

# 基于运行方式与故障信息融合的 配电网保护策略优化

宁楠<sup>1</sup>, 孙睿择<sup>1</sup>, 潘凯岩<sup>2</sup>, 孔海滨<sup>2</sup>, 张恋<sup>2</sup>, 陈怀茵<sup>1</sup>

(1. 贵州电网有限责任公司贵安供电局, 贵州 贵阳 550003; 2. 东方电子股份有限公司, 山东 烟台 264010)

**摘要:**为实现配电网继电保护策略的自适应优化,根据继电保护故障处理流程,将保护分为故障辨识和出口决策环节,并在此基础上提出基于运行方式与故障信息融合的配电网继电保护策略两级优化方法。首先,依托运行方式跟踪,实现故障辨识环节的保护动作定值整定;其次,开放故障辨识环节产生的故障信息给出口决策环节,从而实现出口决策环节的优化整定;最后,着重研究融合故障信息的出口决策环节优化方法,通过故障拓扑、保护出口配合以及重合闸效益分析,给出配电网继电保护在应对不同故障场景下保护出口决策的隔离动作选择、出口定值整定与重合闸策略选取,有效提升保护的灵活性。

**关键词:**配电网;继电保护;运行方式;故障信息;策略优化

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.02.007 中图分类号:TM773 文章编号:1673-9140(2022)02-0054-08

## Optimization of distribution network protection strategy based on the integration of operation mode and fault information

NING Nan<sup>1</sup>, SUN Ruize<sup>1</sup>, PAN Kaiyan<sup>2</sup>, KONG Haibin<sup>2</sup>, ZHANG Lian<sup>2</sup>, CHEN Huailin<sup>1</sup>

(1. Gui'an Power Supply Bureau, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550003, China;

2. Dongfang Electronics Cooperation, Yantai 264010, China)

**Abstract:** In order to realize the adaptive optimization of the relay protection strategy of the distribution network, the protection is divided into the fault identification and exit decision-making process in terms of the fault handling process of the relay protection. On this basis, a two-level optimization method for relay protection strategy of the distribution network based on the fusion of operation mode and fault information is proposed. First of all, relying on the tracking of the running mode, the fixed values of the protection action in the fault identification process are set. Then, the fault information generated by the fault identification process is opened to the export decision-making process so as to realize the optimal setting of the export decision-making process. Finally, this paper focuses on the optimization method of the exit decision-making process integrating fault information. Through the fault topology, protection exit coordination and reclosing benefit analysis, the isolation action selection, exit fixed-value setting and reclosing strategy selection of protection exit decision-making for the distribution network relay protection in response to different fault scenarios are given to effectively improve the protection flexibility.

**Key words:** distribution network; relay protection; operation mode; fault information; strategy optimization

收稿日期:2021-03-01;修回日期:2021-04-19

基金项目:中国南方电网有限责任公司重点科技项目(K-SZ2013-906)

通信作者:宁楠(1985-),男,教授级高级工程师,主要从事电力系统继电保护及自动化、变电和配电设备智能技术的研究;E-mail:674604139@qq.com

新能源的接入带来配电网运行特征的变化,助增及外汲效应给传统配电网保护的选择性与灵敏性带来重大考验<sup>[1-2]</sup>。另一方面,配电网主动管理策略也使得配电网时刻面临着网络拓扑的改变,配电网的运行方式变动频繁,使得固定化的保护策略难以适应配电网所有的运行工况<sup>[3-4]</sup>。

配电网智能化改造与通信技术的发展,使得配电网的保护朝“智能化”、“信息化”的方向发展<sup>[5-6]</sup>,使得配电网的保护能够寻求更多的运行信息来改进自身的决策。为提升配电网保护的适应性以应对运行方式的变化,国内外的研究主要由两方面深入开展。

1) 研究差动保护方法在配电网中的应用。文献[7-8]研究了网络化电流差动保护在配电网中的应用;文献[9]则进一步提出了配电网中采用阻抗差动保护以降低差动保护的同步需求。纵联保护对采样数据的同步性能要求高,需要高可靠性的通信网络支撑,降低了其在配电网中的应用<sup>[10]</sup>。

2) 实时分析、提取配电网的运行状态实现对运行方式的跟踪,以达到对保护定值与动作策略的动态整定<sup>[11]</sup>。文献[12]提取网络设备的连接关系、开关的变位信息,从而实现基于配电网运行方式的在线跟踪的保护在线调整;文献[13-14]计及了运行过程中的电压信息,以电压关联因子的方式应对运行方式的差异。在运行方式跟踪的辅助下,实现了保护定值与配合方案的自动调整。拓扑分析是此类方法的重要实现手段,基于图论演算<sup>[7]</sup>、最小生成树法则<sup>[14]</sup>有效识别网络的联络点,进而实现自适应的自愈策略。已有的研究已经充分实现了配电网保护策略在运行方式在线跟踪的情况下的自适应寻优。

