

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200595

自适应配电网拓扑与开关配置的智能分布式保护方法

林志超

(广东电网有限责任公司惠州供电局, 广东 惠州 516000)

摘要: 分布式保护是配电网保护重要选择, 然而当前的分布式保护由于缺乏配电网整体的运行信息以及配置信息, 难以实现适应于拓扑变化与设备运行状态变化下的精准快速的保护策略调整。为此, 提出一种适应于不同开关设备配置条件的智能分布式保护方法, 借助差异化的动作时序整定, 实现配电网保护智能决策。为实现自适应的时序整定, 通过在线的拓扑分析掌握运行动态, 并进一步地根据开关之间的配合需求定义开关的时序距离, 通过对最大时序距离的计算获得满足时序配合条件的动作时序定值。算例表明所提方法能够正确应对各种故障场景, 能够在配电网中进行推广应用。

关键词: 配电网; 拓扑自适应; 配置自适应; 分布式保护

Intelligent-distributed distribution network protection strategy for self-adaptive topology and different switch configurations

LIN Zhichao

(Huizhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Huizhou 516000, China)

Abstract: Distributed protection is an important choice for distribution network protection. However, because of the lack of overall operational information and configuration information of a distribution network, it is difficult to achieve accurate and rapid protection strategy adjustment for current distributed protection under the changes of topology and equipment operational status. Therefore, this paper proposes an intelligent distributed protection strategy which is suitable for different configuration conditions of switches. With the help of timing settings, intelligent decision-making of distribution network protection is realized. In order to realize the self-adaptive timing settings, we examine the dynamic operating status through online topology analysis, and further define the timing distance according to the operational order requirements between the switches, and obtain the timing setting value satisfying the requirements by calculating the maximum timing distance. The simulation results show that the proposed method can correctly deal with various fault scenarios, and show great prospect for application in a distribution network.

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. 031300KK52180108).

Key words: distribution network; topology adaptation; configuration adaptation; distributed protection

0 引言

配电网网络接线日益复杂以及运行方式的频繁变动给配电网保护提出新的挑战^[1-3]。配电网保护与控制技术需要适应配电网的发展, 传统的配电网保护与控制配置方法依赖于静态的网络拓扑和固定的运行方式, 未能有效适应配电网复杂多变的新特点^[4-6]。

配电网的新变革需要新的配电网保护及控制理论及方法提供支撑, 现阶段大部分研究倾向于实现网络化的配电网保护与控制^[7-8]。国内外专家学者提出基于实时通信的故障定位与供电恢复技术, 提升了配电网保护及控制的适应能力。文献[9]基于广义节点的概念, 形成配电网集中式差动保护方法, 文献[10]借助网络化的通信手段, 实现了集中式分层化的主保护和后备保护方法。然而, 基于实时通信的配电网保护与控制方法^[11-12], 易受信息失效的影响以及信息安全的干扰^[13-18]。配电网仍然需要坚强

基金项目: 南方电网有限责任公司科技项目资助(031300KK52180108)

可靠的就地保护方案提供高可靠的后备运行保障,如何实现智能化的就地保护同样需要得到关注^[19-20]。就地保护由于缺乏通信交互机制,只能通过时序整定的方法实现保护配合,如何实现智能化的时序整定是就地化保护性能提升的关键。与此同时,考虑到配电网的保护与控制受限于投资与环境因素,现阶段大部分配电网仍采取由断路器开断故障短路电流,并由分段开关隔离故障的故障处理方法^[21-23],复杂的开关配置条件,给配电网就地保护的动态时序整定带来困难^[24-25]。

为形成面向拓扑与配置自适应的配电网就地保护及控制方法,妥善解决当前就地保护动态时序配合困难的问题^[26-27]。本文根据配电网开关配置的差异,依托于在线更新的网络拓扑,设计智能分布式保护方法。为实现智能分布式保护时序定值的自适应整定,本文借助于拓扑分析计算,形成开关元件之间的时序距离描述,通过对最大时序距离的计算,保障开关元件的时序配合关系。本文所提方法不依赖于实时的通信手段,只需要在线的拓扑分析,在实现拓扑与配置自适应的同时,减少了对网络的依赖。本文所提方法在 PSCAD/EMTDC 平台上进行验证,算例结果表明所提方法能够正确应对各种故障场景,值得在实际配电网中应用与推广。

