

微电网继电保护的研究与应用

郭建勇¹, 李瑞生², 李献伟², 杨红培³

(1. 国家电网公司, 北京 100031; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000;
3. 许昌电气职业学院, 河南 许昌 461000)

摘要: 为了解决分布式电源接入电网产生的随机性及波动性, 以及对配电网继电保护和低压配电保护的影响, 分析了微电网接入对配电网一次设备的要求, 提出基于区域差动保护的配电网保护解决方案以及基于正反方向阻抗的低压配电保护解决方案。通过实际的工程实践证明, 区域差动保护很好地解决了微电网接入对常规配电网多电源以及重合闸等保护的影响, 正反方向阻抗的低压配电保护很好地解决了分布式电源接入低压配电网带来的影响。

关键词: 微电网; 分布式发电; 继电保护; 区域差动保护; 正反方向阻抗继电器

Application research of micro-grid relay protection

GUO Jian-yong¹, LI Rui-sheng², LI Xian-wei², YANG Hong-pei³

(1. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 2. XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China;
3. Xuchang Electrical Professional College, Xuchang 461000, China)

Abstract: The micro-grid is an effective way to solve the uncontrolled and stochastic volatility of distributed generation connected to the grid, this paper analyzes the impact of distribution relay protection from micro-grid access. We put forward the requirements for primary equipment of distribution network, distribution network protection solution based on regional differential protection, and low-voltage distribution protection solution based on the positive and negative direction impedance. Actual project proved that regional differential protection better solves the impact of conventional distribution network multi sources protection and reclosure protection from micro-grid access, and positive and negative direction impedance relay solves the impact of low-voltage distribution network protection from distribution generation access.

Key words: micro-grid; distributed generation; relay protection; regional differential protection; positive and negative direction impedance relay

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)10-0135-06

0 引言

微电网是指由分布式发电 (distributed generation, DG)、储能装置、能量变换装置、相关负荷等组成的发电系统, 是能够实现自我控制、保护和管理的自治系统^[1-2]。拥有并网和离网两种运行模式, 微电网接入给电力系统保护带来新的问题^[3-5]。微电网随着 DG 数量和渗透率的逐渐增加可能改变其内部潮流的方向, 从而给整个电网带来影响^[6]。并网运行时其潮流存在双向流动, 其双向流动的特点改变了常规配电网单向流动的特征, 同时微电网接入要求采用电力电子技术实现“柔性”接入, 其电源特征与常规的“旋转”发电机发电接入不同^[7-9], 微电网的接入对配电网继电保护和低压配

电保护带来一定影响。

1 微电网接入对配网继电保护的影响

1.1 微电网对配电网继电保护影响

常规 10 kV 配电网分为的单向辐射型网络或“手拉手”环网型开环运行方式。传统辐射状单端电源过流保护无方向元件, 大量的 DG 接入后, 配电系统变成多电源网络, 正常运行时配电网中的潮流分布及故障时短路电流的大小、流向和分布均会发生变化, 传统保护间的配合关系被打破, 保护的动作为和性能将无法满足新的要求^[10-14]。当接入 DG 后为两侧电源, 类似于在配电网接入一个常规的发电机, 因此也自然应如同传统两侧电网一样, 对于继电保护的影响仍是相邻线路保护误动问题,

重合闸不能正常熄弧重合不成功问题。

1.2 微电网对常规配电线路保护影响

低压配电系统电压等级 0.4 kV(380/220 V)，保护配置通常采用带继电保护的低压断路器（又称万能断路器）及采用熔断器保护、热继电器保护等。

如图 1 是微电网系统负荷电流流向图， \dot{E}_s 是配电网系统电势， \dot{E}_{DG} 是分布式电源电势，PCC 是公共连接点， Z_f 是微电网负荷， \dot{I}_f 为负荷电流。正常并网运行时，配电网系统电源 \dot{E}_s 及分布式电源 \dot{E}_{DG} 共同提供负荷电流，离网运行分布式电源 \dot{E}_{DG} 提供负荷电流。

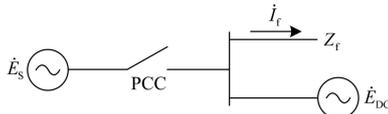


图 1 微电网系统负荷电流流向图

Fig. 1 Current flow diagram of load in micro-grid system

根据对称分量法，由不同故障的复合序网分析可知，三相短路故障电流最大；两相短路次之，为三相短路的 0.87 倍；单相接地故障电流最小，为三相短路的 0.55 倍或 0.75 倍。

