

基于电流行波的微电网保护策略

李练兵, 张晓娜, 张家安, 孙鲁滨

(河北工业大学控制科学与工程学院, 天津 300130)

摘要: 针对微电网的故障电流小、潮流双向性等特性, 提出了适合微电网的保护策略并进行了仿真。传统的基于过电流的电网保护技术对于微电网的保护受到一定限制, 因而需要对新的技术进行探索。在对这些因素分析的基础上, 提出了微电网的保护策略: 通过小波变换对电流行波进行分析判断故障位置, 母线电压确定故障发生与否及扰动电压判断故障类型。利用 SVPWM 控制原理在 Matlab/Simulink 中使用 SimPowerSystems 搭建微电网的模型, 并对孤岛运行模式下微电网不同的故障类型进行仿真分析, 仿真结果表明所提出的保护策略在孤岛运行的方式下是有效的。

关键词: DG; 微电网保护; 故障特性; SVPWM; 电流行波; 小波变换

Protection scheme of microgrid based on current traveling wave

LI Lian-bing, ZHANG Xiao-na, ZHANG Jia-an, SUN Lu-bin

(Control Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Based on the characteristics of microgrid, for example small fault current, the bidirectional powerflow, etc, a protection scheme is proposed and simulated. The traditional protection scheme based on overcurrent has some restrictions on the microgrid protection, thus a novel protection needs to be explored. Based on the analysis of the above factors, a microgrid protection scheme is proposed. Wavelet transform is used in analyzing current traveling waves to identify faulted location, the bus bar voltages are used to determine whether a fault happened or not, and disturbance voltages are used to determine fault types. A microgrid model is established using SVPWM with SimPowerSystems in Matlab/Simulink, and different faults in the islanded microgrid are simulated, and the result shows that the proposed protection is valid in an islanded operating mode.

Key words: DG; microgrid protection; failure characteristics; SVPWM; current traveling wave; wavelet transform

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)18-0094-07

0 引言

微电网是一个包含分布式电源、储能单元和可控负载的小型电力系统。随着新能源的不断发展, 对于微电网的研究得到了越来越多的关注。但是随着越来越多的微电网不断并入配电网中, 也给原电网带来了许多不利的方面。由于微电网的接入, 原配电网由单电源辐射式的结构变为多电源结构, 使其原有的保护方法已无法完全适用于微电网^[1-8]。

微电网有两种运行模式: 并网运行和孤岛运行。在这两种运行模式下, 微电网发生短路故障时, 其故障特性也有很大不同^[9]。配电网的保护是基于短路的过流保护的, 在并网模式下, 故障点的故障电流由配电网来提供, 这与配电网的情况类似; 而在孤岛运行模式下, 由于逆变器中的限流模块会快速响应, 故障电流的模值被限制在 2 倍额定电流之内,

无法启动传统的过流保护器件, 所以必须寻找新的方法能够保证微电网的正常、稳定运行^[10-11]。

文献[12-13]提出在微电网中加入较高容量的短路电源, 使微电网在并网和孤岛两种运行模式下能够使用相同的保护原理, 避免设计新的保护策略, 以及更换传统的保护设备和装置, 但在孤岛模式下微电网的正常运行完全依赖于设备的正常运行, 且投资较高。文献[14]在每个保护区域中都安装一个差动继电器, 将微电网分成几个区域进行保护, 故障时只需将相应的区域切除即可, 但保护方法复杂, 需测量每相的电流, 当发生单相故障接地时, 用差动电流和零序电流装置来保护系统, 当发生两相故障时, 用负序电流装置保护, 但对于三相故障则无效。文献[15]建立一个既能获取保护安装处电气量信号, 又能接收全网信息和数据的多 Agent 系统, 这个分层分布式多 Agent 系统可以实现保护器件间

的协调, 也可以实现保护动作值的在线整定, 对于结构复杂的网络比较适合, 但对于城市间的配电网, 由于其范围比较大, 多Agent 系统间的配合既繁琐又不经济。

1 保护设计

与传统的配电网保护不同, 由于微电网中多个微电源接入配电网中, 因此配电网可以向微电网中的负荷供电, 而微电网中如果微电源的容量足够大也可以向配电网提供能量, 这就存在了潮流的双向流动, 其结构也不再是单一的辐射状, 且并网模式和孤岛模式下, 故障短路电流差异很大, 所以对于微电网的保护需要新的策略。微电网的结构如图 1 所示。

