

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190008

含 DG 配电网分层分区协同故障定位隔离技术

张孟琛, 牛益国, 宣文华

(国网冀北电力有限公司秦皇岛供电公司, 河北 秦皇岛 066000)

摘要: 高密度分布式电源并网使配电网故障状况复杂, 故障定位困难。针对含高密度分布式电源馈线自动化故障定位与隔离技术, 构建了基于分布式智能馈线自动化系统的故障定位方案。分析了含 DG 配电网区域性故障判别方式, 引入区域电流代数和变化作为故障区域定位的基本判据, 提出了依据电流相角突变的保护判据。以 19 节点网络仿真模型对上述方案进行验证, 此方案可快速实现故障定位与故障隔离, 对高密度分布式电源的接入具有良好的适应性。

关键词: 馈线自动化; 分布式电源; 分层分区; 馈线智能单元; 故障定位

Hierarchical zoning collaborative fault location and isolation technology for distribution networks containing DG

ZHANG Mengchen, NIU Yiguo, XUAN Wenhua

(Qinhuangdao Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: High density distributed power supply complicates the fault current of distribution network, and makes fault location difficult. In this paper, a fault location scheme based on distributed intelligent feeder automation is proposed to locate and isolate feeder automation fault. The regional fault identification methods for distribution networks with DG is analyzed, the regional current algebra and variation are introduced as the basic criteria for fault location, and the protection criteria based on the sudden change of current phase are proposed. Finally, the proposed scheme is verified by a 19-node network simulation model, which shows that this scheme can realize fault location and isolation quickly and has good adaptability to the access of high-density distributed power supply.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777121).

Key words: feeder automation; distributed generation; layering and zoning; feeder intelligent unit; fault location

0 引言

随着世界能源危机的加深, 分布式电源 (Distributed Generation, DG) 迅速发展并得到广泛应用。分布式发电的并网容量不断增大、渗透率不断加深, 使得配电网从传统辐射分布网络向多电源的复杂网络发展^[1-3]。配电网分支多、结构多样, 高密度 DG 的接入使网络架构更加繁杂, 改变了传统配电网单电源、潮流单向流动的特点, 运行方式灵活多变, 影响配电网短路电流分布。配电网短路故障时 DG 会注入短路电流, 使得故障电流分布愈加复

杂^[4-5], 配电网原有馈线保护的工作环境发生变化, 对高密度 DG 并网适应性较差, 传统馈线自动化系统中基于过电流保护的故障定位算法失效, 有可能导致配电网中馈线自动化系统不能正确故障定位与隔离。因此, 研究适用于含 DG 配电网的故障定位方案, 提高现有配电自动化系统对 DG 接入的适应性是解决上述问题的一种有效途径。

传统的配电网故障定位方法有阻抗法^[6]、矩阵法^[7]、相位法^[8]、行波法^[9]和人工智能法^[10]等。近年来, 为了对含 DG 配电网准确地故障定位, 许多学者对这些故障定位方法进行了进一步的研究。文献[11]采用故障电压与电流配合的方法进行故障定位, 但配网馈线一般不装设电压互感器, 故其应用会受限。文献[12-13]提出了利用电流相角特征的故障定位方法, 且不需要加装电压互感器, 但应用于

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777121); 国网秦皇岛供电公司 2018 年群众性创新研究开发项目资助(520104170004)

多分支线路时可能出现定位错误。文献[14]对此方法进行改进,提出了一种适用于多电源、多分支配电网的方法。文献[15-16]采用改进的行波法进行故障定位,行波法不受 DG 的影响,能够适应 DG 接入配电网。文献[17-18]采用线性整数规划的故障定位方法,较人工智能算法数值稳定性好,且不易陷入局部最优。文献[19-20]分别采用基于拓扑片的馈线拓扑分散法和综合考虑可靠性、可观性的方法对馈线终端进行配置,能够有效提高故障定位的效率和可靠性。

针对传统馈线自动化系统难以适应高密度 DG 接入的问题,本文提出一种分层分区结构配电网故障定位实现方案,给出馈线分布式智能单元的功能和协同工作方式,建立基于馈线终端单元点对点通信的保护方案,提出依据故障电流幅值和相角突变特征的保护判据,解决传统馈线自动化系统中故障隔离和定位算法失效的问题。本文所提出的方案反

