

含分布式电源的智能配电网保护控制方案

唐志军^{1,2}, 邹贵彬³, 高厚磊³, 仝冰冰³

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 福建电力科学研究所, 福建 福州 350007;
3. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 分布式电源 (DR) 在配电网中的高度渗透, 使传统的配网保护与控制面临极大的困难, 对此提出了一种基于高级馈线终端单元 (Advanced Feeder Terminal Unit, AFTU) 的保护控制技术。根据 DR 容量和负荷大小, 预先将含 DR 的配电网划分为若干能孤岛运行的区域。在馈线出口、DR 接入位置以及区域边界处装设断路器和 AFTU, AFTU 之间通过光纤网络互联。各 AFTU 实时检测本地信息, 并与相邻的 AFTU 进行信息交互。根据本地及临近的信息, 可快速定位故障区段, 实现故障的隔离及孤岛运行。利用相关的信息, 设计了重合闸和孤岛再并网控制策略。案例分析说明了所提分布式保护控制方案的可行性。
关键词: 分布式电源; 高级馈线终端; 分布式保护控制; 重合闸; 孤岛

Protection and control scheme for smart distribution grid with distributed resource

TANG Zhi-jun^{1,2}, ZOU Gui-bin³, GAO Hou-lei³, TONG Bing-bing³

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2. Electric Power Research Institute of Fujian Electric Power Limited Company, Fuzhou 350007, China;
3. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The protection and control of distribution grid faces a serious challenge due to the integration of high penetration rate distributed resource (DR). This paper proposes an advanced feeder terminal unit (AFTU) based protection and control scheme. According to the capacities of DR and load, the distribution network is divided into several zones in advance, which may operate in islanded mode. At the beginning of feeder, the point of common coupling of DR and the border of zone, the circuit breakers and AFTUs are installed, and the adjacent AFTUs are connected by the optic fiber. Each AFTU detects the local information and exchanges the information with the adjacent AFTUs in real time. According to the information, AFTU can fast locate the fault section, and realizes the isolation of fault section and the islanded operation. Using the related information, the control strategy of reclose and re-connection of DR is design. Case analysis shows that the proposed protection and control scheme is feasible.

This work is supported by Independent Innovation Foundation of Shandong University of China (No. 2012ZD005).

Key words: DR; AFTU; distributed protection and control; reclose; island

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)08-0009-06

0 引言

传统配电网的网架结构是辐射状的, 其特征是由单电源供给下游一条或若干条馈线, 而配网保护也是按照单一的潮流方向进行整定。为满足不断增长的负荷需求, 并有效应对化石能源危机, 通过将 DR 就地直接接入配电网成为首选。DR 就地接入可改善电能质量、提高供电可靠性并降低线路损耗,

但同时也为配网的保护控制带来了一系列的问题^[1-7]。随着 DR 规模、容量的增大, 为最大限度地发挥 DR 的发电能力, IEEE 发布了解决孤岛问题的新标准。新标准不再禁止有意识的孤岛存在, 而是鼓励电网运营商和用户尽可能通过技术手段实现分布式电源的孤岛运行^[8-9]。此举对 DR 发电商、电网公司和用户均有利, 但对配网的保护控制提出了更高的要求。对此, 必须研究满足含 DR 配电网的新型保护控制方法。

针对含 DR 的配网保护问题, 近年来国内外学者开展了相关研究, 并提出了一些解决措施。文献

基金项目: 山东大学自主创新基金项目 (2012ZD005); 福建省电力有限公司科技项目 (201311144)