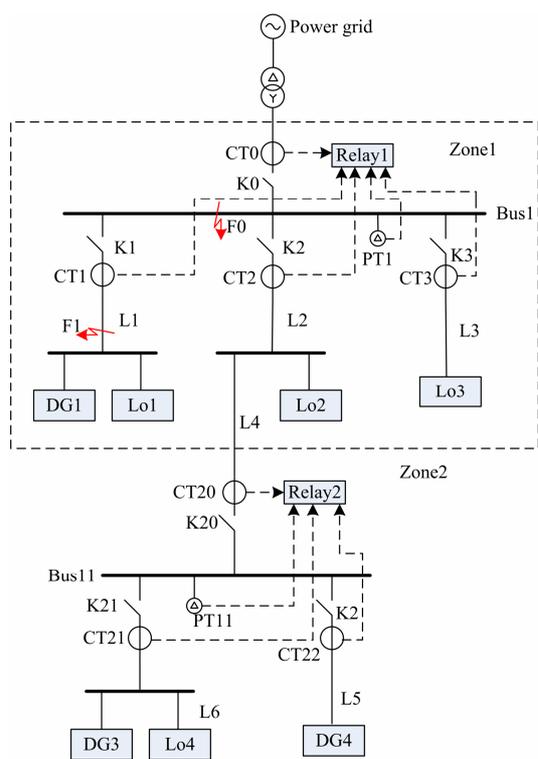


图 1 微电网结构图

Fig. 1 Schematic of the microgrid

在外部发生故障时, 微电网只需断开与配电网相连的 PCC, 实现孤岛运行保证微电网内部能够稳定运行即可; 而在微电网内部发生故障时, 希望能够通过保护装置找到故障所在并切除, 而不是直接将电源从配电网中切除, 而且有些电源除了提供电力负荷外, 还提供其他形式的负荷, 更无法轻易地将其切除。

对于微电网的内部故障, 采用电流行波的原理进行判断。在微电网中, 当其中一条馈线发生故障

时, 故障产生的电流行波将沿着馈线从故障点向母线传播, 由于母线处的波阻抗不连续, 而发生折射和反射。行波在网络中的传播过程如图 2 所示。

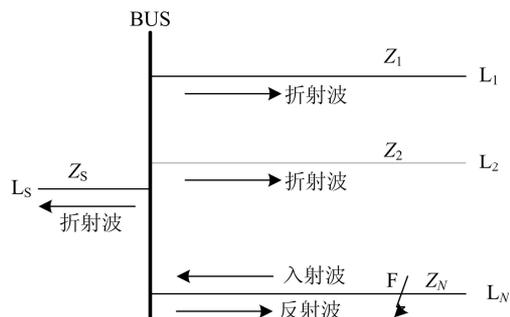


图 2 初始行波在母线处的折反射

Fig. 2 Reflection and refraction of initial traveling wave at busbar

根据图 2 母线有 N 条出线, 假设每条出线的线路波阻抗均相等^[16], 即

$$Z_{1x} = Z_{2x} = \dots = Z_{Nx} = Z_x \quad (1)$$

当线路发生故障时, 故障处的电流行波是入射波和反射波叠加形成的, 其 x 模量 (x 可以是 α 、 β 或零模分量) 电流行波为

$$i_{Nx} = i_{Fx} + i_{rfx} = -i_{Fx} \cdot 2Z_{Nx} / (Z_{Mx} + Z_{Nx}) \quad (2)$$

