

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180725

基于动态拓扑分析的配电网自适应保护与自愈控制方法

张安龙, 李艳, 黄福全, 刘子俊

(深圳供电局有限公司, 广东, 深圳 518001)

摘要: 配电网保护控制亟需提高保护的灵活性并缩减恢复供电时间。基于动态拓扑分析建立配电网保护控制系统图形化描述为提高保护控制自适应能力提供了解决方法。首先研究了关联子图的计算方法, 将配电网自适应保护控制系统的故障辨识区域、故障动作区域的自适应动态调整转化为不同类型关联子图求取。在此基础上进行不同运行与配置情况下的保护故障辨识、动作逻辑以及自愈判断动态决策。最后通过案例说明了验证关联子图算法以及保护控制决策的正确性, 有效满足配电网保护控制系统自适性需求。

关键词: 配电网; 自适应保护; 自愈控制; 动态拓扑分析; 关联子图

Adaptive protection and self-healing control method of distribution network based on dynamic topology analysis

ZHANG Anlong, LI Yan, HUANG Fuquan, LIU Zijun

(Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518001, China)

Abstract: The requirement to improve the flexibility of protection and reduce the power supply recovery time for distribution network protection control is needed. Based on dynamic topology analysis, the graphical description of the distribution network protection control system is provided to solve the problem of adaptive protection and control. Firstly, the calculation method of the correlated subgraph is studied. The adaptive dynamic adjustment of the fault identification area and fault action area of the adaptive protection control system of the distribution network is transformed into different types of correlated subgraphs. On this basis, the dynamic strategy for fault identification, action logic, and self-healing judgment for different operation and configuration are carried out. Finally, the associated subgraph algorithm and protection control decision are verified by the case, which effectively meets the self-adaptability requirements of the distribution network protection and control system.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. SZKJXM20160056) and National Natural Science Foundation of China (No. 51577073).

Key words: distribution network; adaptive protection; self-healing control; dynamic topology analysis; correlated subgraph

0 引言

为满足能源转型与供电可靠性提升的目标, 配电网接入大量分布式电源, 并采取闭环运行的复杂运行方式, 由此改变了配电网的故障特征, 进而影响其保护与控制策略。传统固定逻辑的配网保护控制难以有效适应新型配电网接线复杂、设备配置多样、运行方式多变等特点^[1-6]。为此, 国内外研究围

绕两种思路开展研究: 一种是将主网的差动保护和安稳控制方案直接引入配电网^[7-9], 以解决保护适配和复电控制问题, 然而由此带来配网保护控制系统配置复杂、投资大以及运维困难等新问题; 另一种思路则是通过信息共享实现配电网广域保护控制^[3], 网络化的配电网广域保护, 为配电网网络拓扑的充分描述创造了条件^[10-12], 保护根据元件在网络中的位置, 获取关联域并实现关联域内的保护控制信息交互, 如文献[13]通过邻接矩阵计算, 获取保护可达矩阵; 文献[14]进一步考虑了断路器失灵, 得到多级扩展差动环后备保护, 克服了传统保护只能利

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目资助 (SZKJXM20160056); 国家自然科学基金项目资助 (51577073)

用就地信息的局限性。

然而，现阶段广域保护控制方案的实现仍是建立在静态网络拓扑的基础上^[15-16]，保护逻辑与保护对象绑定，与采样设备、开关设备相关联。广域保护功能的实现，通过多级区域保护相互配合，当运行方式与设备关联配置情况发生改变时，只能通过保护投退适应网络变化，不能真正实现运行方式改变、网络拓扑变化情况下的自适应。

配电网的自适应保护控制应建立在动态拓扑分析的基础上，实现配电网保护控制与定点电流采样的关联解耦、与定点开关操作的关联解耦。根据被保护对象的变化调整保护定值，实现自适应决策。能够根据失电区域的源荷配置，获取恢复供电的控制手段。完整体现配电网保护控制的采样自适应、故障定位自适应、故障切除自适应与自愈控制自适应。

因此，本文提出了基于动态拓扑分析与关联子图的计算方法，实现保护决策区域、判断故障动作区域的自适应动态调整，并给出了保护故障辨识、动作逻辑以及自愈判断方法。为配电网自适应保护控制的实现与推广应用打下基础。

1 基于图论的配电网拓扑描述模型

1.1 配电网有向图描述

配电网网络拓扑整体描述为图 $G(V, E)$ ，其中 V 表示图的顶点，映射配电网设备元件(包括电源、母线、馈线以及负荷等)， E 表示图的边，映射配电网开关元件(包括各种类型的开关)。

