

辐射型主动配电网的自适应方向保护方案

范忻蓉¹, 张沛超¹, 方陈²

(1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海交通大学, 上海 200240;
2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437)

摘要: 为了适应辐射型主动配电网对保护的要求, 提出了一种基于方向闭锁原理的自适应保护方案。根据配电网的树状结构特征定义了参考方向整定规则, 并结合闭锁方向规则, 实现保护原理对于线路和母线等故障元件的自适应性。在配电网重构后, 通过拓扑分析完成参考方向的自动配置, 实现对于动态重构的适应性。针对主动配电网中包含较多可再生能源的特征, 以及孤岛运行模式的需求, 采用全阻抗继电器作为启动元件以提高保护的灵敏性。针对主动配电网中易于出现的弱电源问题, 利用联跳提高弱馈侧保护的動作可靠性。以实际配电网作为算例验证了方案的有效性。所提保护方案能够为主动配电网提供一种简单、经济和可靠的主保护方案。

关键词: 主动配电网; 分布式发电; 微网; 方向闭锁; 自适应保护方案

Adaptive directional protection scheme for radial active distributional network

FAN Xinrong¹, ZHANG Peichao¹, FANG Chen²

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Electric Power Research Institute, SMEPC, Shanghai 200437, China)

Abstract: Aiming to meet the demand of radial active distributional network (ADN) for protections, an adaptive protection scheme based on directional interlocking principle is proposed. First, according to the tree-structured feature of distribution network, the setting rule for reference direction is defined. Combined with the interlocking direction rule, the proposed scheme can adapt for fault elements such as line, bus, etc. Next, after the network reconfiguration, the reference direction can be re-configured automatically through the topology analysis. Furthermore, aiming to cater to the features that the ADN has high penetration of renewable energy and need to run in isolated island mode, full-impedance relay is choiced as the starting element to improve the sensibility of the protection. In order to solve the weak source problem that often occurs in ADN, a transfer-trip feature is adopted. The proposed scheme is verified using test cases based on a real distribution network, showing that it is easy, economic and reliable, and can provide a main protection scheme for ADN.

Key words: active distribution network; distributed generation; microgrid; directional interlocking; adaptive protection scheme

0 引言

随着大量分布式电源(Distributed Generator, DG)接入配电网, 传统的单向供电的被动式配电网正在向着能够可靠地完成DG的消纳、调度、保护和监控的主动配电网方向演变^[1-2]。在具有高渗透率DG的主动配电网中, 配电网的潮流和短路电流特征将产生实质性的改变^[3-5], 继电保护技术将面临多方面挑战。第一, 是短路电流方向特征的变化, DG接

入后, 改变了传统配电网中短路电流的单向性。第二, 是短路电流水平的变化, 大多分布式可再生能源属于逆变器接口型DG^[6-7](Inverter-interfaced DG, IIDG), 所能提供的短路电流水平有限, 一般仅为额定电流的1.2倍。此外, 某些主动配电网具备特殊情况下的微网运行能力, 其在联网和孤岛运行模式下的短路电流具有很大差异。这些都给保护的整定与配合带来了极大的困难。第三, 主动配电网具备故障后重构以及正常运行时的优化重构能力, 而网络重构会改变拓扑结构, 保护必须能够做到迅速适应。第四, 在主动配电网中, 母线上有源线路增多,

进一步增大了配置专用母线保护的成本; 第五, 仍需要把经济性作为重要约束条件, 在设计保护方案时应充分考虑投资成本和运维成本。

为了应对上述问题, 近年来研究者做出了大量努力^[8-14]。由于差动保护可以很好地解决输电网络中双向潮流的问题^[8], 文献[9]把差动保护应用于配电网, 采用基于正序故障分量的电流差动保护原理, 有效适应配电网线路特点并能够解决弱馈问题。文献[10]采用基于配电自动化的集中式线路差动和就地式母线差动的保护方案, 能够适用于主动配电网。但差动保护对通道和同步要求很高^[11], 投资成本大且运维复杂, 在配电网中大量采用具有困难。

