

DOI: 10.7667/PSPC161032

## 配电自动化系统中相间短路故障处理策略

张志华<sup>1</sup>, 刘健<sup>1</sup>, 张小庆<sup>1</sup>, 杜红卫<sup>2</sup>, 苏标龙<sup>2</sup>, 时金媛<sup>2</sup>

(1. 陕西电力科学研究院, 陕西 西安 710054; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 为了使配电自动化系统的故障处理功能满足实际应用中遇到的各种复杂场景的需要, 面向故障处理对配电网简化模型进行了完善, 设计了综合考虑开环和闭环运行方式和分布式电源接入以及非健全故障信息的容错故障定位流程。提出多重故障的可分辨性判据。提出考虑故障修复期间负荷变化的短时供电恢复策略, 提出了根据实际需要综合生成短时供电恢复策略、即时供电恢复策略、最小甩负荷供电恢复策略、模式化故障处理策略和区域间两相短路接地供电恢复策略的方法。设计了包含故障定位、隔离、供电恢复策略生成、开关操作步骤生成和遥控障碍修正的相间短路故障处理流程。结合实例对所建议的方法进行了说明, 结果表明其可行性和有效性。

**关键词:** 配电网; 配电自动化系统; 相间短路故障; 故障定位; 供电恢复

### Programming of inter-phase short circuit fault processing for distribution automation systems

ZHANG Zhihua<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoqing<sup>1</sup>, DU Hongwei<sup>2</sup>, SU Biaolong<sup>2</sup>, SHI Jinyuan<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China;

2. NARI Technology Development Limited Company, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** The purpose of this paper is to guarantee a distribution automation system (DAS) to make a sound fault processing for various situations in the practice. A simplified model for fault location and service restoration is established. A simplified model for fault location and service restoration is improved. A robust fault location flow chart is established, in which distributed generations (DG) and information mistaken are considered for both open-loop and close-loop contribution grids. The criterions to identify whether the multiple faults could be located separately are put forward. The short-time restoration scheme considering the load fluctuation during the reparation is suggested. The flow chart of appropriately choosing the short time service restoration, the real time service restoration, the service restoration with minimum load shedding, the modeled service restoration and the restoration scheme for inter-phase to ground fault is described. The flow chart of inter-phase short circuit fault processing is designed, in which the fault location, isolation, restoration, sequence of switches to be tele-controlled and correction program in case of control failure are included. Examples are given to illustrate the proposed methods, showing the feasibility and effectivity.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5226SX13044H).

**Key words:** distribution systems; distribution automation systems (DAS); inter-phase short circuit faults; fault location; service restoration

## 0 引言

据统计, 超过 85% 的故障停电是由于配电网故障造成的, 因此配电网故障处理技术对于提高供电可靠性具有重要意义。

相间短路故障处理是配电自动化系统最重要的功能之一, 该领域一直都是研究热点, 已经取得了

大量的研究成果, 但是许多配电自动化系统的故障处理模块并没有充分利用这些成果, 而且已有成果也尚不能解决在工程应用中遇到的一些实际问题。

文献[1]和文献[2]建立了一种配电网简化模型, 为故障处理奠定了基础。但是已有模型没有反映实际应用中有些配电终端具有遥控功能而更多配电终端仅具备故障监测功能(如故障指示器等)的差别, 从而错误地认为故障定位的区域就是可以自动化隔离故障的区域, 也没有描述节点与区域的层次关系,

而这些关系对于多重故障分辨率以及故障处理中开关操作障碍时修正措施的生成非常重要,为此本文面向故障处理需要对该模型进行进一步完善。

在相间短路故障定位方面,已经取得了大量研究成果,并已经成功地应用于配电自动化工程中<sup>[3-8]</sup>,但是都旨在解决健全信息条件下的故障定位问题,而在实际应用当中故障信息漏报和误报现象经常发生。文献[9-11]研究了非健全信息条件下的容错故障定位问题,文献[12]研究了含分布式电源配电网故障定位方法。文献[13-15]研究了结合继电保护协调配合的配电自动化故障定位和处理策略以及终端配置规划方法。

上述研究结果很有应用价值,但是知识比较零碎,且没有分析多重故障的可分辨性。本文在梳理和完善各种故障定位方法的基础上,面向配电自动化主站应用软件开发,提出根据需要综合运用已有的各种故障定位方法的流程。

在故障后供电恢复方面,也已经取得了大量成果,主要包括基于启发式算法和现代优化算法的供电恢复策略生成等<sup>[16-19]</sup>;文献[20]和文献[21]还研究了造成母线失压等大扰动情形下配电网大面积断电快速恢复问题;文献[22]研究了发挥高供电能力配电网架潜力的模式化故障处理方法;文献[23]研究了两相短路接地的供电恢复策略问题;文献[24]研究了从当前运行方式过渡到供电恢复目标运行方式的开关遥控操作排序问题。

