

继电保护配合提高配电自动化故障处理性能

刘健, 张小庆, 张志华

(陕西电力科学研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为了提高配电网的故障处理性能, 论述了多级级差实现配电网继电保护配合的可行性。分析了装设瞬时电流速断保护情况下级差配合的适应范围。给出了多级级差保护与配电自动化协调配合的配电网故障处理策略的配置原则, 讨论不具备多级级差保护配合条件时的处理和分布式电源接入带来的影响。研究表明: 配电网多级级差继电保护配合是可行的, 可以实现用户故障不影响分支, 分支故障不影响主干线。即使安装了瞬时电流速断保护的情形仍然有一部分区域具备级差配合的条件。配电自动化与继电保护协调配合, 能够显著提高故障处理性能。
关键词: 配电网; 配电自动化; 继电保护; 短路电流; 故障定位; 健全区域供电恢复

Improving the performance of fault location and restoration based on relay protection for distribution grids

LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, ZHANG Zhihua

(Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: To improve the performance of fault isolation and restoration in distribution grids, the feasibility of relay protection based on time-delay coordination in distribution systems is investigated. The adaptive ranges of time-delay coordination in case of instantaneous over-current relay protection installed are analyzed. Design considerations of hybrid fault isolation and restoration combined by time-delay based relay protection and distribution automation system (DAS) are given. The influences on the fault treatment process in case of distribution generation (DG) implanted and without time-delay coordination are discussed. It is concluded that the time-delay coordination is feasible with which the outage of a branch can be avoided when a fault occurs in a custom and the outage of a trunk can be avoided when a fault occurs on one of its branches. Even in the case of instantaneous over-current relay protection installed, the corresponding feeder has some capacities of time-delay coordination. The performance of fault isolation and restoration can be remarkably improved by the combination of relay protection and distribution automation system.

Key words: distribution grids; distribution automation; relay protection; short-circuit current; fault location; restoration

中图分类号: TM76

文章编号: 1674-3415(2015)22-0010-07

0 引言

据统计, 超过 85% 的故障停电是配电网故障造成的, 随着配电自动化系统的建设, 采用自动化手段进行故障快速处理, 对于提高供电可靠性已经发挥了重要作用^[1]。

配电自动化系统一般采用集中智能^[2], 在收集由配电自动化终端设备上报的故障信息的基础上, 采用故障定位规则进行故障定位和隔离, 然后进行网络重构, 最大限度地恢复健全区域供电^[3-8]。但是一般都会引起健全区域的短暂停电, 即使故障仅仅发生在辐射状分支或用户侧也是如此。

根据国家电网公司已经建成的城市配电自动化系统故障处理记录统计, 超过 80% 的故障发生在分支线或用户侧的架空部分, 并且以两相相间短路居多。主干线大多已经电缆化或采用绝缘导线, 故障率较低, 故障的主要原因是外力破坏。

继电保护配合能够迅速切除故障, 恢复健全部分供电而不造成短暂停电, 但是由于城市配电网级联开关数较多、供电半径较短而沿线短路电流差别不大、运行方式多变等特点, 配电网继电保护配合很困难。

文献[9]建议了一种利用级差配合的配电网继电保护方案, 能够与配电自动化协调配合进行故障

处理,但是没有分析变电站出线断路器装设瞬时电流速断保护的情况下级差配合的可行性,也未研究分布式电源接入对配电网继电保护配合的影响。

本文结合相关标准,深入分析多级级差配合的配电网继电保护的可行性和适应范围,讨论不具备多级级差保护配合条件时的处理和分布式电源接入带来的影响,论证采用继电保护配合提高配电自动化故障处理性能的观点。

1 配电网多级保护配合的可行性

对于供电半径较长、分段数较少的开环运行农村配电线路,在线路发生故障时,故障位置上游各个分段开关处的短路电流水平差异比较明显时,可以采取电流定值与延时级差配合的方式(如3段式过流保护或反时限过流保护)实现多级保护配合,有选择性地快速切除故障。

对于供电半径较短的开环运行城市配电线路或分段数较多的开环运行农村配电线路,在线路发生故障时,故障位置上游各个分段开关处的短路电流水平往往差异比较小,无法针对不同的开关设置不同的电流定值,此时仅能依靠保护动作延时间级差配合实现故障有选择性的切除。