1 基于时序特征的智能分布式配电网保护

智能分布式配电网保护提供了不依赖于实时通信网络的配电网保护及供电恢复处理方法^[28-29]。依靠开关的时序配合保证故障切除与供电恢复的选择,考虑到配电网开关配置条件的差异,制定基于时序特征的保护方法。

1.1 智能分布式配电网保护故障定位原理

智能分布式配电网保护根据开关类型差异独立工作,不依赖于其他单元动作判断,其工作逻辑主要依靠电流判断与时序判断实现配合。需要说明的是为实现分布式配电网保护的智能化,分布式保护的时序定值是根据配电网当前的网络拓扑进行在线整定,保证时序定值对运行方式的跟踪。

在时序配置实现智能分布式保护方法中,通过断路器的跳闸时序,进行故障区段定位;通过分段开关的合闸时序,实现故障元件确定。

1) 故障区段定位

为实现有选择性地切除故障元件,需要首先完成故障区段的定位,并实现该区段断路器切除故障以及分段开关解列等待复电操作^[30-31]。故障区段的定位原理依赖于断路器跳闸时序的整定,不同断路器遵循阶梯级的跳闸时序的整定信息,实现对故障

区段的感知,而不依赖于故障信号的交互,降低对实时通信系统的依赖。

假设故障出现时刻为 T_0 ,当断路器或分段开关检测到故障发生,断路器与分段开关的计时器开始工作:当断路器 i 计时 T^{CBi} 及电流特征 I^{CBi} 满足式(1),则断路器 i 判断故障位于其下游区段,由此断路器 i 执行故障切除操作。 $T_{set_trip}^{CBi}$ 的设置需要区分不同区段,将在下文进行陈述。同样的,分段开关 j 则判断故障电流消失时间 T_e^{Sij} ,当满足式(2),则分段开关可以将故障定位在断路器 i 的下游。需要说明的是,当分段开关 j 位于断路器 $i-1$ 与断路器 i 之间,而在此之前,分段开关 j 感知到故障电流存在时,则开关 j 进行解列操作。

$$\begin{cases} T^{CBi} - T_0 > T_{set_trip}^{CBi} \\ I_0^{CBi} > I_{set_trip}^{CBi} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} T_e^{Sij} - T_0 > T_{set_trip}^{CBi} \\ T_e^{Sij} - T_0 < T_{set_trip}^{CBi+1} \\ I_0^{Sij} > I_{set_trip}^{Sij} \end{cases} \quad (2)$$

由此,根据给定的配电网断路器动作时序信息以及自身对故障时刻、故障电流的感知结果,可实现对故障区段的定位:只有邻近故障点上游的断路器以及该断路器与故障点之间的分段开关,将进行跳闸操作,并且保证分段开关的动作时间在断路器动作时间之后。

2) 故障元件确定

依照断路器的跳闸时序定值,只能将故障点划归为不同的故障区段,为实现故障点的精准定位,可依靠分段开关的合闸时序完成故障点的排查。

通过断路器、分段开关的按照上下游关系依次重合,当故障元件上游开关合闸于故障点,合闸瞬间将检测到故障电流重现,从而可通过故障电流出现的时间,确定故障发生点。

假定故障消失时刻为 T_e 、当分段开关检测故障电流再次出现的时间 T_r^{Sij} 满足式(3),说明故障点位于分段开关 j 下游,从而实现故障点的精准定位。当发现故障位于分段开关 j 下游,分段开关 j 将在故障电流再次消失之后迅速打开,并不再闭合。

$$\begin{cases} T_r^{Sij} - T_e > T_{set_close}^{Sij} \\ T_r^{Sij} - T_e < T_{set_close}^{Si,j+1} \\ I_r^{Sij} > I_{set_trip}^{Sij} \end{cases} \quad (3)$$

1.2 智能分布式网络化保护时序整定说明

智能分布式网络化保护需要为断路器与分段开关都赋予时序定值,来实现对故障点精准定位。智

能分布式网络化保护的时序定值配合图如图 1 所示。为实现故障点的定位以及智能分布式配电网保护与供电自愈操作，需要开关元件配置四组基本的时序定值：包括断路器跳闸时序 $T_{set_trip}^{CBi}$ 、分段开关跳闸时序 $T_{set_trip}^{Si,j}$ 、断路器合闸时序 $T_{set_close}^{CBi}$ 、分段开关合闸时序 $T_{set_close}^{Si,j}$ 。