式中: i_{Fx} 为入射电流波; i_{rfx} 为反射电流波; Z_{Mx} 为母线的等效波阻抗; Z_{Nx} 为故障线路的阻抗。

假设非故障线路的波阻抗为 Z_{Kx} , 则从故障线路折射到非故障线路的折射波在各非故障线路分流, 形成非故障线路的 x 模量电流初始行波为

$$i_{Kx} = i_{Fx} \cdot 2Z_{Mx}^2 / [Z_{Kx}(Z_{Nx} + Z_{Mx})] \quad (3)$$

$$(k = 1, \dots, N-1)$$

根据式 (2) 和式 (3) 可以看出: 一般母线接有较多的出线回路, 母线的等效波阻抗远小于非故障的波阻抗^[17], 因此可以得出故障线路的初始电流行波的幅值远远大于非故障线路的电流行波的幅值, 且假设电流的方向从母线到馈线为正方向, 那么故障线路的电流行波的方向相反, 而非故障线路的电流行波的幅值近似, 方向相同。上述推导过程证明初始行波与中性点是否接地无关。

在正常情况下, 类似于馈线的激励或者分布式电源的切换等出现的扰动, 也可能产生电流行波从而引起保护装置的误动, 因此本课题中通过测量母线的电压来判断产生的扰动是否为故障, 再由电流行波来确定故障的具体位置。测量母线电压经过

Park 变换使电压由静止坐标变换为旋转的 dq0 坐标,三相的交流电压量就会转变为 dq 坐标上的直流量,那么故障电压量也会反映到 dq 坐标当中,对于每一种故障都可以得到一个扰动值。在正常的情况下,扰动值为 0,对于不同故障类型,扰动值的波形也呈现出不同的特征,因此可以根据扰动值的波形预先判断出故障的类型。当发生三相故障时,扰动值的波形是一个纯直流电压的波形;两相故障时,扰动值的波形为带有交流震荡的直流电压;单相接地故障时,扰动值波形是一个介于零与最大值之间震荡的直流信号^[18]。

2 小波变换理论

2.1 小波函数的选取

当微电网内部发生故障时,电流的初始行波是一个瞬时突变值,难以直接提取并对其进行分析。小波变换具有多分辨率、检测信号奇异性等特点,特别是对于暂态突变信号或者较为微弱的信号比较敏感。小波变换能够准确捕捉到故障行波的突变信号,其模极大值点与行波波头一一对应,模极大值的极性代表故障行波的变化方向,模极大值的大小表示故障行波强度的变化。

小波变换就是用小波函数来逼近所研究的信号,本文中采用 B 样条小波作为小波函数。B 样条小波其构造简单,构造的小波有显示表达式,光滑性好,便于对问题进行深入的分析和解决,易于编程,适合对突变信号的检测。

0 阶 B 样条函数的定义:

$$N_0(t) = \begin{cases} 1, & (0 \leq t) \\ 0, & (t < 0, t \geq 1) \end{cases}$$

m 阶 B 样条函数可以由 0 阶 B 样条函数不断作卷积得到

$$N_m(t) = N_0(t) * N_{m-1}(t) = \int_0^1 N_{m-1}(t-\tau) d\tau$$

定义 m 阶 B 样条函数 $N_m(t)$ 为尺度函数, $N_{m+1}(2t-1)$ 为小波函数,得到 3 次 B 样条小波函数的滤波系数如表 1 所示。

表 1 滤波器系数

Table 1 Coefficients filter

k	h_k	g_k
-1	0.125	
0	0.375	-2
1	0.375	2
2	0.125	

2.2 小波变换奇异性理论

由小波定义,信号 $f(t)$ 的小波变换为

$$W(s, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(a) \varphi_s(a-t) da$$

小波模极大值是指 t 在 t_0 某一邻域内存在

$$|W(s_0, t)| \leq |W(s_0, t_0)|$$

则点 (s_0, t_0) 为模极大值点, $|W(s_0, t_0)|$ 就为对应的模极大值。

小波变换模极大值满足

$$W_{\max}(s, t) \leq As^\alpha$$

式中: A 为常数; s 为尺度; α 为 Lipschitz 指数。某一点的 Lipschitz 指数 α 表征了在该点的奇异性的大小, α 为负模极大值随分解尺度的增大而迅速减小, α 为非负则模极大值随尺度的增大而增大或者不变。

通过以上的分析可以得出,信号奇异点可以由小波变换的模极大值进行检测。当发生故障时,根据扰动电压的波形判断出故障的类型,然后对故障的初始电流行波进行小波变换,根据线路的小波模极大值的极性及其模值大小来判断故障所在。