多级级差保护配合是指:通过对变电站10 kV出线断路器和10 kV馈线开关过流保护设置不同的动作延时时间来实现保护配合。

(1) 变电站出线断路器不装设瞬时电流速断保护的情形

根据《3 kV~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程》(DL/T584-2007)、《继电保护和安全自动装置技术规程》(GB/T 14285-2006)以及《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》(GB/T 50062-2008)等相关标准中关于3~10 kV线路保护的规定^[10-12]:在线路短路不会造成发电厂厂用母线或重要用户母线电压低于额定电压的60%、线路导线截面较大允许带时限切除短路、并且过电流保护的时限不大于0.5~0.7 s的情形,可不装设瞬时电流速断保护,而采用延时电流速断保护或过电流保护,从而为多级级差保护配合提供了条件。

(2) 变电站出线断路器装设瞬时电流速断保护的情形

瞬时速断保护定值一般按躲过线路末端最大三相短路电流和励磁涌流整定,可靠系数一般大于1.3。而在配网上发生的相间短路故障中,绝大部分是两相相间短路故障。

因此,瞬时速断保护不能保护馈线全长,其保护范围一般仅仅局限在相距母线较近的馈线段,定

义变电站出线断路器瞬时电流速断保护范围的临界点为 I_c ,馈线以 I_c 为界分为两个部分:上游部分不具备多级级差保护配合的条件;下游部分发生两相相间短路故障时(末端甚至三相相间短路故障时),将不引起变电站出线断路器的瞬时电流速断保护动作,而只是启动其延时电流速断保护或过电流保护,从而具备了多级级差保护配合的条件,如图1所示。

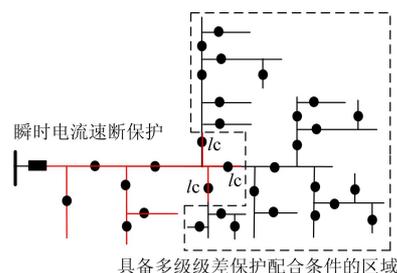


图1 具备多级级差保护配合条件的区域示意图

Fig. 1 Over-current protection with coordination time-delay is feasible in the area within the dashed block

由于10 kV馈线都从主变电站供出,一般情况下一条馈线的供电范围大致呈扇形,越向下游分支越多,因此对于变电站出线断路器装设了瞬时电流速断保护的馈线,其具备多级级差保护配合条件的区域恰好落于分支比较多的范围,对于实施第2节即将描述的变电站出线开关-分支开关-次分支开关(或用户开关)的多级级差配合非常有利。

(3) 时间级差的整定

由上述分析可见,对于不装设瞬时电流速断保护的情形,可以在整条馈线上进行多级级差保护配合,对于装设瞬时电流速断保护的情形,可以在 I_c 下游部分的分支或用户开关与变电站出线开关之间进行多级级差保护配合。

变电站出线断路器过流保护动作时间一般设置为0.5~0.7 s。考虑最不利的情况,为了不影响上级保护的整定值,需要在此时间内安排多级级差保护的延时配合。

对于馈线断路器使用弹簧储能操动机构的情形,其分闸时间一般为60~80 ms,采用全波傅氏算法故障检测的保护出口时间在30 ms左右,继电器驱动时间一般为5 ms左右,考虑一定的时间裕度,延时时间级差 Δt_{jc} 可以设置为250~300 ms,从而实现两级级差保护配合。

对于馈线断路器使用永磁操动机构的情形,其分闸时间可以做到20 ms左右。采用全波傅氏算法故障检测的保护出口时间在30 ms左右(采用半波傅氏算法更快,但是不提倡,因其不能滤除偶次谐波),

若采用 IGBT 驱动, 则时间可忽略不计, 若仍采用继电器驱动则一般在 5 ms 左右, 考虑一定的时间裕度, 延时时间级差 Δt_{jc} 可以设置为 200 ms, 从而实现三级级差保护配合。

在系统的抗短路电流承受能力较强的情况下, 可适当延长变电站变压器低压侧开关的过流保护动作延时时间, 以便提高多级级差保护的可靠性。

由于要求变压器、断路器、负荷开关、隔离开关、线路以及电流互感器的热稳定校验时间为 2 s, 因此所建议的多级级差保护配合方案并没有对这些设备的热稳定造成影响。

2 多级级差保护的配置原则

1) 两级级差保护的配置原则

两级级差保护配合下, 线路上开关类型组合选取及保护配置的原则如下:

- (1) 主干馈线开关全部采用负荷开关;
- (2) 用户(或次分支)开关或分支开关采用断路器;

(3) 变电站出线开关根据需要决定是否装设瞬时电流速断保护, 其过电流保护的延时时间设置为一个时间级差 Δt_{jc} ;

(4) 具备多级级差保护配合条件的区域(对于不装设瞬时电流速断保护的馈线为其整条馈线, 对于装设瞬时电流速断保护的馈线为其 l_c 下游部分的区域)的用户(或次分支)断路器或分支断路器保护动作延时时间设定为 0 s, 电流定值按照躲开下游最大负荷以及励磁涌流设置。

采用上述两级级差保护配置后具有下列优点:

(1) 分支或用户(或次分支)故障发生后, 相应分支或用户(或次分支)开关首先跳闸, 而变电站出线开关不跳闸, 因此不会造成全线停电, 有助于减少故障后导致停电的用户数。

(2) 不会发生开关多级跳闸或越级跳闸的现象, 因此故障处理过程简单, 操作的开关数少, 瞬时性故障恢复时间短。

(3) 主干线采用负荷开关相比全断路器方式降低了造价。

2) 三级级差保护的配置原则

采用三级级差保护的典型配置为: 变电站 10 kV 出线开关、具备多级级差保护配合条件区域的馈线分支开关与用户(或次分支)开关形成三级级差保护, 其中用户(或次分支)开关过流保护动作延时时间设定为 0 s, 电流定值按照躲开下游最大负荷以及励磁涌流设置; 馈线分支开关过流保护动作延时时间设定为 Δt_{jc} , 电流定值按照躲开下游最大负荷以及

励磁涌流设置; 变电站出线开关过流保护动作时间设定为 $2\Delta t_{jc}$ 。

3 与继电保护配合的配电网故障处理

3.1 不发生越级跳闸时的故障处理

根据第 2 节的配置原则, 对于不装设瞬时电流速断保护的馈线, 分支线或次分支(或用户)发生故障时, 将由继电保护直接快速将故障隔离在最小范围从而完成故障处理; 对于装设了瞬时电流速断保护的馈线, 在 l_c 下游部分发生两相相间短路时一般也不会发生越级跳闸, 也由继电保护直接快速将故障隔离在最小范围从而完成故障处理。

但是如果故障发生在主干线, 根据第 2 节的配置原则, 主干线不配置保护(因主干线故障率远比分支线低), 因此会引起变电站出线断路器保护动作跳闸, 需要由配电自动化系统根据收到的故障信息判断出故障区域, 通过遥控相应开关动作完成故障区域的隔离并恢复对健全区域的供电^[1-4]。配电自动化系统故障处理的过程已经有大量文献报道, 本文不再赘述。

3.2 发生越级跳闸时的故障处理

对于装设了瞬时电流速断保护的馈线, 若在 l_c 上游发生相间短路故障或在 l_c 下游部分发生三相相间短路故障, 则可能导致变电站出线断路器瞬时电流速断保护和分支(或用户)开关过流保护同时动作, 引起越级跳闸, 下面分析其影响并论述相应的故障处理策略。

(1) 两级级差配合的情形

用户开关或分支开关下游发生三相相间短路故障后, 对于按照第 2 节两级级差保护的配置原则进行配置的情形, 由于用户(或次分支)开关或分支开关过流保护不带延时, 其故障检测时间和中间继电器驱动时间大约 30 ms; 而变电站出线断路器即使装设了瞬时电流速断保护, 其故障检测时间和中间继电器驱动时间大约 30 ms, 断路器动作时间大约 20~80 ms(与操作机构类型有关)。因此, 在变电站出线断路器完成分闸切除故障电流之前, 用户(或次分支)开关或分支开关的中间继电器已经出口, 该开关必然会分闸。

综上所述, 对于装设了瞬时电流速断保护的馈线, 在两级级差配合的情形, 用户(或次分支)开关或分支开关下游发生三相相间短路故障后, 可能导致变电站出线断路器和用户(或次分支)开关或分支开关均分闸的结果。