由于 DG 的等效参数难以得到，下面采用短路容量法计算并网运行、离网运行时的短路电流。

并网运行，配电网系统电源 \dot{E}_s 及分布式电源 \dot{E}_{DG} 并联，系统电源 \dot{E}_s 的配电变压器的短路容量为 $S_{1k} = \frac{S_{1N}}{U_{1k}\%}$ ， $U_{1k}\%$ 为短路阻抗（短路电压）， S_{1N} 为配电变压器容量，系统电源提供的短路电流 $I_{1k} = \frac{S_{1k}}{\sqrt{3}U}$ ；按照逆变器的过电流保护不大于额定电流的 1.5 倍，分布式电源 \dot{E}_{DG} 的短路容量为 $S_{2k} = 1.5S_{2N}$ ， S_{2N} 为 \dot{E}_{DG} 逆变器容量，分布式电源 \dot{E}_{DG} 提供的短路电流 $I_{2k} = \frac{S_{2k}}{\sqrt{3}U}$ 。并网运行最大短路电流 $I_k = I_{1k} + I_{2k}$ ；离网运行由分布式电源 \dot{E}_{DG} 单独供电，最大短路电流 $I_k = I_{2k}$ 。

并网运行短路电流远远大于离网运行时短路电流，并网运行时短路电流主要是由配电网系统电源提供。并网运行时低压配电网故障时，系统电源及分布式电源共同提供故障电流，主要是由配电网电源提供，故障电流比没有 DG 接入时大；离网（孤岛）运行时低压配电网故障时 DG 提供故障电流，故障电流小。同时离网（孤岛）运行故障时由于逆变器的限流允许的最大输出电流为 $1.5I_n$ ；传统的带

继电保护的低压断路器脱扣时间接近 1 h ($I_n < 63$ A)，无法实现快速隔离故障的要求^[15-19]。

2 微电网接入配电网的保护方案

2.1 对配电网一次设备及继电保护的要求

由于微电网的接入，传统的配电一次设备无法满足快速故障隔离要求，因此需要配电网的一次设备配置为：1) 10 kV 以上配电网宜全部配置断路器；2) 0.4 kV 低压配电网宜配置支持外部遥控功能的微型断路器；3) 微电网接入应保证原有 0.4 kV 低压配电网接地方式不变，孤岛运行时，应考虑 DG 的接地。

2.2 基于区域差动的配电网继电保护

为解决微电网接入带来的问题，采用高压系统中成熟差动保护的方案，配置全线速动差动保护做主保护，配置简单过流作后备保护。

2.2.1 区域差动主保护

如图 2 是配电网系统及含有多个子微电网的保护配置示意图，对于 10 kV 电压等级配电网，可按照差动保护对象划分为多个保护区域，包括线路差动保护区域、母线差动保护区域、配电变压器保护区域，对于配电变压器的差流计算需考虑 Δ/Y 转角的影响；对于其他保护区域在假设电流的正方向为母线流向线路的前提下，差流为各侧电流的矢量和。区域差动保护采用启动判据与比率制动判据组成与门出口。

启动判据

$$I_d \geq I_{OP0} \quad (1)$$

比率制动判据

$$I_d > kI_r \quad (2)$$

式中： I_d 为差动电流， $I_d = |\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dots + \dot{I}_k|$ ； I_{OP0} 为启动判据的整定值； I_r 为制动电流， $I_r = |\dot{I}_1| + |\dot{I}_2| + \dots + |\dot{I}_k|$ ； k 比率制动系数； i_k 为被保护对象各侧电流。

断路器配置智能采集单元，通过 PTN (Packet Transport Network) 光纤通讯网，采用 IEC61850 标准中采样值 (Sampled Value, SV) 及面向通用对象的变电站事件 (Generic Object Oriented Substation Event, GOOSE) 报文机制完成信息交互。

区域差动保护与智能采集单元通过光纤环网利用 PTN 技术传输数据，采用基于 IEEE 1588 对时的同步机制，实现 100 ns 级同步精度。目前，基于 IEEE1588 V2 的协议实现时间同步，在 PTN 设备中已得到广泛应用。