在当前网络拓扑与潮流状态下,基于运行方式跟踪的配电网保护给出了定值配置与出口策略的选择方法。这也意味着,在各种不同的故障条件下,保护

始终具有唯一的定值整定与出口策略<sup>[15]</sup>。因此,当前保护策略的自适应仅仅针对配电网运行方式的自适应,无法实现根据故障条件的变化改进保护的出口策略。事实上,在配电网保护单元给出故障的辨识结果(故障信息)的情况下,保护单元的出口策略可融合故障信息,来选择更为合理的保护出口时序、动作开关以及重合闸方案,以进一步提升保护策略的适应性。

为此,本文融合配电网运行方式与故障信息,提出配电网继电保护策略两级优化方法。首先,跟踪配电网的运行方式,实现保护故障辨识环节的定值整定;然后,在取得保护的故障辨识信息后,结合保护对故障分布的判断结果实现对出口决策环节的优化整定。针对出口决策环节的优化整定,本文结合故障信息给出故障网络拓扑、保护出口配合以及重合闸效益分析方法,进而实现在两级优化方法作用下的故障隔离策略、保护出口时序整定以及重合闸方案选择。在所述两级优化方法作用下,配电网保护应对不同运行方式使故障场景的灵活性与合理性得到有效提升。

## 1 运行方式与故障信息的融合与保护策略的两级优化方法

配电网复杂的运行工况以及高供电可靠性需求要求配电网保护充分提高其自适应能力。配电网保护的自适应,需要体现两方面的需求:①根据配电网运行方式的变化而自动调整故障辨识策略,实现故障辨识环节的优化;②根据配电网的故障条件选择最为快速、有效、合理的保护配合、开关动作以及重合闸措施等出口决策方法,实现出口决策环节的优化。从自适应保护的实际需求出发,构造保护策略两级优化方法,如图 1 所示。

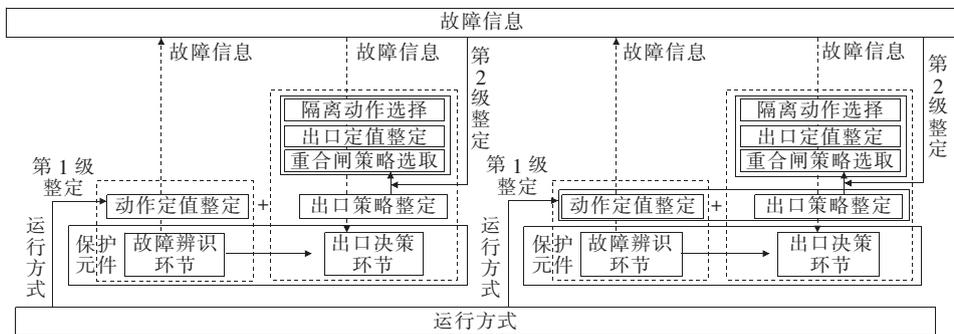


图 1 基于运行方式与故障信息融合的保护策略两级优化

Figure 1 Two-level optimization of protection strategy based on the operation mode and fault information integration

### 1.1 基于运行方式跟踪的保护动作定值整定

配电网保护为监测配电网的运行状态,需要与运行方式相匹配。具体而言,运行方式的改变对保护的故障辨识环节带来故障特征的变化,配电网保护需要跟踪运行方式实现对其自身动作定值的调整。现有研究就运行方式跟踪的自适应保护已给出许多解决方法,因此,本文的研究重点为融合故障信息的第2级优化。

### 1.2 融合故障信息的保护出口策略优化整定

运行方式跟踪能够满足保护对故障前网络拓扑与潮流的感知,根据第1级优化结果,保护各单元将得到固定的、预想的出口策略。事实上,运行方式仅仅确定了故障前网络的运行拓扑与潮流。实际故障点的不同将导致对于同一运行方式,故障网络拓扑、故障潮流分布也存在差异,这一差异反映到具体的出口策略上也将有所不同。换言之,故障的不确定性是基于运行方式跟踪的第1级保护预配置无法全面考虑的,因此给第2级优化带来了应用空间。