但是上述研究大都以故障时刻的负荷分布作为故障隔离后供电恢复策略优化的依据,而实际上故障修复往往耗时较长,期间负荷一般会发生较明显的变化,在生成供电恢复策略时应考虑这些变化,本文将探讨这个问题;并且在配电自动化主站的故障处理应用软件中,需要对各种供电恢复策略综合运用;更重要的是,实际应用当中往往会遇到开关遥控操作失败的情形,为了保障故障处理顺利进行,需要生成补救措施,这些问题已有文献都未涉及,却是开发配电自动化主站的故障处理应用软件所必须考虑的,本文将对此进行研究,给出综合运用各种供电恢复策略的故障处理流程。

## 1 面向故障处理的配电网简化模型

文献[1]和文献[2]建立了一种配电网简化模型,将开关看作节点,将馈线段看作边,将馈线供出的负荷看作边的权,将流过开关的负荷看作节点的权,从而将配电网当作一个加权图。本节在此基础上,

面向故障处理进一步完善该模型。

在配电自动化系统中,由于并非所有开关都安装自动化装置,而且即使安装也并非一定具有遥控功能,因此有必要将节点分为三类。

1) 监控节点:安装了具有遥信、遥测和遥控功能的自动化终端(如 FTU)的节点。

2) 监测节点:安装了具有遥信、遥测功能而不具有遥控功能的自动化终端(如故障指示器、“两遥”终端等)的节点。

3) 末梢节点:描述馈线或分支的末梢的节点。

若两个节点之间再没有其他节点,则称这两个节点是相邻的。

以来自主网的潮流方向为参考方向,若 A 和 B 两个节点相邻,参考方向为从 A 指向 B,则称 A 为 B 的父节点,称 B 为 A 的子节点。称父节点及以上辈份节点为长辈节点,称子节点及以下辈份节点为子辈节点。

将由各个节点围成的中间再没有其他节点的子图称作区域,相应的节点称为区域的端点,其中参考方向流入区域的端点称为该区域的入点,参考方向流出区域的端点称为该区域的出点。

区域可以分为如下两类。

1) 监控区域:全部端点都是监控节点或末梢节点的区域,它是配电自动化故障隔离和负荷转移的最小单元。

2) 监测区域:全部端点都是监测节点或末梢节点的区域,它是配电自动化故障定位的最小单元。

如果区域 A 的出点是区域 B 的入点,则称 A 为 B 的父区域,称 B 为 A 的子区域。称父区域及以上辈份区域为长辈区域,称子区域及以下辈份区域为子辈区域。

本文所论述的配电自动化系统相间短路故障隔离和供电恢复均以监控区域为对象,虽然大多数情况下,由于经济性原因,监测节点的布点比监控节点会更为密集,可以将故障定位到更小的范围内,但是由于其不具备遥控功能,只能在配电自动化系统故障处理过程结束以后,由人工再将故障隔离在更小的区域内,以便后续故障点的查找和检修工作的开展。

## 2 配电自动化系统主站的故障定位方法

相间短路故障可分为区域内相间短路故障(即短路发生在某个区域内部)和区域间相间短路接地故障(通常由某个区域内部单相接地导致另外两相对地绝缘升高,继而引发另一个或多个区域内部另外一相接地构成两相短路接地)。

### 1) 相间短路故障定位判据

配电自动化系统广泛采用的相间短路故障定位判据已经非常成熟<sup>[3-8]</sup>。

【定位方法 2.1】对于开环运行的情形,若一个区域的一个端点上报了短路电流信息,并且其他所有端点均未上报短路电流信息,则反映该区域内发生了相间短路故障;若其他端点中至少有一个也上报了短路电流信息,则反映故障不在该区域内。

【定位方法 2.2】对于闭环运行的情形,若一个区域的所有经历了短路电流端点的故障功率方向都指向该区域内部,则反映该区域内发生了相间短路故障;若至少有一个经历了短路电流端点的故障功率方向指向该区域外部,则反映故障不在该区域内。

上述判据适用于区域内相间短路故障,对于区域间相间短路故障(如:两相短路接地),则需要分别针对发生短路接地的各个相别应用上述判据进行接地定位。

### 2) 多重相间短路故障的分辨性判据

实际当中,经常遇到多重故障的情形,本文提出多重故障的可分辨性判据。

#### (1) 多重区域内相间短路故障的分辨性

若存在长辈与晚辈关系的区域同时发生区域内相间短路故障,则这些区域内相间短路故障无法分辨,其余情况下的多重区域内相间短路故障都可分辨。

#### (2) 多重区域间相间短路接地故障的分辨性

对每个发生接地的相别而言,若存在长辈与晚辈关系的区域同时发生接地,则这些接地位置无法分辨,其余情况下的接地位置都可分辨。只有所有相别的接地位置都可分辨时,相应的多重区域间相间短路故障才可以分辨。

### 3) 容错相间短路故障定位

在配电自动化主站能够完全正确地收到故障信息的情况下,1)中描述的判据可以准确地判断出故障所在区域,但是由于配电设备、配电自动化系统和通信网络都是工作在户外恶劣环境下,难免发生漏报或错报故障信息现象,因此实际应用当中要实现可靠的故障定位还必须针对上述非健全信息的情形采取容错故障定位措施。

