

有源配电网电流差动保护应用技术探讨

高厚磊¹, 李娟¹, 朱国防¹, 徐丙垠², 赵宝光³, 李尚振³

(1. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东 济南 250061; 2. 山东理工大学智能电网研究中心, 山东 淄博 255049; 3. 国网山东省电力公司莱芜供电公司, 山东 莱芜 271100)

摘要: 有源配电网具有多电源、多分段、多分支、功率双向流动、弱馈等特征, 传统三段式电流保护难以保证选择性和灵敏性, 需要提供新的更有效的保护方法。基于该背景, 将正序故障分量电流差动保护引入到有源配电网, 探讨其应用原理与实现技术。针对不同的馈线结构, 给出了适应性差动保护动作判据及门槛整定原则。针对配电网线路特点, 提出并实现了基于故障信息的电流数据自同步方法。根据配电自动化通信体系最新进展, 探讨了基于点对点等通信实现差动保护数据交换的通信规约。基于智能配电终端平台, 开发出正序故障分量电流差动保护样机并对其进行了综合测试, 测试结果验证了所提保护方案的可行性。

关键词: 有源配电网; 分布式电源; 电流差动保护; 正序故障分量; 自同步; 对等通信

Study on application technology of current differential protection in active distribution network

GAO Hou-lei¹, LI Juan¹, ZHU Guo-fang¹, XU Bing-yin², ZHAO Bao-guang³, LI Shang-zhen³

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education (Shandong University), Jinan 250061, China; 2. Research Center for Smart Grid, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 3. Laiwu Power Supply Company, Shandong Electrical Power Corporation, Laiwu 271100, China)

Abstract: For active distribution network, its characteristics can be described as multi-source, multi-segment, multi-branch, bidirectional power flow, bidirectional fault current, weak-infeed and so on. In this case, the selectivity and sensitivity of traditional over current protection scheme cannot be ensured. It is necessary to provide more effective protection methods. This paper introduces a current differential protection scheme based on positive sequence fault component (PSFC) into active distribution network, and discusses its application principle and implementation technology. For different structure of feeders, the corresponding criterions and threshold setting rules are provided. In view of the current condition of distribution network, a self-synchronization scheme using fault signal is proposed and realized. And the communication protocols used for data exchange of differential protection based on peer to peer communication is discussed according to the new development of distribution automation communication architecture. Finally, the proposed protection prototype is developed based on a platform of intelligent distribution terminal, and the test results have verified the feasibility of the protection scheme.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050213) and National Natural Science Foundation of China (No. 51177094).

Key words: active distributed network; distributed generation; current differential protection; positive sequence fault component; self-synchronization; peer to peer communication

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)05-0040-05

0 引言

分布式电源作为一种崭新的发电形式, 在世界范围内获得了广泛关注。近年来, 分布式发电在欧

洲发达国家发展迅速, 有些国家 DG 容量已接近或者超过总发电装机容量的 50%。我国也在《“十二五”能源发展规划》中提出要大力发展靠近负荷布置的分布式风电、太阳能发电与天然气发电, 相应的国家电网公司和南方电网公司也出台了相关的并网服务政策, 为分布式电源的接入提供了良好的基础。可见, 未来的电网将有大量分布式电源分散接入中低压配电网; 未来的配电网将是 DG 高度渗透

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)重点项目(2012AA050213); 国家自然科学基金面上项目(51177094); 国网山东省电力公司重点科技项目(2013A-25)

的有源配电网。

传统配电网多为单辐射型网络, 闭环网络亦多开环运行, 其潮流与故障电流均单向流动, 因此传统配电网保护方法较为简单, 三段式电流保护即可满足保护的要求。而分布式电源的接入改变了配电网的结构, 使得传统配电网转变为有源网络; 其潮流与故障电流均可能双向流动, 大小和方向均具有不确定性。在此情况下, 传统三段式电流保护的灵敏度和选择性遇到挑战, 甚至出现误动或拒动的现象。

为解决含 DG 配电网的保护问题, 国内外学者做了大量的研究工作, 取得了一系列成果^[1-11], 在理论及技术方面为分布式电源的并网应用起到了指导作用。由于分布式电源的不确定性以及配电网目前具备的客观条件, 前期成果在应用中将受到以下一个或多个因素的影响: (1) DG 的接入位置、容量及类型; (2) 配电网节点 PT 配置有限, 难以获取充足的电压信息; (3) 配电网网络拓扑结构复杂, 难以识别和适应; (4) 通信方式的可靠性及实时性; (5) 只利用故障分量的相位信息。因此, 有必要针对以上制约因素, 研究能够满足 DG 随机接入且对网络结构具有较强适应性的保护与控制方法。