对于架空馈线或电缆架空混合馈线, 变电站出线断路器可以配置自动重合闸功能, 由于故障已经

被用户(或次分支)开关或分支开关隔离,变电站出线断路器一次快速重合就可恢复健全区域供电。

对于全电缆馈线,变电站出线断路器不宜配置自动重合闸功能,需要由配电自动化系统根据收到的故障信息判断出故障位于用户(或次分支)开关或分支开关下游,且已经被用户(或次分支)开关或分支开关隔离,通过遥控变电站出线断路器合闸恢复健全区域供电。

(2) 三级级差配合的情形

1) 三级级差配合的最下游开关的下游发生相间短路故障的情形

三级级差配合的最下游开关的下游发生三相相间短路故障后,对于按照第2节三级级差保护的配置原则进行配置的情形,由于最下游开关过流保护不带延时,其故障检测时间和中间继电器驱动时间大约30 ms;而变电站出线断路器即使装设了瞬时电流速断保护,其故障检测时间和中间继电器驱动时间大约30 ms,断路器动作时间大约20~80 ms(与操作机构类型有关)。因此,在变电站出线断路器完成分闸切除故障电流之前,最下游开关的中间继电器已经出口,该开关必然会分闸。

但是,三级级差配合的中间开关由于过流保护的延时时间一般大于变电站出线断路器的故障检测时间、中间继电器驱动时间和断路器动作时间之和,因此在变电站出线断路器完成分闸切除故障电流后该开关的保护将返回,该开关必然不会分闸。

综上所述,对于装设了瞬时电流速断保护的馈线,在三级级差配合的情形下,三级级差配合的最下游开关的下游发生三相相间短路故障后,可能导致变电站出线断路器和最下游开关均分闸,但是中间开关不分闸的结果。

对于架空馈线或电缆架空混合馈线,变电站出线断路器配置自动重合闸功能,由于故障已经被三级级差配合的最下游开关隔离,变电站出线断路器一次快速重合就可以恢复健全区域供电。

对于全电缆馈线,变电站出线断路器不宜配置自动重合闸功能,但是配电自动化系统主站的集中智能故障处理模块可以根据收到的故障信息判断出故障位于三级级差配合的最下游开关下游,且已经被用户开关或分支开关隔离,可通过遥控变电站出线断路器合闸恢复健全区域供电。

2) 三级级差配合的中间开关与最下游开关之间发生相间短路故障的情形

三级级差配合的中间开关与最下游开关之间发生相间短路故障后,对于按照第2节三级级差保护的配置原则进行配置的情形,由于三级级差配合的

中间开关过流保护延时时间一般大于变电站出线断路器的故障检测时间、中间继电器驱动时间和断路器动作时间之和,因此在变电站出线断路器完成分闸切除故障电流后该开关的保护将返回,该开关必然不会分闸。

综上所述,对于装设了瞬时电流速断保护的馈线,在三级级差配合的情形下,三级级差配合的中间开关与最下游开关之间发生三相相间短路故障后,可能会导致变电站出线断路器分闸,但是三级级差配合的中间开关不分闸的结果。

对于架空馈线或电缆架空混合馈线,变电站出线断路器一般会配置自动重合闸功能,由于三级级差配合的中间开关未分闸,对于永久故障的情形,变电站出线断路器的重合闸将失败。对于全电缆馈线,变电站出线断路器一般不会配置自动重合闸功能。因此,无论架空馈线、电缆架空混合馈线还是全电缆馈线,都需要依靠配电自动化系统主站的集中智能故障处理模块根据收到的故障信息判断出故障位置,并通过遥控相应开关分闸隔离故障区域,遥控变电站出线断路器合闸恢复健全区域供电。

4 分布式电源接入的影响

分布式电源(DG)的接入有可能会给前述的多级级差保护配合方案带来一些影响,在此需要加以分析。

(1) 对不装设瞬时电流速断保护馈线的影响

对于不装设瞬时电流速断保护的馈线,其多级级差保护配合比较简单,就是通过变电站出线开关和分支或用户开关过电流保护动作时限的配合来实现的。此时分布式电源若是从该馈线所在母线上的相邻馈线接入,则当在该馈线上发生故障时,分布式电源提供的助增电流将有助于提高过电流保护的灵敏度,对保护动作是有利的;若分布式电源是接入到本馈线上的,则对于分布式电源下游的开关的过电流保护,分布式电源提供的助增电流仍然有利于其保护动作;只是当分布式电源下游发生故障时,流过其上游开关的短路电流相对于分布式电源接入以前会有所减小,但是由于过电流保护的灵敏度一般较高,再加上分布式电源容量一般较小,尤其是逆变器并网型分布式电源提供的短路电流很小,一般不会导致分布式电源上游的开关过电流保护拒动。

