

DOI: 10.7667/PSPC161324

配网故障处理智能化装置探讨

刘翊平

(西安理工大学, 陕西 西安 710048)

摘要: 在城区配电网中, 为了缩小施工停电范围, 方便调度, 环网柜、分段断路器设置多, 且间隔距离小。传统继电保护很难满足选择性要求, 采用重合器因多次重合对系统冲击大, 亦不太合适。通过分析老装置存在的不足, 充分利用传统分布式保护的优点, 结合基于集中信息智能馈线自动化原理, 提出了一种新的故障处理恢复策略。该方案结合两者的优点, 借鉴保护原理, 使装置通信量小、开关动作次数少, 能有效精确定位故障点, 实现最小范围自动隔离故障, 解决配网自动化实际应用中可能遇到的一些疑难问题, 满足了智能化要求。

关键词: 配电网; 继电保护; 配网自动化; 故障精确定位; 智能化探讨

Discussion on intelligent device of power distribution network fault processing

LIU Yiping

(Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In urban distribution network, in order to narrow the scope of power construction and be convenient to scheduling, more ring main units and section breakers are set, and the spacing distance is too small. Traditional relay protection is hard to meet the requirement of selectivity; it is also not suitable if using recloser because multiple reclosing will exert big impact on system. This paper puts forward a new fault processing recovery strategy through analyzing the defects in the old device, making full use of the advantages of traditional distributed protection, and combining with feeder automation principles based on centralized information intelligence. The new scheme combines both advantages, and references the device communication to make device communication amount little and switch action times few. It can locate failure point accurately and effectively, achieve automatic isolation fault in minimum range, and solve some complicated problems possibly encountered in the practical application of distribution network automation. The method can meet the requirement of intelligence.

Key words: distribution network; relay protection; distribution network automation; accurate fault location; intelligent discussion

0 引言

随着我国高压电网的完善和发展壮大、电网的稳定与安全对国民经济和人民生活的影响越来越大, 配电网是直接为广大用户打交道的终端电力设备, 其供电可靠性在城市电网输配电过程中的重要性不言而喻。因此, 必须对配电线路故障进行精确定位, 利用分段断路器或环网柜有效隔离故障, 使停电范围大为缩小。

1 常用线路故障指示器的原理及特性

架空线路故障定位指示器主要用于指示故障电流的通路情况, 在线路发生故障后, 运行维护人员可借助指示器的报警显示, 确定故障区段, 并沿

线找出故障点。目前, 国内故障指示器的研究主要集中在故障判据、指示器取能及通信上, 并且也取得了一定的成绩^[1]。其动作原理一般是利用短路瞬间电流突变、保护动作停电作为动作依据^[2]。如图 1

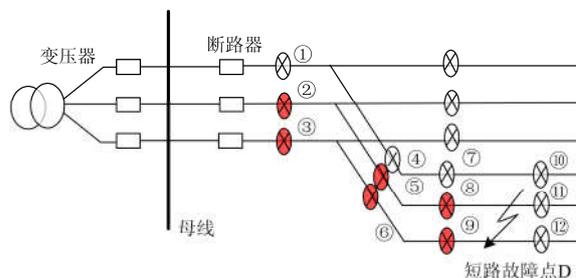


图 1 故障指示器动作原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of fault indicator action

所示,当D点发生两相短路时,②③⑤⑥⑧⑨故障指示器动作,指明故障区段,且由此判断故障点应当在指示器⑧⑨与⑪⑫区段间。

故障指示器作为电力系统的故障查找的有力工具,确实有一定的优越性^[3]。但查找故障还是要依靠人力从变电站开始沿线路方向逐项进行查看,自动化水平不高。且不能在最小范围内隔离故障,提高供电可靠性^[4]。为了实现这一目标,重合器便应运而生。

2 常用重合器原理和特性

现代配网线路上由于环网柜、分段开关之间距离小,传统的继电保护很难同时满足选择性、灵敏性要求,易产生越级跳闸^[5]。鉴于这种情况,要实现最小范围内隔离配网故障,各生产厂家研发了重合器,重合器的原理是通过检测故障电流且在给定的时间内切断故障电流,按给定次数重合来实现故障有效隔离的一种控制装置,断路器的循环操作顺序通常是分-0.5 s-合分-180 s-合分^[6]。