3 仿真与分析

3.1 DG 的控制方式

SVPWM 控制的 DG 电路原理图如图 3 所示,图 4 为控制系统结构框图。利用有功无功电流解耦控制,直流侧电压利用率更高,动态性能更好,还可方便地消除交流输入的稳态误差。

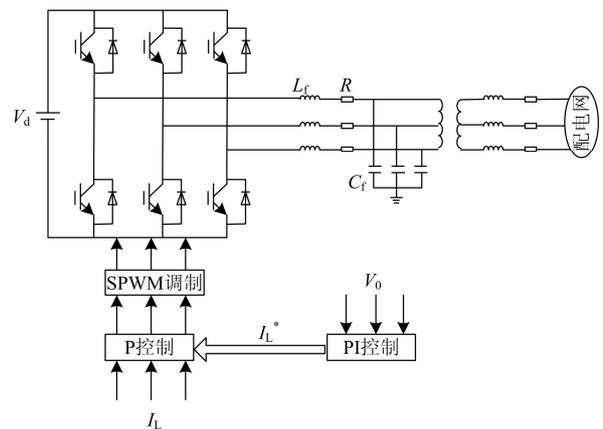


图 3 SVPWM 控制的 DG 电路原理图

Fig. 3 DG schematic of SVPWM

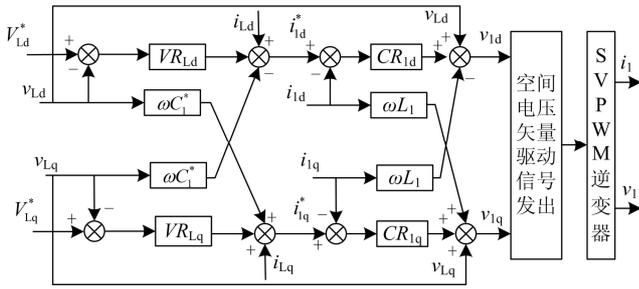


图 4 控制系统结构图

Fig. 4 Schematic of control system

3.2 仿真图形及分析

(1) 馈线处故障

微电网的电压等级为 0.4 kV, DG 容量为 75 kW, 系统的额定频率为 50 Hz, 微电网的负荷采用恒定阻抗模型, $Lo1$ 、 $Lo2$ 和 $Lo3$ 参数相同, 有功功率为 25 kW, 无功功率为 18 kvar, $Lo4$ 为纯电阻, 有功功率为 60 kW。微电网中线路采用阻抗模型, $R=0.641 \Omega/\text{km}$, $X=0.101 \Omega/\text{km}$ 。

微电网孤岛方式运行, 仿真的起止时间分别为 0.15 s 和 0.5 s, 在 0.2 s 时 F1 处发生故障, 故障持续时间为 0.2 s, 发生故障时故障区域内的波形和故障区域外的波形如图 5、图 6 所示。

由两条母线处的电压波形可以看出, Bus1 和 Bus11 的电压都出现了波动, 可以排除是馈线的激励或者分布式电源的切换等造成的扰动, 而是有故障发生。且 Bus1 处的扰动电压比 Bus11 处的电压值大, 由此可以得出故障发生区域为区域 1, 再由扰动电压波形为介于 0 到最大值之间震荡的直流信