映故障区域内的电流变化,不受 DG 投退的影响,适应高密度 DG 接入,能够正确判断故障,可以实现故障点快速准确定位与隔离。

1 分布式智能馈线自动化系统实现方案

1.1 分布式智能馈线自动化系统总体结构

分布式智能馈线自动化系统采用分层分区模式构建。如图 1 所示,该系统采用三层逻辑架构,包括馈线智能单元(Feeder Unit, FU)、区域智能单元(Zone Unit, ZU)和终端智能单元(Unit, TU)。FU 安装在馈线出口处,负责对馈线不同智能单元进行协调, FU 可以通过 ZU 对 TU 进行远程操作,实施控制。以每个分段器为区域分界点,将馈线分成若干区域, TU 负责采集故障信息。相邻智能单元之间均可以与同级及上下级单元交换故障检测、定位与隔离等状态信息。

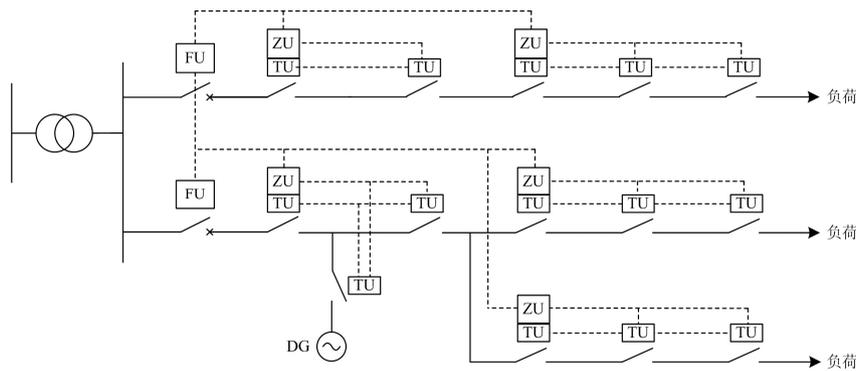


图 1 系统基本框架图

Fig. 1 System basic frame diagram

1.2 智能单元的类型及功能配置

在分布式馈线自动化系统框架中,通过各单元配合协作,实现故障定位。FU、ZU 与 TU 仅从网络逻辑上作区分,在硬件平台上没有区别,可采用统一的智能终端,不需要额外进行改造与加装设备。各智能单元的功能如下。

(1) FU

FU 配置于变电站内,每条出线配置一个 FU。FU 之间可进行通信,互相配合,协同管理;每个 FU 也可以与其下级 ZU 进行通信,传送故障信息和控制指令。

(2) ZU

以沿馈线安装的分段器为界将馈线进行分区,每个区域配置一个 ZU。每个 ZU 最少由两个相邻的 TU 组成。ZU 与区域内 TU 进行 GOOSE 信息交互、处理与分析,可与对应上级 FU 进行 GOOSE 通信。

(3) TU

TU 为最低层次智能单元,沿馈线安装,由 ZU 规定正方向,对线路状态进行监测。分断器上的 TU 既是低层开关动作单元,又是区域负责信息上汇单元。TU 负责所在区段的故障判别,控制分断器进行分合闸操作,具有点对点通信功能,与相邻的 TU 完成 GOOSE 信息交互。

1.3 智能馈线自动化通信方式

本文所提出的分布式智能馈线自动化系统是基于分布式馈线自动化系统构建的,其整体网络需要在相邻终端间完成点对点通信,对通信水平要求较高。为保证安全性和抗干扰性能,通信网络采用光纤以太网方式组建,采用基于 IEC61850 的 GOOSE 快速通信模式。

GOOSE 服务以高速对等网络通信(P2P)为基础,其体系结构中各终端既是网络参与者、网络服

务获取者,也是信息、资源与功能服务的提供者。相对主/从(Master/Slave)网络结构,可降低设备的维护成本。GOOSE 报文的发送和接受分别由 Publisher (公告式发布)和 Subscriber(预定式接受)来执行。对于 Publisher,发送 GOOSE 报文时间间隔并非一直不变,没有 GOOSE 事件发生时,报文的间隔会依照最初设定值进行发送;事件发生时,监测目标发生了变化,报文便会根据设定的最小时间间隔进行发送,之后间隔逐渐变大,直到事件状态结束,报文发送时间间隔又变回设定的初值。具体发送时间间隔如图 2 所示。

