

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201620

## 220 kV 变电站主变低压侧跳闸典型故障分析与启示

胡浩<sup>1</sup>, 魏华跃<sup>1</sup>, 刘国玉<sup>1</sup>, 张人龙<sup>1</sup>, 蔡正梓<sup>1</sup>, 杨明华<sup>1</sup>, 姜望<sup>2</sup>

(1. 国网北京市电力公司, 北京 100031; 2. 国网山西省电力公司检修分公司, 山西 太原 030001)

**摘要:** 在各类电压等级的变电站故障之中, 主变低压侧故障是较为常见的典型故障, 此类故障往往依靠相关设备的后备保护动作切除, 不可避免地扩大了故障范围。为了解决此类问题, 针对中性点经小电阻接地系统中一座220 kV 变电站所发生的主变低压侧故障, 运用对称分量法, 结合录波图、相量图对其保护动作情况进行了分析, 指出主变出口低压侧母线桥绝缘击穿是造成此次死区故障的原因。剖析了具有接地故障表征的死区故障特征。进而从发挥运行值班人员的主观能动性、提升设备运维综合化水平、提升主配网一体化调控系统智能化水平及改变电网供电模式等多个角度, 对未来如何防范和缓解此类故障的影响提出了建议。

**关键词:** 主变低压侧故障; 后备保护; 小电阻接地系统; 故障分析; 微电网

### Typical fault analysis and revelation of a low voltage side trip of a main transformer in a 220 kV substation

HU Hao<sup>1</sup>, WEI Huayue<sup>1</sup>, LIU Guoyu<sup>1</sup>, ZHANG Renlong<sup>1</sup>, CAI Zhengzi<sup>1</sup>, YANG Minghua<sup>1</sup>, JIANG Wang<sup>2</sup>

(1. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China; 2. Maintenance Branch of State Grid Shanxi Electric Power Corporation, Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** Among all kinds of power substation faults across various voltage levels, the low-voltage side fault of the main transformer is a common typical one. This fault is often dependent on the backup protection action of the relevant equipment for its removal. This inevitably enlarges the fault-impacted areas. In order to remedy this problem, the fault at the low voltage side of the main transformer in a 220 kV substation where the neutral point is grounded through the small resistance is investigated. The symmetrical component method is used to analyze the protection action, which is further combined with fault-recording and phasor diagrams. The insulation breakdown of the bus bridge at the low voltage side of the main transformer outlet is the cause of the dead zone fault. The characteristics of dead zone fault with grounding fault representation are analyzed. This should give full play to shift personnel's subjective initiative, as well as improving the comprehensive level of equipment operation and maintenance, improving the intelligent level of the integrated dispatching and control system of the primary and distribution network, and changing the power supply mode of the power grid. Some suggestions are put forward to prevent and alleviate the influence of such faults in the future.

This work is supported by the Liaoning Provincial Key Research and Development Program (No. 2017106018) and the Liaoning Provincial Key Research and Development Program of Science and Technology (No. 2018106019).

**Key words:** low-voltage side fault of main transformer; backup protection; small-resistance grounding system; fault analysis; micro-grid

## 0 引言

在电网各类故障之中, 由于出线开关拒动、接地故障或其他原因造成变电站站内接地变保护或主变后备保护动作切除故障设备, 是一种较为常见的典型故障。此类故障波及面广、影响供电客户特别

是重要客户供电的可能性大, 处置方法灵活, 对运行值班人员以及技术人员都具有重要的参考价值与借鉴意义。因此, 有必要对此类故障进行有针对性的研究与讨论。

以下文献从传统角度出发, 针对各种特殊情况下的越级故障进行技术研讨: 文献[1-4]均以一线实际案例为切入点, 通过对故障录波图、故障分量相量图、保护动作情况进行分析, 指出“人”、“机”、“管”、“环”多重因素是造成越级故障的重要原因,

**基金项目:** 辽宁省重点研发项目资助(2017106018); 辽宁省科学技术重点研发计划项目资助(2018106019)

并据此总结了相应的防范措施；文献[5]运用频率响应和油色谱分析法，指出 10 kV 电缆故障是造成主变越级跳闸的关键因素；文献[6]通过分析高阻接地线路故障的保护动作行为，指出由于灵敏度不足，即使整定值无问题，依然无法避免故障范围扩大化；文献[7]指出由于工艺漏项导致主变低压侧绝缘母线受潮引发局部放电；文献[8]针对 220 kV 某变电站 GIS 单相接地故障，对发生故障的隔离开关进行现场解体及返厂检查，对动静触头、盆式绝缘子、壳体内壁和均压罩进行检查，并采用有限元法对隔离开关进行电场仿真计算；文献[9]提出了一种基于小波相对熵的直流系统接地故障定位方法；文献[10]针对日益增长的小电流接地故障检测与保护装置的测试需求，研制了基于数字仿真结果的小电流接地故障模拟测试系统。而以下文献另辟蹊径，提出了全新的防范思路：文献[11-12]采用改造后备保护的办 法，减轻穿越性故障电流的危害；文献[13]利用开关柜内故障特征研制了一种精准的柜式低压侧母线保护，改善了传统后备保护低效的缺点；文献[14]利用电力电子元件设计出一种动态电阻接地装置，提升了保护动作的灵敏度与可靠性。文献[15]针对配网小电流接地故障选线准确性差的问题，该文在波形相似度理论基础上，研究了配网小电流接地故障选线技术。