如图 2 所示,设 QR3 整定为一快一慢,QR2 整定为一快二慢,QR1 整定为一快三慢,若故障发生在 B 处,QR1, QR2, QR3 同时动作跳闸,QR3 在一次瞬时动作,一次重合并延时分闸后即闭锁在分闸状态,而 QR1、QR2 的动作情况是一次瞬时动作,二次重合,并于第二次重合时因 QR3 已断开将故障隔离,所以 QR1、QR2 二次重合能有效恢复 QR3 的电源侧的供电。假设故障发生在 A 处,则 QR2 在第二次延时跳闸后闭锁,QR1 必须在第三次重合后才能恢复 QR2 的电源侧的供电^[7]。

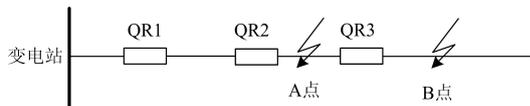


图 2 重合器应用原理示意图

Fig. 2 Principle diagram of reclosing application

由以上分析可知,重合器是利用多次重合来实现其精确隔离故障的目的,每次重合都会给系统带来一次故障电流的冲击,分段断路器越多,重合次数越多,如有十多台分段断路器时,这种方法将不再适用,为了解决这一问题,推出配网故障处理智能化新产品,以下是本文提出的一套解决方案。

3 实现配网故障处理智能化的思路及原理

在城市配电网中,由于线路分段数较多,当线路发生故障时,故障位置上游各个分段开关处短路

电流的大小往往差异比较小,为此,建议采用一种利用级差配合的配电网继电保护方案,旨在分支故障不影响主干线,次分支/用户故障不影响分支^[8-9]。实际上,目前广泛采用的分布独立式传统继电保护,在上下级回路的保护整定值差异很小时,不能解决越级跳闸难题,无法从根本上实现故障的快速识别与隔离,常导致扩大事故范围的严重后果^[10-11],要彻底解决此类问题,只能依赖于智能化产品。

构建智能化产品,实现广域保护的在线自适应设置原理和故障元件识别是两种主要方法^[12],故障点的逻辑判断显得尤为重要。考虑到实际配网规模庞大复杂及负荷的量测数据缺乏,对配网进行简化建模,不仅可以反映故障恢复后配电网的潮流分布,而且大大减少了计算时间,提高搜索效率^[13],因此,采用简单易行的策略是很有必要的。目前,我国配电网大多采用双电源供电,应有三种运行方式:1) A 变电站供电、B 变电站备用;2) A 变电站备用、B 变电站供电;3) A、B 两变电站供电,中间选一断路器分断。可在 A、B 两变电站分别装设配网故障处理智能装置,如图 3 所示,当 D_A 合上、D_B 断开时应由 A 变电站智能装置控制,当 D_B 合上、D_A 断开时应由 B 变电站智能装置控制,当 D_A、D_B 均合上且中间设分断断路器分开运行时,则分断断路器左右两侧分别由 A、B 两变电站智能装置分别控制。该装置动作基本原理是当配电线路发生短路故障时,通过故障电流的断路器均因电流突变而跳闸,这些因故障而跳闸的断路器通过光纤通信或无线通信发出信号,其发信条件是通过了故障电流和辅助开关变位到了分闸位置,以此区分故障跳闸和正常操作。变电站智能装置主机在接收到这些信息后,只要将发跳闸信号的断路器的 ID 地址编号进行比较,发出相应的跳、合闸控制信号,各分段断路器终端装置接到信号,执行跳、合闸操作,系统就能恢复非故障段的正常运行。下面具体研究在各种运行方式下线路发生故障时,装置是如何实现在最小范围内有效隔离故障的。

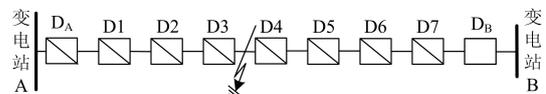


图 3 A 站供电 B 站备用运行方式示意图

Fig. 3 Operation mode schematic of A substation supplying power and B substation being standby

3.1 A 变电站供电 B 变电站备用运行方式及动作原理分析

首先来探讨如图 3 所示的运行方式下智能装置

的动作原理,在该运行方式下线路由变电站 A 供电,变电站 B 热备用,此时本线路应由变电站 A 配网故障处理智能装置控制(可用断路器 D_A 辅助开关进行控制),假若 D_3 、 D_4 间发生短路,故障电流引起 D_A 、 D_1 、 D_2 、 D_3 同时跳闸,并将跳闸信息发至配网故障处理智能装置,该装置将已跳闸断路器的 ID 编号进行排序,选 ID 编号最大的开关,本例为 D_3 。将其保持在跳闸位,同时向 ID 号比 D_3 大 1 的开关 D_4 发跳闸指令,向 D_A 、 D_1 、 D_2 、 D_B 发合闸指令,即可恢复线路无故障段的正常运行。以下各图中均用 \square 表示断开位置, \square 表示合闸位置。