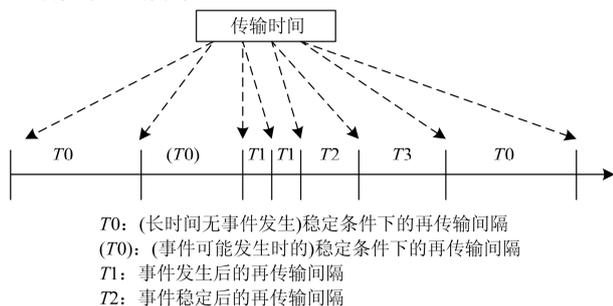


图 2 GOOSE 报文发送时序图

Fig. 2 GOOSE message sending sequence diagram

2 方案实施

在通信网络的支持下,本文所提方案与变电站常规馈线保护在动作时序上相互配合。当线路发生故障时,馈线保护首先动作,使线路出口断路器动作,切断故障线路。故障点两侧 TU 将检测到的故障信号通过点对点通信方式上传到 ZU, ZU 通过故障定位算法判断故障区段,向 TU 下发指令完成故障区段隔离,同时将故障定位结果上报给 FU。方案实施流程如图 3 所示。

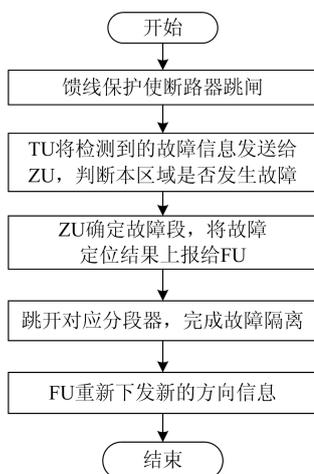


图 3 故障定位与隔离流程图

Fig. 3 Flow chart of fault location and isolation

具体实施过程如下:

(1) 当故障发生时, FU 检测到故障电流,站端馈线保护先动作,向断路器发送跳闸信号,切断故障线路。故障发生后,可触发 GOOSE 服务, TU 检测到故障信息立即传送给 ZU。

(2) ZU 对所获取的故障信息进行分析,判断本区域是否发生故障,并将判断结果发送至上级 FU 统一调控。

(3) 确定故障发生区域后,由该区域 ZU 向区内 TU 发送控制指令, TU 之间进行点对点通信,将自身故障信息与相邻 TU 进行对比分析,确定故障段,并将故障定位结果经 ZU 上报给 FU,以便后续故障排查。

(4) 完成故障定位后, FU 将故障隔离信号发送给故障区域 ZU,再统一发送至 TU, TU 确认分段器(断路器或负荷开关)处于故障区段,每一个分段器只受自身所属 FU 的跳闸指令控制。若本地开关为断路器时,控制本地断路器跳闸;若本地开关为负荷开关时, ZU 向 FU 发送信息,使上游断路器跳闸。

故障区域内的 DG 需要退出运行,主要依靠 FU 向跳闸断路器的下游区域中 ZU 发送切除 DG 命令。ZU 断开本地负荷开关,并向其下游 TU 发送故障隔离命令和故障指示信号,实现故障隔离,同时将相关信息上报给主站。

(5) 故障后 FU 将新的方向信息下发,重新整定 TU 正方向。

当故障发生时,若通信异常或开关动作失效,则启用延时自动跳闸隔离的后备方案,各 TU 设置相应的最大过流限制,延时时间设定为 0.1 s。若在延时等待期间内通信恢复正常,能接受相应的 GOOSE 报文,则继续完成故障处理;若通信未恢复,延时时限结束后,检测到本区域未有过电流,则不再动作;如若仍检测到过流信息,则 TU 驱动跳闸。

GOOSE 服务会在故障发生后立即被触发,信息传递极快,延迟相对于线路出口断路器动作时限较小,在最不利的通信条件下 GOOSE 通信延时最大可能为 12 ms^[21]。本文所提出方案仅需 4 次 GOOSE 通信,至多 48 ms 通信时间完成故障定位和隔离。如果计及 TU 延时时间 0.1 s,故障隔离时间小于重合闸启动整定时间(通常为 1~2 s)。因此本方案整体动作实时性和时序不会对馈线主保护和重合闸造成影响。

