

## 微电网继电保护方法探讨

张宗包<sup>1</sup>, 袁荣湘<sup>1</sup>, 赵树华<sup>2</sup>, 陈建锋<sup>2</sup>, 彭炽刚<sup>2</sup>, 方永康<sup>2</sup>, 黄凯荣<sup>2</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2 广东电网公司江门供电局, 广东 江门 529030)

**摘要:** 针对微电网控制灵活、短路故障电流小, 潮流双向流动等特点, 探讨了微电网的继电保护方法。通过研究 CERTS 微电网模型, 讨论了微电网并网对配电网电流保护和重合闸的影响, 提出了微电网系统级保护和单元级保护的概念。在微电网与公共配电网的连接点(PCC)处配置系统级保护; 结合小电流接地故障检测技术, 在微电网内部配置单元级保护, 并给出了三种具体的保护方案, 以实现微电网的继电保护。并对现有的微电网继电保护方法进行归纳总结。

**关键词:** IEEE1547; 分布式发电(DG); 微电网(MG); 系统级保护; 单元级保护

### Research on micro-grid protection - a new power system

ZHANG Zong-bao<sup>1</sup>, YUAN Rong-xiang<sup>1</sup>, ZHAO Shu-hua<sup>2</sup>,

CHEN Jian-feng<sup>2</sup>, PENG Zhi-gang<sup>2</sup>, FANG Yong-kang<sup>2</sup>, HUANG Kai-rong<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Jiangmen Power Supply Company of Guangdong Power Grid, Jiangmen 529030, China)

**Abstract:** Considering that micro-grid (MG) can be controlled flexibly, its short circuit-current is limited and power float is bidirectional, this paper gives a new relay protection scheme of MG. Firstly, CERTS micro-grid model is presented. The impact on over current protection and reclosing in grid-connected mode is discussed. The MG protection contains two parts: system level protection and unit level protection. The system level protection is fixed at PCC and unit level protection is inner protection. By research on the detection of neutral ineffectively grounding fault system, three unit level protection schemes are presented in detail. At last, the present microgrid protection technology is discussed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50677046).

**Key words:** IEEE1547; distributed generation(DG); micro-grid(MG); system level protection; unit level protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0204-06

## 0 引言

随着经济的发展, 电力用户对供电可靠性、电能质量的要求越来越高。传统集中式发电面临严格限制, 不能在可接受的成本内满足敏感电力负荷需求。与此同时, 技术进步使分布式发电重新回到电力发展的舞台。分布式发电具有灵活、高效和环保优势, 提供更清洁、优质的电能。并且不需要进行电力输送所需的大量投资, 其经济性显著<sup>[1]</sup>。随着分布式发电逐渐植入配电网, 文献[2-4]指出不加约束地接入分布式发电电源会给配电网带来很多问题。因此, 人们提出微电网的概念, 希望通过将一个地区的分布式电源和其当地的负荷组成小型电

网, 利用有效的控制理论和保护方法, 解决分布式发电并网带来的问题。

对微电网的研究, 人们已经做了大量的工作。美国、欧洲、日本都建立了微电网示范工程<sup>[5-7]</sup>。其中最有代表性的是美国电力可靠性技术解决方案协会(CERTS)的微电网工程。文献[8-9]对微电网进行了定义: 微电网是一个以一系列分布式电源和群聚负荷组成一个简单电力系统, 为当地用户提供电力的小型电网。IEEE1547对微电网的各个环节都给出了相关标准。研究表明, 对于电力公司来说, 微电网扮演着一个“合法公民”的角色, 提高电力系统供电的可靠性; 对电力用户来说, 微电网可以提供高质量的电力资源, 热电联产(CHP)的微电网还可以提供热能需求<sup>[10-13]</sup>。

然而, 微电网的控制原理和保护技术复杂。首

**基金项目:** 国家自然科学基金(50677046)

先, 微电网短路故障电流小, 基于电力电子设备的微电网短路电流被限制在 2 倍额定电流以内, 传统的过电流保护不再适用于微电网, 必需寻求新的保护和控制原理; 其次, 微电网有并网运行和孤网运行两种模式, 微电网如何辨识公共电网的各种故障, 并做出正确的响应确定微电网是否需要孤网运行是一大难题<sup>[14]</sup>。所以, 必需研究新方法、新理论保障微电网的安全、稳定运行。