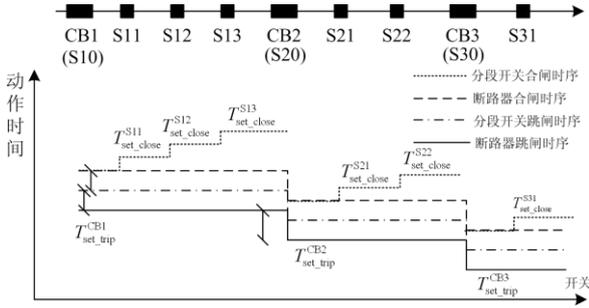


图 1 时序整定说明

Fig. 1 Description of timing settings

其中分段开关跳闸时序 $T_{set_trip}^{Si,j}$ 、断路器合闸时序 $T_{set_close}^{CBi}$ ，可按照断路器跳闸时序 $T_{set_trip}^{CBi}$ 进行整定，因此，时序整定主要考虑 $T_{set_trip}^{CBi}$ 、 $T_{set_trip}^{Si,j}$ 两个层面。时序之间需要满足下列两项配合逻辑。

1) 不同开关之间的动作时序配合，即横向时序配合，促使保护能够精确定位到故障点位置。如图所示，主要包括上游断路器比下游断路器高一个动作时间等级；下游开关比上游开关高一个重合时间等级。即

$$\begin{cases} T_{set_trip}^{CBi} - T_{set_trip}^{CBi+1} > \Delta t_1 \\ T_{set_close}^{Si,j+1} - T_{set_close}^{Si,j} > \Delta t_2 \end{cases} \quad (4)$$

横向时序配合根据网络拓扑与实际的开关设备配置关系动态调整。需要说明的是，重合时序等级的相互配合只需围绕两组断路器所围成的最小区域内展开，从而缩减配电网整体的复电时间。

2) 同一开关的不同动作时序配合，即纵向时序配合。纵向时序配合的严格执行，即

$$T_{set_close}^{Si,0} - T_{set_trip}^{CBi} > \Delta t_3 \quad (5)$$

其中， Δt_3 计及了分段开关解列、断路器重合闸到分段开关重合的过程时长，此外，考虑到跳闸后开关绝缘强度恢复时间需要， Δt_3 还需要计及绝缘强度恢复时间需求，因此， Δt_3 按不低于 1 s 进行设置。

2 计及拓扑与配置变化的自适应时序整定

考虑到配电网运行方式的实时变化，以及在配

电网升级改造过程中设备配置的调整，时序整定需要得到在线更新，因此，采用拓扑描述以及定值自适应修改的方法，实现智能分布式保护方法。

2.1 基于在线拓扑的开关关联描述

根据在线获取的开关状态，建立开关的邻接关系，用矩阵 C 进行表示：其中，开关 i 与 j 关联，其元素取值为 1；否则为 0。分布式各保护单元，根据拓扑的描述信息，进行广度优先生成树搜索建立开关的上下游关系，流程如下。

1) 从馈线出口开关 i 开始访问，在广度优先遍历中，将每次纵深访问的开关记录下来，形成广度优先生成树。形成辅助矩阵 T 表示广度优先生成树，初值可表示为

$$T^{(1)} = [0 \ \cdots \ 0 \ 1 \ 0 \ \cdots \ 0]^T \quad (i)$$

2) 从开关 i 出发，访问开关 i 的各个未曾访问的邻接开关 j_1, j_2, \dots, j_k 。

$$T^{(2)} = [T^{(1)} \ | \ ((P_{1 \times 1}^{(2)} T^{(1)} C) - P_{1 \times 1}^{(2)} T^{(1)})] \quad (6)$$

其中， $P_{1 \times 1}^{(2)} = [1]$ 。

3) 然后，依次从开关 j_1, j_2, \dots, j_k 出发，访问各自未被访问的邻接开关。

$$T^{(n+1)} = [T^{(n)} \ | \ ((P_{n \times 1}^{(n+1)} T^{(n)} C) - P_{n \times 1}^{(n+1)} T^{(n)})] \quad (7)$$

其中， $P_{n \times 1}^{(n+1)} = [0 \ \cdots \ 0 \ 1]^T$

从广度优先生成树 $T^{(n+1)}$ 中，可以确定开关之间的上下游关系，即位于第 a 行的开关，其在当前拓扑下，是 $b (b > a)$ 行元素的上游开关。由此可以形成实时的有向邻接矩阵 C' ，与邻接矩阵 C 相比，当开关 i 与 j 相邻，且开关 i 在 j 上游，才有 C' 中关联元素取值为 1。从有向邻接矩阵模型可以直观地看出开关上下游的组成关系。