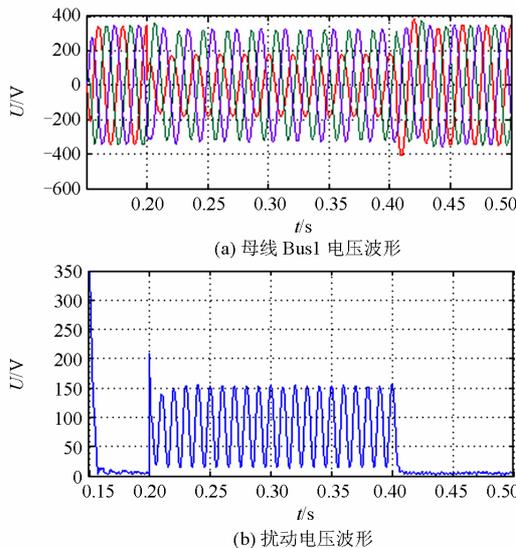


图 5 故障区域内的单相电压波形

Fig. 5 Waveforms of voltage in-zone single phase fault

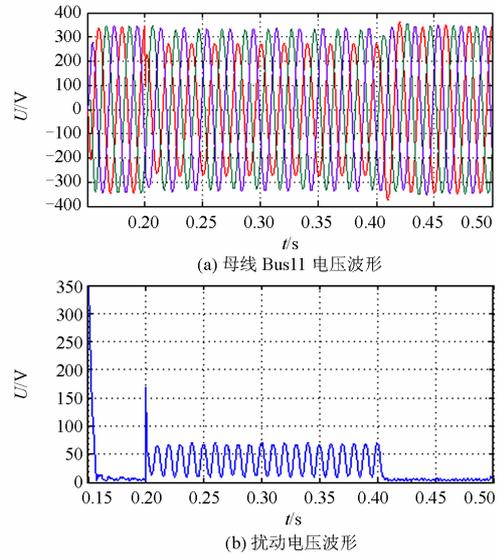


图 6 故障区域外的单相电压波形

Fig. 6 Waveforms of voltage out-zone single phase fault

号波形, 可以判断发生的故障类型为单相接地故障。通过测量区域 1 中各馈线的初始电流行波并进行小波变换可以判断出故障馈线。

由于三相线路之间存在电磁的耦合关系, 相互之间不是独立的, 因此可以采用相模变换的方法对三相系统进行解耦处理。本文采用的是零模量进行分析。若其中一条线路的零模分量的初始模极大值大于其他线路的零模分量的初始模极大值且极性与其他线路的极性相反, 则为故障线路, 若所有线路的初始模极大值极性相同, 则故障线路为母线。图 7 为零模分量的小波模极大值。

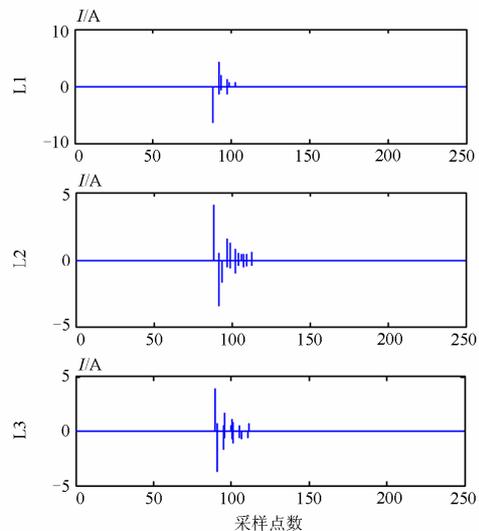


图 7 小波模极大值

Fig. 7 Wavelet modulus maxima

由图 7 可以得出，馈线 L1 的零模初始模极大值大于其他馈线且极性相反，可以判断出故障所在位置为馈线 L1，可通过断路器 Relay1 动作断开开关 K1，迅速切除故障，保证微电网系统的稳定性。

当发生两相短路接地故障时，可以通过两个区域内母线电压的波形排除误动的可能，确定故障发生，再由扰动电压的大小确定故障发生的区域，由扰动电压的波形为带有交流震荡的直流电压的波形可以判断故障的类型为两相短路接地故障，故障区域内和故障区域外的波形如图 8、图 9 所示。