## 1 典型微电网的基本结构

图 1 是美国电力可靠性技术解决方案协会 (CERTS) 提出的微电网结构。

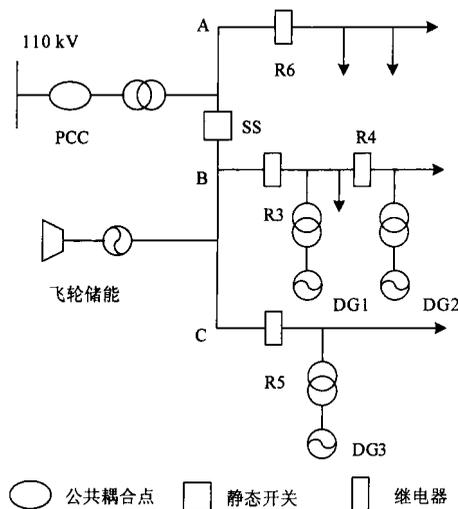


图 1 CERTS 的微电网模型

Fig.1 CERTS micro-grid architecture

如图 1, 一个微电网包括分布式电源 DG、储能单元、和用电负荷, 它以一个“合法公民”的身份接于配电网。DG 通过电力电子接口接在馈线上, DG 采用自制控制中的“对等”和“即插即用”运行模式<sup>[15-17]</sup>。微电网通过公共耦合节点 PCC (Point of Common Couple) 与公共配电网连接。PCC 经过降压变压器接在 10 kV 母线上。母线有三条辐射状馈线 A、B、C, 馈线电压等级一般为 10 kV 或更低。馈线 A 连接对电能质量要求不是很高的一般负荷; 馈线 B、C 所带的负荷为敏感负荷, 在母线分段处安装了一个静态开关 SS (Static Switch), 通过静态开关可以平滑地实现微电网孤网运行和并网运行模式的切换。

该模型反映了微电网的基本特征: (1) 分布式电源 DG 基于电力电子接口控制, 以保证电网运行的灵活性和稳定性。(2) 敏感负荷的电源双重配置, 既可以通过静态开关从公共电网取电, 也可以由 DG 供电, 保证了敏感负荷对电力可靠性和电能质

量的要求。(3) 敏感负荷通过静态开关 (SS) 与公共电网连接, 当公共电网发生故障时, 静态开关迅速动作, 微电网进入孤网运行, 保证对敏感负荷的持续电力供应。

然而, 微电网和分布式发电不同: (1) 微电网能有效地管理分布式发电。分布式电源 DG 通过电力电子接口接入微电网, 基于电力电子设备的分布式电源 DG 的控制速度更快, 短路点故障电流受到限制。(2) 微电网是一个整体, 它的控制保护复杂, 传统继电保护原理不适用于微电网, 必需采用新的保护技术。(3) 微电网并网运行模式和传统分布式发电都与公共电网相连, 但微电网 PCC 处静态开关 (SS) 的设置使得微电网对公共电网的影响降至最低。

## 2 微电网并网对配电网继电保护的影响

微电网并网运行必然会引起配电网电流大小、方向和分布发生变化, 继而对配电网继电保护带来不利影响。随着分布式发电的逐渐应用, 其对传统配电网的继电保护的影响已经引起人们越来越多的重视<sup>[18-20]</sup>。

文献[21-22]指出, 在低渗透时, 微电网的接入对公共电网的影响不大, 但随着渗透率  $\lambda$  的逐渐增大, 公共大电网将失稳。其中  $\lambda$  为微电网的渗透率,  $\lambda = P_m / P_s$ ,  $P_m$  为微电网渗透到公共电网的功率,  $P_s$  为公共大电网的容量。传统配电网典型保护设计方案通常是主馈线采用电流速断保护和过流保护组成的两段式保护, 并配置三相一次重合闸装置。电流速断按照线路末端故障有灵敏度的方法整定, 过流保护按保护线路全长加时限整定。所以, 微电网并网运行对公共配电网继电保护的影响主要表现在对馈线电流保护和重合闸动作情况两个方面。如图 2 所示。