[10-11]提出了含 DR 配电网的故障区间定位新方法；文献[12]提出了含 DR 配电网自适应保护新策略。文献[13-14]提出了利用配电自动化系统实现含 DR 的配电网保护，由安装于变电站中的主保护完成。该方法通过预先划分网络区段，并离线计算各种故障情形下的运行数据，然后根据在线测量结果，分析确定故障区域并隔离。该方法能够解决含 DR 的配网保护问题，但需要整个保护区域内大量的同步电流数据，因此计算量大，动作速度慢。文献[15]提出了一种含分布式发电的配电网自适应过电流保护，通过上下游方向保护的时限配合以及实时检测网络状态实现保护功能，但该保护方法仅仅适应三相短路故障，而且要预先判断是并网状态还是孤岛状态。文献[16]提出了含 DR 的配电网快速电流保护方案，为每个保护配置反映两侧电流的方向元件以及反映对端保护动作信息的加速模块，通过上下游保护的时限配合实现故障的隔离。对于短的馈线，保护具有良好的动作性能。但对于安装多开关的长馈线，保护的速动性将受到影响。文献[17]提出了一种基于故障相关区域自适应划分的分布式保护新原理，通过搜索算法，借助通信手段，定位故障区段并切除故障区域，该方法的动作性能受配网节点的数量和通信速率的影响。文献[18]提出了考虑 DR 随机性的配电网保护方案，可不受 DR 的容量、接入位置和数量的影响，其故障算法是基于 PMU 采样值的故障在线计算，需要大量实时信息的测量、处理和传输，因此对通信系统的要求较高。

随着配电网的改造和升级，以及光纤通讯技术在配网中的广泛应用，为有通道保护提供了条件，为此提出了一种基于当地和相邻信息的含 DR 配电网的保护控制方案。预先将配电网划分为若干区域，区域间配置智能开关和 AFTU，各 AFTU 通过光纤网络进行信息交互，根据本地电气量信息和相邻的信息，可快速定位故障区域，实现故障的隔离。利用有关 AFTU 之间的信息交互，能够自动确定重合闸与孤岛再并网控制策略。最后，用一个案例说明了所提方案的可行性。

1 DR 接入方式及其对保护的影响分析

1.1 DR 的并网方式

根据 DR 的容量不同，DR 接入配电网的电压等级一般为 400 V~110 kV。各电压等级配电网的接线方式不同，DR 的接入也有所差异，主要通过变电站母线接入和通过馈线接入，如图 1 所示。当 DR 容量较大时，一般接入 35 kV 或更高电压等级系统中，如图 1 中的 DR1；容量较小时一般接入 10 kV

母线或直接接入馈线，如 DR2 和 DR3；而更低容量的 DR 可直接接入 400 V 低压配网。

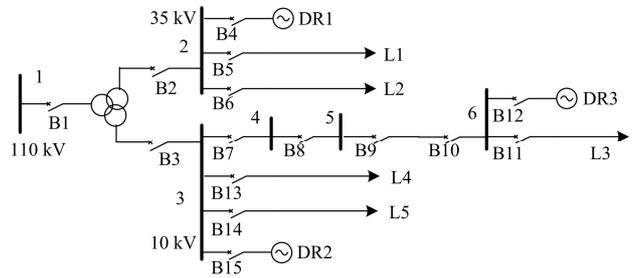


图 1 DR 接入配网示意图

Fig. 1 Schematic of DR connected to distribution grid

1.2 DR 接入对保护控制的影响

当系统正常运行时，DR 与系统电源一起为下游负载供电。当系统发生故障时，DR 的接入改变了原来配网故障时短路电流水平并影响到各节点的电压与电流的分布，对保护系统的影响主要有：① 导致保护拒动或误动。如图 1 所示，若馈线 L3 末端发生故障，DR3 提供短路电流并抬高节点 6 的电压，由此导致母线 3 和 6 之间的电压差减小，可能引起 L3 出口保护拒动。若馈线 L4 上发生故障，DR3 提供的反向短路电流流过 L3 出口保护，可能导致该保护误动。② 影响断路器的重合闸。在线路发生故障时，若主系统侧断路器跳开而 DR 继续给线路供电，则会影响到故障电弧的熄灭，导致重合闸失败。当位于系统和 DR 之间的断路器重合闸时，DR 仍然没有解列，可能造成非同期合闸，由此引起的冲击电流导致重合困难，还可能破坏电气设备。③ 影响备用电源的自投。如果系统电源中断而 DR 没有及时解列，则由于母线电压的继续存在，将会影响备用电源的正确判断进而导致拒动。④ 影响孤岛内线路的保护。孤岛运行后岛内的拓扑结构和潮流数据均发生较大的变化，并网运行时对相关线路设置的保护定值在孤岛运行时可能不再适应。例如图 1 中变压器发生故障且在开关 B3 断开时，若 DR2 和 DR3 能够维持该区域内的功率平衡，则可形成孤岛运行模式。此时，馈线 L3、L4 和 L5 的原保护定值就无法匹配该运行模式。