主变低压侧故障本质上属于配网源端故障，因此，提升配网故障处置能力有助于减轻此类故障的负面影响。文献[16-19]重点分析了中性点经小电阻接地系统中接地变对于保障配网系统安全运行的理论依据与重要价值。文献[20]通过对随机矩阵特征根平均谱半径(Mean Spectral Radius, MSR)指标的分析，给出了随机矩阵原理应用于用户用电异常区域定位的具体步骤，同时也可以实现用户侧用电异常时刻点的特征发现。文献[21-22]分别采用智能化调控体系和数据驱动型主、配网一体化调控监测平台提升电网供电质量，减少停电负荷损失。考虑到分布式系统在能源供应体系中扮演的日益重要的角色，近年来兴起的微电网也为配网故障处置、电网优化运行、能源互补兼容提供了新的手段<sup>[23-30]</sup>。

然而，这些文献一方面对于本文所涉及的变电站主变出口绝缘母线短路故障造成接地变跳闸的案例未曾涉及，亦未对 220 kV 负荷变电站的低压侧跳闸故障现象做出总结；另一方面，近年来的研究尽管各有侧重，但未曾以一线实践经验为立足点，从全局性、系统性、人的主观能动性的角度对如何解决此类问题进行分析。

鉴于以上不足，本文结合一线工作，梳理了主

变低压侧跳闸故障的主要现象，以一座 220 kV 变电站发生的典型故障为例，在分析其保护动作情况及相关处置方法的基础上，从人的主观能动作用、设备运维综合化、主配网一体化调控系统智能化及未来电网发展方向上提出了相关的防范措施与启示，给未来处理与防范此类故障提供了一种可供参考的思路。

## 1 变电站情况简介

本文研究对象为典型的 220 kV 负荷变电站：10 kV 侧为小电阻接地系统；10 kV 母线没有独立速断保护，依靠后备保护切除故障。

### 1.1 220 kV 变电站一次设备

该变电站站内配置三台主变，Y/Y/△绕组接线，10 kV 电压等级运行方式如下所述。

10 kV 接线方式为单母线分段接线，201、202A、202B、203 开关分别运行在 10 kV4#、10 kV5A#、10 kV5B#、10 kV6#母线；母联 245、256 开关断，掉 201、202A 投 245 自投运行，掉 202B、203 投 256 自投运行。其中，2#主变低压侧采用分支接线方式，2#接地变(中性点经小电阻接地)243 开关运行在 10 kV5A#母线。

一次设备接线图如图 1 所示，虚线部分是本文所分析典型故障对应的相关设备范围。

### 1.2 220 kV 变电站相关保护配置

本变电站保护配置如表 1 所示(只列出与故障有关的保护装置信息)。

表 1 保护配置

Table 1 Protection configuration

一次设备	保护配置	保护型号
2#主变	复压闭锁过流保护	PCS-978GE
2#接地变	过流保护	PCS-9621
2#接地变	零序过流保护	PCS-9621

主变低压侧 1 分支后备保护装置信息如表 2 所示，相间电流互感器(Current Transformer, CT)变比 6000/5。202A 开关掉闸联掉 202B 及本母线接地变 243 开关。

表 2 主变低压侧 1 分支后备保护定值

Table 2 Backup protection setting values of branch 1 of low voltage side of main transformer

整定值名称	整定值	动作元件
复压闭锁过流 I 段定值/A	6	—
复压闭锁过流 I 段一时限/s	1.5	跳 245
复压闭锁过流 I 段二时限/s	2	跳 202A, 闭锁 245 自投