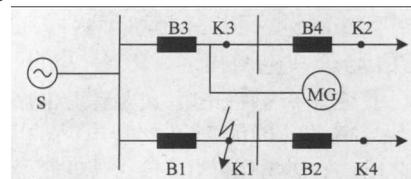


图 2 微电网对公共电网继电保护的影响

Fig.2 Influence of MG to distribution network relay

### 2.1 对配电网电流保护的影响

由于微电网接入配电网, 使原有公共配电网电流大小、分布和流向都发生了变化, 从而可能引起原有保护的误动、拒动和灵敏度降低<sup>[23-25]</sup>。

(1) 导致本线路部分保护灵敏度降低及拒动, 部分保护的灵敏度增加。如图, 当 K3 发生接地故

障时, 由于 MG 的分流作用, 使 B3 感受到的故障电流减小, B3 的灵敏度降低; 当 K2 点发生接地故障, B4 将流过 MG 提供的故障电流, 使保护 B4 的灵敏度增加。

(2) 导致本线路保护误动。当母线处或 K1 发生接地故障时, B3 流过 MG 提供的反方向短路电流, 当 MG 馈入电网的功率足够大时, 将使 B3 误动。

(3) 导致相邻线路保护误动, 失去选择性。当 K4 发生接地故障, B1 流过 MG 提供的短路电流, 如果 MG 的容量足够大, 那么 B1 的保护范围将可能延伸到下一段线路, 使保护失去选择性。

## 2.2 对重合闸的影响

如图 2, K3 发生接地故障, 保护 B3 的电流速断保护立即动作断开故障线路, 但 MG 的 PCC 从检测外部故障到 SS 断开 MG 需要一段时间, 期间 MG 和 B3 所在的馈线构成孤岛运行, 如果此时保护 B3 的前加速动作, 可能会造成非同期合闸。同时, MG 继续向故障点提供电路电流, 可能使故障点电弧重燃, 扩大事故。保护 B3 的前加速必须与 PCC 处的静态开关 SS 动作时间配合。文献[26]指出, 必须限制 MG 提供的短路电流, 以公共配电网电流速断或定时限过流保护的定值为约束条件, 以减轻 MG 接入对重合闸前加速、后加速的影响。

## 3 微电网继电保护

### 3.1 国内外微电网继电保护的研究情况

目前, 国内几乎没有关于微电网继电保护方面的研究, 国外对微电网继电保护的研究也还只是停留在理论研究阶段<sup>[27-28]</sup>。文献[2]指出微电网的继电保护必需遵循两条原则: (1) 无论在孤网运行模式还是并网运行模式, 微电网的保护策略必须一致;

(2) 短路故障时, 提供短路电流的电源必需迅速切除。

微电网有并网运行和孤网运行两种模式。微电网通过 PCC 与公共电网相连, PCC 处的静态开关及其相应的继电保护特性的定义是微电网继电保护的一个难点。它必须能够准确判断电网的各种故障并迅速做出反应, 决定微电网是否需要进入孤网运行, 实现微电网这两种运行模式间的平滑切换; 微电网继电保护的另一个难点是在孤网运行故障电流小的情况下给微电网配置充分的保护, 由于微电网的分布式电源 DG 采用电力电子设备接入微电网, 微电网发生接地故障时, 分布式电源 DG 提供的短路电流被限制在  $2I_N$ , 传统配电网广泛采用的过流保护不再适合于微电网, 微电网的继电保护必须采用新的保护原理。针对这两个难点, 作者提出系统

级保护和单元级保护的方案, 以合理配置微电网的继电保护。

### 3.2 微电网系统级保护

前面已经谈到, 不加约束地接入分布式发电会给配电网带来很多问题, 如对配电网电压稳定、继电保护等方面的影响。微电网系统级保护主要目的是确保在公共电网发生永久性故障或微电网的运行状态不符合 IEEE1547 标准时, 微电网能够迅速、平滑进入孤网运行, 减轻微电网的接入对公共配电网的影响。同时, 保证微电网能够安全过渡到新的运行稳态。