可见，DR 接入配网对传统配电网的保护带来了严峻的考验，必须提出新的应对措施。

2 分布式保护控制方案

2.1 方案的整体规划

在未来的智能配电网中，DR 将高度渗透。当系统故障时，DR 需具备低电压穿越能力和孤岛运

行能力, 由此保证区域内全部或重要负荷不失电, 提高供电可靠性。为此, 在配网规划时就应该科学设计, 结合 DR 的种类、接入位置、容量大小以及附近的负荷情况, 预先将配电网分成若干区域, 进行计划孤岛的划分。考虑到配电网的投资成本, 不可能在馈线的每个分段处都装设断路器, 因此在网络划分后, 可在系统内两个相邻区域的边界处安装 AFTU 和智能开关 (Intelligent Breaker, IB), AFTU 实时检测当地电气量信息和 IB 的位置信息, 具备与其他 AFTU 进行信息交互、故障诊断、保护控制等功能。IB 接收 AFTU 的指令, 具有切断故障电流、重合闸以及检同期合闸等能力。图 2 是整体方案的示意图, 其中虚线圆内部分是计划孤岛的划分区域; IB1、IB2、IB3 分别是线路出口、边界和 DR 并网点处的智能开关, AFTU1~AFTU3 是相应的智能终端单元。

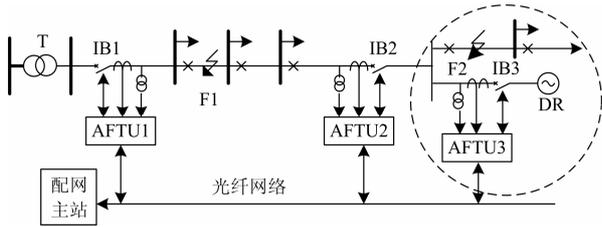


图 2 整体方案的示意图

Fig. 2 Schematic of the whole scheme

当具备上述条件的配网发生故障时, AFTU 根据本地信息及相邻信息可快速定位故障区段, 并采取相应措施实现故障区段隔离、重合闸、孤岛运行以及孤岛的再并网等系列操作。

2.2 配电网的区域划分

对配电网进行区域划分, 需要根据配网的拓扑结构、DR 的容量和类型以及负荷情况而综合分析及合理规划, 其前提为: 一是要保证故障时具有将故障区域与系统分开的能力, 确保非故障网络的安全稳定运行; 二是要满足孤岛内分布式电源与负荷的匹配关系。

当 DR 接入一个辐射状的配电网之后, 系统的物理结构仍然是辐射状的。若该系统发生故障, 则故障区段将被隔离, 上下游之间的电气设备连接也被切断。因此, 可以建立一个由下游 DR 接入的区域进行孤岛运行的网络分区计划, 且最大程度地发挥 DR 的发电能力。为此, 分区时从 DR 接入的母线开始向该分支的下游延伸, 直到满足区域内预计平均负荷与 DR 容量相匹配为止。当到达分支末端而 DR 的容量仍大于区域内预计负荷时, 网络划分就向上游延伸, 直至 DR 容量与区域负荷匹配。当然, 在分区时, 考虑就近原则, 孤岛内可以包含

若干个 DR, 以发挥各 DR 的协同发电效应。由此, 配网被分成两种类型区域: 其一, 包含 DR 的区域, 区域内要满足功率平衡方程 (1)。

$$\sum_{i=1}^m P_{DRi} = \sum_{r=1}^n P_{Lr} \quad (1)$$

式中: P_{DRi} 是区域内第 i 个 DR 的发电容量; P_{Lr} 是区域内第 r 个预计负荷容量。对于该类区域, 应至少配置一台具有频率和电压调整能力的 DR, 以满足孤岛运行时调频和调压的要求; 其二, 位于孤岛运行区域之间的不含 DR 的区域, 该区域内的负荷由主电源或相邻区域的电源供电。