主变低压侧 2 分支后备保护装置信息如表 3 所示，相间 CT 变比 6000/5。

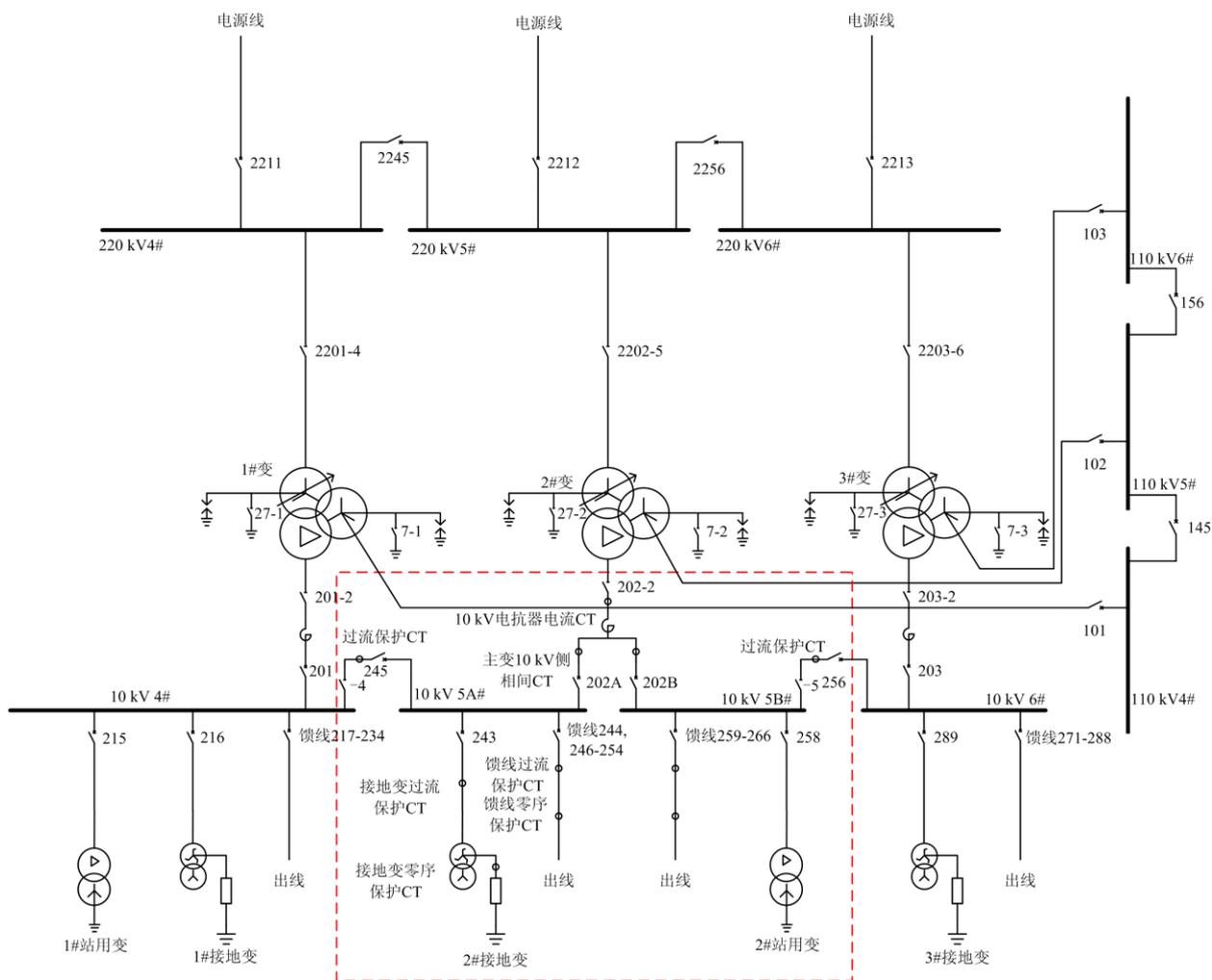


图 1 220 kV 变电站一次接线图

Fig. 1 Primary connection of 220 kV substation

表 3 主变低压侧 2 分支后备保护定值

Table 3 Backup protection setting values of branch 2 of low voltage side of main transformer

整定值名称	整定值	动作元件
复压闭锁过流 I 段定值/A	6	—
复压闭锁过流 I 段一时限/s	1.5	跳 256
复压闭锁过流 I 段二时限/s	2	跳 202B, 闭锁 256 自投

主变自定义后备保护装置信息如表 4 所示, 10 kV 电抗器电流 CT 变比 4000/5。跳总出口, 即跳 2212、2245、2256、102、202A、202B 开关并闭锁 2245、2256 自投。

接地变保护信息如表 5 所示, 零序保护 CT 变比 100/5, 过流保护 CT 变比 200/5。过流保护和零序保护动作均跳 202A 开关同时联掉 202B 及 243 开关。

表 4 主变自定义后备保护定值

Table 4 Custom backup protection setting values of main transformer

整定值名称	整定值	动作元件
复压闭锁过流定值/A	9	—
复压闭锁过流一时限/s	2.5	跳总出口

表 5 接地变相关保护定值

Table 5 Protection setting values of grounding transformer

整定值名称	整定值	动作元件
过流 I 段定值/A	25	—
过流 II 段定值/A	5	—
零序过流 I 段定值/A	4.5	—
零序过流 II 段定值/A	4.5	—
过流 I 段时间/s	0	跳 202A
过流 II 段时间/s	2	跳 202A
零序过流 I 段第一时限/s	1.5	跳 245、256
零序过流 II 段时间/s	2	跳 202A, 闭锁 245、256 自投

## 2 主变低压侧故障分析

### 2.1 故障现象分类

220 kV 变电站发生主变低压侧开关跳闸故障, 大致分为 10 kV 馈线越级故障、10 kV 接地变间隔本体设备故障、主变低压侧设备非死区故障与主变低压侧设备死区故障四类(不考虑保护拒动)。

1) 10 kV 馈线越级故障。此类故障往往首先发出 10 kV 馈线保护动作信号, 由于开关拒动, 无法切除故障, 进而导致接地变或主变低压侧后备保护动作切除故障。如果发生故障类型为两相短路、三相短路故障, 线路过流保护动作但开关拒动, 一旦故障电流达到主变低压侧后备保护定值, 则根据保护信息可知, 主变复压闭锁过流 I 段启动, 第一时限 1.5 s 跳主变低压侧相应分支主开关相邻母联开关, 第二时限 2 s 跳主变低压侧相应分支主开关并闭锁相邻母联自投, 造成主变低压侧相应分支母线失电, 切除故障(若跳变压器低压侧 1 分支主开关 202A 开关则联掉 202B 及 243 开关, 同时 256 自投出口动作合上 256 开关)。如果发生故障类型为单相接地、两相短路接地, 则接地变接地点与故障点构成零序电流通路, 根据保护信息可知, 如故障电流达到接地变零序保护动作定值, 接地变零序保护启动, 零序过流 I 段 1.5 s 动作跳母联 245、256 开关, 零序过流 II 段 2 s 动作跳主变 202A 开关, 联掉 202B、接地变 243 开关, 闭锁母联 245、256 自投, 造成 10 kV 5A#、5B# 母线失电, 从而切除故障。

2) 10 kV 接地变间隔本体设备故障。此类故障由 10 kV 接地变自身保护动作切除故障, 如果故障电流达到接地变过流保护动作定值, 则过流保护动作跳主变 202A 开关, 联掉 202B、接地变 243 开关, 母联 245、256 自投动作合上母联 245、256 开关, 不会造成母线失电。如果故障类型为接地故障, 故障电流未达到过流保护动作定值但是达到接地变零序保护动作定值, 保护动作过程同 1) 所述。

3) 主变低压侧设备非死区故障。此类故障是指主变 10 kV 侧相间 CT 至 10 kV 馈线保护 CT 之间接地变和主变后备保护范围可以覆盖, 但馈线保护无法覆盖的非死区设备故障。如发生故障类型为两相短路、三相短路故障, 则一般由主变低压侧后备保护动作切除故障; 如果发生故障类型为单相接地、两相接地故障, 则一般通过接地变零序保护动作切除故障。保护动作过程同 1) 所述。