解决含 DG 配电网保护问题的重要基础是配电网的通信体系。文献[12-13]在此方面做了大量有价值的研究探索, 并已成功开发出具有对等通信功能的智能终端装置。本文以此为基础, 将电流差动保护引入有源配电网, 研究其应用的可行性。文章的主要内容包括: 有源配电网的主要特征; 采用正序故障分量电流差动保护的原因; 差动保护动作判据的设计; 保护原理的实现技术以及试验测试结果。

1 有源配电网的特征

有源配电网指分布式电源高度渗透、功率双向流动的配电网。所谓“高度渗透”是指接入的 DG 对配电网的潮流、短路电流产生了实质性的影响, 传统配电网的规划设计、保护控制、运行管理方法等不再有效。以图 1 所示系统为例对有源配电网的特征进行分析。

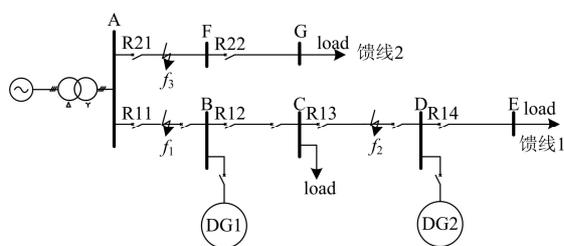


图 1 含分布式电源的配电网模型

Fig. 1 Distributed network model with DGs

(1) 多电源网络

如图 1 所示, 与传统配电网单电源供电不同, 有源配电网中除系统电源外, 还存在一个或多个 DG, 且 DG 的总容量大(各 DG 的容量可能较小), 渗透率高。

(2) 潮流与故障电流双向流动

一般 DG 受自然因素影响较大, 其出力也随之具有一定的波动性。假设图 1 中 DG2 的容量较大, 当自然条件较好时, 有可能同时给上、下游负荷供电, 保护 R13 上的电流为线路流向负荷; 当自然条件较为恶劣时, 可能导致 DG2 的出力小于下游负荷, 则此时保护 R13 上的电流为母线流向线路。同理, 当 f_2 点发生故障时, DG1 和 DG2 同时向故障点提供短路电流, 使得保护 R11 上的电流由线路指向母线。

可以看出, 有源配电网中潮流与负荷均会出现双向流动的现象并具有不确定性; 故障电流的幅值及相位会因此受到负荷电流的影响。

(3) 具有分支负荷与分支电源

与输电网相比, 配电线路结构复杂, 具有多分段、多分支的结构特点。分支线路上有可能是分支负荷也有可能是分支电源。而配电网设备相对落后, 电压电流信息不完整, 分支负荷可能为不可测分支。

(4) 弱馈现象

以图 1 所示 f_1 点故障为例, 有源配电网故障点下游 DG 向故障点提供短路电流, 故障点下游的保护流过的故障电流不为零。该故障电流的大小受 DG 的容量、类型、接入位置等影响。当 DG 提供的故障电流较小时, 尤其是逆变类 DG, 会出现严重的弱馈现象。

(5) 电压信息不足

由于经济方面的原因, 目前配电网除变电站出口母线处配置全相电压互感器外, 其余节点不配置 PT 或不配置全相 PT, 因此很难获取全相电压信息。

2 正序故障分量电流差动保护的引入

在输电线路保护中, 电流差动保护因性能优越而被广泛应用, 其优点主要表现为: 绝对选择性; 灵敏度高; 适用于单端、两端及 T 接线路; 适用于一端为弱馈的线路; 不需要电压信息。根据前述有源配电网的特征分析, 电流差动保护在原理上恰好适应解决有源配电网的保护问题。

电流差动保护在进行差动比较时既可以采用全电流, 也可以采用故障分量电流。为有效消除有源配电网中负荷对故障电流的影响, 提高高阻故障及弱馈情况下保护的灵敏度, 因此考虑采用基于故障

分量的电流差动保护。

由于分相差动所需要传输的信息量较大，会加重配电网信道的通信压力；同时差动保护主要用来对付两相及三相故障且配电网主要采用三相重合闸，不需要判断故障类型；因此考虑采用基于正序故障分量的电流差动保护。将基于正序故障分量的电流差动保护引入有源配电网，不需要电压信息的配合，可以反映所有的故障类型，有效适应配电网多分段、多分支的结构特点并能解决弱馈问题。