方向闭锁原理能够实现线路故障的全线速动, 同时无需同步采样且对通信带宽要求低, 故较之差动保护具有更好的经济性。文献[11-13]提出了几种方向闭锁纵联电流保护方案, 其中, 文献[11,13]针对辐射形配电网, 而文献[12]则适合闭环运行配电网。但这些方案仅具备线路保护功能, 而在配电网中, 母线故障概率较高, 且易造成开关设备烧毁, 甚至烧坏直流操作回路造成整站保护拒动。但中低压母线一般不设专门的母线保护, 母线故障需靠相邻线路保护切除, 动作时间较长, 并且往往要扩大停电范围。为此, 文献[14]提出一种基于 GOOSE 的级联方向闭锁保护方案。较之文献[11-13], 该方案同时具备线路和母线保护功能, 能够实现配电网全范围故障的快速动作。但该方案主要针对闭环运行的配电网, 而目前配电网仍主要采用开环运行的方式。此外, 该文献对配电网重构讨论不足。最后, 文献[11-14]都默认配电网中的 DG 为同步电机型 (Synchronous DG, SDG), 对 IIDG 讨论不足。

本文在文献[14]的基础上, 针对更具代表性的开环运行的主动配电网, 根据其树状拓扑结构特点, 提出一种原理简单的继电保护方案, 该方案具备对短路电流水平的适应性、对拓扑结构改变的适应性以及对不同故障元件的适应性。

1 自适应方向保护方案原理

1.1 配电网的树结构表示

配电网具有闭环设计和开环运行的特点。配电网的这一特点使其可以抽象为树结构, 其中: 树的根节点代表上级电源; 叶节点代表终端负荷或分布式电源; 中间节点代表母线; 各分支代表线路。在配电网重构时, 仍需要满足辐射状运行方式的约束, 即配电网中不存在环路和孤岛^[15-16]。出现环路时, 会造成环网供电; 出现孤岛时, 则会导致负荷失电。因此, 配电网重构可以等效为树的结构变化, 重构

后的配电网仍然可以表示为树结构。

图 1 所示是一个配电网的树形拓扑的示意图。图中联络断路器 2.4、3.4 在配电网正常运行时常开, 保持配电网开环运行。

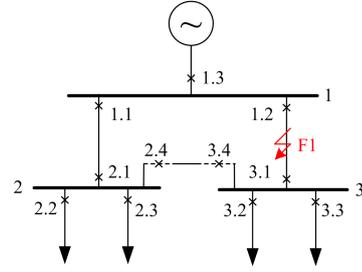


图 1 配电网树状拓扑图

Fig. 1 Tree topology of distribution grid

1.2 保护功能配置

在本保护方案中, 每套保护 (Protective Relay, PR) 装置的功能构成如图 2 所示。图中用 IEC 61850 标准所定义的逻辑节点 (logical node)^[17-18] 表示主要的功能模块。其中: 利用距离元件 (PDIS) 实现故障启动功能, 对此将在 1.4 节作进一步讨论; 保护方案 (PSCH) 逻辑节点代表保护通道功能, 用于在保护装置之间传递方向闭锁和联跳信号; 当保护通道故障时, 由过流元件 (PTOC) 提供后备功能; 最后, 由保护跳闸条件 (PTRC) 逻辑节点综合本地和远方信号, 并在判断满足跳闸条件后向断路器 (XCBR) 发出跳闸命令。保护跳闸条件为

$$\text{Trip} = (\neg \text{Blk} \wedge \text{Str}) \vee \text{TT} \vee \text{OC} \quad (1)$$

式中: Blk 代表闭锁跳闸信号; Str 代表启动信号; TT (Transfer Trip) 代表联跳信号; OC (Over Current) 代表过电流后备动作信号。其中, 过电流保护为后备功能, 独立于方向闭锁, 详见文献[14], 本文不再讨论。其余信号将在下面分别讨论。