第2级优化保护故障辨识环节将开放保护的故障信息,利用通信网络获取不同保护单元的故障信息结果,推导故障分布情况,根据故障点的实际位置优化出口决策环节的决策逻辑。

1)尽可能地缩小故障停电范围。考虑到配电网断路器不能够得到完备配置,仅考虑第1级整定,只能通过断路器隔离故障元件,难以做到故障隔离范围的尽可能小。考虑故障信息的情况下可以确定故障点的分布,判断故障电流的组成,结合第2级优化整定以发挥负荷开关在故障隔离的作用。

2)尽可能快地保证故障的隔离。第1级整定认为保护、开关元件将按照出口时序进行动作,事实上,保护可能因为灵敏性因素或异常运行因素的存在而拒动。按照第1级整定的定值无法灵活实现时序的缩减。考虑故障信息的情况下可以确定需要配合的保护范围,压缩整体的保护出口时序,实现第2级优化。

3)尽可能实现复电选择的合理化。传统的保护认为,利用重合闸可以有效降低瞬时故障的影响,而城市电缆网络的建设降低了瞬时故障发生率,也降低了重合闸的效益。根据第2级优化整定可以结合故障位置的不同,判断重合闸是否具备更优的经济

效益,做出最合理的自愈选择。

## 2 基于运行方式与故障信息融合的故障隔离策略

### 2.1 故障网络拓扑提取与分析

故障网络拓扑的确定需要两方面的信息融合:①配电网故障前的拓扑连接关系,可以通过配电网开关的位置变位情况获得;②配电网的故障信息,配电网保护故障辨识环节将给出实时的故障分析结果用于确定故障点分布,由此,可形成配电网的故障网络拓扑。

从配电网的接线出发,获取配电网的接线方式,定义:若2个开关关联同一元件,则有开关距离 $L_0=1$ ;若2个开关未同时关联同一元件,则有 $L_0=\infty$ 。考虑配电网运行方式的变化,当开关由闭合状态调整为分闸状态时,则与此开关关联的开关距离 $L_0$ 将修正为 $\infty$ 。

1)利用Dijkstra算法(最小路径算法),结合配电网的接线情况 $L_0$ ,可以获得2个开关之间是否具有电气连接关系:当某一开关 $i$ 与某电源出口开关 $s$ 之间的Dijkstra距离 $L(i,s) \neq \infty$ 时,则说明此开关与该电源存在电气连接。

2)以主电源开关为参考点,确定开关之间的上下级关系,当 $L(i,s)=L(j,s)-L(i,j)$ 时,则 $i$ 为 $j$ 上游开关。用 $r(i|j)$ 表示开关的上下游情况,当 $r(i|j)=1$ 时,说明开关 $i$ 位于开关 $j$ 的上游,否则为0。

在取得保护故障辨识环节开放的故障信息的情况下,将故障信息表达为开关的上行方向上的故障判断结果向量 $\mathbf{P}^{\text{up}}$ 及下行方向上的故障判断结果向量 $\mathbf{P}^{\text{down}}$ ,元素 $P_i^{\text{up}}=1$ 说明开关 $i$ 所对应的保护上行方向上存在故障,元素 $P_i^{\text{down}}=1$ 说明开关 $i$ 所对应的保护下行方向上存在故障。根据故障判断结果向量,可判断开关是否关联故障元件,若

$$\begin{cases} P_f^{\text{up}} \cdot \prod_{j \neq f} (1 - P_j^{\text{up}} \cdot r(j|f)) = 1 \\ P_f^{\text{down}} \cdot \prod_{j \neq f} (1 - P_j^{\text{down}} \cdot r(f|j)) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

则可判断开关 $f$ 直接关联故障元件,即对开关 $f$ 而

言:当开关  $f$  检出上游发生故障 ( $P_f^{\text{up}} = 1$ ),且开关  $f$  的上游开关  $j$  均未检出故障 ( $P_j^{\text{up}} \cdot r(j|f) = 0$ ) 时,式(1)中的第 1 式成立,表示开关  $f$  直接与故障元件相关联;当开关  $f$  检出下游发生故障 ( $P_f^{\text{down}} = 1$ ),且开关  $f$  的下游开关  $j$  均未检出故障 ( $P_j^{\text{down}} \cdot r(f|j) = 0$ ) 时,式(1)中的第 2 式成立,表示开关  $f$  直接与故障元件相关联。

## 2.2 基于故障网络拓扑分析的故障隔离策略优化

故障隔离需要具体指导开关切断故障电流。配电网存在多种开关类型,包括断路器、负荷开关等,不同开关只能在特定的工况下工作。随着故障网络拓扑的不同,不同开关承受的短路电流也将不同。因此,在已知故障网络拓扑的条件下,可以根据开关承受的短路电流情况自适应取得配电网的故障隔离策略。一般情况下,均认为断路器具备故障隔离操作能力,而负荷开关能开断和关合正常负荷水平的电流。因此,开关是否能够参与故障隔离操作,主要针对负荷开关进行分析。