4) 主变低压侧设备死区故障。此类故障是指主变 10 kV 侧出口至 10 kV 主开关之间的死区设备故障。假设故障在主变 10 kV 侧相间 CT 至主开关之

间, 如发生故障类型为两相短路、三相短路故障, 则一般由主变低压侧后备保护先行动作跳开低压侧主开关, 故障切除无效后由主变自定义后备保护经延时切除故障; 假设故障在主变出口至 10 kV 电抗器 CT 之间发生, 如果发生故障类型为接地故障, 则一般触发接地变零序保护动作, 保护动作过程同 1) 所述, 但需要注意的是, 由于接地变保护动作后, 故障依然无法切除, 而一般情况下, 由于故障电流无法达到主变差动保护、后备保护动作定值, 由此将导致故障点持续存在。从保护动作情况角度分析, 此类接地故障极易与 2)、3) 混淆, 且一旦误判, 将造成更为严重的后果, 需要综合运用各种技术手段避免误判。

根据上述情况, 相关保护动作情况如图 2 所示。

### 2.2 故障案例分析

本文针对前述变电站所发生典型故障进行分析。故障梗概如下: 保护启动时刻(0 时刻), 2# 接地变零序过流 I 段、II 段保护启动, 但此时属于间断放电阶段, 故障电流未达到保护动作定值。在相对 0 时刻的 10 250 ms 时刻发生永久性 A 相接地故障, 11 752 ms 时刻 2# 接地变零序过流 I 段保护动作跳开母联 245、256 开关, 将故障影响范围限制在 10 kV 5A#、5B# 母线以及所连接设备上, 12 252 ms 零序过流 II 段保护动作, 跳开 202A 开关, 联掉 202B、243 开关, 闭锁 245、256 自投。

首先, 使用对称分量法对故障进行理论分析。由于 A 相接地, 故而在接地点对于各相电流有如式 (1) 的边界条件。

$$\begin{cases} \dot{I}_{fa} = \dot{I}_k \\ \dot{I}_{fb} = 0 \\ \dot{I}_{fc} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\dot{I}_{fa}$ 、 $\dot{I}_{fb}$ 、 $\dot{I}_{fc}$  分别为故障点的三相故障电流;  $\dot{I}_k$  为故障点的接地相故障电流。

根据对称分量法原理, 有

$$\begin{cases} \dot{I}_{fa} = \dot{I}_{fa1} + \dot{I}_{fa2} + \dot{I}_{fa0} \\ \dot{I}_{fb} = a^2 \dot{I}_{fa1} + a \dot{I}_{fa2} + \dot{I}_{fa0} \\ \dot{I}_{fc} = a \dot{I}_{fa1} + a^2 \dot{I}_{fa2} + \dot{I}_{fa0} \end{cases} \quad (2)$$

式中: 运算符号  $a = e^{j120^\circ}$ ;  $\dot{I}_{fa1}$ 、 $\dot{I}_{fa2}$ 、 $\dot{I}_{fa0}$  分别为序分量等效网络中的正序、负序、零序电流。

由此可以得到式(3)。

$$\begin{cases} \dot{I}_{fa1} = \dot{I}_{fa2} = \dot{I}_{fa0} = \dot{I}_0 \\ \dot{I}_k = \dot{I}_{fa} = 3\dot{I}_0 \end{cases} \quad (3)$$