对于给定的配电网拓扑结构,来自各个位置的故障信息之间存在相互关联,并且发生相间故障时至少可以采集到来自两相的故障信息,利用故障信息的上述冗余,在存在少量故障信息漏报和错报的情况下,可以实现容错定位。

文献[9-11]详细论述了基于最大似然估计的容错故障定位原理,即在根据历史数据统计得出漏报

率和错报率的基础上,寻找与配电自动化主站收到的故障信息最相符的故障位置假设作为故障定位结果,在能够获知各个区域的故障率(比如:根据各类线型的单位长度故障率推算或根据历史数据统计等)的情况下,该方法可以转化为贝叶斯估计。

### 4) 含分布式电源配电网故障定位

随着分布式电源接入的逐渐增长,配电自动化故障定位必须考虑分布式电源的影响。

文献[12]探讨了根据故障电流信息依靠传统故障定位规则(即定位方法 2.1 和 2.2)对含分布式电源配电网进行故障定位的适用范围,并指出该适用范围相当大,尤其对于微型燃气轮机和光伏等逆变器并网型分布式电源,因此已经建设的配电自动化系统在一段时期内不必做任何改变也能适应分布式电源接入的需要。

对于将来分布式电源(尤其是电机并网型)更大规模接入的前景,在配电自动化终端配置方向元件,并在检测到故障电流后上报故障功率方向,则可以采用闭环运行配电网相间短路故障定位判据实现故障定位。

对于已经安装了大量不具有方向元件的配电自动化终端的情形,可以利用重合闸与分布式电源脱网特性的配合实现故障定位,本文称之为【定位方法 2.3】,具体方法如下:

变电站出线断路器的重合闸延时时间设置为 2.5~3.5 s;故障发生后变电站出线断路器保护动作跳闸;2 s 后该馈线上的 DG 全部从电网脱离;变电站出线断路器跳闸后经 2.5~3.5 s 延时进行重合,若是瞬时性故障则恢复全馈线供电;若是永久性故障,则变电站出线断路器再次跳闸,此时配电自动化系统采集到的故障信息就排除了 DG 的影响,可以根据故障电流依靠传统故障定位规则进行全范围故障定位。

上述改进策略对于接入任意容量的分布式电源的情形都适用,并且只需要适当修改配电自动化主站的故障定位应用软件即可,而不需要更换配电自动化终端。

### 5) 主站的相间短路故障定位流程

配电自动化系统主站相间短路故障定位流程如图 1 所示。在发生相间短路故障后,主站根据上报故障信息的自动化终端所在馈线是开环运行还是闭环运行、是否包含分布式电源以及其容量是否在适应范围、所涉及的自动化终端是否都具有方向元件、收到的故障信息是否健全等的差别,恰当运用本节论述的各种故障定位方法。

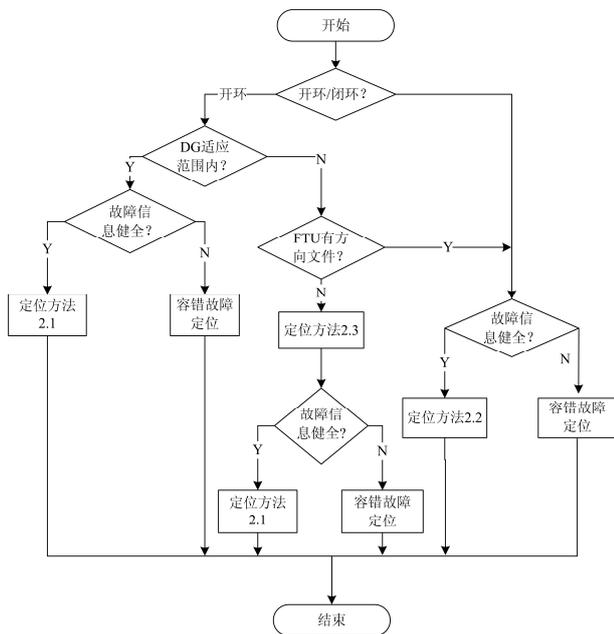


图 1 配电自动化主站的相间短路故障定位流程

Fig. 1 Flow chart of inter-phase short circuit fault location

### 3 供电恢复策略生成

在配电自动化故障隔离和供电恢复方面已有大量研究成果，但基本上都是基于故障发生时刻的负荷分布信息安排健全区域的供电恢复方案，而实际上在故障修复期间，相关馈线段供出的负荷会发生变化，若不考虑这些变化则有可能在故障修复期间引起过负荷问题。此外，配电网特殊接线下的供电恢复策略、区域间的两相接地故障处理策略以及严重扰动下(如母线失压)的供电恢复策略都需要在故障处理流程中加以考虑。

针对上述问题，本文将供电恢复策略分为以下 5 种类型。

#### 1) 即时供电恢复策略

即时供电恢复策略是基于故障发生时刻的负荷分布信息安排健全区域的供电恢复方案所得到的供电恢复策略。尽管健全区域恢复供电后不会立即引起问题，但是由于没有考虑故障修复期间的负荷变化，有可能在故障修复期间引起过负荷问题，并且在故障发生后并不一定能够得到可行的即时供电恢复策略。