2.3 保护原理

对含 DR 的配电网进行合理分区后, 应进一步分析不同位置故障时的故障特征, 以期发现解决措施。如图 2 所示, 规定由电源端指向下游负荷的方向为电流的正方向, 靠近系统电源端的开关为上游开关, 而远离系统端的开关为下游开关, 下面分析不同位置故障时的故障特征。当 F1 点发生故障时, IB1 流过由系统电源 T 提供的正方向的短路电流, 短路功率的方向为正, 而 IB2 流过由 DR 提供的反方向的短路电流, 其短路功率的方向为负; 当 F2 点发生故障时, IB1 和 IB2 均流过由 T 提供的正向短路电流, 短路功率的方向均为正, 同时 IB3 流过由 DR 提供的正向短路电流。以边界开关为分界点, 总结不同位置故障时的特征如下:

(1) 当某边界开关的下游区域发生故障时, 边界开关和上游开关流过方向相同、幅值增大的故障电流, 短路功率方向均为正。

(2) 当某边界开关的上游区域发生故障时, 边界开关和上游开关均流过故障电流, 但二者的短路功率方向相异。

当配网正常运行时, 边界开关和上游开关仅流过正常的负荷电流。由此, AFTU 通过实时检测本地开关流过的电气量信息, 并与相邻 AFTU 进行信息交互, 就可定位故障区域, 实现快速的保护功能。

某 AFTU (不包括 DR 出口处的 AFTU) 对故障区域的判别流程如图 3 所示, 对于系统电源侧的 AFTU 则只与下游的 AFTU 交换信息, 而位于配网末端的 AFTU, 则只要满足过流条件, 即可快速跳闸。对于 DR 出口处的 AFTU, 由于 DR 始终提供正向电流, 其动作策略将在下面讨论。

由图 3 可知, AFTU 对故障的判别主要包括故障起动判别、过电流判别和功率方向比较, 对此分别进行分析。

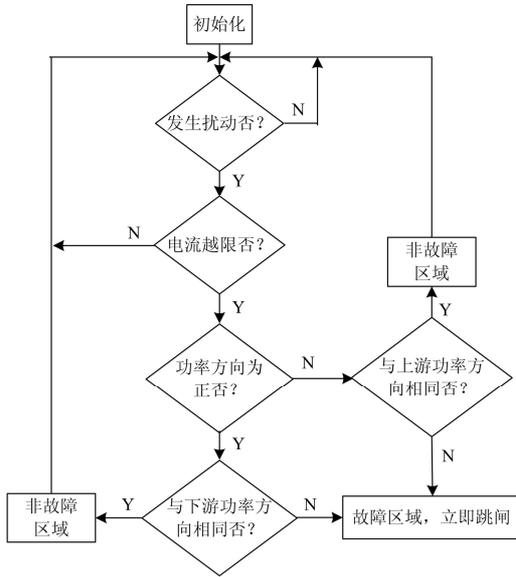


图3 故障区域判别流程

Fig. 3 Flowchart of identifying faulty zone

(1) 故障起动判别。在配电网中，负荷投切较为频繁，因此 AFTU 中的故障起动元件可采用故障分量算法^[19]，如式 (2) 所示。

$$\Delta I_{\varphi} = \left| |i(k) - i(k - N)| - |i(k - N) - i(k - 2N)| \right| \quad (2)$$