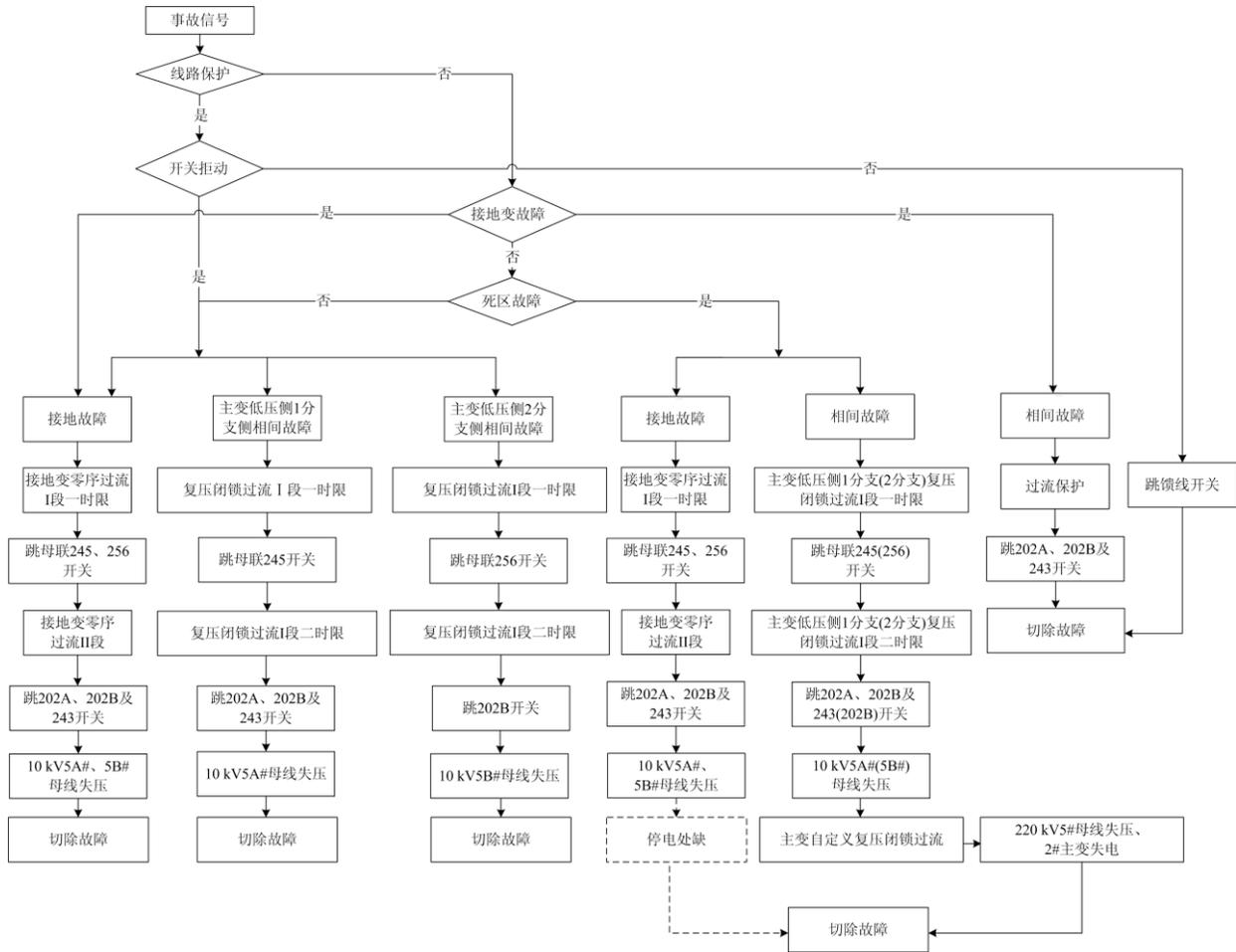


图 2 主变低压侧跳闸故障现象

Fig. 2 Fault phenomenon of low voltage side trip of main transformer

结合文献[16-19]可知, 发生单相接地后, 在中性点经小电阻接地系统中, 故障电流  $3i_0$  从接地点经由母线通过接地变中性点引出线流回大地。流过接地变各相 CT 故障电流为  $i_0$ , 流过接地变中性点引出线即流过零序 CT 的故障电流  $i_N$  为  $3i_0$ 。

接地变各相故障电流与中性点引出线零序电流之间关系如图 3 所示。



图 3 接地变故障电流相量图

Fig. 3 Fault current phasor diagram of grounding transformer

接地变故障录波图如图 4 所示。

由图 4 可以看出: 在接地变 243 开关保护跳闸时刻, 接地变二次侧相电流约为 3.3 A, 小于过流保护动作定值, 因而接地变过流保护不会动作。

由于接地变 243 开关二次侧零序电流约为

19.7 A, 即流过接地变零序 CT 电流为 19.7 A, 大于接地变零序保护动作定值, 故而只有接地变零序保护动作。

选择保护跳闸时刻各故障电气量相量进行分析, 如图 5 所示。



图 4 接地变录波图

Fig. 4 Fault-recording diagram of grounding transformer

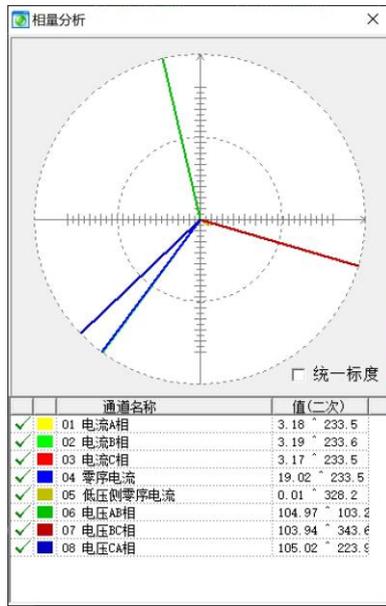


图 5 接地变故障相量示意图

Fig. 5 Fault phasor diagram of grounding transformer

接地变故障录波信息如表 6 所示。

表 6 接地变录波信息

Table 6 Fault-recording information of grounding transformer

相对时间/ms	动作元件
0	保护启动
11 752	零流 I 段第一时限
11 752	保护跳闸
12 252	零序过流 II 段
12 338	零流 I 段第一时限: 返回
12 338	零序过流 II 段: 返回
12 338	保护跳闸: 返回
12 838	保护启动: 返回

由图 5 可以看出, 接地变单相故障电流  $i_0$  约为 3.2 A, 小于过流保护动作定值, 因而接地变过流保护不会动作; 流过零序 CT 故障电流  $3i_0$  约为 19 A, 高于 4.5 A, 故而接地变零序保护动作, 与故障录波分析一致。

由图 5 可知, 接地变相电流二次侧有效值约为 3.2 A, 折算至接地变零序 CT 二次侧为 6.4 A, 则  $3i_0$  为 19.2 A, 与采集值 19.02 A 一致, 而接地变各相电流与中性点引出线零序电流相位均为  $233^\circ$ , 证明了单相接地故障电流特征与理论分析相吻合。

### 2.3 故障案例处置

根据事故报警信息, 有如下故障处置流程:

- 1) 检查事故信号, 解除报警音响, 确认故障影响范围;
- 2) 检查并确认保护及故录动作情况;

3) 与有关下级调度确认有无供电客户负荷尤其是重要客户负荷受到损失, 如影响供电客户供电, 通知其采取低电压等级层面方式调整措施恢复停电负荷;

4) 汇报相关部门、主管领导故障情况, 及时上报故障信息;

5) 使用远程视频监视系统、调度自动化系统等综合技术手段, 结合现场检查结果判断母线是否具备试送条件, 如果具备条件, 及时采用合适电源恢复送电;

6) 如果母线恢复送电, 通知相关下级调度, 10 kV 母线已恢复送电, 停电负荷可恢复;

7) 如短时间不具备恢复送电条件, 则通知相关下级调度做好方式调整措施, 尽快恢复客户正常供电;

8) 做好故障后相关(相邻)设备的风险分析与控制、准备相应风险预案;