3 差动保护动作判据设计

配电线路与输电线路相比，具有电压等级低、线路短、分布电容小、分支多等特点，在建立正序故障分量电流差动保护动作判据时，将以输电线路中成熟应用的判据为基础，结合配电网不同结构的馈线情况进行设计。

3.1 无分支馈线

如图 2 所示，当差动区内无分支电源或负荷时，其动作判据整定为

$$\begin{cases} |\Delta \dot{I}_{mg1} + \Delta \dot{I}_{ng1}| > I_{set1} \\ |\Delta \dot{I}_{mg1} + \Delta \dot{I}_{ng1}| \geq K_{rel} |\Delta \dot{I}_{mg1} - \Delta \dot{I}_{ng1}| \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\Delta \dot{I}_{mg1}$ 、 $\Delta \dot{I}_{ng1}$ 为 M、N 两侧的正序故障分量； I_{set1} 主要用来防止稳态情况下保护误动，按考虑两端 CT 误差整定； K_{rel} 按躲过区外故障 CT 饱和进行整定。

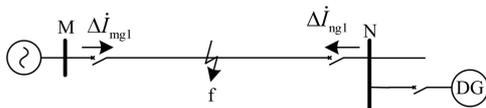


图 2 无分支馈线示意图

Fig. 2 Diagram of feeder without branch

3.2 含不可测分支馈线

如图 3 所示网络，差动区内存在不可测分支负荷。在负荷投切时，保护将反映为故障分量，必须将其躲过才能使保护不发生误动，其判据按是否引入电压量分别进行考虑。

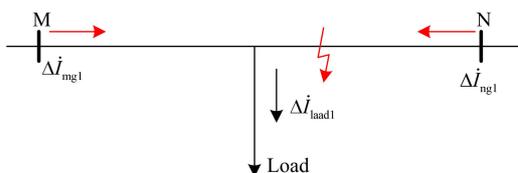


图 3 含不可测分支的馈线示意图

Fig. 3 Diagram of feeder with unmeasured branch

(1) 不引入电压量的判据

$$\begin{cases} |\Delta \dot{I}_{mg1} + \Delta \dot{I}_{ng1}| > I_{set1} \\ |\Delta \dot{I}_{mg1} + \Delta \dot{I}_{ng1}| \geq K_{rel} |\Delta \dot{I}_{mg1} - \Delta \dot{I}_{ng1}| \end{cases} \quad (2)$$

式中： I_{set1} 按考虑分支线负荷投切不误动整定； K_{rel} 按区外故障保护不误动进行整定。

与判据 (1) 相比，判据 (2) 的制动门槛较高，由此会降低保护的灵敏度。为解决该问题，可考虑引入电压量的方法。

(2) 引入电压量的判据

负荷投切时，电压会在额定值附近发生波动但不会发生大的变化，以电压量做参考可降低保护门槛。判据为

$$\begin{cases} |\Delta \dot{I}_{mg1} + \Delta \dot{I}_{ng1}| \geq I_{set1} \\ |\Delta \dot{I}_{mg1} + \Delta \dot{I}_{ng1}| \geq K_{rel} |\Delta \dot{I}_{mg1} - \Delta \dot{I}_{ng1}| \\ |U_{\varphi} - U_N| \geq U_{set} \quad \text{任意两相满足条件} \end{cases} \quad (3)$$

式中： I_{set1} 、 K_{rel} 的整定同式(1)； U_{φ} 为 A、B、C 三相任一相电压； U_{set} 按躲过正常运行情况下的最大波动范围来整定。

若本地配有 PT，可就地采集电压信号；否则通过通信从远方获取。

3.3 含弱馈端的馈线

如图 2 所示网络，假设被保护区段内部故障。因 M 侧为系统侧，其正序故障分量电流较大；N 侧因负荷电流或故障电阻等原因，其正序故障分量电流较小，表现为弱馈端。若 N 侧电流虽小但能够启动本侧保护，则差动保护正常动作；若 N 侧保护因电流太小无法启动，则通过采用特殊逻辑设计，由 M 侧发远跳命令控制 N 侧跳闸，完成故障的隔离。