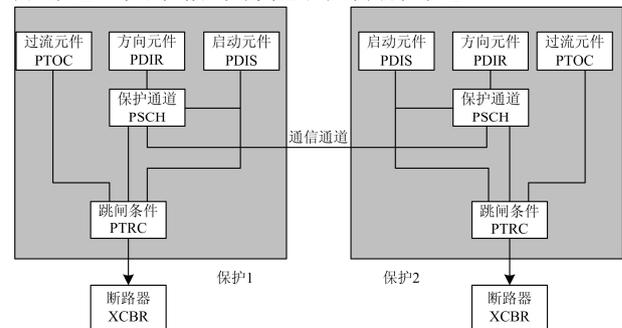


图 2 保护原理示意图

Fig. 2 Schematic of the proposed principle

1.3 方向闭锁原理

对于方向闭锁原理, 首先需要确定保护的参考方向和闭锁方向。参考方向一般指向被保护元件。

为了使得本原理能够同时具备线路保护和母线保护功能, 本文采用了新的参考方向规则。以下分析仍以图 1 所示配电网拓扑为例。

参考方向规则: 在配电网树结构中, 方向元件的参考方向为由叶子节点指向根节点方向。

依据上述规则, 各保护的参考方向如图 3(a)。

现假设母线 1、3 之间(图 1 中 F1 处)发生永久性故障, 线路保护 1.2、3.1 动作切除故障。配电网进行故障重构, 联络断路器 2.4、3.4 闭合。此时, 本保护方案将生成新的树结构, 并根据规则 1 更新参考方向, 如图 3(b)所示。

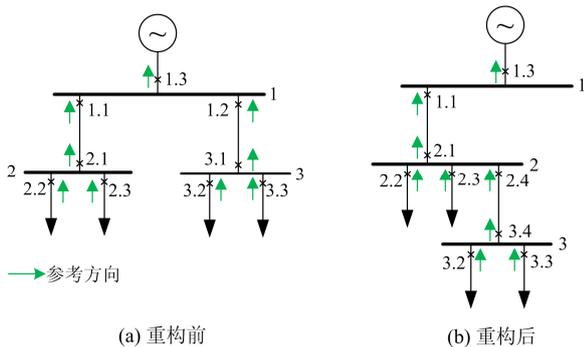


图 3 参考方向整定示意图
Fig. 3 Diagram of reference direction setting

为实现上述功能, 本保护方案中设计了如图 4 所示的自动配置单元。只有在发生配电网重构事件时, 该单元的功能才被触发, 并将新的参考方向下载到各保护装置中。

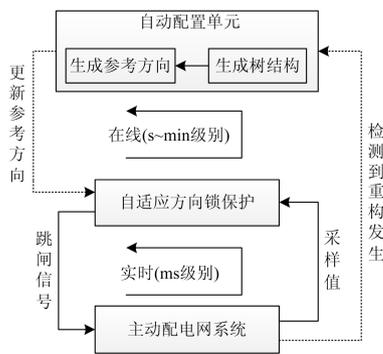


图 4 自适应生成参考方向
Fig. 4 Adaptive generating of reference directions

在配电网发生故障时, 由方向元件判断故障方向, 并按照如下规则确定闭锁方向。

闭锁方向规则: 若(1)启动元件已启动; (2)故障方向与参考方向同向, 则逆参考方向发闭锁信号。否则, 则顺参考方向发闭锁信号。

下面分别用线路、母线以及负荷/DG 这三种基本故障类型解释上述规则, 如图 5 所示。

(1) 当线路故障时, 全网只有故障点(F1 点)呈现图 5(a)所示的汇流特征。对于 PR1.1, 其电流方向与参考方向相反, 因此该保护顺参考方向发出闭锁信号; 对于 PR2.1, 其电流方向与参考方向相同, 因此逆参考方向发出闭锁信号。以上情况导致只有故障点两侧的保护闭锁方向相背, 最终仅该两处保护因收不到闭锁信号而动作, 线路故障被选择性切除。需说明的是, 当闭锁方向指向树节点时(如 PR1.1), 应闭锁该节点上所有保护。

(2) 当母线故障时, 全网只有故障处(F2 点)呈现图 5(b)的汇流特征。故障母线上各保护的闭锁方向皆背离该母线, 最终只有上述保护因收不到闭锁信号而动作, 母线故障被选择性切除。需说明的是, 当闭锁方向指向树分支时(如 PR2.1), 应闭锁该分支对侧的保护。