式中： ΔI_{φ} 是相电流的起动量， φ 代表 A 相、B 相或 C 相； $i(k)$ 是电流在时刻 k 的采样值； N 为一个工频周期的采样点数。起动判据如式 (3) 所示。

$$\Delta I_{\varphi} \geq I_{dz} \quad (3)$$

式中， I_{dz} 为固定门槛， $I_{dz} = (0.1 \sim 0.3)I_e$ ， I_e 为额定电流。

(2) 故障区域判别。当某 IB 的下游线路或上游线路发生相间或三相故障时，流过该 IB 的电流的幅值都会增大，只是短路功率的方向相异。因此，通过判别本地电流是否越限，并与流过上、下游开关的功率方向进行比较，就可实现故障区域的快速判别，如图 3 所示判别流程。为提高保护的灵敏性，并兼顾上下游保护之间的关系，过电流的阈值可按照最大负荷电流进行整定，如式 (4) 所示。

$$I_{\varphi} > I_{L.max} \quad (4)$$

式中： I_{φ} 是相电流的有效值； $I_{L.max}$ 为最大负荷电流。

当 IB 为末端开关时，末端 AFTU 只要判别出满足过流条件，即可快速跳闸而不需要上游 AFTU 的信息。对于 DR 出口处的 AFTU，其动作策略为：此 AFTU 与 DR 所在区域的上、下游边界开关的 AFTU 进行信息交互，边界 AFTU 负责识别故障区

域，并将故障信息通知 DR 出口处的 AFTU；若故障发生在 DR 所在区域内，AFTU 立即命令 DR 的并网开关跳闸；若故障发生在相邻区域内，则闭锁跳闸。

(3) 后备保护。当识别出故障区域后，相关 IB 应该立即跳闸，隔离故障区域。若发生保护拒动或开关失灵，则应由相邻的 AFTU 作为后备保护并切除故障。在此，提出后备保护动作策略：当某 AFTU 判别出其保护区域内发生故障后，将故障信息发给相邻的上游或下游 AFTU，相邻的 AFTU 经过延时后若发现仍存在故障电流，则控制本地开关跳闸，实现相邻 AFTU 的后备保护功能。

2.4 重合闸、故障隔离与孤岛再并网

当相邻的两个 AFTU 判别出故障位于它们之间的区域后，二者立即发出跳闸命令，跳开各自侧的 IB。如果能够进行重合闸操作，则由靠近上游的 AFTU 经延时后发出重合闸命令。若是永久性故障，则加速跳闸，故障区域被永久隔离，下游区域则根据预先设定的计划孤岛方案，进入孤岛运行模式。当故障处理完毕后，首先由系统侧的 IB 合闸，边界 IB 是否直接合闸则根据其下游区域是否为有压状态。若下游是孤岛运行区域或由其他电源供电，则边界 IB 要检同期合闸，实现区域间的再并网运行；若下游区域处于无压状态，则此 IB 可直接合闸。如果此故障是瞬时性的，上游 IB 重合成功。但下游 IB 是否直接合闸，控制策略与上述相同。

3 案例分析

图 4 是由系统电源、分布式电源 DR1 和 DR2 以及负荷构成的 10 kV 配电网，其中 DR1 和 DR2 分别由不同类型的分布式电源组成，具备孤岛运行的能力。根据网络划分原则，此网络共划分为 4 个区域，其中区域 2 和 4 是计划孤岛区；在 IB1~IB6 处配置相应的高级馈线终端单元 AFTU1~AFTU6，IB2、IB3 和 IB4 分别是区域 1 和 2、区域 2 和 3 以及区域 3 和 4 的分界开关。