经上述故障处理智能装置处理后,其运行方式见图 4,从图中可以看出,已经将故障停电范围缩到最小。此种处理方式称为升序逻辑判断关系模式,即分断开关 ID 编号按升序排列,通过故障电流的断路器 ID 编号最大的最靠近故障点。

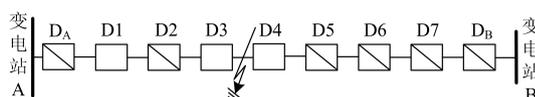


图 4 A 站供电 B 站备用运行方式下故障隔离示意图

Fig. 4 Fault isolation schematic under the mode of A substation supplying power and B substation being standby

3.2 B 变电站供电 A 变电站备用运行方式及动作原理分析

如果配电线路采用如图 5 所示运行方式,在该运行方式下线路由变电站 B 供电,变电站 A 热备用,则该线路由变电站 B 配网故障处理智能装置控制(可用断路器 D_B 辅助开关进行控制),假若 D_3 、 D_4 间发生短路,引起 D_B 、 D_4 、 D_5 、 D_6 、 D_7 同时跳闸,并将跳闸信息发至智能装置,该装置将已跳闸的断路器 ID 编号进行排序,选 ID 编号最小的开关,本例为 D_4 保持在跳闸位,同时向 ID 号比 D_4 小 1 的开关 D_3 发跳闸指令,向 D_B 、 D_5 、 D_6 、 D_7 、 D_A 发合闸指令,即可恢复线路无故障段的正常运行。

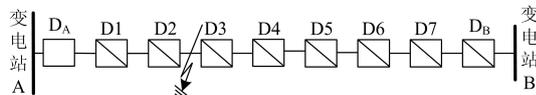


图 5 B 站供电 A 站备用运行方式示意图

Fig. 5 Operation mode schematic of B substation supplying power and A substation being standby

经配网故障处理智能装置处理后,其运行方式见图 6,从图中可以看出,已经将故障停电范围缩到最小。此种处理方式称为降序逻辑判断关系模式,即分断开关 ID 编号按降序排列,通过故障电流的断路器 ID 编号最小的最靠近故障点。

从图 6 中可以看出,经配网故障处理智能装置

故障处理后,运行方式发生了变化。A 变电站配网故障处理智能装置控制范围为 D_A 、 D_1 、 D_2 ,此段按升序逻辑判断关系模式处理故障。B 变电站配网故障处理智能装置控制范围为 D_B 、 D_5 、 D_6 、 D_7 ,此段按降序逻辑判断关系模式处理故障。为了使 A、B 两变电站配网故障处理智能装置能自动适应这种运行方式的改变,可利用 A、B 两变电站出口断路器 D_A 、 D_B 是否出现增量电路来加以区别,如果 D_A 出现故障增量电流,说明故障出在 A 变电站配网故障处理智能装置控制范围内,由 A 变电站配网故障处理智能装置按升序逻辑判断关系模式处理故障。如果 D_B 出现故障增量电流,说明故障出在 B 变电站配网故障处理智能装置控制范围内,由 B 变电站配网故障处理智能装置按降序逻辑判断关系模式处理故障。经这样处理后,无论运行方式如何变化,配网故障处理装置都能自动适应,而不至于发生逻辑错误。

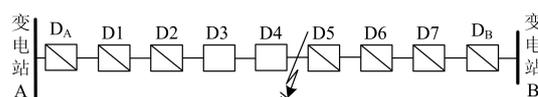


图 6 B 站供电 A 站备用运行方式下故障隔离示意图

Fig. 6 Fault isolation schematic of B substation supplying power and A substation being standby