微电网系统级保护的关键是其与公共配电网的连接点 PCC。由以上分析可知, 微电网并网运行对配电网继电保护的影响主要取决于两个要素: 注入配电网的短路电流大小和持续时间。当公共电网发生永久性故障或微电网的运行状态不符合 IEEE1547 标准时, 要求微电网进入孤网运行, PCC 的迅速动作能减轻微电网对公共配电网继电保护的不利影响。所以, PCC 安装的控制与保护装置必须能够检测并准确判断电网的各种故障情况, 迅速做出响应, 决定微电网是否进入孤网运行。文献[29]指出, PCC 处的继电保护, 可以通过测量其两端的电压、频率和电流大小实现 IEEE1547 标准所要求的检测, 如不同步、电能质量下降、微电网内部或外部故障以及重新并网等问题。

为了减少断路器全分闸时间, 提高 PCC 的开断速度, 文献[30-31]介绍了一种基于晶闸管控制的快速开关, 这种快速开关没有旋转部件, 使用寿命因此大大增长。在检测到跳闸信号后, 静态开关在 0.5~2 个周波即 40 ms 内即可断开 PCC 处的连接, 微电网进入孤网运行。可以安装在低压母线的敏感负荷馈线出口处, 保护敏感负荷; 也可以安装在 PCC 处, 必要时实现微电网孤网运行。

### 3.3 微电网单元级保护

当公共电网发生故障或电能质量下降, 如过电压、电压偏低等, 对于敏感负荷, 需要微电网快速断开与公共电网的连接, 西门子公司 F47 标准建议断开时间在 50 ms 内。此后, 微电网进入孤网运行模式。微电网单元级保护主要是应对微电网内部发生的各种故障所配置的保护。

微电网单元级保护必须考虑两个方面: 能够处理微电网并网运行时的各种内部故障; 外部电网故障使微电网 PCC 处解列进入孤网运行时, 必须保证微电网能平滑过渡到新稳态运行, 若微电网内部发生故障能够迅速切除故障部分, 保证健全部分安全稳定运行。以下介绍三种微电网继电保护方法。

(1) 基于电流序分量的保护方法。

文献[32]介绍了一种基于序分量的微电网继电保护方法, 其继电保护配置如图3所示。

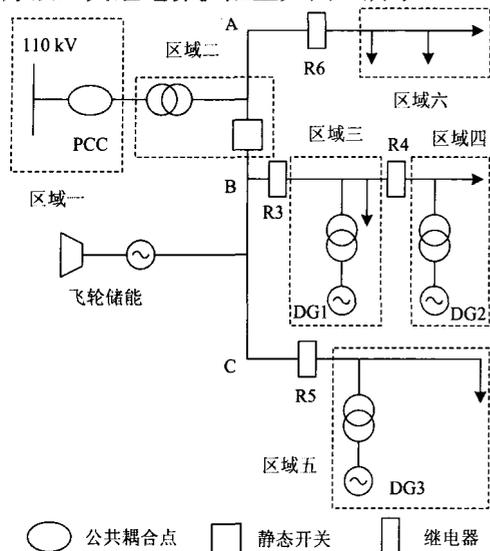


图3 基于序分量的微电网继电保护

Fig.3 MG protection based on symmetrical components

整个微电网的保护分为六个区域。微电网故障形式主要是相一地短路故障和相间短路故障。理论研究证明, 零序和负序分量可以成功检测相地和相间故障<sup>[33-34]</sup>。正常运行时, 由于负荷的不对称性, 微电网中会包含有一定数值的零序和负序分量, 为了避免由于负荷不对称造成序电流元件动作, 必需给每个序电流元件一个合适的阈值。在研究差动保护和电流对称分量的基础上, 笔者提出用零序电流保护作为单相接地故障的主保护, 用负序电流保护作为相间短路的主保护, 电流差动保护作为后备保护。这种组合有很好的保护效果。

每一相配置电流互感器、馈线和中性点处配置三相电流互感器, 以提取接地故障保护所需要的三相电流。经过变化矩阵输出正序、负序、零序电流分量, 作为继电器的输入信号。单相接地故障后备保护通过检测差动—对称分量  $I_d = \sum_{k=a,b,c,n} |I_k|$  实现。