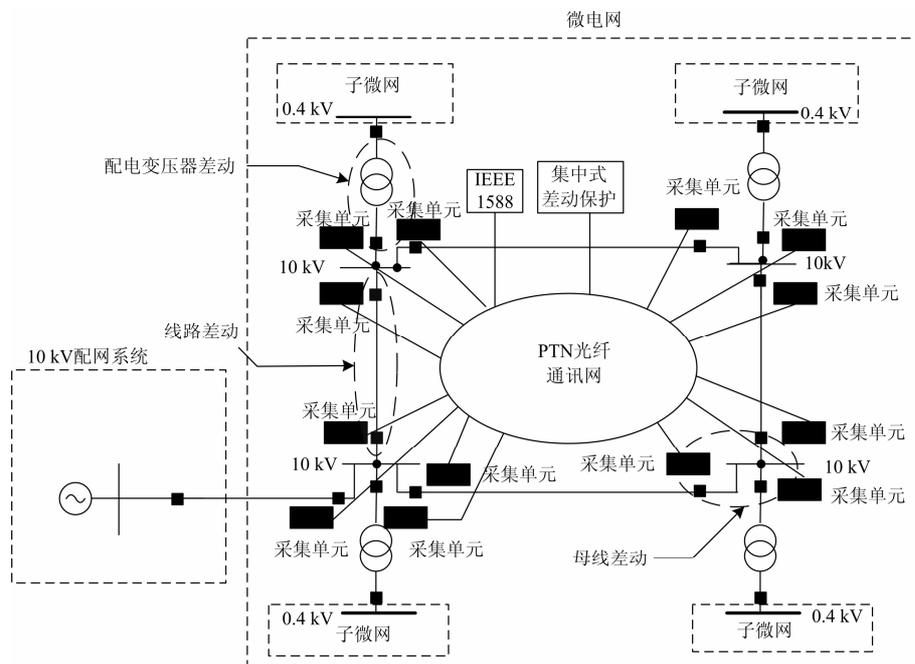


图 2 微电网系统及含有多个子微电网的保护配置示意图

Fig. 2 Protection configuration diagram of micro-grid system containing multiple sub-micro grid

区域差动保护基于的微电网三层体系结构, 分别是就地控制层的智能采集单元、集中控制层的区域差动保护和配网调度层的配网调度系统, 与微电网的三层网络架构保持一致。为了保证可靠性, 集中控制层的区域差动保护采取双重冗余配置。

区域差动保护通过采集配电网系统各个节点的电流和状态信息, 其本质是网络化的差动保护, 能够快速实现故障自动定位和隔离。

2.2.2 后备保护

在区域差动保护中, 配置失灵后备保护在断路器失灵拒动时由相邻断路器动作, 隔离故障。10 kV 及以上配电网系统配置双套区域差动保护, 其可靠性、速动性、灵敏性和选择性是有保证的, 从“强化主保护、简化后备保护配置”的原则出发, 配电网系统可配置简单的带时限过流或方向过流保护作为后备保护, 由智能采集单元实现, 防止因整个主网的网络通讯中断, 集中式区域差动保护退出运行而导致的主配电网失去全部保护的情形发生。

就地智能采集单元配置后备保护功能, 线路就地采集单元配置距离保护作为线路及母线的后备保护, 变压器就地采集单元配置过流保护作为变压器的后备保护; 配电升压变压器的高压侧配置带时限方向过流保护, 如图 3 (a) 所示, 作为变压器内部

故障的后备保护, 并对低压母线故障保证一定的灵敏性, 方向指向电源点, 电流值可整定得灵敏一些, 用以切除 0.4 kV 母线故障, 作为子微网内部故障的后备保护。配电降压变压器配置带时限过流保护, 如图 3 (b) 所示, 按躲过最大负荷电流整定。

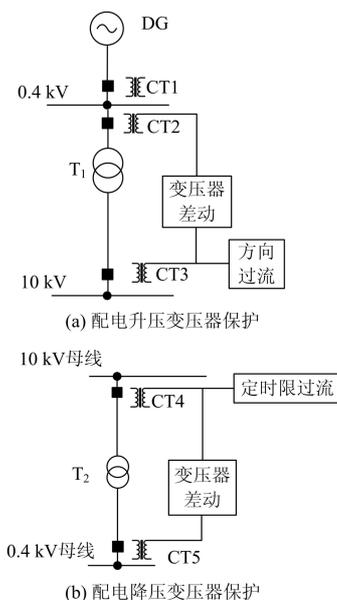


图 3 配电变压器后备保护

Fig. 3 Backup protection of distribution transformers

2.3 基于正反方向阻抗继电器的低压配电网继电保护配置

对于含有微电网的低压配电网，在有 DG 的馈线单元配置正、反方向的两种方向阻抗继电器构成距离保护，正方向阻抗继电器无延时出口，用于保护出线故障，反方向阻抗继电器延时 0.5 s 出口，用于保护低压母线故障。无 DG 的馈线单元（即负荷出线），配置正方向阻抗继电器构成距离保护，正方向阻抗继电器无延时出口，用于保护出线故障。