3.3 A、B 两变电站供电中间断路器 D_5 分断运行方式及动作原理分析

如果配电线路采用如图 7 所示运行方式,在该运行方式下线路 D_A 、 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 段由变电站 A 供电, D_B 、 D_6 、 D_7 由变电站 B 供电, D_5 作为联络开关分段运行,假若 D_3 、 D_4 间发生短路,引起 D_A 、 D_1 、 D_2 、 D_3 同时跳闸,并将跳闸信息分别发至 A、B 两变电站配网故障处理智能装置,两端配网故障处理装置收到信息后先作出简易判断,由于此时 D_A 通过了故障增量电流,而 D_B 无故障增量电流通过,所以故障发生在 A 变电站配网故障处理智能装置控制范围内,应由 A 变电站配网故障处理智能装置按升序逻辑判断关系模式处理故障。将已跳闸的断路器 ID 编号进行排序,选最大的开关,本例为 D_3 保持在跳闸位,同时向 ID 号比 D_3 大 1 的开关 D_4 发跳闸指令,向 D_A 、 D_1 、 D_2 及联络开关 D_5 发合闸指令。

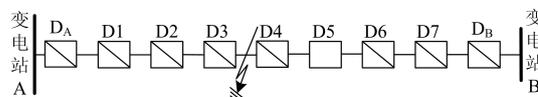


图 7 A、B 两站供电中间断路器分断运行方式示意图

Fig. 7 Disconnected operation mode schematic of intermediate circuit breaker when A and B substation supplying power

经故障处理智能装置处理后，其运行方式见图 8。从图中可以看出，已经将故障停电范围缩到最小。

应当说明的是，采用升、降序逻辑判断原理处理故障，比采用矩阵式算法判断故障点更为简单、方便，矩阵式算法需要根据接线方式预先编制好矩阵元素，将装置接收的故障信息与预先编好的矩阵元素进行比较计算来定位故障点，矩阵计算方法较为复杂，而且具有一定的局限性^[14-15]。特别是当线路接线发生变化或增加环网柜时，需重编矩阵元素，运行维护很不方便。而升、降序逻辑判断原理处理故障，无需编写矩阵，只需按要求将分段断路器的地址进行升、降序排列编号就行，在实际应用中显得十分灵活、方便。这也是本文推荐此法的原因之一。

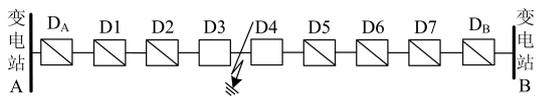


图 8 A、B 两站供电中间断路器分断运行方式下故障隔离示意图

Fig. 8 Fault isolation schematic of intermediate circuit breaker disconnected operation mode when A and B substation supplying power

从以上的分析来看，3 种运行方式下，故障处理结果均达到了最佳效果，使故障停电范围最小。

3.4 部分分段开关拒动的情况

除以上 3 种正常运行模式外，还要考虑配电网中存在部分分段开关拒跳的情况，其运行方式见图 9。

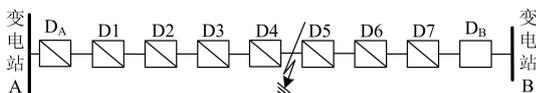


图 9 分段开关拒动情况下分析示意图

Fig. 9 Analysis schematic of section switch refusing to act

当在 D4 与 D5 之间发生故障时，DA、D1、D3、D4 跳闸，D2 拒跳，DA、D1、D3、D4 均发跳闸信息给变电站 A 配网故障处理智能装置，因 D2 拒跳，没发跳闸信息，故不作处理，保持在合闸位置。这样，处理的结果与正常升序逻辑关系模式处理结果相同。但如果离故障点最近的 D4 发生拒动，则只有 DA、D1、D2、D3 跳闸，并向变电站 A 配网故障处理智能装置发跳闸信息，故障处理智能装置将跳闸断路器 ID 号进行排序，选最大的开关 D3 跳闸，同时向 ID 号比 D3 大 1 的 D4 发跳闸指令，因 D4 机构或回路故障跳不开，依然保持在合闸位置。此时，装置会向 DA、D1、D2、及 DB 发合闸指令，因 D4 跳不开，DB 合闸又会造成 D5、D6、D7、DB 跳

闸，此时因 DB 有故障增量电流通过，应由 B 变电站按降序逻辑关系模式进行处理，将跳闸断路器的 ID 编号进行排序，保持 ID 号最小的 D5 为跳闸位置，向 D6、D7、DB 发合闸指令。处理后的最终结果如图 10 所示。