以图 1 配电网为例，抽象形成配电网等效图见图 2，抽象形成的图不随元件状态改变，对于特定配电网，等效图唯一。

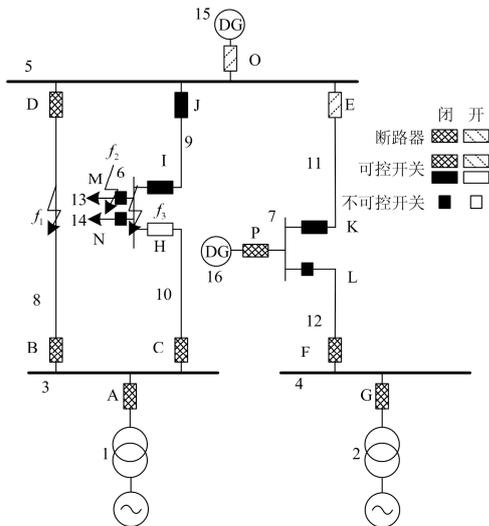


图 1 配电网结构示例

Fig. 1 An example of distribution network structure

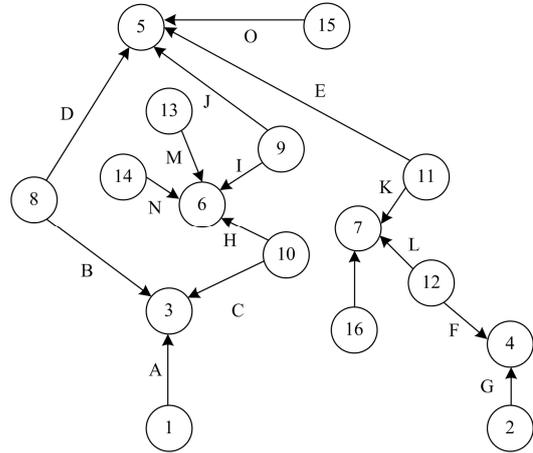


图 2 配电网结构等效图

Fig. 2 Equivalent diagram of distribution network structure

从顶点的类型出发，定义线路设备的顶点指向非线路设备的顶点为边正方向，按照此定义，将边记为 $e(v_i, v_j)$ 为正， v_i 、 v_j 为边 e 关联顶点。采用矩阵描述，形成顶点与边之间的完全关联矩阵 S 。按顺序进行编号，其中：

$$s_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{顶点 } i \text{ 与边 } j \text{ 相连，且边 } j \text{ 指向顶点 } i \\ 0 & \text{顶点 } i \text{ 与边 } j \text{ 不相连} \\ -1 & \text{顶点 } i \text{ 与边 } j \text{ 相连，且边 } j \text{ 背离顶点 } i \end{cases}$$

1.2 面向设备配置自适应的边属性描述

为体现保护控制设备配置自适应，需要根据配电网自适应保护控制采样设备配置、开关类型配置等需求，建立边的属性描述。根据边的属性不同，分别形成边的描述集合，如表 1 所示。

表 1 边的属性描述集合

Table 1 Attribute description set of edge

边(集合)	说明
状态集 E_a 与 $\overline{E_a}$	边的投退状态
可测边集 E_b 与 $\overline{E_b}$	边是否具备电流采样
可动边集 E_c 与 $\overline{E_c}$	边能否动作于故障电流，一般指断路器
可控边集 E_d 与 $\overline{E_d}$	边是否具备遥控能力，一般指可控开关

统一采用矩阵进行表示，以边是否具备可测性为例，则建立的可测性描述矩阵 B 中

$$b_i = \begin{cases} 1 & \text{边 } i \in E_b \\ 0 & \text{边 } i \in \overline{E_b} \end{cases}$$

同理，建立边的状态属性描述 A 、可动性属性描述 C 以及可控性属性描述 D 。

1.3 面向策略逻辑自适应的顶点属性描述

为体现保护控制策略自适应，需要根据配电网自适应保护的源荷部署与分配情况，建立顶点的属性描述。主要包括最大负荷电流以及电源变压器额

定容量等。

1) 负荷顶点的最大负荷电流描述 $L_{s \times s}$ 为对角阵, s 为顶点数目, 其中

$$l_i = \begin{cases} l & \text{负荷元件最大负荷电流} \\ 0 & \text{非负荷顶点} \end{cases}$$

2) 变压器(电源)顶点的容量描述 $TN_{s \times s}$ 为对角阵, s 为顶点数目, 其中

$$tn_i = \begin{cases} m & \text{变压器(电源)容许最大允许容量} \\ 0 & \text{非变压器(电源)顶点} \end{cases}$$

