 B、C 相接地情况下中低压侧电流波形。图中，(a)(b)代表金属性接地、(c)(d)代表经 0.01Ω 低阻接地、(e)(f)代表经 0.5Ω 低阻接地下的中低压短路电流波形。将图 4 仿真结果与 10 kV 开关柜 05 柜、08 柜二次保护装置定值进行对比，可以得到如表 2 所示的保护动作情况。

当低压侧 B、C 两相金属性接地时，高压侧电流最高值出现在 B 相，其有效值达到 2.37 kA，超

过 10 kV 开关柜 05 柜、08 柜速断段定值 1.08 kA, 10 kV 速断保护将动作; 经 0.01Ω 低阻接地时, B 相最大电流值达到 910 A, 超过 10 kV 开关柜 05 柜、08 柜过流段定值 198 A, 10 kV 过流保护将动作; 经 0.5Ω 低阻接地时, 10 kV 开关柜保护均不动作。

表 2 低压侧 B、C 两相接地故障电流与保护动作情况

Table 2 Fault current when B, C two phase grounded in low voltage side and protection action

故障类型	相别	高压侧电流有效值	低压侧电流有效值	保护动作情况
金属性接地	A	1.42 kA	2.73 kA	10 kV 速断保护将动作
	B	2.37 kA	59.46 kA	
	C	1.86 kA	59.11 kA	
0.01 Ω 低阻接地	A	577 A	2.73 kA	10 kV 过流保护将动作
	B	910 A	22.77 kA	
	C	541 A	22.80 kA	
0.5 Ω 低阻接地	A	120 A	2.73 kA	10 kV 线路保护均不动作
	B	127 A	3.19 kA	
	C	118 A	3.19 kA	

此外, 由于二段式线路保护定值的限制, 原有 10 kV、0.4 kV 低压保护配置难以满足中低压系统保护选择性的要求。因为线路保护速断、过流保护的灵敏性较差, 难以精准感知低压进线断路器前侧发生接地电阻较大的低阻接地等故障, 从而无法及时感知并切除故障。因此, 在改造过程中拟在原有保护基础上引入变压器差动保护, 并修改保护整定定值, 以满足中低压保护配置的选择性、可靠性要求。

2 差动保护配置

2.1 差动保护原理

差动保护是将 CT 的两端电流矢量差作为故障特征量, 当达到设定动作值时启动动作元件的一种保护^[8]。保护范围为 CT 两端之间的设备(可以是线路、发电机、电动机、变压器等电气设备)。差动保护的基本原理为基尔霍夫电流定律^[9]。当保护区间内设备出现故障时, 流进被保护设备的电流和流出的电流不相等, 差动电流大于零。当差动电流大于差动保护装置的整定值时, 上位机报警保护出口动作, 将被保护设备的各侧断路器跳开, 切除故障设备。对于电压等级 10 kV 以上、容量达到单独运行 10 MVA 或并列运行 6.3 MVA 的变压器应采用差动保护。值得注意的是, 此种情况下的变压器绝大多数接线方式都是 Yd11 型接线。

差动保护相较于电流速断保护主要有以下优点: 一是以 KCL 为故障判据, 原理简单, 动作迅速。二是具有天然选相能力。三是保护范围不受系统振

荡、非全相运行、系统运行方式的影响^[10]。

2.2 可行性分析

对于变压器“联结组标号”为 Dyn11 型号的配电变压器而言, 若需装设差动保护, 可以画出其接线方式如图 5 所示。

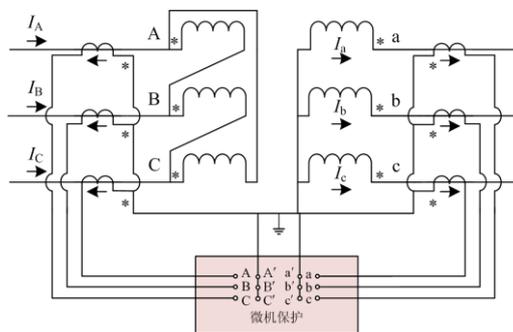


图 5 Dyn11 型配电变压器上的差动保护装置接线图

Fig. 5 Wiring diagram of differential protection device on Dyn11 distribution transformer

从图 5 可以看到, 在 Dyn11 型配电变压器上装设差动保护装置最大的问题在于变压器低压侧中性点直接接地、中性点引出零线的存在, 使得两侧电流互感器流入流出的电流不再相等, 在三相负荷不平衡或者差动保护区外低压侧出线接地故障时, 都有可能引起差动保护装置跳闸。