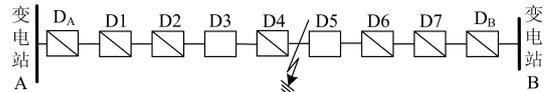


图 10 分段开关拒动情况下隔离故障示意图

Fig. 10 Fault isolation schematic of section switch refusing to act

从图 10 中可以看出，处理结果将 D4、D5 间的故障及拒动开关同时进行了隔离，可通知检修人员对其检修，其他正常部分均自动恢复运行。从上述处理拒跳过程来看，采用分布式控制与集中控制相结合的原理，处理这类故障是很自然、简单。如果仅采用集中控制，当通信、控制、机构任一环节出现问题，装置发出跳闸指令而对方拒跳时，处理起来就没那么简单了，这也是该装置的突出优点之一。另外，考虑到多台配变在合闸瞬间励磁涌流的问题，在上述各种情况下，发合闸指令的同时，应发保护装置闭锁信号，短时闭锁保护装置，如闭锁 0.3 s 后解除，用以躲过励磁涌流的作用。

上述原理亦可应用于树枝状配电线路，此时，分支线路断路器地址 ID 号的编号方法如下：如第一个分支线的第一个断路器地址 ID 号可编为 101，第二个断路器地址 ID 号可编为 102，第二个分支线的第一个断路器地址 ID 号可编为 201，第二个断路器地址 ID 号可编为 202，依此类推。其动作原理是如果故障跳闸断路器的最大 ID 号大于 100，则可判断为分支线路故障，除 ID 号最大的故障跳闸断路器外，应向所有故障跳闸的断路器发合闸指令，方可恢复非故障段正常运行。如在图 11 所示中，D 点发生短路，DA、D1、D2、D201、D202 均因通过短路电流而跳闸，并发跳闸信息给 A、B 两变电站智能装置，此时因 DA 通过了故障增量故障电流，而 DB 无故障增量电流通过，所以故障发生在 A 变电站智能装置控制范围内，应由 A 变电站智能装置按升序逻辑判断处理故障。又因跳闸断路器 ID 号最大的为 202 大于 100，故为分支线故障，所以不必向联络开关 D4 发合闸指令，只需向 DA、D1、D2、D201 发合闸指令，保持 D202 在跳闸位置，即可恢复非故障段正常运行，详见图 11。

3.5 三供一备典型接线方式下动作原理分析

典型接线模式的建立是为了使配网建设标准化，规范化，高压配电网的常见接线模式有直供接

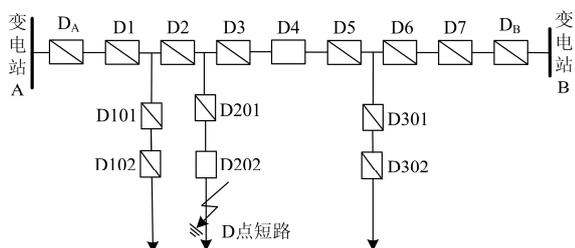


图 11 分支线路短路情况下隔离故障示意图

Fig. 11 Fault isolation schematic of branch short circuit

线, T 型接线, π 型接线^[16]。下面讨论按 π 型接入的三供一备典型接线, 其原理图如图 12 所示: 图中 A 段母线、B 段母线、C 段母线可为同一变电站不同母线段, 也可为不同变电站的母线段, E 段母线一般采用不同变电站母线段。正常运行时, D_A 故障处理智能装置控制范围是 D_A 、D1 至 D9, D_B 故障处理智能装置控制范围是 D_B 、D101 至 D109, D_C 故障处理智能装置控制范围是 D_C 、D201 至 D209, 该三套故障处理智能装置均按升序逻辑关系处理故障, 其动作原理同于上述手拉手链式结构中 A 变电站智能装置。 D_E 故障处理智能装置只控制 D_E 、D301, 该故障处理智能装置按降序逻辑关系处理故障, 其动作原理同于上述手拉手链式结构中 B 变电站智能装置。

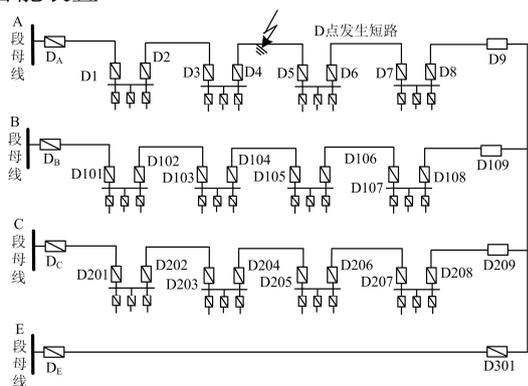


图 12 三供一备典型接线方式示意图

Fig. 12 Typical wiring diagram of three substations supplying power and one substation being standby