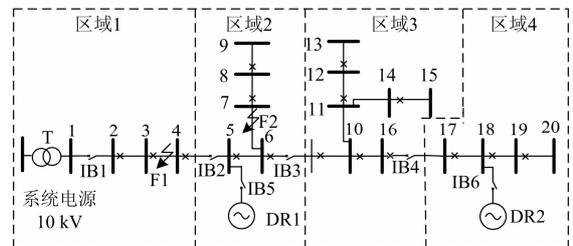


图4 含 DR 的配网结构和故障设置点

Fig. 4 Configuration of distribution grid with DR and fault positions

规定电流的正方向由电源侧指向负荷, 当不同位置发生故障时, 保护控制情况如下。

(1) 区域 1 内部故障。若 F1 点发生相间或三相故障, AFTU1~AFTU6 都会检测到电流突变, 均会起动。由图 3 可知, 只有 AFTU1 和 AFTU2 满足故障跳闸条件, 立即跳开 IB1 和 IB2, 延时后由 IB1 重合闸。若故障为瞬时性的, IB1 重合成功。随后, AFTU2 检测到区域 1 电压恢复, 则检同期后控制 IB2 合闸, 系统回到正常运行状态。若为永久性故障, IB1 加速跳闸。根据网络划分情况以及预先设定的控制策略, 在 AFTU1 向 IB1 发出加速跳闸命令的同时, 向 AFTU3 和 AFTU4 发出故障信息, 并由 AFTU3 和 AFTU4 控制其开关 IB3 和 IB4 跳闸。由此, 故障被隔离, 区域 3 处于停电状态, 而区域 2 和 4 处于孤岛运行模式。

故障处理完毕后, IB1 首先合闸, 区域 1 供电恢复。由于区域 2 处于孤岛运行状态, AFTU2 检测到区域 1 电压恢复后, 启动检同期策略并控制 IB2 合闸, 区域 2 由孤岛运行转为再并网运行。由于区域 3 为停电状态, IB3 可直接合闸, 区域 3 供电恢复。由于区域 4 为孤岛运行状态, AFTU4 检测到区域 3 电压恢复后, 也启动检同期策略并控制 IB4 合闸, 区域 4 也由孤岛运行转为再并网运行。

(2) 区域 2 内部故障。若 F2 点发生相间故障, AFTU1~AFTU6 都会检测到电流突变, 均会起动。根据图 3 故障区域识别流程, AFTU2 和 AFTU3 满足故障跳闸条件, 控制相应的 IB2 和 IB3 跳闸, 同时将故障区域信息通知 AFTU5, 由 AFTU5 控制 IB5 跳闸。因为故障发生在计划孤岛内, 当 IB5 跳闸后, IB2 再启动重合闸, 重合是否成功视故障性质而定。由于 IB4 是末端开关, 不管 AFTU4 是检测到过流还是收到 AFTU3 的故障信息, 都能控制 IB4 跳闸。此后, 区域 2 和 3 被隔离, 处于失电状态, 而区域 1 由系统供电, 区域 4 由 DR2 供电。

当故障处理完毕后, 首先由 IB2 和 IB3 合闸, 区域 2 和 3 供电恢复。AFTU5 检测到区域 2 电压恢复, 随即启动检同期策略, 控制 IB5 合闸, DR1 重新并网。当 AFTU4 检测到区域 3 电压恢复时, 也启动检同期策略, 并控制 IB4 合闸, 区域 4 由孤岛运行转为再并网运行。

由此可知, 无论网络的何处发生故障, 各 AFTU 都能根据故障区域判别流程和控制策略, 进行故障判别和相应的控制操作, 实现故障的隔离及恢复。

4 结论

高渗透率的 DR 接入配网及由此带来的灵活多

变的配网运行方式, 对配电网的保护控制技术提出了更高的要求, 对此研究, 取得的主要成果如下:

(1) 设计了保护控制的整体方案。基于节省投资成本, 根据区域划分原则, 仅在电源接入点、区域分界处装设断路器和高级馈线终端单元, 并由其完成保护控制功能。

(2) 提出了分布式纵联保护原理。借用通信手段, 利用当地电流及功率方向信息和相邻信息可快速判别故障区域; 同时, 制定了后备保护策略。

(3) 设计了重合闸和孤岛再并网控制策略。根据故障区域、DR 接入位置, 相关 AFTU 实施不同的重合闸方式。通过实时检测断路器两侧的电压状况, 考虑区域运行模式, 有关 AFTU 实施相应的孤岛再并网策略。