阻抗继电器采用过流启动，记忆正序电压极化，由于 0.4 kV 电压等级阻抗角较小，阻抗动作特性采用偏移阻抗特性。对于正方向阻抗继电器的定值按躲开最大负荷整定，当本线路相间（或接地）短路时该继电器动作，延时 0 s，快速出口跳开本线路的断路器。对于反方向阻抗继电器的定值按躲开变压器高压侧母线短路或按躲开高压侧出线电流速断保护末端短路整定，其定值较小，其保护范围至变压器内部（或至高压线路、低压线路一部分），其定值不能太大，以免高压侧短路时误动。当低压母线相间（或接地）短路时含有 DG 馈线单元的反方向继电器动作，延时 0.5 s 跳开本线路的 DL，切断本 DG 向外供电；当其他低压线路或变压器或高压线路的一部分短路时，本馈线单元的反方向阻抗继电器虽动作，但由于延时 0.5 s，能保证出口不动作，不跳开本线路的断路器，待故障切除后，该继电器自动返回。

此种距离保护配置，在微电网并网及离网运行时都投入运行，都能发挥保护效能，并且是微电网在离网运行（公共连接点断开）时唯一的保护，在微电网并网运行时它也是 0.4 kV 低压系统能跳开断路器的保护。

如图 4 为对微电网离网运行时保护动作及故障分析；DG 出口 d1 点故障，L2 的正方向阻抗继电器满足动作条件；L1、L3 正方向阻抗继电器不动作，反方向阻抗继电器动作；L4、L5 由于电流接近于零，正、反方向继电器均不动作，L2 的保护切除故障后，L1、L3 反方向阻抗继电器返回。

母线 d2 点故障，L1、L2、L3 正方向阻抗继电器不动作，反方向阻抗继电器动作；L4、L5 正、反方向阻抗继电器均不动作。L1、L2、L3 反方向阻抗继电器经延时跳闸。d3 点故障，L4 正方向阻抗继电器动作；L1、L2、L3 反方向继电器均动作；待故障切除后，L1、L2、L3 反方向阻抗继电器返回。L5 正、反方向阻抗继电器均不动作，L4 正方向阻抗继电器动作跳闸，切除故障。

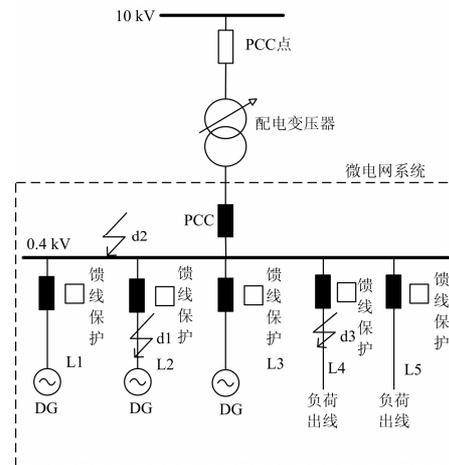


图 4 PCC 的离网保护逻辑图

Fig. 4 Islanding protection logic diagram of PCC

保护的动作用流程：电流元件启动后，正方向阻抗元件动作，判为本分支故障，跳开本分支故障；反方向阻抗元件动作，经延时元件（延时躲过馈线故障切除时间）动作后，跳开本分支线路断路器。

3 工程实践

本文介绍的研究成果已应用于许继集团有限公司开发的适用于微电网接入的配电网集中保护控制装置，实现了配电网故障识别、定位、故障隔离及保护的功能，同时配合微电网系统，进行微电网孤岛运行方式的识别及相关的处理措施，以确保分布式电源在多电源、多电源种类、复杂供电模式及运行方式下微机保护的可靠性及有效性为目标。

另外，本文介绍的微电网保护配置方案已在国家电网许继集团有限公司在北京上地的智能配用电实验基地项目中得到应用，该项目含有微电网的智能配用电系统控制保护功能，该方案运行效果良好。

4 结语

本文分析了微电网接入对配电网继电保护和低压配电保护的影响，提出了微电网接入对配电网一次设备的要求，提出了基于区域差动保护解决配电网保护的解决方案，基于正反方向阻抗解决低压配电保护的解决方案，并通过实际的工程证明，区域差动保护很好地解决了微电网接入对常规配电网保护的影响，正反方向阻抗继电器很好地解决了微电网接入对低压配电网保护带来的影响。

参考文献

[1] 盛鹏, 孔力, 齐智平, 等. 新型电网: 微电网研究综述 [J]. 继电器, 2007, 35(12): 75-80.