假如图 12 中 D 点发生短路故障, 故障电流引起 D_A 、D1、D2、D3、D4 同时跳闸, 并将跳闸信息发至 D_A 、 D_B 、 D_C 、 D_E 各故障处理智能装置, 因 D_B 、 D_C 、 D_E 均无故障增量电流通过, 该三套装置均不动作。只有 D_A 通过了故障增量电流, 应由 D_A 智能装置按升序逻辑判断关系处理故障。对故障跳闸的开关 ID 编号进行排序, 选 ID 编号最大的开关, 本例为 D4。将其保持在跳闸位, 同时向 ID 号比 D4

大 1 的开关 D5 发跳闸指令, 向 D_A 、D1、D2、D3, 及备用电源侧联络开关 D9 发合闸指令, 即可恢复正常段运行。

3.6 多分段多联络接线方式下动作原理分析

多分段多联络是当前配网接线的一种常见形式, 其接线方式见图 13。

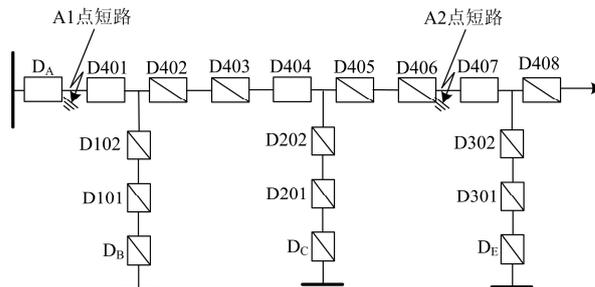


图 13 多分段多联络接线方式示意图

Fig. 13 Wiring schematic of multiple segments and multiple connection lines

假如图 13 中 A1 点发生短路故障, 故障电流引起出口开关 D_A 跳闸, 故障跳闸信息发至 D_A 、 D_B 、 D_C 、 D_E 各智能装置, 因只有 D_A 通过了故障增量电流, 故由 D_A 智能装置处理故障, 保持 D_A 在跳闸位置, 向 D401 发跳闸指令, 由于故障点出在所有联络开关与该线路连接点的电源侧, 应向所有联络开关发合闸指令, 向所有联络开关连接点处靠电源侧的开关发跳闸指令, 由各联络线分担负荷, 这样不至于在新运行方式下过负荷, 处理结果如图 14 所示。

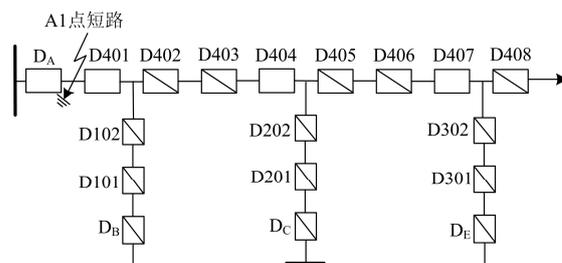


图 14 多分段多联络接线故障处理结果示意图

Fig. 14 Troubleshooting diagram of multiple segments and multiple connection lines

假如在图 13 中 A2 点发生短路故障, 故障电流引起开关 D_A 、D401、D402、D403、D404、D405、D406 跳闸, 故障跳闸信息发至 D_A 、 D_B 、 D_C 、 D_E 各智能装置, 因只有 D_A 通过了故障增量电流, 故由 D_A 智能装置按升序逻辑关系处理故障, 保持 ID 号最大的 D406 在跳闸位置, 向比其 ID 号大 1 的 D407 发跳闸指令, 由于故障点出在联络开关 D302 与该线路连接点的电源侧, 且在联络开关 D2、D102 与该线路连接点的负荷侧, 所以只向联络开关 D302

发合闸指令，联络开关 D2、D102 保持原状不动，处理结果如图 15 所示。

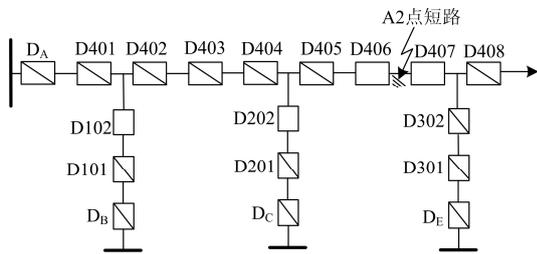


图 15 多分段多联络接线故障处理结果示意图

Fig. 15 Troubleshooting diagram of multiple segments and multiple connection lines