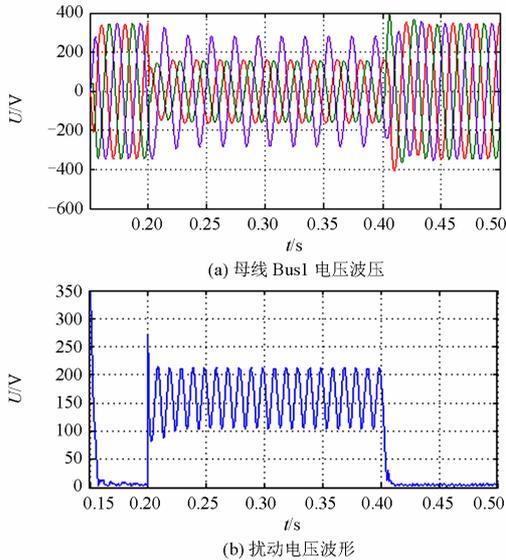


图 8 故障区域内的两相电压波形

Fig. 8 Waveforms of voltage in-zone phase to phase fault

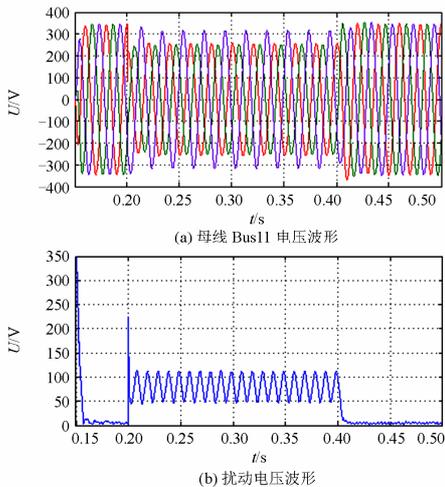


图 9 故障区域外的两相电压波形

Fig. 9 Waveforms of voltage out-zone phase to phase fault

图 10 所示的是 F1 处发生两相短路故障时，各馈线的小波模极大值。由图 8、图 9 可判断故障所在区域，再由图 10 可得出 L1 的模极大值比其他馈

线的值大，且方向相反，可以判断出故障的具体位置为 L1，通过断路器断开相应开关，保证其他电网的正常运行。

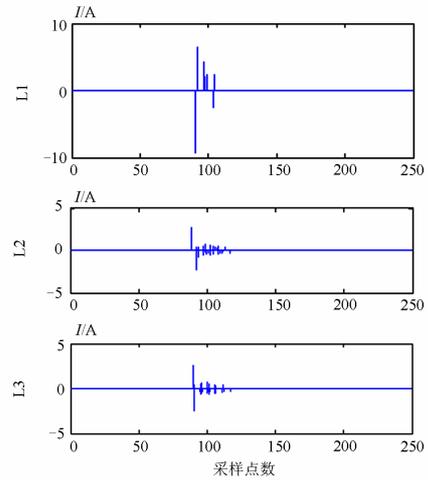


图 10 小波模极大值

Fig. 10 Wavelet modulus maxima

(2) 母线故障

在母线 F0 上发生单相接地故障，微电网的参数和故障时间的设置同 (1) 相同。当母线处发生故障时，通过 B 样条小波程序对各馈线电流行波零模分量进行小波变换，提取模量小波变换的模极大值和极性，如图 11 所示。由图可知，区域 1 各馈线的零模分量的小波变换初始模极大值接近相等且极性相同，符合零模分量模值极性的判别方法。

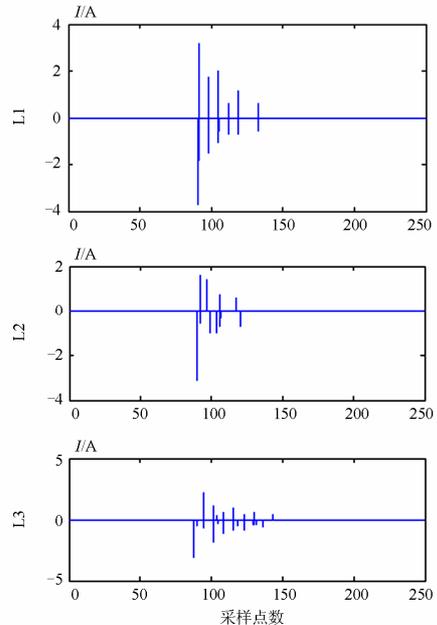


图 11 小波模极大值

Fig. 11 Wavelet modulus maxima

4 结论

该文在分析微电网特性及其保护影响的基础上, 对不同的故障类型进行分析并提出了相应的保护策略。采用故障电流行波的方法检测故障不受微电网潮流双向性、故障电流等的影响, 且方法响应迅速, 能够最大限度地保证微电网运行状态的稳定性。