利用 Dijkstra 算法,分别取得任一开关与故障点之间的距离  $L(i, f)$  以及各电源与故障点之间的距离  $L(s, f)$ ,则故障点与指定电源之间串接的开关必需满足:

$$L(s, f) = L(i, s) + L(i, f) \quad (2)$$

当负荷开关不位于系统电源与同步机型的分布式电源之间时,负荷开关将被视为可参与故障隔离操作。将开关是否能够执行故障隔离操作作用统一的向量表示,简单记为  $\hat{S}$ ,当元素为 1 时,表示该开关可执行故障隔离操作,否则为 0。此时,意味着负荷开关在当前运行方式下可代替断路器执行故障隔离操作,从而缩小故障停电范围。

## 3 基于运行方式与故障信息融合的出口时序优化

### 3.1 保护出口配合范围的确定与分析

不同保护元件需要通过有效的时序加以配合,因此,需要确定参与时序配合的保护元件组成。参与保护时序配合的元件具备以下要素:

1) 保护本身是否能够给出故障指示。配电网保

护可能由于灵敏性能差异,不一定能够反映出实际故障的存在,此外,保护可能由于自身异常、退出等原因,无法给出故障判断结果,则此类保护单元不将执行出口。因此,在保护出口的时序配置中,可不考虑此类保护单元的影响。

2) 保护即使能够辨识故障的存在,保护关联的开关也应具备文 2.2 中所述故障隔离操作条件。一旦保护所关联的开关不具备故障隔离操作条件,保护同样不执行出口,同样在保护出口的时序配置中,移除此保护单元的影响。

保护能否给出故障指示以及开关能否参与故障隔离操作,可通过故障信息提取。以下行方向(正方向)元件的保护为例,参与时序配合的元件应满足:

$$A_i^{\text{down}} = P_i^{\text{down}} \cdot S_i \quad (3)$$

其中,  $P_i^{\text{down}}$  为向量  $\mathbf{P}^{\text{down}}$  内部元素,  $S_i$  为向量  $\hat{S}$  内部元素。当且仅当保护有效辨识故障  $P_i^{\text{down}} = 1$ ,且自身关联开关具备故障隔离操作能力  $S_i = 1$ ,保护将参与出口时序整定,即  $A_i^{\text{down}} = 1$ 。

### 3.2 基于出口配合分析的保护时序定值优化

从保护配合的角度来看,当某一保护单元未给出动作信号,即  $A_i = 0$  的情况出现时,意味着其他保护之间“距离”的缩短,则保护优化决策过程如下。

以下行方向的时序整定为例,有

$$T_i^{\text{down}} = \begin{cases} \infty, & A_i^{\text{down}} = 0 \\ \Delta t \cdot \sum_{L=1}^{L_{\max}} \left( \prod_{j(L=1)} (A_j^{\text{down}} \cdot r(i|j)) \right), & A_i^{\text{down}} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\prod_{j(L=1)} (A_j^{\text{down}} \cdot r(i|j))$  表示开关  $i$  距离为 1 的下游开关是否需要给出故障指示。

依次计算开关距离  $L=1$  到  $L_{\max}$  的开关是否给出故障指示,从而获得开关  $i$  的时序整定结果  $T_i^{\text{down}}$ 。考虑到配电网开环运行以及同时发生 2 点故障的情况较小,则式(4)可以进一步简化为

$$T_i^{\text{down}} = \begin{cases} \infty, & A_i^{\text{down}} = 0 \\ \Delta t \cdot \sum_{L=1}^{L_{\max}} \left( \sum_{j(L=1)} (A_j^{\text{down}} \cdot r(i|j)) \right), & A_i^{\text{down}} = 1 \end{cases} \quad (5)$$

即对开关  $i$  而言:当其检测到故障发生时,开关  $i$  的

时序定值将根据下游保护的在线情况与动作结果进行优化。从开关距离为 1 开始,确定以此开关距离的所有保护中是否产生动作信号,如产生则增加一个阶级的动作时间,并以此类推,直至开关距离最大为止。

当某一开关距离的下游保护均未给出动作指示时,相应的  $\sum_{j(L=1)} (A_j^{\text{down}} \cdot r(i|j))$  将没有动作结果输出,从而在时序上可以减掉相应的动作延迟,从而在时序上保证了保护的配合优化。