1.4 基于关联子图的自适应保护控制模型

定义关联子图 $G'(V', E'_i, E'_o)$, 表示配电网等效图的一个连通子图。通过三个组成要素描述配电网关联子图, 其中, V' 表示关联子图包含的顶点集合, E'_i 表示联系子图顶点的内置边集合, E'_o 表示联系子图内部顶点与外部顶点的分界边集合。

$$\begin{aligned} V' &\subseteq V \\ E'_i, E'_o &\subseteq E \end{aligned}$$

根据配电网保护控制的需求, 形成以下定义。

1) 关联子图: 指定边的属性类型 E_{st} , 满足子图内任意两个顶点之间存在通路 $E_L \subseteq E_{st}$ 。如定义边的属性类型为 E_a , 则相应得到的关联子图表示两点之间存在电气连接的配电区域。

2) 最大关联子图: 在关联子图定义的基础上, 限定子图的分界边属性, 取 $E'_o \subseteq \overline{E_{st}}$ 。得到具备属性类型 E_{st} 关联顶点集的最大范围。如仍定义边的属性为 E_a , 则分界边属性为 $\overline{E_a}$, 则最大关联子图表示存在电气连接的最大配电区域。

配电网自适应保护控制包括故障辨识、故障切除、故障隔离以及恢复自愈等环节, 其实质上是关联子图确立的过程。

故障辨识实现采样配置自适应, 需要通过关联子图算法形成以可测性属性的边为分界的故障辨识区间。

故障切除与故障隔离过程需要满足开关配置自适应, 要求关联子图算法能够根据故障定位结果定制故障切除与隔离的区间, 即获取以具备可动性属性以及可控性属性的边为分界边的关联子图。

过载判断与故障自愈过程, 需要关联子图算法确定各个最大电气连接子图的负载情况与分界边开关集合, 指导供电恢复策略。

因此, 在保护控制决策过程中, 需要形成下述几种类型的关联子图, 统一表达为 $G''_{\max}(V''^i, E''_i, E''_o)$, $i \in (a, b, c, d)$ 。分别表示最大电气连接子图、

最大不可测子图、最大不可动子图以及最大不可控子图。其 E''_{st} 分别等于 E_a 、 $\overline{E_b}$ 、 $\overline{E_c} \cap E_a$ 、 $\overline{E_d} \cap E_a$ 。

2 自适应保护控制关联子图计算方法

2.1 关联子图生成方法

生成关联子图是自适应保护控制算法的核心。用矩阵计算方法表示关联子图的推导, 以最大电气连接子图形成方法为例, 其基本流程如下。

1) 形成辅助矩阵 $S^{(0)}$, 根据实际所需求取的关联子图不同 $S^{(0)}$ 的形式不同。如对于最大不可测子图, 有

$$S^{(0)} = S \times \overline{B} \quad (1)$$

式中: B 为边的可测性描述矩阵; \overline{B} 表示矩阵对角线元素取逻辑反。

2) 赋予最大不可测子图初值 $B^{(0)}$, 等同于完全关联矩阵 S , 即

$$B^{(0)} = S \quad (2)$$

3) 对比矩阵 $S^{(n)}$ 与 $B^{(n)}$ 中的元素, 发现非零的一致元素 s_{ik} 、 s_{jk} 。

4) 分别对 $S^{(n)}$ 以及 $B^{(n)}$ 进行行变换: 矩阵中第 i 行元素等于原矩阵第 i 行加上第 j 行元素, 并对第 j 行元素清 0, 形成新的矩阵 $S^{(n+1)}$ 以及 $B^{(n+1)}$, 可表示为

$$S^{(n+1)} = P^{(n)}(i, j) \times S^{(n)} \quad (3)$$

$$B^{(n+1)} = P^{(n)}(i, j) \times B^{(n)} \quad (4)$$

其中

$$P_{s \times s} = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & 0 & \\ & & & & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} (i) \\ \\ \\ (j) \end{matrix}$$

5) 用 $S^{(n+1)}$ 及 $B^{(n+1)}$ 代替 $S^{(n)}$ 及 $B^{(n)}$, 重复步骤 3) 与步骤 4), 直至消去后结果与上一次消去后结果保持不变, 同理可形成其他最大关联矩阵。