在即时供电恢复策略的生成方法方面已有丰富的研究成果，主要包括启发式算法、禁忌搜索算法、遗传算法和 PSO 算法等，不再赘述。

#### 2) 短时供电恢复策略

短时供电恢复策略是在考虑故障修复期间的负荷变化的基础上安排健全区域的供电恢复方案所得

到的供电恢复策略，它一般不会在故障修复期间引起过负荷问题，但是通常比较保守，并且在故障发生后并不一定能够得到可行的短时供电恢复策略。

短时供电恢复策略的生成可以有两种途径：

一是根据短时负荷预测结果，寻求在故障修复期间对应的时段内都满足电气极限约束条件的一种运行方式作为短时供电恢复策略，需要采用禁忌搜索算法、遗传算法和 PSO 算法等实现，计算量较大。

二是根据历史统计数据，以相关馈线段在故障修复期间对应的时段内可能出现的最大供出负荷为根据，生成即时供电恢复策略作为短时供电恢复策略，可以采用启发式算法实现，计算量较小，但结果比较保守。

#### 3) 甩负荷最小为目标的供电恢复策略

甩负荷最小为目标的供电恢复策略是在配电网受到较大扰动的情形下，无法恢复从网架结构角度看可恢复的全部健全区域供电时，而以恢复尽量多的负荷供电为目标的一种供电恢复策略。

文献[20]和文献[21]对此问题进行了研究，并给出了切实可行的以甩负荷最小为目标的供电恢复策略的生成方法，本文不再赘述。

#### 4) 模式化供电恢复策略

国内外研究表明，多分段多联络、多供一备、互为备用和 4×6 等模式化接线方式有助于减小用于故障支持的备用容量，有效提高配电设备利用率，但是需要针对各种模式化接线形式安排特定的模式化故障处理策略。比如，对于 3 分段 3 联络配电网架，当某条馈线失去电源时(如：检修变电站出线断路器)，需要遥控该馈线的两台分段开关分闸，将其隔离为 3 段，并分别遥控与各馈线段相连的联络开关合闸，从而将故障馈线的负荷转移到与其联络的 3 条馈线上。

文献[22]详细论述了各种模式化接线配电网在各种可能的故障位置下的故障处理策略，本文不再赘述。

#### 5) 区域间两相短路接地供电恢复策略

对于区域间两相短路接地故障，由于发生两处接地位置不在同一个区域中，对于设施比较陈旧、绝缘老化程度高的馈线，为了减少过电压的危害，需要将发生接地的两个区域全部隔离，在此基础上再安排健全区域的供电恢复策略；而对于新建馈线以及绝缘条件好的馈线，可以只隔离一个发生了接地的区域，在此基础上再安排健全区域的供电恢复策略，究竟隔离哪一个接地区域，以隔离后能够恢复供电的负荷(或用户)多为选择原则。

文献[23]详细论述了两相短路接地的供电恢复策略的具体生成方法, 本文不再赘述。

### 6) 5 种供电恢复策略的综合运用

在配电网发生母线失压或配电网发生相间短路故障、在收到某一个断路器的保护跳闸信号后, 配电自动化系统的故障定位模块被启动和执行, 随后进入故障处理流程, 其主要步骤如下:

(1) 根据故障定位结果, 判断故障区域是否在线路上, 若是则进行(2); 否则, 则认为是发生了母线失压, 进行(6)。

(2) 根据零序电压信息判断是不是区域间两相短路接地故障, 若是则生成并执行区域间两相短路接地供电恢复策略; 否则进行(3)。

(3) 根据故障定位结果判断故障区域是不是在模式化接线配电网架范围内, 若是则生成并执行模式化供电恢复策略; 否则进行(4)。

(4) 判断是否可以得到可行的短时供电恢复策略, 若是则生成并执行短时供电恢复策略, 一般可以避免在故障修复期间产生过负荷问题; 否则进行(5)。

(5) 判断是否可以得到可行的即时供电恢复策略, 若是则生成并执行即时供电恢复策略, 尽管可以恢复供电, 但是有可能在故障修复期间引起过负荷问题, 届时将需要执行(6)甩去部分负荷; 否则进行(6)。

(6) 生成并执行甩负荷最小为目标的供电恢复策略。

综合运用 5 种供电恢复策略的故障处理流程如图 2 所示。

## 4 开关操作步骤生成和遥控障碍处理

### 1) 开关操作步骤生成

供电恢复策略描述了故障处理后的目标运行方式, 在实际应用中还需要生成从当前方式过渡到目标方式的过程中所需的开关遥控操作步骤。

对于供电恢复过程, 合理的开关操作顺序应当满足:

(1) 对于不允许合环的情形在操作过程中不产生闭环。

(2) 操作过程中不发生过负荷。

(3) 操作过程中应尽快恢复停电损失大的负荷供电。

文献[24]论述了基于上述原则的开关遥控操作步骤生成方法, 本文不再赘述。

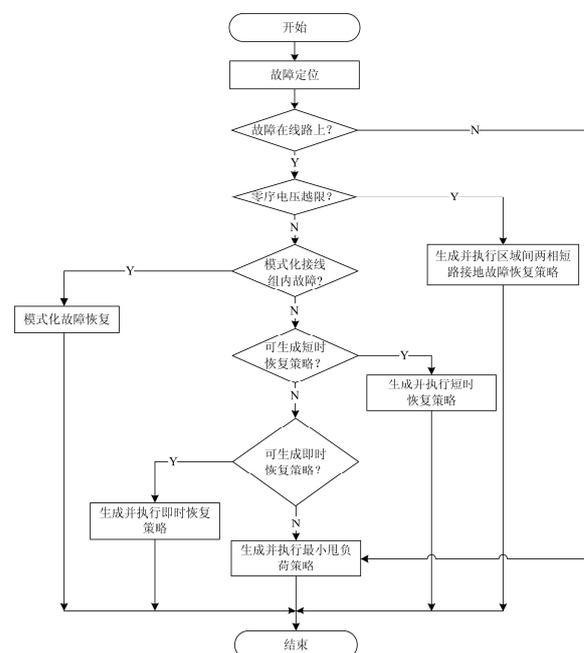


图 2 综合运用 5 种供电恢复策略的流程

Fig. 2 Flow chart of integrating the five service restoration schemes

### 2) 开关操作障碍时的自适应修正处理策略

在实际应用中, 经常由于某种原因导致对个别开关的遥控操作不成功, 此时需要寻找修正处理策略。

当遥控某台开关失败后, 首先可以尝试再次进行该遥控操作, 若成功则可按照已经制定的供电恢复过程的开关遥控操作步骤执行后续的遥控操作, 若多次(如 3 次)重复遥控均无效时, 可以进行下面的步骤。

第 1 步: 若全部可恢复的区域的供电都得到了恢复, 则退出; 否则执行第 2 步。

第 2 步: 将遥控失败的开关进行标识, 将其从解空间中排除, 而不再参与供电恢复策略的生成, 而将其状态保持在当前状态。

第 3 步: 将已经遥控操作成功的开关进行标识, 将其从解空间中排除, 而不再参与供电恢复策略的生成, 而将其状态保持在当前状态。这一步骤的目的在于在随后的修正处理策略中避免影响到之前已经遥控成功的开关的操作结果, 从而保证已经得到供电恢复的区域不要在随后的修正处理中再次遭遇停电。

第 4 步: 重新进行图 2 描述的流程, 即根据需要搜索短时供电恢复策略、即时供电恢复策略、最小甩负荷供电恢复策略、区域间两相短路接地供电恢复策略和模式化供电恢复策略, 得到修正的供电

恢复策略。

第 5 步：生成新的开关遥控操作步骤。

第 6 步：交付配电自动化系统故障处理子过程执行。

### 5 配电自动化主站的相间短路故障处理流程

配电自动化系统主站的相间短路故障处理流程如图 3 所示。

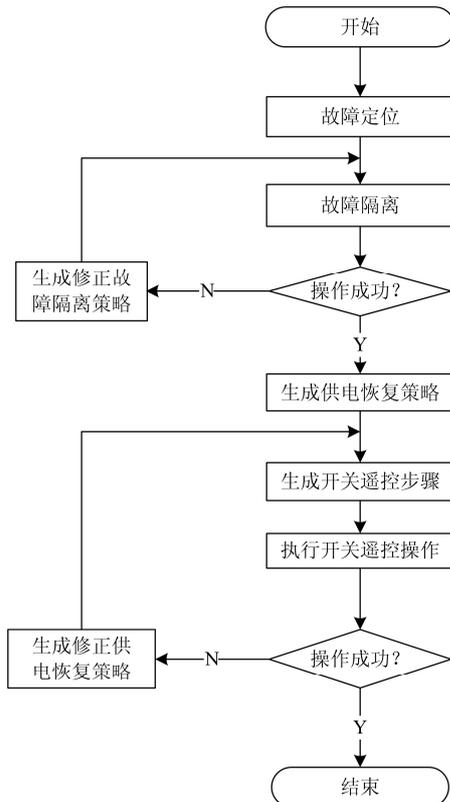


图 3 配电自动化主站的相间短路故障处理流程

Fig. 3 Flow chart of interphase short circuit fault processing

### 6 实例分析

本节结合实例对本文所论述的相间短路故障定位和供电恢复流程进行详细说明。

如图 4 所示的示例配电网， $S_1$ — $S_{10}$  为变电站出线开关， $S_1$ 、 $S_2$  及  $S_{10}$  所带线路为电缆线路，其余线路为架空线路， $A_1$ — $A_{50}$ 、 $B_1$ — $B_{15}$  为线路分段开关及环网柜馈出开关， $S_6$ 、 $S_7$ 、 $S_8$ 、 $S_9$  所带馈线构成三分段三联络模式化接线， $S_3$  所带线路上接有两个大容量分布式电源(已超出传统故障定位规则的适应范围)，图中开关旁标注的数字为即时负荷采样值(电流值)，假设所有架空线路额定载流量为 560 A，电缆线路额定载流量为 600 A。