9) 根据现场检查结果, 做好后续故障处置, 同时做好故障信息跟踪汇报工作及风险管控措施, 及时处置, 恢复正常方式。

### 2.4 故障原因说明

值班人员通过对设备区的视频检查发现, 主变低压侧出口母线桥有明显的打火放电现象, 结合保护动作现象可知, 本次故障属于较为罕见的第 4) 类故障。

现场人员通过对站内 2# 变进行检查, 发现主变出口 10 kV 母线桥 A 相中段绝缘有明显烧损痕迹, 判断母线桥中段 A 相绝缘击穿。经分析, 设备生产工艺问题是造成此次故障的主要原因。因为本站绝缘母线接地铜带引出焊接工艺不合理, 加之当日设备正处于迎峰度夏阶段, 最终, 在内因和外因的共同作用下, 造成了短路故障的发生。

绝缘母线剖面图如图 6 所示。

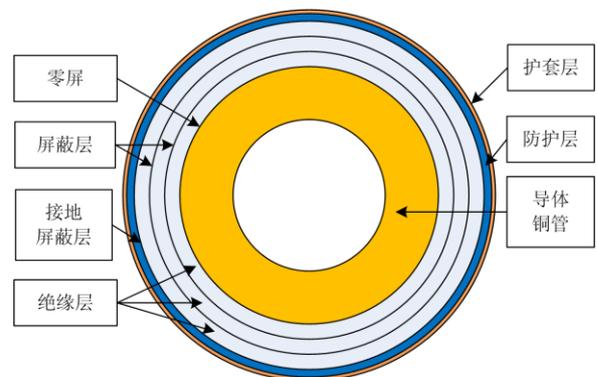


图 6 绝缘母线剖面图

Fig. 6 Cutaway drawing of insulated busbar

接地铜带部署于接地屏蔽层中, 穿越防护层作为接地引出线直接引出, 焊接于不锈钢波纹管端部。

因为接地引出处的防护层在焊接过程中曾受到外力作用产生了微裂纹,此裂纹无法通过常规质量检查试验发现,而母线运行时电流产生的机械应力作用导致微裂纹向纵深发展至绝缘层和屏蔽层,绝缘屏蔽层微隙放电,导致绝缘逐渐下降直至击穿。

### 3 启示与思考

由本次故障可知,人、设备、人与设备的交互中介(调控系统)是三个影响故障处置正确性的核心要素,基于人网一体发展思想,针对三个要素得到以下启示。

1) 人的主观能动性。值班人员是故障处置中掌握最高话语权的第一指挥员,具有不可替代性。虽然近年来人工智能的深度介入已经并且仍在重塑传统意义上的电力系统,但任何技术革新的最终目的不是弱化、取代电网运行人员的决策性,而是解放电网运行人员的思想,在更为广泛的领域内强化、开拓运行人员的认知思维能力,使运行人员能够关注现场问题的本质,而不是被细枝末节的信息所干扰。这是辩证的统一关系而不是绝对对立的关系。调度规程仅给出了原则性的指导意见,值班人员能否根据实际情况灵活处置,全面掌握故障数据与信息,综合研判和统筹考虑,这是正确处置此类故障的关键。准确的故障判读取决于值班人员的经验积累、训练水平和对电网的熟悉程度,而扎实的理论基础与业务能力是缩短人与人之间禀赋差异,实现故障处置“快、准、稳”的前提,所以强化值班人员的技术培训,构建与实际电网相一致的模拟故障演练平台,指导值班人员建立坚实的专业技术知识储备库,是提升人机融合、人网一体建设水平、充分发扬人在故障处置过程中主导作用的必要条件。

2) 设备维护系统化。结合“预防为主,综合治理”的指导原则,针对绝缘母线问题,对照全寿命周期设备运维要求,提出如下措施。

(1) 在生产阶段消除安全隐患是降低故障发生概率的重要保证。生产厂家需要提升专业技能队伍安全生产体系建设水平,强化产品质量风险责任意识;可以建立质量风险把关人制度,针对薄弱环节强化风险监测,杜绝隐患风险。克服接地铜带直接穿越易受外力破坏的缺点,调整布局,缩短直接裸露在外的接地铜带长度,同时适当延伸母线内部接地铜带的长度,保障接地引出处的机械强度。

(2) 在运行阶段充分利用制度约束、全息感知和网架优化措施可以有效降低故障风险。制度约束即严格执行“两票三制”,严格落实周期性绝缘介质性能检测试验,通过常态化设备监测增加提前发现异常的概率;全息感知采用空地巡检机器人、设备智能感知装置,精确实现设备异常状态感知,提升隐

患排查精度;网架优化从减轻设备运行压力的角度,通过应用微电网、储能等智能电网新技术来改善过于集中的网架结构,利用其独特的海绵效应缓解站内设备运行压力,避免故障扩大化。

3) 主配网一体化调控系统的智能化升级。兼顾各方、统一集成、横向扩展、纵向贯通的主配网一体化调控系统,是提升电网故障抵御能力的重要工具。未来电网的智慧调控系统必然是一种智能、立体的综合成像系统:智能,构建数据驱动型自适应判别模型,结合必要的人工干预实现对关键故障异常信息的精准预判;立体,利用人工智能领域机器学习算法,分析客户活跃度、气象条件、运行空间等相关因子与故障事件的关联度,采用混合现实技术实现立体化多维度沉浸式事故分析图景。在此基础上,结合事件化、模块化、标准化的故障信息系统,融合基于空、地、人智能感应装置建立的设备监测系统,实现设备健康水平、故障风险等级等信息的可视化全方位呈现,建立集智能成像、综合研判、业务集成于一体的全流程新型人网交互指挥枢纽。最后,采用此系统作为中介平台,融合主网-配网-微网三级网架,协调发挥运行人员的决策能力、配网系统的自愈能力与微网系统能源互济能力的综合效应,以达到进一步提升故障处置效率与供电服务质量的的目的。