因此对于不装设瞬时电流速断保护的馈线,分布式电源的接入一般不会破坏其多级级差保护的配合关系。

(2) 对装设瞬时电流速断保护馈线的影响

对于装设瞬时电流速断保护的馈线,若分布式电源是从该馈线所在母线上的相邻馈线接入,则当在该馈线上发生故障时,分布式电源提供的助增电流将扩大变电站出线开关瞬时电流速断保护的保护区,使得其动作区进入到按照分布式电源接入以前的条件计算得出的 l_c 的下游部分,从而会增加越级跳闸的可能。

而若分布式电源是接入到本馈线上的,其对于瞬时电流速断保护则没有这种影响,并且若是当分布式电源下游发生故障时,流过变电站出线开关的短路电流会减小,瞬时电流速断保护的保护区会缩小,这对于确保在变电站出线开关和 l_c 的下游部分的开关间的多级级差保护配合是有利的。

另外,无论是否装设瞬时电流速断保护的馈线,在接入到本馈线上的分布式电源提供的短路电流较大时,反向电流都有可能引起分支或用户开关处未装设方向元件的过流保护在反方向故障时误动,破坏多级级差保护的配合关系,因此需要在必要的情况下配置方向元件。但是,对于分布式电源提供的短路电流水平较低(比如光伏等通过逆变器并网型分布式电源)时,这方面的影响不大,必要时适当调整过流保护定值就可以适应而不必加装方向元件。

(3) 对自动重合闸的影响

根据 Q/GDW480-2010《分布式电源接入电网技术规定》规定,非有意识孤岛的分布式电源必须在馈线故障后 2 s 内从电网脱离。因此,对于下游接有分布式电源的开关,其自动重合闸的延时时间应大于 2 s。

5 实例

图 2(a)所示为一个典型的架空配电网,矩形框代表变电站出线开关,方块代表断路器,圆圈代表负荷开关。空心代表分闸,实心代表合闸。

根据第 2 节的配置原则,变电站出线开关 S_1 和具备多级级差保护配合条件的区域的分支开关和用户开关之间实现了三级级差保护配合,其中变电站出线断路器配置瞬时电流速断保护、过流保护以及自动重合闸功能,过流保护延时时间为 $2\Delta t_{jc}$;大方块代表的断路器配置过流保护,延时时间为 Δt_{jc} ;小方块代表的断路器配置过流保护,延时时间为 0 s。

(1) 不发生越级跳闸时的故障处理过程

如图 2(b)所示,当用户开关 J 下游发生两相相间短路时(永久性故障),变电站出线开关 S_1 瞬时电流速断保护不会启动,只有 S_1 、I、J 过流保护启动,由于 S_1 、I、J 过流保护之间存在延时时间级差配合,

J 断路器过流保护动作跳闸切除故障就完成了故障处理。

如图 2(c)所示,当分支开关 G 下游发生两相相间短路时(永久性故障),变电站出线开关 S_1 瞬时电流速断保护不会启动,只有 S_1 、G 过流保护启动,由于 S_1 、G 过流保护之间存在延时时间级差配合,G 断路器过流保护动作跳闸切除故障就完成了故障处理。

如图 2(d)所示,当主干线上开关 C 和 D 之间区域发生两相或三相相间短路时(永久性故障),由于主干线上没有进行多级级差保护配合,需由变电站出线开关 S_1 跳闸切除故障,故障没有被隔离在最小范围之内。之后变电站出线开关 S_1 重合失败,配电自动化系统根据故障信息上报情况和网络拓扑,可以精确地判断出故障就发生在 C 和 D 间,则进行修正控制:遥控负荷开关 C、D 分闸、遥控变电站出线开关 S_1 合闸、遥控联络开关 K 合闸,从而将故障隔离在最小范围,如图 2(e)所示。

由以上故障处理过程可以看出,采用继电保护与配电自动化配合,当在具备多级级差保护配合条件的区域内发生两相相间短路时,则可以将分支和用户故障限制在就地,不影响上一级,仅仅是在主干线故障时才会造成全线短暂停电,需要由配电自动化系统根据网络拓扑和收集到的故障信息进行修正控制。