1) 情形 1: 可分辨的多重区域内相间短路故障，故障定位采用定位方法 2.1，故障恢复分别采用模式化故障恢复和短时供电恢复策略。

假设在开关  $S_9$ 、 $A_{37}$  所围成的区域内以及开关  $A_1$ 、 $A_2$  所围成的区域内同时发生相间短路故障， $S_1$ 、 $S_9$  跳闸。假设故障修复时间需要 4 个小时，故障修复时期内， $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_{10}$  所带馈线每个小时的负荷预测值如表 1 所示，对于  $S_6$ 、 $S_7$ 、 $S_8$ 、 $S_9$  所带馈线构成的三分段三联络模式化接线，其上的故障处理采用模式化故障处理方式，而不需要依据负荷值。

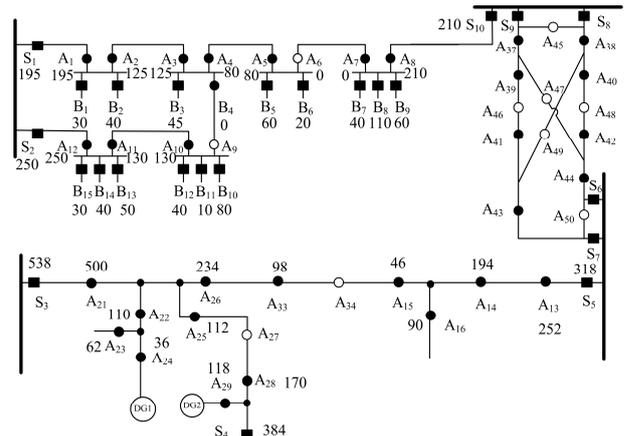


图 4 一个示例配电网

Fig. 4 An example of a typical distribution grid

表 1 实例中故障修复时期内  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  所带馈线各个环网柜馈出开关的负荷预测值

Table 1 Load forecasting of the example during the period of fault repairing

单位: A

| 开关  | 时刻/h |     |     |     |
|-----|------|-----|-----|-----|
|     | 1    | 2   | 3   | 4   |
| B1  | 30   | 35  | 30  | 40  |
| B2  | 40   | 40  | 50  | 50  |
| B3  | 40   | 50  | 50  | 50  |
| B5  | 140  | 145 | 150 | 170 |
| B6  | 90   | 95  | 90  | 90  |
| B7  | 30   | 40  | 50  | 50  |
| B8  | 100  | 100 | 110 | 110 |
| B9  | 40   | 50  | 40  | 70  |
| B10 | 60   | 65  | 70  | 70  |
| B11 | 50   | 60  | 60  | 60  |
| B12 | 50   | 60  | 50  | 60  |
| B13 | 70   | 70  | 75  | 85  |
| B14 | 55   | 55  | 65  | 65  |
| B15 | 90   | 100 | 90  | 90  |

(1) 故障定位: 由于发生故障的配电线路均为开环运行, 没有分布式电源接入, 且假设主站正确收到  $S_1$ 、 $A_1$ 、 $S_9$  上报的流过故障电流信息, 故障信息不存在矛盾, 因此采用定位方法 2.1 即可。

之后, 分别控分开关  $A_{37}$  和  $A_1$ 、 $A_2$  完成两处故障区域隔离。

(2) 供电恢复策略生成: 由于两处故障发生在两个独立的连通系内, 对于开关  $S_9$  所带线路上健全区域的供电恢复, 判明其属于模式化接线网架范围内负荷转移, 因此直接采用模式化故障恢复策略(控分  $A_{39}$ , 控合  $A_{46}$ 、 $A_{47}$  即可; 对于开关  $S_1$  所带线路上健全区域的供电恢复, 结合其未来 4 个小时内的负荷预测信息, 计算得到可生成短时供电恢复策略步骤为: 控分开关  $A_4$ 、控合开关  $A_6$ 、 $A_9$ )。

分别执行上述策略即可完成情形 1 的故障处理。

2) 情形 2: 可分辨的多重区域内相间短路故障, 故障定位分别采用定位方法 2.3 和容错故障定位方法, 故障恢复采用最小甩负荷策略。

假设在开关  $S_3$ 、 $A_{21}$  所围成的区域内以及开关  $A_{14}$ 、 $A_{15}$ 、 $A_{16}$  所围成的区域内同时发生相间短路故障,  $S_3$ 、 $S_5$  跳闸。

(1) 故障定位: 对于  $S_3$  馈线, 由于有分布式电源接入且 FTU 未配置方向元件, 因此需采用定位方法 2.3 进行故障定位, 假设主站在  $S_3$  经延时 2.5 s 重合后的第二次故障信息收集过程中, 正确收到  $S_3$  上报的流过故障电流信息, 故障信息不存在矛盾, 最终依据定位方法 2.1 即可定位故障位于开关  $S_3$ 、 $A_{21}$  所围成的区域内。