如图 6 所示, 当配电变压器低压侧 a 相发生接地短路故障时, 故障相 a 相和变压器低压侧中性点通过大地形成了闭合回路。由于主变低压侧中性点直接接地, 短路点和中性点之间的零序阻抗较小, 于是在施加 a 相电压下产生了较大的零序电流, 幅值为低压侧三相零序电流之和。与此同时, 变压器高压侧的绕组中也会感应出零序电动势, 但由于高压侧接线方式为三角型, 零序电流在绕组内部循环, 不能流出绕组。也就是说, 当低压侧发生单相接地时变压器低压侧有零序电流, 而高压侧无零序电流。而 Yd11 型变压器低压侧发生单相接地时, 零序电流构不成通路, 对差动保护没有影响, 无需消零。

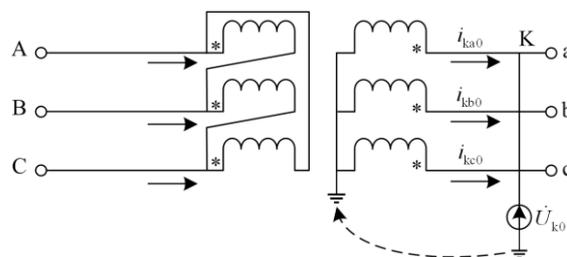


图 6 Dyn11 变压器零序电流分布示意图

Fig. 6 Dyn11 transformer zero sequence current distribution diagram

2.3 定值整定

1) 比率制动式纵联差动保护其动作特性曲线如图 7 所示。

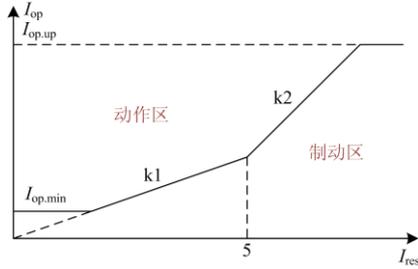


图 7 比率制动特性曲线

Fig. 7 Ratio braking characteristic curve

a) 最小动作电流

$$I_{op.min} = K_{rel}(K_{cr} + \Delta U + \Delta m)I_e \quad (1)$$

式中： I_e 为变压器基准侧二次额定电流； K_{rel} 为可靠系数，取 1.3~1.5； K_{cr} 为电流互感器的变比误差，取 0.02； ΔU 为变压器调压引起的误差； Δm 为互感器变比未完全匹配产生的误差。此处取：

$$I_{op.min} = 0.5I_e \quad (2)$$

b) 拐点电流：装置固定为 $I_t = 5I_e$ 。

c) 斜率 K_1 ：一般取 0.3~0.5，此处取 $K_1 = 0.5$ ，根据 $I_{op} = 0.5I_{res}$ 可求得初始制动电流为 $I_{res,0} = I_e$ 。

d) 斜率 K_2 ：一般取 0.5~1，此处取 $K_2 = 1$ 。

e) 二次谐波制动系数

$$K_{res(2)} = \frac{I_{d2\phi}}{I_{d\phi}} = 0.15 \sim 0.2 \quad (3)$$

式中： $K_{res(2)}$ 为二次谐波制动系数； $I_{d\phi}$ 为三相差动电流基波电流； $I_{d2\phi}$ 为二次谐波电流。

f) 灵敏系数

最小运行方式下两相短路的一次制动电流为

$$I_{res} = \frac{1}{2} |I_{k1}| = \frac{1}{2} \times 1961 = 980.5 \text{ A} \quad (4)$$

以上制动电流在第三折线中，其中 I_{k1} 为最小运行方式下变压器低压侧两相短路电流。

最小运行方式下两相短路的一次动作电流为

$$I_{op} = (I_{res} - 5I_e)K_2 + 5I_eK_1 = 619.75 \text{ A} \quad (5)$$

保护灵敏度为

$$K_{sen} = \frac{I''_{k2.min}}{I_{op}} = \frac{1961}{619.75} = 3.16 \geq 1.5 \quad (6)$$

式中， $I''_{k2.min}$ 为最小运行方式下保护区内两相最小短路电流。

2) 差动速断

差动速断电流的启动值按躲过变压器可能产生的最大励磁涌流或外部短路最大不平衡电流整定。对于 6 300 kVA 以下变压器，可取 $I_i = (7 \sim 12)I_e$ ，此处取 $7I_e = 1010 \text{ A}$ 。

但从表 1 可以看到，本次配电室低阻故障中，一次侧电流值为 120 A，小于差动速断电流定值，也即差动保护装置的灵敏度仍会受到小阻值接地故障的影响。鉴于此，在差动保护配置过程中，特别投入了零序报警功能，针对小阻值接地故障，保护装置只投报警出口，不投跳闸出口，从而很好地解决了高可靠性和高灵敏性之间的矛盾。

3) 定值配合

根据引入的变压器差动保护重新整定保护参数，整定定值如表 3 所示。

表 3 改造后配电室保护定值整定情况

Table 3 Protection setting situation of the power distribution room after the transformation