- SHENG Kun, KONG Li, QI Zhi-ping, et al. A survey on research of microgrid: a new power system[J]. Relay, 2007, 35(12): 75-80.
- [2] LASSETER R H, PIAGI P. Microgrid: a conceptual solution[C] // PESC Record-IEEE Annual Power Elec-tronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004: 4285-4290.
- [3] 苏玲, 张建华, 王利. 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. Study on some key problems and technique related to microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 235-239.
- [4] 刘杨华, 吴政球. 孤岛运行的微电网潮流计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 16-20.
- LIU Yang-hua, WU Zheng-qiu. Research on flow calculation method in island operation of the micro-power[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 16-20.
- [5] 姚勇, 朱桂萍, 刘秀成. 电池储能系统在改善微电网电能质量中的应用[J]. 电工技术学报, 2012, 26(1): 85-89.
- YAO Yong, ZHU Gui-ping, LIU Xiu-cheng. Improvement of power quality of micro-grids by battery energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 26(1): 85-89.
- [6] 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, 2012, 25(7): 117-122.
- CHEN Da-wei, ZHU Gui-ping. Power transmission characteristics of low voltage microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 25(7): 117-122.
- [7] 康龙云, 郭红霞, 吴捷, 等. 分布式电源及其接入电力系统时若干研究课题综述[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 43-47.
- KANG Long-yun, GUO Hong-xia, WU Jie, et al. Characteristics of distributed generation system and related research issues caused by connecting it to power system[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 43-47.
- [8] 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.
- [9] 孙孝峰, 吕庆秋. 低压微电网逆变器频率电压协调控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 77-84.
- SUN Xiao-feng, Lü Qing-qiu. Improved PV control of grid-connected inverter in low voltage micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 77-84.
- [10] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微电网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.
- WANG Cheng-shan, XIAO Zhao-xia, WANG Shou-xiang. Synthesized control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.
- [11] GIRGIS A, BRAHMA S. Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system[C] // Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, Halifax, Canada, 2001: 115-119.
- [12] 孙鸣, 赵月灵, 王磊. DG 容量及接入方式对变电站继电保护定值的影响[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(9): 46-49.
- SUN Ming, ZHAO Yue-ling, WANG Lei. Impact of DG capacity and location on relay protection of substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(9): 46-49.
- [13] 丁明, 王敏. 分布式发电技术[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7): 31-36.
- DING Ming, WANG Min. Distributed generation technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(7): 31-36.
- [14] NIKKHAJOEI H, LASSETER R H. Microgrid protection[C] // Power Engineering Society General Meeting, Tampa, USA, 2007: 1-6.
- [15] 杨恢宏, 余高旺. 微电网系统控制器的研发及实际应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 126-140.
- YANG Hui-hong, YU Gao-wang. Research and practical applications of micro-grid system controller[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 126-140.
- [16] 王新刚, 艾芊, 徐伟华, 等. 含分布式发电的微电网能量管理多目标优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 79-83.
- WANG Xin-gang, AI Qian, XU Wei-hua, et al. Multi-objective optimal management of microgrid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 79-83.

[17] 艾欣, 崔明勇, 雷之力. 基于混沌蚁群算法的微电网环保经济调度[J]. 华北电力大学学报, 2009, 36(5): 1-5.
AI Xin, CUI Ming-yong, LEI Zhi-li. Environmental and economic dispatch of microgrid using chaotic ant swarm algorithms[J]. Journal of North China Electric Power University, 2009, 36(5): 1-5.

[18] 杨佩佩, 艾欣, 崔明勇, 等. 基于粒子群优化算法的含多种功能系统的微电网经济运行分析[J]. 电网技术, 2009, 33(30): 38-42.
YANG Pei-pei, AI Xin, CUI Ming-yong, et al. Particle swarm optimization based economic operation analysis of microgrid containing multi energy supply system[J]. Power System Technology, 2009, 33(30): 38-42.

[19] 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 Zhao-xia, WANG Shou-xiang. Synthetical control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.

收稿日期: 2013-08-12; 修回日期: 2013-09-04

作者简介:

郭建勇 (1978-), 男, 工程师, 主要从事继电保护、电力可靠性分析等方面的研究; E-mail: jy-guo@sgcc.com.cn

李瑞生 (1966-), 男, 教授级工程师, 主要从事智能电网、继电保护等方面的研究;

李献伟 (1982-), 男, 工程师, 主要从事变电站综合自动化、智能电网等方面的研究。