对于  $S_5$  馈线, 没有分布式电源接入, 但是假设主站仅收到  $S_5$ 、 $A_{14}$  上报的故障电流信息, 明显故障信息存在矛盾, 因此采用容错故障定位规则, 基于贝叶斯估计方法进行故障定位, 假设收到故障信息的开关  $S_5$ 、 $A_{14}$  正确上报的概率为 0.9, 未收到故障信息的开关  $A_{13}$ 、 $A_{15}$ 、 $A_{16}$  其未漏报的概率是 0.8, 参考文献[11]计算得到各个区域的故障概率分别为  $P(S_5, A_{13}) \approx 0.21$ ,  $P(A_{13}, A_{14}) \approx 0.053$ ,  $P(A_{14}, A_{15}, A_{16}) \approx 0.47$ ,  $P(A_{15}, A_{34}) \approx 0.12$ ,  $P(A_{16}, -) \approx 0.12$

直接选择故障概率最大的区域作为故障区域, 仍可将故障正确定位在开关  $A_{14}$ 、 $A_{15}$ 、 $A_{16}$  所围成的区域内。

之后, 分别控分开关  $A_{14}$ 、 $A_{15}$ 、 $A_{16}$  和  $A_{21}$  完成两处故障区域隔离。

(2) 供电恢复策略生成: 由于两处故障发生在同一连通系内, 也不属于模式化接线网架, 且短期和即时策略均无法满足, 最终需采用最小甩负荷策略(控分  $A_{23}$ 、 $A_{24}$ 、 $A_{26}$ , 控合  $A_{27}$ ; 控合  $S_5$ )。

3) 情形 3: 区域间两相短路接地故障, 允许单相接地状态运行。

假设在开关  $A_2$ 、 $A_3$  所围成的区域内发生 A 相接地, 在开关  $A_{10}$ 、 $A_{11}$  所围成的区域内发生 B 相接地,  $S_1$ 、 $S_2$  跳闸, 完成故障定位以后, 根据零序电压信息判断出是区域间两相短路接地故障, 参照文献[20], 假设允许以单相接地状态运行, 隔离一处故障区域即可, 结合供电恢复方案的比较, 优先选择导致甩负荷少的一处故障区域隔离, 在隔离任意一处故障都不会导致甩负荷时, 则选择供电恢复方案下负荷分布更为均衡的一处故障区域进行隔离, 最终得到供电恢复策略及开关操作步骤: “控分  $A_{10}$ 、控分  $A_{11}$ ; 控合  $S_1$ ; 控合  $S_2$ ; 控分  $A_4$ 、控合  $A_9$ ; 控合  $A_6$ ”。

4) 情形 4: 遥控障碍处理。

假设对于情形 2 所示的故障情形, 在故障隔离和供电恢复的过程中, 控分开关  $A_{14}$ 、 $A_{15}$ 、 $A_{16}$  和  $A_{21}$  均成功, 两个故障区域被成功隔离, 之后控分开关  $A_{23}$  成功, 但是控分开关  $A_{24}$  失败, 并且重复遥控 3 次均无效, 按照第 4 部分论述的遥控障碍处理策略, 将遥控失败的开关进行标识, 将其从解空间中排除, 不再参与供电恢复策略的生成, 而将其状态保持在当前状态, 将已经遥控操作成功的开关进行标识, 将其从解空间中排除, 不再参与供电恢复策略的生成, 而将其状态保持在当前状态, 重新进行图 2 描述的流程并按照第 4 部分论述的方法生成开关操作步骤, 得到的后续修正处理策略及开关操作步骤为: 控分  $A_{22}$ , 控分  $A_{26}$ , 控合  $A_{27}$ ; 控合  $S_5$ 。

## 7 结论

监控区域是配电自动化故障隔离和负荷转移的最小单元, 监测区域是配电自动化故障定位的最小单元, 实际当中有时两种区域并不重合, 需区别对待。

配电自动化主站的故障定位流程需根据收到的故障信息来自的子网络是开环还是闭环运行、接入的分布式电源的容量是否在传统故障定位规则的适应范围内以及自动化终端是否配置方向元件、收到的故障信息是否健全等因素, 恰当应用合适的故障定位判据和方法; 有的多重故障是可以分辨的, 而一些多重故障不具备分辨性。

供电恢复策略应考虑故障修复期间负荷的变化, 优先生成短时供电恢复策略, 若没有可行的短时供电恢复策略则生成即时供电恢复策略, 若也没有可行的即时供电恢复策略, 则生成最小甩负荷供电恢复策略; 对于模式化接线的子网络生成模式化