根据负荷的不对称情况, 每一个继电器设计相应的阈值。各区域的继电器都延时3个周波, 但继电器3延时10个周波, 以与保护四区的继电器配合, 各相断路器在接到跳闸信号后延时1.5个周波再动作, 以消除不同继电器的电流对称分量不同上升时间的影响。

如图3, 假设区域四发生单相接地故障, 区域二的静态开关、区域三和区域四的零序电流分量都超过阈值。故障发生后0.5~2个周波内静态开关动作, 微电网进入孤网运行, 接着区域四的继电器

动作 DG2 退出运行, 区域三的继电保护时限与区域四的保护配合而没有动作, 故障区域被隔离。微电网其余部分经过一个暂态过程恢复正常运行, 静态开关检测到故障消除, 同步条件满足之后, 实现自同步并网。

(2) DG 出口电压 abc-dq0 变换法。

文献[35-37]介绍了一种 DG 出口电压 abc-dq0 变换实现微电网保护的方法。对于不同的故障情况, 三相电压的 dq 分量具有不同的特征, 以此实现各种类型接地故障的判别。首先获取三相机端电压, 通过 abc-dq0 变换矩阵得到  $V_{ds}$  和  $V_{qs}$ , 如式(1)。

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

再用公式(2)将静止坐标轴上的  $V_{ds}$ 、 $V_{qs}$  投影到同步旋转的坐标轴上:

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} \quad (2)$$

令  $V_{dif} = V_{qrf} - V_{qr}$ ,  $V_{qrf}$  为一个给定阈值。

则不同  $V_{dif}$  的输出对应了微电网不同的故障情况: 微电网正常运行时,  $V_{dif}$  的值为0; 三相短路故障发生时,  $V_{dif}$  输出为稳定的直流信号; 相间故障  $V_{dif}$  为一个直流和震荡的交流信号的叠加; 单相接地故障时,  $V_{dif}$  为一个从0到一个极大值的震荡输出。这些震荡信号的频率都为电网额定频率的两倍。通过  $V_{dif}$  的不同输出信号可以实现各种接地故障的检测, 隔离故障区域, 保护微电网安全、稳定运行。

(3) 谐波畸变法。

文献[38]介绍了一种基于谐波畸变率 THD(The Harmonic Distortion) 的微电网保护方法: 通过相电压的变化识别故障类型, 正常运行时三相电压幅值近似相等, 故障发生, 故障相电压将低于健全相电压, 以此可实现故障相判别; 利用 THD 的畸变进行故障定位。正常运行时配电网相当于一个低阻抗的电压源, 微电网的 THD 维持在较小值, 约为0。故障发生, 静态开关迅速动作, 微电网与配电网的连接断开, 进入孤网运行模式, 此时, 逆变器输出电流所含谐波将增加, 导致 THD 增大。具体实现方法如图4所示。

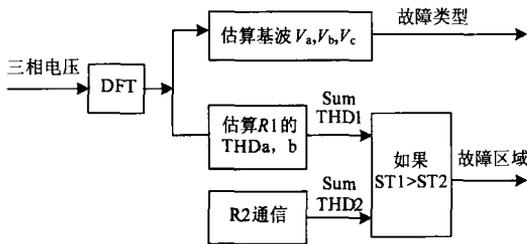


图4 基于谐波畸变的微电网保护实现框图

Fig.4 Protection of MG based on DFT

如图4所示,提取三相电压 $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ , 经过离散傅里叶变换 DFT 并采用合适的窗口得到三相基波电压和继电器 R1 的各相谐波总和 THD1, 与 R2 的输出 THD2 进行比较, 如果  $ST1 > ST2$ , 则故障落在 R1 所在的区域。相对于传统公共电网, 微电网的覆盖区域较小, 可以很方便地实现微电网内部通信。

### 3.4 微电网继电保护的发展方向

在已有研究的基础上, 还需要对微电网继电保护的以下几个方面进行更系统、深入的探讨。

(1) 微电网的继电保护必需与其控制结合起来, 通过研究微电网的运行特性、控制原理以及对故障的响应特性来指导微电网继电保护的研究。

(2) 无论是系统级保护还是单元级保护, 都要求微电网各个单元之间能实现通信。必须寻求一种稳定不易被干扰的通信和信号的处理方式。

(3) 微电网的保护要有系统性, 单元级保护要求微电网孤网运行模式和并网运行模式下要有一致性。不仅要保护微电网安全稳定运行, 还要尽可能减少微电网并网对公共电网的不利影响。文中提到的序分量保护方法很有潜力, 但需要进行更深入的研究。