3 含 DG 配电网故障区域定位判据

3.1 配电网区内智能单元故障方向整定

针对馈线故障,本文基于电流的变化、方向及相

角信息来确定故障位置。由 ZU 统一向区域内 TU 发送方向指令,规定如图 4 所示正常运行情况下正方向。故障发生时, TU 将故障区域隔离后,需要综

合联络开关 S 动作情况,重新规定正方向。如图 5 所示,当 K 点故障时,两侧分断器隔离故障之后,依据所在母线 FU,重新规定正方向。

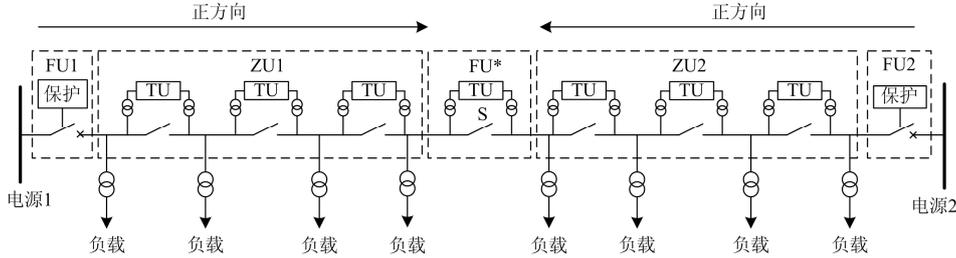


图 4 正常运行时正方向设置图

Fig. 4 Positive direction setting diagram during normal running

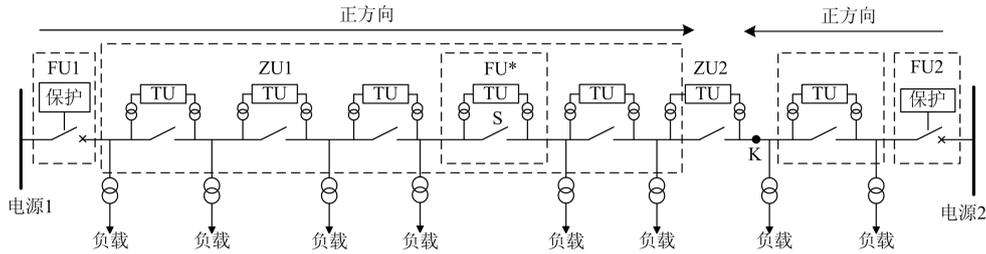


图 5 故障运行时正方向设置图

Fig. 5 Positive direction setting diagram during fault running

3.2 区域电流总量故障判据

区域流入电流与流出电流由 ZU 负责监测,并上报给 FU, FU 计算出区域内电流总量 I_{Z_k} 。

$$I_{Z_k} = \sum_{i=1}^n I_{\text{Entrance},i} - \sum_{j=1}^m I_{\text{Exit},j} \quad (1)$$

式中: $I_{\text{Entrance},i}$ 为第 i 条线路流入区域电流; $I_{\text{Exit},j}$ 为第 j 条线路流出区域电流; n 为流入区域电流的数量; m 为流出区域电流的数量; k 为区域编号。

如果区域内电流总量 I_{Z_k} 出现突变,可判断该区域发生了故障。反之,若 I_{Z_k} 未出现突变,表明故障发生在别的区域,当前区域没有发生故障。故障区域内电流总量变化的百分数 K_{Z_c} 为

$$K_{Z_c} = \left(\frac{|I_{Z_{\text{new}}}| - |I_{Z_{\text{old}}}|}{|I_{Z_{\text{old}}}|} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中, $I_{Z_{\text{old}}}$ 和 $I_{Z_{\text{new}}}$ 分别为每个周波前后区域内电流总量。

如果故障区域电流总量变化的百分数 K_{Z_c} 满足

$$K_{Z_c} \geq K_{\text{set}} \quad (3)$$

则可判断该支路发生了故障。反之,表明该支路没有发生故障。 K_{set} 为阈值定值。该判据能够掌

握整个区域内的电流变化,不受 DG 投退的影响。

3.3 电流相角突变量方向定位判据

故障发生时启动故障定位程序,当 ZU 所在区域内发生故障时,每个 TU 与相邻 TU 通过通信网络交换信息,根据上下游 TU 检测到的故障前后电流相角突变量方向判断该区段是否发生故障。如果某段线路内部故障,满足