故障处理策略；对于两相短路接地故障则综合考虑其影响生成区域间两相短路接地供电恢复策略，对于造成母线失压的严重故障则生成最小甩负荷供电恢复策略。

配电自动化主站的相间短路故障处理流程中还需要生成由当前运行方式过渡到供电恢复目标运行方式的开关遥控操作步骤，并在个别开关遥控遇到障碍时采取修正性措施。

基于上述原理的故障处理应用软件已经作为 Open5200 配电自动化系统的重要组成部分，成功应用于全国 20 余城市的配电自动化工程中。

### 参考文献

- [1] 刘健, 程红丽, 毕鹏翔. 配电网的简化模型[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 77-82.  
LIU Jian, CHENG Hongli, BI Pengxiang. A simplified model for distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 77-82.
- [2] 刘健, 毕鹏翔, 董海鹏. 复杂配电网简化分析与优化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [3] 刘健, 倪建立, 杜宇. 配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(1): 31-33.  
LIU Jian, NI Jianli, DU Yu. A unified matrix algorithm for fault section detection and isolation in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(1): 31-33.
- [4] 刘健, 程红丽, 董海鹏, 等. 配电网故障判断与负荷均衡化[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(22): 34-38.  
LIU Jian, CHENG Hongli, DONG Haipeng, et al. Fault section identification and load balancing of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22): 34-38.
- [5] 费军, 单渊达. 配网中自动故障定位系统的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 32-34.  
FEI Jun, SHAN Yuanda. Study of automatic fault location system in the distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 32-34.
- [6] HUANG Junhui, GE Shaoyun, HAN Jun, et al. A diagnostic method for distribution networks based on power supply safety standards[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.  
DOI 10.1186/s41601-016-0020-2
- [7] 付家才, 陆青松. 基于蝙蝠算法的配电网故障区间定位[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 100-105.  
FU Jiakai, LU Qingsong. Fault sections location of distribution network based on bat algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 100-105.
- [8] 刘鹏程, 李新利. 基于多种群遗传算法的含分布式电源的配电网故障区段定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 36-41.  
LIU Pengcheng, LI Xinli. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 36-41.
- [9] 王英英, 罗毅, 涂光瑜. 基于贝叶斯公式的似然比形式的配电网故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 54-57.  
WANG Yingying, LUO Yi, TU Guangyu. Fault location based on Bayes probability likelihood ratio for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 54-57.
- [10] 刘健, 赵倩, 程红丽, 等. 配电网非健全信息故障诊断及故障处理[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 50-56.  
LIU Jian, ZHAO Qian, CHENG Hongli, et al. Robust fault diagnosis and restoration for distribution grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 50-56.
- [11] 刘健, 董新洲, 陈星莺, 等. 配电网容错故障处理关键技术研究[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 253-257.  
LIU Jian, DONG Xinzhou, CHEN Xingying, et al. Robust fault isolation and restoration for distribution systems[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 253-257.
- [12] 刘健, 张小庆, 同向前, 等. 含分布式电源配电网的故障定位[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 36-42.  
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, TONG Xiangqian, et al. A new fault location algorithm based on fault component from finite synchronized phasor measurement unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 36-42.
- [13] 刘健, 刘超, 张小庆, 等. 配电网多级继电保护配合的关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 35-41.  
LIU Jian, LIU Chao, ZHANG Xiaoqing, et al. Coordination of relay protection for power distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 35-41.
- [14] 刘健, 张小庆, 张志华. 继电保护配合提高配电自动化故障处理性能[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 10-16.  
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, ZHANG Zhihua. Improving the performance of fault location and restoration based on

- relay[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 10-16.
- [15] 刘健, 林涛, 赵江河, 等. 面向供电可靠性的配电自动化系统规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 52-60.
- LIU Jian, LIN Tao, ZHAO Jianghe, et al. Specific planning of distribution automation systems based on the requirement of service reliability[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 52-60.
- [16] PEREZ-GUERRERO R, HEYDT G T, JACK N J, et al. Optimal restoration of distribution systems using dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1589-1596.
- [17] KLEINBERG M R, MIU K, CHIANG H D. Improving service restoration of power distribution systems through load curtailment of in-service customers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1110-1117.
- [18] KUMAR Y, DAS B, SHARMA J, et al. Multiobjective, multiconstraint service restoration of electric power distribution system with priority customers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 261-270.
- [19] CHIOU J P, CHANG C F, SU C T. Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 668-674.
- [20] 刘健, 徐精求, 程红丽. 紧急状态下配电网大面积断电快速恢复算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 132-138.
- LIU Jian, XU Jingqiu, CHENG Hongli. Algorithms on fast restoration of large area breakdown of distribution systems under emergency states[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 132-138.
- [21] 刘栋, 陈允平, 沈广, 等. 基于 CSP 的配电网大面积断电供电恢复模型和算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 28-32.
- LIU Dong, CHEN Yunping, SHEN Guang, et al. CSP-based model and algorithm of service restoration for large area blackout of distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 28-32.
- [22] 刘健, 张志华, 张小庆, 等. 配电网模式化故障处理方法研究[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 97-102.
- LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing, et al. Modeled fault isolation and restoration for distribution systems[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 97-102.
- [23] 刘健, 张小庆, 张志华, 等. 配电网两相接地短路故障定位与供电恢复[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 105-110.
- LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, ZHANG Zhihua, et al. Two-phase short-circuit fault location and service restoration for distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 105-110.
- [24] 刘健, 石晓军, 程红丽, 等. 配电网大面积断电供电恢复及开关操作顺序生成[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 76-79.
- LIU Jian, SHI Xiaojun, CHENG Hongli, et al. Restoration for large area blackout of distribution network and switching operation sequence management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 76-79.

收稿日期: 2016-07-31; 修回日期: 2017-01-22

作者简介:

张志华(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化;

刘健(1967—), 男, 博士, 总工程师, 教授, 博士生导师, 百千万人才工程国家级人选, 国家电网公司科技领军人才, 主要研究方向为配电网及其自动化技术; E-mail: powersys@263.net

张小庆(1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。

(编辑 魏小丽)