## 4 基于运行方式与故障信息融合的重合闸策略

### 4.1 重合闸效益分析

重合闸有效避免了瞬时故障造成的长时间停电现象,但却拖慢了永久故障情况下的复电进程。当故障发生在不同的元件上,是否采取重合闸对整体的复电效益影响也将不同,而复电效益实质上与配电网所处的运行方式与故障点分布有关。

融合运行方式与故障点分布的重合闸效益分析如下。

1) 维持正常供电的负荷计算。当元件  $x$  故障切除后,能够有效维持正常供电的负荷为

$$\Delta I_{\text{maintain}} = I_s^{\text{LD\_down}} - I_{b_s}^{\text{LD\_down}} + \sum_{b_k} I_{b_k}^{\text{LD\_down}} \quad (6)$$

式中  $I_s^{\text{LD\_down}}$  为系统所接的所有负荷;  $I_{b_s}^{\text{LD\_down}}$  为主电源跳闸操作脱离的负荷;  $\sum_{b_k} I_{b_k}^{\text{LD\_down}}$  为能够在故障过程中始终维持供电的负荷量。

2) 具备转供条件的负荷计算。当故障点被有效隔离后,此时,可通过主系统恢复供电的负荷为

$$\Delta I_{\text{recover}}^{\text{up}} = I_s^{\text{LD\_down}} - I_{f_{\text{up}}}^{\text{LD\_down}} \quad (7)$$

式(7)表明,依靠主系统实现恢复供电的负荷,可根据主电源所带负荷总数与故障元件关联的上游开关  $f^{\text{up}}$  所带负荷大小相减取得,即此时除故障元件下游外,系统其余负荷均可通过主电源恢复供电。

当计算通过联络开关  $s'$  恢复的负荷,首先判断联络开关是否位于主电源与故障元件关联的上游开关之间,即  $L(s', s) = \infty$  时,下游各分支无法通过联络开关  $s'$  取得供电恢复。否则,判断故障元件关联

的下游开关  $f^{\text{down}}$  是否与联络开关  $s'$  之间存在通路,若存在通路,则下游开关  $f^{\text{down}}$  可以通过联络开关  $s'$  取得供电恢复,否则不能。

$$\Delta I_{\text{recover}}^{\text{down}} = \begin{cases} I_{f_{\text{down}}}^{\text{LD\_down}}, & \text{if } L(s', f^{\text{down}}) \neq \infty \\ 0, & \text{if } L(s', f^{\text{down}}) = \infty \end{cases} \quad (8)$$

因此,总的具备转供条件的负荷为

$$\Delta I_{\text{recover}} = \Delta I_{\text{recover}}^{\text{up}} + \Delta I_{\text{recover}}^{\text{down}} \quad (9)$$

### 4.2 基于效益分析的重合闸选择

是否采用重合闸策略将对复电效果产生明显差异。记故障切除时刻起至重合闸完成时所经时长为  $\Delta T_1$ ;若重合闸失败,线路完成转供的时长为  $\Delta T_2$ ,线路检修时长为  $\Delta T_3$ 。此外,考虑元件  $k$  发生瞬时故障的概率为  $1 - a\%$ ,用负荷损失时长衡量复电效益。

1) 采取重合闸策略下的复电效益。

$$\begin{aligned} H_y &= (I_s^{\text{LD\_down}} - \Delta I_{\text{maintain}}) \cdot \\ &\Delta T_1 \cdot (1 - a\%) + (\Delta I_{\text{recover}} - \Delta I_{\text{maintain}}) \cdot \\ &\Delta T_2 \cdot a\% + (I_s^{\text{LD\_down}} - \Delta I_{\text{recover}}) \cdot \Delta T_3 \cdot a\% \end{aligned} \quad (10)$$

其中,第 1 项表示重合成功情况下的负荷损失时长;第 2 项表示重合失败情况下可转供的负荷损失时长;第 3 项表示不可转供负荷损失时长。

2) 不采取重合闸策略下的复电效益。故障切除后线路直接进行重构策略,造成的负荷损失为

$$\begin{aligned} H_n &= (\Delta I_{\text{recover}} - \Delta I_{\text{maintain}}) \cdot \\ &(\Delta T_2 - \Delta T_1) + (I_s^{\text{LD\_down}} - \Delta I_{\text{recover}}) \cdot \Delta T_3 \end{aligned} \quad (11)$$

其中,第 1 项表示可转供的负荷损失时长;第 2 项表示不可转供负荷损失时长。因此,复电方式是否考虑进行重合闸,可通过判断  $H_y$  与  $H_n$  的大小关系决定。从而实现复电效益的最大化。