## 4 结语

分布式发电是一种高效、清洁的发电方式。但分布式电源接入配电网必然会引起配电网电流大小、方向和分布发生变化, 继而对配电网继电保护带来不利影响。微电网能有效地管理分布式发电, 使微电网并网运行对配电网继电保护的影响降至最低。本文首先通过研究 CERTS 微电网模型, 在分析微电网结构和特点的基础上, 提出微电网保护的重点和技术难点, 讨论了微电网接入对配电网保护的影响, 提出系统级保护和单元级保护的概念, 并对现有的微电网继电保护方法进行归纳总结, 最后指出了微电网继电保护的研究方向。

## 参考文献

- [1] Nikkhajoei H, Lasseter R H. Distributed generation interface to the CERTS microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24: 1598-1608.
- [2] Lasseter R H. Microgrids and distributed generation[J]. Journal of Energy Engineering, 2007, 133 (3): 144-149.
- [3] 孙鸣, 余娟, 邓博. 分布式发电对配电网线路保护的影响[J]. 电网技术, 2009, 33 (8): 104-107.  
SUN Ming, YU Juan, DENG Bo. Analysis of impact of DGs on line protection of distribution networks[J]. Power System Technology, 2009, 33 (8): 104-107.
- [4] 李斌, 刘天琪, 李兴源. 分布式发电对系统电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2009, 33 (3): 84-88.  
LI Bin, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan. Impact of distributed generation on power system voltage stability[J]. Power System Technology, 2009, 33 (3): 84-88.
- [5] Michael Angelo Pedrasa. Overview of microgrid management and control[C]. //International Conference on Clean Electrical Power, ICCEP. 2007.
- [6] Morozumi S. Micro-grid demonstration projects in Japan[J]. Power Conversion Conference-Naqoya, 2007.
- [7] Hatzigiorgiou, Hiroshi Asano, Reza Iracani, et al. Microgrid overview[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007.
- [8] Lasseter R H. Microgrid power engineering society meeting[C]. 2002: 305-308.
- [9] Diagiand P, Lasseter R H. Industrial application of microgrids[J]. Power System Engineering Research Lenter, 2001.
- [10] Joydeep Mitra, Shshi B Patra, Ranade S J. Reliability stipulated microgrid architecture using particle swarm optimization[C]. //Ninth Inernational Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Sweden: 2006.
- [11] Gray Davis. Concept of microgrid[M]. Consultant Report of CERTS Program Office Lawrence Berkeley National Laboratory, 2003.
- [12] Venkataramanan Giri, Marnay Chris. A larger role for microgrid[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6 (3): 78-82.
- [13] Lasseter R H, Piagi P. Microgrid a conceptual solution[J]. PESC'04 Achen, 2004.
- [14] Nikkhajoei H, Lasseter R H. Microgrid protection[C]. //Power Engineering Society General Meeting. 2007.
- [15] Marwali M N, Jung Jin-Woo, Keyhani Ali. Control of distributed generation systems—part II: load sharing control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19: 1551-1561.
- [16] Nikkhajoei H, Lasseter R H. Microgrid protection[C].// Power Engineering Society General Meeting. 2007.
- [17] Marnay Chris, Javier Rubio F, Siddiqui Afzal S. Shape of microgrid[C]. //Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference.2001: 150-153.