$$\Delta\phi = \arg(i/i_{\text{pre}}) < 0^\circ \quad (4)$$

如果某段线路外部故障,则

$$\Delta\phi = \arg(i/i_{\text{pre}}) > 0^\circ \quad (5)$$

式中, i_{pre} 与 i 分别为故障前后电流相量,由 TU 负责检测,并将检测得到的信息发送给对应的 ZU。

如图 5 所示,在 DG 接入处安装 ZU, K 点发生短路故障时, TU3、TU4 和 TU8 测量到的电流极性值分别为 $\Delta\phi_3$ 、 $\Delta\phi_4$ 和 $\Delta\phi_8$, 存在下面的关系:

$$\begin{cases} \Delta\phi_3 < 0^\circ \\ \Delta\phi_4 < 0^\circ \\ \Delta\phi_8 < 0^\circ \end{cases} \quad (6)$$

通过式(6)可判断出故障点位于 TU3、TU4 和 TU8 之间的区域内。ZU 下发跳闸命令,使 TU8、TU9 处的断路器跳闸,使 DG3、DG4 脱网, TU3 和 TU4 发出告警信号,等待运维人员检修。故障如图 6 所示。

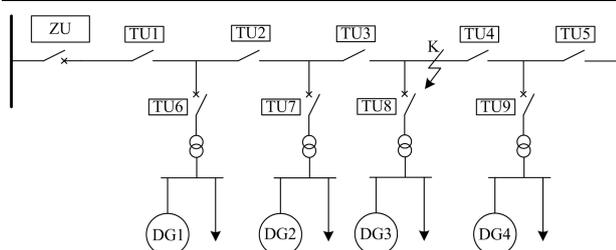


图 6 含 DG 的区域内故障图

Fig. 6 Intra-area fault diagram with DG

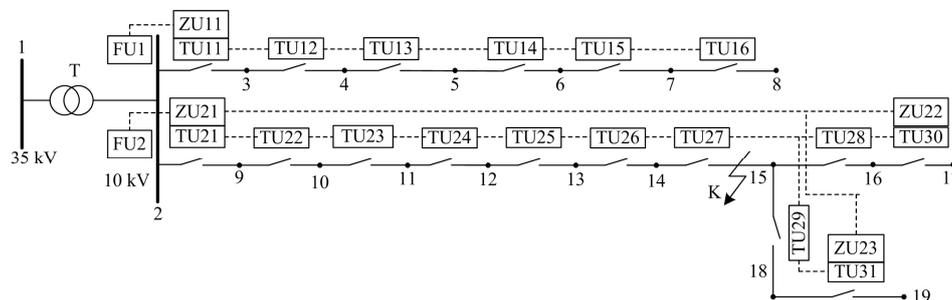


图 7 10 kV 配电系统图

Fig. 7 10 kV distribution system diagram

表 1 线路参数

Table 1 Line parameter

线路电阻/(Ω /km)	线路电抗/(Ω /km)	线路电导/(S/km)
0.33	0.342	2.71×10^{-4}

表 2 配电网有功和无功负载

Table 2 Active and reactive load of distribution network

节点号	有功功率/kW	无功功率/kvar
2	300	164
3	800	400
4	700	240
5	300	270
6	600	300
7	300	180
8	300	100
9	300	100
10	450	380
11	600	200
12	500	140
13	700	320
14	400	150
15	300	200
16	450	200
17	450	200
18	600	400
19	500	200

配电网共接入光伏 1.82 MW，风电 0.84 MW，DG 渗透率达到 28.6%，各节点接入的光伏和风电容量如表 3 所示。

4 仿真验证

4.1 基本仿真网络的构建

建立如图 7 所示 19 节点配电网 Matlab 仿真模型。配电网从节点 1 处经 35 kV/10 kV 变压器接入 35 kV 电网，变压器 T 容量为 25 MVA，低压侧有两条 10 kV 出线，线路参数如表 1 所示。10 kV 配电网总负荷为 9.5 MVA，各节点负载如表 2 所示。

表 3 光伏和风电接入容量

Table 3 Access capacity of photovoltaic and wind power

节点号	光伏接入容量/kW	风电接入容量/kW
2	60	30
3	160	80
4	140	60
5	80	30
6	120	60
7	70	30
8	60	30
9	60	30
10	110	50
11	120	60
12	100	50
13	150	70
14	80	40
15	70	30
16	100	40
17	100	40
18	140	60
19	100	50