4 差动保护实现技术

实现电流差动保护的关键技术有两点：一是线路两端的电流数据同步；二是两端电流数据的实时交换。输电线路差动保护采用专用通道或 SDH 网络进行数据通信；采用乒乓算法或利用 GPS 时钟信号实现数据同步。配电网中不具备这样的通信条件，其电流差动保护的实施应充分考虑配电网的现状特点，在降低成本的基础上进行。本文采用故障信号自同步方式实现数据同步；采用基于以太网的对等通信方式实现数据交换。

4.1 基于故障信号的自同步方法

配电线路的长度多为几公里或十几公里, 电磁波的传播时间在这样长的线路上可被忽略。因此, 当线路中某点故障时, 两侧检测到的故障起始时刻可被认为是同一时刻, 以此作参考, 进行故障分量电流的计算, 可实现两侧电流数据的同步, 如图 4 所示。此方法的同步精度在于对故障起始时刻检测的准确性, 特别是在电流波形过零附近的故障。本文采用三点乘积算法进行快速故障检测, 在采样率不低于 3 200 Hz 的情况下, 理论上可保证两端同步误差不超过 0.33 ms (约 6°), 基本满足电流差动保护对同步误差的要求; 提高采样率可进一步提高同步精度。以上同步方法已申请专利。

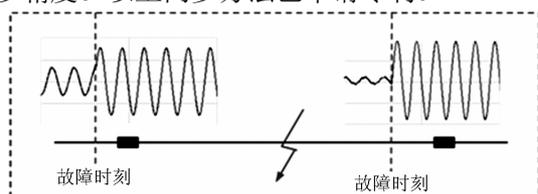


图 4 故障信号自同步示意图

Fig. 4 Self-synchronization scheme using fault signal

4.2 基于对等通信的数据传输

传统配电自动化主要采用一点对多点通信方式, 即主站与所有配电终端进行通信, 由主站根据收集的信息进行集中控制, 其通信速度慢、实时性差, 故障恢复的时间在数秒至十几秒。要满足智能配电网快速故障定位、隔离与恢复的要求, 配电自动化应采用点对点通信方式并实现分布式智能控制, 即配电终端具备相互间对等通信和就地控制的功能。

针对上述目标, 文献[12-14]研究了 IP 网络以及 IEC61850 标准在配电自动化中应用的可行性以及分布式智能控制技术。研究表明, 利用基于 TCP/IP 或 GOOSE 协议的以太网, 能够实现智能配电终端间的对等通信; 相对于 TCP/IP 协议, GOOSE 协议在保证可靠性的情况下, 具有更快的传输速度。本文即采用这种先进的通信方式实现正序故障分量电流差动保护的数据交换, 如图 5 所示。

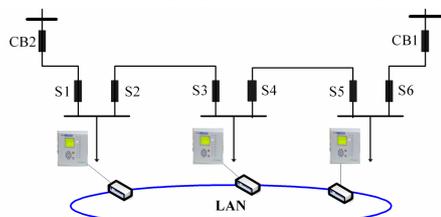


图 5 基于以太网的对等通信示意图

Fig. 5 Peer to peer communication based on Ethernet

5 试验测试

为考证所提保护原理及实现方案的可行性, 基于山东科汇公司最新研制的智能配电终端平台 (PZK-5), 开发了自同步正序故障分量电流差动保护样机; 利用有源配电网物理模拟平台对所开发装置进行了综合测试, 包括对等通信能力、自同步能力、保护性能等方面。图 6、图 7 分别为试验场景和典型录波结果。

主要试验结果为: 装置在 TCP/IP 或 GOOSE 协议下均可实现对等通信; 6 400 Hz 采样率下, 两端数据自同步平均误差不超过 2° ; 能正确反映被保护区段内、外部故障; 单端电源、弱馈情况下动作正确; 保护动作时间 (含通信时间) 小于 45 ms。测试结果与理论分析基本吻合。