当配电系统中存在不同的馈线时，需要对不同的馈线依次执行上述步骤 1) 到 3)，从而获得不同馈线的广度优先生成树，即上下游配合关系。需要说明的是，当存在高渗透率分布式电源接入时，以该分布式电源接入点为起始点，同样进行广度优先生成树分析。获取表达分布式电源电流传输路径的上下游配合关系。特别注意的是，此时的上下游关系不再是单一层面的，在不同的电流路径中，上下游关系可能相反。在含高渗透率分布式电源配电网中，需要电压信息作为判断故障电流方向的依据^[32]。

2.2 开关时序距离定义

开关上下游关系交代了开关之间如何关联，为将开关的连接关系，转换成时序配合关系，需要定义不同开关之间的时序距离。

1) 开关反向时序距离

定义开关 i 与该开关下游开关 k 之间的反向时

- WANG Zengping, YANG Guosheng, WANG Zhijie, et al. Relay protection-related domestic and foreign standards for interconnecting distributed resources with electric power systems[J]. *Electric Power*, 2019, 52(8): 112-119.
- [4] 许偲轩, 陆于平. 适用于含分布式电源配电网的纵联保护方案[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(9): 113-118.
XU Sixuan, LU Yuping. A pilot protection method for distribution network with distributed generators[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(9): 113-118.
- [5] 贾健飞, 李博通, 孔祥平, 等. 计及逆变型分布式电源输出特性的配电网自适应电流保护研究[J]. *高压电器*, 2019, 55(2): 149-155.
JIA Jianfei, LI Botong, KONG Xiangping, et al. Research on adaptive current protection for distribution network considering the output characteristics of inverter-interfaced distributed generator[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(2): 149-155.
- [6] 司新跃, 陈青, 高湛军, 等. 基于电流相角突变量方向的有源配电网保护[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(11): 97-103.
SI Xinyue, CHEN Qing, GAO Zhanjun, et al. Protection scheme for active distribution system based on directions of current phase angle variation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(11): 97-103.
- [7] CAI Yu, CAI Zexiang, LIU Ping, et al. Communication-assisted protection and self-healing control scheme for distribution networks based on IEC 61850[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 72169-72178.
- [8] 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.
- [9] 赵庆周. 含分布式电源的配电网新型保护方案研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
ZHAO Qingzhou. Research on novel protection scheme for distribution network with DG[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [10] 陈晓龙, 李永丽, 谭会征, 等. 含逆变型分布式电源的配电网自适应正序电流速断保护[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(9): 107-112.
CHEN Xiaolong, LI Yongli, TAN Huizheng, et al. An adaptive instantaneous trip protection based on positive sequence current for distribution network with IBDG[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(9): 107-112.
- [11] 姜惠兰, 钱广超, 范中林, 等. 考虑负荷控制的有源配电网故障恢复策略[J]. *中国电力*, 2017, 50(3): 101-106.
JIANG Huilan, QIAN Guangchao, FAN Zhonglin, et al. A service restoration strategy considering influence of load management for distribution system with DG[J]. *Electric Power*, 2017, 50(3): 101-106.
- [12] 程杉, 倪凯旋, 苏高参, 等. 基于 DAPSO 算法的含分布式电源的配电网重构[J]. *高压电器*, 2019, 55(7): 195-202.
CHENG Shan, NI Kaixuan, SU Gaocan, et al. Reconfiguration of distribution network with distributed generations based on DAPSO algorithm[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(7): 195-202.
- [13] 张安龙, 李艳, 黄福全, 等. 基于动态拓扑分析的配电网自适应保护与自愈控制方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(11): 111-117.
ZHANG Anlong, LI Yan, HUANG Fuquan, et al. Adaptive protection and self-healing control method of distribution network based on dynamic topology analysis[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(11): 111-117.
- [14] 翟学, 林涛, 吴俊鹏, 等. 含光伏电站的电网自适应接地距离保护研究[J]. *中国电力*, 2016, 48(2): 78-83.
ZHAI Xue, LIN Tao, WU Junpeng, et al. Adaptive ground distance of power grid with photovoltaic plant[J]. *Electric Power*, 2016, 48(2): 78-83.
- [15] 丛伟, 房凡秀, 史方芳, 等. 智能配电网分布式区域纵联保护关联域的在线确定方法[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(12): 67-73, 111.
CONG Wei, FANG Fanxiu, SHI Fangfang, et al. Bus-bar protection scheme based on correlation of coefficients of sampled current values[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(12): 67-73, 111.
- [16] 马帅, 武志刚, 高厚磊, 等. 适配高渗透率 DG 接入配电网的幅值比较式保护[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(4): 43-50.
MA Shuai, WU Zhigang, GAO Houlei, et al. Amplitude comparison protection for distribution network with high permeability distributed generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(4): 43-50.
- [17] 杨晶晶, 林凡勤, 周成瀚, 等. 含分布式电源的馈线电流序分量比较式保护[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(15): 116-123.
YANG Jingjing, LIN Fanqin, ZHOU Chenghan, et al. Comparison protection method of current sequence components for feeder with distributed generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(15): 116-123.
- [18] 李晓, 李满礼, 倪明. 配电信息物理系统分析与控制研究综述[J]. *中国电力*, 2020, 53(1): 11-21.