2.2 关联子图的顶点归属算法

上述生成的关联子图记录了子图与其分界边 E'_o 的关联, 为直观获取关联子图与顶点 V' 的归属关系, 需要在子图生成过程中, 同步获取每一步子图变化中顶点的从属变化。以可测关联子图顶点归属关系计算为例, 实现步骤如下。

1) 建立 s 维顶点初始单位对角阵 $R_B^{(0)}$, 其中下标 B 的选取与最大不可测子图 $B^{(n)}$ 对应, 同理可得 $R_A^{(0)}$ 、 $R_C^{(0)}$ 、 $R_D^{(0)}$ 。

2) 从单位阵 $R^{(0)}$ 出发, 直至形成 $R_B^{(n)}$ 。

$$\mathbf{R}_B^{(n)} = \prod_0^{n-1} \mathbf{P}^{(n-1)}(i, j) \times \mathbf{R}_B^{(0)} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{R}_B^{(n)}$ 即表示顶点与子图的从属关系。

3) 根据关联子图生成方法的不同, 分别形成关于不同关联子图的顶点从属描述。

3 基于关联子图自适应保护控制方法

3.1 故障辨识

根据最大不可测子图 $\mathbf{B}^{(n)}$ 可以解析出子图中设备元件关联的采样数目, 对单端采样构成过流保护逻辑, 多端采样构成差动保护逻辑, 进行矩阵形式统一, 可得^[17-20]

$$|\mathbf{I}_{act}| = |\mathbf{B}^{(n)} \times \mathbf{I}| > \mathbf{I}_{set} \quad (6)$$

式中, \mathbf{I} 为反映开关电流采样的 t 维矩阵, 当判断成立时, 实现故障判断, 确定关联子图是否为故障区。

$$\mathbf{Fault} = (f_1 \quad f_2 \quad \cdots \quad f_s)^T = \mathbf{F}(|\mathbf{B}^{(n)} \times \mathbf{I}| - \mathbf{I}_{set} > 0) \quad (7)$$

式中: $\mathbf{F}(\mathbf{X})$ 表示列向量元素运算; 当第 i 个元素满足逻辑判断时, $f_i \geq 1$, 即关联子图 \mathbf{G}_{max}^i ($\mathbf{V}^i, \mathbf{E}_i^i, \mathbf{E}_0^i$) 为故障区, \mathbf{V}^i 为故障元件集合。

在进行故障辨识过程中, 针对最大不可测子图的变化需要调整故障门槛值。过流保护的定值设置应以被保护对象下游所有负荷电流大小进行整定。差动电流设置, 应考虑存在采样丢失时, 提高差动门槛, 取无效采集支路的全部负荷电流。则根据最大不可测子图设备元件的从属变化, 计入负荷电流作为故障辨识门槛, 有

$$\mathbf{I}_{set_1} = \mathbf{R}_B^{(n)} \times \mathbf{L} \quad (8)$$

考虑到互感器量测的误差以及电源变压器有单独的保护措施, 对所有互感器应设立一定的误差门槛, 并排除含有电源元件。则制动量还需满足另一组判断条件, 即

$$\mathbf{I}_{set_2} = \mathbf{R}_B^{(n)} \times \mathbf{L}' + |\mathbf{B}^{(n)}| \times \boldsymbol{\varepsilon} \quad (9)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}$ 表示互感器量测等形成的误差; \mathbf{L}' 是 s 维对角矩阵, 当元件为电源元件时, 相应元素为无穷大。

保护的故障定位结合上述两组制动量进行决策, 即

$$\mathbf{Fault} = \mathbf{F}(|\mathbf{I}_{act}| > \mathbf{I}_{set_1}) \cap \mathbf{F}(|\mathbf{I}_{act}| > \mathbf{I}_{set_2}) \quad (10)$$

3.2 保护控制动作逻辑

保护控制动作逻辑包括遥控断路器切除故障

与遥控可控开关隔离故障的过程^[21-23]。根据上述关联子图故障辨识结果, 获取故障元件集合, 根据故障元件与最大不可动子图 $\mathbf{C}^{(n)}$ 及最大不可控子图 $\mathbf{D}^{(n)}$ 的归属, 反推关联子图边界。

故障需跳断路器组合为

$$\mathbf{Break_act} = |\mathbf{Fault}^T \times \mathbf{R}_B^{(n)} \times \mathbf{R}_C^{(n)T} \times \mathbf{C}^{(n)}| \quad (11)$$