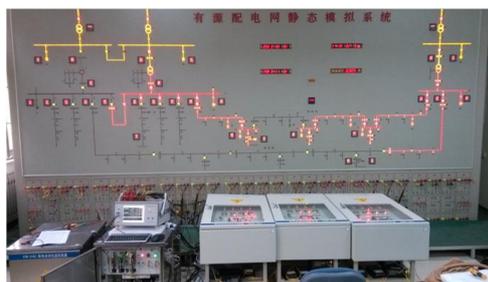


图 6 保护样机测试现场

Fig. 6 A snap shot of prototype test venue

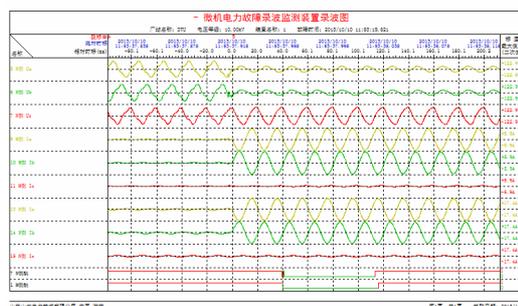


图 7 区内两相短路故障录波图

Fig. 7 Fault record for internal phase to phase fault

6 结论

根据有源配电网对保护的要求, 提出一种基于正序故障分量的电流差动保护方法。结合配电网实际条件和当前通信技术, 提出基于检测故障时刻的数据自同步方案和基于对等通信的数据交换方案。基于智能配电终端硬件平台, 成功开发出具有自同步差动保护功能的装置样机; 试验结果验证了所提保护原理、同步方法及通信方案的正确性和可行性,

对分布式电源类型、接入位置、接入容量等具有较强的适应性。

参考文献

- [1] 贾伟, 张永生, 吴寿山. 用于含分布式电源配网保护的无电压方向元件研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 41(2): 94-97.
JIA Wei, ZHANG Yong-sheng, WU Shou-shan. Research on directional element without voltage in distribution network protection with DG[J]. Power System Protection and Control, 2011, 41(2): 94-97.
- [2] 孙景钉, 李永丽, 李盛伟, 等. 含逆变型分布式电源配电网自适应电流速断保护[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 71-76.
SUN Jing-liao, LI Yong-li, LI Sheng-wei, et al. Study on adaptive current instantaneous trip protection scheme for distribution network with inverter interfaced DG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 71-76.
- [3] 张艳霞, 代凤仙. 含分布式电源配电网的馈线保护新方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 71-74.
ZHANG Yan-xia, DAI Feng-xian. New schemes of feeder protection for distribution networks including distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 71-74.
- [4] 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.
- [5] 孙景钉, 李永丽, 李盛伟, 等. 含分布式电源配电网保护方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 81-84.
SUN Jing-liao, LI Yong-li, LI Sheng-wei, et al. A protection scheme for distribution system with distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1): 81-84.
- [6] 胡汉梅, 郑红, 赵军磊, 等. 基于配电网自动化的多 Agent 技术在含分布式电源的配电网继电保护中的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 102-105.
HU Han-mei, ZHENG Hong, ZHAO Jun-lei, et al. Application of the distributed automation based multi-Agent technology in the distributed protection with DG[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 102-105.
- [7] 尚璠, 邵能灵, 刘琦, 等. 考虑分布式电源的配电网保护改进方案研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 40-44.
SHANG Jin, TAI Neng-ling, LIU Qi, et al. New protection method for distribution network with DG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 40-44.
- [8] 林霞, 陆于平, 王联合, 等. 含分布式电源的配电网智能电流保护策略[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 82-89.
LIN Xia, LU Yu-ping, WANG Lian-he, et al. An intelligent current protection strategy for distribution network containing distributed generation[J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 82-89.
- [9] 曹贵明. 基于正序故障分量的含分布式电源配电网保护研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
CAO Gui-ming. Protection researches of distribution network based on the positive sequence fault components[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [10] 林霞, 陆于平, 王联合. 分布式发电条件下的新型电流保护方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 50-56.
LIN Xia, LU Yu-ping, WANG Lian-he. New current protection scheme considering distributed generation impact[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 50-56.
- [11] PRADHAN A K, ROUSTRAY A, GUDIPALLI S M. Fault direction estimation in radial distribution system using phase change in sequence current[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(4): 2065-2071.
- [12] 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 Guo-zheng, XU Bing-yin, SUONAN Jia-le, et al. Communication technology for distribution automation based on IEC 61850[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 62-66.
- [13] 韩国政, 徐丙垠. IP 网络在配电自动化中的应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 57-60.
HAN Guo-zheng, XU Bing-yin. Application of IP network in distribution automation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 57-60.
- [14] 徐丙垠, 薛永端, 李天友, 等. 智能配电网广域测控系统及其保护控制应用技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 1-9.
XU Bing-yin, XUE Yong-duan, LI Tian-you, et al. A wide area measurement and control system for smart distribution grids and its protection and control application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 1-9.

收稿日期: 2014-01-06

作者简介:

高厚磊(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统保护与控制方面的研究工作; E-mail: houlei@sdu.edu.cn

李娟(1987-), 女, 在读博士生, 研究方向为配电网故障检测;

朱国防(1975-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为智能配电网保护与自动化。