(3) 同样, 若负荷/DG 发生故障, 如图 5(c)中 F3 点, 全网仅负荷/DG 保护收不到闭锁信号, 最终该处保护动作, 切除故障。

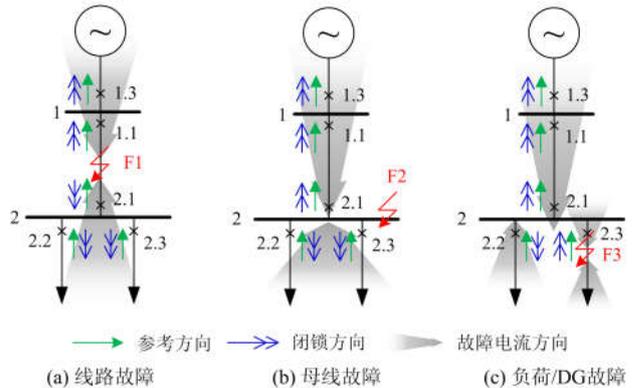


图 5 三种基本故障类型
Fig. 5 Three primary fault types

1.4 启动元件的实现与整定

传统配电网保护中一般以过电流元件作为启动元件。如果主动配电网始终与主电网联网运行, 且所接入的 DG 以 SDG 为主, 则过电流元件仍可能具有较高的灵敏度。但如前文所述, 主动配电网中还可能大量 IIDG, 发生故障时其所能够提供的短路电流水平较低。此外, 主动配电网的动态重构能力以及微网运行能力会使系统运行方式变得非常复杂。例如, 主动配电网在联网模式下的负荷电流甚至会与孤岛模式下的短路电流水平接近。在这种情况下, 如果以过电流元件作为启动元件, 其灵敏度很小, 甚至为零, 会造成拒动。

为此, 本保护方案采用全阻抗继电器作为启动元件, 代替过电流元件。其目的在于: (1) 提高启动元件的灵敏度, 尤其是孤岛运行时; (2) 方便整定计

算。由于距离元件受系统运行方式的影响较小, 故也可以提高保护的适应性。为保证保护的安全性, 启动元件可按如下规则整定。

启动元件整定规则:

启动元件的距离定值 = $\min(1.5Z_L, Z_L + Z_M)$ 。

其中, Z_L 、 Z_M 分别为本线路和相邻线路的阻抗。上述整定值可确保整定范围覆盖本线路全长, 同时不超过相邻线路全长。

1.5 弱馈侧保护联跳

当配电网发生线路故障时, 流过远离主电源侧保护的短路电流可能很小, 启动元件仍存在拒动的可能。为提高保护动作的可靠性, 定义如下规则。

保护联跳规则: 保护一旦发出跳闸命令, 则同时向线路对侧保护发出联跳(Transfer Trip)命令。

以图 5(a)的线路故障为例, 流过 PR1.1、1.3 的短路电流由大电网提供, 启动元件能可靠动作; 而 PR2.1、2.3 处短路电流由下游 DG 提供, 启动元件可能拒动。为此, PR1.1 在发出跳闸命令的同时向对侧 PR2.1 发联跳命令, 可以保证故障被可靠切除。

对于其他各种异常情况的分析, 如电压互感器断线、方向元件判别错误、保护拒动、断路器失灵以及通信失效等, 可参考文献[14], 本文不再赘述。

2 实例分析

2.1 算例

本节以崇明岛配电自动化示范工程的某示范区配电网为例, 进一步分析和验证本文的保护方案。示范区配电网拓扑如图 6 所示, 某 35 kV 变电站有 2 条 10 kV 出线。社区微网是有源的, 其余负荷无源。8.2 处断路器常开, 配电网保持开环运行状态。根据当前拓扑自动生成图 7(a)所示的树结构。根据参考方向整定规则, 各保护的参考方向已在图中标出。