## 5 算例分析

为了保证算例分析的有效性和一般性,本文挑选典型的配电网系统作为研究对象,如图 2 所示,基于 PSCAD/EMTDC 平台对配电系统进行仿真分析,研究两级优化方法对保护策略的优化作用。其中各负荷元件的额定电流设置:  $I_D^{\text{LD}} = 20$ 、 $I_L^{\text{LD}} = 30$ 、 $I_H^{\text{LD}} = 20$  A。分布式电源 K 为同步机型分布式电源, F、J 为逆变型分布式电源。

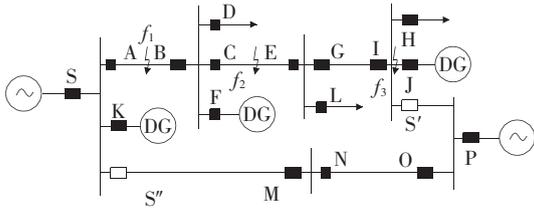


图 2 算例分析

Figure 2 Case study

5.1 故障隔离策略分析与验证

根据图 2 仿真算例的配置参数,形成初始化的开关距离,如:  $L(S, A) = 1, L(S, S') = 1, L(S, B) = \infty$ 。其他开关距离可以此类推。考虑当前运行方式,对初始化的开关距离的表示结果进行修正,则其中  $L(S, S'') = \infty$ 。

假设故障发生在  $f_1$  上,实时仿真给出的保护故障辨识结果,即故障信息为

$$P^{down} = \begin{matrix} & A & B & C & D & E & F & G & H & I & J & K & L & S \\ [1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{matrix}$$

$$P^{up} = \begin{matrix} & A & B & C & D & E & F & G & H & I & J & K & L & S \\ [0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

由式(1)可知,故障点位于 A、B 之间,进而分析各开关与故障点及各电源之间的位置关系。

对于开关 A 有

$$L(S, A) = L(S, A) + L(A, A)$$

$$L(K, A) = L(K, A) + L(A, A)$$

因此,开关 A 在故障点、系统电源 S 及同步机型分布式电源 K 之间,开关 A 在此故障情况下不能参与故障隔离操作。

对于开关 C 有

$$L(S, A) < L(S, C) + L(C, A)$$

$$L(K, A) < L(K, C) + L(C, A)$$

因此,开关 C 不在故障点、系统电源 S 及同步机型分布式电源 K 之间,开关 S 在此故障情况下可参与故障隔离操作。

因此,在  $f_1$  故障的情况下,能够参与故障隔离操作的开关组合如下:

$$\hat{S} = \begin{matrix} & A & B & C & D & E & F & G & H & I & J & K & L & S \\ [0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{matrix}$$

可见,由故障网络拓扑的分析,部分负荷开关可以被当成断路器执行故障隔离操作,提供了有效的故障切除优化方法。

假设故障点发生在  $f_2$  上,能够参与故障隔离操作的开关组合如下:

$$\hat{S} = \begin{matrix} & A & B & C & D & E & F & G & H & I & J & K & L & S \\ [0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{matrix}$$

由于故障点的改变,开关 C 背侧连接系统电源,因此不再能够执行故障隔离操作,意味着只能通过断路器 B 实现故障  $f_2$  的切除。由此 2 组案例比较,可以说明融合运行方式与故障信息对保护策略的改进作用。

为了进一步分析不同类型分布式电源接入位置情况下算法的灵活性,本文变换同步机型分布式电源(TDG)和逆变型分布式电源(NDG)位置,如图 3 所示,其中 K、F、J、Q、R、S 虚线部分为不同类型分布式电源可能接入位置。在  $f_1, f_2$  和  $f_3$  等不同故障点故障时,参与故障隔离操作的开关组合情况如表 1 所示。

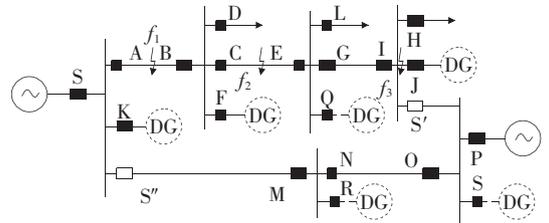


图 3 不同分布式电源接入情况

Figure 3 Access situation to different distributed power sources

表 1 不同接入情况下参与隔离操作的开关组合

Table 1 Switch combinations involved in the isolation operation under different access conditions

DG 接入位置		故障时开关组合		
TDG	NDG	$f_1$	$f_2$	$f_3$
K	F, J	S, K, B	B, F, E	I, J
K	Q, J	S, K, B	B, E	I, J
J	F, K	S, K, B	B, F, G	I, J
J	Q, K	S, K, B	B, G, Q	I, J
J, K	F, Q	S, K, B	B, F, G, Q	I, J