(2) 发生越级跳闸时的故障处理过程

如图 2(f)所示,当用户开关 J 下游发生三相相间短路时(永久性故障),则有可能导致变电站出线开关 S_1 瞬时电流速断保护和用户开关 J 过流保护均动作跳闸,故障虽然切除,但是没有将故障隔离在最小范围。之后变电站出线开关 S_1 自动重合闸动作,由于故障已经被用户开关 J 隔离,重合成功,恢复对健全区域供电,将故障隔离在最小范围内,如图 2(g)所示。

如图 2(h)所示,当分支开关 E 下游发生三相相间短路故障时(永久性故障),则有可能变电站出线开关 S_1 瞬时电流速断保护越级跳闸切除故障,而 E 断路器不会分闸。之后变电站出线开关 S_1 自动重合闸动作,由于故障未被分支开关 E 隔离,重合失败。此时,配电自动化系统根据故障信息上报情况和网络拓扑,可以精确地判断出故障就发生在分支开关 E 下游,则进行修正控制:遥控分支开关 E 分闸、遥控变电站出线开关 S_1 合闸,从而将故障隔离在最小范围,如图 2(i)所示。

由以上故障处理过程可见,虽然在具备多级级

差保护配合条件的区域发生三相相间短路时, 继电保护有可能越级跳闸, 但是通过配电自动化的修正控制仍可以得到正确的故障处理结果。

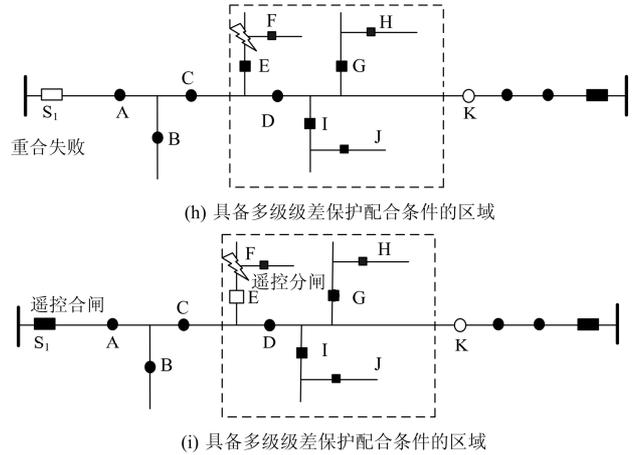
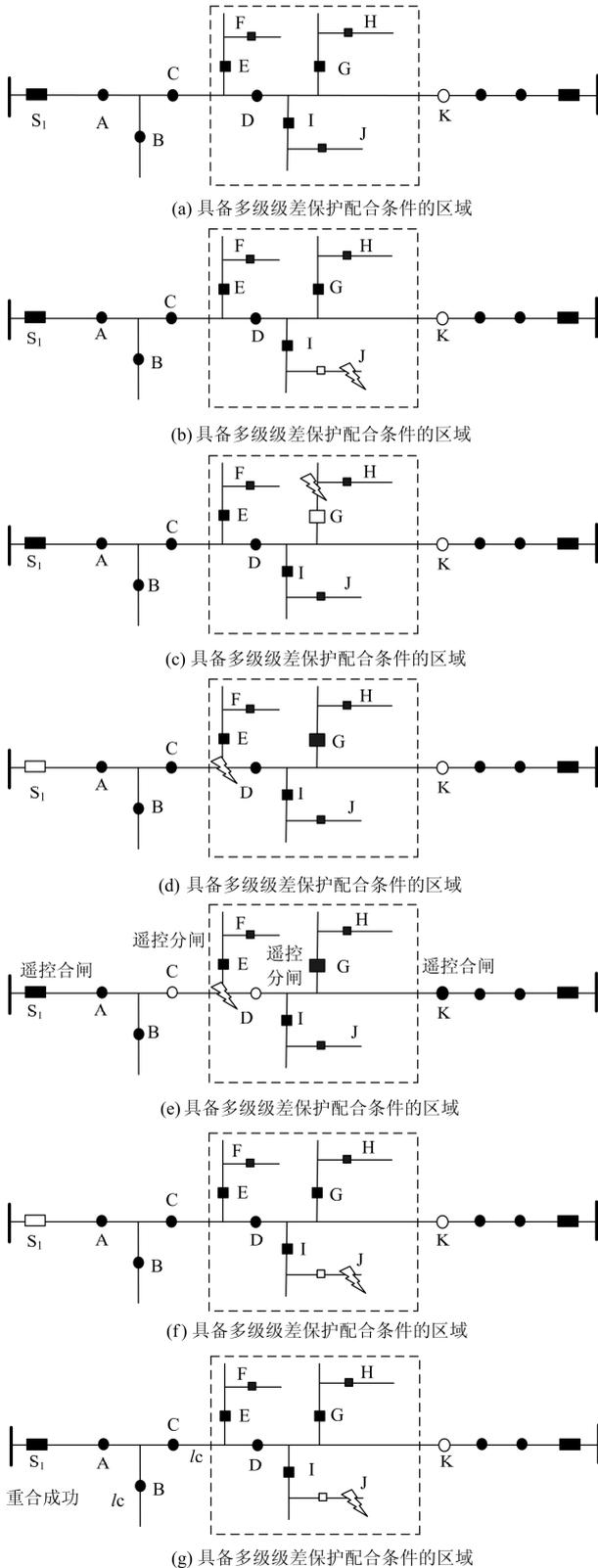