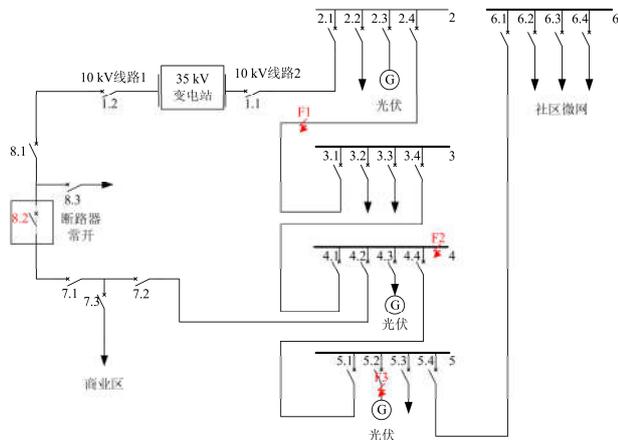
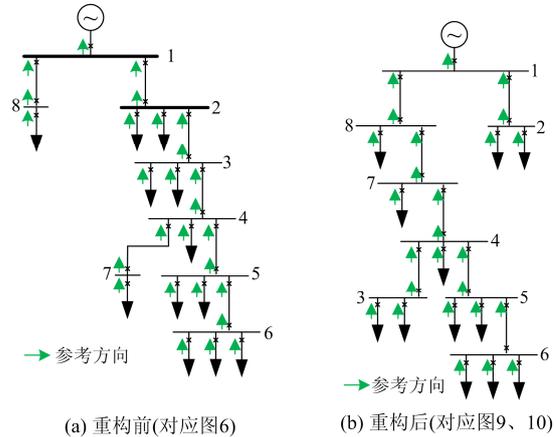


图 6 示例配电网拓扑图

Fig. 6 Diagram of the sample distribution grid



(a) 重构前(对应图6) (b) 重构后(对应图9、10)

图 7 示例配电网树形结构

Fig. 7 Tree diagram of the sample distribution grid

2.2 故障分析

图 6 中设置了 F1~F3 三处故障, 下面分别分析。

情况 1: 线路故障(F1 点)

当配电网线路发生故障时, PR2.4 检测到电流方向与参考方向相反, 则按照闭锁方向规则, 顺参考方向发出闭锁信号, 将母线 2 其他相连元件的所有保护 PR2.1~PR2.3 闭锁; PR3.1 检测到电流方向与参考方向相同, 则逆参考方向闭锁 PR3.2~3.4。其他保护闭锁方向如图 8 所示。可见, 只有故障线路两侧保护 PR2.4、PR3.1 没有收到闭锁信号, 且启动元件启动, 最终 PR2.4、PR3.1 动作切除故障。

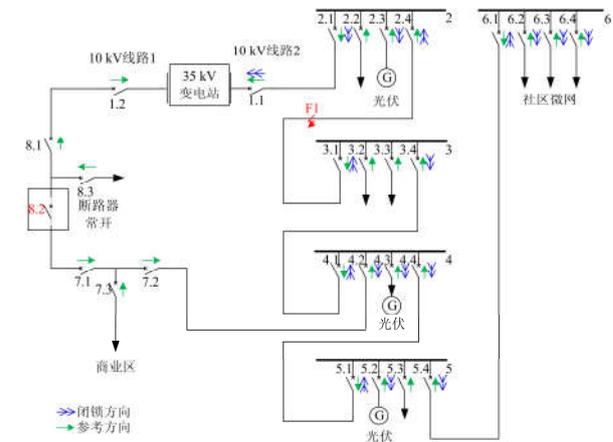


图 8 F1 点故障时各保护闭锁方向示意图

Fig. 8 Diagram of interlocking directions when F1 faulted

故障切除后, 配电网发生故障重构。设重构方案为 8.2 处断路器闭合, 变电站 2-3 间线路停运, 变电站 3~6 由 10 kV 线路 1 供电, 相应的电网拓扑如图 9, 配电网开环运行。故障重构后的树结构见图 7(b)。后面两种故障情况分析皆基于该树结构。

情况 2: 母线故障(F2 点)