参考文献

- [1] 黄伟, 雷金勇, 夏翔, 等. 分布式电源对配电网相间短路保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 93-97. HUANG Wei, LEI Jin-yong, XIA Xiang, et al. Influence of distributed generation on phase-to-phase short circuit protection in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 93-97.
- [2] 王希舟, 陈鑫, 罗龙, 等. 分布式发电与配电网保护协调性研究[J]. 继电器, 2006, 34(3): 15-19. WANG Xi-zhou, CHEN Xin, LUO Long, et al. Research on the coordination of distributed generation and distribution system protection[J]. Relay, 2006, 34(3): 15-19.
- [3] DOYLE M T. Reviewing the impacts of distributed generation on distribution system protection[C] // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2002, 1: 103-105.
- [4] BARKER P P, DE MELLO R W. Determining the impact of distributed generation on power systems: part 1-radial distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15: 486-493.
- [5] 杨辉. 在含有分布式电源的配电系统中继电保护协调问题研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [6] 黄学良, 刘志仁, 祝瑞金, 等. 大容量变速恒频风电机组接入对电网运行的影响分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 142-149. HUANG Xue-liang, LIU Zhi-ren, ZHU Rui-jin, et al. Impact of power system integrated with large capacity of variable speed constant frequency wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010,

- 25(4): 142-149.
- [7] 冯希科, 郇能灵, 宋凯, 等. DG 容量对配电网电流保护的影响及对策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 156-160.
FENG Xi-ke, TAI Neng-ling, SONG Kai, et al. Research on the impact of DG capacity on the distribution network current protection and countermeasure[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 156-160.
- [8] 麻秀范, 崔换君. 改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 175-181.
MA Xiu-fan, CUI Huan-jun. An improved genetic algorithm for distribution network planning with distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 175-181.
- [9] 张琦, 孙向东, 钟彦儒, 等. 用于分布式发电系统孤岛检测的偶次谐波电流扰动法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 112-119.
ZHANG Qi, SUN Xiang-dong, ZHONG Yan-ru, et al. Even harmonic current disturbing method for islanding detection in the distributed power generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 112-119.
- [10] 徐子华, 王艳松. 含分布式电源的配电网故障区间定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 22-27.
XU Zi-hua, WANG Yan-song. Study of fault region locating method for distribution networks with distributed generators[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 22-27.
- [11] 唐斐, 陆于平. 分布式发电系统故障定位新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 62-68.
TANG Fei, LU Yu-ping. A new fault location algorithm for distributed generation system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 62-68.
- [12] 余琼, 余胜, 李晓晖. 含分布式电源的配网自适应保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 110-115.
YU Qiong, YU Sheng, LI Xiao-hui. An adaptive protection scheme for meshed distribution system with DG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 110-115.
- [13] JAVADIAN S A M, HAGHIFAM M R. Protection of distribution networks in presence of DG using distribution automation system capabilities[C] // Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2008: 1-6.
- [14] JAVADIAN S A M, HAGHIFAM M R. Implementation of a new protection scheme on a real distribution system in presence of DG[C] // Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008: 1-7.
- [15] MAHAT P, CHEN Zhe, BAK-JENSEN B, et al. A simple adaptive overcurrent protection of distribution systems with distributed generation[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2011, 2(3): 428-437.
- [16] 孙景钊, 李永丽, 李盛伟, 等. 含分布式电源配电网的快速电流保护方案[J]. 天津大学学报, 2010, 43(2): 102-108.
SUN Jing-liao, LI Yong-li, LI Sheng-wei, et al. A fast current protection scheme for distribution system with distributed generations[J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(2): 102-108.
- [17] 张青杰, 陆于平. 基于故障相关区域自适应划分的分布式保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 39-43, 52.
ZHANG Qing-jie, LU Yu-ping. A new distributed protection principle based on adaptive division for relevant fault area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 39-42, 52.
- [18] 李乃永, 梁军, 赵义术, 等. 考虑分布式电源随机性的配电网保护方案[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 33-38.
LI Nai-yong, LIANG Jun, ZHAO Yi-shu, et al. Protection schemes for distribution network considering the randomness of distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 33-38.
- [19] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.

收稿日期: 2013-07-24; 修回日期: 2013-10-08

作者简介:

唐志军(1973-), 男, 硕士研究生, 高工, 从事电力系统继电保护与自动化的生产和管理工作;

邹贵彬(1971-), 男, 通信作者, 博士, 教授, 从事电力系统继电保护的教学和研究工作; E-mail: guibinzou@sdu.edu.cn

高厚磊(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力系统保护与控制的教学和研究工作。