保护位置	保护类型	定值/A	时延/s
变电站内 10 kV 馈线断路器	速断保护	5 160	0.15
	过流保护	900	1
	差动速断	7	0
1#、2#配电变压器	比率差动	0.5	
	过流保护	11.53	0.7
0.4 kV 进线断路器	长延时过负荷保护	5 000	24
	短延时过负荷保护	15 000	0.4
	接地保护	1 200	0.4
0.4 kV 出线断路器	长延时过负荷保护	3 200	24
	短延时过负荷保护	9 600	0.2
	瞬时电流保护	48 000	0

2.4 智能综合监控系统

针对此次故障设计了中低压二次系统改造方案，以 10 kV 配电变压器差动保护配置为核心，在原配电室一次设备基本不动的情况下，实施了智能综合监控系统建设改造。改造硬件设施如图 8 所示，增加了热成像摄像头、红外温度控制器、烟雾传感器、红外双鉴探测器等设备^[11-14]，对配电室的温度、水浸、安防等方面进行全方位的智能监控，通过智能联网的方式有效提升了配电室的安全性和可靠性水平。此外，应用全套电能质量智能监测终端，收集关键节点的用电量、电压、电流、谐波含量等信息，实现故障的主动抢修服务^[15-18]。

在智能配电室硬件结构的基础上，使用了以 5G 网络切片技术为核心的系统架构^[19-21]，如图 9 所示。通过云计算与 5G 技术将设备采集到的环境信息进行处理传输，上传到监控中心进行参数的集中监控。同时，监控中心通过 5G 切片技术，实现手机 APP

与配电室的双向授权认证^[22-24], 并采用信号区域授权管控, 保障配电室信息数据安全不泄露。

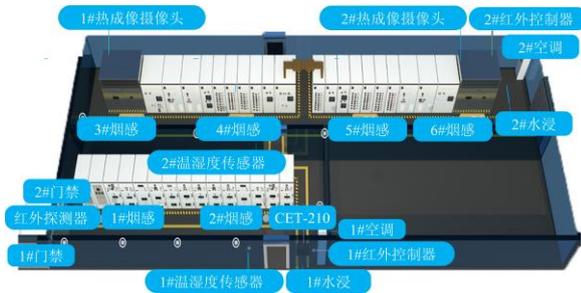


图 8 硬件结构图

Fig. 8 Hardware structure diagram

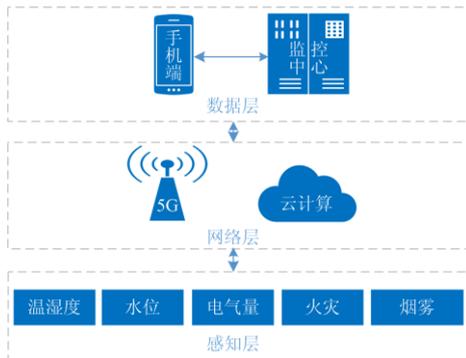


图 9 系统结构图

Fig. 9 Software structure diagram

3 结论

文中介绍某 10 kV 配电室保护装置参数配置情况, 建立了 PSCAD 仿真模型, 通过仿真可以推断, 本次故障为低阻接地类型, 即 B、C 两相分别经电弧电阻对零线放电。在故障发展过程中, 中、低压侧三相电流值较小, 未达到保护装置动作定值, 是本次故障中 10 kV 开关柜保护装置未动作的根本原因。针对故障, 提出差动保护的可行性分析, 分析显示, 配变差动保护可有效解决中低压保护整定配合定值与时延级差难以配合的问题, 同时可灵敏监测低压侧接地故障下的保护“盲区”数据。文中介绍了差动保护定值的整定方法以及与阶段式低压电流保护的配合定值。设计了中低压二次系统改造方案, 以 10 kV 配电变压器差动保护配置为核心, 在原配电室一次设备基本不动的情况下, 建立了包含环境监控感知的智能化配电室硬件设计方案及数据传输网络架构, 并利用 5G 切片技术来保障配电室数据传输的安全性。智能综合监控系统的成功建设与数据感知, 进一步验证了差动保护可以有效提升 10 kV 大容量配电变压器供电可靠性。