在配电网重构后，如果母线 4 发生故障，则根据闭锁方向规则，PR4.1—PR4.4 的闭锁方向背离母线 4，并分别闭锁对侧线路保护，如图 9 所示。最终，母线各侧保护 PR4.1—PR4.4 动作切除故障。可见，本保护方案无需配置专门的母线保护，即可以快速切除母线故障。

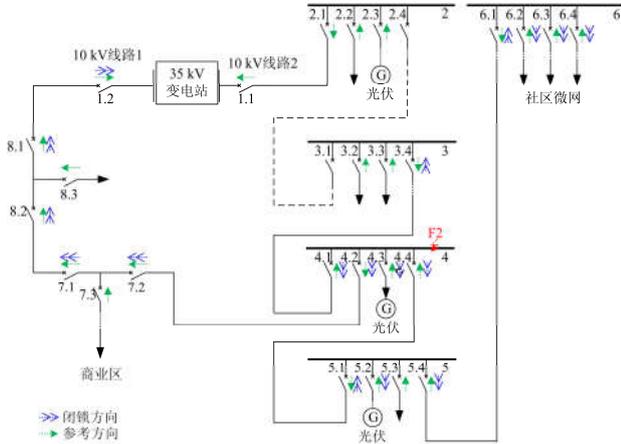


图 9 F2 点故障时各保护闭锁方向示意图

Fig. 9 Diagram of interlocking directions when F2 faulted

情况 3: 负荷/DG 侧故障(F3 点)

设在配电网重构后，DG 侧发生故障，PR5.2 感受到的故障电流与参考方向相反，因此顺着参考方向发出闭锁信号，将母线 5 上其他相连元件的保护 PR5.1、PR5.3 和 PR5.4 闭锁。所有保护闭锁情况如图 10 所示。最终，PR5.2 动作切除故障。

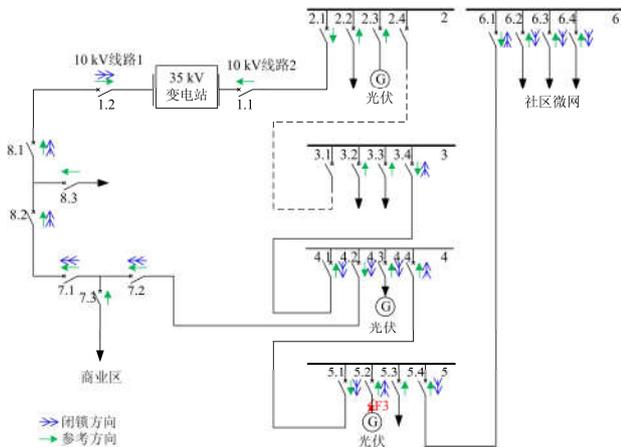


图 10 F3 点故障时各保护闭锁方向示意图

Fig. 10 Diagram of interlocking directions when F3 faulted

3 结论

本文针对主动配电网的需求，根据其树状拓扑结构的特征，提出了一种原理简单、经济可靠的继电保护方案，该方案对于不同的故障元件、DG 类

型以及渗透率、配电网运行模式、配电网重构等都具有自适应性。保护方案具有如下特点：

- (1) 本方案基于方向闭锁原理实现了线路故障的全线速动切除，较之差动保护具有明显的经济性，适合在主动配电网中大量采用。
- (2) 采用本方案后，无需额外配置专门的母线保护，能够快速切除母线故障，避免扩大停电范围。
- (3) 针对主动配电网中短路电流水平变化很大的特点，利用全阻抗继电器作为启动元件，能够适应不同的 DG 类型以及渗透率，支持配电网的并网/孤岛运行模式的切换，同时简化了整定计算。
- (4) 针对主动配电网所固有的弱电源问题，设计了联跳功能，提高了远离主电源侧保护的可靠性。
- (5) 参考方向的整定规则基于配电网的树状结构特征，拓扑分析简单，适应主动配电网动态重构的需要。