4.2 故障定位与隔离仿真

如图 7 所示，故障点位于 14 与 15 节点之间，故障类型为三相对称故障。设 $t=0.2$ s 时发生故障，故障持续时间为 0.5 s。依据 3.2 节，以区域内电流总量的变化量为判据，ZU21 区段内电流总和变化情况如图 8 所示。由于故障点位于配电网内，配电网内电流总和发生突变。可根据式(3)判断故障位于

ZU21 区段内。

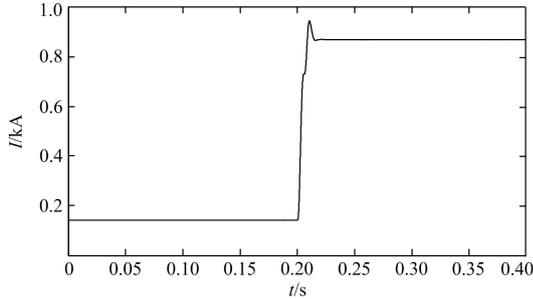


图 8 配电网内电流总和变化

Fig. 8 Variation of summation of current in distribution network

14 节点与 15 节点的电流相角差如图 9 所示。故障发生后，故障点两端 TU 检测到的电流相角值差约 180°。

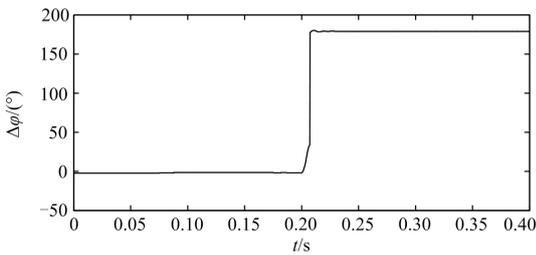


图 9 14 与 15 节点电流相角差变化曲线

Fig. 9 Node current phase angle change curve between node 14 and 15

故障发生时 14 节点和 15 节点电流相角如表 4 所示。14 节点和 15 节点故障后与故障前电流相角差值均小于 0°，满足式(4)所示判据，可判断两节点位于故障区内。

表 4 故障发生时故障区内电流相角

Table 4 Current phase for an internal fault when fault occurs

节点号	故障前相角/(°)	故障后相角/(°)	相角差值/(°)
14	-42.5	-124.4	-81.9
15	-43.1	159.2	-157.7

综上所述，本文提出的配电网分层分区协同故障定位隔离技术能够正确识别馈线故障，实现了故障准确定位和隔离，对高密度 DG 接入具有较高的适应性。

5 结论

分布式发电的推广对现行配电网馈线自动化提出了新的要求和挑战。本文建立了含 DG 的分层分区协同智能馈线自动化系统的整体框架，提出了区域性故障判别方法，引入区域电流总量与相角突变方向作为故障区域定位的基本判据，能够在故障

发生时，准确地对故障进行定位与隔离。仿真结果验证了含 DG 配电网分层分区协同故障定位隔离方案的有效性和对高密度 DG 接入的适应性。

参考文献

[1] 李斌, 薄志谦. 智能配电网保护控制的设计与研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(增刊 1): 1-6.
LI Bin, BO Zhiqian. Design and research of intelligent distribution network protection control[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(S1): 1-6.

[2] 尤毅, 刘东, 于文鹏, 等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10-16.
YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Active distribution network technology and its progress[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.

[3] 王成山, 王丹, 周越. 智能配电系统架构分析及技术挑战[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 2-9.
WANG Chengshan, WANG Dan, ZHOU Yue. Framework analysis and technical challenges to smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 2-9.

[4] SHEN S, LIN D, WANG H, et al. An adaptive protection scheme for distribution systems with DGs based on optimized Thevenin equivalent parameters estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 411-419.

[5] FIROUZ Y, FARHADKHANI S, SALIM R, et al. Numerical comparison of the effects of different types of distributed generation units on overcurrent protection systems in MV distribution grids[J]. Renewable Energy, 2014, 69(9): 271-283.

[6] BRAHMA S M. Fault location in power distribution system with penetration of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 1545-1553.

[7] 康文文, 赵建国, 丛伟, 等. 含分布式电源的配电网故障检测与隔离算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 25-29.
KANG Wenwen, ZHAO Jianguo, CONG Wei, et al. Fault detection and isolation algorithm for distribution network with distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 25-29.