如果是分支联络线发生故障，处理起来比较简单，只是处理后的分支线路 ID 号是按降序排列的，注意到这点即可。

另外，多分段多联络还有一种较典型的接线就是 4×6 接线方式，它的特点是由 4 个电源和 6 条手拉手线路组成，任何两个电源间都存在联络和可转供通道，每个电源点都有其他三个做备用，原理接线图如图 16 所示。

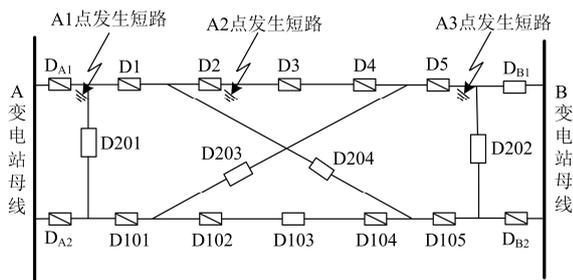


图 16 4×6 典型接线方式示意图

Fig. 16 Typical 4×6 wiring diagram

4×6 典型接线方式实现智能化比较复杂，如图 16 所示，由于交叉连线多，运行方式多，下面分析几种典型运行方式。

方式一：当 DA1、DA2、DB1、DB2 均正常时，可按手拉手链式结构进行智能化处理，既可一端供电一端备用，也可两端供电中间联络开关分断运行。

方式二：当 DA1、DA2、DB2 正常且 DB1 检修时，见图 16，当图中 A1 点发生短路时，因故障发生在联络开关 D203、D204 电源侧，应按各联络开关分担负荷的原则处理故障，即保持 DA1 在跳闸位置，向 D1、D3 发跳闸指令，向 D203、D204 发合闸指令，即可恢复正常段运行。当图 16 中 A2 点发生短路时，引起 DA1、D1、D2 跳闸，跳闸信息发至各端智能装置，因只有 DA1 通过了故障增量电流，应由 DA1 智能装置按升序逻辑关系处理故障。保持 D2

在跳闸位置，向 ID 号比 D2 大 1 的 D3 发跳闸指令，向 DA1、D1、D203 发合闸指令，即可恢复无故障段运行，联络开关 204 因与该线路连接点在短路点的电源侧，故保持不动。当图 16 中 A3 点发生短路时，因故障发生在联络开关 D203、D204 负荷侧，联络开关均不动作，保持 D5 在跳闸位置，向跳闸的所有断路器发合闸指令即可。

方式三：当 DA1、DB1 检修，DA2、DB2 主供时，详见图 17。

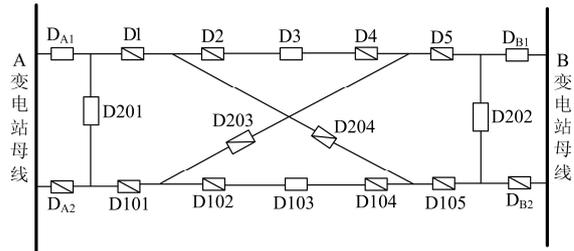


图 17 4×6 连接方式三示意图

Fig. 17 Third 4×6 connection diagram

此方式下线路发生短路，当跳闸的分段开关含有 ID 号小于 100 的开关时，即为线路末端故障，保持 ID 号小于 100 的开关在分闸位置，向其他跳闸的分段开关发合闸指令，就能恢复正常段运行。当跳闸的分段开关不含 ID 号小于 100 的开关，但含有 D203 时，此为 D203 后端故障，应向 D4、D5 发跳闸指令，向 D3、D202 及除 D203 以外的其他跳闸的分段开关发合闸指令，可恢复非故障段正常段运行。当跳闸的分段开关不含 ID 号小于 100 的开关，但含有 D204 时，此为 D204 后端故障，应向 D1、D2 发跳闸指令，向 D3、D201 及除 D204 以外的其他跳闸的分段开关发合闸指令，可恢复非故障段正常段运行。当跳闸的分段开关 ID 号在 100 与 200 之间时，按手拉手链式结构两端供电中间分断的情形处理。

其他运行方式皆为以上三种基本运行方式的变形，可按相同原理进行处理。

4 结论

通过以上分析可知，采用现代通信技术，利用计算机对跳闸信息进行简单的排序和逻辑判断，就能精确定位故障点，解决传统继电保护依靠精确计算和时间阶梯所不能解决的问题。同时，通过分析对比发现，采用分布式开关保护控制原理和集中信息智能馈线自动化相结合的配网故障恢复策略，具有许多优点，更有利于配网自动化的推广应用。该方法就像三维立体结构变压器解决平面布置变压器所不能解决的磁路对称性问题一样，是一个非常有创意的方法，能快速准确隔离故障，希望能给新产