故障隔离动作可控开关组合为

$$\mathbf{Switch_act} = |\mathbf{Fault}^T \times \mathbf{R}_B^{(n)} \times \mathbf{R}_D^{(n)T} \times \mathbf{D}^{(n)}| \quad (12)$$

3.3 过载判断与自愈逻辑

在进行自愈之前, 需要分析故障隔离后, 系统形成的各个最大电气连接子图的负荷水平^[24-26]。通过元件的负荷矩阵 \mathbf{L} 与供电恢复后元件子图归属关联矩阵 $\mathbf{R}_A^{(n)}$, 求取供电恢复后区块中负荷的总量, 计算方法如式(13)所示。

$$\sum \mathbf{L} = \mathbf{R}_A^{(n)} \times \mathbf{L} \times \mathbf{I} \quad (13)$$

式中, \mathbf{I} 为 s 维单位列向量。

计算各最大电气连接子图的变压器运行容量和, 计算方法为

$$\sum \mathbf{T} = \mathbf{R}_A^{(n)} \times \mathbf{T} \times \mathbf{I} \quad (14)$$

由此, 可获得各最大电气连接子图可承受过负荷能力如式(15)所示。

$$\Delta \mathbf{L} = \sum \mathbf{T} - \sum \mathbf{L} \quad (15)$$

自愈可闭合开关选取可按式(16)进行计算。

$$\mathbf{switch_recover} = \mathbf{Condition_1} \cap \mathbf{Condition_2} \quad (16)$$

其中

$$\mathbf{Condition_1} = \mathbf{F}(\Delta \mathbf{L}^T \times |\mathbf{A}^{(n)}| < |\Delta \mathbf{L}^T \times \mathbf{A}^{(n)}|) \quad (17)$$

$$\mathbf{Condition_2} = \mathbf{F}(\Delta \mathbf{L}^T \times |\mathbf{A}^{(n)}| > 0) \quad (18)$$

条件 1 表示开关连接的两个最大电气连接子图中能恢复失电区域供电; 条件 2 表示开关满足所连接的两个最大电气连接子图具备承受过负荷能力。自愈可闭合开关需同时满足条件 1 与条件 2 的判断。

4 算例分析

仍以图 1 为例, 由两台变压器以及两组分布式电源构成的区域配电网, 供电范围包括三回馈线 (BI、CH、FE) 及其他负荷分支, 其中开关 E、H 作为常开节点。除开关 L、N 外, 每个开关上都装设有电流互感器, 同时假设互感器 I 采样异常。按序号排列形成以下模型。

分别假设故障发生在 f_1 、 f_2 以及 f_3 上, 验证关联子图算法以及保护控制决策的正确性。

得失电区块自愈。

当 $m_{15} > l_{13} + l_{14}$ 时, 可通过动作开关 O, 使得失电区块自愈。

5 结论

传统的基于静态拓扑分析的配电网保护控制难以满足自适应需求。本文提出了基于动态拓扑分析的配电网自适应保护与自愈控制方法, 首先建立配电网有向等效图边属性描述与顶点属性配置, 实现了配电网拓扑动态描述。在此基础上, 探索了配电网关联子图模型与配电网等效图描述相结合的在自适应保护控制中的应用。进一步给出了配电网最大电气连接子图、最大不可测子图、最大不可动子图、最大不可控子图的计算方法, 满足配电网保护控制对于拓扑连接自适应、采样配置自适应以及开关配置自适应的需求, 实现了保护决策区域、判断故障动作区域的实时动态调整, 并得出保护故障辨识、动作逻辑以及自愈判断方法, 从根本上解决了配电网保护控制自适应需求。