参考文献

- [1] 范明天, 张祖平, 苏傲雪, 等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 12-18, 5. FAN Mingtian, ZHANG Zuping, SU Aoxue, et al. Enabling technologies for active distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 12-18, 5.
- [2] 李鹏, 张玲, 王伟, 等. 微网技术应用与分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 109-115. LI Peng, ZHANG Ling, WANG Wei, et al. Application and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 109-115.
- [3] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 2016, 1: 7pp. DOI 10.1186/s41601-016-0025-x
- [4] MANDITEREZA P T, BANSAL R. Renewable distributed generation. The hidden challenges—a review from the protection perspective[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 1457-1465.
- [5] HUANG Junhui, GE Shaoyun, HAN Jun, et al. A diagnostic method for distribution networks based on power supply safety standards[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp. DOI 10.1186/s41601-016-0020-2
- [6] USTUN T S, OZANSOY C, ZAYEGH A. A central microgrid protection system for networks with fault current limiters, environment and electrical engineering[C] // International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2011: 1-4.

- [7] NADERI S B, NEGNEVITSKY M, JALILIAN A, et al. Efficient fault ride-through scheme for three phase voltage source inverter-interfaced distributed generation using DC link adjustable resistive type fault current limiter[J]. *Renewable Energy*, 2016, 92: 484-498.
- [8] 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 Ruisheng. 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.
- [9] 高厚磊, 李娟, 朱国防, 等. 有源配电网电流差动保护应用技术探讨[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(5): 40-44.
GAO Houlei, LI Juan, ZHU Guofang, et al. Study on application technology of current differential protection in active distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(5): 40-44.
- [10] 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. A differential protection scheme to apply to active distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(12): 104-109.
- [11] 刘凯, 李幼仪. 主动配电网保护方案的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(16): 2584-2590.
LIU Kai, LI Youyi. Study on solutions for active distribution grid protection[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(16): 2584-2590.
- [12] 李斌, 于绚, 薄志谦, 等. 含分布式电源的闭环配电网保护方案[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(7): 79-84.
LI Bin, YU Xuan, BO Zhiqian, et al. Investigation of protection schemes for closed loop distribution network with distributed generators[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(7): 79-84.
- [13] 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.
- [14] 张沛超, 范忻蓉, 李鑫, 等. 智能配电网的自适应级联方向闭锁保护方案[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(1): 81-88.
ZHANG Peichao, FAN Xinrong, LI Xin, et al. Adaptive directional interlocking protection scheme for smart distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(1): 81-88.
- [15] 易海川, 张彼德, 王海颖, 等. 提高 DG 接纳能力的配电网动态重构方法[J]. *电网技术*, 2016, 40(5): 1431-1436.
YI Haichuan, ZHANG Bide, WANG Haiying, et al. LV distribution network dynamic reconfiguration method for improving distribution network's ability of accepting DG[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(5): 1431-1436.
- [16] 林济铿, 潘光, 李云鹏, 等. 基于基本树的网络拓扑放射性快速判断方法及配网重构[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(25): 156-166, 23.
LIN Jikeng, PAN Guang, LI Yunpeng, et al. A fast determination method of topological radial property of distribution network based on basic-tree and distribution network reconfiguration[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(25): 156-166, 23.
- [17] 韩国政, 徐丙垠, 索南加乐, 等. 基于 IEC 61850 的配网自动化通信技术研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(2): 62-66.
HAN Guozheng, XU Bingyin, SUONAN Jiale, et al. Communication technology for distribution automation based on IEC 61850[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(2): 62-66.
- [18] 梅德冬, 樊瑞, 周斌. IEC 61850 模型信息的规则表达与校验研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(3): 131-136.
MEI Dedong, FAN Rui, ZHOU Bin. Research on regular expressions and check of IEC 61850 model information[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(3): 131-136.

收稿日期: 2016-09-13; 修回日期: 2016-11-25

作者简介:

范忻蓉(1991—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为智能配电网新型保护原理; E-mail: fanvan32@sjtu.edu.cn

张沛超(1970—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统保护和控制、智能变电站; E-mail: pczhang@sjtu.edu.cn

方陈(1983—), 男, 博士, 主要研究方向为智能电网、分布式新能源和微网优化运行。E-mail: fangc02@gmail.com

(编辑 张爱琴)