5.2 保护出口时序动态优化

在文 5.1 中的故障网络拓扑分析基础上,分析保护的出口时序配合范围。当故障发生在  $f_1$  上时,对于下行方向的保护时序定值,参考保护的动作用输出  $P^{down}$ ,有开关 A、K、S 需进行时序整定。进一步考虑开关是否具备故障隔离操作条件  $\hat{S}$ ,则开关 A 被排除在时序配合范围外。综合以上考虑,针对  $f_1$  处故障,下行方向上只需要完成开关 S 与 K 的

时序整定,即开关 S、K 将在  $\Delta t$  的时间内快速动作。

对于上行方向的保护定值时序,参考保护动作输出  $\mathbf{P}^{\text{up}}$ ,由开关 B、C、E 给出故障判断结果。进一步考虑开关是否具备故障隔离操作条件  $\hat{S}$ ,由于开关 B、C、E 均具备条件,上行方向上的保护动作时序定值将由此 3 个开关共同决定,而不需要计及其他开关的配合关系。

因此,根据故障时下行和上行的保护定值的分析,保护的时序定值结果为

$$\mathbf{T} =$$

$$[\infty \quad \Delta t \quad 2\Delta t \quad \infty \quad 3\Delta t \quad \infty \quad \Delta t \quad \Delta t]$$

从保护定值的时序定值结果可知,保护的動作时序不再需要考虑线路全长的各级保护单元,保护动作时序可以得到尽可能大的缩小,与此同时,还兼顾了开关的动作特性。

### 5.3 重合闸的效益判断

假设重合闸时间为  $\Delta T_1 = 2 \text{ s}$ ,转供完成时间为  $\Delta T_2 = 60 \text{ s}$ ,检修时长为  $\Delta T_3 = 5\,400 \text{ s}$ ,瞬时故障发生概率为 2%。当故障位于  $f_2$  处,故障发生时将动作于开关 B、F、E,如不采取重合闸措施或重合闸失败,则动作开关 C、E 将故障隔离,并合上开关 B、S' 恢复系统供电。因此,当故障发生在  $f_2$  时,可以预先计算出

$$\Delta I_{\text{maintain}} = I_{\text{S}}^{\text{LD\_down}} - I_{\text{B}}^{\text{LD\_down}} + I_{\text{E}}^{\text{LD\_down}} = I_{\text{H}}^{\text{LD}} + I_{\text{L}}^{\text{LD}}$$

$$\Delta I_{\text{recover}} = \Delta I_{\text{recover}}^{\text{up}} + \Delta I_{\text{recover}}^{\text{down}} = I_{\text{D}}^{\text{LD}} + I_{\text{L}}^{\text{LD}} + I_{\text{H}}^{\text{LD}}$$

分析采取重合闸策略将造成负荷损失时长达到  $H_y = 1\,176.8 \text{ A} \cdot \text{s}$ ;不采取重合闸策略将造成负荷损失时长达到  $H_n = 1\,160 \text{ A} \cdot \text{s}$ 。因此,当故障发生在  $f_2$  处时,可以判断不采取重合闸策略将得到更好的复电效益。

当故障位于  $f_3$  处,故障发生时将首先动作于断路器 I、J。因此,当故障发生在  $f_3$  时,可以预先计算出:

$$\Delta I_{\text{maintain}} = I_{\text{S}}^{\text{LD\_down}} - I_{\text{I}}^{\text{LD\_down}} = I_{\text{D}}^{\text{LD}} + I_{\text{L}}^{\text{LD}}$$

$$\Delta I_{\text{recover}} = \Delta I_{\text{recover}}^{\text{up}} + \Delta I_{\text{recover}}^{\text{down}} = I_{\text{D}}^{\text{LD}} + I_{\text{L}}^{\text{LD}}$$

分析采取重合闸策略将造成负荷损失时长达到  $H_y = 105\,840.8 \text{ A} \cdot \text{s}$ ;不采取重合闸策略将造成负荷损失时长达到  $H_n = 108\,000 \text{ A} \cdot \text{s}$ 。因此,故障发生在  $f_3$  时,可以判断采取重合闸策略将得到更好的

复电效益。

从不同故障情况下负荷损失结果的分析可以看出,不同故障点分布将得到不同的重合闸选择,这意味着融合故障信息可以避免重合闸选择的盲目性,取得更好的保护效果。

## 6 结语

为充分发挥运行方式与故障信息在配电网继电保护策略中的优化作用,本文设计了继电保护策略两级优化方法。首先,基于运行方式实现保护故障辨识环节的动作定值整定,以取得故障辨识信息;然后,根据故障信息实现出口决策环节的优化整定。在所述分析方法的辅助下,配电网保护能够取得以下效果:

- 1) 配电网保护能够基于故障网络拓扑分析,判断开关与故障点及电源的串联关系,兼顾负荷开关动作能力获得合理的故障隔离策略;
- 2) 配电网保护能够根据保护出口配合分析,缩小保护的配合范围,进而缩小保护的出口时限;
- 3) 配电网保护能够根据不同故障点的重合闸效益分析,给出是否采取重合闸以获得更好的保护效果。

### 参考文献:

- [1] 杨亘焯,孙荣富,丁然,等. 计及光伏多状态调节能力的配电网多时间尺度电压优化[J]. 中国电力,2022,55(3):105-114.  
YANG Genye, SUN Rongfu, DING Ran, et al. multi time scale reactive power and voltage optimization of distribution network considering photovoltaic multi state regulation capability[J]. Electric Power, 2022, 55(3):105-114.
- [2] 王珊珊,吕飞鹏,张国星. 含分布式电源多点接入的配电网新型纵联保护[J]. 电测与仪表,2020,57(4):49-54.  
WANG Shanshan, LV Feipeng, ZHANG Guoxing. New longitudinal protection of distribution network with multi-point access of distributed generation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(4):49-54.
- [3] 喻恒凝,黄力,张思东,等. 分布式光伏和电动汽车接入

- 对配电网网损和电压偏移影响的分析研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(1): 28-34.
- YU Hengning, HUANG Li, ZHANG Sidong, et al. Effects of distributed photovoltaic generation and electric vehicle integrating into distribution network on line loss and voltage drift[J]. Smart Power, 2020, 48(1): 28-34.
- [4] 于洋, 王同文, 谢民, 等. 基于 5G 组网的智能分布式配电网保护研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 16-23.
- YU Yang, WANG Tongwen, XIE Min, et al. Research and application of intelligent distributed distribution network protection based on a 5G network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 16-23.
- [5] 张丽虹, 常成, 熊炜, 等. 基于智能控制终端的主动配电网故障处理方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 22-29.
- ZHANG Lihong, CHANG Cheng, XIONG Wei, et al. Fault handling method of active distribution network based on intelligent control terminal[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 22-29.
- [6] 谢林枫, 王红星, 刘军成, 等. 基于电能质量约束的智能配电网分布式电源消纳能力研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(4): 41-47.
- XIE Linfeng, WANG Hongxing, LIU Juncheng, et al. A study on the distributed generation accommodation capacity of the smart distribution network based on power quality constraints[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(4): 41-47.
- [7] 李振兴, 望周丽, 刘颖彤, 等. 基于整形变换降容的电流差动保护原理与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 77-85.
- LI Zhenxing, WANG Zhouli, LIU Yingtong, et al. Principle and realization of current differential protection based on shaping transformation and capacity reduction [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 77-85.
- [8] 黄昱翰, 蔡泽祥, 潘天亮, 等. 面向闭环运行配电网的广域保护控制方案[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 47-52.
- HUANG Yuhan, CAI Zexiang, PAN Tianliang, et al. Research on wide area protection and control scheme for closed-loop distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 47-52.
- [9] 唐成达. 含逆变型分布式电源的配电网线路保护研究[D]. 成都: 西华大学, 2019.
- [10] HABIB H F, FAWZY N, ESFAHANI M M, et al. An enhancement of protection strategy for distribution network using the communication protocols[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 1240-1249.
- [11] SHEN S F, WANG H F, JIANG K, et al. Regional area protection scheme for modern distribution system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5416-5426.
- [12] 沈绍斐. 基于就地和区域信息的自适应保护研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [13] 马静. 基于保护动作信号的配电网区域保护方案[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 34-41.
- MA Jing. Regional protection scheme of distribution network based on operating signal of protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 34-41.
- [14] 金能, 梁宇, 邢家维, 等. 提升配电网线路保护可靠性的远方保护及其与就地保护优化配合方案研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(24): 5221-5233.
- JIN Neng, LIANG Yu, XING Jiawei, et al. Research on remote protection and the optimized coordination-scheme of local-remote protection to enhance the protection reliability of the line in distribution network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(24): 5221-5233.
- [15] 丛伟, 盛亚如, 咸国富, 等. 基于智能配电终端的分布式供电恢复方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 77-85.
- CONG Wei, SHENG Yaru, XIAN Guofu, et al. Distributed power service restoration method based on smart terminal unit [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 77-85.