- LI Xiao, LI Manli, NI Ming. A review of analysis and control of cyber physical distribution system[J]. Electric Power, 2020, 53(1): 11-21.
- [19] 张兆云, 陈卫, 张哲, 等. 一种广域差动保护实现方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 297-303.
ZHANG Zhaoyun, CHEN Wei, ZHANG Zhe, et al. A method of wide-area differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 297-303.
- [20] 张惠智, 李永丽. 光伏电源接入的配电网短路电流分析及电流保护整定方案[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 327-332.
ZHANG Huizhi, LI Yongli. Short circuit current analysis and current protection setting scheme in distribution network with photovoltaic power[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 327-332.
- [21] 刘蓓, 汪飒, 陈春, 等. 和声算法在含 DG 配电网故障定位中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 280-284.
LIU Bei, WANG Feng, CHEN Chun, et al. Harmony search algorithm for solving fault location in distribution networks with DG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 280-284.
- [22] 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.
- [23] 黄泽华, 李猛, 刘裕涵, 等. 智能配电网自愈控制方案研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1): 492-496.
HUANG Zehua, LI Meng, LIU Yuhuan, et al. Research of smart distribution network self-healing scheme[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 492-496.
- [24] 贾浩帅, 郑涛, 赵萍, 等. 基于故障区域搜索的配电网故障定位算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 62-66.
JIA Haoshuai, ZHENG Tao, ZHAO Ping, et al. Fault location algorithm for distribution system based on fault region searching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 62-66.
- [25] 李斌, 袁越. 光伏并网发电对保护及重合闸的影响与对策[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 12-17, 23.
LI Bin, YUAN Yue. Effects and countermeasures of photovoltaic grid-connected generation on protection and reclosing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 12-17, 23.
- [26] 孙东, 仇志华, 赵倩鹏, 等. 基于配网自动化的电缆配电网短路故障定位与隔离方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(10): 21-27.
SUN Dong, QI Zhihua, ZHAO Qianpeng, et al. Distribution automation based short-circuit fault location and isolation method for closed-loop distribution network with underground cable[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2018, 30(10): 21-27.
- [27] 高孟友, 徐丙垠, 范开俊, 等. 基于实时拓扑识别的分布式馈线自动化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 127-131.
GAO Mengyou, XU Bingyin, FAN Kaijun, et al. Distributed feeder automation based on automatic recognition of real-time feeder topology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 127-131.
- [28] 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, 215-218.
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, 215-218.
- [29] SHEN Shaofei, WANG Huifang, JIANG Kuan, et al. Regional area protection scheme for modern distribution system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5416-5426.
- [30] GIUSTINA D D, DEDÁ A, INVERNIZZI G, et al. Smart grid automation based on IEC 61850: an experimental characterization[J]. IEEE Transaction on Instrument and Measurement, 2015, 64(8): 2055-2063.
- [31] 丛伟, 孔瑾, 赵义术, 等. 用于智能配电网自动重合闸的断路器分类方法[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1146-1151.
CONG Wei, KONG Jin, ZHAO Yishu, et al. Classification of circuit breakers suitable for auto-reclosing in smart distribution system[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1146-1151.
- [32] 据泽立, 朱跃, 蒲路, 等. 配电网电压综合补偿方法研究[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 235-240.
JU Zeli, ZHU Yao, PU Lu, et al. Study on the voltage integrated compensation method of distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 235-240.

收稿日期: 2020-05-27; 修回日期: 2020-10-23

作者简介:

林志超(1972—), 男, 工程硕士, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护及配用电技术。E-mail: Linzc12345@163.com

(编辑 姜新丽)