参考文献

- [1] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Summary of research on frequency modulation of power system under high wind power permeability[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [2] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 1-8.
LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Calculation method of transient overvoltage of sending end system under DC bipolar blocking fault[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8.
- [3] 刘润根, 陈超, 杨蕊菁, 等. 基于小波相对熵的变电站直流系统接地故障定位方法[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 169-174.
LIU Yugen, CHEN Chao, YANG Ruijing, et al. Location method of ground fault in DC system of substation based on wavelet relative entropy[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 169-174.
- [4] 廖峰, 陈锦荣, 黎永豪, 等. 小电阻接地方式下接地变压器零序差动保护的研究及应用[J]. 广东电力, 2020, 33(7): 100-106.
LIAO Feng, CHEN Jinrong, LI Yonghao, et al. Research and application of zero-sequence differential protection of grounding transformer under the mode of small resistance grounding[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(7): 100-106.
- [5] WANG Bin, GENG Jianzhao, DONG Xinzhou. High-impedance fault detection based on nonlinear voltage-current characteristic profile identification[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 783-791.
- [6] 薛永端, 刘珊, 王艳松, 等. 基于零序电压比率制动的小电阻接地系统接地保护[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 112-117.
XUE Yongduan, LIU Shan, WANG Yansong, et al. Grounding fault detection in low resistance grounding system based on zero-sequence voltage ratio restrain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 112-117.
- [7] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进VDCOL的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.
- [8] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. 电力系统保护与

控制, 2020, 48(19): 119-127.

CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Hybrid DC transmission system fault isolation method based on coordination of current limiter and circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 119-127.

[9] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 76-83.

SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional-order control of battery/superconducting hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 76-83.

[10] 许庆强, 许扬, 周栋骥, 等. 小电阻接地配电网线路保护单相高阻接地分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(9): 91-94.

XU Qingqiang, XU Yang, ZHOU Dongji, et al. Analysis of distribution network line relay protection during single-phase high-resistance grounding faults in low resistance neutral grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(9): 91-94.

[11] 谢伟, 王哲斐, 蔡秋焯, 等. 基于最优系统能效的配电网规划方法[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 128-134.

XIE Wei, WANG Zhewen, CAI Qiuye, et al. Distribution network planning method based on optimal system energy efficiency[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 128-134.

[12] 朱丹丹, 赵静波, 李强, 等. 高载能负荷企业参与受阻风电消纳决策方法[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 121-127.

ZHU Dandan, ZHAO Jingbo, LI Qiang, et al. Decision-making method for enterprises with high energy load to participate in obstructed wind power consumption[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 121-127.

[13] 张建新, 吴峰, 黄磊, 等. 考虑设备运行状态的频率和电压紧急调控在线预决策[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 101-106.

ZHANG Jianxin, WU Feng, HUANG Lei, et al. Online pre-decision-making of frequency and voltage emergency regulation in consideration of equipment operating status[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 101-106.

[14] SONG C, LI Y, RAJEH T, et al. Application and development of ground source heat pump technology in China[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(2): 215-232. DOI: 10.1186/s41601-021-00195-x.

[15] 中华人民共和国能源部. 电力装置的继电保护和自动装置设计规范: CB50062-92[M]. 北京: 中国计划出版社, 1992.

[16] 厂用电继电保护整定计算导则: DL/T 1502—2016[S].

[17] 刘林, 祁兵, 李彬, 等. 面向电力物联网新业务的电力通信网需求及发展趋势[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3114-3130.

LIU Lin, QI Bing, LI Bin, et al. Requirements and developing trends of electric power communication network for new services in electric internet of things[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3114-3130.

[18] GOPE P, SIKDAR B. Privacy-aware authenticated key agreement scheme for secure smart grid communication[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3953-3962.

[19] KONG P Y. Optimal configuration of interdependence between communication network and power grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(7): 4054-4065.

[20] PARK L, JEONG S, LAKEW D S, et al. New challenges of wireless power transfer and secured billing for internet of electric vehicles[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(3): 118-124.

[21] 张宁, 杨经纬, 王毅, 等. 面向泛在电力物联网的5G通信: 技术原理与典型应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4015-4025.

ZHANG Ning, YANG Jingwei, WANG Yi, et al. 5G communication for the ubiquitous internet of things in electricity: technical principles and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4015-4025.

[22] 聂峥, 章坚民, 傅华渭. 配变终端边缘节点化及容器化的关键技术和应用场景设计[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 154-163.

NIE Zheng, ZHANG Jianmin, FU Huawei. Key technologies and application scenario designs for making distribution transformer terminal unit being a containerized edge node[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 154-163.

[23] KONG P Y, SONG Y. Joint consideration of communication network and power grid topology for communications in community smart grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(5): 2895-2905.

[24] LI W, LOGENTHIRAN T, VAN-TUNG P, et al. A novel smart energy theft system (sets) for IOT-based smart home[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 5531-5539.

收稿日期: 2021-04-01; 修回日期: 2021-07-24

作者简介:

俞斌(1990—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为配电网线路保护控制、脉冲功率放电、高压电缆; E-mail: 616928315@qq.com

李黎(1976—), 男, 通信作者, 博士, 研究员, 研究方向为脉冲功率技术及强流脉冲气体开关。E-mail: leeli@hust.edu.cn

(编辑 葛艳娜)