### 4 结论与展望

220 kV 变电站主变低压侧一旦发生故障,往往造成 10 kV 客户供电可靠性降低,影响电能质量。本文以 220 kV 变电站发生的主变低压侧故障为基础,分析了具有接地故障表征的主变低压侧出口死区故障,得出以下结论:

1) 故障处置综合研判在整个故障处理过程中占有极其重要的地位。尽管馈线越级故障是造成接地变后备保护或主变后备保护动作的常见原因,但并非是绝对原因。此次故障证明,尽管发生的几率较小,主变低压侧出口至开关柜之间的设备故障依然是导致母线失电的重要因素,需要在故障处置中引起注意。例如,在视频检查环节,如果只查看低压侧开关柜设备,极易造成故障点误判,从而影响处置步骤的正确性和可靠性。所以全面掌握各类故障信息,综合考虑故障处置措施,是此次故障所带来的重要经验。

2) 未来防范此类故障需要统筹考虑,综合行动。如果要从根本上消除或是缓解此类故障所造成的影响,不能仅依靠事后处置,需要从多个维度探索出系统性、整体性、全局性的改良路径,才可在降本提质增效的同时,贯彻好“安全第一,预防为主,综合治理”的安全生产指导方针。本文提出充

分发挥值班人员主观能动性、强化系统化设备运维手段、提升主配网一体化调控系统智能化水平,是减轻故障影响,保证供电可靠性的重要途径,为未来处置、防范此类故障提供了具有建设性的建议。

3) 未来能源供应模式转型为提升电网安全性带来新的契机。垂直供应体系在此次故障中所暴露的弊端,以及未来清洁能源转型的必然趋势,已经显示多能协同、一体发展是未来微型能源网的发展方向。改变供电模式,将大量被动依赖型能源消耗者转变为主动独立型能源供应者,使其自主可控地参与、主导配网故障处置,也许是一种从根本上缓解此类故障影响的措施。必须注意的是,技术革新堪称微网落地的关键,但是能够决定微网未来命运的力量,是未来社会发展的原动力——群众。如何在短时间内扶助群众、联合群众,搭建群众“买得起、靠得住、用得惯”的自主化微网平台,进而能动地推动其向前发展,是一个亟待研究的新课题。

参考文献

[1] 闫炳耀. 220 kV 变电站 110 kV 线路越级跳闸事故研究[J]. 农村电气化, 2018(12): 28-30.  
YAN Bingyao. Fault research of overstep tripping in 110 kV line in 220 kV substation[J]. Rural Electrification, 2018(12): 28-30.

[2] 刘亚东, 张新东, 王恒超, 等. 10 kV 线路保护拒动引起主变越级跳闸的原因分析[J]. 农村电气化, 2020(4): 31-33.  
LIU Yadong, ZHANG Xindong, WANG Hengchao, et al. Reason analysis of main transformer overstep tripping due to 10 kV line protection refusing operation[J]. Rural Electrification, 2020(4): 31-33.

[3] 屠秉慧, 邓晨, 叶国耀, 等. 20 kV 线路故障引起越级跳闸的分析及应对措施[J]. 电工电气, 2020(10): 28-31, 42.  
TU Binghui, DENG Chen, YE Guoyao, et al. Analysis and countermeasures of overstepping trip caused by 20 kV line fault[J]. Electrotechnics Electric, 2020(10): 28-31, 42.

[4] GU Zhongde, ZHANG Xi, TU Min. Synthetic fault analysis of a relay protection override trip[J]. Smart Grid, 2020(2): 67-72.

[5] HUANG Yanhai, HAI Tianshu, LAN Chenghao, et al. Sishui No.2 main transformer winding fault analysis[C] // 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED2018), September 17-19, 2018, Tianjin, China: 1273-1278.

[6] 尹超勇, 徐浩, 许立强, 等. 一起线路高阻接地故障引起的主变越级跳闸事故分析[J]. 湖南电力, 2020, 40(4): 51-54.  
YIN Chaoyong, XU Hao, XU Liqiang, et al. Analysis on over tripping accident of main transformer caused by a line high resistance grounding fault[J]. Hunan Electric

Power, 2020, 40(4): 51-54.

[7] 王峰, 尉镔, 王晋川. 一起封闭母线绝缘损坏故障分析[J]. 山西电力, 2011(2): 26-27.  
WANG Feng, YU Bin, WANG Jinchuan. Analysis on the fault caused by insulation damage of metal enclosed busbar[J]. Shanxi Electric Power, 2011(2): 26-27.

[8] 王栋, 邱志斌, 魏巍, 等. 220 kV 某变电站 GIS 单相接地故障分析及处理措施[J]. 高压电器, 2020, 56(11): 259-265.  
WANG Dong, QIU Zhibin, WEI Wei, et al. Single-phase grounding fault analysis of a GIS in a 220 kV substation and treatment measures[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11): 259-265.

[9] 刘渝根, 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.

[10] 褚宏鼎, 徐丙垠, 陈恒, 等. 基于数字仿真结果的小电流接地故障模拟测试系统[J]. 电测与仪表, 2019, 56(5): 26-31.  
CHU Hongding, XU Bingyin, CHEN Heng, et al. Simulation test system for small current grounding fault based on digital simulation results[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(5): 26-31.

[11] PAN Zhencun, DING Lei, WANG Rui, et al. Transformer and bus backup protection based on longitudinal comparison principle[C] // 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Asia and Pacific, August 18-19, 2005, Dalian, China: 1-4.