参考文献

- [1] 高亮, 郎陈杰, 夏能弘. 分布式电源并网条件下配电网继电保护方案设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 143-149.
GAO Liang, LANG Chenjie, XIA Nenghong. Design of relay protection scheme of distribution network with DG[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 143-149.
- [2] 范忻蓉, 张沛超, 方陈. 辐射型主动配电网的自适应方向保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 150-155.
FAN Xinrong, ZHANG Peichao, FANG Chen. Adaptive directional protection scheme for radial active distributional network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 150-155.
- [3] NIKOLAIDIS V C, PAPANIKOLAOU E, SAFIGIANNI A S. A Communication-assisted overcurrent protection scheme for radial distribution systems with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 114-123.
- [4] 唐志军, 邹贵彬, 高厚磊, 等. 含分布式电源的智能配电网保护控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 9-14.
TANG Zhijun, ZHOU Guibin, GAO Houlei, et al. Protection and control scheme for smart distribution grid with distributed resource[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 9-14.
- [5] 王鲍雅琼, 陈皓. 含分布式电源的配电网保护改进方案综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 146-154.
WANG Baoyaqiong, CHEN Hao. Overview study on improving protection methods of distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 146-154.
- [6] 裴哲义, 丁杰, 李晨, 等. 分布式光伏并网问题分析与建议[J]. 中国电力, 2018, 51(10): 80-87.
PEI Zheyi, DING Jie, LI Chen, et al. Analysis and suggestion for distributed photovoltaic generation[J]. Electric Power, 2018, 51(10): 80-87.
- [7] 李瑞生. 一种基于虚拟节点网络拓扑结构适用于架空线路主动配电网的纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 70-75.
LI Risheng. An aerial line active distribution network pilot protection scheme based on topology of virtual node[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 70-75.
- [8] 孔令令, 陈晓刚, 张霞, 等. 10 kV 配电网分支线保护配置方案[J]. 供用电, 2018, 35(8): 21-24.
KONG Lingling, CHEN Xiaogang, ZHANG Xia, et al. Protection configuration scheme for 10 kV distribution network branch line[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(8): 21-24.
- [9] 李瑞生. 适用主动配电网的差动保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 104-109.
LI Ruisheng. Differential protection scheme to apply to active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 104-109.
- [10] 田果, 黄小莉, 邓强, 等. 基于图论的智能配电网馈线保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 95-99.
TIAN Guo, HUANG Xiaoli, DENG Qiang, et al. Feeder protection based on graph theory in smart distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 95-99.
- [11] 陈兵, 赵肖旭, 施伟成, 等. 配电网网格化自动成图的实现[J]. 电力工程技术, 2017, 36(6): 100-105.
CHEN Bing, ZHAO Xiaoxu, SHI Weicheng, et al. Realization of automatic grid generation in distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6): 100-105.
- [12] 张巍, 孙云莲. 基于划分拓扑算法的配电网故障定位研究及应用[J]. 供用电, 2018, 35(10): 52-57.
ZHANG Wei, SUN Yunlian. Research and application of fault location in distribution network based on a algorithm of partition[J]. Distribution & Utilization, 2018,

- 35(10): 52-57.
- [13] 邹俊雄. 20 kV 配电网闭环运行特性优化与保护控制策略研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [14] 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.
- [15] MA J, XIANG X, ZHANG R, et al. Regional protection scheme for distribution network based on logical information[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(17): 4314-4323.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] COFFELE F, BOOTH C, DYSKO A. An adaptive overcurrent protection scheme for distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 561-568.
- [19] 殷豪, 李德强, 孟安波, 等. 纵横交叉算法在配电网故障定位中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 109-114.
YIN Hao, LI Deqiang, MENG Anbo, et al. Fault location for distribution network based on crisscross optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 109-114.
- [20] 陈奎, 张云, 王洪寅, 等. 基于免疫算法的含分布式电源配电网的故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 57-62.
CHEN Kui, ZHANG Yun, WANG Hongyin, et al. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on immune algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 57-62.
- [21] 梁睿, 孟祥震, 周鲁天, 等. 配电网故障定位技术发展现状及展望[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 20-27.
LIANG Rui, MENG Xiangzhen, ZHOU Lutian, et al. Status quo and prospect of distribution network fault location[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 20-27.
- [22] 黄泽华, 李锰, 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 Yuhan, et al. Research of smart distribution network self-healing scheme[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 492-496.
- [23] JONES D, KUMM J J. Future distribution feeder protection using directional overcurrent elements[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(2): 1385-1390.
- [24] 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.
- [25] SEYEDI Y, KARIMI H. Design of networked protection systems for smart distribution grids: a data-driven approach[C] // Power & Energy Society General Meeting, 2017, Chicago, IL, USA: 1-5.
- [26] 王艳松, 孙明鸿. 含微网配电网的综合优化规划研究[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 118-124.
WANG Yansong, SUN Minghong. Research on comprehensive optimization for distribution network with micro-grid[J]. Electric Power, 2018, 51(2): 118-124.

收稿日期: 2018-06-13; 修回日期: 2018-12-06

作者简介:

张安龙(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为继电保护整定计算及事故分析; E-mail: zhanganlong@sz.csg.cn

李艳(1971—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: dyhust@163.com

黄福全(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: huangfuquan@sz.csg.cn

(编辑 许威)