[8] 牛耕, 周龙, 裴玮, 等. 基于克拉克电流相角差值的低压有源配电网故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(增刊 1): 15-24.
NIU Geng, ZHOU Long, PEI Wei, et al. Fault location method for low voltage active distribution network based on phase-angle differences of the Clark currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(S1): 15-24.

[9] 刘洋, 曹云东, 侯春光. 基于经验模态分解及维格纳

- 威尔分布的电缆双端故障定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4086-4093.
- LIU Yang, CAO Yundong, HOU Chunguang. The cable two-terminal fault location algorithm based on EMD and WVD[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4086-4093.
- [10] 刘蓓, 汪飒, 陈春, 等. 和声算法在含 DG 配电网故障定位中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 280-284.
- LIU Bei, WANG Feng, CHEN Chun, et al. Harmony search algorithm for solving fault location in distribution networks with DG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 280-284.
- [11] 孙玲玲, 王宁, 贾清泉, 等. 计及分布式光伏发电低电压穿越能力的主动配电网保护方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 79-86.
- SUN Lingling, WANG Ning, JIA Qingquan, et al. Protection method of active distribution network considering low voltage ride-through of distributed PV generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 79-86.
- [12] 庞清乐, 刘昱超, 李希年, 等. 基于电流极性比较的主动配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 101-108.
- PANG Qingle, LIU Yuchao, LI Xinian, et al. Current polarity comparison based fault location for active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 101-108.
- [13] 司新跃, 陈青, 高湛军, 等. 基于电流相角突变方向有源配电网保护[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 97-103.
- SI Xinyue, CHEN Qing, GAO Zhanjun, et al. Protection scheme for active distribution system based on directions of current phase angle variation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 97-103.
- [14] 虞坚阳, 王科龙, 秦勇明, 等. 主动配电网智能分布式馈线自动化故障定位方法[J]. 南方电网技术, 2016, 10(12): 38-44.
- YU Jianyang, WANG Kelong, QIN Yongming, et al. Fault location method for intelligent distributed feeder automation of active distribution network[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(12): 38-44.
- [15] 邓丰, 李欣然, 曾祥君, 等. 基于多端故障行波时差的含分布式电源配电网故障定位新方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4399-4409, 4640.
- DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. A novel multi-terminal fault location method based on traveling wave time difference for radial distribution systems with distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4399-4409, 4640.
- [16] 闫红艳, 高艳丰, 王继选, 等. 同杆双回线路行波故障测距的关键问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 120-128.
- YAN Hongyan, GAO Yanfeng, WANG Jixuan, et al. Research on key problems of traveling wave location of double-circuit lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 120-128.
- [17] 郭壮志, 徐其兴, 洪俊杰, 等. 配电网快速高容错性故障定位的线性整数规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 786-795.
- GUO Zhuangzhi, XU Qixing, HONG Junjie, et al. Integer linear programming based fault section diagnosis method with high fault-tolerance and fast performance for distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 786-795.
- [18] 何瑞江, 胡志坚, 李燕, 等. 含分布式电源配电网故障区段定位的线性整数规划方法[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3684-3692.
- HE Ruijiang, HU Zhijian, LI Yan, et al. Fault section location method for DG-DNs based on integer linear programming[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3684-3692.
- [19] 朱国防, 沈培锋, 王勇, 等. 基于拓扑片的智能分布式馈线拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 152-157.
- ZHU Guofang, SHEN Peifeng, WANG Yong, et al. Dynamic identification method of feeder topology for distributed feeder automation based on topological slices[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 152-157.
- [20] 项添春, 戚艳, 董逸超, 等. 提高配电网供电可靠性和状态可观性的终端优化配置方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(6): 107-112.
- XIANG Tianchun, QI Yan, DONG Yichao, et al. Optimal configuration method for terminals considering the reliability and observability of distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(6): 107-112.
- [21] 傅旭华, 黄晓明, 王松, 等. 数字化变电站 GOOSE 技术工程化应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11): 112-116.
- FU Xuhua, HUANG Xiaoming, WANG Song, et al. Engineering application of GOOSE technology in digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 112-116.

收稿日期: 2019-01-02; 修回日期: 2019-02-18

作者简介:

张孟琛(1992—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为配网馈线自动化。E-mail: qhdzhangmc@126.com

(编辑 张爱琴)