在利用 Matlab 仿真过程中, 没有进行并网情况下的故障仿真, 也未考虑硬件实现情况, 这都需要进一步研究。

参考文献

- [1] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.
WANG Cheng-shan, XIAO Chao-xia, WANG Shou-xiang. Integrated control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.
- [2] 肖宏飞, 刘士荣, 郑凌蔚, 等. 微型电网技术研究初探[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(8): 114-119.
XIAO Hong-fei, LIU Shi-rong, ZHENG Ling-wei, et al. A preliminary research on microgrid technology[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(8): 114-119.
- [3] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网中分布式电源逆变器的多环反馈控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 100-107.
WANG Cheng-shan, XIAO Chao-xia, WANG Shou-xiang. Multiple feedback loop control scheme for inverters of the micro source in microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 100-107.
- [4] 吴卫民, 何远彬, 耿攀, 等. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 98-106, 113.
WU Wei-min, HE Yuan-bin, GENG Pan, et al. Key technologies for DC micro-grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 98-106, 113.
- [5] 陈达威, 朱桂萍. 低压微电网中的功率传输特性[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 117-122, 143.
CHEN Da-wei, ZHU Gui-ping. Power transmission characteristics of low voltage microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 117-122, 143.
- [6] 苏玲, 张建华, 王利, 等. 微电网相关问题及技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 235-239.
SU Ling, ZHANG Jian-hua, WANG Li, et al. Study on some key problems and technique related to microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 235-239.
- [7] 袁超, 吴刚, 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): 99-105.
YUAN Chao, WU Gang, ZENG Xiang-jun, et al. Effect of distributed generation on relay protection of distributed system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(2): 99-105.
- [8] VENKATARAMANAN G, MARNAY C. A larger role for microgrids[J]. IEEE Power Energy Magazine, 2008, 6(3): 78-82.
- [9] 韩奕, 张东霞. 含逆变器分布式电源的微电网故障特征分析[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 147-152.
HAN Yi, ZHANG Dong-xia. Fault analysis of microgrid composed by inverter-based distributed generations[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 147-152.
- [10] 张玉海, 王新超, 许志成, 等. 微电网保护分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 55-60.
ZHANG Yu-hai, WANG Xin-chao, XU Zhi-cheng, et al. Analysis of microgrid protection[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 55-60.
- [11] NATTHAPHOB N, GERALD T H, RAJA A, et al. Fault current contribution from synchronous machine and inverter based distributed generators[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(1): 634-641.
- [12] PEDRASA M, SPOONER T. A survey of techniques used to control microgrid generation and storage during island operation[C] // Proceedings of the 2006 Australian Universities Power Engineering Conference (AUPEC),

- Melbourne, Australia, December 10-13, 2006.
- [13] JAYAWARNA N, BARNES M, JONES C, et al. Operating microgrid energy storage control during network faults[C] // System of Systems Engineering, 2007. SoSE '07. IEEE International Conference on, 2007: 1-7.
- [14] NIKKHAJOEI H, LASSETER R. Microgrid protection[C] // Proceedings of the 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, USA, June 24-28, 2007.
- [15] ALWALA S, FELIACHI A, CHOUDHRY M A. Multi agent system based fault location and isolation in a smart microgrid system[C] // Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), IEEE PES, 2012.
- [16] 丁瑾, 袁振海. 10 kV 配电线路单相接地故障暂态电流行波选线研究[J]. 电测与仪表, 2009, 46(4): 29-34, 38. DING Jin, YUAN Zhen-hai. Study on line selection of 10 kV distributed line single-phase earth fault with transient current traveling wave[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2009, 46(4): 29-34, 38.
- [17] 艾斌, 吕艳萍. 基于小波模极大值极性的行波信号识别[J]. 电网技术, 2003, 27(5): 55-57. AI Bin, Lü Yan-ping. Traveling wave signal identification based on wavelet polarity of modulus maxima[J]. Power System Technology, 2003, 27(5): 55-57.
- [18] AL-NASSERI H, REDFERN M A, LI F. A voltage based protection for microgrids containing power electronic converters[C] // Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2006.

收稿日期: 2013-12-10; 修回日期: 2014-05-20

作者简介:

李练兵 (1972-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电池管理、电动汽车、光伏与风电并网变流器;

张晓娜 (1988-), 女, 通信作者, 研究生, 主要研究方向为继电保护、微电网保护; E-mail: 283586424@qq.com

张家安 (1975-), 男, 博士, 主要从事电力系统稳定与控制、电力系统仿真与并行计算研究。