[12] SARI M, TRYOLLINNA A, SUDIN A D P, et al. Through fault current effects on distribution transformer and prevention actions using backup protection: Case study of Kelapa Gading transformer[C] // 2017 International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), October 2-5, 2007, Bali, Indonesia: 247-251.

[13] 黎高程, 陈晓彬, 孙玉彤, 等. 一种基于柜式母线故障特性的中低压母线精准保护[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 156-162.  
LI Gaocheng, CHEN Xiaobin, SUN Yutong, et al. A kind of accurate protection of mid-low voltage bus based on the fault characteristics of cabinet bus[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 156-162.

[14] 张健, 马伟, 朱亚奇, 等. 10 kV 配网中性点小电阻接地系统的研究与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 109-115.  
ZHANG Jian, MA Wei, ZHU Yaqi, et al. Research and design of neutral grounding resistance system for 10 kV distribution network[J]. Power System Protection and

- Control, 2019, 47(14): 109-115.
- [15] 吴建辉, 刘伟, 康国庆, 等. 基于波形相似度的配网小电流接地故障选线技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(8): 38-42, 49.  
WU Jianhui, LIU Wei, KANG Guoqing, et al. Research on line selection technology of distribution network with small current and ground fault based on waveform similarity[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(8): 38-42, 49.
- [16] 顾韧, 闫少波. 10 kV 配电网中性点经小电阻接地方式分析[J]. 电工电气, 2015(5): 37-40.  
GU Ren, YAN Shaobo. Analysis of low-resistance neutral point grounding mode in 10 kV power distribution grid[J]. Electrotechnics Electric, 2015(5): 37-40.
- [17] 赵世杰, 兰文光, 钟磊, 等. 接地变压器及其保护原理分析[J]. 科学技术创新, 2020(30): 164-165.  
ZHAO Shijie, LAN Wenguang, ZHONG Lei, et al. Analysis of grounding transformer and its protective principles[J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(30): 164-165.
- [18] HU Chenwang, ZENG Xiangjun, TAO Jin, et al. Fault analysis of a grounding transformer[C] // Proceedings of the 2010 International Conference on Modelling, Identification and Control, July 17-19, 2010, Okayama, Japan: 579-584.
- [19] SHEN M, INGRATTA L, ROBERTS G. Grounding transformer application, modeling, and simulation[C] // IEEE Power and Energy Society 2008 General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, USA: 1-8.
- [20] 郝方舟, 孙奇珍, 沈超, 等. 基于高维随机矩阵的配电网用户侧用电行为分析[J]. 广东电力, 2019, 32(11): 111-119.  
HAO Fangzhou, SUN Qizhen, SHEN Chao, et al. Users electricity consumption behavior analysis in distribution network based on high dimensional random matrix[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(11): 111-119.
- [21] 刘胜利, 唐卫华, 周益华. 强耦合主配一体化智能调度控制系统在长沙地调的研究及应用[J]. 电工技术, 2019(11): 110-113.  
LIU Shengli, TANG Weihua, ZHOU Yihua. Research and application of strong coupling operation and distribution integrated smart dispatching and control system for Changsha district power networks[J]. Electric Engineering, 2019(11): 110-113.
- [22] 赵晋泉, 杨婷, 吴凡, 等. 基于数据挖掘的输配网一体化事故响应决策[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 1-8.  
ZHAO Jinquan, YANG Ting, WU Fan, et al. Data mining based accident response and decision-making for integrated transmission and distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 1-8.
- [23] CHEN C, WANG J, QIU F, et al. Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 958-966.
- [24] 黄利军, 翟登辉, 李瑞生, 等. 未来多源农村配电网安全与防护技术与探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 167-174.  
HUANG Lijun, ZHAI Denghui, LI Ruisheng, et al. Research and discussion on safety and protection technology of distribution network in rural areas in the future[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 167-174.
- [25] 戴志辉, 陈冰研, 谢军, 等. 含多微网的主动配电网分层调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 121-127.  
DAI Zhihui, CHEN Bingyan, XIE Jun, et al. Hierarchical scheduling strategy for active distribution network with multi-microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 121-127.
- [26] 王涛, 韩璟琳, 邵华, 等. 基于合作博弈的农村微电网群与配电网运行优化方法[J]. 河北大学学报: 自然科学版, 2020, 40(4): 441-448.  
WANG Tao, HAN Jinglin, SHAO Hua, et al. Optimization method of rural microgrid group and distribution network operation based on cooperative game[J]. Journal of Hebei University: Natural Science Edition, 2020, 40(4): 441-448.
- [27] 刘家好, 张琪祁, 王颖, 等. 计及分布式可再生能源发电的配电网应急供电恢复策略[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(6): 600-606.  
LIU Jiayu, ZHANG Qiqi, WANG Ying, et al. Service restoration strategy for distribution systems considering renewable-energy-based distributed generators[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 600-606.
- [28] BADAL F R, DAS P, SARKER S K, et al. A survey on control issues in renewable energy integration and microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 87-113. DOI: 10.1186/s41601-019-0122-8.
- [29] USTUN T S, OZANSOY C, ZAYEGH A. A central microgrid protection system for networks with fault current limiters[C] // 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, May 8-11, 2011, Rome, Italy: 1-4.
- [30] 周孝信, 曾嵘, 高峰, 等. 能源互联网的发展现状与展望[J]. 中国科学: 信息科学, 2017, 47(2): 149-170.  
ZHOU Xiaoxin, ZENG Rong, GAO Feng, et al. Development status and prospects of the energy internet [J]. Sci Sin Inform, 2017, 47(2): 149-170.

收稿日期: 2020-12-25; 修回日期: 2021-04-27

作者简介:

胡浩(1990—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统调度运行控制。E-mail: dianqi0810hh@163.com

(编辑 姜新丽)