图 2 继电保护和配电自动化协调配合的故障处理实例
Fig. 2 Coordination of distribution automation and relay protection for fault control

6 结论

(1) 对于变电站出线断路器未安装瞬时电流速断保护的情形, 可以实现用户(次分支)、分支、变电站出线断路器三级级差保护配合, 实现用户(次分支)故障不影响分支, 分支故障不影响主干线。而对于主干线故障则需要依靠集中智能配电自动化系统加以处理。继电保护配合能够提高配电自动化故障处理性能。

(2) 即使对于变电站出线断路器安装了瞬时电流速断保护的情形, 由于绝大多数馈线相间短路故障为两相相间短路, 馈线上仍然有一部分区域具备级差配合的条件, 继电保护配合仍有助于提高配电自动化故障处理性能。

(3) 对于不装设瞬时电流速断保护的馈线, 分布式电源的接入一般不会破坏其多级级差保护的配合关系; 对于装设瞬时电流速断保护的馈线, 若分布式电源是从所在母线上的相邻馈线接入, 则会扩大变电站出线开关瞬时电流速断保护的保护区, 减少可实现多级级差保护配合的区域范围。

(4) 相邻馈线故障时, 为了避免本馈线上分布式电源提供的反向故障电流导致过流保护误动, 需有选择性地配置方向元件。

参考文献

[1] 沈兵兵, 吴琳, 王鹏. 配电自动化试点工程技术特点及应用成效分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 27-32.
SHEN Bingbing, WU Lin, WANG Peng. Technological characteristics and application effects analysis of distribution automation pilot projects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 27-32.

- [2] 陈堂, 赵祖康, 陈星莺, 等. 配电系统及其自动化技术[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, 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): 77-83.
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): 77-83.
- [5] 徐玉琴, 张丽, 王增平. 基于 AER 模型的配电网大面积断电供电恢复算法[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 66-71.
XU Yuqin, ZHANG Li, WANG Zengping. Agent-environment-rules model based algorithm of service restoration for large-area blackout of distribution system[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 66-71.
- [6] 颜萍, 顾锦汶, 张广. 一种快速高效的配电网供电恢复算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 52-56.
YAN Ping, GU Jinwen, ZHANG Guang. A fast efficient service restoration method for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 52-56.
- [7] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障定位的一种新算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(14): 48-50.
WEI Zhinong, HE Hua, ZHENG Yuping. A novel algorithm for fault location in power distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(14): 48-50.
- [8] CIRIC R M, POPOVIC D S. Multi-objective distribution network restoration using heuristic approach and mix integer programming method[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2000(22): 497-505.
- [9] 刘健, 张志华, 张小庆, 等. 继电保护与配电自动化配合的配电网故障处理[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 53-57.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing, et al. Relay protection and distribution automation based fault allocation and restoration for distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 53-57.
- [10] DL/T584-2007 3 kV~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程[S].
- [11] GB/T 14285-2006 继电保护和安全自动装置技术规程[S].
- [12] GB/T 50062-2008 电力装置的继电保护和自动装置设计规范[S].

收稿日期: 2015-06-22

作者简介:

刘健(1967-), 男, 通信作者, 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, 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, 主要研究方向为电力系统自动化;

张志华(1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为配电网及其自动化技术。

(编辑 葛艳娜)