品研发人员一些启发和参考。

参考文献

- [1] 陈煦斌, 秦立军. 配网故障指示器最优配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 100-104.
CHEN Xubin, QIN Lijun. Optimal configuration of fault indicator in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 100-104.
- [2] 黄一山. 关于配电网线路的故障定位分析及其在配电网中的实际应用研究[J]. 价值工程, 2012, 21(3): 29-32.
HUANG Yishan. About the fault location of distribution line analysis and its practical application in power distribution lines[J]. Value Engineering, 2012, 21(3): 29-32.
- [3] 李卫. 配电网故障自动定位系统研究及应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
LI Wei. Research and application of power distribution network fault automatic positioning system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [4] 崔海, 侯茜, 李向奎, 等. 浅议配电网运行及自动化的管理应用[C] // 山东电机工程学会第四届供电专业学术交流论文集, 2007: 138-141.
CUI Hai, HOU Qian, LI Xiangkui, et al. Extraction of distribution network operation and automation management application[C] // Shandong Institute of Electrical Engineering of the Fourth Power Supply Academic Symposia Proceedings, 2007: 138-141.
- [5] 王宝华, 许贵东. 配电网馈线自动化故障恢复系统探讨[C] // 加入WTO和中国科技与可持续发展——挑战与机遇、责任和对策(上册), 2002, 23(9): 65-67.
WANG Baohua, XU Guidong. Distribution network fault recovery feeder automation system[C] // Accession to the WTO and China Science and Technology and the Sustainable Development, Meet Challenges and Machine, Responsibility and Countermeasures (I), 2002, 23(9): 65-67.
- [6] 刘富波. 重合器、分段器和熔断器间的保护配合[J]. 高压电器, 1994, 23(1): 46-48.
LIU Fubo. Protection collaboration among the reclosing and section and fuse[J]. High Voltage Engineering, 1994, 23(1): 46-48.
- [7] 张宏. 配电网馈线故障区域定位的研究[D]. 福州: 福州大学, 2004.
ZHANG Hong. Research on distribution feeders fault localization[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2004.
- [8] 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[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 35-41.
- [9] 刘健, 张小庆, 张志华. 继电保护配合提高配电网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 Zihua. Improving the performance of fault location and restoration based on relay protection for distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 10-16.
- [10] 刘建华, 刘鹏, 元航, 等. 煤炭智能供电系统故障识别与隔离技术[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 138-142.
LIU Jianhua, LIU Peng, YUAN Hang, et al. Research on fault visual identification and isolation technology of smart power supply system in coal mine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 138-142.
- [11] 李文俊, 程志伟, 薛忠新, 等. 基于光钎通讯防越级跳闸方案设计和应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 131-135.
LI Wenjun, CHENG Zhiwei, XUE Zhongxin, et al. Design and application on preventing override trip system based on fiber-optic communication[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 131-135.
- [12] YIN Xianggen, ZHANG Zhe, LI Zhenxing, et al. The research and the development of the wide area relaying protection based on fault element identification[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 13pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0023-z
- [13] 孙洁, 王增平, 王英男, 等. 含分布式电源的复杂配电网故障恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 56-62.
SUN Jie, WANG Zengping, WANG Yingnan, et al. Service restoration of complex distribution system with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 56-62.
- [14] 毕元, 房鑫炎, 俞国勤, 等. 通用矩阵算法和区域辨识法电力故障定位计算[J]. 电力系统及其自动化学报 2010, 22(6): 52-58.
BI Yuan, FANG Xinyan, YU Guoqin, et al. General matrix algorithm and incident region method based fault location analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2010, 22(6): 52-58.
- [15] 郑涛, 潘玉美, 郭昆亚, 等. 基于免疫算法的配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 77-83.
ZHENG Tao, PAN Yumei, GUO Kunya, et al. Fault location of distribution network based on immune algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 77-83.
- [16] 葛少云, 郭寅昌, 刘洪, 等. 基于供电能力计算的高压配电网接线模式分析[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 56-62.
GE Shaoyun, GUO Yinchang, LIU Hong, et al. Load supply capability based analysis of HV distribution network connection mode[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 56-62.

收稿日期: 2016-08-19; 修回日期: 2016-11-30

作者简介:

刘翊平(1996—), 女, 本科, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: xiajibaihe1996@163.com

(编辑 姜新丽)