- [18] 袁超, 曾祥君, 等. 分布式发电系统继电保护技术[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (2): 99-104.  
YUAN Chao, ZENG Xiang-jun, et al. Protection technology for distribution generation systems[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (2): 99-104.
- [19] 林霞, 陆于平, 吴新佳. 分布式发电系统对配电网继电保护灵敏度影响规律[J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (1): 24-29.  
LIN Xia, LU Yu-ping, WU Xin-jia. The impact of DG system to relay protection sensitivity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29 (1): 24-29.
- [20] 胡学浩. 分布式发电技术与微型电网[J]. 院士论坛-中国电力发展和技术创新, 2008.  
HU Xue-hao. Technology of DG and microgrid[J]. Academician Forum-Development and Technology Innovation of Power System in China, 2008.
- [21] 丛伟, 潘贞存, 王伟, 等. 含高渗透率 DG 的配电系统区域纵联保护方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (10): 81-85.  
CONG Wei, PAN Zhen-cun, WANG Wei, et al. Area pilot protection of distribution network included high penetration of DG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (10): 81-85.
- [22] 张佳佳, 陈金富, 范荣奇. 微网高渗透对电网稳定性都影响分析[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24 (1): 25-29.  
ZHANG Jia-jia, CHEN Jin-fu, FAN Rong-qi. Investigation of the influence of microgrids high large penetration rations on power network stability[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2009, 24 (1): 25-29.
- [23] 何朝阳. 含微网的电力系统优化运行与稳定控制相关问题研究(博士学位论文)[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.  
HE Zhao-yang. Study on optimal operation and stability control of power system with microgrid, doctoral dissertation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2008.
- [24] 王希舟, 陈鑫, 甘德强. 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, GAN De-qiang. Analysis on coordination of DG and distribution network relay protection[J]. Relay, 2006, 34 (3): 15-19.
- [25] 高研, 毕锐, 杨为, 等. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25 (4): 20-23.  
GAO Yan, BI Rui, YANG Wei, et al. Effect of distributed generation on relay protection in distribution system[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25 (4): 20-23.
- [26] 黄伟, 雷金勇, 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): 92-97.  
HUANG Wei, LEI Jin-yong, et al. Influence of DG to distribution network between line fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (1): 92-97.
- [27] Vilathqamuwa D, Mahinda. Protection of microgrids during utility voltage sags[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 53 (5): 1427-1436.
- [28] Driesen Johan. Protection issues in microgrids with multiple distributed generation units[C]. //Fourth Power Conversion Conference. Nagoya: 2007.
- [29] William E Feero, Douglas C, John Stevens. Protection issues of the microgrid concept[C]. //Transmission Reliability Program Office of Power Technologies Assistant Secretary for Energy Efficiency and Renewable Energy U. S. Department of Energy. 2002.
- [30] Kroposki B, Basso T, Deblasio R. Microgrid standards and technologies[C]. //Power Energy Society General Meeting. 2008.
- [31] Klapp D, Vollkommer H T. Application of an intelligent static switch to the point of common coupling to satisfy IEEE 1547 compliance[C]. //Power Energy Society General Meeting. 2007.
- [32] Nikkhajoei R, Lasseter R H. Microgrid fault protection based on symmetrical and differential current components[C]. //Public Interest Energy Research California Energy Commission. 2006.
- [33] 陈禾, 陈维贤. 配电线路的零序电流和故障选线新方法[J]. 高电压技术, 2007, 33 (1): 49-52.  
CHEN He, CHEN Wei-xian. Zero-sequence current and new method of fault line location in distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (1): 49-52.
- [34] Elnewehi A F, Schweitzer E O. Negative-sequence overcurrent element application and coordination in distribution protection [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1993 (8) : 915-924.
- [35] Haddad K, Joos G, Chen S. Control algorithms for series static voltage regulators in faulted distribution systems[C]. //Proc Power Electronics Conference. 1999.
- [36] Redfern M A, AI-Nasseri H. Protection of microgrid dominated by distributed generation using solid state converters[C]. //Developments in Power System Protection. 2008.
- [37] AI-Nasseri H, Redfern M A, Li F. A voltage based protection for micro-grids containing power electronic converters[C]. //Power Engineering Society General Meeting. 2006.
- [38] AI-Nasseri H, Redfern M A. Harmonics content based protection scheme for micro-grids dominated by solid state converters[C]. //Power System Conference. 2008.

收稿日期: 2009-10-20; 修回日期: 2010-03-30

作者简介:

张宗包(1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护及智能电网的研究; E-mail: zbzhangwhu@163.com  
袁荣湘(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统继电保护和电力系统安全稳定分析和控制的研究;  
赵树华(1954-), 男, 高级政工师、工程师, 主要从事专业技术管理工作。